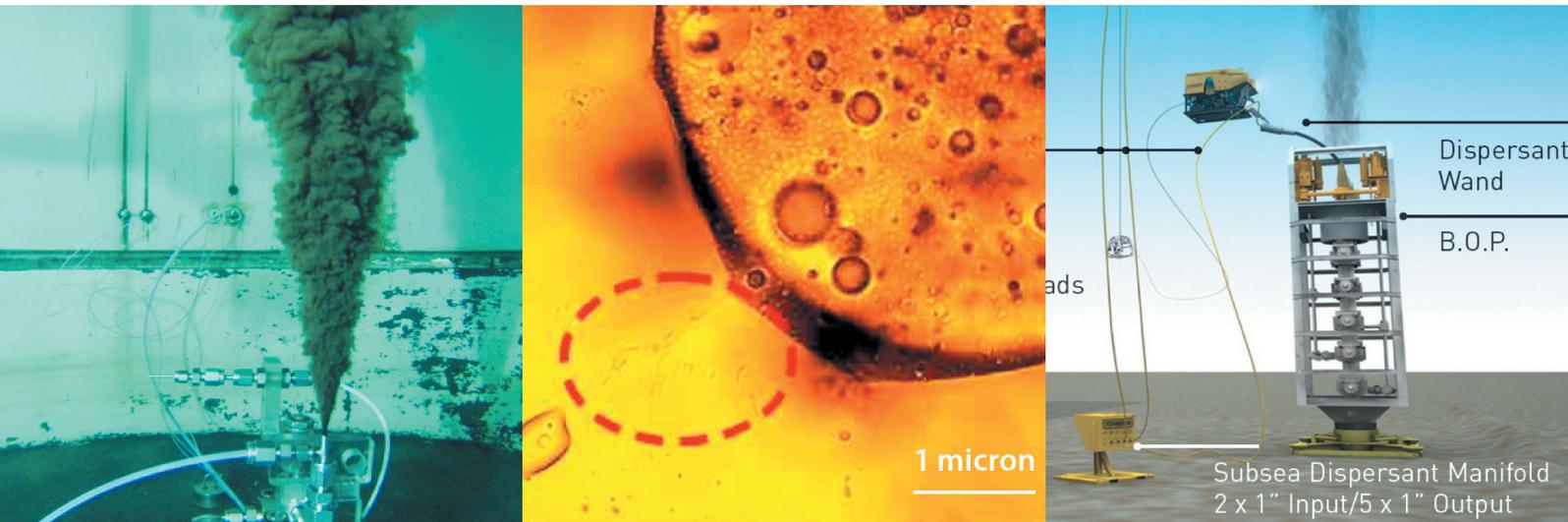


Dispersants : injection sous-marine

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, Londres EC2V 5DE, Royaume-Uni
Téléphone : +44 (0)20 7633 2388 Télécopieur : +44 (0)20 7633 2389
E-mail : 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, Londres EC2V 5DE, Royaume-Uni
Téléphone : +44 (0)20 3763 9700 Télécopieur : +44 (0)20 3763 9701
E-mail : reception@iogp.org Internet : www.iogp.org

Bureau de Bruxelles

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

Bureau de Houston

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

Rapport 533 de l'IOGP

Date de publication : 2015

© IPIECA-IOGP 2015 Tous droits réservés.

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

Exonération de responsabilité

Bien que tous les efforts possibles aient été fournis pour assurer l'exactitude des informations contenues dans cette publication, ni l'IPIECA, ni l'IOGP, ni aucun de leurs membres passés, présents ou futurs ne garantissent leur exactitude ou n'assument la responsabilité d'une quelconque utilisation prévisible ou imprévisible de cette publication, même en cas de négligence de leur part. Par conséquent, ladite utilisation se fait aux risques et périls du destinataire, avec la convention que toute utilisation par le destinataire constitue un accord avec les conditions de cet avertissement. Les informations contenues dans cette publication ne prétendent pas constituer des conseils professionnels de différents contributeurs de contenu, et ni 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.

Dispersants : injection sous-marine

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

Préface

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

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

Les révisions ont été réalisées par le Projet de coopération industrielle de l'IOGP-IPIECA dans le cadre de la lutte contre la pollution par les déversements d'hydrocarbures (JIP). Le JIP a été créé en 2011 pour valoriser les enseignements en matière de la préparation et la lutte contre les déversements d'hydrocarbures de la marée noire d'avril 2010 dans le golfe du Mexique.

Remarque sur les bonnes pratiques

Dans ce contexte, une « bonne pratique » constitue un énoncé de lignes directrices, de pratiques et de procédures, internationalement reconnues, qui permettra au secteur de l'industrie pétrolière d'atteindre des performances acceptables en termes de santé, de sécurité et d'environnement.

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

Table des matières

Préface	2	Analyse des avantages environnementaux et économiques en fonction des options de lutttes envisagées	29
Table des matières	4	Étape 1 : Évaluer les données	30
La fonction des dispersants lors des opérations de lutte contre les déversements d'hydrocarbures	6	Étape 2 : Prédire les résultats	30
Le comportement des hydrocarbures déversés en milieu sous-marin	7	Étape 3 : Équilibrer les compromis	31
Autres déversements en milieu sous-marin	10	Étape 4 : Sélectionner les meilleures options	34
Répercussions potentielles des déversements d'hydrocarbures en milieu sous-marin	11	Législation régissant l'usage des dispersants	35
Répercussions potentielles dans la colonne d'eau	11	Législation régissant l'agrément des produits dispersants utilisables en milieu sous-marin	35
Répercussions potentielles à la surface de la mer	12	Législation régissant l'usage des dispersants en milieu sous-marin	35
Lutte contre les déversements d'hydrocarbures en milieu sous-marin	14	Expérience : l'accident de Macondo	36
Lutte en milieu sous-marin	14	Déversement d'hydrocarbures et de gaz en milieu sous-marin dans le puits de Macondo	36
Les dispersants et leur fonctionnement	16	Usage de dispersants dans le puits de Macondo	38
Composition des dispersants modernes	16	Suivi obligatoire de la colonne d'eau	43
La logique d'action du dispersant en milieu sous-marin	17	Évaluation du préjudice causé aux ressources naturelles	48
Les avantages et risques potentiels inhérents à l'usage de dispersants en milieu sous-marin	19	Aspects opérationnels : vue d'ensemble	49
Possibilités et limites	21	Équipements requis	49
Possibilités de l'usage de dispersants en milieu sous-marin	21	Réserves de dispersant	50
Limites liées à l'usage de dispersants en milieu sous-marin	22	Déploiement des équipements SSDI	50
Toxicité et biodégradabilité des hydrocarbures	23	Débit d'injection du dispersant en milieu sous-marin	51
Composés chimiques des hydrocarbures bruts	23	Objectifs des actions de suivi et d'échantillonnage en milieu sous-marin	52
Les composés chimiques potentiellement toxiques des hydrocarbures	23	Conclusion	55
Analyse de la toxicité des dispersants et des hydrocarbures déversés	23	Annexe : Quatre scénarios de planification de l'analyse des bénéfices	57
Exposition aux hydrocarbures, aux hydrocarbures dispersés et aux composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau	26	Bibliographie	65
Effet de l'usage de dispersants en milieu sous-marin	26	Remerciements	70
Exposition des organismes marins par ingestion des gouttelettes d'hydrocarbures dispersés	27		
Biodégradation des hydrocarbures	27		

Résumé

Qu'ils soient injectés sur des hydrocarbures flottants ou en milieu sous-marin, les dispersants visent le même objectif : minimiser le préjudice écologique et socio-économique global en empêchant les hydrocarbures déversés de dériver vers les habitats côtiers et d'atteindre le littoral. L'usage de dispersants sur les hydrocarbures flottants fragmente la nappe de surface en de nombreuses petites gouttelettes d'hydrocarbure qui sont dispersées, rapidement diluées, puis biodégradées dans les couches supérieures de la colonne d'eau. L'usage de dispersants en milieu sous-marin est destiné à empêcher les hydrocarbures déversés d'atteindre la surface de la mer en dispersant ces hydrocarbures dans l'eau près du point de déversement. Cette action présente un avantage considérable pour la santé et la sécurité du personnel d'intervention, qui est ainsi substantiellement moins exposé aux composés organiques volatils (COV) présents sur le site de déversement. L'ajout de dispersants aux hydrocarbures et gaz déversés en milieu sous-marin permet de fragmenter une plus grande partie de ces hydrocarbures en petites gouttelettes qui seront dispersées, diluées et biodégradées dans la colonne d'eau, empêchant ainsi les hydrocarbures de remonter et de former des gouttelettes de plus grande taille flottant à la surface de la mer. Les tensioactifs présents dans le dispersant réduisent grandement la tension superficielle qui existe entre l'hydrocarbure et l'eau, permettant donc à la turbulence liée au déversement d'hydrocarbures et de gaz en milieu sous-marin de convertir une plus grande partie des hydrocarbures déversés en petites gouttelettes.

L'expérience acquise lors de l'intervention contre le déversement du puits de Macondo, dans le cadre de l'accident de Deepwater Horizon dans le golfe du Mexique en 2010, a révélé que l'injection sous-marine de dispersant (SSDI) peut constituer une méthode de lutte efficace dans le cadre des éruptions d'hydrocarbures et de gaz en milieu sous-marin. Si la méthode d'injection sous-marine de dispersant n'avait pas été employée, un plus grand volume d'hydrocarbures aurait atteint la côte. Les défis liés à la mise en œuvre d'une intervention pour lutter contre un déversement d'hydrocarbures à 1 550 m sous la surface de la mer avec une méthode jamais utilisée auparavant étaient colossaux. Un degré considérable d'ingéniosité et de savoir-faire a dû être appliqué pour faire de l'injection sous-marine de dispersant une méthode d'intervention viable dans le cadre de la plus grande intervention jamais réalisée contre un déversement d'hydrocarbures.

La méthode SSDI, en tant qu'intervention en milieu sous-marin, présente de nombreux avantages par rapport à la stratégie consistant à intervenir une fois que les hydrocarbures déversés sont remontés à la surface.

Par exemple, cette méthode :

- traite les hydrocarbures déversés au point de déversement ;
- nécessite une quantité moindre de dispersant que les traitements de surface ;
- réduit l'exposition du personnel de lutte aux risques de santé et de sécurité posés par les COV et les hydrocarbures ; et
- peut être mise en œuvre en continu, de jour comme de nuit, et par pratiquement toutes sortes de conditions météorologiques, contrairement aux autres méthodes employées en surface.

Tout comme pour toute autre méthode d'intervention, les possibilités, les limites, les avantages et les risques liés à la dispersion des hydrocarbures déversés dans la colonne d'eau doivent être pris en compte dans le cadre d'une analyse des avantages environnementaux net et économiques en fonction des options de lutttes envisagées (NEBA). L'ajout de dispersant transforme une plus grande proportion de l'hydrocarbure déversé en gouttelettes plus petites, qui se disperseront dans la colonne d'eau. La méthode SSDI présente les avantages suivants :

- La dispersion des hydrocarbures déversés dans la colonne d'eau empêche les hydrocarbures de remonter à la surface de la mer (ou réduit la quantité d'hydrocarbures qui rejoignent la surface), où ils pourraient partir à la dérive et atteindre le littoral, causant par là un préjudice grave aux habitats, à la faune et aux ressources socio-économiques côtiers vulnérables aux hydrocarbures.
- La dispersion des hydrocarbures dans l'eau sous la forme de petites gouttelettes favorise l'action de colonisation rapide des micro-organismes dégradant les hydrocarbures présents naturellement dans les milieux océaniques. Ces micro-organismes biodégradent substantiellement la plupart des hydrocarbures en l'espace de quelques jours ou quelques semaines. Le dispersant est lui aussi biodégradé.

La méthode SSDI présente toutefois quelques risques potentiels. L'augmentation de la quantité et de la concentration des hydrocarbures dispersés dans l'eau peut temporairement accroître le risque couru par les organismes marins en raison de leur exposition à ces hydrocarbures. Cependant, les éruptions d'hydrocarbures et de gaz à grande vitesse et à haut débit produisent des niveaux importants d'hydrocarbure dans la colonne d'eau, même si aucun dispersant sous-marin n'est utilisé. Toutes les parties concernées doivent comprendre les compromis liés à l'usage de la méthode SSDI, qui devraient idéalement être pris en charge lors de la planification d'urgence de lutte contre les déversements d'hydrocarbures.

La logistique de mise en œuvre de la méthode SSDI nécessite un grand nombre d'équipements spécialisés, d'intervenants bien formés et d'autres éléments de soutien. Plusieurs véhicules télécommandés sous-marins (ROV) sont nécessaires en parallèle avec des navires de ravitaillement dédiés au large et une chaîne logistique permettant d'assurer l'approvisionnement en dispersants.

L'usage de dispersants en milieu sous-marin exige un suivi sous-marin pour déterminer si leur action est efficace et la direction dans laquelle les panaches d'hydrocarbures sous-marins seront portés par les courants. Pour évaluer l'éventuelle toxicité des hydrocarbures dispersés sur les organismes marins, il peut s'avérer nécessaire de réaliser des études de suivi et d'échantillonnage d'eau supplémentaires accompagnées d'analyses chimiques pour s'assurer que les concentrations d'hydrocarbures et l'envergure du déversement ne dépassent pas les hypothèses de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de lutttes envisagées (NEBA) pour l'évènement en cours. Ces analyses ont été effectuées lors de l'accident de Macondo. Bien que les études soient toujours en cours, les données disponibles indiquent que les craintes quant au risque de toxicité importante pour les organismes marins, quant à l'appauvrissement en oxygène de l'eau dû à la biodégradation et quant à la persistance du dispersant dans la colonne d'eau étaient sans fondement, et que l'usage de dispersant en milieu sous-marin s'est avéré être une méthode très efficace de lutte contre le déversement.

La fonction des dispersants lors des opérations de lutte contre les déversements d'hydrocarbures

L'épandage de dispersants en surface constitue l'une des diverses méthodes d'intervention qu'il est possible d'utiliser en mer. L'apport de dispersant peut constituer un moyen utile de minimiser les risques de sécurité sur le site de déversement et de réduire le préjudice global causé par le sinistre en éliminant l'hydrocarbure de la surface de la mer par son transfert dans la colonne d'eau, l'empêchant ainsi d'atteindre les habitats côtiers vulnérables et le littoral. La dispersion des hydrocarbures appuie les processus naturels de biodégradation qui entraînent leur décomposition. Les dispersants ne font pas sombrer les hydrocarbures vers le fond marin.

À l'instar de toutes les autres méthodes disponibles d'intervention contre les hydrocarbures, l'utilisation des dispersants a ses limites ; cependant, son potentiel en fait une technique d'intervention particulièrement utile pour lutter contre les déversements importants d'hydrocarbures en mer. Le présent Guide des bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP se penche sur l'utilisation de dispersants dans le cadre de déversements d'hydrocarbures en milieu sous-marin. Un autre Guide de bonnes pratiques intitulé *Dispersants : surface application* (IPIECA-IOGP, 2015) décrit l'utilisation de dispersants dans le cadre de déversements d'hydrocarbures flottants.

Lors du déversement d'hydrocarbures et de gaz ayant eu lieu suite à l'accident de Macondo en 2010, la méthode d'injection sous-marine de dispersant (SSDI) a été utilisée pour la première fois afin de traiter les hydrocarbures avec un dispersant directement à la source d'une éruption à grande échelle. Cette méthode, novatrice à l'époque, d'injecter un dispersant est décrite dans le présent Guide de bonnes pratiques.

La raison d'utiliser la méthode SSDI pour un déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin est la même que pour tout autre cas : empêcher les hydrocarbures de partir à la dérive ou en minimiser la quantité afin qu'ils n'atteignent pas les eaux côtières peu profondes ou le littoral, où ils sont susceptibles de causer un préjudice grave aux habitats et aux espèces qui s'y trouvent et de perturber les activités socio-économiques de la région. Toute utilisation réussie d'un dispersant donne lieu au transfert d'une plus grande quantité d'hydrocarbures dans la colonne d'eau que par d'autres méthodes pour les raisons suivantes :

- l'épandage de dispersant sur les hydrocarbures flottants a pour effet de les transférer de la surface de la mer à la couche supérieure de la colonne d'eau, où ils sont plus rapidement dilués et biodégradés ; et
- la méthode SSDI augmente la proportion d'hydrocarbures dispersés, dilués et biodégradés dans la colonne d'eau par rapport à la quantité d'hydrocarbures remontant à la surface de la mer et susceptibles d'atteindre le littoral.

L'usage de dispersant en milieu sous-marin constitue une méthode de lutte contre un déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin. Il est donc tout d'abord utile d'examiner le comportement des hydrocarbures déversés dans ce milieu.

Le comportement des hydrocarbures déversés en milieu sous-marin

Le déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin peut se produire de diverses façons :

- éruptions sous-marines, telles que l'accident de Macondo en 2010 et l'accident d'Ixtoc 1 en 1979 (Farrington, 1980) ;
- fissure du fond marin, comme le suintement du gisement de Frade dans le bassin de Campos au Brésil en 2012 (Chevron, 2012) et d'autres suintements naturels répandus dans les océans du monde entier ;
- fuites ou ruptures des conduites sous-marines (tuyaux reliant les puits sous-marins aux installations offshore) ;
- fuites ou ruptures d'oléoducs sous-marins ; et
- déversements du carburant ou des hydrocarbures transportés par des navires sombrés.

Le comportement des hydrocarbures déversés est déterminé par les facteurs suivants :

- caractéristiques du déversement, c'est-à-dire les pression et débits des hydrocarbures et du gaz, le ratio gaz/hydrocarbures (GOR), et la taille et la forme géométrique du déversement ;
- environnement aquatique dans lequel les hydrocarbures sont déversés, c'est-à-dire la profondeur (et donc la pression hydrostatique), la température, les courants et les conditions océanographiques sur le site de déversement ; et
- propriétés des hydrocarbures déversés, sachant que, dans le cadre d'une éruption sous-marine, les hydrocarbures sortent à une température élevée, mais se refroidissent rapidement une fois qu'ils entrent en contact avec l'eau froide des profondeurs marines, et que la densité, la viscosité et le point d'écoulement des hydrocarbures, ainsi que l'évolution de ces propriétés dans le temps, exercent une influence sur le comportement des hydrocarbures déversés.

La principale caractéristique d'hydrocarbures déversés en milieu sous-marin qui affecte leur comportement est la taille, ou la distribution de la taille, des gouttelettes produites :

- un déversement d'hydrocarbures à haute pression et grande vitesse, notamment en présence d'une phase gazeuse, produit de petites gouttelettes et de petites bulles de gaz dans l'eau, le comportement des hydrocarbures et du gaz dépendant alors de la profondeur de l'eau ;
- un déversement lent et à faible pression et petite vitesse sans présence de gaz permet aux hydrocarbures d'entrer dans l'eau sous la forme de globules de grande taille.

La vitesse à laquelle une gouttelette d'hydrocarbure remonte dans une eau de mer statique (salinité de 32 parties pour mille, soit 1,024 g/ml) dépend de la densité de l'hydrocarbure et de la taille de la gouttelette.

Ci-dessous : suintement naturel à basse pression au large des côtes de la Californie



USGS

Tableau 1 Diamètre d'une gouttelette d'hydrocarbure et temps d'ascension dans une eau de mer statique

Diamètre de la gouttelette (densité de l'hydrocarbure = 0,85)	Temps requis pour 1 mètre d'ascension	Temps requis pour 1 500 mètres d'ascension
4 mm (4 000 µm)	3 à 5 s	1 à 2 heures
3 mm (3 000 µm)	5 à 10 s	2 à 4 heures
2 mm (2 000 µm)	Environ 15 s	Environ 6 heures
1 mm (1 000 µm)	Environ 20 s	Environ 8 heures
0,4 mm (400 µm)	85 s	35 heures
0,2 mm (200 µm)	5 min	5 jours
0,1 mm (100 µm)	19 min	Biodégradée avant d'atteindre cette distance
0,05 mm (50 µm)	1,3 heures	Biodégradée avant d'atteindre cette distance
0,02 mm (20 µm)	8 heures	Biodégradée avant d'atteindre cette distance
0,01 mm (10 µm)	31 heures	Biodégradée avant d'atteindre cette distance

Remarque : Gouttelettes d'hydrocarbures faisant plus de 0,4 mm de diamètre perdent leur forme sphérique lors d'une ascension rapide dans l'eau et les estimations de temps deviennent alors moins précises.

La plupart des hydrocarbures bruts sont moins denses que l'eau de mer et ont donc tendance à flotter. Cependant, les grandes gouttelettes d'hydrocarbure remontent beaucoup plus rapidement à la surface de la mer que les petites gouttelettes (voir le tableau 1 à la page 7). Les petites gouttelettes issues d'un déversement d'hydrocarbures en profondeur sont biodégradées avant d'atteindre la surface, comme l'indique le tableau. La biodégradation a également pour effet de ralentir la vitesse d'ascension de toutes les gouttelettes du fait que leur taille diminue dans le cadre de ce processus, ce facteur n'étant pas pris en compte pour calculer les temps estimés.

Éruption sous-marine

Bien que des études théoriques aient examiné le comportement d'hydrocarbures déversés dans le cadre d'éruptions sous-marines en profondeur, une seule expérience à grande échelle a été menée sur le terrain pour confirmer ou modifier les hypothèses correspondantes. Il s'agit du projet DeepSpill, qui a été mis en œuvre dans la mer de Norvège en 2000 à 844 m de profondeur, à environ 125 km au large des côtes de la Norvège centrale (Johansen *et al.*, 2001 et Johansen *et al.*, 2003). Quatre déversements contrôlés d'hydrocarbures et de gaz ont été générés, soit un total de 120 m³ (755 bbl) d'hydrocarbures et 10 000 m³ de gaz naturel. Cette expérience a uniquement étudié des hydrocarbures non traités, sans faire appel à un dispersant. Une observation approfondie des vents, des courants, de la densité de l'eau, de la concentration d'hydrocarbures en surface et en profondeur a eu lieu en parallèle avec le prélèvement d'échantillons chimiques et biologiques dans la colonne d'eau. Les hydrocarbures ont commencé à atteindre la surface au bout d'environ une heure après le début du déversement, à quelques centaines de mètres du site de déversement. Les hydrocarbures ont continué à remonter à la surface pendant plusieurs heures après la cessation du déversement. Aucun hydrate de gaz ne s'est formé. Aucune bulle de gaz n'a atteint la surface de la mer, ce qui indique que le gaz s'était dissous dans l'eau. Les sonars à bord des navires de l'étude ont pu assurer le suivi du panache d'hydrocarbures et de gaz pendant son ascension dans la colonne d'eau.

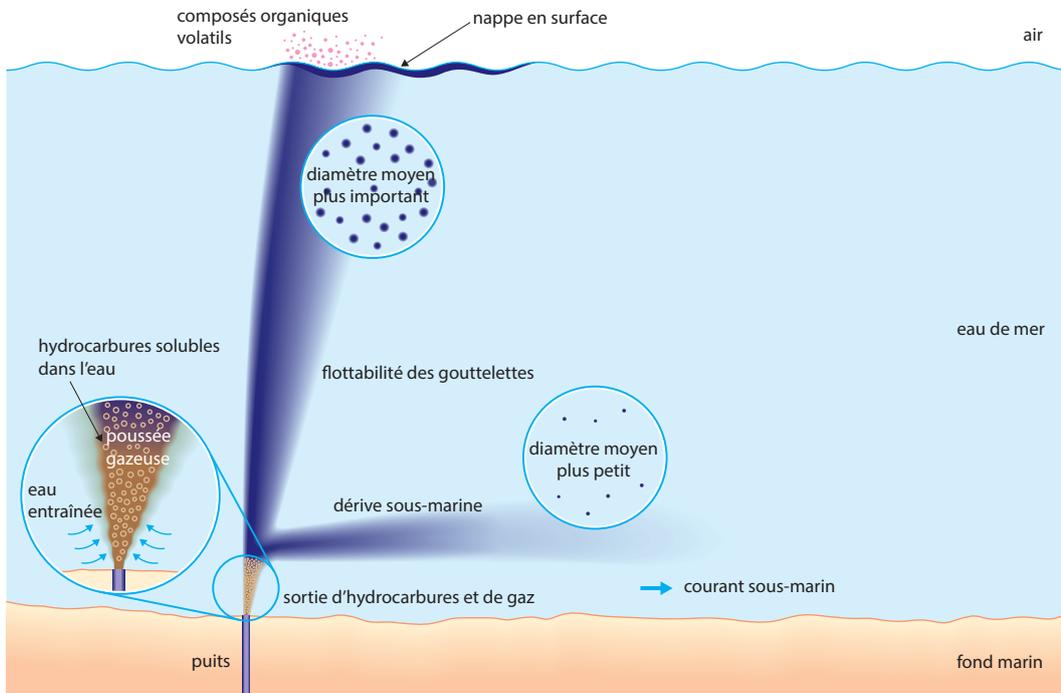
Les conclusions du projet DeepSpill, deux autres études de suivi en laboratoire et trois comparaisons de modèle ont été synthétisées dans un rapport de 2005 intitulé *Review of Deep Oil Spill Modeling Activity Supported by the DeepSpill JIP and Offshore Operators Committee* (Adams and Socolofsky, 2005). Ce rapport indique que :

- Les jets d'hydrocarbures et de méthane déversés à grande vitesse en eaux profondes sont fragmentés en petites gouttelettes d'hydrocarbure et en bulles de gaz sous l'action de la turbulence intense des conditions du déversement. Ce processus est souvent qualifié de « mécanique » pour le distinguer des hydrocarbures dispersés sous l'action d'un dispersant.
- Au départ, le panache de petites gouttelettes d'hydrocarbure, de bulles de gaz et d'eau entraînée monte rapidement sous la forme d'un panache ascendant, le gaz constituant la principale source de poussée et de flottabilité. Près du point de déversement, ce panache se comporte comme un panache monophasé.
- Alors que le panache de gouttelettes d'hydrocarbure et de bulles de gaz effectue son ascension depuis les profondeurs (plus de 500 m), le méthane se dissout dans la mer (en raison de sa solubilité à haute pression), ce qui réduit la flottabilité du panache et ralentit donc sa remontée dans l'eau.
- La stratification de la colonne d'eau et les courants séparent alors les gouttelettes d'hydrocarbure et les bulles de gaz (si elles n'ont pas encore été dissoutes) du panache d'eau entraînée.
- Les grandes gouttelettes d'hydrocarbure continuent alors à remonter lentement vers la surface de la mer en raison de leur propre flottabilité, qui est fonction de leur taille, tandis que les petites gouttelettes sont transportées horizontalement et restent en suspension dans la colonne d'eau jusqu'à ce qu'elles soient diluées et biodégradées.

Ces processus sont illustrés sous forme schématique par l'image 1 à la page 9.

Tous les hydrocarbures déversés lors d'une éruption sous-marine à grande profondeur n'atteignent pas la surface de la mer. La turbulence causée par le jet d'hydrocarbures et de gaz à grande vitesse et haut débit convertit une partie des hydrocarbures en gouttelettes dont la taille est suffisamment réduite pour assurer leur

Image 1 Représentation schématique d'un déversement en milieu sous-marin (échelle non respectée)

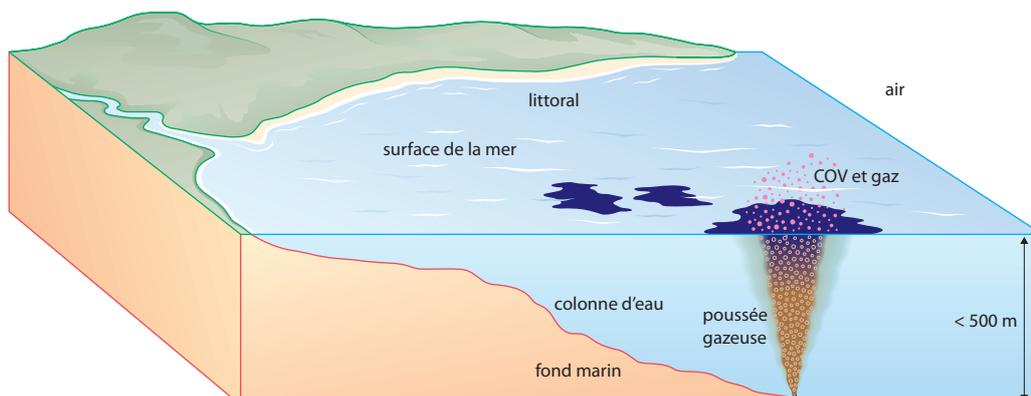


L'image 1 illustre les processus en œuvre dans le projet DeepSpill et dans l'explosion de Macondo de 2010 (échelle non respectée). Les couleurs affichées sur le schéma pour le panache de grandes gouttelettes d'hydrocarbure remontant à la surface de la mer et le panache de petites gouttelettes d'hydrocarbure qui sont dispersées et se répartissent en strates horizontales, mais qui restent dans la colonne d'eau, servent uniquement à faciliter la compréhension du processus. Le panache d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau n'est pas visible et il est nécessaire d'utiliser des instruments sensibles pour le détecter, les hydrocarbures dispersés étant dilués dans la colonne d'eau.

dispersion dans la colonne d'eau par les courants dominants présents dans cette colonne d'eau stratifiée. La proportion d'hydrocarbures qui est dispersée par la turbulence du déversement dépend des conditions précises du déversement.

Quand l'éruption sous-marine donnant lieu au déversement d'hydrocarbures et de gaz se produit à moins de 500 m de profondeur (voir l'image 2), en général, le gaz ne se dissout pas totalement dans l'eau. Quand une éruption a lieu dans des eaux peu profondes, le panache de bulles de gaz est susceptible d'atteindre rapidement la surface de la mer, où le gaz est libéré dans l'air (avec un danger potentiel d'incendie ou

Image 2 Représentation schématique d'une éruption d'hydrocarbures et de gaz en eaux peu profondes avec la majorité du gaz déversé qui atteint la surface (échelle non respectée)



Éruption d'Ixtoc I au Mexique en 1979, à moins de 100 m de profondeur



NOAA

d'explosion), tandis que, dans un premier temps, les hydrocarbures s'étendent sur la surface de la mer dans une direction radiale. Les hydrocarbures en surface subissent alors les processus d'altération habituels, dont les mouvements dus à l'action du vent et des courants de surface, l'évaporation, la fragmentation et, éventuellement, l'émulsification.

Autres déversements en milieu sous-marin

Les conditions entourant chaque déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin doivent être analysées pour en déterminer l'issue probable. Plusieurs modèles informatiques ont été élaborés pour prédire le comportement probable des hydrocarbures.

- Une fuite en trou d'épingle dans une conduite sous-marine transportant des hydrocarbures et du gaz donne lieu à un jet fin de petites gouttelettes d'hydrocarbure qui pénètrent dans l'eau, mais le volume du déversement d'hydrocarbures reste faible. Quand une telle conduite est percée, le déversement initial d'hydrocarbures et de gaz est rapide, mais prend fin dès que la conduite est isolée et dépressurisée.
- La rupture d'un oléoduc sous-marin après l'extraction du gaz par traitement offshore entraîne un déplacement initial rapide des hydrocarbures dans l'eau, suivi par un déversement beaucoup plus lent des hydrocarbures alors que l'oléoduc percé commence à se remplir d'eau. Les hydrocarbures sont alors plus susceptibles de remonter sous la forme de globules de grande taille.
- Les déversements émanant de navires sombrés dépendent des conditions exactes de l'évènement, mais sont généralement lents et produisent des grands globules de carburant ou d'hydrocarbures transportés.

Dans les cas de figure évoqués ci-dessus, il est peu probable que la méthode SSDI soit réalisable ou efficace.

Répercussions potentielles des déversements d'hydrocarbures en milieu sous-marin

Comme indiqué dans la section précédente, les hydrocarbures déversés suite à une éruption sous-marine sont susceptibles de pénétrer dans la colonne d'eau sous la forme de gouttelettes d'hydrocarbure de tailles diverses. Si les gouttelettes de taille relativement importante montent assez rapidement dans la colonne d'eau, l'ascension des gouttelettes plus petites est beaucoup plus lente, certaines d'entre elles n'atteignant jamais la surface du fait qu'elles sont dispersées, rapidement diluées, puis biodégradées dans la colonne d'eau.

Répercussions potentielles dans la colonne d'eau

Il existe un risque que les organismes marins présents dans la colonne d'eau soient exposés aux gouttelettes d'hydrocarbure dispersées et aux autres composés dissous et provenant des gouttelettes d'hydrocarbure. La probabilité que ces organismes subissent un préjudice en raison de leur exposition dépend de plusieurs facteurs, dont la composition chimique exacte des hydrocarbures, la concentration de gouttelettes et de composés dissous auxquels les organismes sont exposés, la durée de l'exposition et la sensibilité des espèces en question. Un poisson adulte peut détecter des composés d'hydrocarbure dans l'eau et s'écarter de la zone présentant une haute concentration d'hydrocarbures à proximité du déversement, tandis que le plancton dérive selon les courants et ne peut se soustraire aux composés présents dans les hydrocarbures.



Shutterstock.com



Wellcome Images

Les poissons adultes (à gauche) peuvent détecter des composés d'hydrocarbure dans l'eau et sont ainsi en mesure d'éviter les zones contaminées, tandis que le plancton (ci-contre) dérive selon les courants et ne peut se soustraire aux hydrocarbures.

Répercussions potentielles à la surface de la mer

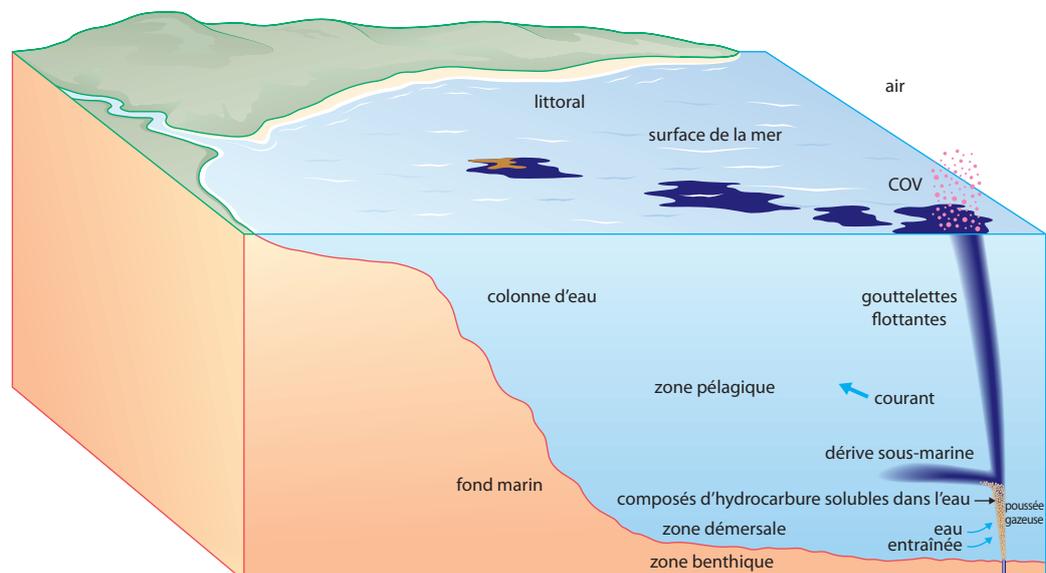
Les hydrocarbures déversés remontant en surface s'étendent et forment une nappe d'hydrocarbures à proximité du déversement. Certaines parties des composés plus volatils présents dans les hydrocarbures (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX), qui sont souvent désignés collectivement par l'appellation composés organiques volatils, ou COV) peuvent se dissoudre dans la colonne d'eau ; le degré de dissolution dépendant de la profondeur à laquelle le déversement a eu lieu et d'autres facteurs (tels que l'emploi de la méthode SSDI). Les COV atteignant la surface de la mer s'évaporent des hydrocarbures pour se répandre dans l'air. Les risques éventuels posés par cette situation pour la santé et la sécurité des intervenants doivent être pris en compte dans tout plan de lutte contre les déversements d'hydrocarbures.

Les hydrocarbures flottants dérivent sous l'action des vents et des courants dominants. Les hydrocarbures à la dérive à la surface de la mer sont susceptibles de présenter un risque pour la faune, notamment pour les oiseaux marins qui se posent sur les hydrocarbures ou qui plongent au travers, ainsi que pour les tortues et les mammifères marins qui doivent remonter à la surface pour respirer. La probabilité que ces animaux subissent un préjudice dépend de plusieurs facteurs, dont la composition chimique exacte et la concentration des hydrocarbures, la durée de l'exposition, la méthode d'exposition et la sensibilité des espèces en question. Parmi les effets éventuels figurent les irritations, l'hypothermie et les effets toxiques létaux et sublétaux.

Les ressources écologiques les plus vulnérables sont généralement celles situées dans les eaux côtières ou sur le littoral. Par ailleurs, ces aires côtières sont des zones de reproduction pour de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés, ainsi que des zones de nidification pour les oiseaux. Des hydrocarbures en dérive vers le littoral peuvent entrer en contact avec ces ressources écologiques et perturber d'importantes activités socio-économiques côtières.

Les hydrocarbures déversés sont susceptibles d'exercer des effets négatifs sur un grand nombre de ressources écologiques et socio-économiques, en fonction du compartiment environnemental exact dans lequel ils ont été déversés. Ces effets sont résumés dans l'image 3 (ci-dessous) et le tableau 2 (page 13). Des informations plus détaillées sont disponibles dans le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur l'écologie marine (IPIECA-IOGP, 2015a) et littorale (IPIECA-IOGP, 2016).

Image 3 Représentation schématique des compartiments environnementaux en rapport avec un déversement sous-marin à grande profondeur



Remarque : le panache d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau n'est pas visible et il est nécessaire d'utiliser des instruments sensibles pour le détecter, les hydrocarbures déversés étant dilués dans la colonne d'eau. L'émulsification potentielle des hydrocarbures flottants est indiquée par une couleur qui vire vers le marron/orange.

Tableau 2 Effets potentiels des hydrocarbures sur les compartiments environnementaux

Compartiment environnemental		Effets potentiels des hydrocarbures	
Zone benthique au niveau du fond marin			Les hydrocarbures déversés en milieu sous-marin remontent et flottent en surface ou forment un panache sous-marin qui est dilué et biodégradé au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la source du déversement. La majorité des hydrocarbures présents sous la forme de petites gouttelettes dans l'eau sont biodégradés au bout de quelques jours ou quelques semaines. Les composés d'hydrocarbures dont la biodégradation est plus lente sont semblables au bitume ou à l'asphalte, sont avant tout biologiquement inertes et présentent une faible toxicité. La proportion d'hydrocarbures bruts présente sous la forme de ces composés est généralement faible, la concentration de ces résidus de gouttelettes dispersées et biodégradées étant très basse, soit de quelques ppb (parties par milliard) dans l'eau. Une partie de ces composés peut éventuellement finir par se déposer sur le fond marin à des concentrations extrêmement basses sur une surface étendue, ce qui ne présente aucun risque pour la vie marine.
Colonne d'eau	Zone démersale près du fond marin		
	Zone pélagique profonde		
	Zone côtière		
Surface de la mer			Des hydrocarbures déversés et flottant à la surface de la mer présentent des risques pour les ressources écologiques comme les oiseaux marins, les mammifères marins et les œufs ou larves de poissons présents dans la partie supérieure de la colonne d'eau. Le plumage des oiseaux marins qui se posent sur l'hydrocarbure ou qui plongent au travers est contaminé par celui-ci. Les propriétés isolantes du plumage s'en trouvent réduites, ce qui peut entraîner la mort par hypothermie. Les hydrocarbures flottants peuvent persister jusqu'à ce qu'ils soient éliminés par les personnels de lutte ou par le processus d'altération naturelle.
Sédiments côtiers			Les gouttelettes d'hydrocarbure dispersées par des moyens naturels et intégrées aux sédiments situés près du littoral continuent à subir les processus d'altération naturelle, tels que la biodégradation. Cependant, les organismes qui habitent dans la vase et les sédiments risquent d'être exposés à ces hydrocarbures pendant une plus longue durée.
Littoral			Les hydrocarbures déversés à la surface de la mer peuvent dériver vers les eaux peu profondes, contaminant ainsi les habitats côtiers, dont les vasières et les marécages qui sont particulièrement vulnérables aux hydrocarbures. Les photos ou les vidéos d'oiseaux marins en détresse ou mourant recouverts d'hydrocarbures échoués sur le littoral constituent des images emblématiques et particulièrement attristantes qui illustrent les effets des déversements d'hydrocarbures par le passé. Les hydrocarbures déversés sont susceptibles d'étouffer les organismes côtiers. Les hydrocarbures présents dans les substrats côtiers continuent à subir l'action des processus d'altération et de biodégradation, mais à un rythme bien plus lent que pour les hydrocarbures dispersés, et peuvent constituer une source d'exposition à long terme pour les organismes côtiers. La probabilité que ces organismes subissent des effets toxiques dépend de plusieurs facteurs, dont la composition chimique exacte des hydrocarbures et leur concentration.
Activités socio-économiques			Les hydrocarbures présents à la surface de la mer peuvent contaminer les navires et leurs équipements. Par ailleurs, il est possible que les gouvernements interdisent la pêche dans des eaux contaminées, ce qui risque de nuire aux sociétés et aux personnes qui pêchent dans ces zones. Les hydrocarbures à la surface de la mer peuvent en outre empêcher ou perturber les activités de loisirs aquatiques. Les hydrocarbures déversés dérivant vers une plage touristique peuvent également entraîner sa fermeture, ce qui peut exercer un impact sur les revenus des personnes vivant du tourisme. Les hydrocarbures dérivant vers le littoral peuvent en outre perturber les infrastructures économiques du littoral comme les captages d'eau de mer et les ports.

Lutte contre les déversements d'hydrocarbures en milieu sous-marin

La mise en œuvre de toute méthode faisant partie des outils disponibles doit viser à réduire les dommages qui pourraient être causés par les hydrocarbures déversés en l'absence d'intervention. Il est considéré que l'arrivée d'hydrocarbures dans les eaux côtières ou sur le littoral constitue la principale menace écologique des hydrocarbures flottants. Les environnements côtiers ont généralement une plus grande abondance biologique et sont souvent plus vulnérables aux hydrocarbures que les environnements de haute mer. Il est souvent crucial d'empêcher les hydrocarbures de dériver vers le littoral pour minimiser l'impact environnemental des déversements au large.

La lutte contre les déversements d'hydrocarbures en milieu sous-marin peut être lancée :

- **à la source** : la maîtrise de la source est destinée à mettre fin au déversement ou à empêcher les hydrocarbures déversés de remonter en surface, soit par confinement sous-marin (avec transfert sur un navire de récupération de surface), soit par renforcement de la dispersion des hydrocarbures ; ou
- **à la surface de la mer** : une fois que les hydrocarbures déversés sont remontés en surface, l'intervention a pour objectif principal de les empêcher de dériver jusqu'au littoral.

L'un des avantages de la lutte sous-marine est la possibilité d'intervenir à un emplacement fixe et connu, contrairement aux actions lancées quand les hydrocarbures flottent déjà en surface, ces derniers apparaissant dans certains cas sous la forme de bandes fragmentées et éparpillées sur une grande étendue qui dérivent sous l'action des vents et des courants dominants.

Lutte en milieu sous-marin

Maîtrise de la source

L'arrêt d'un déversement sous-marin d'hydrocarbures est toujours le principal objectif visé par les interventions. En cas de fuite ou de rupture des conduites ou des oléoducs sous-marins, il est possible que les contrôles d'ingénierie établis puissent rapidement fermer l'oléoduc ou isoler la section endommagée. En revanche, il est bien plus difficile d'arrêter l'écoulement ayant lieu à la suite d'une éruption sous-marine si l'obturateur (BOP) est défaillant. Si le forage d'un puits de secours pour intercepter et détourner les hydrocarbures en profondeur sous la tête de puits installée sur le fond marin peut s'avérer efficace, cette méthode peut demander plusieurs semaines de travail. Au cours de ces dernières années, des dispositifs de fermeture de puits à déploiement rapide ont été élaborés pour isoler un puits de pétrole dans le cas improbable où toutes les barrières de sécurité, dont le BOP, seraient défaillantes. La Marine Well Containment Company (MWCC), le Subsea Well Intervention Service (SWIS) et d'autres prestataires disposent maintenant de dispositifs de fermeture de puits pouvant être rapidement déployés dans toutes les régions où des opérations d'exploration, de développement et de production d'hydrocarbures ont lieu.

Confinement et récupération en milieu sous-marin

La récupération d'une partie ou de la totalité des hydrocarbures déversés en milieu sous-marin est possible grâce au déploiement de divers dispositifs de collecte et de récupération d'hydrocarbures en milieu sous-marin. À la suite du déversement de Macondo et d'autres accidents, le Subsea Well Response Project (SWRP), MWCC et Helix Well Containment Group ont préparé des kits d'outils comportant des équipements de confinement et des recommandations pour le confinement d'un puits en milieu sous-marin. Des équipements et services internationaux de confinement et récupération en milieu sous-marin sont actuellement disponibles auprès de SWIS et d'autres prestataires. Le concept de confinement s'appuie sur les appareils de forage existants et sur les équipements d'essai de forage actuellement disponibles sur le marché pour capturer les fluides s'échappant lors d'un accident et les faire remonter à la surface pour leur traitement et leur élimination. S'il n'est pas possible de fermer le puits, la kit d'outils de confinement de puits en milieu sous-marin peut être utilisée pour envoyer les hydrocarbures du dispositif de fermeture de puits à un pétrolier de déchargement.

Injection de dispersant en milieu sous-marin

La méthode d'injection sous-marine de dispersant peut empêcher les hydrocarbures de remonter à la surface de la mer et de dériver vers le littoral, ou tout au moins en limiter la quantité. Des informations plus détaillées sont fournies dans des sections suivantes.

Lutte contre les hydrocarbures flottants

Les méthodes d'intervention disponibles en cas de déversement sous-marin d'hydrocarbures qui atteignent la surface et en cas de déversement ayant lieu en surface sont identiques et largement adoptées. Voici ces méthodes :

- **Confinement et récupération en mer** : les hydrocarbures déversés sont récupérés au moyen de barrages flottants et de dispositifs de récupération (récupérateurs), puis sont stockés dans les réservoirs d'un navire ou sur d'autres sites de stockage flottants pour être finalement déchargés, traités ou éliminés.
- **Brûlage contrôlé in-situ** : les hydrocarbures sont confinés dans des barrages flottants résistants au feu, puis sont enflammés. Le brûlage in-situ élimine les hydrocarbures flottants en les transformant en produits de combustion atmosphériques (avant tout sous la forme de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau avec de petites quantités de suie et d'autres gaz) qui sont rapidement dispersés dans l'atmosphère.
- **Usage de dispersants** : sous l'action des dispersants, les hydrocarbures flottants pénètrent dans la couche supérieure de la colonne d'eau sous forme de petites gouttelettes qui sont rapidement diluées dans l'eau, ce qui a pour effet de réduire leur concentration dans l'eau. Une quantité importante de l'hydrocarbure présent dans ces gouttelettes sera ensuite biodégradée par les organismes agents de dégradation des hydrocarbures. Dans la plupart des cas, les hydrocarbures seront biologiquement transformés en dioxyde de carbone et en eau.

Chacune de ces méthodes présente des possibilités et des limites qui la rendent plus ou moins adaptée à une intervention dans des conditions précises (voir le tableau 3).

Tableau 3 *Caractéristiques opérationnelles clés des principales méthodes d'intervention de surface en mer (veuillez remarquer que les opérations en surface ont essentiellement lieu pendant qu'il fait jour)*

Facteur	Confinement et récupération	Brûlage contrôlé sur site	Usage de dispersant
Taux de rencontre d'hydrocarbures déversés	Basse	Basse	Élevée
Vitesse d'élimination des hydrocarbures déversés	Basse	Élevée durant la combustion	Élevée
Limites inhérentes aux conditions ambiantes	Possible jusqu'à des vents de 20 nœuds et des vagues de 2,5 mètres de hauteur	Possible jusqu'à des vents de 10 nœuds et des vagues de moins de 1 mètre de hauteur	Possible jusqu'à des vents de 35 nœuds et des vagues de 5 mètres de hauteur
Type et propriétés de l'hydrocarbure	Nécessité d'adapter le récupérateur à l'évolution de la viscosité	Les hydrocarbures qui ont perdu leurs fractions les plus légères et les hydrocarbures émulsionnés sont difficiles à enflammer	Les hydrocarbures de forte viscosité seront difficiles à disperser, en sus des limites inhérentes au point d'écoulement

Les dispersants et leur fonctionnement

Composition des dispersants modernes

Les dispersants sont des mélanges de tensioactifs contenus dans les solvants.

Tensioactifs

Les tensioactifs sont des substances de surface actives utilisées dans de nombreuses applications domestiques et industrielles. Les molécules des tensioactifs se composent de deux ensembles liés : un ensemble hydrophile (« affinité à l'eau ») lié à un ensemble oléophile (« affinité à l'hydrocarbure »). Les tensioactifs peuvent être classés en plusieurs catégories comme les produits anioniques (avec un ensemble hydrophile chargé négativement), non ioniques (avec un ensemble hydrophile non chargé), cationique (avec un ensemble hydrophile chargé positivement) ou amphothérique (combinant des substances cationiques et anioniques dans la même molécule). Il existe des milliers de tensioactifs proposés à la vente. Ils prennent la forme de substances actives entrant dans la composition de nombreux produits domestiques comme les savons, les shampoings, les additifs alimentaires, les produits cosmétiques, les nettoyants et les détergents. Aucun tensioactif n'est fabriqué spécialement pour être utilisé dans les dispersants destinés à la lutte contre les déversements d'hydrocarbures.

Dans la plupart de leurs applications, les tensioactifs servent à réduire la tension interfaciale (TIF) entre deux fluides. Les tensioactifs composant les nettoyants courants réduisent la tension de surface dans l'eau (également appelés tension superficielle air/eau) ; ainsi, l'eau peut mouiller les fibres et les surfaces à nettoyer de manière plus efficace. Ils délogent et encapsulent les saletés, les empêchant de se déposer de nouveau sur les surfaces.

Les tensioactifs utilisés dans les dispersants réduisent la TIF hydrocarbure/eau en s'orientant sur l'interface hydrocarbure/eau. La substance oléophile composant la molécule de tensioactif se situe dans l'hydrocarbure alors que la substance hydrophile se situe dans l'eau. Le tensioactif forme un « pont » entre l'hydrocarbure et l'eau. L'interface entre l'hydrocarbure et l'eau est alors occupée par les tensioactifs, ce qui réduit d'environ 30 fois la tension interfaciale hydrocarbure/eau en présence d'un dispersant moderne et bien formulé. Cette réduction de la TIF hydrocarbure/eau permet aux vagues ou à d'autres sources d'énergie de fragmenter l'hydrocarbure en minuscules gouttelettes et de les disperser dans l'eau. De plus, le tensioactif enrobe chacune des gouttelettes, ce qui empêche ces dernières de s'agglutiner pour former des gouttelettes de plus grande taille qui seraient alors plus susceptibles de remonter jusqu'à la surface.

Solvants

Parmi les solvants utilisés dans les dispersants modernes figurent les éthers de glycol, les hydrocarbures et l'eau (Fiocco *et al.*, 1995). Un solvant est nécessaire pour produire un dispersant liquide qui pourra être facilement pulvérisé. De nombreux tensioactifs prennent la forme de substances liquides ou solides à viscosité élevée, si bien qu'ils doivent être mélangés avec un solvant afin de pouvoir produire un dispersant d'une viscosité relativement faible. Le solvant donne également au dispersant une flottabilité positive et aide le tensioactif à pénétrer dans l'hydrocarbure déversé.

Les formulations ou mélanges précis de la plupart des dispersants constituent des informations confidentielles. Cependant, les informations relatives à la formulation peuvent être communiquées, de manière confidentielle, aux autorités de réglementation nationales dans le cadre du processus d'enregistrement ou d'autorisation des dispersants. La plupart des dispersants se composent d'un mélange de deux ou trois tensioactifs non ioniques (Brochu *et al.*, 1986) et contiennent parfois un tensioactif anionique (Brandvik et Daling, 1998). Tous les tensioactifs utilisés dans les dispersants sont également utilisés dans de nombreux autres produits domestiques.

La liste des composés des dispersants courants COREXIT® a été publiée par leur fabricant et est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4 Liste des composés des dispersants courants COREXIT®, publiée par leur fabricant

Numéro d'enregistrement de Chemical Abstracts Service	Appellation	Appellation générique	Exemples d'usage courant et quotidien
1338-43-8	Sorbitane, mono-(9Z)-9-octadécénoate	Span	Crème pour la peau, shampoing pour le corps, émulsifiant sous forme de jus
9005-65-6	Sorbitane, mono-(9Z)-9-octadécénoate, dérivés de poly(oxy-1, 2-éthanediyle)	Tween	Bain-douche pour bébé, bain de bouche, lotion pour le visage, émulsifiant alimentaire
9005-70-3	Sorbitane, tri-(9Z)-9-octadécénoate, dérivés de poly(oxy-1, 2-éthanediyle)	Tween	Lotion pour le visage/le corps, lotion de bronzage
577-11-7	Acide butanédiolique, 2-sulfo-, 1,4-bis(2-éthylhexyle d'ester), sel de sodium (1:1) [contient du 2-Propanediol]	DOSS	Agent mouillant des produits cosmétiques, gélatine, boissons
29911-28-2	Propanol, 1-(2-butoxy-1-méthyléthoxy)	Éther glycolique de solvant	Produits d'entretien domestique
64742-47-8	Distillats (pétrole), légèrement hydrotraités	Solvant à base d'hydrocarbures	Désodorisant, agent nettoyant
111-76-2	Éthanol, 2-butoxy [NON inclus dans la composition du COREXIT® 9500]	Éther glycolique de solvant	Nettoyants

La plupart des tensioactifs non ioniques les plus largement utilisés se composent de substances hydrophiles à base de sorbitane (dérivé du sorbitol, un sucre) et une substance oléophile à base d'acide gras (une huile végétale) (Al-Sabagh *et al.*, 2007). Le nom commercial générique de ces tensioactifs non-ioniques est « Span ». Les autres tensioactifs non ioniques utilisés, les esters de sorbitane éthoxylé, sont regroupés sous l'appellation générique « Tween ». Les Spans et Tweens sont appliqués dans les secteurs pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires et agro-chimiques. Le tensioactif anionique utilisé dans les dispersants modernes est le dioctyl sulfosuccinate de sodium (parfois appelé DOSS). Ce tensioactif est également utilisé dans de nombreux produits domestiques, dont divers produits d'entretien. Ses propriétés de rétention d'eau peuvent être utiles et il est présent dans certains traitements visant des troubles de la santé humaine.

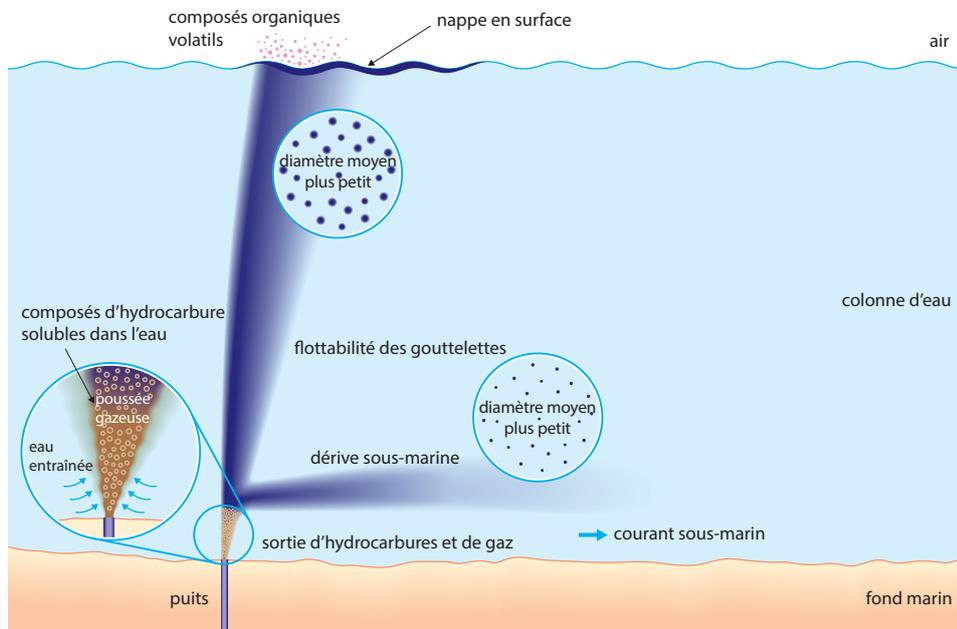
La logique d'action du dispersant en milieu sous-marin

Les dispersants ajoutés aux hydrocarbures réduisent grandement la TIF entre l'hydrocarbure et l'eau. Les tensioactifs présents dans ces dispersants établissent un « pont » reliant les différentes propriétés propres à l'hydrocarbure et à l'eau. Cela permet à l'énergie de mélange de produire une quantité beaucoup plus importante de petites gouttelettes d'hydrocarbure quand un dispersant est ajouté que quand il n'y en a pas. Quand le dispersant est employé pour des hydrocarbures flottants, l'énergie de mélange est due à l'action des vagues (IPIECA-IOGP, 2015).

Quand le dispersant est employé suite à une éruption sous-marine, l'énergie de mélange provient de la turbulence produite au point de déversement des hydrocarbures et du gaz. Si les hydrocarbures sont libérés à haute pression et avec une grande vitesse, notamment en présence d'une phase gazeuse, ils produisent un panache de gouttelettes d'hydrocarbure et de bulles de gaz dans l'eau. Même sans injection de dispersant, une certaine proportion des hydrocarbures déversés se présente sous la forme de gouttelettes trop petites pour remonter à la surface qui, dans certain cas, représentent une partie non négligeable du déversement.

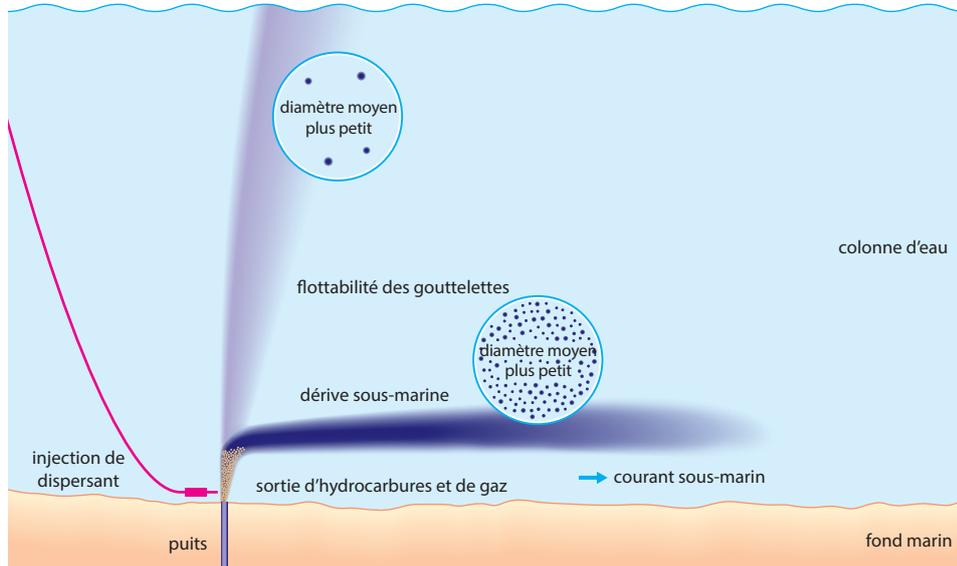
Image 4 Représentation schématique d'un déversement en milieu sous-marin avec et sans injection de dispersant (échelle non respectée)

a) Sans dispersant



Remarque : le panache d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau n'est pas visible et il est nécessaire d'utiliser des instruments sensibles pour le détecter, les hydrocarbures déversés étant dilués dans la colonne d'eau.

b) Avec dispersant



L'injection sous-marine de dispersant dans les hydrocarbures libérés entraîne une réduction importante de la TIF, tandis que la turbulence des conditions du hydrocarbures convertit une grande partie de ces derniers en gouttelettes dont la taille est suffisamment réduite pour assurer leur dispersion dans la colonne d'eau par les conditions océanographiques ambiantes.

Les avantages et risques potentiels inhérents à l'usage de dispersants en milieu sous-marin

La raison d'utiliser la méthode SSDI pour une éruption sous-marine est la même que pour tout autre usage de dispersant : empêcher les hydrocarbures de partir à la dérive ou minimiser la quantité d'hydrocarbures partant à la dérive pour qu'ils n'atteignent pas les eaux côtières peu profondes ou le littoral, où ils risqueraient de causer un préjudice aux habitats côtiers présentant une grande biodiversité et une grande abondance, et de perturber les activités socio-économiques de la région. Cette méthode présente également un avantage considérable pour la santé et la sécurité du personnel d'intervention, qui est ainsi nettement moins exposé aux COV présents sur le site de déversement.

Avantages liés à l'usage de dispersants

Les avantages de l'usage de dispersants sont notamment les suivants :

- Il permet de réduire les dommages et les perturbations susceptibles d'affecter les sites naturels vulnérables, les habitats côtiers et les éléments socio-économiques qui pourraient se produire si le dispersant n'était pas utilisé et que l'hydrocarbure demeurerait à la surface ou atteignait les eaux côtières et le littoral.
- Il augmente l'exposition de l'hydrocarbure au processus de biodégradation et dès lors accélère sa fragmentation naturelle et son assimilation dans l'environnement.
- Il peut non seulement réduire les vapeurs potentiellement nocives à proximité du déversement et constituer un atout en matière de sécurité pour les équipes intervenant dans la zone immédiate depuis un navire, mais aussi minimiser l'exposition des intervenants et des communautés locales à l'hydrocarbure dans un contexte plus large. Les COV présents dans les hydrocarbures dispersés sont dissous dans la mer au lieu de s'évaporer dans l'atmosphère.
- Le recours à la méthode SSDI, qui peut être employée jour et nuit, réduit la quantité de dispersant nécessaire par rapport aux épandages en surface.
- Il réduit la quantité d'hydrocarbures atteignant le littoral, réduisant ainsi l'ampleur et la durée des opérations de nettoyage de la côte.
- Il évite la génération de grandes quantités de déchets souvent associées liées aux opérations de nettoyage de la côte, de tels déchets étant susceptibles de soulever de sérieux problèmes environnementaux à l'occasion de leur traitement, leur stockage et leur élimination.

En bref, un système efficace d'injection de dispersant en milieu sous-marin est susceptible de traiter la grande majorité des hydrocarbures s'échappant depuis un point de déversement unique avant qu'ils ne remontent à la surface et qu'ils ne forment une nappe flottante étendue. Les hydrocarbures dispersés en profondeur sous forme de petites gouttelettes ne remontent pas vers la partie supérieure de la colonne d'eau, où la vie marine est généralement plus abondante.

Une fois déployée, la méthode SSDI permet de traiter à la source les hydrocarbures déversés avec un taux de rencontre élevé, peut être mise en œuvre en continu jour et nuit, et n'est généralement pas soumise aux conditions météorologiques. Cependant, quand la méthode SSDI est employée depuis un navire en surface, ce dernier peut être amené à suspendre les opérations et rentrer au port si des conditions météorologiques extrêmes surgissent, par exemple en cas de cyclone ou de typhon. Dans de tels cas, systèmes SSDI automatiques ou télécommandés peuvent poursuivre les opérations.

Risques potentiels inhérents à l'usage de dispersants en milieu sous-marin

Toute utilisation réussie d'un dispersant (en surface comme en milieu sous-marin) donne lieu au transfert d'une plus grande quantité d'hydrocarbures dans la colonne d'eau que d'autres méthodes. L'usage de dispersants engendre un risque potentiel que des organismes marins présents en grands fonds dans la colonne d'eau soient davantage exposés aux gouttelettes d'hydrocarbure dispersées et aux composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau libérés par ces gouttelettes.

Dans de nombreux cas d'éruption sous-marine, une partie considérable du volume d'hydrocarbures déversés est produite sous la forme d'un panache de minuscules gouttelettes d'hydrocarbure dans l'eau en raison de la turbulence créée par l'écoulement rapide d'hydrocarbures et de gaz dans l'eau. L'injection de dispersant aux hydrocarbures déversés augmente la proportion d'hydrocarbures dispersés sous la forme de minuscules gouttelettes, dont la proportion était toutefois déjà élevée.

La façon dont la communauté perçoit le préjudice causé par l'usage de la méthode SSDI peut porter atteinte à la confiance du marché halieutique.

Un processus d'évaluation de l'usage des dispersants en milieu sous-marin est abordé en détail dans le cadre d'une analyse des avantages environnementaux et économiques (NEBA) aux pages 29 à 34.

Possibilités et limites

Les possibilités et les limites de l'usage des dispersants sur des hydrocarbures flottants sont décrites dans le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP relatif à l'épandage de dispersants en surface (IPIECA-IOGP, 2015).

Possibilités de l'usage de dispersants en milieu sous-marin

Les méthodes de lutte en milieu sous-marin sont susceptibles, une fois déployées, de traiter à la source tous les hydrocarbures déversés. Cela n'est pas le cas pour les interventions de lutte contre les hydrocarbures flottants, qui sont souvent limitées en raison de la fragmentation et de la diffusion des hydrocarbures sur une grande surface. La fréquence à laquelle une méthode d'intervention entre en contact avec l'hydrocarbure est couramment nommée taux de rencontre. Le taux de rencontre des méthodes d'intervention en surface, notamment en cas de confinement des hydrocarbures, peut être faible. Cependant, le taux de rencontre de toutes les méthodes de lutte en milieu sous-marin est susceptible d'être très élevé, et il est souvent possible de traiter tous les hydrocarbures déversés dans une zone très réduite, sous réserve que cette dernière se situe à une certaine distance de la surface de la mer.

Les possibilités de l'usage de dispersants en milieu sous-marin doivent donc être initialement comparées aux possibilités d'autres méthodes d'intervention sous-marine, telles que le capping ou technique de fermeture de puits, de confinement et de récupération en milieu sous-marin. Un facteur limitant commun à toutes ces méthodes est la vitesse à laquelle les équipements et les intervenants nécessaires peuvent être déployés sur le site du déversement d'hydrocarbures, ainsi que la possibilité d'intervenir aux profondeurs auxquelles le déversement s'est produit.

Les aspects logistiques liés au transport des équipements lourds et encombrants nécessaires pour la fermeture de puits et le confinement en milieu sous-marin (un dispositif de fermeture d'un puits peut peser 300 tonnes) depuis leur site de stockage peuvent poser des difficultés considérables.

Tableau 5 Comparaison des caractéristiques et des limites du capping ou technique de fermeture d'un puits, du confinement et de l'injection de dispersant

Facteur	Capping ou technique de fermeture d'un puits	Confinement sous-marin	Injection de dispersant en milieu sous-marin
Taux de rencontre d'hydrocarbures	Très élevé		
Taux de traitement des hydrocarbures	Empêche l'écoulement de fluides du puits	Capture les fluides du puits	Très élevé
Facteurs de déploiement	Élimination initiale de débris parfois nécessaire	Applicable dans les cas rares où la fermeture d'un puits n'est pas suffisante ou pas possible	Applicable en cas de déploiement de dispositifs de fermeture de puits et de confinement
Limites	Systèmes actuels généralement limités à une profondeur maximale de 3 000 m et une pression maximale de 15 000 psi	Systèmes actuels généralement limités à une profondeur maximale de 3 000 m	Systèmes actuels généralement limités à une profondeur maximale de 3 000 m

Limites liées à l'usage de dispersants en milieu sous-marin

Les conditions ambiantes de la mer et les propriétés des hydrocarbures, notamment la viscosité, ainsi que la façon dont cette viscosité augmente quand les hydrocarbures déversés subissent les processus d'altération naturelle, déterminent l'efficacité de l'usage de dispersant sur les hydrocarbures flottants.

L'usage de dispersant en milieu sous-marin n'est affecté ni par l'énergie de mélange due à l'action des vagues en surface ni par le changement des propriétés des hydrocarbures dû au processus d'altération naturelle.

En cas d'éruption sous-marine, il y a un flux continu d'hydrocarbures bruts et de gaz provenant du réservoir. Le dispersant est injecté dans les hydrocarbures alors qu'ils pénètrent dans l'eau. Bien que les propriétés des hydrocarbures changent rapidement en raison de la dissolution de certains composés solubles dans l'eau et de leur chute soudaine de température quand ils pénètrent dans la mer, il est peu probable que ces changements réduisent l'efficacité du dispersant pour la plupart des hydrocarbures bruts. Les hydrocarbures bruts déversés à partir d'un puits sous-marin ont souvent une température élevée, mais se refroidissent rapidement une fois qu'ils entrent en contact avec l'eau froide des profondeurs marines. Si ces hydrocarbures bruts ont un point d'écoulement très élevé en raison de leur forte teneur en cire, il est possible qu'ils se solidifient en pénétrant dans l'eau, puis qu'ils prennent la forme d'un panache de gouttelettes de cire solidifiées.

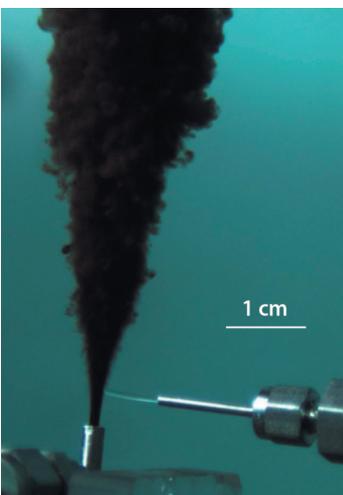
Une limite potentielle de l'usage de dispersant en milieu sous-marin peut être l'efficacité de son injection au niveau du point de déversement. Le dispersant doit être injecté dans les hydrocarbures et dans le gaz alors qu'ils pénètrent dans l'eau. Des études (Brandvik *et al.*, 2014a et 2013, et Johansen *et al.*, 2013) ont démontré que la durée pendant laquelle les tensioactifs présents dans le dispersant peuvent influencer la formation de gouttelettes après le déversement des hydrocarbures est très courte :

- si le dispersant est injecté dans les hydrocarbures et le gaz avant leur déversement, par exemple s'il est injecté dans une colonne montante percée, il doit être injecté en amont, à une distance maximale correspondant à six fois le diamètre de la fuite ;
- si le dispersant est injecté dans une éruption turbulente d'hydrocarbures et de gaz, il doit être injecté à peine au-dessus du point de déversement, à une distance maximale correspondant à dix fois le diamètre de la fuite.

Des systèmes SSDI ont été développés en tenant compte des critères ci-dessus pour assurer l'efficacité des opérations. L'injection de dispersant dans les hydrocarbures avant leur déversement au point d'écoulement peut être plus efficace que l'injection directe dans le jet d'hydrocarbures déversés près du point d'écoulement. Le point d'injection doit se situer dans le jet sous pression, avant qu'il ne commence à se fragmenter en gouttelettes individuelles. La distance avec le point de déversement dépend des conditions précises du déversement.

S'il n'est pas possible d'injecter le dispersant dans les hydrocarbures et le gaz avant leur déversement, il convient de le faire aussi près que possible du point de déversement. Des essais ont révélé que les dispersants sont efficaces tant qu'ils sont injectés directement dans le jet sous pression, avant qu'il ne se fragmente en gouttelettes. Une condition clé de l'injection en dehors du point de déversement consiste à distribuer le dispersant autour du jet et non à l'injecter d'un seul côté. Les anneaux d'injection peuvent être le moyen le plus efficace d'y parvenir.

Ci-dessous :
photographie d'un
bac d'essai montrant
l'injection de
dispersant dans un
déversement, le
dispersant étant
visible sous la forme
d'une ligne blanche
aspirée dans le
panache ascendant
d'hydrocarbures



SINTEF

Toxicité et biodégradabilité des hydrocarbures

Composés chimiques des hydrocarbures bruts

Les hydrocarbures bruts se composent d'un grand nombre d'agent chimiques. Il s'agit principalement d'hydrocarbures, composés exclusivement d'hydrogène et de carbone. Les hydrocarbures peuvent être classés en fonction de leur poids moléculaire ou de la longueur de la chaîne de carbone ; la majorité des hydrocarbures composant les hydrocarbures bruts contiennent de 5 à 35 atomes de carbone. Les hydrocarbures peuvent également être classés en fonction du type chimique, par. ex les alcanes (paraffines), les cycloalcanes (naphtènes) et les composés aromatiques (contenant un ou plusieurs cycles benzéniques). Les proportions relatives de ces composés chimiques varient d'un hydrocarbure brut à l'autre et expliquent la grande diversité des propriétés physiques caractérisant les hydrocarbures bruts. La majorité des hydrocarbures composant les hydrocarbures bruts sont des alcanes et cycloalcanes, allant des liquides volatils aux liquides non volatils ou solides (cires) en fonction de leur taille (nombre d'atomes de carbone) et de la température ambiante.

Les composés chimiques potentiellement toxiques des hydrocarbures

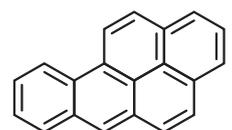
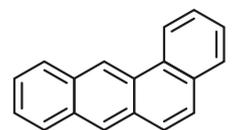
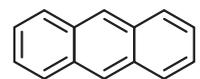
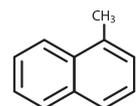
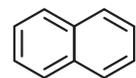
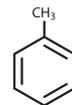
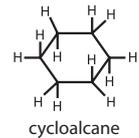
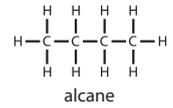
La plupart des alcanes et des cycloalcanes sont peu susceptibles de générer des effets toxiques sur les organismes marins en raison de leur faible niveau de solubilité dans l'eau. Les hydrocarbures aromatiques sont partiellement solubles dans l'eau et sont généralement considérés comme la partie des carburants et des hydrocarbures bruts la plus toxique pour les organismes aquatiques (Anderson *et al.*, 1974 ; Di Toro *et al.*, 2007).

Encadré 1 Composés aromatiques chimiques des hydrocarbures

- **Composés aromatiques à cycle unique** : il s'agit du benzène, du toluène, de l'éthylbenzène et des xylènes qui sont souvent désignés comme composés BTEX. Les hydrocarbures bruts contiennent de 0,5 à 5 % de BTEX. Le gasoil contient jusqu'à 40 % de BTEX. Les composés BTEX sont relativement solubles dans l'eau, mais représentent également la majorité des COV. S'ils atteignent la surface, ils s'échappent rapidement des hydrocarbures flottants pour s'évaporer dans l'air.
- **Composés aromatiques à double cycle** : il s'agit du naphtalène et de ses dérivés alkyl-substitués. Divers hydrocarbures bruts contiennent de 0 % à 0,4 % de naphtalène et de 0 % à 1 % ou plus de naphtalènes substitués. Ces composés sont moins solubles dans l'eau que les BTEX alors que leur volatilité est modérée.
- **Hydrocarbures aromatiques polycycliques à 3, 4 et 5 cycles (HAP)** : les hydrocarbures bruts contiennent de 0 ppm à plusieurs centaines de ppm de composés aromatiques à trois cycles, mais beaucoup moins de composés à quatre ou cinq cycles, qui représentent généralement de 1 à 10 ppm. Les composés HAP ne sont pas volatils, alors que les composés à 3 et 4 cycles sont légèrement solubles dans l'eau.

Analyse de la toxicité des dispersants et des hydrocarbures déversés

Des analyses de toxicité des dispersants et des mélanges dispersants/hydrocarbures (pour produire les hydrocarbures dispersés) sont réalisées à différentes fins et à l'aide de diverses méthodes d'analyse. L'objectif des analyses de toxicité des dispersants était de s'assurer que l'utilisation de détergents industriels toxiques, comme ceux utilisés en grande quantité au Royaume-Uni sur le déversement d'hydrocarbures du *Torrey Canyon* survenu en 1967 (Smith, 1968), ne se reproduirait pas. À l'heure actuelle, la plupart des pays exigent des dispersants qu'ils présentent une toxicité inférieure au niveau jugé acceptable avant de les autoriser.



Ci-dessus : exemples de composés aromatiques

Une analyse de toxicité LC₅₀ (concentration létale à 50 % de la population testée) sur 96 heures ou 48 heures, articulée autour d'un large éventail d'espèces testées, a été réalisée afin de déterminer la toxicité des dispersants. L'objectif de l'analyse de toxicité LC₅₀ sur 48 ou 96 heures était de déterminer la concentration du dispersant dans l'eau létale pour 50 % des organismes exposés pendant le nombre d'heures indiqué. L'analyse peut donc être utilisée pour classer la toxicité comparative de différents dispersants. Le régime d'exposition (concentration du dispersant dans l'eau et durée d'exposition) dans le cadre de l'analyse LC₅₀ ne reproduit pas l'exposition au dispersant à laquelle est soumis un organisme marin si le dispersant est utilisé pour un déversement d'hydrocarbures en mer.

Aux États-Unis, les analyses de toxicité requises par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) en vue de l'inscription des dispersants sur la liste des produits du NCP (Plan nationale d'urgence de lutte contre la pollution provoquée par les substances dangereuses et les hydrocarbures) s'articulent autour de deux espèces standards définies par l'EPA des États-Unis : le *menidia beryllina* et la crevette mysid (*americamysis bahia*). Le régime d'exposition appliqué dans le cadre de la procédure d'analyse de la toxicité LC₅₀ ne saurait simuler l'usage du dispersant sur les hydrocarbures déversés en mer dans la mesure où les concentrations utilisées dans le cadre de l'analyse sont plus élevées et la durée de l'exposition plus longue que celles prévalant en mer. Cependant, l'analyse de la toxicité LC₅₀ constitue un mode d'évaluation de la magnitude relative des effets toxiques qui pourraient être causés par les dispersants ou les hydrocarbures dispersés dans le cadre des conditions d'exposition de l'analyse.

Lors de l'accident de Macondo, huit dispersants inscrits sur la liste des produits du NCP avaient fait l'objet d'une analyse de toxicité (Hemmer *et al.*, 2010).

Les niveaux de toxicité mesurés dans le cadre des analyses LC₅₀ ont été classés sur échelle à cinq niveaux représentant d'une toxicité très haute à une « toxicité quasiment nulle », tel qu'appliqué par l'EPA américain en interprétant les résultats des analyses LC₅₀ (US EPA, 2012). Ce barème de classement de toxicité est également utilisé à l'échelle internationale (GESAMP, 2014).

Tableau 6 Résultats des analyses de huit dispersants inscrits sur la liste du NCP réalisées par l'EPA aux États-Unis

Catégories d'écotoxicité de l'EPA (ppm = parties par million)	Americamysis bahia LC ₅₀ sur 48 heures	Menidia beryllina LC ₅₀ sur 96 heures
Très hautement toxique : <0,1 ppm		
Hautement toxique : 0,1-1 ppm		
Modérément toxique : >1-10 ppm		Dispersit SPC 1000
Légèrement toxique : >10-100 ppm	Dispersit SPC 1000 Nokomis 3-AA COREXIT® 9500A Nokomis 3-F4 ZI-400	Nokomis 3-F4 Nokomis 3-AA ZI-400 Saf-Ron Gold Sea Brat #4
Quasiment non toxique : >100 ppm	Saf-Ron Gold JD-2000	COREXIT® 9500A JD-2000

US EPA, 2012

Le COREXIT® 9500A, le dispersant le plus utilisé lors de l'accident de Macondo, a été classé comme « légèrement toxique » pour l'Americamysis bahia et « quasiment non toxique » pour le Menidia beryllina dans le cadre des analyses de toxicité LC₅₀.

La même méthode d'analyse de la toxicité que celle utilisée dans le cadre de la liste de produits NCP a été appliquée par l'EPA (US EPA, 2010) afin de déterminer la magnitude relative des effets toxiques qui auraient pu être causés par :

- des hydrocarbures Louisiana Sweet Crude (LSC) dispersés mécaniquement ;
- le dispersant utilisé durant la lutte contre l'accident de Macondo, à savoir COREXIT® EC9500A ; et
- les hydrocarbures bruts LSC dispersés au moyen d'un mélange selon un dosage 1:10 de COREXIT® EC9500A et de LSC.

Les résultats résumés dans le tableau 7 montrent que le dispersant seul génère des effets toxiques moindres que l'hydrocarbure brut seul. Le dispersant seul est considéré comme quasiment non toxique à l'égard des espèces de poissons et seulement « légèrement toxique » à l'égard des crevettes, alors que l'hydrocarbure brut dispersé mécaniquement a été évalué comme « modérément toxique » à l'égard des deux espèces. L'hydrocarbure brut dispersé chimiquement affiche le même classement dans la mesure où l'hydrocarbure brut dispersé mécaniquement est réputé « modérément toxique » pour les deux espèces. Dans ce cas, les effets toxiques mesurés sont causés par l'hydrocarbure et non par le dispersant. Il ne convient donc pas d'évaluer la toxicité d'un dispersant en réalisant des analyses de toxicité sur des hydrocarbures dispersés.

Tableau 7 Synthèse des résultats des analyses de la toxicité aquatique LC₅₀ menées par l'EPA sur des hydrocarbures déversés, un dispersant et des hydrocarbures dispersés dans le cadre de l'intervention sur le sinistre de Macondo

Catégories d'écotoxicité de l'EPA (ppm = parties par million)	Louisiana Sweet Crude (LSC) Dispersant		Dispersant (COREXIT® EC9500A)		Hydrocarbure dispersé (LSC + COREXIT® EC9500A)	
	Americamysis bahia	Menidia beryllina	Americamysis bahia	Menidia beryllina	Americamysis bahia	Menidia beryllina
Très hautement toxique : <0,1 ppm						
Hautement toxique : 0,1-1 ppm						
Modérément toxique : >1-10 ppm	2,7 ppm	3,5 ppm			5,4 ppm	7,6 ppm
Légèrement toxique : >10-100 ppm			42 ppm			
Quasiment non toxique : >100 ppm				130 ppm		

US EPA, 2010

L'analyse de toxicité LC₅₀ a utilisé un mélange au dosage de 1:10 de dispersant et d'hydrocarbure. Ce mélange contient une plus forte teneur en dispersant que les applications sous-marines, pour lesquelles des rapports de 1:100 ou de 1:50 sont généralement utilisés.

Quand un dispersant est répandu sur des hydrocarbures en surface ou injecté en milieu sous-marin, la durée d'exposition des organismes marins aux hydrocarbures dispersés et la concentration des hydrocarbures dispersés dépendent de divers facteurs, dont les conditions environnementales et les circonstances précises du déversement.

Exposition aux hydrocarbures, aux hydrocarbures dispersés et aux composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau

Selon un principe clé en matière de toxicologie, la magnitude de l'effet d'un composé chimique sur un organisme donné dépend de l'exposition de l'organisme au composé chimique. L'exposition dépend de la voie d'exposition, de la concentration de l'agent chimique auquel l'organisme est exposé et de la durée de l'exposition.

En cas de déversement d'hydrocarbures, certains organismes marins sont susceptibles d'être exposés à des concentrations élevées de gouttelettes d'hydrocarbures naturellement dispersées et de composés solubles dans l'eau provenant des hydrocarbures présents dans l'eau. Lors d'une éruption sous-marine libérant des hydrocarbures et du gaz à haute pression, il est probable que la totalité des hydrocarbures soit rejetée dans l'eau sous la forme de gouttelettes d'hydrocarbure. Une partie substantielle des hydrocarbures déversés peut se transformer en minuscules gouttelettes d'hydrocarbure sous l'action de la turbulence produite par le déversement d'hydrocarbures et de gaz. Dans un tel cas, un grand nombre de composés aromatiques au poids moléculaire faible (les BTEX et les HAP à 2 et 3 cycles) sont rapidement transférés des hydrocarbures à l'eau, où ils sont rapidement dilués et biodégradés.

Ces composés sont susceptibles de porter préjudice aux organismes marins se trouvant à proximité du site de l'éruption sous-marine, ces derniers étant exposés à ces composés dissous et à des concentrations d'hydrocarbures déversés dans l'eau de la mer. Les gouttelettes d'hydrocarbure de plus grande taille, les bulles de gaz et les composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau remontent rapidement dans la colonne d'eau, ce qui présente un certain risque pour les organismes pélagiques (qui se trouvent dans la colonne d'eau), mais non pour les organismes benthiques (qui vivent sur ou dans le fond marin) ou les organismes démersaux (qui vivent près du fond marin).

Les concentrations de gouttelettes d'hydrocarbure et de composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau diminuent rapidement au fur et à mesure que le panache ascendant entraîne l'eau et est dilué lors de son ascension dans la colonne d'eau. Cependant, tant que l'éruption se poursuit, la zone se trouvant à proximité du point de déversement continue à afficher une concentration relativement élevée de gouttelettes d'hydrocarbure et de composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau.

Effet de l'usage de dispersants en milieu sous-marin

Les gouttelettes d'hydrocarbure pénétrant dans l'eau sous forme d'un panache doivent être de petite taille pour que l'usage de dispersant en milieu sous-marin soit efficace. Le taux de transfert des composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau est supérieur quand les gouttelettes d'hydrocarbure sont de petite taille en raison de la plus grande surface hydrocarbure/eau. Cette situation donne lieu à une concentration plus élevée d'hydrocarbures dispersés (minuscules gouttelettes) et de composés solubles dans les eaux se trouvant près du point de déversement. Bien que la méthode SSDI ait pour effet d'augmenter ces concentrations, ces dernières sont probablement déjà élevées près de la source, même sans injection de dispersant. De ce fait, bien que la possibilité que les organismes marins présents dans le voisinage du point de déversement sous-marin d'hydrocarbures et de gaz subissent des effets toxiques soit accrue par l'usage de dispersant en milieu sous-marin, cette possibilité est déjà élevée avant l'injection de dispersant. Les hydrocarbures dispersés par la méthode SSDI présentent généralement une flottabilité neutre et créent des panaches d'hydrocarbures dispersés à basse concentration. Ces panaches partent à la dérive, sont dilués, puis biodégradés.

Exposition des organismes marins par ingestion des gouttelettes d'hydrocarbures dispersés

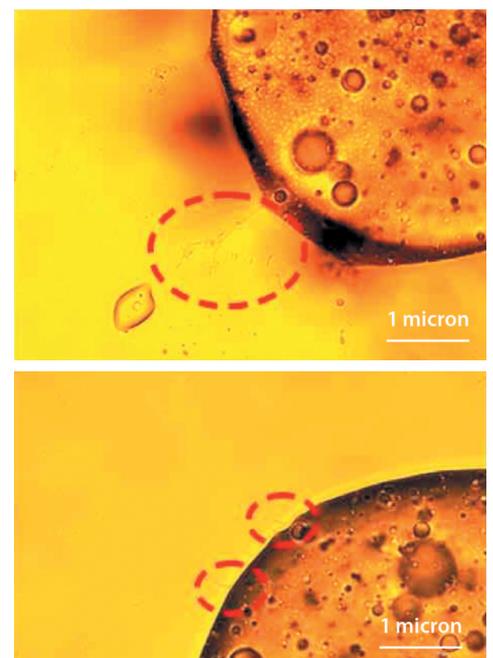
L'ingestion de nourriture constitue pour les organismes marins une voie potentielle d'exposition aux HAP à poids moléculaire élevé. Les organismes filtreurs qui se nourrissent de plancton peuvent ingérer des gouttelettes d'hydrocarbure dispersées par voie naturelle ou chimique si elles sont de la même taille que certains planctons. Des organismes relativement simples, comme les bivalves, ne sont pas en mesure de décomposer biochimiquement les HAP dont le poids moléculaire est plus élevé et qui sont présents dans les hydrocarbures, ces HAP pouvant s'accumuler (« bioaccumulation ») dans certains organes (Neff and Burns, 1996). Les prédateurs qui consomment des bivalves contaminés par les hydrocarbures peuvent alors être exposés à des concentrations élevées d'HAP d'un poids moléculaire plus élevé par la voie d'ingestion. Les organismes qui possèdent un foie, comme les poissons, peuvent métaboliser les HAP, bien que certains de ses métabolites soient parfois nocifs. Il est toutefois peu probable que les bivalves soient exposés aux hydrocarbures dispersés en milieu sous-marin, car il s'agit d'organismes benthiques et ils sont donc davantage susceptibles d'être exposés aux nappes qui se dispersent naturellement à la surface d'eaux peu profondes. Les planctons et les copépodes se trouvent parfois dans la partie intermédiaire ou profonde de la colonne d'eau, ce qui augmente le risque d'exposition. Cependant, en raison de la faible concentration des hydrocarbures dispersés, alliée à l'abondance et la haute capacité de récupération de ces populations, l'impact sur ces organismes est probablement limité.

Biodégradation des hydrocarbures

Les gouttelettes d'hydrocarbure présentes dans la colonne d'eau sont rapidement colonisées par les micro-organismes qui dégradent le pétrole et qui sont naturellement présents dans les environnements océaniques (King *et al.*, 2014). Tous les océans du monde présentent des suintements naturels d'hydrocarbures (Kvenvolden, 2003) et des microbes ayant évolué pour dégrader les hydrocarbures émanant de ces suintements se trouvent dans tous les milieux marins, même les plus froids et les plus sombres. La plupart des composés chimiques des hydrocarbures bruts présents dans ces gouttelettes ont une solubilité dans l'eau limitée et les micro-organismes doivent se trouver dans l'espace de contact entre l'eau et l'hydrocarbure pour pouvoir biodégrader l'hydrocarbure. Les hydrocarbures dispersés sous la forme de petites gouttelettes ont une surface de contact hydrocarbure/eau bien plus élevée qu'une nappe d'hydrocarbures flottant sur la surface de la mer. Cette surface de contact accrue favorise la fixation des microbes et accélère donc la biodégradation. Il existe toute une communauté de micro-organismes (bactéries et champignons) qui consomment et dégradent les hydrocarbures au fur et à mesure qu'ils se développent et se reproduisent, après quoi les protozoaires et nématodes de plus grande taille consomment ces bactéries. Les hydrocarbures sont donc assimilés par le milieu (American Academy of Microbiology, 2011) et ne posent plus aucun risque. Les hydrocarbures dispersés sont eux aussi rapidement dilués. Quand une gouttelette individuelle a été entièrement colonisée par les micro-organismes et que la biodégradation s'est fait grandement ressentir, la concentration des hydrocarbures dispersés dans l'eau est généralement très basse. Avec une concentration basse, la plupart des milieux marins disposent d'une quantité suffisante d'oxygène, de phosphore, d'azote et d'autres nutriments pour que la biodégradation aérobie puisse commencer.

L'image 5 montre une photomicrographie d'une gouttelette d'hydrocarbure à laquelle s'est attachée une bactérie dégradant les hydrocarbures. Cette image montre que les micro-organismes dégradant les hydrocarbures peuvent être

Image 5 *Microbes biodégradant qui commencent à « dévorer » la gouttelette d'hydrocarbure dispersée*



Hazen et al., 2010

beaucoup plus petits (certains faisant à peine quelques microns de longueur) que les gouttelettes d'hydrocarbure (qui peuvent faire quelques dizaines de microns de diamètre).

La biodégradation survient principalement sous l'action de l'oxydation biochimique (Atlas et Bartha, 1992 ; Atlas et Cerniglia, 1995 ; Prince, 1997 ; Prince *et al.*, 2013). Les différents composés chimiques des hydrocarbures bruts sont biodégradables à des vitesses différentes et dans des mesures différentes (Singer and Finnerty, 1984 ; Lindstrom and Braddock, 2002 ; Campo *et al.*, 2013). Les alcanes à chaîne linéaire seront les plus rapidement biodégradés, suivis par les composés aromatiques monocycliques, puis par les alcanes à chaîne ramifiée et les cycloalcanes. De nombreux hydrocarbures ramifiés, cycliques et aromatiques complexes, qui ne seraient pas biodégradés individuellement, peuvent être oxydés via un mécanisme de co-métabolisme dans un mélange d'hydrocarbures grâce à l'abondance d'autres substrats qui peuvent être métabolisés facilement à l'intérieur de l'hydrocarbure (Heitkamp et Cerniglia, 1987).

Les hydrocarbures biodégradés seront finalement transformés en dioxyde de carbone et en eau (MacNaughton *et al.*, 2003). La biodégradation de certains composés d'hydrocarbure très lourds, tels que le bitume ou l'asphalte, est plus lente. Ces substances sont biologiquement inertes et sont non toxiques ou quasiment non toxiques.

La concentration des hydrocarbures dispersés dans l'eau diminue progressivement jusqu'à atteindre des niveaux indétectables au fur et à mesure que les petites gouttelettes sont diluées dans la colonne d'eau. Les tensioactifs et les solvants présents dans les dispersants étant biodégradables, ces derniers sont eux aussi biodégradés, et le sont d'ailleurs souvent plus rapidement que les hydrocarbures. La concentration des résidus de gouttelettes correspondant aux composés d'hydrocarbure qui ne sont pas rapidement biodégradés est très basse, soit de quelques ppb (parties par milliard) dans l'eau. Ces résidus d'hydrocarbures sont finalement déposés à faible concentration sur une grande étendue du fond marin.

En bref, la dispersion des hydrocarbures par l'injection de dispersant renforce considérablement le processus naturel de biodégradation. Les hydrocarbures dispersés efficacement persistent dans le milieu pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines, tandis que les hydrocarbures flottants non dispersés subissent des processus d'altération, sont émulsifiés et finissent par échouer sur la côte, demeurant parfois dans ce milieu pendant plusieurs années.

Analyse des avantages environnementaux et économiques en fonction des options de luttes envisagées

L'analyse des avantages environnementaux et économiques en fonction des options de luttes envisagées (net environmental benefit analysis, ou NEBA) est un processus mis en œuvre par la communauté des intervenants afin de faire les meilleurs choix pour réduire les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les humains et l'environnement (voir le Guide de bonnes pratiques de l'APIECA-IOGP sur la NEBA (APIECA-IOGP, 2015b)).

La NEBA exerce son action à différents niveaux d'un déversement :

- la NEBA fait partie intégrante du processus de la planification d'urgence et oriente la stratégie de lutte contre les divers scénarios prévus ;
- pendant une intervention, la NEBA permet de s'assurer que les conditions réelles sont pleinement comprises et évaluées pour que la stratégie de lutte soit adaptée et ajustée en fonction de l'évolution de la situation ;
- la NEBA peut servir également à définir et vérifier l'atteinte des critères de validation à long terme d'une intervention.

La NEBA nécessite réflexion et jugement pour comparer les résultats prévisibles de l'utilisation de différentes méthodes de lutte contre les déversements d'hydrocarbures et pour émettre des recommandations sur les tactiques les plus judicieuses à mettre en œuvre en fonction de l'avis de personnel de lutte expérimentés et suite à la consultation des parties prenantes. La NEBA comprend en principe les étapes suivantes pour divers cas de déversement identifiés et doit être réalisée avant tout déversement d'hydrocarbure lors de l'élaboration du planification d'urgence contre les déversements d'hydrocarbures.



Tableau 8 Principales étapes d'une NEBA dans le processus d'élaboration du planification d'urgence contre les déversements d'hydrocarbures

Étapes de la NEBA	Description
Évaluer les données	La première étape consiste à localiser le point de déversement des hydrocarbures et à définir la direction dans laquelle ils dériveront sous l'action des courants et des vents au moyen des modèles existants de trajectoire des déversements hydrocarbures. Il peut également être utile de savoir comment un hydrocarbure sera altéré par les processus naturels durant sa dérive. Il s'agit d'un des volets de l'évaluation des données disponibles.
Prédire les résultats	La seconde étape consiste à déterminer les éléments qui sont susceptibles d'être affectés par les hydrocarbures déversés en l'absence de toute intervention. Il peut par exemple s'agir des ressources écologiques au large, près des côtes et sur le littoral, ainsi que des ressources socio-économiques. L'efficacité et la faisabilité des stratégies de lutte doivent également être évaluées. Cette étape traite des méthodes de lutte, des modalités pratiques de leur utilisation et de la quantité hydrocarbures qu'elles permettent de récupérer ou de traiter. Dans le cas où les zones menacées comprendraient des habitats côtiers vulnérables aux hydrocarbures, la lutte contre le déversement d'hydrocarbure en mer visera à empêcher que les hydrocarbures atteignent ces habitats ou à limiter leur dérive. L'expérience passée permet de déterminer quelles méthodes d'intervention sont susceptibles d'être les plus efficaces. Les aspects pratiques et opérationnels doivent constituer une partie très importante du processus NEBA appliqué à toutes les méthodes d'interventions viables.
Équilibrer les compromis	Les avantages et les inconvénients des possibles stratégies de lutte seront pris en compte et évalués et pondérés en fonction de leurs impacts écologiques et socio-économiques afin de comprendre et d'équilibrer les compromis.
Sélectionner la ou les meilleures options	Le processus abouti à l'adoption de la ou des méthodes de lutte qui, dans le cadre du plan de lutte contre les déversements d'hydrocarbures, sont susceptibles de minimiser l'impact potentiel d'un déversement sur l'environnement, ainsi que de favoriser la régénération et la restauration des zones affectées aussi rapidement que possible.

Étape 1 : Évaluer les données

Un aspect important de toute planification d'urgence contre les déversements d'hydrocarbures est l'utilisation de scénarios réalistes pour les déversements d'hydrocarbures (voir le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP relatif à la planification d'urgence (IPIECA-IOGP, 2015c)). Il est donc nécessaire d'élaborer divers scénarios de déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin, y compris en envisageant la pire éventualité qui soit crédible. Les conditions ambiantes prévues doivent être prises en compte.

La modélisation doit alors être réalisée pour prédire le comportement des hydrocarbures déversés. Plusieurs modèles informatiques sont disponibles pour la modélisation des éruptions sous-marines donnant lieu à un déversement d'hydrocarbures et de gaz. Le modèle choisi doit tenir compte de tous les facteurs pertinents, tels que les caractéristiques du puits, les conditions météorologiques et les conditions océaniques, dont les courants, les températures, etc., et ce jusqu'aux profondeurs concernées.

De nouveaux modèles permettant de prédire avec précision la répartition des tailles de gouttelettes d'hydrocarbures produites dans diverses conditions de déversement sont actuellement à l'étude.

Étape 2 : Prédire les résultats

La combinaison de la cartographie des zones vulnérables (IPIECA/IMO/IOGP, 2012) et de la modélisation peut indiquer quelles ressources écologiques et socio-économiques (au large, près des côtes et sur le littoral) sont susceptibles de courir un risque en l'absence d'intervention pour lutter contre les hydrocarbures. Les façons dont les hydrocarbures peuvent affecter diverses ressources écologiques et socio-économiques, ainsi que les facteurs pouvant exercer un impact sur ces impacts, sont décrits dans le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur l'écologie marine (IPIECA-IOGP, 2015a) et littorale (IPIECA-IOGP, 2016).

Faisabilité de l'usage d'une méthode d'intervention donnée

L'efficacité et la faisabilité probables de mise en œuvre des différentes méthodes d'intervention en fonction des diverses conditions ambiantes possibles doivent être évaluées. Cette étape traite des méthodes de lutte, des modalités pratiques de leur utilisation et de la quantité d'hydrocarbures qu'elles permettent de récupérer ou de traiter pendant la durée probable de disponibilité de ces méthodes. Les aspects pratiques et opérationnels doivent constituer une partie importante du processus NEBA appliqué à toutes les méthodes d'interventions viables.

Quand une méthode de lutte contre un déversement sous-marin d'hydrocarbures est envisagée, il est nécessaire de déterminer si l'intervention devra avoir lieu en milieu sous-marin (par du capping (technique de fermeture d'un puits) sous-marin, par le processus de confinement et récupération en mer, ou par injection sous-marine de dispersant) ou s'il convient d'attendre que les hydrocarbures déversés soient remontés en surface pour procéder par la méthode de confinement et récupération en mer, de brûlage contrôlé in-situ ou d'épandage de dispersant en surface. Les caractéristiques particulières du déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin, ainsi que le comportement de ces hydrocarbures et du gaz déversés, doivent orienter la décision.

- Lors d'une éruption sous-marine donnant lieu à un déversement d'hydrocarbures et de gaz, si le gaz est dissous dans l'eau et n'atteint pas la surface, le recours à des navires de surface pour déployer des dispositifs de fermeture de puits, des systèmes de confinement et de récupération en milieu sous-marin, et des équipements d'injection sous-marine de dispersant peut constituer une solution viable.
- Cependant, dans le cas d'une éruption sous-marine d'hydrocarbures et de gaz dans des eaux peu profondes (avec des débits et des pressions d'hydrocarbures semblables), le gaz n'est pas entièrement dissous dans l'eau avant d'atteindre la surface de la mer, et il est alors préférable d'envisager le déploiement d'un système sous-marin déporté d'une distance horizontale pouvant aller jusqu'à 500 m du puits, les risques d'incendie et d'explosion excluant toute possibilité d'utiliser des navires de surface directement au-dessus de la source.

Le délai requis pour déployer les équipements de lutte contre le déversement peut également constituer un facteur clé de l'évaluation de la faisabilité de l'intervention. Une intervention contre un déversement d'hydrocarbures est souvent une course contre la montre. Dès qu'un déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin a eu lieu, les risques potentiels sont déterminés en fonction de la proximité des ressources susceptibles d'être endommagées et des conditions ambiantes, telles que la direction et la vitesse du vent.

La technique de confinement et récupération en mer est généralement la première méthode d'intervention envisagée. Cela sera toujours le cas à l'avenir car la grande majorité des déversements d'hydrocarbures sont de petite envergure et se produisent près de sites où sont stockés les équipements nécessaires. Cependant, quand les déversements sont plus importants et plus éloignés des sites de stockage d'équipements, la méthode de confinement et récupération est moins efficace en raison de la grande surface occupée par les hydrocarbures, du faible taux de rencontre d'hydrocarbures et des difficultés d'ordre logistique liées au transport des hydrocarbures récupérés vers le littoral en vue de leur traitement ou de leur élimination. Il est donc nécessaire d'utiliser des dispersants pouvant être rapidement épandus par voie aérienne ou injectés par voie sous-marine. Les dispersants peuvent traiter les déversements d'hydrocarbures situés dans des endroits reculés du fait qu'un déploiement rapide est possible à l'aide d'appareils aériens. Ce déploiement aérien permet aux dispersants de traiter de grandes surfaces bien plus rapidement que lors d'un épandage par navire. Les dispersants sous-marins traitent les hydrocarbures à un emplacement connu encore plus efficacement.

Étape 3 : Équilibrer les compromis

La décision d'utiliser ou non un dispersant n'est pas une affaire simple, même si certains considèrent faussement qu'il s'agit simplement d'un débat « priorité aux oiseaux ou aux poissons ». Les nappes d'hydrocarbures non traitées qui se déplacent à la surface des eaux peuvent affecter les œufs et les larves de poissons dans la nappe ou juste au-dessous. De plus, les hydrocarbures en dérive vers les eaux côtières et les hydrocarbures échoués sur le littoral peuvent porter atteinte à de nombreux poissons pendant leur phase juvénile. Si ces hydrocarbures ne sont pas dispersés, les nappes flottantes peuvent atteindre le littoral et affecter le secteur halieutique. Cet impact peut même être plus grave que celui d'une dispersion d'hydrocarbures si le déversement a lieu pendant les périodes critiques de frai ou si les hydrocarbures pénètrent dans les habitats côtiers des poissons juvéniles. Si la probabilité que les hydrocarbures dispersés causent un préjudice éventuel aux poissons est faible, l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de lutttes envisagées (NEBA) offre des arguments clairs démontrant que l'usage de dispersant peut protéger le secteur halieutique.

Les compromis, ou équilibres, entre les avantages et les risques potentiels de l'usage de dispersant en milieu sous-marin dans le cadre d'une éruption sous-marine sont semblables, mais pas identiques à ceux qui ont lieu lors de l'usage de dispersant sur des hydrocarbures flottants, les circonstances n'étant pas tout à fait les mêmes. Les risques potentiels courus par les organismes marins en raison des hydrocarbures dispersés sont différents quant à leur ampleur, leur emplacement et leurs répercussions éventuelles.

Le risque que ces organismes marins subissent des effets toxiques est lié à leur exposition aux hydrocarbures dispersés et aux composés partiellement solubles dans l'eau de ces hydrocarbures. L'exposition, quant à elle, dépend de la concentration et de la durée.

Exposition aux hydrocarbures dispersés due à l'usage de dispersant sur des hydrocarbures flottants

Le mouvement des vagues à travers une nappe d'hydrocarbures localisée a pour effet de fragmenter les hydrocarbures en gouttelettes de différentes tailles. Les gouttelettes de plus grande taille remontent rapidement à la surface, tandis que les plus petites gouttelettes sont dispersées dans la colonne d'eau. La proportion des hydrocarbures dispersés par des mécanismes naturels est souvent basse et diminue encore plus au fur et à mesure que les hydrocarbures sont altérés par les processus naturels.

L'usage de dispersant augmente considérablement la proportion d'hydrocarbures qui est convertie en petites gouttelettes sous l'action des vagues. Des panaches localisés de gouttelettes d'hydrocarbure dispersées

sont produits par les vagues déferlant dans les zones où l'hydrocarbure a été traité par le dispersant. La concentration d'hydrocarbures (sous forme de gouttelettes) dans la partie supérieure de la colonne d'eau augmente rapidement, puis diminue rapidement au fur et à mesure que les hydrocarbures sont dilués dans les eaux environnantes. Alors que la nappe d'hydrocarbures part à la dérive sous l'action du vent, le mouvement des vagues produit des nuages localisés d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau à une certaine distance des nuages précédents, qui ont été dilués. La concentration maximale d'hydrocarbures dispersés dans l'eau est faible et de courte durée, et a lieu à des emplacements éparpillés pendant une certaine période sous les hydrocarbures traités par le dispersant.

Les organismes marins habitant la partie supérieure de la colonne d'eau (à une profondeur maximale d'environ 5 à 10 m) peuvent être brièvement exposés à une concentration accrue de gouttelettes d'hydrocarbure dispersées et de composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau présents dans la colonne d'eau, ce qui ne serait pas le cas si les dispersants n'étaient pas utilisés. En l'absence de dispersant, ces organismes subissent toutefois, dans une certaine mesure, une exposition en raison de la dispersion naturelle, comme l'indique le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP relatif à l'épandage de dispersants en surface (IPIECA-IOGP, 2015).

Exposition aux hydrocarbures dispersés due à l'usage de la méthode SSDI lors d'un déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin

Le déversement continu de grandes quantités d'hydrocarbures et de gaz depuis une source unique produit de grandes concentrations d'hydrocarbures dispersés et de composés d'hydrocarbure solubles dans les eaux proches du point de déversement. Les hydrocarbures dispersés dans l'eau sont dilués et leur concentration diminue au fur et à mesure que le panache remonte en surface et part à la dérive. L'utilisation de la méthode SSDI a pour effet d'accroître la concentration déjà élevée d'hydrocarbures dispersés dans l'eau près du point de déversement. Cette forte concentration d'hydrocarbures dispersés dans l'eau près de la source reste élevée tant que les hydrocarbures et le gaz continuent à se déverser (comme l'illustre l'image 4 à la page 18).

Le régime d'exposition des organismes marins aux hydrocarbures dispersés et aux composés d'hydrocarbure solubles dans l'eau présents dans la colonne d'eau dépend de leur proximité du point de déversement, de la direction prise par le panache dérivant et de leur aptitude à détecter les hydrocarbures et à s'en éloigner. Les organismes sessiles se trouvant sur le fond marin, qui ne sont pas capables de s'écarter, peuvent subir un niveau d'exposition aux hydrocarbures dispersés plus élevé que les organismes capables de nager et de s'éloigner. Les organismes sessiles se trouvant près du point de déversement peuvent être exposés à de fortes concentrations d'hydrocarbures dispersés pendant de longues périodes.

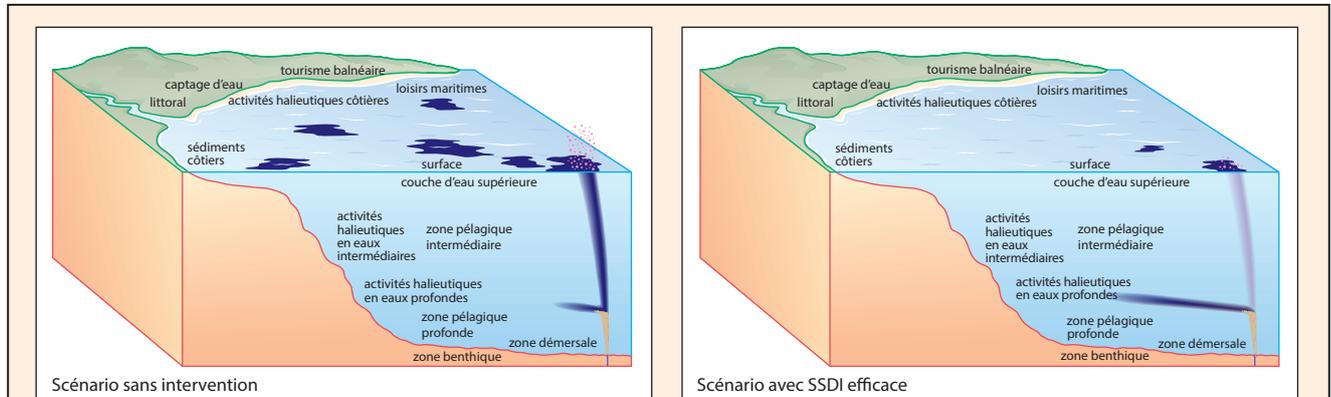
Les effets réels du régime d'exposition aux hydrocarbures dispersés produit par la méthode SSDI dépendent des organismes marins présents dans le voisinage du point de déversement sous-marin d'hydrocarbures et de gaz ou près des panaches sous-marins d'hydrocarbures dispersés qui partent à la dérive, sont dilués, puis biodégradés. En général, la densité de la population habitant les profondeurs sous-marines est moindre que chez la population présente près de la surface de la mer.

Dans le cadre de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de luttes envisagées (NEBA), l'usage de dispersant en milieu sous-marin étant envisagé et son efficacité comparée à celle d'autres méthodes de lutte, il est essentiel de se pencher sur les résultats probables des choix suivants :

- absence d'intervention, c'est-à-dire pas de dispersant sous-marin ni aucune autre méthode d'intervention ;
- usage de dispersants sous-marins.

Toute considération relative aux compromis liés à l'usage des dispersants en milieu sous-marin devra dès lors prendre en compte le niveau de dommages graves et durables causés aux habitats côtiers et aux ressources socio-économiques vulnérables qui sont susceptibles d'être évités par l'usage du dispersant, et effectuer une comparaison avec les effets localisés qui pourraient être causés à l'environnement marin par l'usage du dispersant. L'encadré 2 à la page 33 fournit un exemple illustrant les bénéfices que la méthode SSDI permet d'obtenir par rapport à l'absence d'intervention.

Encadré 2 Exemple illustrant les bénéfices que la méthode SSDI permet d'obtenir par rapport à l'absence d'intervention



Ce scénario représentatif indique que l'usage efficace de la méthode SSDI permet de réduire les conséquences globales d'un déversement et donc d'aboutir à un bénéfice écologique net.

Cet exemple est fourni à titre illustratif et, pour chaque planification d'urgence contre les déversements d'hydrocarbures, il est nécessaire d'examiner les caractéristiques propres à l'opération, dont les ressources environnementales locales, leur valeur écologique, commerciale et culturelle, et leur caractère saisonnier.

Compartiment environnemental		Population/Ressources représentatives	Conséquence relative potentielle* sans intervention	Conséquence relative potentielle avec SSDI	
Zone benthique		Organismes fousseurs	Insignifiante	Insignifiante	
Colonne d'eau	Zone démersale près du fond marin	Poissons plats	Insignifiante	Insignifiante	
	Zone pélagique profonde (>400 m)	Poissons ronds	Petite	Modérée	
	Zone pélagique intermédiaire (<400 m)	Poissons ronds	Petite	Petite	
	Couche d'eau supérieure (<20 m)	Plancton	Modérée	Insignifiante	
	Eau côtières (<10 m)	Récif corallien	Modérée	Insignifiante	
Surface de la mer		Oiseaux marins/Mammifères marins	Très grave	Petite	
Littoral	Sédiments côtiers en surface	Herbiers marins	Modérée	Insignifiante	
	Zones humides	Organismes fousseurs	Très grave	Insignifiante	
	Rivage rocheux			Modérée	Insignifiante
	Rivage sableux			Modérée	Insignifiante
Activités socio-économiques	Tourisme balnéaire		Très grave	Petite	
	Activités halieutiques côtières et aquaculture**		Grave	Petite	
	Activités halieutiques en eaux intermédiaires**		Petite	Modérée	
	Activités halieutiques en eaux profondes**		Insignifiante	Grave	
	Captage d'eau de mer		Très grave	Petite	
	Loisirs maritimes		Très grave	Petite	

* Les différentes catégories de conséquence relative tiennent compte de divers facteurs, dont la vulnérabilité des habitats, des espèces ou des populations, l'étendue géographique d'une zone susceptible d'être touchée, le temps de récupération estimé et la valeur socio-économique éventuelle d'une ressource.

** Les autorités régissant les activités halieutiques sont susceptibles d'imposer, par précaution, une interdiction de la pêche ou des exclusions particulières pour se prémunir contre les risques perçus pour la santé humaine et pour la confiance du marché. Ce genre d'interdiction reste généralement en vigueur jusqu'à ce que les faits démontrent qu'il est possible de consommer les poissons sans aucun danger. Une interdiction aggrave les conséquences subies par les entreprises du secteur halieutique en raison de la perte de revenus et non en raison d'impacts sur les populations ou les stocks de poissons.

Étape 4 : Sélectionner les meilleures options

Dans l'étape 4 de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de lutttes envisagées (NEBA), les données, les points de vue et les compromis sont pris en compte pour sélectionner la stratégie de lutte la mieux adaptée au scénario de planification ou aux conditions entourant l'accident. Cette phase de la NEBA fait appel à la participation des planificateurs et d'autres parties prenantes, qui aboutissent à un consensus sur les priorités de protection et sur les compromis acceptables.

Le principal objectif de la planification et de l'exécution d'une intervention est la mise en œuvre de méthodes qui, à un moment donné, offrent le plus grand bénéfice net. Par exemple, dans le cadre d'un sinistre au large, le traitement et la récupération d'hydrocarbures aussi près de la source que possible offrent le plus grand bénéfice, avant que les hydrocarbures ne puissent être altérés et se répandre. Dans un tel cas, les autres méthodes seraient moins efficaces et, si elles étaient utilisées, les hydrocarbures seraient davantage susceptibles d'atteindre des sites sensibles, des frontières internationales ou le littoral.

L'annexe figurant aux pages 57 à 64 fournit quelques exemples de déversement et indique les facteurs NEBA à prendre en compte pour planifier une intervention.

Législation régissant l'usage des dispersants

Un rapport intitulé *Regulatory approval of dispersant products and authorization for their use* a été préparé par le Projet de coopération industrielle de l'IOGP-IPIECA dans le cadre de la lutte contre la pollution par les hydrocarbures (JIP) (IPIECA-IOGP, 2014) dans le but de présenter les principes législatifs applicables aux dispersants.

La législation régissant les dispersants a été regroupée dans les deux catégories suivantes :

1. **La législation régissant l'agrément des produits dispersants** qui définit les dispersants dont l'utilisation est autorisée dans les eaux territoriales.
2. **La législation régissant l'usage autorisé des dispersants** qui définit où et quand les dispersants agréés peuvent être utilisés sur des hydrocarbures déversés dans les eaux territoriales.

Législation régissant l'agrément des produits dispersants utilisables en milieu sous-marin

Les mêmes critères sont appliqués pour tous les dispersants, qu'ils soient injectés en milieu sous-marin ou épanchés sur des hydrocarbures flottants :

- Un dispersant doit atteindre, voire dépasser, un certain seuil d'efficacité.
- Un dispersant ne doit pas dépasser un seuil de toxicité maximal pour la vie marine. Il convient de faire preuve de prudence lors de l'examen de la toxicité du dispersant par rapport à la toxicité des hydrocarbures dispersés (mélange d'hydrocarbures et de dispersant). Dans le cadre de l'autorisation d'un dispersant, le seuil de toxicité maximal du dispersant examiné est généralement fixé :
 - à un niveau où le mélange d'hydrocarbures et de dispersant n'est pas plus toxique que les hydrocarbures seuls pour un même niveau d'exposition ; ou
 - si le dispersant est testé seul, à un niveau de toxicité considérablement moindre qu'une substance toxique de référence.
 Remarque : toute crainte concernant la toxicité des hydrocarbures dispersés doit être prise en compte lors du processus d'autorisation de l'usage du dispersant (c'est-à-dire où et quand le dispersant peut être utilisé).
- Un dispersant doit être facilement biodégradable et ne doit pas contenir de substances nocives persistantes. Il peut donc s'avérer nécessaire de fournir des informations complémentaires dans le cadre du processus d'agrément du produit.

Lors du sinistre de Macondo, les dispersants injectés en milieu sous-marin étaient les mêmes que les dispersants couramment utilisés pour des hydrocarbures flottants partout dans le monde.

Législation régissant l'usage autorisé des dispersants en milieu sous-marin

À ce jour, les États-Unis sont le seul pays à réglementer l'injection de dispersant en milieu sous-marin comme méthode de lutte contre les déversements. À la suite de l'accident de Macondo, l'US National Response Team a publié des lignes directrices pour le suivi environnemental d'opérations atypiques faisant appel à l'utilisation d'un dispersant (NRT, 2013) et a lancé un processus de révision du Plan d'urgence national. L'American Petroleum Institute (API, 2013) a lui aussi préparé un document d'orientation de suivi semblable, mais davantage axé sur la collecte des informations nécessaires à la prise de décisions opérationnelles concernant l'utilisation continue de la méthode SSDI.

Expérience : l'accident de Macondo

La méthode d'injection sous-marine de dispersant (SSDI) a été utilisée pour la première fois pour répondre à l'accident de Macondo, dans le golfe du Mexique, en 2010. Pour comprendre la raison pour laquelle la méthode SSDI a été choisie, il est nécessaire de se pencher sur les circonstances entourant le sinistre.

Le 20 avril 2010 au soir, une explosion s'est produite suite à un dégagement de gaz, entraînant l'engloutissement de l'appareil de forage de Deepwater Horizon au niveau du puits d'exploration de Macondo dans le golfe du Mexique, à environ 68 km au sud-est de Venice, en Louisiane. Alors que l'appareil de forage commençait à sombrer, la colonne montante marine, sa tige de forage toujours à l'intérieur, qui reliait la plateforme à l'obturateur et au puits au-dessous, s'est détachée de la plateforme en perdition et a directement coulé jusqu'au plancher océanique. Des hydrocarbures et du gaz ont continué à s'échapper de la colonne montante cassée et pliée (un tube qui, avant l'accident, reliait la tête du puits sur le fond marin à l'appareil de forage en surface) après l'immersion de l'appareil de forage de Deepwater Horizon.

L'intégrité du puits a été compromise, puis ce dernier a subi une perte de contrôle hydrostatique. L'obturateur (BOP) n'a pas été en mesure d'isoler le puits après les explosions initiales. Un effort de grande envergure a été déployé pour sceller le puits et mettre fin au flux continu d'hydrocarbures et de gaz. Les équipes d'intervention ont rapidement commencé à forer deux puits de secours.

Au bout de quelques jours après l'accident, le gouvernement fédéral américain a créé une Unified Area Command pour gérer la lutte contre le déversement d'hydrocarbures. La plus grande opération de lutte contre un déversement d'hydrocarbures de l'Histoire avait été lancée. Un grand nombre de méthodes de lutte contre les déversements d'hydrocarbures ont été appliquées pour tenter d'empêcher les hydrocarbures d'atteindre le littoral, de contaminer les ressources écologiques vulnérables et de perturber l'économie locale, notamment le tourisme et les activités halieutiques. Voici les méthodes de lutte mises en œuvre :

- utilisation de grands récupérateurs offshore et d'équipements d'eaux de surface pour recueillir les hydrocarbures flottants ;
- brûlage contrôlé in-situ par l'Unified Command quand les conditions météorologiques et océaniques, la distance de la côte et les autres conditions le permettaient sans danger ;
- utilisation de dispersants suivant diverses méthodes ; et
- protection physique du littoral, avec notamment le déploiement d'un barrage solide de 1 160 km et d'un barrage absorbant de 2 960 km, dans le cadre du programme complet d'intervention pour la protection du littoral.

Le puits a été coiffé le 10 juillet et le déversement d'hydrocarbures et de gaz a été arrêté le 15 juillet. Les hydrocarbures et le gaz s'étaient déversés dans les eaux du golfe du Mexique pendant 87 jours. En janvier 2015, la Cour de district des États-Unis a conclu que, s'il n'était pas possible de savoir avec précision quelle quantité d'hydrocarbures avait été déversée dans le golfe du Mexique, les faits indiquaient qu'environ 3,19 millions de barils s'étaient écoulés (soit 507 000 m³).

Déversement d'hydrocarbures et de gaz en milieu sous-marin dans le puits de Macondo

Lors de l'accident de Macondo, l'évolution des hydrocarbures a été déterminée par plusieurs caractéristiques du déversement sous-marin d'hydrocarbures et de gaz. Certains paramètres ne sont pas connus avec exactitude et certains d'entre eux ont fait l'objet de nombreuses spéculations et de litiges juridiques, quelques procédures étant toujours en cours à la date de préparation du présent Guide. D'autres faits, qui sont connus avec certitude, ne sont pas contestés.

Après l'engloutissement de la plateforme Deepwater Horizon, le déversement d'hydrocarbures et de gaz s'est produit à une profondeur d'environ 1 550 mètres, soit à une pression de 150 atmosphères. Il n'a donc pas été

possible d'envoyer directement des plongeurs pour étudier les débits de déversement d'hydrocarbures et de gaz et pour couper l'écoulement. Toutes les opérations sous-marines ont été mises en œuvre par le biais de véhicules sous-marins télécommandés (ROV). Les caméras vidéo installées sur les ROV se déplaçant sur le fond marin ont rapidement révélé que le déversement d'hydrocarbures et de gaz se poursuivait depuis deux ou trois emplacements sur la colonne montante cassée et pliée.

Les hydrocarbures continuaient à remonter en surface, et plusieurs techniques ont été essayées pour maîtriser la source de déversement, pour arrêter l'écoulement, ou pour confiner et récupérer les hydrocarbures.

- Un caisson hydraulique a été déployé le 7 mai, mais des cristaux d'hydrate de méthane se sont formés à l'intérieur, augmentant sa flottabilité. Le caisson a commencé à flotter et n'a pu être placé sur la fuite pour recueillir les hydrocarbures.
- Un tube RITT (riser insertion tube tool) a été inséré dans la colonne cassée le 14 mai pour recueillir et récupérer une partie de l'écoulement sur un navire en surface. Le RITT a récupéré en moyenne 2 000 barils (320 m³) d'hydrocarbures par jour, puis a été enlevé pour permettre le lancement des procédures « top kill » (pompage de boue de forage dans le puits).
- Après l'échec de l'opération « top kill » le 29 mai, des préparations ont été effectuées pour mettre en œuvre un plan de système de confinement avec une colonne montante marine inférieure (LMRP).
- La colonne montante a été coupée le 3 juin et le système de confinement LMRP dit « top hat » a été mis en place. Les hydrocarbures et le gaz récupérés ont été siphonnés par une colonne montante jusqu'au navire *Discoverer Enterprise* à un débit d'environ 15 000 bbl (2 400 m³) par jour.
- Un deuxième système de confinement (collecteur sous-marin) a été fixé à l'obturateur le 16 juin et les hydrocarbures et le gaz récupérés ont été brûlés par le biais de la plateforme Q4000 à un débit d'environ 8 500 barils (1 400 m³) par jour.
- Le puits a été coiffé, et le déversement d'hydrocarbures et de gaz a été arrêté le 15 juillet.

Il n'a pas été possible de mesurer directement la quantité d'hydrocarbures et de gaz déversés dans les grands fonds lors de l'accident de Macondo. De nombreuses estimations du débit d'hydrocarbures et de gaz ont été effectuées pendant et après le sinistre, mais les quantités exactes n'étaient pas connues. Il était évident qu'une partie des hydrocarbures déversés atteignait la surface de la mer car la nappe d'hydrocarbures continuait à se former au-dessus du puits quand le système SSDI n'était pas en service, et une partie des hydrocarbures continuait par ailleurs à remonter en surface près du site de déversement (à une distance de quelques kilomètres) alors même que le système SSDI était en service.



Image modifiée à partir de la vidéo de BP obtenue par les ROV

Hydrocarbures et gaz déversés depuis la colonne montante cassée le 11 mai 2010

Ci-dessous : hydrocarbures (pétrole) et gaz naturel s'échappant d'une extrémité de la colonne montante après sa rupture le 3 juin 2010 juste au-dessus du bloc obturateur du puits de Macondo

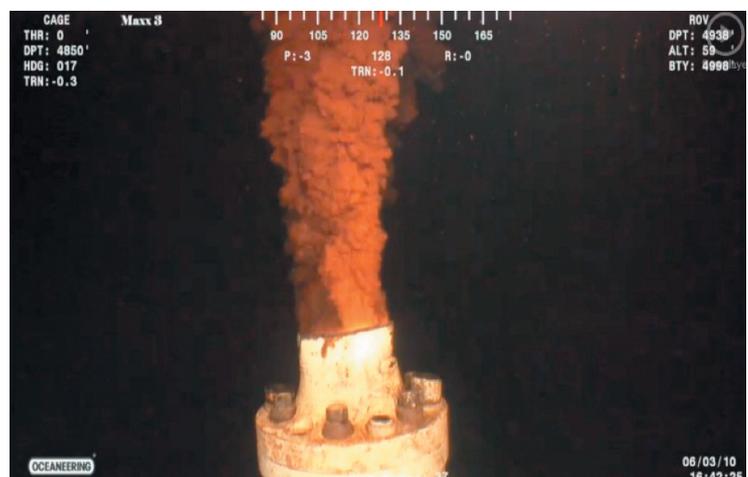


Image modifiée à partir de la vidéo de BP obtenue par les ROV

Les nappes et irisations d'hydrocarbures présentes sur la surface de la mer ont alors commencé à se fragmenter et à dériver sous l'action des vents et des courants dominants. Cependant, un prélèvement d'échantillon d'eau a révélé qu'une partie des hydrocarbures déversés depuis la source n'était pas remontée en surface et avait été dispersée dans la colonne d'eau, tant sous l'action de l'énergie de mélange générée par le rejet que sous l'action du système SSDI.

Les hydrocarbures n'étaient pas déversés sous la forme d'un jet continu de liquide. En raison de la turbulence créée par les conditions du déversement, les hydrocarbures et le gaz étaient déversés dans la mer sous la forme d'un panache de petites gouttelettes d'hydrocarbure et de bulles de gaz. La répartition de la taille de ces gouttelettes d'hydrocarbure et de ces bulles de gaz dépendait de plusieurs paramètres, dont :

- les débits du gaz et des hydrocarbures, et la proportion gaz/hydrocarbure ;
- les pressions et les températures des fluides déversés (le puits de Macondo était foré dans un réservoir de pétrole et de gaz à haute pression et haute température) ;
- la taille et la configuration des orifices par lesquels les hydrocarbures et le gaz s'écoulaient ; et
- la pression et la température de l'eau dans laquelle les hydrocarbures et le gaz se déversaient.

Comme indiqué ci-dessus, certains de ces paramètres sont connus avec certitude et précision, mais d'autres peuvent seulement être estimés avec un degré de certitude et de précision largement inférieur. Les études et modélisations réalisées après l'accident de Macondo (par exemple Socolofsky, 2012), conjuguées aux mesures relevées lors de l'accident et au cours des mois suivants (OSAT, 2010), ont confirmé les caractéristiques générales du comportement des hydrocarbures qui sont présentées dans l'image 4 à la page 18.

Usage de dispersants dans le puits de Macondo

Usage de dispersants sur les hydrocarbures à la surface de la mer

Les appareils aériens ont tout d'abord pulvérisé le dispersant sur les hydrocarbures flottants le 22 avril. Cette opération a été exécutée sous la direction du Federal On-Scene Coordinator (FOSC), l'emploi de dispersant ayant été préalablement autorisé dans le cadre du plan de lutte contre les déversements d'hydrocarbures de la Regional Response Team (RRT). Les appareils aériens ont pulvérisé le dispersant sur les hydrocarbures en dehors d'une zone d'exclusion de sécurité de cinq milles marins autour des navires impliqués dans les efforts de maîtrise de la source. L'épandage de dispersant dans les zones plus proches de la source a eu lieu depuis les navires. Leur objectif était de disperser dans la colonne d'eau les hydrocarbures flottants tout en supprimant l'accumulation de COV dans l'atmosphère afin que le personnel de lutte n'y soit pas exposé.

Alors que l'opération de lutte s'est intensifiée, davantage d'appareils aériens ont été déployés pour pulvériser le dispersant sur les hydrocarbures flottants. Une semaine après le début de l'intervention, la quantité de dispersant pulvérisé avait atteint 522,5 m³ et continuait à augmenter. Alors que l'opération de lutte se poursuivait, de plus en plus de personnes commençaient à s'inquiéter de la quantité de dispersants nécessaire pour lutter contre les nappes de surface. Elles se demandaient notamment s'il serait possible de fabriquer et d'acheter un volume suffisant de dispersant, craignant par ailleurs les effets potentiels du dispersant sur l'environnement. Certains intervenants et des membres du public ont eux aussi exprimé leur inquiétude que certaines personnes soient exposées aux produits chimiques des dispersants ou aux hydrocarbures dispersés.

Facteurs liés à l'usage de dispersants en milieu sous-marin

D'autres moyens efficaces d'utiliser le dispersant ont été étudiés. Il a notamment été envisagé de faire appel à l'injection sous-marine de dispersant directement au niveau du point de déversement. La méthode d'injection sous-marine de dispersant présentait en effet plusieurs avantages potentiels :

- Elle renforcerait la sécurité de l'intervention et des efforts de maîtrise de la source en réduisant la quantité d'hydrocarbures remontant à la surface. Elle réduirait l'exposition potentielle du personnel de lutte à bord des navires de surface aux COV s'évaporant des hydrocarbures.
- Elle permettrait de dépendre dans une moindre mesure des opérations ultérieures de confinement et récupération en mer, de brûlage contrôlé in-situ, d'épandage de dispersant en surface, et de protection et traitement du littoral en réduisant la quantité d'hydrocarbures flottants.
- Elle offrirait un taux de rencontre supérieur au taux obtenu par l'épandage de dispersant sur les hydrocarbures flottants. Le dispersant serait efficace à des taux de traitement plus faibles, ce qui aurait pour effet d'abaisser la quantité totale de dispersant nécessaire pour lutter contre le déversement.
- Elle pourrait se poursuivre en continu, de jour comme de nuit (24 h sur 24, 7 jours sur 7), tandis que les appareils aériens peuvent uniquement déverser le dispersant quand il fait jour.
- La plupart des conditions météorologiques et océaniques difficiles n'auraient aucune incidence sur sa mise en œuvre, ce qui n'était pas le cas pour les autres méthodes d'intervention en mer.

Il existait toutefois de nombreuses incertitudes et questions quant à l'injection de dispersant en milieu sous-marin, dont notamment les points suivants :

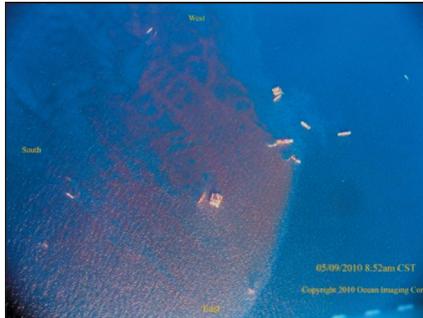
- La méthode d'injection sous-marine de dispersant n'avait jamais été mise en œuvre auparavant. Serait-elle efficace ? Et si tel était le cas, quelles en seraient les conséquences ?
- Quelles seraient les répercussions à long terme de l'usage de dispersant en milieu sous-marin ?
 - Quels seraient les effets de la génération de grandes quantités d'hydrocarbures dispersés près de la source pendant de longues durées ?
 - Comment serait-il possible de réaliser une analyse des avantages environnementaux et économiques en fonction des options de lutttes envisagées (NEBA) alors que le milieu sous-marin n'avait pas été étudié en profondeur ?
- La biodégradation des hydrocarbures dispersés pourrait-elle avoir lieu dans les profondeurs sous-marines, où la température de l'eau est plus basse ?
 - Si une telle biodégradation se produisait bel et bien, le milieu serait-il privé d'une grande partie de son oxygène ?

Tests de l'usage de dispersants en milieu sous-marin

Les autorités de réglementation (le Federal On-Scene Coordinator pour la lutte contre le déversement d'hydrocarbures (FOSC) et l'EPA) ont autorisé BP à réaliser des essais pour tester la nouvelle méthode d'injection de dispersant en milieu sous-marin. Plusieurs tests utilisant des quantités limitées de dispersant ont été mis en œuvre le 30 avril, du 2 au 4 mai et du 10 au 11 mai.

L'encadré 3 à la page 40 présente plusieurs photographies aériennes prises pendant les tests d'injection de dispersant en milieu sous-marin du 9 au 12 mai. Bien qu'il soit difficile de quantifier avec précision la quantité totale d'hydrocarbures présents sur la surface de la mer à partir de ces photographies, elles fournissent d'excellentes preuves qualitatives des effets de l'usage des dispersants en milieu sous-marin. Le photographe a pu confirmer que la réduction observée de la surface occupée par les hydrocarbures allait bien au-delà de la zone captée par les images.

Encadré 3 Preuves visuelles de l'efficacité de la méthode SSDI



9 mai, 08 h 52

Cette photographie a été prise avant l'injection de dispersant. Les hydrocarbures flottant au-dessus de la source du déversement forment une couche continue. Les hydrocarbures s'écoulant de la colonne montante cassée remontent constamment dans la colonne d'eau et parviennent à la surface de la mer.



10 mai, 08 h 40

La même vue aérienne a été prise trois heures après le début de l'opération d'injection de dispersant dans les hydrocarbures et le gaz se déversant depuis l'extrémité de la colonne montante cassée à travers un tube guidé par le ROV.

La surface occupée par les hydrocarbures flottants est nettement inférieure par rapport à la photographie précédente. Il est raisonnable de supposer que la plupart des hydrocarbures ne parviennent plus à la surface de la mer.



10 mai, 17 h 05

Cette photo capture les hydrocarbures flottants après onze heures d'injection sous-marine de dispersant. Seuls des résidus éparpillés des hydrocarbures sont toujours visibles en surface.

L'injection de dispersant en milieu sous-marin a alors été arrêtée.



11 mai, 09 h 10

Cette photographie a été prise cinq heures après l'arrêt de l'injection sous-marine de dispersant et révèle que la surface des hydrocarbures flottants s'est considérablement étendue. Cela indique que les hydrocarbures antérieurement dispersés en milieu sous-marin sous l'action du dispersant injecté remontent maintenant vers la surface de la mer.



12 mai, 08 h 35

Cette image prise 28 heures après l'arrêt de l'injection de dispersant montre que les hydrocarbures flottants occupent à présent la même surface qu'avant le test d'injection de dispersant, bien que les hydrocarbures partent maintenant à la dérive vers le nord en raison d'un changement de la direction du vent.

Injection de dispersant en milieu sous-marin

Méthode sous-marine

Le dispersant a été injecté dans les hydrocarbures et le gaz se déversant depuis l'extrémité de la colonne montante cassée à travers un tube guidé par le ROV jusqu'au 3 juin, moment où la colonne montante a été enlevée. Le dispersant a alors été injecté dans les hydrocarbures et le gaz s'échappant de la tête du puits et du LMRP, et ce jusqu'à l'arrêt du déversement le 15 juillet.

Le dispersant a été injecté à l'aide d'une « lance » ou « tige » tenue par un ROV et guidée par l'intervenant de ce ROV. Les images vidéo prises en direct ont alors montré que la lance se déplaçait dans les hydrocarbures et le gaz déversés et que l'eau était entraînée dans le panache à environ 1 m au-dessus de la tête du puits ou du LMRP. Diverses configurations de lance ou de tige ont été essayées pour injecter le dispersant (voir les photographies à droite).

Débit d'injection du dispersant en milieu sous-marin

Les débits de déversement d'hydrocarbures et de gaz étant inconnus et impossibles à mesurer, il n'a pas été possible de déterminer un dosage précis pour le dispersant à injecter, c'est-à-dire un dosage dispersant/hydrocarbure (DOR) spécifique. Dans les essais préliminaires du système SSDI réalisés en mai 2010, le débit du dispersant injecté allait en moyenne de 17,4 à 37,9 l/min.

Des essais ont été effectués pour déterminer le débit d'injection le plus efficace dans l'intervalle testé et pour évaluer si l'injection de dispersant en milieu sous-marin aurait pour effet de réduire la quantité totale de dispersant nécessaire dans le cadre de l'intervention. Ces essais avaient pour but de déterminer si l'injection de dispersant directement dans les hydrocarbures s'échappant de la tête du puits serait efficace, notamment avec un volume de dispersant substantiellement inférieur au volume que l'équipe d'épandage aérien déversait quotidiennement sur les hydrocarbures flottants. Les essais ont révélé que l'injection sous-marine empêcherait les hydrocarbures de remonter en surface dans la zone voisine du puits. Cependant, le débit d'injection utilisé lors de l'essai n'a pas été suffisant pour disperser tous les hydrocarbures sous-marins. Une proportion partiellement dégradée et altérée des hydrocarbures continuait toujours à atteindre la surface de la mer à plusieurs kilomètres du puits et l'épandage aérien de dispersant a dû poursuivre son action de lutte contre ces hydrocarbures de surface.

Le 26 mai, l'US EPA et l'US Coast Guard (USCG) ont émis une directive (US EPA, 2010a) exigeant que le volume total de dispersant injecté (sur les hydrocarbures de surface et en milieu sous-marin) soit réduit de 75 % par rapport à la quantité quotidienne maximale utilisée jusqu'alors. La directive ordonnait à la partie responsable de cesser l'usage de dispersants de surface en l'absence d'une autorisation écrite préalable de l'USCG. L'injection de dispersant en milieu sous-marin a donc pu se poursuivre, mais uniquement à un taux de 15 000 gal/jour ou 39,4 l/min, soit 357 barils de dispersant/jour.

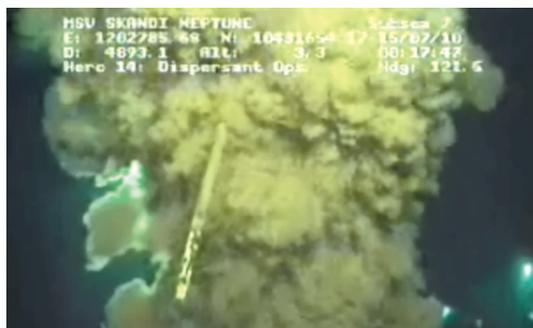


Image modifiée à partir de la vidéo de BP obtenue par les ROV

Quantité de dispersant utilisée

Un peu plus de 7 000 m³ de dispersant au total a été utilisé dans le cadre de l'action de lutte contre l'accident de Macondo.

Plus de 40 % (soit 2 920 m³) de la quantité totale de dispersant ont été injectés en milieu sous-marin.

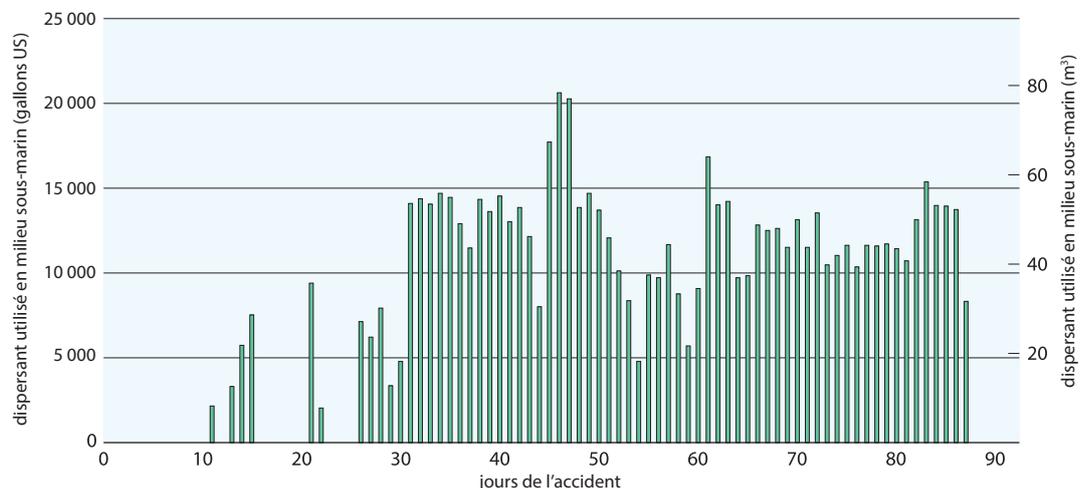
Tableau 9 Usage de dispersant lors de l'accident de Macondo

Dispersant utilisé	Gallons US (au millier près)	m ³
Épandage depuis les appareils aériens	976 000	3 700
Épandage depuis les navires	94 000	360
Injection sous-marine	771 000	2 920
Totaux	1 841 000	6 980

Après les essais réalisés entre la fin du mois d'avril et le début du mois de mai, la quantité quotidienne de dispersant injecté en milieu sous-marin s'est élevée à 55 m³/jour, la pompe d'injection fonctionnant à un débit moyen de 37,9 l/min (image 6). Les données présentées dans le tableau 9 et l'image 6 sont tirées des rapports journaliser publiés par BP sur le site web consacré à l'accident.

Après la directive émise par l'EPA le 26 mai, le volume quotidien moyen de dispersant utilisé dans le cadre de l'intervention a considérablement chuté. L'épandage de dispersants en surface étaient interdit certains jours et, les autres jours, les volumes autorisés étaient substantiellement inférieurs. Entre le 3 et le 5 juin, au moment où la colonne montante a été retirée et le LRMP a été installé, le débit d'injection de dispersant en milieu sous-marin a brièvement augmenté à 76 m³/jour, soit 14 gal/min. À d'autres moments, l'usage quotidien de dispersant en milieu sous-marin est resté à un niveau moyen allant de 30 à 55 m³/jour, soit 22,7 à 39,4 l/min, et ce jusqu'à ce que l'écoulement cesse le 15 juillet.

Image 6 Injection sous-marine de dispersant lors de l'accident de Macondo



Suivi obligatoire de la colonne d'eau

L'injection de dispersant en milieu sous-marin n'avait jamais été utilisée comme méthode de lutte contre un déversement d'hydrocarbures avant l'accident de Macondo, l'usage d'un tel volume de dispersants dans le cadre d'une intervention étant sans précédent. Il s'est donc avéré nécessaire d'assurer le suivi de la colonne d'eau pour répondre aux questions et aux craintes soulevées quant à l'usage de dispersant en milieu sous-marin, à savoir :

- L'injection sous-marine de dispersant directement au point de déversement d'hydrocarbures et de gaz serait-elle efficace ?
- Si cette méthode s'avérait efficace, quelles en seraient les répercussions ?
 - Où les panaches d'hydrocarbures dispersés seraient-ils emportés par les courants ?
 - Quelles seraient les concentrations d'hydrocarbures dispersés dans ces panaches ?
 - Ces concentrations d'hydrocarbures dispersés seraient-elles préjudiciables aux organismes marins y étant exposés ?
 - La biodégradation des hydrocarbures dispersés pourrait-elle avoir lieu dans les profondeurs sous-marines, où la température de l'eau est plus basse ?
 - Si une telle biodégradation se produisait bel et bien, le milieu serait-il privé d'une grande partie de son oxygène, portant ainsi préjudice aux organismes marins ?

L'US EPA a exigé le suivi du dispersant injecté en milieu sous-marin pendant l'intervention pour connaître l'efficacité globale de cette méthode. Elle a également demandé des observations sur le transport des hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau.

Le 10 mai, l'US EPA a émis une directive (EPA, 2010b) mettant en place un plan de suivi en trois phases obligatoire pour poursuivre l'injection de dispersant en milieu sous-marin. La première phase du suivi était nécessaire pour savoir si l'injection sous-marine de dispersant était efficace, c'est-à-dire pour savoir si elle dispersait belle et bien les hydrocarbures sous-marins. Pour ce faire, les mesures suivantes ont été prises :

- utilisation d'un fluoromètre submersible tracté (fluoromètre Turner Designs C3) à 1 m de profondeur pour mesurer la concentration d'hydrocarbures dans l'eau ;
- analyse de la taille des particules à l'aide d'un analyseur LISST (laser in-situ scattering and transmissometry) (Sequoia Scientific, Inc.) à divers intervalles depuis la surface à une profondeur de 550 m pour mesurer la répartition des tailles des gouttelettes d'hydrocarbure ;
- mesurages de l'oxygène dissous à divers intervalles depuis la surface à une profondeur de 550 m pour détecter tout épuisement d'oxygène dû à la biodégradation des hydrocarbures ;
- utilisation d'une sonde TCD pour mesurer la conductivité, la température et la profondeur à divers intervalles depuis la surface jusqu'à une profondeur de 550 m ;
- échantillonnage de l'eau depuis la surface jusqu'à une profondeur de 550 m à des fins d'analyse des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ; et
- observations visuelles aériennes (sous réserve des conditions météorologiques).

La deuxième phase du suivi était exigée si la première phase révélait que l'injection sous-marine de dispersant était bel et bien efficace. Elle a permis d'étendre le suivi réalisé lors de la première phase jusqu'au fond marin, à une profondeur de 1 500 m. Par ailleurs, quelques mesures de suivi supplémentaires ont été ajoutées :

- prises de mesures à l'aide d'un fluoromètre plongé (c'est-à-dire descendu en profondeur et non simplement tracté près de la surface) de la surface au fond marin ;
- analyse de toxicité Rototox™ ; et
- essai de fluorescence sous UV pour détecter les fractions d'HAP à poids moléculaire élevé (> 3 cycles).

La troisième phase définissait les procédures opérationnelles de l'injection sous-marine de dispersant et précisait des paramètres tels que les types de dispersant à utiliser, le taux d'injection de ces dispersants, la méthode de surveillance du taux de pompage et les procédures de lancement et d'arrêt de l'injection pour le FOOSC.

L'obligation de réaliser l'essai de toxicité Rototox™ a permis d'évaluer le risque posé par la méthode SSDI dans sa forme préliminaire et de déterminer si sa mise en œuvre devait être interrompue ou modifiée pour réduire le risque de préjudice pour les espèces marines. Deux seuils ont été fixés :

1. une réduction significative de l'oxygène dissous dans le milieu, c'est-à-dire à moins de 2 mg/l ; ou
2. une réponse toxique excessive, compte tenu des indications des essais de toxicité.

Si l'un des deux seuils était atteint, à la lumière de tous les facteurs pertinents, dont les impacts sur le littoral, sur la surface de la mer, sur la santé humaine et sur l'écologie, les organismes gouvernementaux considéreraient que le risque d'injections sous-marine de dispersant était supérieur à ses bénéfices potentiels et exigeraient donc que le système SSDI soit modifié, voire complètement arrêté.

Les exigences de suivi ont alors été modifiées pour assurer le suivi des eaux non affectées afin d'obtenir des données contextuelles, et un kit de suivi CTD et d'échantillonnage d'eau avec une rosette a également été prévu¹.

Résultats du suivi

Les actions de suivi et d'échantillonnage de la colonne d'eau ont été préparées dans le but de révéler :

- des indications mesurables de l'efficacité de l'injection sous-marine de dispersant, telle que l'emplacement et la concentration des hydrocarbures dispersés dans les panaches sous-marins ; ainsi que
- les risques et conséquences néfastes éventuels de l'injection sous-marine de dispersant, tels qu'une réponse toxique chez les organismes étudiés ou une réduction importante de la teneur en oxygène dissous de l'eau.

Les résultats des actions de suivi et d'échantillonnage d'eau entreprises ont été synthétisées et intégrées à un rapport préparé pour l'Unified Command intitulé *Summary Report for Sub-Sea and Sub-Surface Oil and Dispersant Detection: Sampling and Monitoring*, souvent désigné comme OSAT1 (OSAT, 2010). Ce rapport présente les résultats provenant de plus de 10 000 échantillons prélevés depuis 25 navires de recherche dans le cadre de plus de 125 expéditions et 850 jours en mer. L'OSAT1 inclut un résumé des données recueillies lors du processus SSDI, bien qu'il n'ait pas pour objet de décrire la méthode SSDI. Il expose les résultats de l'échantillonnage d'eau pour déterminer si les activités de lutte dans l'eau sont complètes. Il a permis au FOSC de concentrer son attention sur la lutte sur le littoral et sur les zones tidales situées le long de la côte.

Les données présentées par l'image 7, qui sont tirées d'un rapport publié par le Joint Analysis Group (JAG) chargé d'étudier l'océanographie de surface et sous-marine et les données relatives aux hydrocarbures et aux dispersants (JAG, 2010a), sont des exemples des mesures prises lors du suivi de la colonne d'eau à différents moments, différentes dates et différents endroits. L'image montre :

- la réponse au fluoromètre, la fluorescence (ppb QSDE, ou équivalent de sulfate de quinine dihydraté) en noir ;
- la teneur en oxygène dissous de l'eau (ml/l) en rouge ; et
- l'anomalie de densité de l'eau (kg/m³) en bleu.

Les chiffres présentent des données brutes et servent uniquement à illustrer les résultats obtenus lors du suivi.

¹ La façon la plus courante de concevoir un ensemble d'échantillonnage d'eau consiste généralement à prévoir de 12 à 36 bouteilles de prélèvement d'une capacité de 1,2 à 30 litres regroupées autour d'un cylindre central auquel le CTD ou un autre capteur semblable est attaché.

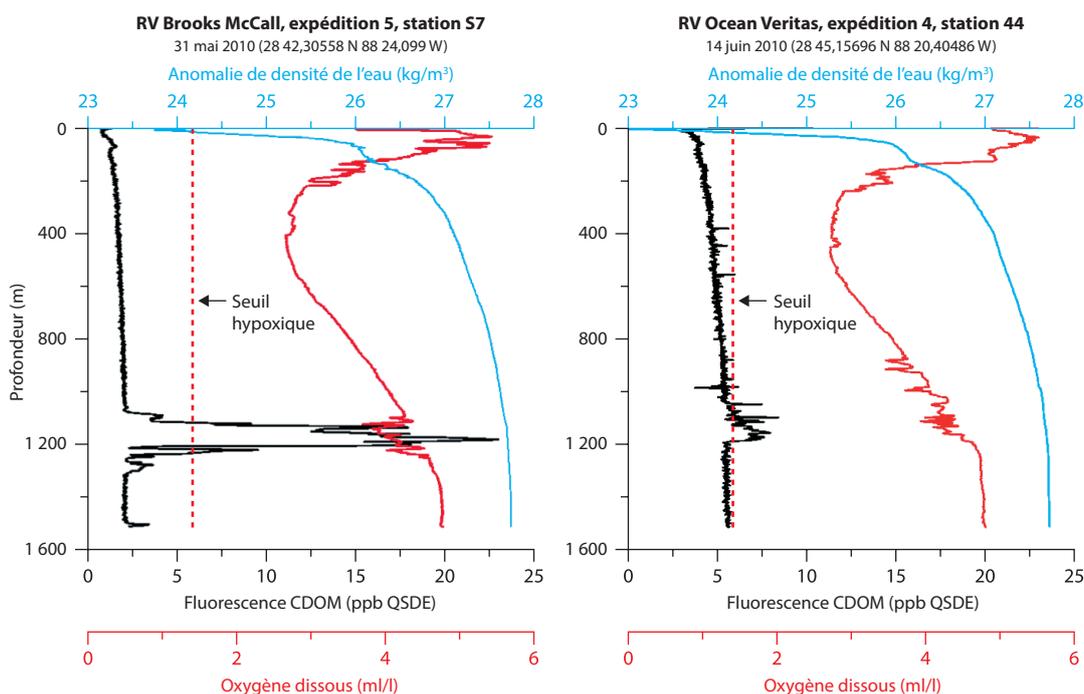
Mesures de fluorométrie et analyse chimique de l'eau

Comme l'a signalé le JAG, les hydrocarbures dispersés (dont les hydrocarbures physiquement dispersés par la turbulence des conditions de déversement et les hydrocarbures dispersés en raison de l'action chimique de l'injection sous-marine de dispersant) ont été détectés par fluorométrie comme panache dilué d'hydrocarbures dispersés à une profondeur d'environ 1 200 m, soit à environ 300 m au-dessus du point de déversement d'hydrocarbures et de gaz. Ces valeurs étaient plus élevées près du site de déversement et diminuaient généralement avec la distance, s'étendant essentiellement du sud-est vers le nord-est, ce qui correspondait aux courants dominants (JAG, 2010a).

Un autre rapport du JAP (JAG, 2012) a conclu ce qui suit :

- Les hydrocarbures détectés ont été classés en hydrocarbures à fractions volatiles (partiellement solubles dans l'eau) et en hydrocarbures à fractions semi-volatiles. La définition de ces deux groupes d'hydrocarbures a permis d'observer des différences au niveau de l'évolution de ces fractions dès le début du déversement. Certains éléments démontrent que les fractions les plus facilement biodégradables, c'est-à-dire les hydrocarbures à fraction volatiles, étaient consommées de préférence.
- La diminution constatée des concentrations d'hydrocarbures avec l'augmentation de la distance depuis la tête du puits était probablement due à plusieurs facteurs, dont avant tout la dilution et la biodégradation. D'autres facteurs, tels que l'adsorption des particules, peut également avoir contribué à cette diminution.
- Les plus grandes concentrations d'hydrocarbures volatils, qui ont été détectées dans l'eau à des profondeurs allant de 900 m à 1 300 m, étaient de l'ordre de 2 112 parties par milliard (ppb), selon les mesures prises dans un échantillon prélevé à 1,2 km de la tête de puits. Au-delà de 20 km depuis la tête de puits, les concentrations d'hydrocarbures volatils étaient largement inférieures à 100 ppb et les valeurs au-delà de 100 km depuis la tête de puits n'étaient pas détectables par les méthodes d'analyse utilisées.
- Les niveaux d'hydrocarbures à fractions semi-volatiles à des profondeurs de 900 m à 1 300 m se situaient essentiellement dans l'intervalle de 1 à 10 ppb à des distances de plus de 10 km depuis la tête de puits. Les niveaux d'hydrocarbures semi-volatils les plus élevés dans un échantillon d'eau étaient de 485 ppb et

Image 7 Exemples de nombreuses mesures prises lors du suivi de la colonne d'eau



JAG, 2010a

ont été relevés dans un échantillon lui aussi prélevé à une distance de 1,2 km de la tête de puits. Des quantités mesurables d'hydrocarbures semi-volatils ont été trouvées à 400 km de la tête de puits et des valeurs supérieures à 10 ppb ont été trouvées jusqu'à environ 275 km de la tête de puits.

Mesures de l'oxygène dissous

Bien que la teneur de l'eau en oxygène dissous ait diminué dans une certaine mesure dans le voisinage du panache d'hydrocarbures dispersés, l'injection de dispersant en milieu sous-marin n'a pas créé de zone pauvre en oxygène susceptible de porter préjudice aux organismes marins.

Résultats de l'échantillonnage et de l'analyse de la colonne d'eau

Des échantillons d'eau ont été prélevés aux endroits où la fluorométrie avait signalé les plus fortes concentrations d'hydrocarbures dispersés et ces échantillons d'eau ont été analysés afin d'y détecter des hydrocarbures spécifiques.

Valeurs de référence pour la santé humaine

Les valeurs de référence fixées pour la santé humaine par l'US EPA en coordination avec le département américain de la Santé et des Services sociaux ont servi à évaluer les risques pour la santé humaine éventuellement posés par une exposition aux eaux contaminées par les hydrocarbures. Ces valeurs de référence correspondent à des seuils fixés pour un certain nombre de composés, dont les COV, les HAP et les métaux.

Au total, 11 634 échantillons (6 090 près du littoral, 750 au large et 4 794 dans les profondeurs) ont été analysés et comparés aux valeurs de référence pour la santé humaine. Aucun des échantillons ne s'est avéré supérieur aux valeurs de référence de l'EPA.

Valeurs de référence pour la vie aquatique

L'EPA a fixé des valeurs de référence signalant des « niveaux inquiétants » de concentrations de HAP dans l'eau et les sédiments afin de détecter tout impact défavorable potentiel sur la vie aquatique. Des échantillons d'eau ont été analysés pour un total de 41 composés chimiques des hydrocarbures, dont 7 composés organiques volatils, 16 HAP apparentés et 18 alkylats homologues aux HAP apparentés. Chacun des composés chimiques a reçu une valeur de toxicité potentielle afin de pouvoir calculer la toxicité cumulée (aiguë ou chronique) du mélange de composés présent dans chaque échantillon. Ces valeurs de référence pour la vie aquatique ont été fixées dans le cadre d'évaluations de toxicité réalisées en laboratoire à l'aide d'eau contaminée et d'un éventail divers d'espèces, d'étapes de vie, de critères et de durées d'exposition.

Au total, 10 578 (6 090 près du littoral, 749 au large et 3 739 dans les profondeurs) échantillons ont été analysés et comparés aux valeurs de référence pour la vie aquatique. Comme l'indiquent les rapports (OSAT, 2010 et OSAT, 2011), environ 1 % du total des échantillons correspondait aux hydrocarbures de Macondo et se trouvait au-dessus des valeurs de référence de l'US EPA, avec 1 % provenant de sites sédimentaires et moins de 1 % provenant de sites aquatiques.

Valeurs de référence pour les dispersants

Les échantillons d'eau ont été analysés afin d'y détecter la présence éventuelle de quatre composés :

- 2-butoxyéthanol (trouvé seulement dans le COREXIT® 9527 utilisé jusqu'en mai, jusqu'à l'épuisement des stocks) ;
- dipropylène glycol n-butyl éther (DPnB) ;
- propylène glycol ; et
- di-iso-octylsulfosuccinate (DOSS).

Des valeurs de référence pour les concentrations de chaque composé individuel dissous dans l'eau de mer ont été utilisées pour fixer les « niveaux inquiétants » en fonction des données disponibles sur les effets biologiques. Ces valeurs ont été définies à des niveaux raisonnablement prudents afin de protéger la vie aquatique.

Au total, 10 178 échantillons (5 262 près du littoral, 682 au large et 4 334 dans les profondeurs) ont été analysés et comparés aux valeurs de référence pour le dispersant. L'OSAT a signalé qu'aucune valeur de référence n'a été dépassée.

Analyses de toxicité

Les analyses réalisées en laboratoire à l'aide des protocoles standard Rototox™ et des hydrocarbures bruts de Macondo dispersés avec le produit COREXIT® 9500A indiquaient que la valeur LC₅₀ du rotifère *B. plicatilis* allait de 10 à 17 ppm. Les valeurs d'hydrocarbures pétroliers totaux (TPH) les plus élevées ayant été observées aux endroits où les analyses de toxicité ont été effectuées étaient considérablement inférieures à ce niveau. Il n'est donc pas surprenant qu'aucun signe de réponse toxique n'ait été constaté dans le cadre des analyses de toxicité Rototox™ réalisées lors de la deuxième phase du suivi obligatoire de la colonne d'eau.

De plus, des analyses de toxicité ont également eu lieu pour diverses espèces benthiques et pélagiques (tableau 10).

Tableau 10 Analyses réalisées pour diverses espèces benthiques et pélagiques lors de l'accident de Macondo

Type d'échantillon	Type d'analyse	Durée	Critère	Nbre d'analyses
Eau	Poissons	96 heures	Survie	126
		7 jours	Survie, croissance, biomasse	36
	Americamysis bahia	96 heures	Survie	93
		7 jours	Survie, croissance, fécondité, biomasse	30
	Americamysis bahia	7 jours	Survie	88
	Oursin	2 heures	Fertilisation	2
	Mollusque	48 heures	Survie, développement embryonnaire	20
	Diatomée	96 heures	Croissance	68
Algue	96 heures	Croissance	68	
Sédiment	Amphipode	96 heures	Survie, croissance	74
		10 jours	Survie, croissance, ré-enfouissement	505
	Ver	10 jours	Survie	112
	Mysidacé	48 heures	Survie	256
		96 heures	Survie, croissance	65
Oursin	60 minutes/ 48 heures	Fertilisation/ Développement embryonnaire	66	

Source : OSAT, 2011

Au total, 3 548 analyses de toxicité ont été réalisées lors du déversement et de l'intervention correspondante, ce qui représente le programme d'analyse le plus étendu jamais mis en œuvre pour caractériser les effets d'un déversement d'hydrocarbures dans le milieu marin. Dans l'ensemble, 90 % des analyses réalisées n'ont révélé aucun effet statistiquement significatif. Aucune des concentrations de composés du dispersant trouvées dans les échantillons de sédiment et d'eau prélevés après le 3 août 2010 dans la zone côtière n'était supérieure aux valeurs de référence aquatiques chroniques de l'US EPA (OSAT, 2011).

Réponse aux craintes concernant les produits de la mer

En raison de certaines craintes liées aux effets potentiels des hydrocarbures et des dispersants sur les produits de la mer, en juin 2010, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et l'US Food and Drug Administration (FDA), en consultation avec l'US EPA et les États du golfe, ont convenu d'appliquer une procédure étendue d'échantillonnage et d'analyse. Les zones fermées à la pêche ont été rouvertes seulement quand les analyses sensorielles et chimiques de tous les produits de la mer échantillonnés dans ces zones ont donné des résultats satisfaisants. Bien que les premiers tests aient été concentrés sur les contaminants d'hydrocarbures, en octobre 2010, la FDA et la NOAA ont élaboré un nouveau test pour détecter des traces des composés du dispersant dans les tissus des poissons (US FDA, 2010). Chaque échantillon analysé présentait des niveaux largement inférieurs aux seuils inquiétants fixés par la FDA, 99 % d'entre eux n'affichant aucun résidu détectable.

À ce jour, aucun des produits de la mer testés par la FDA, la NOAA et les États du golfe n'a présenté des niveaux supérieurs aux seuils fixés par la FDA pour la santé humaine. Les produits de la mer provenant du golfe du Mexique figurent parmi les sources de produits de la mer les plus rigoureusement testées sur le marché américain. Depuis mai 2010, la FDA, la NOAA et les États du golfe ont analysé plus de 10 000 spécimens de poissons, crustacés et coquillages, et les niveaux d'HAP présents dans ces produits de la mer sont systématiquement restés de 100 à 1 000 fois inférieurs aux seuils de sécurité de la FDA (US FDA, 2012).

Évaluation du préjudice causé aux ressources naturelles

Aux États-Unis, la loi intitulée Oil Pollution Act de 1990 prend en charge les impacts environnementaux dus aux déversements par le biais de deux activités :

- **Lutte** : actions entreprises pour confiner et retirer les hydrocarbures de l'eau et du littoral, et pour minimiser tout préjudice causé à la santé et au bien-être du public.
- **Restauration** : actions entreprises pour restaurer ou remplacer les ressources naturelles lésées et pour indemniser le public pour la perte provisoire de jouissance de ces ressources.

Des scientifiques spécialisés dans les actions de lutte, d'évaluation des ressources naturelles et de restauration se sont rendus sur place quelques jours après le début de l'accident pour recueillir des données qui serviraient à évaluer l'impact potentiel des hydrocarbures et des dispersants sur la faune et les habitats, ainsi que sur la perte d'utilisation récréative de ces ressources. C'était le début de la Natural Resource Damage Assessment (NRDA), qui s'est avérée être la plus grande évaluation environnementale jamais entreprise. Au début de l'année 2015, les scientifiques de la NRDA avaient réalisé plus de 240 études, dont des enquêtes sur les impacts benthiques potentiels. Des analyses des données et des évaluations des préjudices potentiels étaient toujours en cours à la date de préparation du présent Guide.

Aspects opérationnels : vue d'ensemble

Les opérations de base mises en œuvre pour l'usage de dispersant en milieu sous-marin sont les suivantes :

- Un navire de surface est utilisé pour transporter les stocks de dispersant et les équipements d'injection nécessaires sur le site du déversement sous-marin d'hydrocarbures.
- Les équipements sont déployés et, si possible, un suivi sous-marin est lancé pour caractériser le déversement d'hydrocarbures en milieu sous-marin.
- Le dispersant est pompé de la surface jusqu'à un collecteur sous-marin. Une bretelle provenant du collecteur est connectée à une buse tenue par un véhicule télécommandé (ROV) situé près du point de déversement.
- Le ROV positionne la buse pour injecter le dispersant directement dans le point d'écoulement des hydrocarbures ou aussi près que possible de ce point.
- Le dispersant est pompé à un débit contrôlé depuis le pont du navire de surface et est injecté par la buse dans les hydrocarbures.
- L'injection sous-marine de dispersant fait l'objet d'un suivi destiné à évaluer son efficacité et à fournir des informations sur les endroits où se trouvent les panaches d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau ainsi que sur tout risque potentiel pour les organismes marins.

Équipements requis

Il est tout d'abord nécessaire de mobiliser les équipements nécessaires sur le site de maîtrise de la source du puits. Le tableau 11 présente un exemple de liste de contrôle de préparation utilisée pour mobiliser les ressources nécessaires.

Tableau 11 Exemple de liste de contrôle de préparation utilisée dans le cadre de l'injection sous-marine de dispersant

Type de ressource	Équipements, fournitures ou autres articles spécifiques
Navire	<ul style="list-style-type: none"> ● Navire de construction offshore pour transporter et déployer le système d'injection sous-marine de dispersant, et navire ravitailleur pour transporter le stock de dispersant
Fournitures chimiques	<ul style="list-style-type: none"> ● Dispersant
Équipements de service	<ul style="list-style-type: none"> ● Plusieurs ROV pour faciliter l'installation et l'injection ● Ensemble de tube spiralé ● Collecteur sous-marin ● Système de pompage de dispersant ● Tuyau et équipement reliant plusieurs navires pour remplir les réservoirs de stockage de dispersant
Kit de suivi du dispersant en milieu sous-marin	<ul style="list-style-type: none"> ● Navire de recherche ● Instruments spécialisés pour assurer le suivi de l'injection sous-marine de dispersant ● Équipe de scientifiques pour soutenir les activités de suivi
Procédures	<ul style="list-style-type: none"> ● Procédures d'installation/d'opération personnalisées selon les navires d'intervention
Planification/Procédures	<ul style="list-style-type: none"> ● Plan de déploiement de dispersant (des réservoirs ISO au navire) ● Plans d'injection de dispersant (dosage dispersant/hydrocarbure, ou DOR) ● Plan de transfert pour les opérations de pompage de ravitaillement ● Planification du suivi du dispersant ● Planification d'urgence pour l'installation
Planification	<ul style="list-style-type: none"> ● Plan d'échelonnement/de séquençage pour l'arrivée des réservoirs de dispersant à la base à terre ● Inclusion du dispersant dans les contrats d'affrètement de navire
Contrats	<ul style="list-style-type: none"> ● Contrat avec le fournisseur de dispersant pour l'achat de stocks supplémentaires de dispersant

Avec l'aimable autorisation de MWCC

Réerves de dispersant

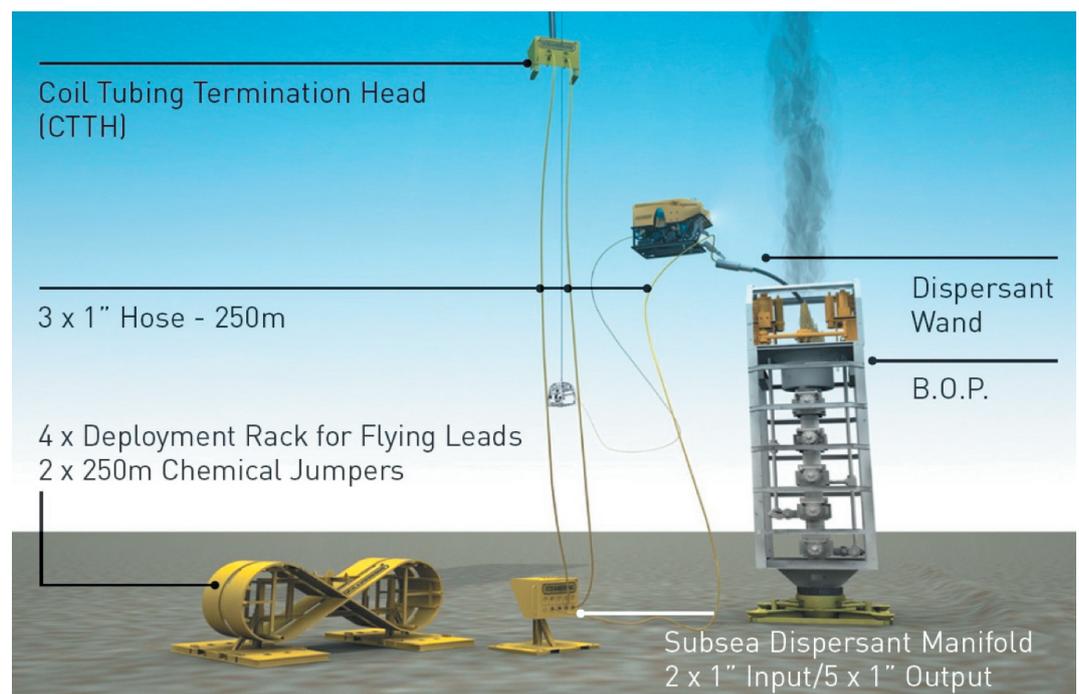
Des réserves de dispersant sont stockées dans le monde entier parmi les réserves mondiales de dispersant (GDS) d'Oil Spill Response Limited (OSRL). Ces réserves contiennent 5 000 m³ (soit 5 millions de litres) de dispersant. Ces réserves sont positionnées de façon à permettre un accès rapide aux dispersants et à mobiliser un stock suffisant pour lutter contre un déversement individuel. Tous les membres d'OSRL ayant signé le contrat de GDS supplémentaire ont accès aux GDS. D'autres organisations de lutte, telles que Marine Well Containment Company (MWCC) dans le golfe du Mexique et Australian Marine Oil Spill Centre (AMOSC) en Australie, ont également préparé des réserves de dispersant pour la zone qu'elles desservent.

Déploiement des équipements SSDI

Une fois que les équipements SSDI sont arrivés sur place, au niveau de la zone de maîtrise de la source, le navire ravitailleur en dispersant est placé sur la surface au-dessus de la tête de puits. Les opérations en cours près de la tête de puits étant parfois multiples (p. ex. activités de coiffage et de confinement, élimination des débris, forage de puits de secours, etc.), tous les navires et toutes les activités doivent faire l'objet d'une coordination minutieuse depuis un système de commande centralisé nommé Simultaneous Operations Command (SIMOPS). Le SIMOPS a pour objectif de coordonner toutes les activités ayant lieu en surface et en profondeur pour assurer la sécurité de tous les navires présents dans les parages.

Une fois que le navire est en place, les tuyaux de surface de dispersant sont attachés aux réservoirs de dispersant. Le collecteur de dispersant et les gueuses avec le tube spiralé sont alors déployés depuis le navire. Les ROV sont utilisés pour raccorder les divers éléments du système d'injection sous-marine de dispersant.

Image 8 Le kit d'outils de SWIS pour l'intervention initiale en milieu sous-marin



Une fois que le ROV est entièrement monté et a été contrôlé, il insère l'injecteur (ou la tige d'injection) dans le panache d'hydrocarbures. Un deuxième ROV aide le premier ROV en éclairant le fond marin et en assurant l'observation vidéo de la zone. Une fois que la tige d'injection est en place, le navire contenant le dispersant démarre l'opération de pompage. Le débit de pompage et l'action du dispersant sont réglés pour maximiser l'efficacité du dispersant en fonction des conditions observées sur place.

Le délai de mobilisation et d'assemblage nécessaire pour ces opérations est probablement de plusieurs jours. Cependant, une fois qu'il est opérationnel, le système peut rester en service 24 heures sur 24 car il n'est limité ni par la nuit, ni par d'autres facteurs, à l'exception de conditions météorologiques de surface extrêmes. Même dans un tel cas, il peut être possible de déployer un système de pompage de dispersant autonome sur le fond marin, c'est-à-dire un système ne nécessitant aucune intervention humaine depuis la surface. MWCC a développé un tel système, qui se nomme système autonome d'injection sous-marine de dispersant (Subsea Autonomous Dispersant Injection, ou SADI). Le système SADI peut être utilisé pour poursuivre l'injection sous-marine en cas d'évacuation d'urgence du personnel présent sur le site. Il se compose d'un compartiment de stockage de dispersant, d'un collecteur et d'un système d'injection par pompage, le tout pouvant être mis en service sur le fond marin sans l'intervention d'un navire de surface.

Débit d'injection du dispersant en milieu sous-marin

Le débit d'injection de dispersant dépend des conditions particulières du déversement d'hydrocarbures. Ce débit est couramment exprimé sous la forme d'un dosage dispersant-hydrocarbure (DOR), qui correspond à la quantité de dispersant nécessaire pour produire une augmentation significative de la proportion de gouttelettes d'hydrocarbure de taille suffisamment réduite pour assurer leur dispersion dans la colonne d'eau.

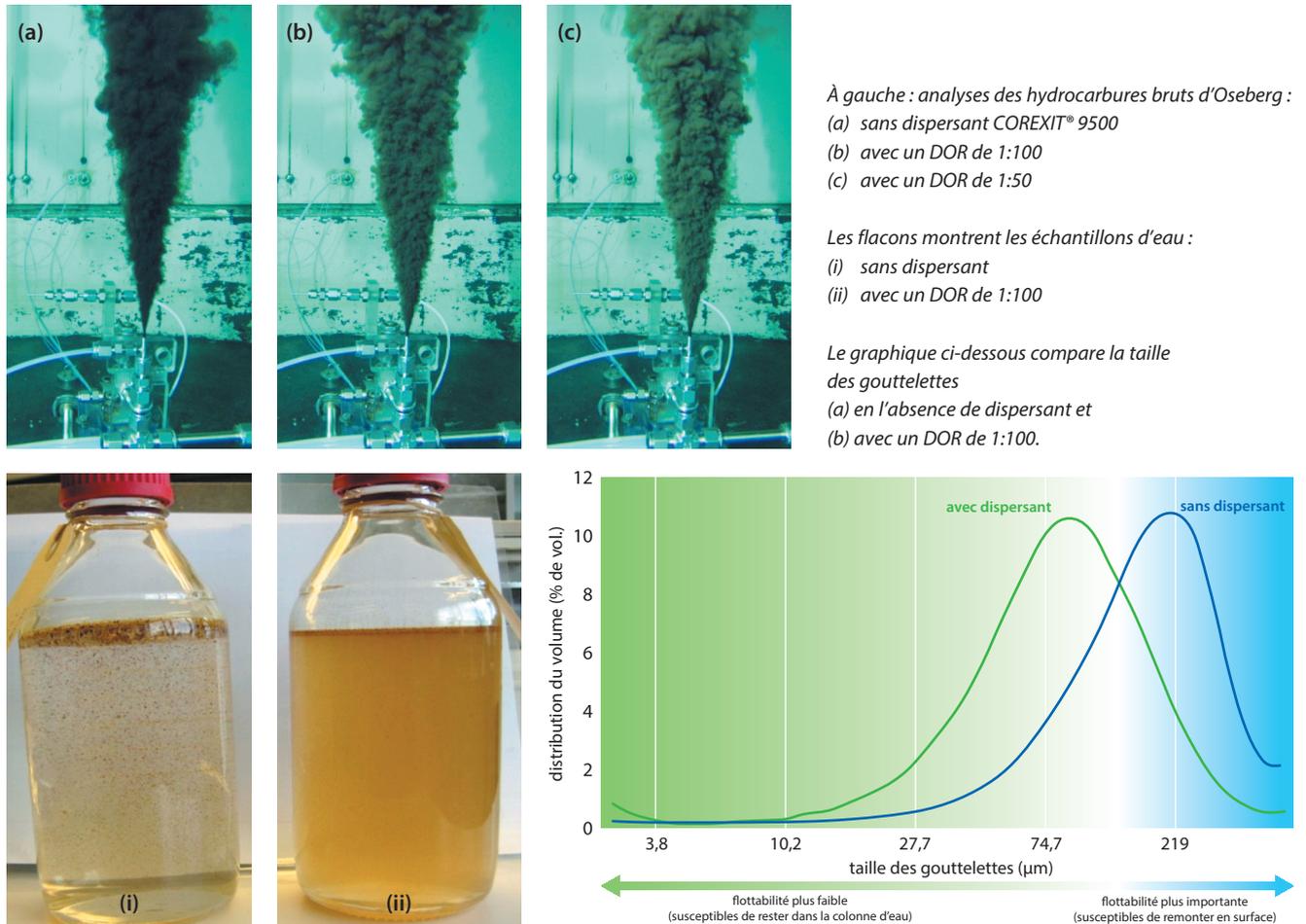
Comme indiqué à la page 51, il n'est pas possible de connaître le DOR utilisé dans les profondeurs lors de l'accident de Macondo car les débits d'hydrocarbures et de gaz n'étaient pas précisément connus.

Des études ultérieures (Brandvik *et al.*, 2014b) utilisant des déversements d'hydrocarbures et de gaz à moindre échelle ont indiqué que des DOR de 1:50, 1:100, voire même moins, peuvent suffire à provoquer une dispersion supplémentaire substantielle. Lors d'un accident, le DOR est basé sur les observations issues du suivi sur le terrain. Le taux de pompage de dispersant est ajusté pour obtenir le DOR minimal nécessaire à une dispersion efficace en fonction du débit d'écoulement d'hydrocarbures existant (voir le tableau 12).

Tableau 12 Taux de pompage de dispersant nécessaires pour obtenir un DOR de 1:50 et de 1:100 pour différents débits d'écoulement d'hydrocarbures

Débit d'écoulement d'hydrocarbures	Taux de pompage de dispersant pour obtenir un DOR de 1:50		Taux de pompage de dispersant pour obtenir un DOR de 1:100	
	Gallons US/minute	Litres/minute	Gallons US/minute	Litres/minute
20 000	12	44	6	22
40 000	23	88	12	44
50 000	29	110	15	55
60 000	35	132	18	66
100 000	58	221	29	110

Image 9 Analyses des hydrocarbures bruts d'Oseberg avec et sans injection de dispersant (source : SINTEF)



Objectifs des actions de suivi et d'échantillonnage en milieu sous-marin

Suivi de l'injection sous-marine de dispersant

Bien que l'injection sous-marine de dispersant soit une méthode de lutte efficace, une partie des hydrocarbures risque de remonter en surface, où il est alors possible d'appliquer les techniques traditionnelles de suivi de déversement d'hydrocarbures, telles que les protocoles SMART (Special Monitoring of Applied Response Technologies). Les programmes de suivi sous-marin sont donc mis en œuvre en parallèle avec les programmes de suivi en surface.

L'American Petroleum Institute (API) a élaboré des lignes directrices destinées au secteur en matière de suivi opérationnel (API, 2013). Ses lignes directrices concernent la collecte en temps réel ou quasi réel de données de suivi susceptibles d'éclairer les décisions opérationnelles prises pour la journée en cours ou le lendemain. Les données de suivi dont la collecte et l'analyse prennent plusieurs jours ne permettent pas la prise de décisions opérationnelles. Les lignes directrices de l'API regroupent les activités de suivi en trois phases prenant en charge :

- l'évaluation de l'efficacité de l'usage de dispersant en milieu sous-marin ;
- la caractérisation de la nature et l'étendue des panaches d'hydrocarbures dispersés en profondeur ou près de la surface ; et
- l'évaluation initiale des effets écologiques potentiels en rapport avec la prise de décisions opérationnelles pour l'intervention.

Ces phases sont lancées dans l'ordre indiqué ci-dessous, chaque phase s'appuyant sur les informations produites par la phase précédente. Chaque phase est censée être mise en œuvre suivant la chronologie du déploiement des ressources d'injection sous-marine de dispersant dans le cadre de l'intervention.

Phase 1 : évaluation de l'efficacité de l'usage de dispersant en milieu sous-marin

La première question à laquelle doit répondre le programme de suivi sous-marin est « la méthode SSDI est-elle susceptible d'être efficace ? »

Au départ, il est nécessaire d'assurer le suivi au niveau du point de rejet pour caractériser la nature du déversement d'hydrocarbures dans le milieu sous-marin, estimer les débits d'hydrocarbures et de gaz, et déterminer les propriétés et le comportement des hydrocarbures déversés. Ces informations servent de données contextuelles préliminaires à l'injection de dispersant et permettent d'orienter la sélection des méthodes d'injection et des taux d'injection.

L'efficacité du dispersant peut être estimée en comparant les données de référence recueillies avant l'injection (telle que l'apparence visuelle, la qualité de l'air et la qualité de l'eau) aux données recueillies après le lancement de l'opération d'injection. L'efficacité du dispersant peut être évaluée par les moyens suivants :

- par voie visuelle, en examinant les images provenant des caméras vidéo des ROV pour déterminer si la forme et la couleur des hydrocarbures déversés changent lorsque le dispersant est injecté ;
- par voie acoustique, en analysant les données de rétrodiffusion générées par un sonar monté sur les ROV, l'imagerie sonar du jet d'hydrocarbures avant et après l'injection de dispersant pouvant également être révélatrice de l'efficacité du dispersant, car l'écho du sonar, à une longueur d'onde adéquate, renvoie normalement un signal de rétrodiffusion fort avant l'injection, mais un signal beaucoup plus faible après l'injection ;
- par voie visuelle, en analysant la zone couverte par les hydrocarbures à la surface de la mer sur les photographies aériennes, qui doivent être prises avant et après l'injection sous-marine de dispersant pour déterminer si cette méthode réduit bel et bien la quantité d'hydrocarbures atteignant la surface ;
- par suivi aérien, en surveillant les COV et la limite inférieure d'explosivité (LIE) sur les navires proches du site de forage avant et après l'injection de dispersant.

Aucune de ces techniques ne permet, de façon individuelle, de quantifier directement l'efficacité du dispersant. Cependant, utilisées conjointement, elles génèrent des données fournissant suffisamment d'éléments pour prendre des décisions opérationnelles en matière de poursuite ou de modification de l'usage de dispersant. Il convient de remarquer que les changements de l'expression des hydrocarbures en surface prennent du temps et sont fonction des vents et des courants de surface, ainsi que du délai nécessaire pour que les hydrocarbures remontent dans la colonne d'eau.

Phase 2 : caractérisation de la nature et de l'étendue des panaches d'hydrocarbures dispersés en profondeur ou près de la surface

Une fois que la méthode SSDI a fait ses preuves, la phase suivante cherche à définir l'ampleur et le comportement des panaches d'hydrocarbures dispersés en milieu sous-marin. Cette phase de suivi vise les objectifs suivants :

- déterminer l'emplacement, l'étendue et les caractéristiques des hydrocarbures dissous et dispersés dans la colonne d'eau ;

- caractériser le mouvement latéral et vertical des hydrocarbures dissous et dispersés ; et
- documenter les changements de concentration des hydrocarbures alors qu'ils s'éloignent de la source.

Les données océanographiques locales alliées aux modèles hydrodynamiques éventuellement disponibles permettent de déterminer la direction probable du mouvement des hydrocarbures en milieu sous-marin.

Suivi de la colonne d'eau

La principale stratégie de suivi fait appel à un navire de recherche muni d'un portique en A et d'un treuil pour réaliser l'échantillonnage avec une sonde CTD et un échantillonneur à rosette. Le CTD est muni d'un fluoromètre, d'un capteur d'oxygène dissous et d'un analyseur de tailles de particules par diffusion laser (p. ex. LISST).

Grâce à cette stratégie, des échantillons d'eau sont prélevés et conservés afin de faire l'objet d'une analyse chimique détaillée par la suite. Cet échantillonnage a lieu à des profondeurs déterminées par les résultats des valeurs prises par le CTD pour des stations sélectionnées. Pour les mesures de l'oxygène dissous effectuées à bord d'un navire, les échantillons doivent être prélevés à des profondeurs supérieures, égales et inférieures à tout niveau présentant une augmentation de la réponse fluorométrique.

Un analyseur de tailles de particules par diffusion laser fournit des mesures in-situ et en temps réel de la répartition des tailles des gouttelettes d'hydrocarbures dispersées. Une réduction importante de la taille des gouttelettes est révélatrice de la dispersion des hydrocarbures.

Échantillonnage d'eau

La détermination des points d'échantillonnage d'eau doit découler des informations obtenues à partir d'un modèle 3D fiable de déversement sous-marin d'hydrocarbures. Si un tel modèle n'est pas disponible, il est nécessaire d'élaborer une grille d'échantillonnage dont le point de déversement constitue le centre. Des stations doivent être établies selon un motif radial s'étendant depuis le centre. De plus, les valeurs relevées par le fluoromètre lors de chaque lancement du dispositif CTD et les mesures obtenues par diffusion de la lumière doivent servir à déterminer la trajectoire suivie par les hydrocarbures dispersés.

Après la récupération des instruments, les échantillons d'eau doivent être placés dans des conteneurs adéquats, puis conservés en vue d'être analysés.

Phase 3 : évaluation initiale des effets écologiques potentiels

Cette phase de suivi vise à caractériser pleinement tous les échantillons d'eau prélevés lors des lancements du dispositif CTD à l'aide de techniques de pointe pour l'analyse en laboratoire des analytes pétroliers et des marqueurs de dispersant. Une fois que les échantillons d'eau ont été prélevés, ils doivent être transportés jusqu'à la côte, puis rapidement transférés vers un laboratoire certifié et agréé en employant des procédures préservant l'intégrité de la chaîne de contrôle. Les délais de transport maritime, de transfert et de traitement en laboratoire peuvent représenter un minimum de cinq jours pour le traitement d'un échantillon en fonction du lieu où s'est produit l'accident. Pour un accident de grande envergure donnant lieu au prélèvement d'un grand nombre d'échantillons, au moins 7 à 10 jours peuvent s'écouler avant de recevoir des résultats d'analyse conformes aux normes en vigueur pour l'assurance et le contrôle qualité (AQ/CQ). Il est peu probable qu'il existe de nombreux endroits au monde disposant de laboratoires suffisamment bien équipés pour réaliser, dans le cadre de la phase d'échantillonnage d'eau et de suivi, des analyses toxicologiques et chimiques à un niveau semblable à l'intervention lancée lors de l'accident de Macondo.

Conclusion

Qu'ils soient répandus sur des hydrocarbures flottants ou injectés en milieu sous-marin, les dispersants visent le même objectif : minimiser le préjudice écologique et socio-économique global en empêchant les hydrocarbures déversés de dériver vers les habitats côtiers et d'atteindre le littoral. L'usage de dispersants sur les hydrocarbures flottants les dispersent dans la couche supérieure de la colonne d'eau, où ils sont rapidement dilués, puis biodégradés. L'usage de la méthode d'injection sous-marine de dispersant (SSDI) est destinée à empêcher les hydrocarbures déversés d'atteindre la surface de la mer en dispersant ces hydrocarbures dans l'eau près du point de déversement. Cette action présente un avantage considérable pour la santé et la sécurité du personnel d'intervention, qui est ainsi substantiellement moins exposé aux composés organiques volatils (COV) présents sur le site de déversement.

L'expérience acquise lors de l'usage de dispersant en milieu sous-marin suite au déversement du puits de Macondo en 2010 a révélé que la méthode SSDI peut constituer une méthode efficace de lutte contre les éruptions d'hydrocarbures et de gaz en milieu sous-marin. Si la méthode d'injection sous-marine de dispersant n'avait pas été employée, un plus grand volume d'hydrocarbures aurait atteint la côte. Les défis liés à la mise en œuvre d'une intervention pour lutter contre un déversement d'hydrocarbures à 1 550 m sous la surface de la mer avec une méthode jamais utilisée auparavant étaient considérables. Un degré considérable d'ingéniosité et de savoir-faire a dû être appliqué pour faire de l'injection sous-marine de dispersant (SSDI) une méthode d'intervention viable dans le cadre de la plus grande intervention jamais réalisée contre un déversement d'hydrocarbures.

La méthode SSDI, en tant qu'intervention en milieu sous-marin, propose de nombreux avantages par rapport à la stratégie consistant à intervenir une fois que les hydrocarbures déversés sont remontés à la surface. L'usage de la méthode SSDI :

- traite les hydrocarbures au point de déversement ;
- nécessite une quantité moindre de dispersant que les traitements de surface ;
- réduit l'exposition potentielle du personnel de lutte aux COV et aux hydrocarbures ;
- peut être mise en œuvre en continu, de jour comme de nuit, et par pratiquement toutes sortes de conditions météorologiques, contrairement aux autres méthodes employées en surface.

La méthode SSDI a des possibilités, des limites, des avantages et des risques qui lui sont propres. Tout comme pour toute autre méthode d'intervention, les avantages et les risques liés à la méthode SSDI doivent être pris en compte dans le cadre d'une analyse des avantages environnementaux et économiques en fonction des options de luttes envisagées (NEBA). L'injection de dispersant entraîne la formation d'un plus grand nombre de petites gouttelettes à partir des hydrocarbures déversés, ces gouttelettes étant alors diluées dispersées dans la colonne d'eau, puis biodégradées dans une très grande mesure. La méthode SSDI présente les avantages suivants :

- La dispersion efficace des hydrocarbures déversés dans la colonne d'eau empêche les hydrocarbures de remonter à la surface de la mer, où ils pourraient partir à la dérive et atteindre le littoral, causant par là un préjudice grave aux habitats côtiers vulnérables et perturbant les activités socio-économiques.
- La dispersion des hydrocarbures dans l'eau sous la forme de petites gouttelettes favorise une colonisation rapide des micro-organismes dégradant le pétrole qui sont naturellement présents dans les milieux océaniques. Ces micro-organismes biodégradent substantiellement la plupart des hydrocarbures en l'espace de quelques jours ou quelques semaines. Le dispersant est lui aussi biodégradé.

Cependant, l'augmentation de la quantité et de la concentration des hydrocarbures dispersés dans l'eau accroît le risque encouru par les organismes marins en raison de leur exposition à ces hydrocarbures, notamment à proximité de la source.

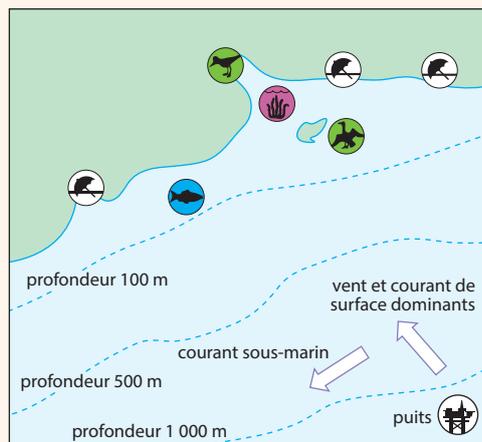
Toutes les parties concernées doivent comprendre les compromis liés à l'usage de la méthode SSDI, qui devraient idéalement être pris en charge lors de la planification d'urgence de lutte contre les déversements d'hydrocarbures.

La logistique de mise en œuvre de la méthode SSDI nécessite un grand nombre d'équipements spécialisés, d'intervenants bien formés et d'autres éléments de soutien. Plusieurs ROV sont nécessaires avec des navires de ravitaillement dédiés au large. L'usage de dispersants en milieu sous-marin exige un suivi sous-marin pour déterminer si son action est efficace et la direction dans laquelle les panaches d'hydrocarbures sous-marins seront emportés par les courants d'eau dominants. Pour évaluer toute possibilité de toxicité des hydrocarbures dispersés sur les organismes marins, il peut s'avérer nécessaire de réaliser des études de suivi et d'échantillonnage d'eau approfondies accompagnées d'analyses chimiques et d'analyses de toxicité. Ces analyses ont été effectuées lors de l'accident de Macondo. Bien que les études soient toujours en cours à la date de publication du présent Guide, les données disponibles indiquent que les craintes quant au risque important de toxicité couru par les organismes marins, à la raréfaction d'oxygène dans l'eau en raison de la biodégradation et à la persistance du dispersant dans la colonne d'eau étaient sans fondement, et que l'usage de dispersant en milieu sous-marin s'est avéré être une méthode très efficace de lutte contre le déversement.

Annexe : Quatre scénarios de planification de l'analyse des bénéfices

Scénario 1

Un puits d'exploration subit une perte de contrôle et l'obturateur est défaillant. Des hydrocarbures bruts et du gaz commencent à se déverser à un débit estimé de 3 000 m³ (19 000 bbl) par jour.



- Le puits se situe à une profondeur de 1 100 m.
- Les nappes d'hydrocarbures de surface se dirigent vers le littoral sous l'action de vents de 15 nœuds et des courants de surface.
- Il existe un courant sous-marin parallèle à la côte.
- La hauteur des vagues est d'environ 1,5 m.
- Des zones de pêche se situent à proximité des côtes et des herbiers marins dans des eaux peu profondes.
- Parmi les ressources côtières susceptibles d'être touchées par les hydrocarbures figure une vasière au niveau d'un estuaire accueillant une population importante d'oiseaux nicheurs. Une île au large est l'habitat d'une colonie d'oiseaux de mer. Il existe trois stations touristiques prisées dans les parages.

Résumé de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de luttes envisagées (NEBA)

Évaluer les données

En l'absence de toute intervention et compte tenu des conditions ambiantes, la modélisation annonce une probabilité de 80 % que les hydrocarbures déversés et dérivant en surface atteignent la côte au bout de quatre jours. Durant cet intervalle, les hydrocarbures déversés devraient être progressivement altérés et émulsifiés. La quantité d'hydrocarbures déversés doit diminuer dans un premier temps en raison des pertes par évaporation, puis augmenter sous l'action de l'émulsification. Cette situation est susceptible d'entraîner 10 000 m³ d'hydrocarbures émulsifiés par jour qui menaceraient la côte au bout de quatre jours. Le gaz libéré avec les fluides du puits serait dissous avant d'atteindre la surface.

Prédire les résultats

Les zones situées près des côtes et les zones côtières étant très vulnérables, leur protection contre les hydrocarbures produirait une bénéfice écologique significative. La vasière estuarienne est productive sur le plan biologique et difficile à protéger au moyen de barrages flottants ou à nettoyer si elle est souillée. Si la colonie d'oiseaux de mer n'abrite pas d'espèces en danger, elle fait de l'île une zone très prisée où des bateaux de touristes accostent quotidiennement. Les stations balnéaires participent de façon très importante à l'économie de la région et leur rentabilité dépend des plages et des sports aquatiques. Le tourisme est saisonnier, mais le sinistre se produit pendant la haute saison. La menace à laquelle font face les plages peut engendrer une perturbation immédiate et est susceptible d'entamer la confiance des touristes dans la région, voire de réduire le volume des réservations futures. Si la pêche côtière est importante sur le plan local, cette activité économique reste assez faible par rapport au tourisme.

suite...

Équilibrer les compromis

Ni le confinement et la récupération en mer, ni le brûlage contrôlé in-situ ne pourraient venir à bout de la quantité d'hydrocarbures déversés dans le délai imparti. L'usage de dispersant en surface est possible et les analyses montrent que les hydrocarbures bruts sont réactifs au dispersant avant leur émulsification, sous réserve que le traitement ait lieu dans un délai d'environ 24 heures. Les conditions ambiantes, caractérisées par des vagues de 1,5 mètres de hauteur et des vents de 15 nœuds, sont propices à l'usage de dispersants. Cependant, les hydrocarbures remontant en surface étant susceptibles de rapidement s'étendre et se fragmenter, le ciblage et le traitement de ces hydrocarbures flottants présentent des difficultés, même si l'opération est mise en œuvre à partir de navires et d'appareils aériens. Compte tenu du dosage dispersant-hydrocarbure (DOR), qui est de 1:20, il est nécessaire d'appliquer environ 150 m³ de dispersant par jour. Le système d'épandage aérien disponible, qui peut être déployé dans un délai de 24 heures, est capable d'envoyer jusqu'à 100 m³ de dispersant par jour. Un navire présent sur place est capable de lancer l'intervention avec son système de pulvérisation embarqué et son stock de 5 m³ de dispersant.

La mobilisation d'un système d'injection sous-marine de dispersant dans le cadre d'une opération de fermeture de puits permettrait de démarrer le traitement dans un délai de sept jours, le dispersant étant fourni par les réserves mondiales. L'injection au niveau de la tête de puits augmenterait grandement, non seulement le ciblage de l'opération de dispersion, mais aussi le volume d'hydrocarbures remontant en surface. Le DOR pourrait diminuer à 1:50 voire moins, ce qui aurait pour effet de réduire le volume de dispersant utilisé quotidiennement de plus de 50 %. Il serait alors possible de minimiser, voire d'arrêter complètement, la pulvérisation de dispersant en surface.

Le renforcement de la dispersion sous-marine des hydrocarbures par l'injection de dispersant engendrerait un risque accru pour les organismes marins pélagiques, principalement dans un rayon de quelques kilomètres autour du puits. Cependant, la dilution des hydrocarbures dispersés (i) ferait chuter les concentrations sous les seuils de toxicité dans les zones environnantes, (ii) rehausserait la biodégradation et (iii) atténuerait grandement la contamination de la zone côtière vulnérable.

Il est prévu que le puits soit coiffé dans les 15 jours.

Sélectionner les meilleures options

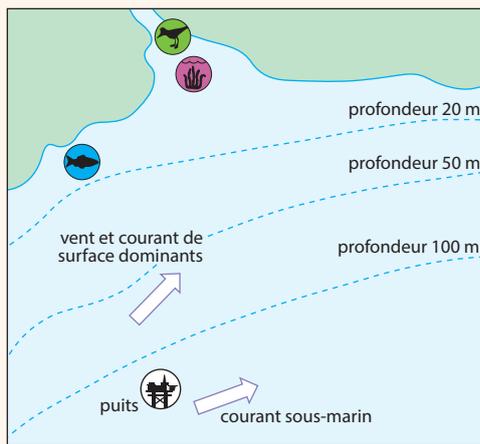
L'usage initial de dispersant en surface pour les hydrocarbures flottants, suivi de l'injection sous-marine dès que sa mobilisation est possible, serait efficace et constituerait le principal outil de l'intervention.

Les opérations de confinement et de récupération sur le littoral seraient mises en œuvre et cibleraient les sites écologiquement sensibles.

Le nettoyage de la côte aurait lieu sur les plages de sable touristiques.

Scénario 2

Un puits d'exploration subit une perte de contrôle et l'obturateur est défailant. Des hydrocarbures bruts et du gaz commencent à se déverser à un débit estimé d'environ 3 000 m³ (19 000 bbl) par jour.



- Le puits se situe à une profondeur de 130 m.
- Les nappes d'hydrocarbures de surface se dirigent vers le littoral sous l'action de vents de 10 nœuds et des courants de surface.
- Il existe un courant sous-marin parallèle à la côte.
- La hauteur des vagues s'élève à environ 0,5 m.
- Des zones de pêche se situent à proximité des côtes et des herbiers marins dans des eaux peu profondes.
- Parmi les ressources côtières susceptibles d'être touchées par les hydrocarbures figure une vasière au niveau d'un estuaire accueillant une population importante d'oiseaux nicheurs.

Résumé de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de luttes envisagées (NEBA)

Évaluer les données

En l'absence de toute intervention et compte tenu des conditions ambiantes, la modélisation annonce une probabilité de 95 % que les hydrocarbures déversés et dérivant en surface atteignent la côte au bout d'environ deux jours. Durant cet intervalle, les hydrocarbures déversés devraient être progressivement altérés et émulsifiés. La quantité d'hydrocarbures déversés doit diminuer dans un premier temps en raison des pertes par évaporation, puis augmenter sous l'action de l'émulsification. Cette situation est susceptible d'entraîner 10 000 m³ d'hydrocarbures émulsifiés par jour qui menacent la côte au bout de deux jours.

Prédire les résultats

Les zones situées près des côtes et les zones côtières étant vulnérables, leur protection contre les hydrocarbures produirait un bénéfice écologique significatif. La vasière estuarienne est productive sur le plan biologique et difficile à protéger au moyen de barrages flottants ou à nettoyer si elle est souillée. La pêche côtière est une activité importante sur le plan local.

Équilibrer les compromis

Le gaz mélangé aux fluides du puits n'aurait pas le temps de se dissoudre totalement et remonterait donc au niveau du puits. Cela restreindrait gravement les opérations à proximité du site en raison des risques pour la sécurité. La lutte contre la pollution de surface serait donc limitée aux zones éloignées du site.

Ni le confinement et la récupération en mer, ni le brûlage contrôlé in-situ ne pourraient venir à bout de la quantité d'hydrocarbures déversés dans le délai imparti. L'usage de dispersant en surface est possible et les analyses montrent que les hydrocarbures bruts sont réactifs au dispersant avant leur émulsification,

suite...

sous réserve que le traitement ait lieu dans un délai d'environ 24 heures. Les conditions ambiantes, caractérisées par des vagues de 0,5 mètres de hauteur et des vents de 10 nœuds, sont propices à l'usage de dispersants. Cependant, les hydrocarbures remontant en surface étant susceptibles de s'étendre et se fragmenter rapidement, surtout sous l'action du gaz présent dans les fluides du puits, le ciblage et le traitement de ces hydrocarbures flottants présentent des difficultés, même si l'opération est mise en œuvre à partir de navires et d'appareils aériens. Compte tenu du dosage dispersant-hydrocarbure (DOR), qui est de 1:20, il est nécessaire d'appliquer environ 150 m³ de dispersant par jour pour traiter tous les hydrocarbures. Le système d'épandage aérien disponible, qui peut être déployé dans un délai de 24 heures, est capable d'envoyer jusqu'à 100 m³ de dispersant par jour. Un navire présent sur place est capable de lancer l'intervention avec son système de pulvérisation embarqué et son stock de 5 m³ de dispersant. La législation nationale autorise la pulvérisation jusqu'à l'isobathe de 20 m de profondeur.

La mobilisation d'un système d'injection sous-marine de dispersant peut être retardée ou limitée par la présence de gaz en surface. Des évaluations spécifiques doivent être réalisées pour étudier la faisabilité du déploiement d'un système d'injection sous-marine. Si elle s'avérait possible, l'injection au niveau de la tête de puits augmenterait grandement le ciblage de l'opération de dispersion tout en réduisant considérablement le volume d'hydrocarbures remontant en surface. Le DOR pourrait diminuer à 1:50 voire moins, ce qui aurait pour effet de réduire le volume de dispersant utilisé quotidiennement de plus de 50 %. Dans un tel cas, la poussée de gaz pourrait transférer les hydrocarbures dispersés dans la couche supérieure de la colonne d'eau au lieu de créer un panache sous-marin. Il serait alors possible de minimiser grandement, voire d'arrêter complètement, l'épandage de dispersant en surface.

Le renforcement de la dispersion sous-marine des hydrocarbures par l'injection de dispersant engendrerait un risque accru pour les organismes marins pélagiques, principalement dans un rayon de quelques kilomètres autour du puits. La dilution des hydrocarbures dispersés (i) ferait chuter les concentrations sous les seuils de toxicité dans les zones environnantes, (ii) rehausserait la biodégradation et (iii) atténuerait grandement la contamination de la zone côtière vulnérable.

En fonction de la situation exacte, il serait possible de coiffer le puits dans les 15 jours ou d'arrêter l'écoulement grâce au forage d'un puits de secours.

Sélectionner les meilleures options

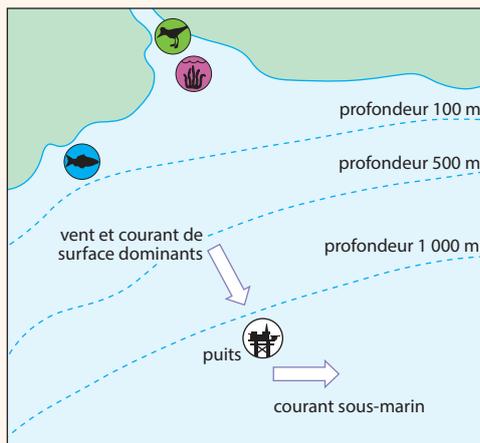
L'usage initial de dispersant en surface pour les hydrocarbures flottants, suivi de l'injection sous-marine si sa mobilisation et son déploiement sont possibles en toute sécurité, constituerait une partie efficace de l'intervention.

Les opérations de confinement et de récupération du littoral seraient mises en œuvre et cibleraient la zone de la crique, qui est écologiquement vulnérable. Étant donné qu'il s'agit d'une zone reculée à l'écart des grands centres urbains, la technique de brûlage côtier in-situ serait utilisée.

La possibilité de lancer un nettoyage de la côte serait également envisagée selon l'ampleur de la contamination et la nature des habitats côtiers touchés.

Scénario 3

Un puits d'exploration subit une perte de contrôle et l'obturateur est défailant. Des hydrocarbures bruts et du gaz commencent à se déverser à un débit estimé d'environ 2 000 m³ (12 500 bbl) par jour.



- Le puits se situe à une profondeur de 1 200 m.
- Les nappes d'hydrocarbures de surface s'éloignent du littoral sous l'action de vents de 20 à 25 nœuds et des courants de surface.
- Il existe un courant sous-marin parallèle à la côte.
- La hauteur des vagues s'élève à environ 2,5 m.
- Des zones de pêche se situent à proximité des côtes et des herbiers marins dans des eaux peu profondes, mais ces zones ne sont pas menacées pour l'instant.
- Cependant, parmi les ressources côtières susceptibles d'être touchées par les hydrocarbures si le vent tournait figure une vase à un niveau d'un estuaire accueillant une population importante d'oiseaux nicheurs. Une île au large est l'habitat d'une colonie d'oiseaux de mer. Il existe trois stations touristiques prisées dans les parages.

Résumé de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de luttes envisagées (NEBA)

Évaluer les données

En l'absence de toute intervention et compte tenu des conditions ambiantes, la modélisation annonce une probabilité de 0 % que les hydrocarbures déversés et dérivant en surface atteignent la côte. La modélisation prédit qu'une partie substantielle du déversement sous-marin se dispersera par des mécanismes naturels. Par ailleurs, les hydrocarbures de surface devraient se décomposer et se dissiper en raison de l'état agité de la mer, avec l'apparition provisoire de quelques nappes d'hydrocarbures en surface. Le gaz libéré avec les fluides du puits serait dissous avant d'atteindre la surface.

Prédire les résultats

Les zones situées près des côtes et les zones côtières étant très vulnérables, leur protection contre les hydrocarbures produirait une bénéfice écologique significative. Cependant, les conditions météorologiques ambiantes indiquent que les ressources côtières ne sont pas menacées par les hydrocarbures dans l'immédiat.

Équilibrer les compromis

L'état agité de la mer exclut l'usage de la méthode de confinement et récupération en surface et du brûlage contrôlé in-situ. L'injection sous-marine de dispersant et l'épandage de dispersant en surface sont donc les seules solutions viables pour traiter les hydrocarbures flottants.

suite...

Les prévisions actuelles sont valables si les vents soufflant au large continuent à suivre la même direction à une vitesse de 20 à 25 nœuds pendant les 3 à 5 prochains jours. La modélisation indique que cette situation poursuivra la décomposition des hydrocarbures de surface, sans formation de nappes persistantes.

Sélectionner les meilleures options

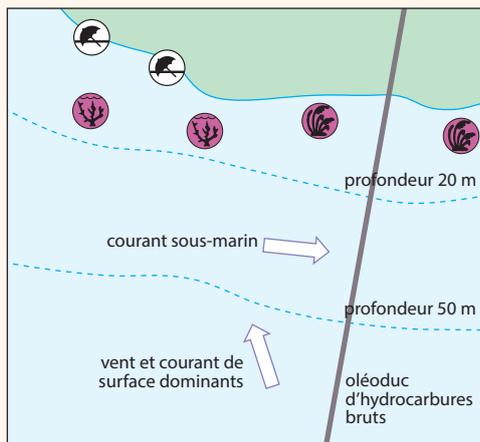
Il est nécessaire d'assurer l'observation aérienne et le suivi de la zone voisine du point de déversement au large pour évaluer et vérifier les prévisions générées par la modélisation, notamment la dissipation rapide des nappes d'hydrocarbures susceptibles d'apparaître en surface.

La mobilisation d'un système d'injection sous-marin de dispersant et d'un système de traitement de surface prêts à être utilisés serait entreprise à titre de précaution. L'usage d'un dispersant ne serait employée que si les conditions météorologiques changeaient au point où des nappes persistantes commençaient à se former en surface. Le premier choix serait d'injecter le dispersant en milieu sous-marin, ce qui serait le moyen le plus efficace de réduire, voire d'éliminer, la quantité d'hydrocarbures remontant en surface.

Un suivi continu de la météo pendant 5 à 10 jours permettrait de prendre des décisions éclairées pour ce qui est de la mobilisation d'autres outils d'intervention, dont les systèmes de confinement et récupération en mer et les mécanismes de protection de la côte. Il convient toutefois de reconnaître que, dans cette région, les vents soufflant au large sont persistants pendant la saison lors de laquelle s'est produit l'accident, et il est donc peu probable que ces ressources soient mises en œuvre à moyen terme.

Scénario 4

Un oléoduc transportant des hydrocarbures bruts est endommagé par l'ancre d'un navire en mouvement. La conduite est fermée, mais des hydrocarbures sont détectés à la surface de la mer.



- L'accident s'est produit à une profondeur de 50 m.
- Les nappes d'hydrocarbures de surface se dirigent vers le littoral sous l'action de vents de 10 nœuds et des courants de surface.
- Il existe un courant sous-marin parallèle à la côte.
- La hauteur des vagues s'élève à environ 0,5 m.
- Des palétuviers longent le littoral et des stations balnéaires sont implantées à l'ouest, avec un récif de corail au large.

Résumé de l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de luttes envisagées (NEBA)

Évaluer les données

En l'absence de toute intervention et compte tenu des conditions ambiantes, la modélisation annonce une probabilité de 98 % que les hydrocarbures déversés et dérivant en surface atteignent la côte au bout d'environ 24 heures. Durant cet intervalle, les hydrocarbures déversés devraient être progressivement altérés et émulsifiés. Le volume quantité d'hydrocarbures déversés doit diminuer dans un premier temps en raison des pertes par évaporation, puis augmenter sous l'action de l'émulsification. L'oléoduc contient un volume maximal d'environ 2 000 m³.

Prédire les résultats

Les zones côtières étant très vulnérables sur le plan écologique, leur protection contre les hydrocarbures produirait un bénéfice écologique significatif. Les palétuviers sont productifs sur le plan biologique et difficiles à protéger au moyen de barrages flottants ou à nettoyer s'ils sont souillés. Les stations balnéaires sont des établissements de luxe et il est impératif que leurs plages soient immaculées et leurs eaux cristallines pour la plongée.

Équilibrer les compromis

En fonction de l'étendue des dommages subis par l'oléoduc, le déversement initial d'hydrocarbures devrait être suivi par une fuite à moindre volume.

La méthode de confinement et récupération en mer étant privilégiée dans ce cas, les systèmes correspondants seraient mobilisés. L'usage de dispersant en surface est possible et les analyses montrent que les hydrocarbures bruts sont réactifs au dispersant avant leur émulsification. Les conditions ambiantes, caractérisées par des vagues de 0,5 mètres de hauteur et des vents de 10 nœuds, sont

suite ...

propices à fois à la récupération et à l'usage de dispersants. Le système d'épandage aérien disponible, qui peut être déployé dans un délai de 6 heures, est capable d'envoyer jusqu'à 15 m³ de dispersant par jour. La législation nationale autorise la pulvérisation jusqu'à l'isobathe de 20 m de profondeur, mais seulement à plus de 2 km des récifs de corail.

La mobilisation d'un système d'injection sous-marine de dispersant ne serait pas faisable, car il n'existe pas d'énergie de mélange sous-marine adéquate lors d'un écoulement provenant d'un oléoduc.

Sélectionner les meilleures options

L'usage initial du dispersant de surface sur les hydrocarbures flottants offrirait la réponse la plus rapide et assurerait la meilleure protection possible des palétuviers vulnérables. Cette méthode serait complétée par la mise en œuvre d'opérations de confinement et récupération à l'intérieur de l'isobathe de 20 m. Des préparations seraient effectuées pour nettoyer les plages touristiques éventuellement contaminées.

Bibliographie

Adams, E. E., and Socolofsky, S. A. (2005). *Review of Deep Oil Spill Modeling Activity Supported by the DeepSpill JIP and Offshore Operators Committee*. Décembre 2004, révisé en 2005.

www.researchgate.net/publication/265031649_DEEP_OIL_SPILL_MODELING_ACTIVITY_SUPPORTED_BY_THE_DEEPSpill_JIP_AND_OFFSHORE_OPERATORS_COMMITTEE

Al-Sabagh, A. M., El-Hamouly, S. H., Atta, A. M., El-Din, M. R. N. and Gabr, M. M. (2007). Synthesis of some oil spill dispersants based on sorbitol esters and their capability to disperse crude oil on seawater to alleviate its accumulation and environmental impact. Dans *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 28, numéro 5, p. 661-670.

American Academy of Microbiology. (2011). *Microbes & Oil Spills FAQs*. Un rapport de l'American Academy of Microbiology, 1752 N Street, NW Washington, DC 20036. www.asm.org.

Anderson, J., Neff, J., Cox, B., Tatem, H. and Hightower G. M. (1974). Characteristics of dispersions and water-soluble extracts of crude and refined oils and their toxicity to estuarine crustaceans and fish. Dans *Marine Biology*, vol. 27, numéro 1, p. 75-88.

API (2013). *Industry Recommended Subsea Dispersant Monitoring Plan. Version 1.0*. Rapport technique 1152 de l'American Petroleum Institute (API), septembre 2013. 20p.

Atlas, R. M. and Bartha, R. (1992). Hydrocarbon Biodegradation and Oil Spill Bioremediation. Dans *Advances in Microbial Ecology*, vol. 12, p. 287-338.

Atlas, R. M. and Cerniglia, C. E. (1995). Bioremediation of Petroleum Pollutants: Diversity and environmental aspects of hydrocarbon biodegradation. Dans *BioScience*, vol. 45, numéro 5, p. 332-338.

Brandvik, P. J. and Daling, P.S. (1998). Optimisation of oil spill dispersant composition by mixture design and response surface methods. Dans *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 42, pages 63-72 ISSN:0169-7439. DOI:10.1016/S0169-7439(98)00009-4

Brandvik, P. J., Johansen, Ø., Leirvik, F., Farooq, U. and Daling, P. S. (2013). Droplet breakup in subsurface oil releases – Part 1: Experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection. Dans *Marine Pollution Bulletin*, vol. 73, numéro 1, p. 319-326. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.05.020

Brandvik, P. J., Johansen, Ø. and Farooq, U. (2014a). Subsea Release of Oil & Gas – A Downscaled Laboratory Study Focused on Initial Droplet Formation and the Effect of Dispersant Injection. *International Oil Spill Conference Proceedings*: mai 2014, vol. 2014, n° 1, p. 283-298

Brandvik, P. J., Johansen, Ø., Farooq, O., Angell, G. and Leirvik, F. (2014b). *Subsurface oil releases - Experimental study of droplet distributions and different dispersant injection techniques Version 2*. A scaled experimental approach using the SINTEF Tower basin. SINTEF report no. A26122. Trondheim, Norvège.

Brochu, C., Pelletier, É., Caron, G. and Desnoyers, J. E. (1986). Dispersion of crude oil in seawater: the role of synthetic surfactants. Dans *Oil and Chemical Pollution*, vol. 3, n° 4, 257-279.

Campo, P., Venosa, A. D. and Suidan, M. T. (2013). Biodegradability of COREXIT 9500 and Dispersed South Louisiana Crude Oil at 5 and 25 °C. In *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, No. 4, pp. 1960-1967.

Chevron, 2012. *Frade Response: Updates and Information on Our Work to Resolve the Frade Field Incident in Brazil's Campos Basin*. www.chevron.com/fraderesponse

Di Toro, D. M., McGrath, J. A. and Stubblefield, W. A. (2007). Predicting the toxicity of neat and weathered crude oil: Toxic potential and the toxicity of saturated mixtures. Dans *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 26, numéro 1, p. 24-36.

Farrington, J. (1980). *NOAA Ship RESEARCHER/Contract Vessel PIERCE Cruise to IXTOC-I Oil Spill: Overview and Integrative Data Assessment and Interpretation*. A summary and assessment report of data collected during research cruises in the Gulf of Mexico during the Ixtoc I oil spill. Woods Hole Oceanographic Institution. www.whoi.edu/oil/ixtoc-i

Fiocco, R. J., Lessard, R. R., Canevari, G. P., Becker K. W. and Daling, P. S. (1995). The Impact of Oil Dispersant Solvent on Performance. Dans *The use of Chemicals in Oil Spill Response*. ASTM STP 1252, P. Lane, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphie, États-Unis.

GESAMP (2014). Revised GESAMP Hazard Evaluation Procedure for Chemical Substances Carried by Ships, 2ème édition (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNIDO/UNDP) Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Rep. Stud. GESAMP No. 64. www.gesamp.org/publications/publicationdisplaypages/rs64

Hazen, T. C., Dubinsky, E. A., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L., Piceno, Y. M., Singh, N., Jansson, J. K., Probst, A., Borglin, S. E., Fortney, J. L., Stringfellow, W. T., Bill, M., Conrad, M. E., Tom, L. M., Chavarria, K. L., Alusi, T. R., Lamendella, R., Joyner, D. C., Spier, C., Baelum, J., Auer, M., Zemla, M. L., Chakraborty, R., Sonnenthal, E. L., D'haeseleer, P., Holman, H-Y. N., Osman, S., Lu, Z., Van Nostrand, J. D., Deng, Y., Zhou, J. and Mason, O. U. (2010). Deep-Sea Oil Plume Enriches Indigenous Oil-Degrading Bacteria. Dans *Science*, vol. 330, n° 6001, p. 204-208. DOI:10.1126/science.1195979.

Heitkamp, M. A. and Cerniglia, C. E. (1987). Effects of chemical-structure and exposure on the microbialdegradation of polycyclic aromatic-hydrocarbons in freshwater and estuarine ecosystems. Dans *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 6, numéro 7, p. 535-546.

Hemmer, M J., Barron, M. G. and Greene, R. M. (2010). *Comparative Toxicity of Eight Oil Dispersant Products on Two Gulf of Mexico Aquatic Test Species*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. U.S.EPA/ORD Contributors: National Health and Environmental Effects Research Laboratory.

IPIECA/IMO/IOGP (2012). *Sensitivity mapping for oil spill response*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 477. <http://oilspillresponseproject.org>

- IPIECA-IOGP (2014). *Regulatory approval of dispersant products and authorization for their use*. Report of the IOGP Global Industry Response Group (GIRG) response to the Macondo incident in the Gulf of Mexico in April 2010, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). <http://oilspillresponseproject.org>
- IPIECA-IOGP (2015). *Dispersants: surface application*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 532. <http://oilspillresponseproject.org>
- IPIECA-IOGP (2015a). *Impacts of oil spills on marine ecology*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 525. <http://oilspillresponseproject.org>
- IPIECA-IOGP (2015b). *Response strategy development using net environmental benefit analysis (NEBA)*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 527. <http://oilspillresponseproject.org>
- IPIECA-IOGP (2015c). *Contingency planning for oil spills on water*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 519. <http://oilspillresponseproject.org>
- IPIECA-IOGP (2016). *Impacts of oil spills on shorelines*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 534. <http://oilspillresponseproject.org/completed-products>
- JAG (2010a). *Review of Preliminary Data to Examine Subsurface Oil In the Vicinity of MC252#1, May 19 to June 19, 2010*. Joint Analysis Group (JAG) for Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data. http://service.ncddc.noaa.gov/rdn/www/activities/healthy-oceans/jag/reports/documents/JAG_Data_Report_2_FINAL.pdf
- JAG (2010b). *Review of R/V Brooks McCall Data to Examine Subsurface Oil*. Joint Analysis Group (JAG) for Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data. http://www.noaa.gov/sciencemissions/PDFs/JAG_Report_1_BrooksMcCall_Final_June20.pdf
- JAG (2012). *Review of Subsurface Dispersed Oil and Oxygen Levels Associated with the Deepwater Horizon MC252 Spill of National Significance*. NOAA Technical Report NOS OR&R 27, p. 95. Joint Analysis Group (JAG) for Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data.
- Johansen, Ø., Brandvik, P. J. and Farooq, U. (2013). Droplet breakup in subsea oil releases – Part 2: Predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants. Dans *Marine Pollution Bulletin*, vol. 73, numéro 1, p. 327-335. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.04.012
- Johansen, Ø., Rye, H. and Cooper, C. (2003). DeepSpill—Field Study of a Simulated Oil and Gas Blowout in Deep Water. Dans *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 8, numéros 5 et 6, p. 433–443. doi:10.1016/S1353-2561(02)00123-8.

Johansen, Ø., Rye, H., Melbye, A. G., Jensen, H. V., Serigstad, B. and Knutsen, T. (2001). *Deepspill JIP experimental discharges of gas and oil at Helland Hansen*. SINTEF Technical Report, juin 2000.

King, G. M., Kostka, J. E., Hazen, T. and Sobczyk, P. (2014). Microbial Responses to the Deepwater Horizon Oil Spill: From Coastal Wetlands to the Deep Sea. Dans *Annual Review of Marine Science*, vol. 7, p. 377-401. DOI:10.1146/annurev-marine-010814-015543. www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-marine-010814-015543

Kvenvolden, K. A. (2003). Natural seepage of crude oil into the marine environment. Dans *Geo-Marine Letters*, vol. 23, numéros 3 et 4, p. 140-146.

Lindstrom, J. E. and Braddock, J. F. (2002). Biodegradation of petroleum hydrocarbons at low temperature in the presence of the dispersant COREXIT 9500. Dans *Marine Pollution Bulletin*, vol. 44, numéro 8, p. 739-747.

MacNaughton, S. J., Swannell, R. P. J., Daniel, F. and Bristow, L. (2003). Biodegradation of dispersed Forties crude and Alaskan North Slope oils in microcosms under simulated marine conditions. Dans *Spill Science and Technology Bulletin*, vol. 8, numéro 2, p. 179-186.

Neff, J. M. and Burns, W. A. (1996). Estimation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations in the Water Column Based on Tissue Residues in Mussels and Salmon: An Equilibrium Partitioning Approach. Dans *Journal of Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 15, numéro 12, p. 2240-2253.

NOAA (2010). *Analysis of Hydrocarbons in Samples Provided from the Cruise of the R/V WEATHERBIRD II, du 23 au 26 mai 2010*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Silver Spring, Maryland, États-Unis. www.noaa.gov/stories2010/.../noaa_weatherbird_analysis.pdf

NRT (2013). *Environmental Monitoring for Atypical Dispersant Operations: Including Guidance for: Subsea Application; Prolonged surface Application*. U.S. National Response Team (NRT). www.nrt.org/production/NRT/NRTWeb.nsf/PagesByLevelCat/Level3Oil?Opendocument

OSAT (2010). *Summary Report for Sub-Sea and Sub-Surface Oil and Dispersant Detection: Sampling and Monitoring*. Report prepared by the Operational Science Advisory Team (OSAT), Unified Area Command, for the US Coast Guard, 17 décembre 2010. www.restorethegulf.gov/sites/default/files/documents/pdf/OSAT_Report_FINAL_17DEC.pdf

OSAT (2011) *Summary Report for Sub-Sea and Sub-Surface Oil and Dispersant Detection: Ecotoxicity Addendum*. Report prepared by the Operational Science Advisory Team (OSAT), Gulf Coast Incident Management Team, for the US Coast Guard, 8 juillet 2011. www.restorethegulf.gov/sites/default/files/u306/FINAL%20OSAT%20Ecotox%20Addendum.pdf

Prince, R. C. (1997). Bioremediation of marine oil spills. In *Trends in Biotechnology*, vol. 15, numéro 5, p. 158-160.

Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D., Febbo, E. J., Wang, F. C. Y. and Nedwed, T. J. (2013). The primary biodegradation of dispersed crude oil in the sea. Dans *Chemosphere*, vol. 90, numéro 2, p. 521-526.

Singer, M. E. and Finnerty, W. R. (1984). Microbial metabolism of straight-chain and branched alkanes. Dans Atlas, R. M. (Ed.) *Petroleum Microbiology*, p. 1-59. Macmillan Publishing Company, New York.

Smith, J. E. (1968). *Torrey Canyon Pollution and Marine Life*. Cambridge University Press, New York.

Socolofsky, S. A. (2012). *Integral plume modeling of subsea accidental oil-well blowouts*. Presentation to the Nearfield Modeling ListServe, 11 juin 2012.

https://ceprofs.civil.tamu.edu/ssocolofsky/nfm/Downloads/socolofsky_Jun_11.pdf

US EPA (2010). *Comparative Toxicity of Louisiana Sweet Crude Oil (LSC) and Chemically Dispersed LSC to Two Gulf of Mexico Aquatic Test Species*. August 2010 and the updated report of September 2010. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. disponible à : www.epa.gov/bpspill/dispersants-testing.html

US EPA (2010a). *Dispersant Monitoring and Assessment Directive—Addendum 3*. US Environmental Protection Agency Archive Document, 26 mai 2010. www.epa.gov/bpspill/dispersants/directive-addendum3.pdf

US EPA (2010b). *Dispersant Monitoring and Assessment Directive for Subsurface Dispersant Application*. US Environmental Protection Agency Archive Document, 10 mai 2010.

www.epa.gov/bpspill/dispersants/subsurface-dispersant-directive-final.pdf

US EPA (2012). Ecotoxicity categories for terrestrial and aquatic organisms. (Site web, dernière mise à jour le 10 février 2015). www.epa.gov/oppefed1/ecorisk_ders/toera_analysis_eco.htm

US FDA (2010). *NOAA and FDA announce chemical test for dispersant in Gulf seafood: all samples test within safety threshold*. Archives web de l'US Food and Drug Administration (FDA). 29 octobre 2010.

www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/2010/ucm231653.htm

US FDA (2012). *Gulf Seafood is Safe to Eat after Oil Spill*. 'FDA Voice' — the official blog of the US Food and Drug Administration (FDA), 11 janvier 2012. <http://blogs.fda.gov/fdavoice/?tag=gulf-seafood>

Remerciements

Le présent document a été rédigé par Alun Lewis (Alun Lewis Consulting) et Peter Taylor (Petronia). Les auteurs souhaitent remercier les personnes suivantes, qui leur ont fait part de leur expertise, leurs connaissances et leurs conseils dans la rédaction du présent document : Gina Coelho (HDR Engineering, Inc.), Richard Santner (BP), Victoria Broje (Shell), Marty Cramer (ConocoPhillips), Anette Boye (Statoil), Tim Lunel (ITOPF), Tim Nedwed (ExxonMobil) et Tom Coolbaugh (ExxonMobil).

La page a été intentionnellement laissée vierge.

La page a été intentionnellement laissée vierge.

La page a été intentionnellement laissée vierge.

IPIECA

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

www.ipieca.org



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

www.iogp.org

