
**PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE (PAM)
CENTRE RÉGIONAL MÉDITERRANÉEN POUR L'INTERVENTION D'URGENCE
CONTRE LA POLLUTION MARINE ACCIDENTELLE (REMPEC)**

Seizième réunion des correspondants du Centre régional
méditerranéen pour l'intervention d'urgence contre la
pollution marine accidentelle (REMPEC)

REMPEC/WG.61/6/4/1

10 avril 2025

Original : anglais

Sliema, Malte, 13-15 mai 2025

Point 6 de l'ordre du jour : Pollution illégale et accidentelle aux hydrocarbures et SNPD par les navires

**Révision des Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution du milieu marin
par les hydrocarbures en Méditerranée**

Pour des raisons de coût et de protection de l'environnement, le tirage du présent document a été restreint. Il est aimablement demandé aux délégations d'apporter leur copie de ce document aux réunions et de s'abstenir de demander des copies supplémentaires.

Note du Secrétariat

Ce document présente la révision de la Partie II Notions de base sur les dispersants et leur application, des Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution du milieu marin par les hydrocarbures en Méditerranée (REMPEC, 2011).

Contexte

1 L'utilisation adéquate et contrôlée de dispersants spécifiques sur des types d'hydrocarbures dispersibles chimiquement est largement reconnue comme étant l'une des méthodes efficaces pour lutter contre les déversements accidentels d'hydrocarbures. Qui plus est, dans certaines conditions océaniques et météorologiques, les dispersants peuvent être la seule méthode de lutte et de protection des ressources naturelles vulnérables et des installations et infrastructures côtières.

2 La 10^e réunion des correspondants du REMPEC (Malte, mai 2011) a validé la version révisée des *Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution du milieu marin par les hydrocarbures en Méditerranée* de 2009, ci-après désigné le Document d'orientation. Ce Document d'orientation est organisé en quatre parties indépendantes, chacune traitant d'un aspect spécifique du sujet : Approbation régionale - Notions de base sur les dispersants et leur application - Plan général et modèle de stratégie nationale d'utilisation de dispersants - Fiches opérationnelles et techniques. Chaque partie a été conçue avec un objectif précis et s'adresse à différents utilisateurs :

3 L'Atelier sous-régional sur les dispersants, leur utilisation opérationnelle et leur efficacité, organisé dans le cadre du Plan d'urgence sous-régional pour la lutte contre la pollution marine entre Chypre, la Grèce et Israël (Grèce, novembre 2021), ci-après désigné l'Atelier sous-régional, a reconnu l'importance de ces Lignes directrices et a convenu d'inclure des informations complémentaires concernant la Méditerranée dans la Partie II du Document d'orientation *Notions de base sur les dispersants et leur application*, sur les questions, entre autres, de la salinité, du niveau des nutriments et des usines de dessalement.

4 Au vu des développements dans le domaine des dispersants depuis l'édition de 2011 du Document d'orientation et de l'expérience acquise avec l'Atelier sous-régional, la Quinzième réunion des correspondants du REMPEC (Malte, juin 2023) a approuvé la demande de l'Atelier sous-régional. Le REMPEC a obtenu des fonds pour sa mise en œuvre dans le cadre du Programme de travail et Budget du PNUE/PAM pour 2024-2025.

5 Le travail de révision a été adapté pour refléter les caractéristiques spécifiques de la Méditerranée et mis à jour pour intégrer les derniers développements concernant les dispersants depuis 2011. Il inclut également des données actualisées sur les dispersants et les techniques de lutte contre les déversements d'hydrocarbures, ainsi que des informations plus complètes sur les écosystèmes méditerranéens.

6 La version révisée du Document d'orientation est reproduite en **Annexe** de ce document.

Actions requises des participants à la réunion

7 **Les participants à la réunion sont invités à :**

- .1 **prendre note** des informations fournies dans ce document ; et
- .2 **examiner et approuver** le Document d'orientation révisé.

Annexe

**Révision des Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution
du milieu marin par les hydrocarbures en Méditerranée**



Mediterranean
Action Plan
Barcelona
Convention



INTERNATIONAL
MARITIME
ORGANIZATION

Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution du milieu marin par les hydrocarbures en Méditerranée

Partie II : Notions de base sur les dispersants et leur application

Edition {2025}

Note

Cette activité a été financée par le Fonds d'affectation spéciale pour la Méditerranée (MTF) et mise en œuvre par le Centre régional méditerranéen pour l'intervention d'urgence contre la pollution marine accidentelle (REMPEC).

Les opinions exprimées dans ce document sont celles des Consultants et ne reflètent pas nécessairement les vues des Nations Unies (ONU), du PNUE/PAM, de l'OMI ou du REMPEC.

Les désignations employées dans ce document et la présentation des données qui y figurent n'impliquent aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ou quant au tracé de leurs frontières ou limites de la part du Secrétariat des Nations Unies, du PNUE/PAM, de l'OMI ou du REMPEC.

Photos de couverture : © Cedre

Ces Lignes directrices sont téléchargeables depuis le site Web du REMPEC (www.rempec.org), dans la section sur les Lignes directrices régionales sur la Préparation à la lutte et la lutte.

Ce document doit être cité, à des fins bibliographiques, comme suit :

OMI/PNUE : Système régional d'information ; Partie D – Lignes directrices opérationnelles et documents techniques, Section 2, Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution par les hydrocarbures du milieu marin en Méditerranée, REMPEC, Édition de mai 2011.

Avant-propos

Dans de nombreux États côtiers de la Méditerranée, il n'existe pas encore de législation spécifique sur l'emploi des dispersants comme moyen de lutte contre les déversements accidentels d'hydrocarbures en mer.

L'utilisation adéquate et contrôlée de dispersants spécifiques sur des types d'hydrocarbures dispersibles chimiquement est largement reconnue comme étant l'une des méthodes de choix pour lutter contre les déversements accidentels d'hydrocarbures, en particulier ceux de grande ampleur. Qui plus est, dans certaines conditions océaniques et météorologiques, les dispersants peuvent être la seule méthode de lutte et de protection des ressources naturelles vulnérables et des installations et infrastructures côtières.

Cependant, une approche opportuniste en matière d'utilisation des dispersants ne saurait être acceptable. La sélection des produits à utiliser, la délimitation des zones où l'utilisation de ces produits est autorisée ou prohibée et leur place dans la stratégie générale de lutte contre la pollution... Tous ces aspects doivent être bien balisés et régulés si l'on veut que les dispersants puissent produire les résultats escomptés sans pour autant créer des risques supplémentaires pour l'environnement.

Compte tenu des développements intervenus dans le domaine des dispersants depuis l'édition d'octobre 1998 des « Lignes directrices pour l'utilisation des dispersants dans la lutte contre la pollution par les hydrocarbures du milieu marin en Méditerranée », la 9^e réunion des correspondants du Centre régional méditerranéen pour l'intervention d'urgence contre la pollution marine accidentelle (REMPEC), qui s'est tenue à Malte du 21 au 24 avril 2009, avait chargé le Groupe de travail technique méditerranéen (MTWG) d'en réviser le contenu.

Cette nouvelle édition des Lignes directrices approuvée par la 10^e réunion des correspondants du REMPEC (Malte, 3-5 mai 2011) a été élaborée avec l'assistance technique du Centre de documentation, de recherche et d'expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE), puis revue par le REMPEC en collaboration avec le MTWG.

Ces Lignes directrices se proposent d'aider les États côtiers de la Méditerranée à formuler et harmoniser les lois et règles nationales en matière d'utilisation des dispersants dans les opérations de lutte contre la pollution du milieu marin par des hydrocarbures. L'emploi des dispersants à terre n'est donc pas couvert ici.

Les Lignes directrices sont organisées en quatre parties indépendantes, chacune traitant d'aspects spécifiques. Chaque partie a été conçue avec un objectif précis et s'adresse à différents utilisateurs :

PARTIE I

APPROBATION RÉGIONALE

La Partie I, identique à la version adoptée par la Huitième réunion ordinaire des Parties contractantes à la Convention de Barcelone (UNEP (OCA)/MED IG.3/5, Annexe I, Antalya, Turquie 15 octobre 1993), expose les orientations approuvées au niveau régional pour l'élaboration de lois et règles nationales pour l'utilisation des dispersants.

PARTIE II **NOTIONS DE BASE SUR LES DISPERSANTS ET LEUR APPLICATION**

La Partie II réunit des informations théoriques sur les dispersants et leur application. Elle offre ainsi des informations contextuelles à l'intention de toute personne intéressée par le sujet.

PARTIE III **PLAN GÉNÉRAL ET FORMAT D'UNE POLITIQUE NATIONALE D'UTILISATION DES DISPERSANTS**

La Partie III a pour vocation d'aider les États côtiers dans la préparation de leurs politiques nationales en matière de dispersants. Elle a été conçue sous forme de plan général qui peut être suivi et adapté par les autorités chargées de la formulation/actualisation de la politique nationale d'utilisation des dispersants et qui peut aussi servir dans la mise en œuvre du plan national ou local d'urgence pour les dispersants.

PARTIE IV **FICHES OPÉRATIONNELLES ET TECHNIQUES**

La Partie IV emprunte à une publication intitulée « Traitement aux dispersants des nappes de pétrole en mer. Traitement par voie aérienne et par bateau. Guide opérationnel » (CEDRE 2005). Elle se compose d'un ensemble de fiches techniques pratiques traitant des différents aspects en rapport avec l'utilisation des dispersants. Cette partie intéresse principalement les utilisateurs sur le terrain en leur apportant les connaissances nécessaires pour une application efficace des dispersants.

Pour tenir les États côtiers régulièrement informés des évolutions concernant l'utilisation des dispersants, le REMPEC compte actualiser ce document en y incluant tout développement nouveau et significatif résultant des efforts de recherche.

**LIGNES DIRECTRICES POUR L'UTILISATION DES DISPERSANTS
DANS LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION DU MILIEU MARIN PAR LES
HYDROCARBURES
EN MÉDITERRANÉE**

P A R T I E II

NOTIONS DE BASE SUR LES DISPERSANTS ET LEUR APPLICATION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	11
2. LA MER MÉDITERRANÉE : CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES.....	12
2.1. Caractéristiques physiques de le mer Méditerranée.....	12
2.1.1. Géographie et géomorphologie	12
2.1.2. Bathymétrie	13
2.1.3. Hydrologie, température et salinité.....	14
2.1.4. Circulation et courants.....	15
2.2. Caractéristiques écologiques.....	15
2.2.1. Biodiversité.....	15
2.2.2. Habitats sensibles et endémiques.....	16
2.2.3. Zones protégées	16
2.2.4. Espèces protégées	17
2.3. Activités économiques	18
2.3.1. Pêcheries et aquaculture	18
2.3.2. Tourisme et trafic maritime	19
2.3.3. Industries	19
3. UTILISATION DE DISPERSANTS	21
3.1 Présentation générale des dispersants.....	21
3.1.1. Définition.....	21
3.1.2. Historique de l'utilisation des dispersants	21
3.1.3. Nomenclature des dispersants.....	23
3.1.4. Composition des dispersants	24
3.1.5. Nouvelle génération de dispersants.....	25
3.2. Propriétés physiques et chimiques des dispersants.....	25

3.2.1.	Viscosité	26
3.2.2.	Densité relative	26
3.2.3.	Point d'écoulement	26
3.2.4.	Point d'éclair.....	26
3.2.5.	Stabilité / durée de conservation	27
3.2.6.	Toxicité.....	27
3.3.	Stockage des dispersants	28
3.3.1.	Stockage.....	28
3.3.2.	Vieillessement et contrôle des stocks	30
3.3.3.	Élimination des stocks périmés.....	31
3.4.	Procédures d'homologation pour les dispersants	31
3.4.1.	Tests réglementaires	33
3.4.2.	Tests complémentaires	35
4.	UTILISATION DES DISPERSANTS DANS LA STRATÉGIE DE LUTTE CONTRE LES DÉVERSEMENTS D'HYDROCARBURES	40
5.	FACTEURS AFFECTANT L'ACTION DES DISPERSANTS.....	44
5.1	Types d'hydrocarbures	44
5.2	Contact dispersants/hydrocarbures	46
5.3	Brassage	46
5.4	Conditions météorologiques	47
5.5	Salinité et température de l'eau	47
5.6	Facteurs opérationnels.....	48
6	SYSTÈMES D'APPLICATION DES DISPERSANTS	49
6.1	Systèmes d'épandage montés sur des aéronefs	50
6.1.1.	Avions.....	51
6.1.2.	Hélicoptères.....	55
6.2	Systèmes d'épandage montés sur navires	57
6.3	Avantages et limitations des deux principaux systèmes d'application de dispersant	59
7.	DOSAGES ET TAUX D'APPLICATION DES DISPERSANTS	62
8.	CONDITIONS LOGISTIQUES POUR UNE UTILISATION EFFICACE DES DISPERSANTS	63
9.	EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT DES DISPERSANTS ET DES HYDROCARBURES DISPERSÉS.....	65
9.1.	Toxicité des hydrocarbures et des hydrocarbures dispersés	65

9.2. Dégradation microbienne	68
9.3. Effets sur les organismes marins.....	69
9.4. Impact sur les pêcheries	70
10. OUTILS D'ÉVALUATION DES AVANTAGES POUR L'ENVIRONNEMENT DE L'INTERVENTION.....	71
11. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES CONCERNANT L'UTILISATION DE DISPERSANTS EN MER MÉDITERRANÉE	72
BIBLIOGRAPHIE.....	13

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de la mer Méditerranée (©Cedre).....	13
Figure 2. Carte de la bathymétrie de la mer Méditerranée.....	14
Figure 3. Exemple d'aires protégées et zones d'importance pour la conservation dans le bassin méditerranéen (carte interactive disponible sur : https://www.mapamed.org/).....	17
Figure 4. Les routes de transport maritime en mer Méditerranée avec un exemple de la densité annuelle de navires cargo transitant dans cette mer (©Plan Bleu).....	19
Figure 5. Un avion C-130 de l'U.S. Air Force qui épand des dispersants chimiques à la surface dans le cadre de l'intervention à la suite de l'accident de Deepwater Horizon (© photo de l'US Coast Guard).....	23
Figure 6. Différents types de dispersants testés.	24
Figure 7. Aéronef de l'US Coast Guard pulvérisant des dispersants (©US Coast Guard).....	25
Figure 8. Tests de toxicité menés sur des poissons (turbot juvénile) et des crevettes avec des dispersants purs par le Cedre (© Cedre).	28
Figure 9. Équipements utilisés en France pour mesurer a) l'efficacité des dispersants (test IFP) et b) leur toxicité (©Cedre).....	32
Figure 10. Cuve à canal circulant Polludrome® du Cedre (de Merlin <i>et al.</i> , 2021 et Cedre, 2014). Objectif : identifier la fenêtre d'opportunité.	37
Figure 11. Cellules flottantes utilisées par le Cedre pour des tests en conditions réelles (©Cedre). Objectif : réaliser des tests dans les conditions naturelles.	37
Figure 12. Colonne d'expérimentation du Cedre (©Cedre). Objectif : visualiser la formation et la stabilité des gouttelettes d'hydrocarbures dispersées dans la colonne d'eau.	38
Figure 13. Épandage de dispersants depuis un navire lors d'un exercice POLMAR à Saint-Barthélemy (France) (©Cedre).	42
Figure 14. Émulsion d'hydrocarbures vieillis dont la dispersion est incertaine (© Cedre).....	45
Figure 15. Navire épandant des dispersants (©Jason Engineering – Norvège).....	47
Figure 16. Rapport entre l'efficacité des dispersants et la viscosité des hydrocarbures. Résultats de tests réalisés sur du pétrole brut par le Cedre. Trois zones sont clairement identifiées : 1) les hydrocarbures sont facilement dispersés ; 2) les hydrocarbures sont plus difficiles à disperser ; et 3) la viscosité des hydrocarbures est telle qu'ils ne peuvent pas être dispersés.	48
Figure 17. Avion d'épandage agricole (Antonov 2) (© Cedre).....	52

Figure 18. Exemple de systèmes fixes sur les ailes de l'avion. DC-6 de Florida Air Transport (N70BF) effectuant des tests d'épandage (Source: <http://floridaairtransport.com/index.php>).

.....	53
Figure 19. Système de dispersion TERSUS (©OSRL)	53
Figure 20.a) Application de faux dispersant (eau) par l'aéronef Hercules d'OSRL équipé d'un pack ADDS ; et b) Système de livraison de dispersant aéroporté (Biegert Aviation Inc.) (©Cedre).....	54
Figure 21. Avion avec module d'épandage POD (© Cedre).	54
Figure 22. Système NIMBUS L-382 par Ayles Fernie (© Ayles Fernie).....	55
Figure 23. Hélicoptère lourd Super Frelon de la Marine française équipé d'un système à cuve (© Cedre).....	56
Figure 24. Systèmes d'épandage fixes pour hélicoptère (©Dart Aerospace).....	56
Figure 25. Cuve à dispersant héliportée utilisée lors d'un exercice Polmar-Terre/Mer dans les Côtes d'Armor (France) (© Marine française).....	57
Figure 26. Rampe montée sur paravane (© Elastec).....	57
Figure 27. a) Rampe à simple jet (© Jason Engineering AS), b) Autre exemple de rampe pour dispersants (© Ayles Fernie).	58
Figure 28. a) Lance à simple buse mobile (© Clean Caribbean & Americas), b) Système fixe intégré directement dans la coque du navire (© TotalEnergies).	59
Figure 29. Système de barrage avec dispersant (Neatsweep, Elastec) (©Elastec).....	59
Figure 31. Incident du Sea Empress (Royaume-Uni) (© Cedre).....	67
Figure 32. Évaluation de l'impact des hydrocarbures dispersés sur les poissons et les moules – Programme Discobiol (© Cedre, © Laurent Mignaux).	68
Figure 33. Première étape pour décider de l'utilisation de dispersants (de Merlin (Cedre) & Lee (COOGER)).....	74
Figure 34. Deuxième étape pour décider de l'utilisation de dispersants (de Merlin (Cedre) & Lee (COOGER)).....	76
Figure 35. Dernière étape pour décider de l'utilisation de dispersants (de Merlin (Cedre) & Lee (COOGER)).....	78
Figure 36. Processus de prise de décision	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résumé des principales caractéristiques physiques et chimiques de la mer Méditerranée	15
Tableau 2. Nombre d'espèces végétales et animales avec statut de protection spécial dans le bassin méditerranéen. Avec le système de la Liste rouge de l'UICN, chaque espèce ou sous-espèce peut être classée dans l'une des neuf catégories suivantes : Éteinte (EX), Éteinte à l'état sauvage (EW), En danger critique (CR), En danger (EN), Vulnérable (VU), Quasi menacée (NT), Préoccupation mineure (LC), Données insuffisantes (DD), Non évaluée (NE).	18
Tableau 3. Plages de viscosité types des dispersants.....	26
Tableau 4. Différents types de stockage de dispersant, utilisés par le passé et actuellement.	29
Tableau 5. Paramètres des tests d'efficacité.....	34

Tableau 6. Avantages et limitations des deux principaux systèmes d'application de dispersant.....	60
Tableau 7. Données de l'incident du Sea Empress.....	67

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

Cedre : Centre de documentation, de recherche et d'expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux

CERA : Évaluation des risques environnementaux par consensus

CRA : Évaluation comparative des risques

CRCC : Coastal Research Response Center

DOR : Rapport dispersants/hydrocarbures

AESM : Agence européenne pour la sécurité maritime

ERA : Évaluation des risques environnementaux

GRV : Grand récipient pour vrac

ISPRA : Institut italien pour la recherche et la protection de l'environnement

LSFO : Fuel-oil à faible teneur en soufre

PAM : Plan d'action pour la Méditerranée

NEBA : Analyse des avantages nets pour l'environnement

OSRL : Oil Spill Response Limited

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

SIMA : Évaluation de l'atténuation de l'impact des déversements

ASPIM : Aires spécialement protégées d'importance méditerranéenne

WAF : Fraction solubilisée dans l'eau

PARTIE II

NOTIONS DE BASE SUR LES DISPERSANTS ET LEUR APPLICATION

1. INTRODUCTION

Depuis leur première application à grande échelle (au lendemain de la pollution provoquée par le naufrage du Torrey Canyon en 1967), l'utilisation des dispersants dans la lutte contre les déversements accidentels d'hydrocarbures est restée une problématique controversée. Bien qu'elle soit souvent reconnue par les spécialistes du nettoyage comme l'une des méthodes les plus efficaces pour intervenir sur les déversements d'hydrocarbures, la dispersion chimique des hydrocarbures présente un certain nombre d'inconvénients. La controverse est en partie due à un manque d'informations, des préjugés et la méconnaissance de l'action de ces produits. La réticence que suscite l'utilisation des dispersants est souvent due aux conséquences qu'ils impliquent lorsque leur application n'est pas correctement planifiée et exécutée. L'utilisation des dispersants, et en particulier le processus de prise de décision quant à leur utilisation, ainsi que la procédure d'application, doivent faire l'objet d'une planification attentive au niveau national et être adossés à une politique d'utilisation appropriée.

Un nombre relativement restreint de pays de la région méditerranéenne disposent d'une politique clairement définie concernant l'utilisation des dispersants. L'état actuel des politiques ciblant l'utilisation des dispersants dans les États côtiers méditerranéens est consultable dans les Profils des pays du REMPEC (<https://www.rempec.org/fr/resources/profil-des-pays>) sur le site internet du REMPEC (www.rempec.org). Lorsqu'une politique clairement définie concernant les dispersants fait défaut, leur utilisation est inévitablement source de discussions animées en cas de déversement d'hydrocarbures.

Le présent document vise à fournir des informations pertinentes et à jour sur les dispersants et leur rôle dans la stratégie de lutte contre les déversements d'hydrocarbures, à même d'aider les États côtiers méditerranéens à élaborer leurs politiques concernant l'utilisation de ces produits pour lutter contre la pollution accidentelle par les hydrocarbures. Dans cette perspective, ce document expose, dans la Partie III, une politique normalisée concernant l'utilisation des dispersants, qui pourrait servir de modèle adaptable par les États qui souhaiteraient se doter d'une politique nationale d'utilisation des dispersants.

De manière générale, la compréhension exhaustive de l'action des dispersants et des méthodes d'application en vigueur, ainsi que des pratiques opérationnelles, doivent constituer le socle de toute politique d'utilisation des dispersants. Une telle politique doit également reposer sur l'adoption de procédures compatibles et, si possible, normalisées pour le test et l'évaluation de l'efficacité, de la toxicité et de la biodégradabilité des dispersants et des mélanges hydrocarbures/dispersants.

La première partie de ce document porte sur les principales caractéristiques physiques, écologiques et socioéconomiques de la mer Méditerranée. Les principaux aspects des dispersants, leur utilisation, leurs effets sur l'environnement et les outils permettant de sélectionner leur utilisation en cas de déversement d'hydrocarbures seront ensuite présentés. Le document se conclut par des recommandations sur l'utilisation de dispersants dans le contexte méditerranéen.

2. LA MER MÉDITERRANÉE : CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

Ce chapitre porte sur les principales caractéristiques environnementales et économiques de la région dans son ensemble. Les spécificités de chaque pays ne sont donc pas abordées. L'objectif est de mettre en lumière les principaux éléments **susceptibles d'avoir une influence sur l'utilisation de dispersants comme moyen de lutte contre les pollutions accidentelles aux hydrocarbures**.

2.1. Caractéristiques physiques de la mer Méditerranée

2.1.1. Géographie et géomorphologie

La mer Méditerranée, dont le nom latin désigne une « mer au milieu des terres », est la plus vaste mer intercontinentale ; son bassin couvre 2,51 millions de km² et un volume total d'eau de mer estimé à 3 842 millions de km³. De l'est à l'ouest, ce bassin semi-fermé s'étend sur près de 4 000 km entre le détroit de Gibraltar, qui le relie à l'océan Atlantique, et le littoral du Levant. Il s'étend sur 800 km en son point le plus large entre Alger et Gênes, et sur 140 km entre la Sicile et le Cap Bon en Tunisie. Le détroit de Gibraltar sépare l'Espagne et le Maroc de 14 km seulement. Au nord-est, la mer Méditerranée est reliée à la mer Noire par le détroit des Dardanelles en mer de Marmara. Au sud-est du bassin, le canal de Suez relie la Méditerranée et la mer Rouge depuis 1869.

Il est généralement admis que la mer Méditerranée se divise en deux grandes zones géographiques, au niveau du détroit de Sicile, qui incluent chacune plusieurs mers intérieures. Ces deux zones sont :

- i) La **Méditerranée occidentale**, sous l'influence de l'Atlantique, englobe la mer d'Alboran, le bassin algéro-provençal et la mer Tyrrhénienne, et couvre une superficie de 0,85 million de km² ; et
- ii) La **Méditerranée orientale**, comprenant la mer Égée, la mer Ionienne, la mer Adriatique, les mers de Sicile et de Libye et les bassins Levantin et pélagien, couvrant environ 1,65 million de km².



Figure 1. Carte de la mer Méditerranée (©Cedre).

La mer Méditerranée compte de nombreux détroits et canaux, qui sont des caractéristiques géomorphologiques particulièrement importantes pour l'échange des masses d'eau, non seulement entre les divers sous-bassins de la région, mais aussi avec les mers et océans adjacents. Le bassin méditerranéen est alimenté par 19 grands fleuves, dont le Nil, le Rhône, le Pô et l'Èbre.

2.1.2. Bathymétrie

Dans le contexte méditerranéen, l'isobathe 200 m est généralement utilisée pour distinguer le plateau continental du talus, représentant respectivement moins de 25 % et 60 % de l'ensemble du bassin. Les plateaux continentaux sont relativement étroits, à l'exception de quelques endroits (mer Adriatique, mer Égée et le plateau entre la Sicile et la Libye), et le talus continental, qui correspond à la zone de transition entre le plateau continental et les profondeurs des plaines abyssales, se caractérise par une pente abrupte. La plaine abyssale représente environ 15 % du fond marin. La profondeur moyenne de la mer Méditerranée est de 1 536 m et les isobathes les plus profondes se situent dans des fosses à 2 855 m dans la partie occidentale du bassin et à 5 121 m dans sa partie orientale.

Les sédiments terrigènes des rivières contribuent au développement de la bathymétrie du bassin, surtout dans ses zones côtières.

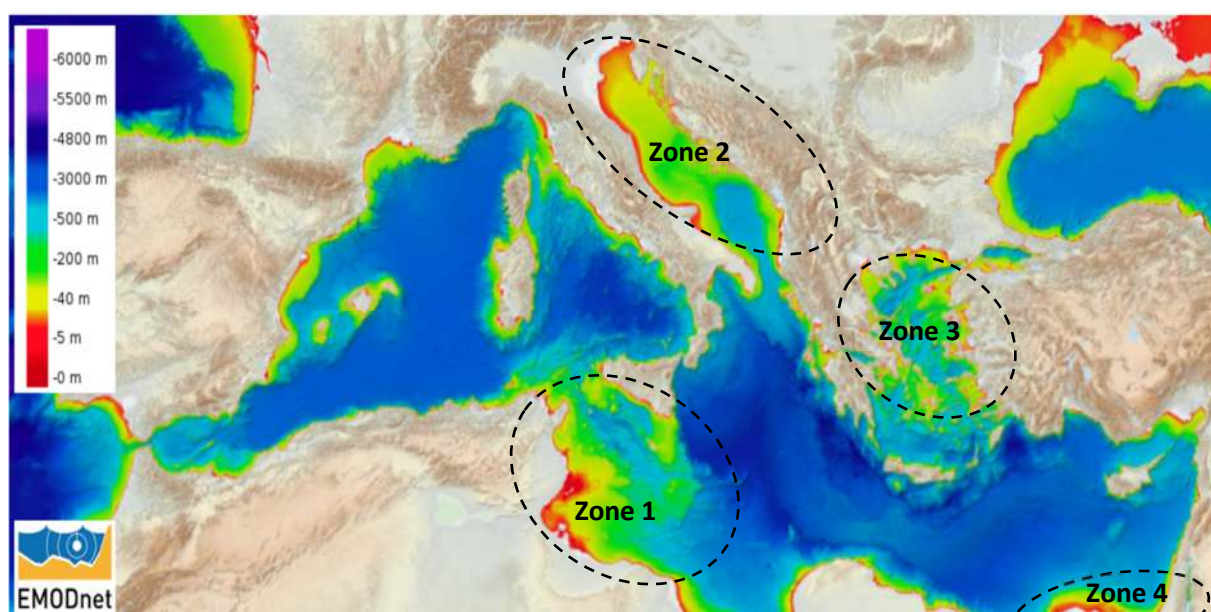


Figure 2. Carte de la bathymétrie de la mer Méditerranée.

La bathymétrie est un facteur limitant dans l'application de dispersants, puisqu'elle détermine la dilution requise pour garantir que les concentrations d'hydrocarbures dispersés aient rapidement l'effet le moins nocif sur l'environnement. La carte ci-dessus identifie les zones (1, 2, 3 et 4) où la bathymétrie pourrait être un facteur limitant pour la bonne utilisation de dispersants.

2.1.3. Hydrologie, température et salinité**– Hydrologie**

Les nombreux reliefs continentaux le long du bassin méditerranéen engendrent des vents régionaux froids et secs venant du nord (par ex. la tramontane, le mistral, la bora, etc.), provoquant l'évaporation de volumes d'eau importants ainsi que des déperditions de chaleur dans les eaux de surface. Ces vents et le climat de la région impactent le bilan hydrique de la mer Méditerranée, déficitaire sur une période de plusieurs années. Les déperditions d'eau dans l'atmosphère causées par l'évaporation dépassent les apports d'eau douce des rivières et des précipitations.

Les précipitations totales sont marquées par une forte variabilité spatio-temporelle : inférieures à 200 mm/an en Afrique du Nord et dans la péninsule arabique, elles peuvent atteindre 2 000 mm/an dans les régions plus montagneuses du nord. Selon la zone, les précipitations hivernales représentent entre 30 % à 80 % des précipitations annuelles totales.

– Salinité

Avec des taux élevés d'évaporation de l'eau douce, les eaux méditerranéennes affichent une salinité élevée : elle varie entre 37 et 39,50 g/L de l'ouest à l'est, excepté à proximité des estuaires ou grands deltas fluviaux où elle peut être moins élevée en raison des apports en eau douce. À titre de comparaison, la salinité moyenne des mers et océans du monde est d'environ 35 g/L.

– Température

Le bassin méditerranéen est soumis à des variations saisonnières, avec des contrastes thermiques annuels importants. En été, les températures des eaux de surface varient de 21 °C à 30 °C sous l'effet d'un ensoleillement intense, tandis qu'en hiver, elles chutent à environ 10 °C à 15 °C. On observe également un gradient de température positif de l'ouest à l'est.

Tableau 1. Résumé des principales caractéristiques physiques et chimiques de la mer Méditerranée

Superficie (totale)	2,51 x 10 ⁶ km ²
Ligne isobathe 2 000 - 3 000 m	30 %
Ligne isobathe inférieure à 200 m	20 %
Volume sur ligne isobathe inférieure à 200 m	55,5 10 ³ km ³
Salinité des eaux de surface	37 à 39,5
Température des eaux de surface (moyenne)	10 à 30 °C

2.1.4. Circulation et courants

La mer Méditerranée est constituée de trois masses d'eau :

- une couche de surface relativement tiède, avec une eau à faible salinité provenant de l'océan Atlantique,
- une couche intermédiaire, et
- une couche profonde d'eau plus froide, plus salée et plus dense.

L'eau provenant de l'océan Atlantique pénètre dans le bassin méditerranéen via le détroit de Gibraltar. Moins dense que les masses d'eau résidentes, elle reste à la surface et détermine les courants dans la couche de surface. Les eaux de l'Atlantique se trouvent ensuite dispersées vers l'est dans les régions du sud, et reviennent vers l'ouest dans les parties septentrionales. La circulation thermohaline ainsi engendrée décrit un circuit général dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans chaque bassin. Le courant est plus fort en été, lorsque l'évaporation est la plus élevée.

Localement, des vortex et autres courants de magnitude moins importante que le courant général sont produits par la morphologie du littoral nord ainsi que par les nombreuses îles de la mer Méditerranée.

Sur l'ensemble de la Méditerranée, les courants de marée sont de faible intensité, de l'ordre de quelques mm/s. Quelques exceptions locales sont toutefois à relever, comme dans le golfe de Gabès et le nord de l'Adriatique, ainsi que dans des zones de passage comme le détroit de Gibraltar, le détroit de Messine et le canal de Sicile, où les courants de marée peuvent parfois atteindre quelques mètres par seconde.

2.2. Caractéristiques écologiques

Le bassin méditerranéen est marqué par des disparités environnementales, en particulier en raison de sa structure hydrologique spécifique, qui se traduit par une teneur de l'eau en nutriments plus élevée à l'extrémité occidentale qu'à l'extrémité orientale. Ainsi, la production organique diminue de l'ouest vers l'est et du nord vers le sud.

2.2.1. Biodiversité

La région de la Méditerranée est reconnue au niveau international comme l'un des « dix points chauds de biodiversité » (de l'anglais « biodiversity hotspot ») de la planète. Selon le taxon,

elle abrite entre 4 % et 18 % des espèces végétales et animales connues, alors qu'elle représente moins de 1 % de la surface totale des océans. Elle abrite 21 espèces de mammifères marins, 750 espèces de poissons, 5 espèces de tortues marines et plus de 360 espèces d'oiseaux marins reproducteurs. On estime que 30 % de ces espèces sont endémiques à la Méditerranée.

2.2.2. Habitats sensibles et endémiques

La Méditerranée abrite une grande diversité d'habitats benthiques de grand intérêt écologique. Ils assurent des fonctions essentielles pour les espèces marines en termes d'alimentation, de reproduction et d'abris. Ils offrent aussi de multiples services écosystémiques aux populations humaines.

Plusieurs d'entre eux sont néanmoins sensibles et menacés par diverses pressions, essentiellement de nature anthropogénique, générant des impacts négatifs directs ou indirects. Il s'agit notamment des herbiers de posidonies, des écosystèmes endémiques de la région occupant entre 20 et 50 % des fonds marins côtiers, des habitats coralligènes, des récifs coralliens profonds et des grottes sous-marines.

2.2.3. Zones protégées

En 1976, la Convention internationale de Barcelone a été adoptée pour la protection et la gestion durable du milieu marin et du littoral de la Méditerranée. Elle regroupe 22 Parties contractantes : Albanie, Algérie, Bosnie-Herzégovine, Chypre, Croatie, Égypte, Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Liban, Libye, Malte, Maroc, Monaco, Monténégro, Slovinie, Syrie, Tunisie, Turquie et Union Européenne. C'est l'accord régional multilatéral le plus important pour la protection de l'environnement en Méditerranée, avec une dimension juridiquement contraignante.

La Convention est complétée par sept protocoles adoptés dans le cadre du Plan d'action pour la Méditerranée (PAM). Parmi eux, le Protocole relatif aux aires spécialement protégées et à la diversité biologique encourage les Parties contractantes à créer des aires marines protégées, qui peuvent être incluses dans la liste des Aires spécialement protégées d'importance méditerranéenne (ASPIM).

En 2020, 8,33 % de la mer Méditerranée bénéficie de ce statut de protection officiel avec trois types d'aires protégées :

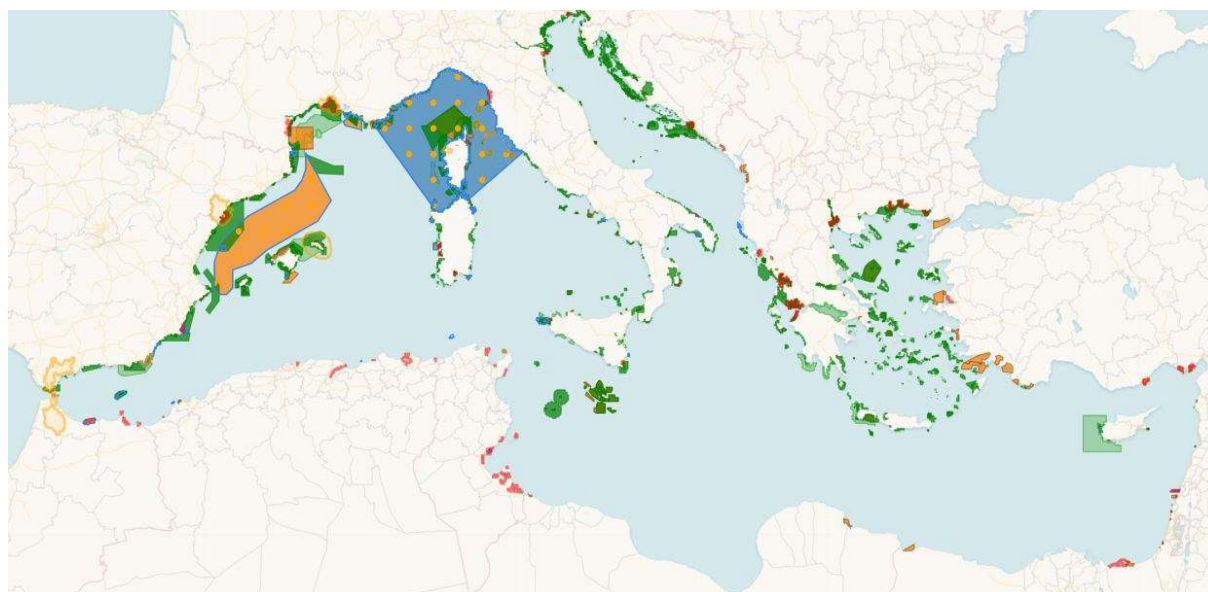
- Les **Aires marines protégées** (AMP) et les **Aires spécialement protégées d'importance méditerranéenne** (ASPIM), désignées comme telles au niveau national par les états signataires de la Convention de Barcelone. On dénombre à ce jour 75 aires de ce type ;

- Les sites **Natura 2000**, limités aux 8 parties signataires qui sont membres de l'Union européenne ; et

- Le **Sanctuaire Pelagos** qui est la seule AMP en Méditerranée avec un statut international, grâce à un accord entre la France, l'Italie et Monaco. Couvrant 87 500 km², cette aire marine a vu le jour dans le but de protéger les mammifères marins.

D'autres aires bénéficient d'efforts spéciaux de protection, y compris des zones de restriction de la pêche pour protéger des habitats de poissons et habitats benthiques en eaux profondes

essentiels, où les techniques de dragage et chalutage à des profondeurs supérieures à 1 000 m sont interdites.



AMP avec statut national

Sites Natura 2000 en mer proposés

Sites Natura 2000 en mer

Sites Ramsar

Sanctuaire Pelagos

Réserve de biosphère

ASPIM

Figure 3. Exemple d'aires protégées et zones d'importance pour la conservation dans le bassin méditerranéen (carte interactive disponible sur : <https://www.mapamed.org/>).

2.2.4. Espèces protégées

Plusieurs espèces vivant dans le bassin méditerranéen sont menacées d'extinction et bénéficient donc d'un statut de protection spécial. Certaines sont endémiques, comme le phoque moine (*Monachus monachus*) ou la posidonie (*Posidonia oceanica*) de Méditerranée. Un total de 87 espèces de faune et flore sont protégées dans la mer Méditerranée grâce à diverses conventions internationales (par ex. les Conventions de Barcelone, Bonn et Berne), des directives européennes et des décrets et ordonnances au niveau national et local.

Par ailleurs, 12 de ces espèces figurent sur la Liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources (UICN), qui constitue l'inventaire mondial de l'état de conservation des espèces végétales et animales en s'appuyant sur des critères précis.

Tableau 2. Nombre d'espèces végétales et animales avec statut de protection spécial dans le bassin méditerranéen. Avec le système de la Liste rouge de l'UICN, chaque espèce ou sous-espèce peut être classée dans l'une des neuf catégories suivantes : Éteinte (EX), Éteinte à l'état sauvage (EW), En danger critique (CR), En danger (EN), Vulnérable (VU), Quasi menacée (NT), Préoccupation mineure (LC), Données insuffisantes (DD), Non évaluée (NE).

Groupe taxonomique	Nombre d'espèces	Espèces sur la Liste rouge de l'UICN
Plantes	20, y compris 15 espèces d'algues	
Éponges	10	
Cnidaires	4	
Mollusques	17	
Échinodermes	3	
Crustacés	6	
Poissons	17	Lamproie marine (NT), Alosa fallax (VU)
Reptiles	1	Tortue caouanne (DD)
Mammifères	9	Rorqual commun (NT), Dauphin à gros nez (NT), Phoque moine de Méditerranée (VU), Globicéphale noir (VU), Dauphin de Risso (VU), Grand cachalot (VU), Dauphin commun (DD), Ziphius (DD), Dauphin rayé (LC)

2.3. Activités économiques

Les ressources marines et maritimes sont à la base de la plupart des activités économiques en Méditerranée, notamment la pêche et l'aquaculture, le tourisme, le transport maritime et les activités portuaires, et l'énergie offshore. Cette économie dite bleue génère chaque année 450 milliards de dollars dans la région.

2.3.1. Pêcheries et aquaculture

La pêche commerciale représente une part considérable de l'économie du bassin méditerranéen, tant en termes de retombées financières que de création d'emplois. La flotte actuelle réunit quelque 87 600 bateaux, dont plus de 80 % sont des navires de petite taille de moins de 20 mètres de long qui pratiquent la pêche artisanale.

L'exploitation combinée par un nombre important de petits bateaux et de chaluts à très petites mailles attrapant de petits individus a contribué à la surexploitation de près de 80 % des réserves de poissons estimées dans cette région.

Face à cette tendance, l'aquaculture s'est fortement développée au cours des 20 dernières années et la production totale de poissons et crustacés issus de l'aquaculture est estimée à 2,4 millions de tonnes. La Turquie, la Grèce, l'Italie et l'Espagne représentent plus de 80 % de la production totale.

2.3.2. Tourisme et trafic maritime

La Méditerranée se classe en tête des destinations touristiques et constitue une source majeure de revenus pour l'ensemble de ses pays côtiers. En quelques décennies seulement, la région est devenue la deuxième destination de croisière au monde après les Caraïbes. Elle compte 36 grands ports, accueillant plus de 120 000 passagers par an, dont 25 sont situés dans la partie occidentale du bassin, sept dans l'Adriatique et quatre en Méditerranée orientale.

Grâce à sa localisation géographique stratégique, au carrefour de trois axes maritimes majeurs (le détroit de Gibraltar, le canal de Suez et le détroit du Bosphore), la Méditerranée est une route importante pour le trafic maritime international, en particulier pour le transport d'hydrocarbures. La flotte combinée des états côtiers de la région représente 13 % de la capacité de transport maritime totale au niveau mondial.

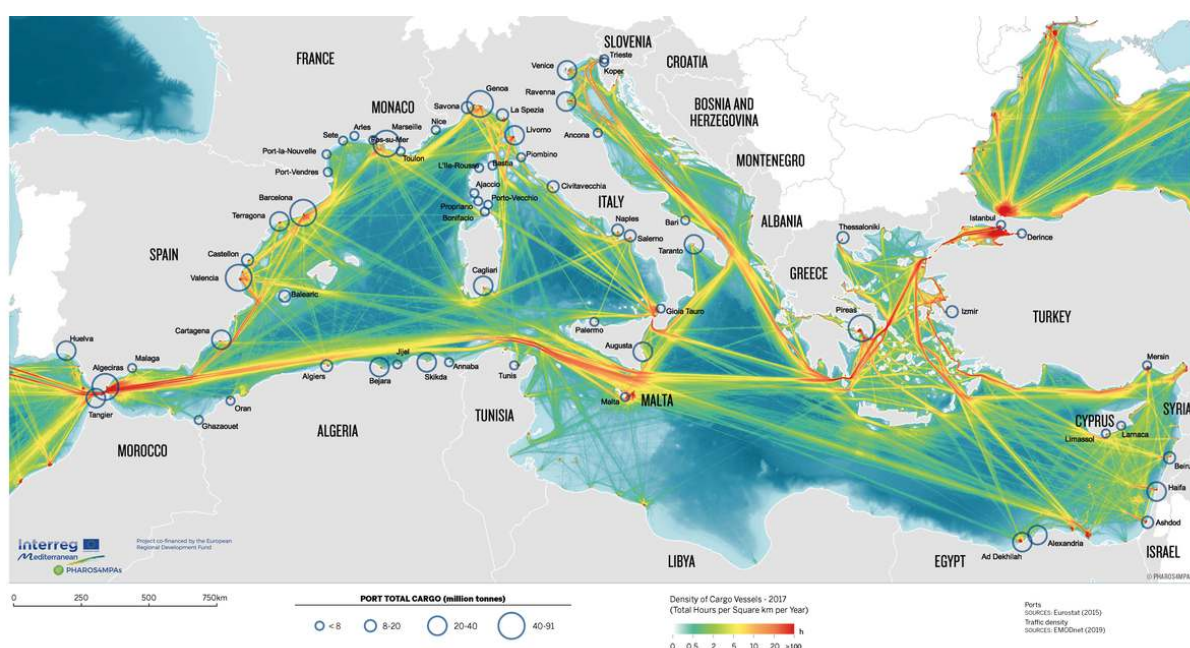


Figure 4. Les routes de transport maritime en mer Méditerranée avec un exemple de la densité annuelle de navires cargo transitant dans cette mer (©Plan Bleu).

2.3.3. Industries

– Industries d'extraction

La Méditerranée compte 323 gisements de pétrole et de gaz, dont la production représente une petite proportion seulement des volumes mondiaux. Toutefois, une part considérable du pétrole mondial, issu essentiellement du golfe Persique, est raffiné dans la région par des raffineries et usines pétrochimiques situées dans plusieurs de ses grands ports.

Depuis les années 1980, la production de gaz offshore en Méditerranée a, quant à elle, progressé plus rapidement que la production de pétrole offshore. L'Égypte est le premier producteur de gaz offshore dans la région, devant l'Italie.

– Usines de dessalement

Depuis le début des années 1980, les usines de dessalement d'eau de mer se sont rapidement multipliées dans le bassin méditerranéen pour compenser les déficits en eau occasionnés par un climat de plus en plus aride.

À ce jour, cette activité est marquée par des disparités régionales, le sud du bassin ayant moins d'usines que le littoral nord, mais néanmoins des capacités de production plus importantes : entre 3 014 m³/jour et 84 850 m³/jour respectivement, contre 120 m³/jour à 4 700 m³/jour en 2023. Israël, le Maroc, l'Algérie, la Tunisie et l'Égypte sont les pays à la tête des plus grosses capacités de production.

3. UTILISATION DE DISPERSANTS

3.1 Présentation générale des dispersants

3.1.1. Définition

Les dispersants utilisés contre les déversements d'hydrocarbures sont produits par l'association d'agents de surface actifs (ou tensioactifs) et d'un ou plusieurs solvants organiques. Ils sont spécialement formulés pour améliorer la dispersion des hydrocarbures dans la colonne d'eau en réduisant la tension interfaciale entre les hydrocarbures et l'eau. Les mouvements naturels ou induits de l'eau permettent une dispersion rapide dans la masse d'eau de minuscules gouttelettes obtenues grâce à l'action des dispersants, ce qui accélère le processus de biodégradation. Parallèlement, les hydrocarbures ainsi dispersés échappent à l'effet du vent qui pourrait les faire dériver vers les côtes ou d'autres zones vulnérables. De plus, les dispersants empêchent la fusion des gouttelettes et la reconstitution de la nappe d'hydrocarbures.

3.1.2. Historique de l'utilisation des dispersants

L'idée de mettre à profit le principe bien connu consistant à éliminer une substance grasse en l'associant à un agent dispersant (savon, détergent), puis en la lavant à l'eau fut avancée pour la première fois au début des années soixante.

La première utilisation massive de mélanges de détergents industriels et de solvants à base d'hydrocarbures aromatiques en guise de dispersants (dits de première génération) visant à endiguer le déversement d'hydrocarbures dû au naufrage du **Torrey Canyon** en mars 1967 a malheureusement démontré la toxicité excessive de ces agents dispersants. Leur impact dévastateur sur la faune et la flore marines a surpassé leur efficacité comme agents de nettoyage de la pollution.

Par la suite, de nouvelles formulations plus acceptables pour l'environnement, élaborées à partir de tensioactifs et d'hydrocarbures à teneur aromatique faible ou nulle et bien moins toxiques ont très vite fait leur apparition sur le marché, tels que le kérosène à faible teneur en composés aromatiques ou les solvants à point d'ébullition élevé contenant des hydrocarbures saturés à chaîne ramifiée. Ces nouveaux produits sont qualifiés de dispersants de « seconde génération » (ou Type 1 au Royaume-Uni) ou de « conventionnels », et leur utilisation n'est pas approuvée par de nombreux pays de nos jours car de nouvelles formulations ont été développées.

Les dispersants de la « troisième génération », appelés communément « concentrés », ont été introduits au milieu des années soixante-dix. Ces mélanges d'émulsifiants, d'agents mouillants et de solvants oxygénés ont une teneur plus forte en composants actifs (tensioactifs) et plus faible en solvants, et ils sont plus efficaces que les dispersants de « seconde génération ». Ils peuvent donc être utilisés à un dosage dispersants – hydrocarbures plus faible que les dispersants conventionnels. Ils peuvent également être appliqués à l'état pur ou pré-dilués dans l'eau de mer, à partir d'un navire ou d'un aéronef (dispersants purs uniquement dans ce dernier cas). La plupart des produits commercialisés à l'heure actuelle appartiennent à cette catégorie.

Depuis leur apparition, les dispersants ont été utilisés à plusieurs reprises contre des déversements d'hydrocarbures d'ampleur variable à travers le monde. Ils sont devenus un outil majeur dans la lutte contre les pollutions par des hydrocarbures. Le développement des techniques d'application et les importantes recherches scientifiques menées sur les effets sur l'environnement des dispersants et des hydrocarbures dispersés ont permis l'élaboration de nouveaux produits.

En 2010, l'accident de grande ampleur sur la plate-forme **Deep Water Horizon** dans le Golfe du Mexique (États-Unis) a marqué un tournant dans l'utilisation des dispersants, qui étaient alors connus pour leurs applications en surface.

Le déversement a débuté à la suite d'un blowout et d'une explosion sur une unité de forage mobile en mer. La plate-forme a coulé et les 2 000 à 2 500 m³ d'hydrocarbures qui se trouvaient dessus ont été soit brûlés, soit déversés en mer. Le déversement d'hydrocarbures et de gaz en mer s'est poursuivi en continu pendant 87 jours à une forte pression.

Il a rapidement été décidé d'appliquer des dispersants à la surface comme technique d'intervention, mais aussi, ce qui était inédit, **d'injecter des dispersants sous la surface**, au niveau de la tête du puits (qui se trouvait à une profondeur de 1 300 m), sans connaître les effets potentiels de tels produits en milieu sous-marin.

Cette intervention avait pour but de :

- **réduire la quantité d'hydrocarbures qui pourrait émerger** du puits endommagé vers la surface ;
- **réduire la quantité de substances volatiles** dans l'atmosphère à proximité du puits endommagé (pour des raisons de sécurité) ;
- réduire la quantité d'hydrocarbures susceptible de dériver vers le **littoral sensible de la Louisiane** (problématique environnementale).

Environ 771 272 gallons US de dispersant ont été injectés en milieu sous-marin, ce qui correspond à environ 42 % de la quantité totale de dispersants utilisée pour l'ensemble de l'intervention. Des doutes subsistent encore sur les effets réels des dispersants et leur efficacité (à savoir, ce qui a réellement été dispersé grâce au produit et ce qui se serait dispersé naturellement).

Les premiers rapports de la communauté scientifique indiquaient que « l'utilisation des dispersants ainsi que les effets de la dispersion des hydrocarbures dans la colonne d'eau a globalement réduit l'impact environnemental. Cette intervention était préférable à une stratégie de « laisser faire » qui aurait causé la montée à la surface des hydrocarbures et leur déversement sur des zones sensibles telles que les marécages et les habitats littoraux » (Rapport de la réunion du CRRC sur l'utilisation de dispersants dans le cas de « Deep Water Horizon » – 26-27 mai 2010).

Il est important de souligner que les recommandations habituelles visant l'application de dispersants sur les nappes en surface peuvent ne pas être adaptées aux opérations en milieu sous-marin sur des panaches causées par un blowout sous-marin. En milieu sous-marin, les hydrocarbures sont frais et possèdent toujours leurs fractions légères (les fractions les plus toxiques), tandis que les nappes superficielles ont souvent eu le temps de vieillir.

À de grandes profondeurs, les conditions environnementales sont tellement différentes (température, sensibilité et diversité écologique, *conditions hydrodynamiques*, etc.) de celles à la surface de l'eau (zone photique) que l'évaluation de l'impact possible d'une dispersion chimique doit se faire avec soin.



Figure 5. Un avion C-130 de l'U.S. Air Force qui épand des dispersants chimiques à la surface dans le cadre de l'intervention à la suite de l'accident de Deepwater Horizon (© photo de l'US Coast Guard)

Pour de plus amples informations sur la dispersion sous-marine, veuillez consulter la **partie IV** du document de l'OMI intitulé « *Guidelines on the Use of the Dispersants for Combatting Oil Pollution at Sea* » (Directives sur l'application de dispersants dans la lutte contre la pollution par les hydrocarbures en mer).

3.1.3. Nomenclature des dispersants

Depuis leur première utilisation à la fin des années 60, les dispersants n'ont cessé d'évoluer pour que leur formulation offre le meilleur compromis entre une efficacité optimale pour la dispersion des hydrocarbures et les impacts les plus faibles possible sur l'environnement.

La nomenclature de ces produits a également évolué et les dispersants de 1^{ère} génération ne sont plus utilisés.

Il existe actuellement deux types de dispersants :

- **Conventionnels** (ou de 2^{de} génération), qui présentent une faible teneur en tensioactifs dans des solvants non miscibles dans l'eau. Plus anciens, leur utilisation (à un ratio de 30 à 100 % par rapport à la quantité d'hydrocarbures) est désormais plus rare.

- **Concentrés** (ou de 3^e génération), principalement utilisés purs, mais parfois dilués, ce sont des produits avec une teneur plus importante en tensioactifs dans des solvants partiellement miscibles dans l'eau. Plus récents, leur utilisation (à un ratio de 5 à 10 % par rapport à la quantité d'hydrocarbures) est désormais répandue.

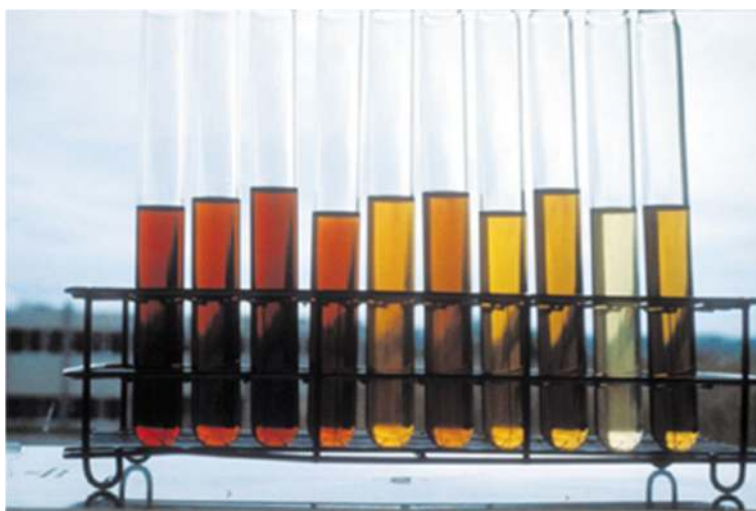


Figure 6. Différents types de dispersants testés.

3.1.4. Composition des dispersants

Les dispersants utilisés contre les déversements d'hydrocarbures sont constitués de deux principaux groupes de composants :

- les tensioactifs et
- les solvants.

Les **tensioactifs** (ou agents de surface actifs) sont des composés chimiques dont les molécules sont constituées de deux parties distinctes : une partie hydrophile et une partie lipophile. Les tensioactifs agissent comme un « pont chimique » entre les éléments huileux et l'eau, et favorisent ainsi la fusion de ces deux phases (en d'autres termes, lorsqu'elles migrent vers l'interface huile-eau, les molécules tensioactives contribuent à réduire la tension interfaciale entre l'huile et l'eau). Par conséquent, l'agitation naturelle de la mer (par ex. les vagues) peut fractionner l'hydrocarbure en d'innombrables gouttelettes fines qui sont ainsi disséminées sous forme de panache dans les couches superficielles de la colonne d'eau.

Plusieurs tensioactifs sont souvent associés afin d'améliorer la performance des dispersants, mais seuls les tensioactifs non ioniques et anioniques sont utilisés dans les formulations les plus récentes :

- tensioactifs non- ioniques : oléates ou laurates de sorbitan, oléates ou laurates éthoxylés de sorbitan, oléates de polyéthylène glycol, alcools gras éthoxylés ou propoxylés, octylphénol éthoxylé.
- tensioactifs anioniques : dioctyl-sulfosuccinate de sodium, ditridécanoyl-sulfosuccinate de sodium.

Les **solvants** se présentent sous une forme simple ou en mélange, ajoutés à des dispersants dans le but de dissoudre les tensioactifs solides, de réduire la viscosité du produit pour permettre une application uniforme, de favoriser la solubilité des tensioactifs dans les hydrocarbures et/ou d'abaisser le point de solidification du dispersant. Les solvants peuvent être divisés en 3 grands groupes : (a) l'eau, (b) les composés hydroxyliques miscibles avec l'eau et (c) les hydrocarbures. Les composés hydroxyliques utilisés dans les formulations de

dispersants comprennent entre autres l'éther monobutylique d'éthylène glycol, l'éther monométhylque de diéthylène glycol et l'éther monobutylique de diéthylène glycol. Parmi les solvants hydrocarbonés utilisés dans les dispersants modernes, on retrouve le kérosène inodore à faible teneur aromatique ainsi que les solvants à point d'ébullition élevé contenant des hydrocarbures saturés à chaîne ramifiée.



Figure 7. Aéronef de l'US Coast Guard pulvérisant des dispersants (©US Coast Guard).

3.1.5. Nouvelle génération de dispersants

Les dispersants de nouvelle génération, aussi appelés « dispersants verts », sont non volatils, non toxiques et proviennent de sources biologiques. Ils constituent des alternatives moins préjudiciables pour l'environnement que les dispersants chimiques de synthèse traditionnels, dont les tensioactifs et solvants peuvent être persistants et potentiellement toxiques.

Des recherches menées récemment ont testé les dispersants verts composés de tensioactifs et de solvants dérivés de plantes, de souches bactériennes et fongiques, et également d'hydrolysats de protéines de poisson et de crevette. Ils affichent une toxicité réduite grâce à l'absence de solvants organiques et de composés chimiques toxiques, ce qui améliore leur biodégradabilité.

Cependant, certaines formulations contiennent toujours des produits chimiques de synthèse comme solvants, mais les tensioactifs proviennent alors de sources biologiques. Comme pour les dispersants de synthèse, l'efficacité de ces nouveaux dispersants dépend toujours des conditions d'utilisation opérationnelles (type d'hydrocarbure, concentration de dispersant, salinité et température de l'eau, énergie de brassage, etc.). Les études ont montré que leur efficacité varie grandement, de 50 à 90 %.

3.2. Propriétés physiques et chimiques des dispersants

Certaines propriétés physiques des dispersants peuvent avoir des conséquences pratiques lors de l'utilisation de ces substances (application, risque d'incendie, protection). C'est la raison pour laquelle certains pays intègrent dans leurs procédures d'homologation des exigences concernant la viscosité et/ou le point d'écoulement, le point d'éclair et la stabilité/durée de conservation des dispersants.

3.2.1. Viscosité

La viscosité d'un liquide peut être définie comme sa résistance à l'écoulement. Les unités de mesure les plus utilisées dans la région méditerranéenne pour quantifier la viscosité sont la viscosité dynamique en « centipoise » (cP) ou la viscosité cinématique en « centistoke » (cSt).

Remarque : dans le présent contexte, la densité des dispersants étant proche de 1, surtout pour les concentrés, les unités centipoise et centistoke sont à peu près équivalentes.

La viscosité des dispersants dépend de la température. Les plages de viscosité types sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3. Plages de viscosité types des dispersants

Plages de viscosité types des dispersants cP/ température °C	0 °C	20 °C
Conventionnels	10–50	5–25
Concentrés	60–250	30–100

La viscosité a une influence sur la taille des gouttelettes obtenues par dispersion. À ce sujet, certains pays imposent des seuils à la viscosité des dispersants (par ex. : la viscosité des dispersants en France ne doit pas dépasser 80 cP à 20 °C).

3.2.2. Densité relative

La densité relative correspond au rapport entre la masse d'un solide ou d'un liquide et la masse d'un volume d'eau équivalent à une température donnée.

Les dispersants conventionnels ont généralement des densités relatives plus basses (0,80 – 0,90) que celles des concentrés (0,90 – 1,05).

3.2.3. Point d'écoulement

Le point d'écoulement d'une solution est la température à laquelle l'échantillon passe d'un état clair à trouble.

Le point d'écoulement de la plupart des dispersants est bien inférieur à 0 °C (-40 à -10 °C). Étant donné les conditions dominantes en Méditerranée, ces dispersants ne devraient jamais se solidifier.

3.2.4. Point d'éclair

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle la vapeur émise par la substance volatile s'enflamme dans l'air au contact d'une flamme.

La plupart des dispersants ont un point d'éclair supérieur à 60 °C et sont considérés comme ininflammables. Pour des raisons pratiques de sécurité, certains pays peuvent imposer des

restrictions concernant le point d'éclair (par ex. : en France, le point d'éclair des dispersants doit être supérieur à 60 °C).

3.2.5. Stabilité / durée de conservation

Lorsqu'ils sont stockés dans des installations appropriées (conteneurs scellés qui restent intacts), les dispersants ne se décomposent pas et ne se détériorent pas car les tensioactifs et solvants sont chimiquement stables. La plupart des fabricants indiquent une durée de conservation de 5 ans ou plus pour leurs produits. Des tests périodiques permettent de s'assurer que les stocks de dispersants ne perdent pas en efficacité.

3.2.6. Toxicité

La toxicité peut se définir comme l'ensemble des effets nocifs pour les organismes causés par l'exposition à une substance ou à un produit chimique. Ces effets négatifs peuvent être :

- **léthaux** (qui causent la mort) ou,
- **sublétaux** (qui causent des effets nocifs pouvant nuire à l'organisme sans pour autant causer la mort).

L'estimation de l'exposition dépend de la concentration de la substance et de la durée durant laquelle l'organisme y a été exposé. La toxicité est généralement exprimée par le seuil de concentration auquel des effets sont observés durant un temps d'exposition constant, ou par le seuil temporel d'exposition auquel des effets sont observés à une concentration constante. Ces concentrations sont généralement exprimées sous forme d'un rapport, en utilisant les parties par million (ppm) ou parties par milliard (ppb), parfois remplacées par les unités de concentrations mg/L ou µg/L.

Les concentrations léthales de dispersants demeurent la principale préoccupation dans l'utilisation de ces produits. Et même si l'évaluation des conséquences écotoxicologiques des dispersants devrait idéalement se faire *in situ* sur les organismes, il existe peu de rapports sur la mesure des concentrations sur le terrain à la suite de l'utilisation de dispersants. Devant l'impossibilité pratique de réaliser de tels tests sur le terrain, de nombreuses procédures de test en laboratoire ont été élaborées. Les résultats de ces tests doivent être interprétés avec prudence puisque qu'ils n'ont pas été conçus dans une optique écologiquement réaliste ou pour prédire les effets de l'utilisation de dispersants sur le terrain. Pour la plupart des tests, les concentrations et les durées d'exposition sont sensiblement supérieures à celles envisagées sur le terrain. Par exemple, la durée d'exposition lors des expériences menées en laboratoire est généralement de **1 à 4 jours**, ce qui est plus long que les durées attendues dans la plupart des scénarios d'utilisation de dispersants en haute mer, où ils seront dilués progressivement et de manière générale plutôt rapidement. De plus, les effets sublétaux évoqués par ces expériences sont estimés à partir de concentrations qui dépassent de **1 ou 2 ordres de grandeur les concentrations les plus fortes** envisagées sur le terrain

Si, dans certains pays, la toxicité des dispersants est étudiée seule, dans d'autres, c'est l'écotoxicité potentielle combinée des dispersants et des **gouttelettes d'hydrocarbure dispersées** qui est évaluée. De plus amples informations sur ce sujet sont présentées dans le Chapitre 9 de ce document.

Certains effets sublétaux, notamment des altérations dans la reproduction, le comportement, la croissance, le métabolisme et la respiration, peuvent se manifester lorsque les organismes sont exposés à des niveaux bien inférieurs aux seuils létaux.

En définitive, les résultats des études sur les effets des dispersants suggèrent que les effets les plus graves survenant dans les eaux de surface ne sont pas seulement dus aux seuls dispersants lorsque ces derniers sont attentivement sélectionnés et utilisés aux taux d'application recommandés.

Par ailleurs, les dispersants actuellement disponibles sur le marché ont été formulés avec des composés chimiques moins préjudiciables pour l'environnement. Une fois introduits dans l'environnement marin, les dispersants sont rapidement dilués et soumis aux processus de dégradation naturels (biodégradation et photodégradation).

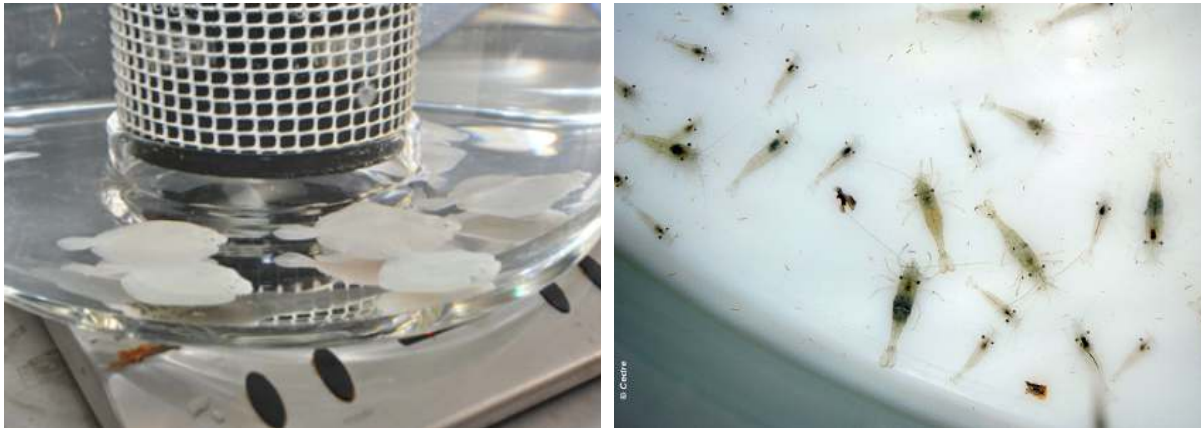


Figure 8. Tests de toxicité menés sur des poissons (turbot juvénile) et des crevettes avec des dispersants purs par le Cedre (© Cedre).

3.3. Stockage des dispersants

Lorsqu'ils sont stockés dans des installations appropriées (conteneurs scellés qui restent intacts), les dispersants ne se décomposent pas et ne se détériorent pas car les tensioactifs et solvants sont chimiquement stables. La plupart des fabricants indiquent une durée de conservation de 5 ans ou plus pour leurs produits. Des tests périodiques permettent de s'assurer que les stocks de dispersants ne perdent pas en efficacité.

Cependant, certains composants des dispersants peuvent causer une corrosion des récipients (fûts ou conteneurs) lors d'un stockage prolongé. En conséquence, dans certains pays, la réglementation relative aux dispersants interdit leur adjonction de tels composants.

3.3.1. Stockage

La quantité de dispersants à stocker pour une intervention d'urgence doit être évaluée lors de la phase de préparation du plan d'urgence. Elle doit être calculée en fonction de la quantité de produit estimée nécessaire pour lutter contre la pollution, dans le scénario le plus probable, et en tenant compte des délais de réapprovisionnement. Le délai nécessaire pour réapprovisionner le stock (soit par les fabricants, soit par d'autres sources) doit également être négocié et déterminé à l'avance. La fenêtre de dispersion pour la plupart des hydrocarbures pouvant être dispersés étant relativement courte, tout retard dans l'application et l'approvisionnement en dispersant peut nettement réduire l'efficacité de cette technique d'intervention.

– Types de conteneurs

Il existe différents types de conteneurs pour stocker les dispersants, qui sont sélectionnés sur la base de plusieurs critères : taille du stock et possibilité de le transporter par voie terrestre,

aérienne ou maritime. Lorsqu'ils sont utilisés dans les bonnes conditions, les conteneurs doivent garantir une durée de conservation potentiellement illimitée des stocks de dispersant. Le tableau 4 résume les principaux types de conteneurs utilisés par le passé et actuellement pour le stockage de dispersants.

Tableau 4. Différents types de stockage de dispersant, utilisés par le passé et actuellement.

Fûts	Méthode de stockage des dispersants historique. Les fûts en métal présentaient une capacité de 200 L et pouvaient être palettisés, mais ils ne permettaient pas un stockage optimal. Présentant un risque de corrosion, ils devaient être stockés sous abris. Les fûts pouvaient aussi être en plastique. La manipulation de ce type de conteneurs était difficile.	
Grands récipients pour vrac (GRV)	Plus faciles à stocker que les fûts cylindriques, les GRV sont palettisés et empilables. Ce sont des cubes en polyéthylène haute densité (PEHD) translucides ou blancs intégrés dans une cage en acier galvanisé tubulaire. Leur capacité est généralement de l'ordre de 1 000 L. Ils disposent d'un bouchon de remplissage sur le dessus et d'une vanne de vidange intégrée à la base. Les fournisseurs de dispersant optent généralement pour une livraison dans des GRV de nos jours. Ils sont faciles à stocker, à inspecter et à transporter.	

Citernes de stockage	Les dispersants peuvent être stockés en vrac dans des citernes de stockage, des conteneurs ISO ou des citernes de navire. Cependant, ce type de stockage induit un risque d'évaporation et d'oxydation du tensioactif. Dans le cas des citernes de navire, la contamination par l'eau de mer pose également un risque majeur.	
------------------------------------	--	--

Il est conseillé d'éviter de mélanger différents types de dispersants dans un même conteneur, même s'ils présentent des compositions similaires. Un tel mélange pourrait entraîner une diminution de l'efficacité du produit et altérer le fonctionnement de l'équipement de pulvérisation lors de l'utilisation.

– Installations de stockage

Il convient de faire particulièrement attention aux installations servant au stockage des dispersants. Un fort taux d'humidité, une exposition directe aux rayons du soleil ou à l'eau salée peuvent causer des dommages importants sur les conteneurs. Il est donc préférable de les stocker dans des abris ventilés ou, si nécessaire, de les couvrir avec des matériaux adaptés s'ils sont en extérieur.

Des températures élevées ou de fortes fluctuations de température peuvent également avoir un effet sur la durée de conservation des dispersants. Il est donc préférable de les conserver à des températures plutôt basses, en contrôlant ce paramètre à l'aide d'un système de climatisation par exemple.

3.3.2. Vieillessement et contrôle des stocks

Les dispersants sont des mélanges complexes de plusieurs composants dont les propriétés peuvent subir des changements lors de leur vieillissement, c'est-à-dire que leur stabilité n'est pas toujours bonne. Au cours d'un stockage prolongé, certains composants peuvent se séparer de la solution en formant des couches, voire se cristalliser. La détérioration des dispersants est souvent due à de mauvaises conditions de stockage qui peuvent en altérer la qualité (par ex. : stock de dispersants pollué par une substance extérieure, surchauffe de citerne de dispersants exposée au soleil durant de longues périodes...). Ces détériorations se traduisent le plus souvent par une perte d'efficacité du produit. Il est recommandé d'évaluer régulièrement l'apparence générale du dispersant stocké, notamment en ce qui concerne sa décantation et couleur, en vérifiant la fiche de données de sécurité pour chaque produit. Un changement de couleur n'est pas forcément un signe de dégradation du produit, mais cela peut indiquer qu'il est nécessaire de retester le produit dans les meilleurs délais pour s'assurer de sa conformité. Il est recommandé d'enregistrer ces inspections (en prenant des photos par exemple) afin de permettre le suivi de la condition générale du dispersant.

Ainsi, il est recommandé de procéder à un contrôle visuel général des stocks tous les mois à minima.

Cela permet d'identifier tout signe de détérioration dans les conteneurs et de remplacer les produits rapidement.

Les pays ayant développé des procédures d'autorisation ou d'homologation demandent régulièrement aux fabricants des informations sur les durées de conservation. Indépendamment de la durée annoncée par le fabricant, la méthode la plus fiable pour découvrir d'éventuelles altérations de la qualité des dispersants stockés consiste à tester périodiquement leur efficacité et à comparer les résultats avec ceux obtenus à l'aide de la même méthode sur le même produit lorsqu'il était frais. Ces tests peuvent facilement être réalisés tous les cinq ans et doivent contrôler la conformité des propriétés physiques et chimiques du dispersant stocké par rapport aux informations mentionnées sur la fiche de données de sécurité, ainsi que son efficacité.

3.3.3. Élimination des stocks périmés

Les stocks de dispersants périmés doivent être éliminés lorsque leurs propriétés, et notamment leur efficacité, ne répondent plus aux exigences techniques de la procédure d'homologation. Comme pour tout déchet industriel, ils doivent être éliminés via des sociétés de service spécialisées.

Il est généralement recommandé de contacter le fabricant du dispersant pour obtenir des conseils sur l'élimination.

3.4. Procédures d'homologation pour les dispersants

La plupart des pays qui envisagent l'utilisation de dispersants dans le cadre de leur stratégie de lutte contre les déversements d'hydrocarbures ont mis au point des critères ou des spécifications auxquels les dispersants doivent répondre.

Ces spécifications peuvent servir de référence pour la sélection informelle des produits les plus appropriés. Cependant, certains pays ont défini des critères formels d'homologation.

À l'heure actuelle, il n'existe pas véritablement d'accord sur le plan international concernant ces critères, malgré les efforts d'organismes intergouvernementaux tels que l'AESM (Agence européenne pour la sécurité maritime) ou l'Accord de Bonn pour harmoniser l'utilisation des dispersants dans leurs zones de compétence. Dans une analyse au cas par cas, on constate qu'au lieu de mettre en place leur propre processus d'homologation, certains pays se contentent d'agréer les produits homologués par d'autres pays. Par exemple, la Croatie accepte certains produits homologués dans d'autres pays tels que Chypre, la France et le Royaume-Uni. Israël, pour sa part, approuve les produits homologués par le Cedre.

Collaboration franco-italienne sur les processus d'homologation de dispersants

(Manfra *et al.*, 2017)

Sur demande du Secrétariat exécutif du RAMOGE¹, un projet de recherche a été mené pour identifier les différences entre les procédures d'homologation appliquées en Italie et en France, afin de proposer un moyen de les harmoniser.

L'étude a été réalisée par le Cedre et l'ISPRA (Institut national italien pour la protection de l'environnement et la recherche) et avait les objectifs principaux suivants :

- i. Établir un comparatif des procédures d'homologation actuelles en Italie et en France pour identifier les similitudes et les différences ;

¹ L'Accord RAMOGE est un accord de coopération intergouvernemental créé en 1976 entre la France, l'Italie et Monaco pour la préservation de l'environnement marin.

- ii. Réaliser des tests de toxicité à l'aide des deux procédures sur deux dispersants sélectionnés ;
- iii. Suggérer une méthode harmonisée entre les deux pays.

L'étude a montré que les différences dans les tests écotoxicologiques et dans le choix des critères d'évaluation débouchaient sur des résultats différents pour un même produit. Les deux dispersants testés répondaient aux exigences françaises d'homologation ($LC_{50} \geq 10$ fois le produit toxique de référence), mais un seul des deux dispersants répondait aux critères d'homologation italiens ($EC_{50} > 10$ mg/L).

Une des solutions envisagée pour l'harmonisation consisterait à augmenter la diversité des organismes inclus dans le test de la procédure française, en tenant compte d'au moins trois niveaux trophiques. Il conviendrait également de discuter des critères communs d'évaluation de la toxicité et de les approuver.

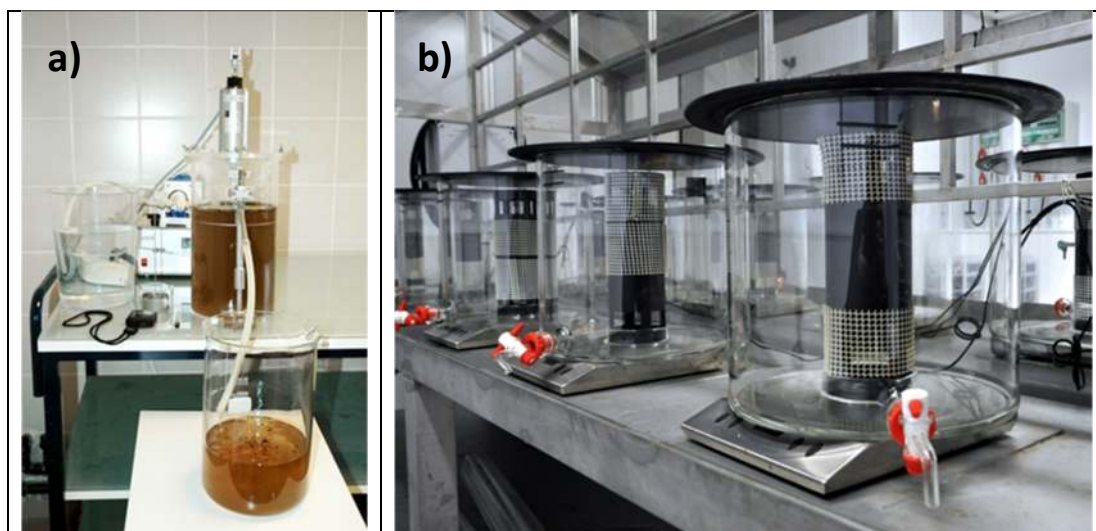


Figure 9. Équipements utilisés en France pour mesurer a) l'efficacité des dispersants (test IFP) et b) leur toxicité (©Cedre).

Souvent, ces spécifications sont uniquement fondées sur les **tests d'efficacité et de toxicité** des produits. En outre, certains pays ont fixé des normes relatives à la biodégradabilité du produit et/ou des hydrocarbures dispersés. Certains pays spécifient également les propriétés physiques que doivent avoir les dispersants approuvés. Les autorités nationales compétentes établissent individuellement leurs listes de produits homologués sur la base de tests d'identification des propriétés. Ces produits, une fois homologués, peuvent être utilisés si nécessaire conformément à la stratégie de lutte adoptée.

Toutes les procédures de test connues sont fondées sur des tests en laboratoire. Ceux-ci ne sont pas destinés à simuler des situations de terrain et sont donc conçus pour fournir des valeurs relatives sur les propriétés testées, afin de classer les produits sur la base de leur efficacité, de leur toxicité ou de leur biodégradabilité relatives. Bien que des différences apparaissent quelquefois, l'expérience du terrain montre qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les valeurs relatives obtenues lors des tests en laboratoire et celles issues de la réaction des produits testés sur le terrain. Cela s'applique également à la comparaison des résultats de différents tests : bien que les valeurs absolues d'une propriété spécifique du dispersant testé puissent largement différer selon la procédure de test utilisée, les produits offrant de meilleurs

résultats pour une procédure donnée conservent également leur supériorité lorsqu'ils sont testés suivant un autre procédé.

Dès les prémices de l'utilisation des dispersants, la principale préoccupation a été leur toxicité. Avec l'élaboration de nouvelles formulations moins toxiques, l'attention s'est tournée progressivement vers leur efficacité. **À l'heure actuelle, l'efficacité des dispersants constitue le critère de sélection le plus important.** On considère qu'il ne sert à rien d'étudier la toxicité et la biodégradabilité d'un produit s'il se révèle inefficace. Il est plus judicieux de sélectionner un produit présentant un rapport optimal grande efficacité/faible toxicité.

Au-delà des procédures de test spécifiques, un modèle de test généralement admis doit se conformer à plusieurs étapes communes :

1. Dans un premier temps, l'**efficacité** du produit est testée.
2. Les produits qui répondent au critère d'efficacité sont ensuite soumis aux tests de **toxicité** et de **biodégradabilité**.
3. Les résultats des **tests** de toxicité et de biodégradabilité sont ensuite **comparés** et
4. les produits conformes aux critères définis sont **homologués pour une possible utilisation**.

3.4.1. Tests réglementaires

Tests d'efficacité

La plupart des tests d'efficacité mesurent le degré et/ou la stabilité de la dispersion (répartition de la taille des gouttelettes) soit par l'observation visuelle, soit par le biais d'une méthode analytique, après le mélange des hydrocarbures et des dispersants dans des conditions normalisées.

La mesure de la baisse de la tension interfaciale entre les hydrocarbures et l'eau suite à l'adjonction de dispersants ou de la vitesse de remontée à la surface des hydrocarbures après le brassage sont deux mesures qui peuvent également être utilisées pour mesurer l'efficacité du dispersant.

Les différences en termes de résultat et de classement s'expliquent souvent par des différences dans les paramètres de test et principalement au niveau du type d'hydrocarbures, de la température, des volumes d'hydrocarbures et d'eau, des dosages appliqués, du contact dispersants/hydrocarbures, mais aussi de l'application, du niveau avant brassage, de l'énergie de brassage, de la dilution continue lors du test en cuve, de la durée du test, etc. (cf. Tableau 5).

Les tests d'efficacité réalisés en laboratoire suivent généralement ces procédures :

- La procédure de **test IFP** (test de dilution) est appliquée en France. Conformément à la norme française AFNOR NFT 90-345, ce test est réalisé dans un bac à essai dont l'eau est renouvelée afin de reproduire les conditions de dilution en mer. Au cours de ce test, l'énergie de brassage fournie par un générateur de vagues est assez modérée.
- Le **test LABOFINA** (ou test WSL, LR448) est une procédure utilisée au Royaume-Uni. Il est réalisé dans une ampoule à décanter qui est mise en rotation pour apporter une forte énergie permettant le processus de dispersion. Un autre test a récemment été

approuvé par la Marine Management Organization (MMO), organe de réglementation du Royaume-Uni, qui est une version modifiée du test dans l'ermeneyer avec déflecteur récemment adopté par le Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS).

- Le **test de la fiole agitée** est une procédure utilisée en Amérique du Nord conformément à la norme ASTM F2059-06, Standard Test Method. Ce test est réalisé sur des échantillons d'hydrocarbures déjà mélangés avec le dispersant, agités doucement dans une petite fiole pour favoriser le processus de dispersion.
- Le test **Mackay-Nadeau-Steelman** (MNS) est un test qui se caractérise par une forte énergie de brassage ; il est utilisé en Norvège et en Australie.

Tableau 5. Paramètres des tests d'efficacité.

ID du test	Source d'énergie	Niveau d'énergie	Volum e d'eau (L)	Rapport hydrocarbures/eau	Méthode d'application du dispersant	Rapport dispersant/hydrocarbures	Temps de décantation (min)
IFP (Institut français du pétrole) - Test de dilution	Cercle oscillant	1-2 Faible	4-5	1:1 000	Goutte-à-goutte	Variable	1
Ampoule en rotation Labofina (appliquant la norme Warren Spring Laboratory LR448)	Rotation du contenant	3 Élevé	0,25	1:50	Goutte-à-goutte	1:25	1
Test de la fiole agitée	Table vibrante	1-2 Faibles	0,12	1:1 200	Prémélange/goutte-à-goutte	1:10 à 1:25	10
MNS (Mackay, Nadeu et Steelman)	Flux d'air à grande vitesse	3 Élevé	6	1:600	Goutte-à-goutte	Non applicable	5

Test de toxicité

Les produits utilisés lors des tests sont généralement des dispersants, des hydrocarbures dispersés (mélange hydrocarbures/dispersants) et parfois des hydrocarbures seuls. Les espèces cobayes peuvent être des poissons, des arthropodes (généralement des crustacés décapodes), des mollusques (pélicypodes), des annélidés (polychètes) et des algues. Il est préférable de prélever ces espèces parmi les populations les plus importantes au niveau local. Les tests peuvent être réalisés avec une toxicité aiguë (courte période de temps) sur une seule espèce ; ils peuvent également être létaux ou sublétaux. Ces tests visent principalement à

déterminer la toxicité relative d'un dispersant donné par rapport à d'autres produits testés préalablement.

Puisque la hausse de la température implique également une augmentation de la toxicité, les tests de toxicité doivent tenir compte des changements de température susceptibles d'intervenir dans l'eau de mer. La mesure de la **concentration létale 50 (LC₅₀)** durant une période déterminée (généralement de 24 à 48 heures) est un critère habituellement utilisé dans les tests de toxicité.

Il existe deux approches différentes pour les tests de toxicité :

- (i) soit en vérifiant la **toxicité intrinsèque** du dispersant afin d'en extraire les composés les plus toxiques et, dans ce cas, seul le dispersant est testé ;
- (ii) soit en vérifiant que **le dispersant n'augmente pas la toxicité des hydrocarbures**, auquel cas les tests sont effectués sur l'hydrocarbure seul et sur les mélanges hydrocarbures/dispersants.

La dispersion des hydrocarbures dans la colonne d'eau impliquant une augmentation de leur toxicité pour les organismes pélagiques qui y vivent, la toxicité du mélange hydrocarbures/dispersants devrait être temporairement plus élevée que celle des hydrocarbures seuls. Ainsi, plus le dispersant est efficace, plus la toxicité du mélange dispersants/hydrocarbures augmente puisque la dispersion sera optimale et les hydrocarbures seront mieux dispersés. Cette approche peut être finalement plus restrictive et inciter à rejeter les dispersants les plus efficaces, ce qui va à l'encontre de l'objectif des procédures d'homologation, conçues pour permettre la sélection des dispersants les plus efficaces et les moins toxiques.

Selon les objectifs des procédures d'homologation (choix des meilleurs produits, qui soient à la fois les plus efficaces et les moins toxiques), le contrôle de la toxicité intrinsèque des dispersants est jugé suffisant. Toutefois, la question de la toxicité des hydrocarbures dispersés reste une préoccupation pour les concepteurs de stratégies d'utilisation des dispersants. Dans le cadre d'une analyse NEBA, la toxicité des hydrocarbures dispersés est requise pour définir les scénarios (conditions environnementales) pour lesquels l'utilisation de dispersants reste acceptable du point de vue de l'environnement.

Test de biodégradabilité

Les dispersants ainsi que les mélanges hydrocarbures/dispersants sont souvent soumis à des tests de biodégradabilité. Il n'existe pas de consensus autour d'une méthode normalisée pour les tests de biodégradabilité des dispersants, et plusieurs tests normalisés adaptés sur des matières biologiques sont utilisés (par ex. : la méthode normalisée utilisée en France porte la référence NF 90 346, en Italie la méthode du « flacon fermé » porte la référence OECD 306:1992, et en Espagne, c'est la norme UNE 77,103:201 qui est appliquée).

Autres tests

Si nécessaire, des méthodes analytiques normalisées sont utilisées pour tester d'autres propriétés (densité, viscosité, etc.).

3.4.2. Tests complémentaires

Au cours des 25 dernières années, des cuves de test à méso-échelle ont été conçues pour assister au mieux dans les opérations d'intervention en cas de déversement, en étudiant la

dispersion chimique dans des conditions plus réalistes et contrôlées que les tests standardisés réalisés en laboratoire.

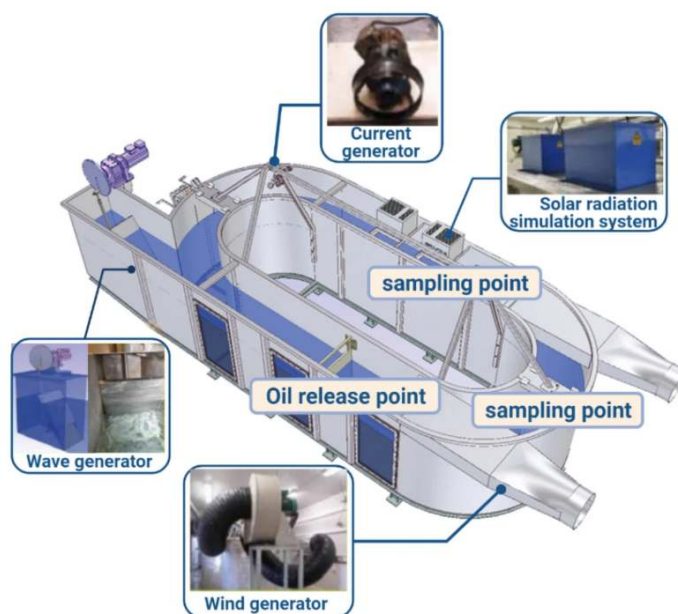
Il existe plusieurs types de méso-échelles :

- Les **cuves à canal droit** sont des canaux linéaires (de 10 à 30 m de long, de 0,5 à 1,2 m de large et de 1 à 2 m de profondeur) équipés d'un générateur de vagues qui contrôle le niveau d'énergie de brassage de l'environnement de test, qui est un facteur déterminant dans l'efficacité des dispersants ;

- Les **cuves à canal circulant** ou canaux en boucle (environ 10 m de long pour 5 à 10 m³) sont spécifiquement conçues pour reproduire les conditions que l'on retrouve en mer et pour étudier l'efficacité de la dispersion lorsque les hydrocarbures vieillissent. La première cuve de ce type, appelée Polludrome®, a été conçue par le Cedre en 1997 (Figure 16).

Characteristics

- Made of 4 mm stainless steel
- Length: 12m
- Height: 1.4m
- Width: 0.6m
- Air conditioned room (1-30°C)
- Water volume: 7 m³ for a water depth of 90 cm
- Wave generator with adjustable wave height, amplitude and frequency
- Simulation of solar radiation by two 2000 W units which recreate the spectrum of natural light
- Air flow at the water surface simulated by a wind generator
- Removable covers and vapour extraction
- Variable speed current generation



• Fabriqué en acier inoxydable de 4 mm • Longueur : 12 m • Hauteur : 1,4 m • Largeur : 0,6 m • Salle climatisée (1-30 °C) • Volume d'eau : 7 m³ pour une profondeur d'eau de 90cm • Générateur de vague avec hauteur, amplitude et fréquence de vague réglables • Simulation du rayonnement solaire par deux unités de 2 000 W qui recréent le spectre de la lumière naturelle • Flux d'air à la surface de l'eau simulé par un générateur de vent • Capots amovibles et extraction des vapeurs • Génération de courant à vitesse variable		Générateur de courant	Système de simulation de rayons solaires
			Point d'échantillonnage
	Générateur de vagues	Point de libération des hydrocarbures	Point d'échantillonnage
	Générateur de vent		

Figure 10. Cuve à canal circulant Polludrome® du Cedre (de Merlin *et al.*, 2021 et Cedre, 2014). Objectif : identifier la fenêtre d'opportunité.

- les **bassins de test** sont de grands plans d'eau équipés pour produire un brassage superficiel contrôlé, qui ont donc été conçus pour étudier la relation entre la pénétration des dispersants et les propriétés des hydrocarbures en utilisant des systèmes d'application réalistes.

- les **cellules flottantes** sont des structures carrées dont chaque côté mesure 3 m ; chaque cellule se compose d'un cadre en aluminium maintenant un plastique flexible qui forme un rideau plongeant à 2,5 mètres de profondeur. Cela permet de délimiter un volume d'eau qui reste quand même soumis à l'influence de la météo et des conditions en mer (vagues, agitation en surface, pluie, vent, ensoleillement, etc.). Le devenir et le comportement des hydrocarbures et des dispersants chimiques peuvent ainsi être étudiés tandis que les conditions environnementales sont enregistrées en continu par une station météorologique. Le Cedre a mené de nombreux essais en utilisant des cellules flottantes, notamment pour comparer l'efficacité des différents traitements selon l'état de vieillissement des hydrocarbures ou sur différents types d'hydrocarbures.

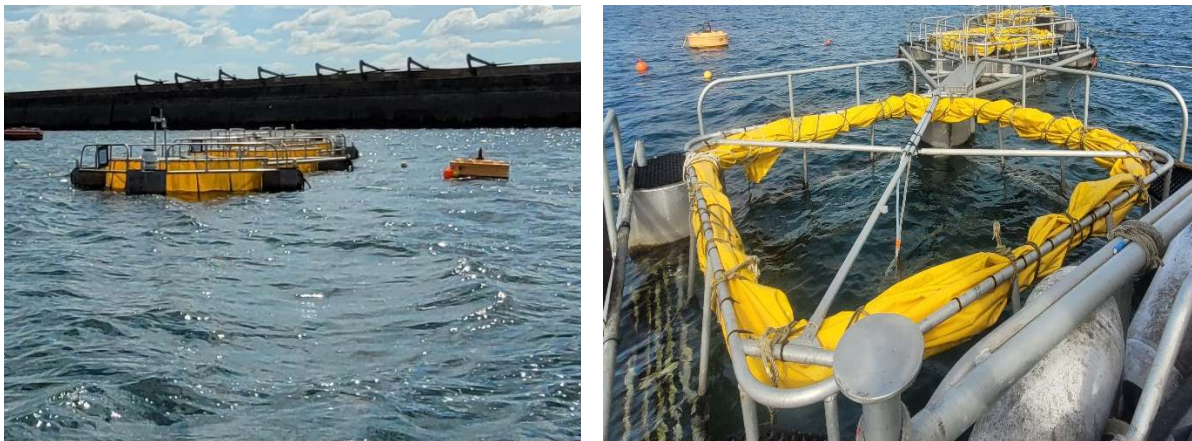


Figure 11. Cellules flottantes utilisées par le Cedre pour des tests en conditions réelles (©Cedre). Objectif : réaliser des tests dans les conditions naturelles.

- les **cuves sous haute pression** comme les caissons hyperbares du Southwest Research Institute à San Antonio (Texas, États-Unis) ont été utilisées par l'institut Sintef pour étudier la dispersion sous-marine. Plus spécifiquement, le but de ces recherches était de vérifier si la pression pouvait avoir un effet sur l'injection de dispersant, la taille des gouttelettes d'hydrocarbure et l'efficacité de la dispersion.

- les **grandes cuves d'expérimentation en colonne d'eau** sont des colonnes verticales transparentes équipées de grandes vitres qui permettent d'étudier le comportement des polluants. Dans le cas de l'utilisation de dispersants, les tests réalisés dans la colonne portent principalement sur le comportement des gouttelettes dispersées sous la surface.



Figure 12. Colonne d'expérimentation du Cedre (©Cedre). Objectif : visualiser la formation et la stabilité des gouttelettes d'hydrocarbures dispersées dans la colonne d'eau.

Toutes ces installations permettent des études plus poussées sur le processus global de dispersion, mais sont limitées par l'environnement fermé et la difficulté à reproduire les mouvements réels des vagues.

Pour remédier à ces limitations, un grand nombre d'**essais en mer** ont été réalisés depuis les années 1980 afin de tester l'efficacité de diverses techniques de contrôle, y compris l'utilisation de dispersants, dans des conditions de déversement contrôlées. Ces essais peuvent être de petite envergure (par ex. de 0,1 à 1 m³ d'hydrocarbures déversés) comme de plus grande ampleur (de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de m³ d'hydrocarbures déversés).

Toutefois, ces essais sont plus difficiles à mettre en œuvre que les tests à méso-échelle et présentent des inconvénients, notamment :

- la difficulté à évaluer la quantité d'hydrocarbures restant à la fin de l'essai ;
- le fait que les évaluations sont basées sur des mesures locales ou des techniques indirectes ;
- la logistique nécessaire est plus conséquente que pour les tests à méso-échelle en mer ;
- les autorisations nécessaires pour déverser des hydrocarbures dans l'environnement.

4. UTILISATION DES DISPERSANTS DANS LA STRATÉGIE DE LUTTE CONTRE LES DÉVERSEMENTS D'HYDROCARBURES

Le comportement des hydrocarbures déversés en mer et les processus de vieillissement des produits pétroliers (formation de nappes superficielles, formation de mousse, boulettes de goudron, hydrocarbures qui coulent ou sont submergés, etc.), ainsi que le niveau d'équipement et de préparation au niveau national ou local vont déterminer le choix de la stratégie d'intervention.

La dispersion chimique est une option de lutte contre les déversements en mer parmi d'autres, comme « la récupération mécanique combinée au confinement des nappes », « ne rien faire et suivre la nappe » et (à titre de référence générale) le « brûlage sur place ». Il est essentiel de noter que l'utilisation de dispersants réduit significativement l'efficacité des autres options de lutte.

Comme toute technique d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures, l'utilisation de dispersants présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont synthétisés comme suit :

Avantages

- En éliminant les hydrocarbures de la surface, les dispersants freinent l'effet du vent sur le mouvement de la nappe d'hydrocarbures, qui autrement pourrait être entraînée vers des zones vulnérables (souvent le littoral), ce qui réduit les opérations de nettoyage des littoraux nécessaires par la suite.
- Contrairement aux méthodes de confinement et de récupération, la dispersion peut être appliquée lorsque la mer est mouvementée et lorsque les courants sont forts.
- Si les processus appliqués sont efficaces, l'organisation appropriée et la fenêtre d'opportunité respectée, les dispersants représentent bien souvent l'option de lutte la plus rapide.
- Les dispersants limitent le risque de contamination de certaines ressources vulnérables aux hydrocarbures flottants (nappes superficielles), comme les oiseaux et les mammifères marins.
- Ils empêchent la formation d'une émulsification persistante de l'eau dans les hydrocarbures (« mousse au chocolat »).
- Ils favorisent la dégradation naturelle des hydrocarbures.
- La dispersion ne produit pas de déchets devant être traités.
- Lorsqu'ils sont pulvérisés depuis un aéronef, les dispersants permettent de traiter de plus larges zones que la plupart des autres techniques de lutte contre les déversements d'hydrocarbures.
- Ils réduisent les vapeurs à la surface de l'eau, ce qui améliore la sécurité pour les intervenants.

Inconvénients

- Dans le cas d'une pollution de grande échelle, la dispersion chimique n'est pas une alternative applicable si la mer est très calme (état de mer 0, 1 voire 2 selon la situation).
- En disséminant les hydrocarbures flottants dans la colonne d'eau, les dispersants risquent d'avoir une influence néfaste sur certaines parties du biotope qui autrement ne seraient pas atteintes par ces hydrocarbures de surface (par ex. les communautés pélagiques et benthiques).
- Lorsque la dispersion des hydrocarbures se révèle inefficace, l'efficacité des autres méthodes de lutte sur les hydrocarbures préalablement traités aux dispersants s'en trouve affectée.
- Les dispersants ne conviennent pas à tous les types d'hydrocarbures polluants ; ils sont notamment de faible utilité sur les hydrocarbures présentant une forte viscosité.
- Leur utilisation dépend des conditions environnementales sur le site à réhabiliter, qui doit également présenter un volume d'eau suffisant pour assurer une dilution rapide du dispersant et des hydrocarbures dispersés.
- Lorsque le recours aux dispersants chimiques est initialement efficace, la dispersion chimique n'est une option valable que durant les premières heures/les premiers jours de l'opération de lutte, avant que les hydrocarbures ne deviennent résistants à la dispersion.
- L'infiltration des hydrocarbures dans les sédiments peut être intensifiée lorsque la dispersion chimique est effectuée à proximité de la côte ou dans une zone peu profonde. De même, lorsque des sédiments sont en suspension, les dispersants augmentent l'adhésion des hydrocarbures aux particules.
- Les dispersants introduisent des quantités supplémentaires de substances étrangères dans l'écosystème marin.
- La « fenêtre d'opportunité » pour une application réussie des dispersants est courte.



Figure 13. Épandage de dispersants depuis un navire lors d'un exercice POLMAR à Saint-Barthélemy (France) (©Cedre).

La capacité à trouver un juste équilibre entre ces avantages et ces inconvénients est réduite en cas de situation d'urgence. Par conséquent, il est important de définir au préalable le cadre d'utilisation des dispersants et leur rôle dans une stratégie globale de lutte contre une pollution accidentelle.

Il convient d'analyser et de déterminer lors de la préparation du plan d'urgence où et dans quelles circonstances il est possible de donner la priorité à l'utilisation des dispersants par rapport à d'autres méthodes de lutttes disponibles.

En évaluant différents enjeux pour chaque zone donnée, il est possible de définir des zones géographiques délimitées au sein desquelles les dispersants peuvent ou ne doivent pas être utilisés. En règle générale, l'utilisation des dispersants est déconseillée dans les zones où la circulation de l'eau est faible, à proximité des zones de frayères, des récifs coralliens, des zones de conchyliculture, des zones marécageuses ainsi que des prises d'eau industrielles et civiles (cf. la Partie III des présentes Lignes directrices).

La lutte contre les déversements accidentels d'hydrocarbures de grande ampleur requiert souvent une coopération internationale. L'application de dispersants peut faire partie des éléments d'une assistance proposée à un pays confronté à un déversement d'hydrocarbures. Afin de faciliter l'intégration de l'assistance offerte aux activités nationales de lutte, certains pays ou groupes de pays (pays de l'Accord de Bonn) ont convenu d'accepter mutuellement l'application des produits homologués par chaque pays en cas d'urgence. La Partie I « Approbation régionale » des présentes Lignes directrices comporte des recommandations concernant la coopération régionale.

En cas d'adoption préalable d'une politique globale de lutte, la décision finale concernant le recours aux dispersants dans le cadre d'un déversement d'hydrocarbures sera uniquement conditionnée par des facteurs circonstanciels (types d'hydrocarbures, vieillissement, conditions, disponibilité du matériel et du personnel, etc.). L'élaboration d'arbres décisionnels pour assister les responsables facilite considérablement ce processus (voir l'Annexe de la Partie III des présentes Lignes directrices).

La prise de décisions concernant l'utilisation de dispersants fait partie des priorités lors de tout déversement d'hydrocarbures dans la mesure où, après un délai relativement court à la suite du déversement, la plupart des hydrocarbures ne peuvent plus être dispersés chimiquement.

Une fois que la décision de recourir aux dispersants est prise, la stratégie d'utilisation devient un élément crucial pour la réussite de l'opération. D'un point de vue stratégique, quelques principes de base peuvent être définis à cet égard :

- les dispersants doivent être appliqués sur les hydrocarbures le plus tôt possible ;
- l'opération d'épandage doit avoir été achevée lorsque les hydrocarbures arrivent au stade de vieillissement (viscosité, formation de mousse), étape à laquelle leur dispersion n'est plus évidente ;
- si les hydrocarbures se dirigent vers une zone sensible, les dispersants devront être appliqués sur la partie de la nappe la plus proche de la zone à protéger.

Lorsqu'une pollution de grande ampleur touche une zone étendue, il est possible de devoir recourir à une combinaison de méthodes de lutte contre le déversement. Dans ces situations, il est possible d'utiliser des dispersants sur une partie de la nappe tandis qu'une récupération mécanique est effectuée simultanément à son autre extrémité.

L'application des dispersants sur zone devrait se conformer à des principes opérationnels tels que :

- appliquer les dispersants sur les couches **très épaisses et moyennement épaisses** et non sur les couches fines de la nappe (pellicule irisée) ;
- effectuer un traitement **méthodique, en passages parallèles et contigus ou se chevauchant légèrement** ;
- noter l'importance du traitement de la nappe **dans la direction opposée à celle du vent** ;
- les navires sont adaptés au traitement des déversements d'ampleur moyenne à proximité des côtes, mais les aéronefs permettent une meilleure réactivité (moins de 24 heures après le déversement), particulièrement au large lorsqu'il s'agit de déversements étendus ;
- toujours utiliser un **aéronef de repérage** pour guider les dispositifs et pour évaluer les résultats, que l'épandage des dispersants soit effectué à partir de navires ou d'aéronefs.

L'observation visuelle aérienne (par ex. : UAS, aéronef), complétée par les photographies, les enregistrements vidéo ou une des techniques de télédétection disponibles, doit être utilisée pour évaluer les résultats de l'application de dispersants. Les observations et les enregistrements produits permettent aussi de conserver un historique du déroulement des différentes phases des opérations.

Enfin, d'un point de vue pratique, les pays qui décident d'envisager le recours à la dispersion chimique dans leur stratégie de lutte doivent accorder une attention particulière :

- a) au stockage de quantités suffisantes de produits sélectionnés et homologués ;
- b) à l'acquisition et à l'entretien des équipements d'épandage appropriés ;
- c) à la formation du personnel sur tous les aspects relatifs à l'utilisation de dispersants, notamment par le biais d'exercices pratiques organisés à intervalles réguliers.

5. FACTEURS AFFECTANT L'ACTION DES DISPERSANTS

Quelle que soit la **technique** d'application et le **dosage** retenus, l'action des dispersants sera essentiellement déterminée par :

- le type d'hydrocarbure à traiter ;
- le contact dispersants/hydrocarbures ;
- le brassage ;
- les conditions météorologiques ;
- la salinité et la température de l'eau ; et
- les conditions opérationnelles.

5.1 Types d'hydrocarbures

Les principales caractéristiques déterminant quels **types d'hydrocarbures** peuvent être traités par dispersion chimique sont :

- la viscosité et la composition chimique.

Seuls les hydrocarbures ayant une **viscosité à la température ambiante de l'eau de mer** inférieure à **5 000 cSt** (soit la plupart des pétroles bruts frais, les fuel-oils moyens) peuvent être dispersés chimiquement par les produits disponibles actuellement. La dispersion chimique des hydrocarbures avec une viscosité comprise entre 5 000 et 10 000 cSt est moins évidente (sensibilité réduite) ; au-delà d'une viscosité de 10 000 cSt (pétroles bruts lourds, vieillis et émulsifiés, fiouls lourds) la dispersion chimique sera de moindre utilité voire complètement inefficace. Il est aussi important de souligner que l'utilisation de dispersants n'est pas recommandée si les hydrocarbures peuvent se disperser « naturellement », lorsque leur viscosité est inférieure à 500 cSt.

Plus la viscosité de l'hydrocarbure est élevée, plus il faut d'agitation en mer (vagues) pour favoriser sa dispersion chimique.

L'application de dispersants doit se faire pendant la « fenêtre d'opportunité », qui est la période de temps pendant laquelle il est possible de disperser les hydrocarbures déversés en mer. Cette période peut être courte (des heures, quelques fois des jours) vu que les processus de vieillissement peuvent rapidement faire augmenter la viscosité des hydrocarbures, ce qui réduit alors l'efficacité du traitement.

Plusieurs études se sont intéressées à l'influence de la composition chimique des hydrocarbures sur leur dispersion. Les principales conclusions de l'étude de Mukherjee *et al.*, 2011, qui est la plus approfondie sur le sujet, sont les suivantes :

- la concentration en fractions aromatiques a un effet positif significatif sur l'efficacité de la dispersion ;

- les fractions saturées et de résine interagissent pour favoriser la dispersion ;
- une forte concentration en fractions saturées améliore la proportion de gouttelettes de petite ($< 7 \mu\text{m}$) et moyenne ($7 - 20 \mu\text{m}$) taille ;
- les aromatiques et les asphaltènes interagissent pour réduire la proportion de petites gouttelettes et produire plus de gouttelettes de grande taille ($> 20 \mu\text{m}$).

Utilisé depuis quelque temps comme source d'énergie pour la propulsion, le fuel-oil à faible teneur en soufre (LSFO) pose des défis de taille en raison de ses propriétés physiques et chimiques. Sa persistance dans l'environnement marin, due à de faibles taux d'évaporation et une forte viscosité, pourrait compliquer les efforts de nettoyage et entraîner des opérations de récupération de grande ampleur. L'émulsification rapide du LSFO dans les eaux chaudes de la Méditerranée pourrait exacerber le problème en créant des émulsions stables d'eau dans les hydrocarbures, qui sont compliquées à traiter. L'efficacité des dispersants chimiques pourrait être d'autant plus limitée par la viscosité variable du LSFO, qui demande souvent d'avoir recours à des méthodes de récupération mobilisant beaucoup de ressources et sur de longues périodes.

– Point d'écoulement

Les hydrocarbures paraffiniques (cireux), qui ont un haut **point d'écoulement**, peuvent résister à la dispersion si la température ambiante est bien en deçà de leur point d'écoulement.

– Émulsification des hydrocarbures

Le processus d'émulsification qui survient avec le vieillissement des hydrocarbures augmente leur viscosité et les dispersants sont généralement inefficaces sur les émulsions d'eau dans les hydrocarbures (« mousse au chocolat »). Cependant, des études ont mis en lumière que les dispersants peuvent encore se révéler efficaces lorsque l'émulsion est toute récente (pas totalement stabilisée). Dans cette situation, l'opération de dispersion peut se dérouler en deux étapes : une première application afin de casser l'émulsion et de réduire ainsi la viscosité des hydrocarbures, suivie d'une seconde application pour réaliser la dispersion proprement dite.

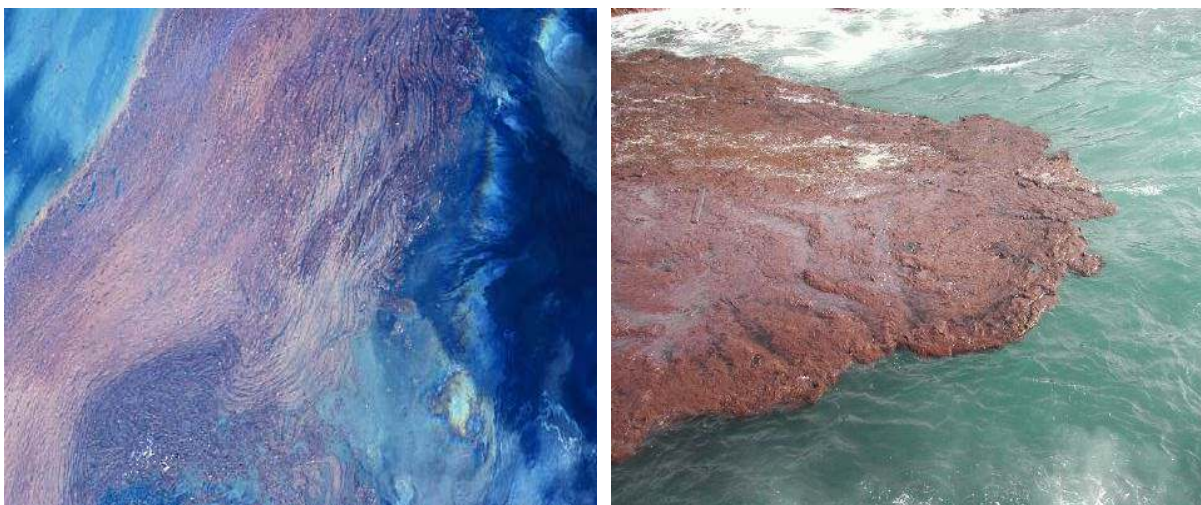


Figure 14. Émulsion d'hydrocarbures vieillis dont la dispersion est incertaine (© Cedre).

5.2 Contact dispersants/hydrocarbures

Pour obtenir un bon contact dispersants/hydrocarbures, les dispersants doivent être pulvérisés au-dessus des hydrocarbures flottants pour **n'atteindre que la surface et ne pas pénétrer** à travers la couche d'hydrocarbures. Pour cela, on associe les techniques d'épandage appropriées et la taille de gouttelettes souhaitée.

La taille optimale des gouttelettes devrait se situer dans une fourchette de **350 à 1 000 µm**, soit une **moyenne de 700 µm**. Les gouttelettes trop fines vont être poussées par le vent et n'atteindront probablement jamais les hydrocarbures, tandis que les gouttelettes trop grosses vont traverser la couche d'hydrocarbures et entrer en contact direct avec l'eau sans avoir eu le temps de se fixer aux hydrocarbures. Le choix du système d'épandage doit tenir compte de ces phénomènes.

Il est aussi important de prendre en compte le type de dispersant utilisé car ils ont tous des propriétés différentes et que leur efficacité peut dépendre des conditions environnementales dominantes lors du déversement. La quantité de dispersant utilisée, généralement appelée **rapport dispersants/hydrocarbures (DOR)**, est un autre facteur devant être pris en compte pour optimiser l'efficacité des dispersants. Il varie selon l'efficacité du dispersant et la composition chimique de l'hydrocarbure. Dans les expériences en laboratoire, le DOR auquel l'efficacité de la dispersion est maximale se situe généralement autour de **1:20 – 1:25 à 1:40**, même si la quantité d'hydrocarbures déversés est rarement connue. Il faut également garder à l'esprit que les tests d'efficacité des dispersants ne sont réalisés que sur un nombre limité d'hydrocarbures.

5.3 Brassage

Une fois que les dispersants sont entrés en contact avec les hydrocarbures et que l'extrémité lipophile de leurs molécules s'y est fixée, le mélange dispersants/hydrocarbures doit être agité afin de se fractionner en gouttelettes et de se disperser dans la masse d'eau de mer.

L'agitation naturelle à la surface de la mer (vagues) est nécessaire pour réaliser ce processus (état de mer 2, vent de 3 Beaufort).

Si l'énergie des vagues n'est pas suffisante (mer très calme), il est préférable d'opter pour une récupération mécanique. Mais, dans certains cas, sur un incident de pollution limité, les dispersants peuvent être utilisés. Le brassage du mélange dispersants/hydrocarbures dans l'eau doit alors être assuré localement :

- en naviguant à travers la nappe d'hydrocarbures et en l'agitant à l'aide de la vague d'étrave et de l'hélice ;
- en brassant les hydrocarbures et l'eau avec des lances d'incendie.



Figure 15. Navire épandant des dispersants (©Jason Engineering – Norvège).

5.4 Conditions météorologiques

Les mauvaises **conditions météorologiques** ont moins d'influence sur la dispersion chimique des hydrocarbures que sur les autres méthodes de lutte (telles que le confinement et la récupération). En outre, elles n'affectent pas directement le processus physico-chimique de la dispersion, mais plutôt l'application des dispersants.

Les **vents** peuvent dévier les dispersants appliqués de la zone cible, ce qui entraîne une perte importante de produit. Dans le cas de l'épandage par voie aérienne, les vents forts peuvent également avoir une incidence sur la sécurité de l'aéronef d'épandage.

Bien que les **vagues** fournissent l'énergie de brassage nécessaire au processus de dispersion (plus l'énergie est forte, meilleure sera la dispersion), les grosses vagues ou les déferlantes peuvent devenir un obstacle en compliquant l'opération d'épandage par les navires. En raison du morcellement des nappes dû à l'effet de vague, une partie du dispersant sera épandue directement sur la surface de l'eau et non sur les nappes, limitant l'interaction entre le dispersant et les hydrocarbures.

Une **visibilité** réduite qui contrarie les opérations d'épandage affecte indirectement l'action des dispersants.

5.5 Salinité et température de l'eau

La salinité de l'eau est un facteur important pour l'efficacité des dispersants car elle réduit la dissolution des dispersants dans l'eau tout en favorisant l'association des tensioactifs aux hydrocarbures.

Les expériences en laboratoire ont montré que l'efficacité des dispersants est optimale avec une salinité comprise entre 30 et 40 ‰.

Les températures de l'air et de l'eau peuvent également avoir un effet sur l'efficacité des dispersants. Par exemple, des températures ambiantes élevées favorisent l'évaporation des composés plus légers des hydrocarbures, ce qui peut rendre les composants à la surface de l'eau plus difficiles à disperser. D'un autre côté, une température plus élevée de l'eau

augmente la solubilité du dispersant, ce qui améliore grandement l'efficacité de la dispersion si le produit est appliqué correctement.

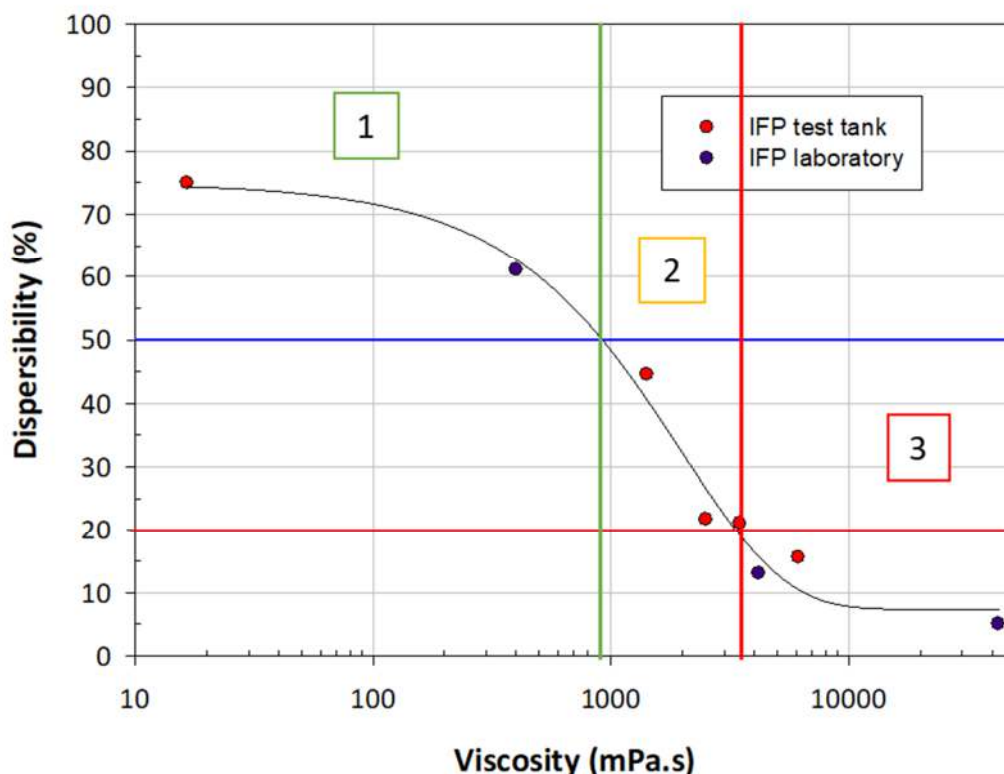
5.6 Facteurs opérationnels

Des facteurs opérationnels et logistiques peuvent également affecter l'efficacité des dispersants comme moyen de lutte contre un déversement d'hydrocarbures.

– La fenêtre de dispersibilité

Dès que les hydrocarbures sont déversés dans l'environnement, ils entament un processus de vieillissement qui affecte leur propriétés physiques et chimiques. Leur viscosité et leur densité peuvent vite être modifiées, ce qui complique leur dispersion. Dans ce contexte, la fenêtre d'opportunité fait référence à la période de temps disponible pour une utilisation efficace des dispersants. Cette période varie en fonction du type d'hydrocarbures et des conditions météorologiques et océanographiques (principalement la température, l'état de mer / le vent) et est généralement estimée autour de **12-24 heures** à basses températures et entre **24 et 72 heures** dans des conditions plus tempérées.

Plus les hydrocarbures vieillissent, plus l'énergie de brassage nécessaire est importante pour une application efficace des dispersants. La décision de recourir aux dispersants doit donc être prise avant le déversement, lors de la planification des mesures d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures et peu de temps après le déversement.



Dispersibilité (%)

Bac de test IFP

Laboratoire IFP

Viscosité (mPa.s)

Figure 16. Rapport entre l'efficacité des dispersants et la viscosité des hydrocarbures. Résultats de tests réalisés sur du pétrole brut par le Cedre. Trois zones sont clairement identifiées : 1) les hydrocarbures sont facilement dispersés ; 2) les

hydrocarbures sont plus difficiles à disperser ; et 3) la viscosité des hydrocarbures est telle qu'ils ne peuvent pas être dispersés.

- Disponibilité du matériel et mode opératoire

En cas de déversement, il est important de tenir compte de la disponibilité à court et moyen termes :

- des stocks de dispersants ;
- des moyens d'application des dispersants (navire, avion, hélicoptère) ;
- des pompes et citernes.

La coordination des opérations sur le terrain est aussi un point essentiel pour que les produits employés soient les plus efficaces possible sur la pollution.

Par ailleurs, pour un même produit et système d'épandage, divers paramètres peuvent avoir une influence sur l'efficacité de la dispersion chimique, notamment :

- la vitesse de dispersion (qui influence la taille des gouttelettes (cisaillement du vent) et le débit d'application, tout particulièrement pour l'épandage aérien) ;
- l'orientation de la buse (qui doit pointer vers le bas ou l'arrière afin de limiter l'effet de l'érosion par l'air en réduisant la vitesse relative du liquide par rapport à l'air) ;
- le positionnement des buses par rapport à leur environnement (proximité de l'eau, interférences ou turbulences créées par le support (aile d'avion, coque de navire, etc.)).

Donc, si l'efficacité de la dispersion dépend en partie de l'environnement, du polluant et du dispersant, le mode de diffusion et par conséquent le système de pulvérisation/épandage, est également un point essentiel.

- Sensibilité du site

La présence d'animaux, comme des oiseaux ou mammifères marins, à proximité de la zone des opérations peut restreindre le choix des moyens et techniques d'application du dispersant. Il en va de même en cas de déversement dans une zone naturelle protégée ou sensible, où les opérations de récupération des polluants peut nécessiter une autorisation.

6 SYSTÈMES D'APPLICATION DES DISPERSANTS

Plusieurs moyens de dispersion existent ou sont en cours de développement, chacun associé à une ou plusieurs technologies de mise en œuvre. Ils doivent être sélectionnés en fonction des exigences et peuvent avoir un impact sur l'efficacité de la dispersion : l'objectif est de créer des gouttelettes d'hydrocarbures suffisamment petites pour être transportées de manière permanente dans la colonne d'eau. En effet, la stabilité de la dispersion est principalement liée à la taille des gouttelettes formées : lorsqu'elles sont suffisamment petites (généralement de l'ordre de 30 à 100 μm), elles peuvent rester en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet de la turbulence naturelle ; mais lorsqu'elles sont de plus grande taille, elles remontent plus ou moins rapidement pour reformer la nappe d'hydrocarbures à la surface.

Les systèmes de dispersion chimique, également appelés systèmes d'application des dispersants, peuvent être montés sur des aéronefs, des navires ou portés par des intervenants. Quel que soit le support, ils se composent généralement :

- d'un ou plusieurs **réservoirs de dispersants** ;
- d'un **filtre** pour éliminer les impuretés solides susceptibles d'obstruer le système. Les filtres sont généralement placés au-dessus de la pompe, pour la protéger de l'encrassement, et en amont des buses pour prévenir leur obstruction ;
- d'une **pompe d'alimentation**. Selon les exigences, différents types de pompes peuvent être utilisés (péristaltique, centrifuge, à piston, à engrenages, à membrane, etc.) ;
- **d'un ou plusieurs supports pour la ou les buses**. Ces supports peuvent, par exemple, être des rampes, des portiques ou des lances de différents types ;
- **d'une ou plusieurs buses étalonnées**. Ces buses sont, de préférence, équipées de soupapes qui se ferment lorsque la pression baisse, ce qui évite ainsi les fuites et maintient le niveau de dispersant lorsque l'épandage est arrêté. Tout le circuit de tuyauterie reste plein lorsque la pompe s'arrête, ce qui garantit un temps de réponse très court au redémarrage de la pompe. La buse a un impact sur le débit, la taille des gouttes (diamètre de l'orifice) et la répartition de l'épandage (forme de l'orifice). Les buses peuvent prendre différentes formes :
 - en forme de cône plein ;
 - en forme de cône vide, ce qui concentre le dispersant sur les bords extérieurs du cône ;
 - plates ou en forme d'éventail, ce qui produit une pulvérisation fine avec un mouvement elliptique. Les bords des pulvérisateurs adjacents se chevauchent afin d'obtenir une distribution uniforme.

Les développements concernant les dispositifs d'épandage permettent désormais de pulvériser des gouttelettes de la bonne taille et, pour certains, de faire varier le rapport dispersants/hydrocarbures afin de traiter des nappes aux épaisseurs variables.

Le choix du système d'application des dispersants dépend essentiellement :

- des types de dispersants disponibles ;
- des types de dispositifs d'épandage disponibles ;
- de la taille et de l'emplacement du déversement ; et
- de la localisation.

6.1 Systèmes d'épandage montés sur des aéronefs

L'épandage de dispersants par voie aérienne présente plusieurs avantages : contrôle et évaluation des résultats satisfaisants, grande réactivité, taux de traitement élevés, utilisation optimale du produit, indépendance vis-à-vis de l'état de la mer. De nombreux systèmes d'épandage ont été élaborés pour être utilisés à partir d'aéronefs à voilure fixe ou tournante (hélicoptères). Les unités disponibles sont soit des aéronefs affrétés pour l'occasion, soit des équipements à installation permanente destinés spécialement à cet usage. Les avions à

système d'épandage intégré, communément utilisés dans le milieu agricole pour l'épandage sur les terres cultivées, peuvent être adaptés pour l'épandage de dispersants.

La qualité du traitement dépend fortement des conditions de vol. Le traitement doit être effectué à une **altitude minimale** et à des vitesses **n'excédant pas 300 km/h**. À plus grandes vitesses, les gouttelettes de dispersant sont atomisées très finement par le flux d'air et il est difficile de contrôler leur dépôt à la surface de la nappe.

Le recours aux aéronefs pose par ailleurs un certain nombre de problèmes, notamment le vieillissement de la flotte et la difficulté à obtenir les autorisations de survol de certains espaces aériens, en particulier quand certains aéronefs d'épandage sont d'anciens modèles militaires.

L'application de dispersants par voie aérienne dépend de la visibilité au-dessus de la zone de la nappe à traiter et de l'énergie des vagues pour le brassage des dispersants et des hydrocarbures.

6.1.1. Avions

Les systèmes de rampes d'épandage, conçus et certifiés pour des types et modèles d'aéronefs spécifiques, incluent le stockage du dispersant, une pompe, des rampes de pulvérisation dotées de buses et un système de commande à distance.

Les rampes ont été classées en **deux catégories** :

- Les **rampes fixes**, qui peuvent se trouver au niveau de l'aile (au-dessus ou en dessous) ou sous le fuselage de l'aéronef.
- Les **rampes modulaires**, qui peuvent être déployées ou installées selon les besoins.

Outre le système d'épandage en lui-même, son positionnement peut avoir une influence sur l'efficacité de la dispersion. Par exemple, on estime qu'un positionnement sous l'aile est plus favorable pour la dispersion en canalisant les jets, contrairement aux rampes placées sur l'aile, qui permettent un éventuel épandage dans un espace dépressionnaire fortement perturbé.

Rampe fixe sur l'aile : modèles agricoles

Les **avions d'épandage agricole** sont facilement disponibles. Il est cependant conseillé d'adapter les buses de pulvérisation car les taux d'application de dispersants sont supérieurs à ceux des produits agrochimiques. Ces avions ne permettent pas de s'éloigner du littoral en raison de la capacité limitée de leurs réservoirs, mais aussi parce que la sécurité offerte par ces monomoteurs est limitée. Ces avions sont conçus pour les pollutions d'une échelle limitée.



Figure 17. Avion d'épandage agricole (Antonov 2) (© Cedre).

Rampes d'épandage fixes sur l'aile de l'avion

Les systèmes fixes pour avions multimoteurs convertis sont équipés d'un dispositif de stockage des dispersants, d'une pompe avec générateur de puissance, de rampes d'épandage dotées de buses et d'un système de commande à distance. Une autre option consiste à utiliser un système autonome (doté d'un réservoir, d'une pompe et de rampes d'épandage). Ces systèmes peuvent être montés sous le fuselage comme une nacelle amovible (par ex. : à la place de la soute à bagages). Ils permettent de convertir très rapidement un avion conventionnel en dispositif d'épandage aérien.

Situé directement sur la surface de l'aile, ce type de rampe n'est pas recommandé dans les climats froids car il pourrait encourager la formation de glace sur l'aile.



Figure 18. Exemple de systèmes fixes sur les ailes de l'avion. DC-6 de Florida Air Transport (N70BF) effectuant des tests d'épandage (Source: <http://floridaairtransport.com/index.php>).

Rampe d'épandage fixe sous le fuselage

Oil Spill Response Limited (OSRL) et 2Excel Aviation ont développé un système d'épandage de dispersant appelé TERSUS (qui signifie « nettoyage » en latin), spécifiquement conçu pour une utilisation sur des avions à réaction.

Ce système assure un débit variable compris entre 500 et 1 200 litres par minute via deux rampes d'épandage équipées chacune de 15 buses. Le dispersant (réservoir de 15 000 litres) est appliqué à une altitude de 150 pieds (environ 45 m) et une vitesse de 150 nœuds. Ce système peut être adapté à différents aéronefs et est compatible avec neuf types de dispersants.



Figure 19. Système de dispersion TERSUS (©OSRL)

Rampe d'épandage modulaire déployable pour aéronef avec rampe de chargement

Des packs spécifiques ont été conçus pour l'épandage de dispersants lorsqu'un fort taux de traitement est nécessaire.

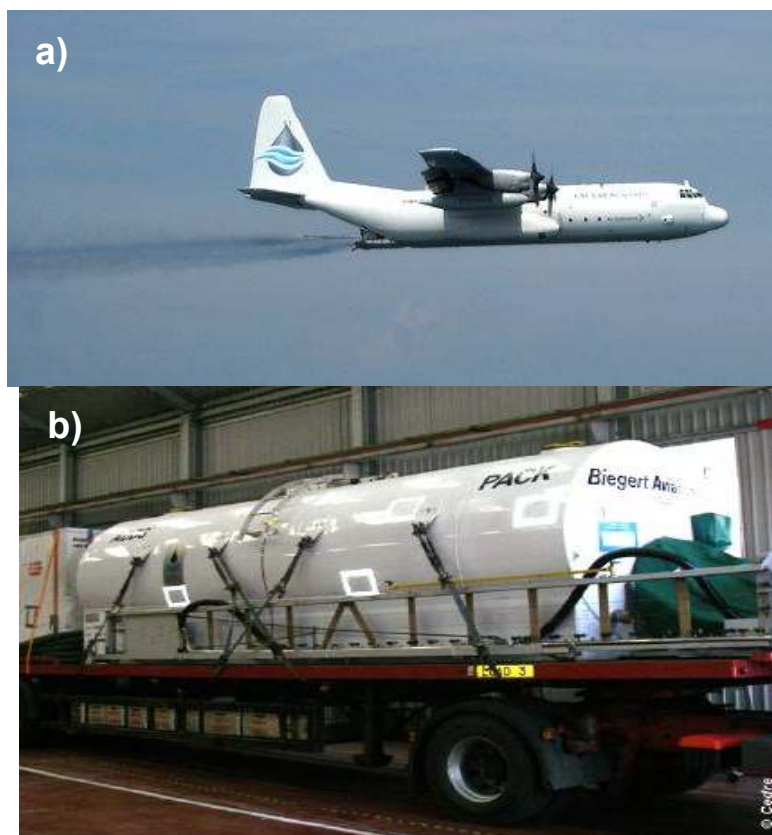


Figure 20.a) Application de faux dispersant (eau) par l'aéronef Hercules d'OSRL équipé d'un pack ADDS ; et b) Système de livraison de dispersant aéroporté (Biegert Aviation Inc.) (©Cedre).

Rampe d'épandage modulaire externe pour aéronef ; Systèmes d'épandage POD

Les systèmes d'épandage POD modulaires ont été développés par OSRL pour être installés sous le fuselage, sous la forme d'une nacelle amovible (c.-à-d. au lieu de la soute à bagages), et offrent une alternative aux systèmes fixes. Ces systèmes autonomes (qui comprennent un réservoir, une pompe et des rampes d'épandage) permettent de transformer rapidement un aéronef classique en pulvérisateur. Leur réservoir peut contenir jusqu'à 1,5 t de dispersants.



Figure 21. Avion avec module d'épandage POD (© Cedre).

Systèmes autonomes d'épandage aéroportés

Ces systèmes sont conçus pour s'adapter aux avions de fret de grande capacité munis de portes de soute arrière pouvant rester ouvertes durant le vol. Les unités conteneurisées sont équipées d'un réservoir, d'un générateur de puissance, d'une pompe et de rampes d'épandage rétractables. Elles peuvent être rapidement montées dans la cale.



Figure 22. Système NIMBUS L-382 par Ayles Fernie (© Ayles Fernie).

6.1.2. Hélicoptères

Les systèmes d'épandage pour hélicoptères sont :

- soit montés **sous le fuselage** (et se composent des mêmes pièces que les unités POD équipant les avions). Comme pour les avions, ces systèmes peuvent à l'origine avoir été conçus pour l'épandage de produits agricoles ou chimiques, mais ont été adaptés pour l'épandage de dispersants. Chaque modèle est conçu spécifiquement pour un type d'hélicoptère. Les hélicoptères avec une capacité d'emport de 300 à 800 kg ont une portée limitée et ne peuvent être utilisés que dans les zones côtières, à proximité de sites d'atterrissage ;
- soit des **systèmes autonomes héliportés**. Les systèmes héliportés (ou « systèmes à cuve héliportée ») peuvent être utilisés avec la plupart des hélicoptères munis d'un crochet pour le transport de charges suspendues. Le système de cuve à dispersant est constitué d'un réservoir suspendu sous l'hélicoptère, équipé d'un aileron pour l'empêcher de tourner pendant le vol, et doté de deux barres d'écarteur à plusieurs buses. Le produit est acheminé jusqu'aux rampes par une pompe centrifuge entraînée par un moteur autonome positionné sous le réservoir. L'épandage est déclenché depuis l'hélicoptère à l'aide d'une commande à distance. Le système peut être relâché en cas d'urgence.



Élingue // Rampe // Réservoir

Figure 23. Hélicoptère lourd Super Frelon de la Marine française équipé d'un système à cuve (© Cedre).

Systèmes fixes d'épandage par hélicoptère

Ces systèmes sont montés sous le fuselage et équipés des mêmes éléments que les unités conçues pour les aéronefs à voilure fixe.



Figure 24. Systèmes d'épandage fixes pour hélicoptère (©Dart Aerospace)

Cuves à dispersants héliportées

Elles peuvent être utilisées avec tout hélicoptère muni d'un crochet pour le transport de charges suspendues. Les unités sont autonomes (réservoir, pompe, générateur de puissance, rampes d'épandage) et télécommandées depuis le poste de pilotage.



Figure 25. Cuve à dispersant héliportée utilisée lors d'un exercice Polmar-Terre/Mer dans les Côtes d'Armor (France) (© Marine française)

6.2 Systèmes d'épandage montés sur navires

Les navires sont les équipements les plus adaptés pour la dispersion de pollutions de petite envergure ou, dans certains cas, et notamment lorsqu'ils se trouvent déjà sur site, pour traiter les pollutions de moyenne taille.

Leur forte capacité de transport et leur capacité à rester sur site pendant de longues périodes en font un bon complément aux équipements d'épandage aériens.

Rampes d'épandage pour navires

Les systèmes de rampes d'épandage pour navires peuvent être :

- **Montés sur paravane** : ces rampes se composent d'un mât, d'un tuyau et d'une ligne d'épandage de dispersant. En fonctionnement, la canalisation porte-buses est acheminée le long de la ligne jusqu'au haut du mât.



Figure 26. Rampe montée sur paravane (© Elastec).

- **Montés sur navire** : ces rampes sont généralement positionnées des deux côtés du pont avant afin d'appliquer le dispersant de manière optimale. Ces systèmes peuvent être montés sur le pont de franc-bord du navire, sur le cadre de la pompe ou intégrés dans la coque. Cependant, ce type d'équipement peut être difficile à utiliser en cas de fortes déferlantes.

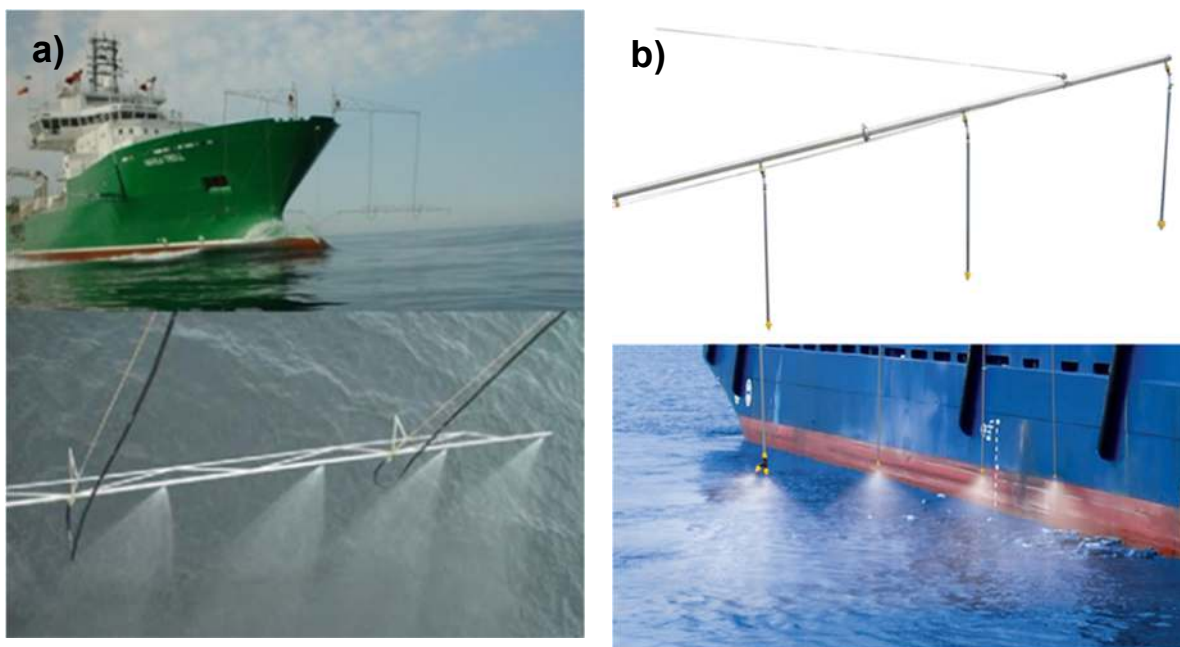


Figure 27. a) Rampe à simple jet (© Jason Engineering AS), b) Autre exemple de rampe pour dispersants (© Ayles Fernie).

Lance à simple buse

Ces systèmes ont été conçus pour être déployés sur tous types de navires, y compris les « navires de passage » comme les remorqueurs, les navires ravitailleurs offshore et les bateaux utilitaires. Les plateformes et installations fixes comme les quais peuvent également en être équipées.

Ces systèmes, qu'ils soient portables ou fixes, sont plus compacts que les rampes de pulvérisation et plus faciles à monter et utiliser.

Les lances à simple buse peuvent être mobiles ou fixes, intégrées directement dans la coque du navire.

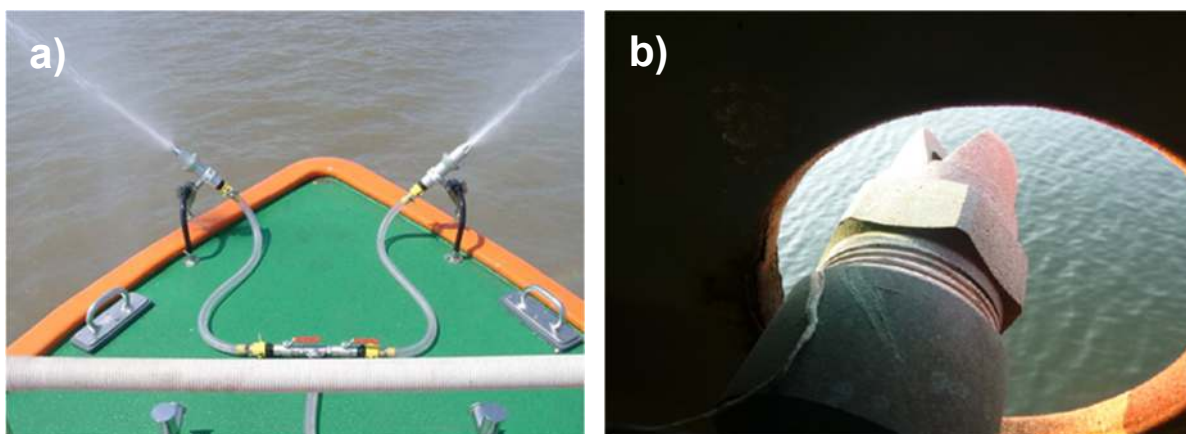


Figure 28. a) Lance à simple buse mobile (© Clean Caribbean & Americas), b) Système fixe intégré directement dans la coque du navire (© TotalEnergies).

Barrages avec portique pour dispersant

Les systèmes de barrages équipés de portiques pour dispersant peuvent être utilisés pour concentrer de larges bandes de nappes d'hydrocarbures distinctes d'une épaisseur variable en une bande relativement uniforme. Cette bande uniforme passe ensuite sous un portique où le dispersant est appliqué. Ces systèmes ont été conçus pour limiter le surdosage et le sous-dosage des dispersants.

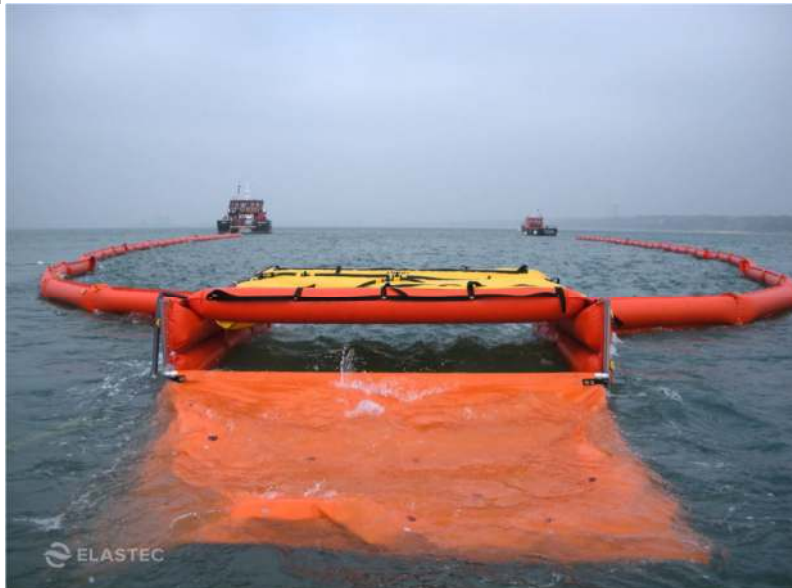


Figure 29. Système de barrage avec dispersant (Neatsweep, Elastec) (©Elastec).

6.3 Avantages et limitations des deux principaux systèmes d'application de dispersant

Le tableau qui suit répertorie les principaux **avantages et inconvénients** des systèmes d'application par voie aérienne et depuis un navire.

Tableau 6. Avantages et limitations des deux principaux systèmes d'application de dispersant.

Système	Avantages	Limitations
Application aérienne	- Rapidité : capacité à se rendre sur site en très peu de temps, ce qui offre une meilleure opportunité d'application du traitement avant le vieillissement des hydrocarbures ; - Taux de prospection élevé ; - Capacité d'épandage même par mauvaises conditions en mer ; - Le guidage aérien est moins nécessaire.	- Épandage inégal et perte de dispersant allant jusqu'à 50 % (l'épandage se faisant à 10-30 mètres au-dessus de la surface de l'eau, une partie du dispersant est perdue sans atteindre sa cible) ; - Ajustement du dosage de dispersant difficile au cours de l'application ; - Capacité d'emport des hélicoptères limitée ; - Dépend des conditions météorologiques ; - Ne favorise pas le brassage/l'agitation de l'eau.

Application depuis un navire	- L'agitation créée par la vague d'étrave aide à initier la dispersion lorsque les conditions en mer sont trop calmes ; - Traitement possible des nappes fortement fragmentées avec l'aide d'un guidage aérien pour les repérer ; - Le dosage du dispersant peut être adapté, soit en modulant la vitesse du navire, soit en utilisant un équipement d'épandage spécifique ; - Capacité de transport de dispersant potentiellement supérieure aux équipements aéroportés ; - Capacité à rester sur site pendant de longues périodes.	- Le délai d'intervention peut être plus long, ce qui réduit les chances de pouvoir appliquer le traitement pendant la fenêtre de dispersibilité ; - Taux de prospection limité (en hectares traités par heure) du fait d'une vitesse de traitement limitée ; - Sensibilité à l'état de la mer : dès que l'état de la mer se détériore, les mouvements du navire sont réduits ; - Un guidage aérien est nécessaire.
--	---	--

7. DOSAGES ET TAUX D'APPLICATION DES DISPERSANTS

Lors de l'application de dispersants, il est essentiel de maintenir un dosage efficace pendant toute l'opération, qui peut donc être adapté en fonction des conditions environnementales et de l'évolution de la situation. La quantité de dispersant à appliquer pour une quantité d'hydrocarbures donnée afin d'obtenir une dispersion satisfaisante dépend du type d'hydrocarbures, de son stade de vieillissement, de sa consistance, des conditions de l'environnement (par ex. : des vagues), et de la nature du dispersant.

Dans certains cas, comme lors de l'incident du « Sea Empress » en 1995, les hydrocarbures peuvent facilement être dispersés, auquel cas un plus faible dosage (rapport hydrocarbures/dispersants ou DOR) peut se révéler suffisant. Dans d'autres cas moins favorables (faible capacité à disperser les hydrocarbures), il peut être indiqué d'augmenter le dosage.

En pratique, il est conseillé de se référer aux dosages recommandés par le fabricant, qui peuvent être ajustés durant les opérations en fonction des moyennes de certaines données.

Les données pour les **dispersants concentrés** (ou de 3^e génération) se situent autour de 20:1 pour les hydrocarbures jusqu'à 5 000 cSt. Ces valeurs peuvent augmenter entre 20:1 et 10:1 pour le traitement d'hydrocarbures d'une viscosité comprise entre 5 000 et 10 000 cSt. Le traitement des hydrocarbures d'une viscosité supérieure à 10 000 cSt est inefficace. Un dosage inférieur à 20:1 suffit pour les hydrocarbures frais et légers, faciles à disperser, avec une viscosité inférieure à 500 cSt.

Les **taux d'application** établis en fonction de l'épaisseur de la nappe sont calculés à partir de règles généralement acceptées pour l'évaluation de l'épaisseur des nappes d'hydrocarbures (l'épaisseur des tâches noires est estimée à environ 0,1 mm, celle des pellicules irisées à la surface devrait se situer entre 0,001 et 0,01 mm). Quel que soit le dispositif d'épandage utilisé, le taux d'application est déterminé par le débit de la pompe à dispersant, la vitesse du navire ou de l'aéronef et l'étendue de la zone couverte par l'épandage (bande balayée ou largeur d'épandage). La relation entre ces variables est la suivante :

$$\text{Taux d'application} = \frac{\text{Débit}}{\text{Vitesse} \times \text{Bande balayée}}$$

Puisque la bande balayée a une valeur constante pour chaque dispositif d'épandage utilisé, il est possible de calculer pour chaque nappe le taux d'application approprié :

- (i) soit en sélectionnant le débit approprié de la pompe à dispersant,
- (ii) soit en sélectionnant la vitesse appropriée du navire ou de l'aéronef.

On utilise très souvent les proportions suivantes : 100 litres de concentré par hectare pour des hydrocarbures de 0,1 mm d'épaisseur pour un dosage correspondant à 1:10 de dispersant dans le mélange dispersants/hydrocarbures.

8. CONDITIONS LOGISTIQUES POUR UNE UTILISATION EFFICACE DES DISPERSANTS

Quelle que soit l'échelle à laquelle les dispersants sont appliqués, leur utilisation exige un appui logistique bien organisé. Comme les hydrocarbures deviennent résistants à la dispersion chimique dès les premières heures ou premiers jours après le déversement, les responsables doivent être capables de disperser sans tarder lors du déversement. Par conséquent, toute la logistique doit être **planifiée en amont**.

Cet aspect devient particulièrement important quand les dispersants sont utilisés pour traiter des pollutions de grande ampleur, assez loin des côtes. Puisque la récupération mécanique des hydrocarbures nécessite également un appui logistique important, les contraintes logistiques peuvent constituer un facteur décisif pour décider de l'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre. Dans ce contexte, les principes de l'analyse NEBA aident à orienter le choix de la technique la plus appropriée. La disponibilité des équipements, des produits et du personnel nécessaires est un facteur majeur dans la prise de décision. Cependant d'autres facteurs tels que l'ampleur du déversement et sa localisation, les délais de mobilisation du personnel et des équipements, et les conditions océaniques et météorologiques dominantes auront également une grande influence sur le choix de la méthode.

Pour garantir une efficacité optimale de l'opération de dispersion, il faut accorder une attention particulière à ses aspects logistiques :

- Le traitement des hydrocarbures par les dispersants nécessite l'utilisation de **quantités considérables de produit**. La proportion de dispersants à appliquer est estimée à environ 5 % du volume d'hydrocarbures à traiter si des concentrés sont utilisés. Lorsque les dispersants conventionnels à base d'hydrocarbures sont utilisés, cette proportion peut atteindre pratiquement le même volume que les hydrocarbures (100 %). On comprend dès lors pourquoi, de nos jours, les produits conventionnels ne sont presque plus utilisés.
- Dans la plupart des pays, les **stocks** de dispersants ne sont généralement prévus que pour l'intervention initiale. Il est nécessaire de prendre des dispositions en amont, avec les fabricants et/ou les distributeurs, pour un approvisionnement en quantités supplémentaires de produits dans des délais très brefs. Des accords internationaux, régionaux, sous-régionaux et bilatéraux avec les pays voisins doivent être envisagés au préalable afin de mutualiser les stocks nationaux disponibles dans la région ou dans des pays plus éloignés. Les dispositions douanières doivent faire l'objet d'arrangements en amont afin de permettre des déplacements transfrontaliers sans obstacles. Les pays touchés par un déversement et nécessitant des stocks et des équipements supplémentaires peuvent solliciter l'aide du REMPEC pour faciliter la coordination de l'assistance régionale proposée dans le cadre du Protocole relatif à la coopération en matière de prévention de la pollution par les navires et de lutte contre la pollution de la mer Méditerranée par les hydrocarbures et les substances nocives et potentiellement dangereuses en cas de situation critique.
- Le **transport** des dispersants depuis le lieu de stockage, de production, ou depuis l'aéroport d'arrivée (seul le transport aérien entre deux pays est suffisamment rapide pour acheminer à temps les dispersants vers le pays affecté) vers le lieu du déversement ou la base opérationnelle, doit être planifié avec soin et exécuté avec précision. Si de grandes quantités de dispersants sont utilisées, leur transport depuis les entrepôts jusqu'à la base opérationnelle se fait plus efficacement en camions-citernes ou en conteneurs pour liquides qu'en fûts. Des pompes de grande capacité doivent être utilisées pour recharger les unités d'épandage.

- La **maintenance** des équipements d'épandage ainsi que des navires et des aéronefs concernés par l'opération doit être planifiée. Un stock des pièces détachées les plus importantes doit être prévu sur la base opérationnelle.
- Le **carburant** pour les navires et les aéronefs doit être disponible sur la base opérationnelle et le ravitaillement effectué rapidement sous peine de ralentir les opérations d'épandage. Lorsqu'il s'agit d'une intervention par voie aérienne, des difficultés de ravitaillement surviennent fréquemment car les réserves de carburant pour les avions équipés de moteurs à piston sont rares. Si des avions locaux sont utilisés, les dispositions relatives à leur ravitaillement doivent être prévues dès l'élaboration du plan d'urgence.
- Les **hélicoptères** peuvent atterrir pratiquement partout voire changer leurs systèmes d'épandage sans atterrir. Des pistes d'atterrissage pour aéronefs légers peuvent être aménagées en l'absence d'un héliport. Cependant, les grands avions nécessitent une longue piste et seuls les vrais aéroports peuvent faire office de bases de ravitaillement et de réapprovisionnement en dispersants.
- Un **hébergement pour les équipages** doit être fourni à proximité de la base. Lorsque de grands navires sont utilisés pour l'épandage, cette question ne se pose pas car les équipages sont hébergés à bord.
- Des **liaisons de télécommunication appropriées**, en particulier entre les avions de repérage et les unités d'épandage, sont essentielles.
- Des **contacts permanents** doivent être maintenus avec les autorités d'aviation nationales pour obtenir sans délai les autorisations nécessaires pour mener les opérations prévues.
- Si la demande d'équipements aériens par le biais de l'**assistance internationale** est envisagée, les autorisations de vol, la compatibilité des infrastructures (par ex. : caractéristiques des pistes) et la disponibilité des carburants spécifiques aux appareils doivent être vérifiés au préalable, idéalement lors de la préparation du plan d'urgence.
- Il convient d'intégrer la **rotation des équipages** lors de la planification des opérations d'épandage.

9. EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT DES DISPERSANTS ET DES HYDROCARBURES DISPERSÉS

La plupart des rapports scientifiques concluent que la toxicité associée à l'utilisation de dispersants ne réside pas dans la toxicité intrinsèque du produit mais plutôt dans la dispersion des hydrocarbures dans la colonne d'eau. Des études récentes ont montré que la dispersion des hydrocarbures augmente leur biodisponibilité pour les organismes marins.

Les effets de l'utilisation des dispersants sur l'environnement sont principalement liés :

- à la **toxicité** des mélange hydrocarbures/dispersants ;
- à leur influence sur la **dégradation microbienne** des hydrocarbures déversés ; et
- à leurs effets sur les **organismes marins** (oiseaux marins, mammifères, populations pélagiques et benthiques).

9.1. Toxicité des hydrocarbures et des hydrocarbures dispersés

Toxicité des hydrocarbures

Certains types d'hydrocarbures comportent une faible proportion de composés chimiques toxiques pour les organismes marins. Certains des composés de faible poids moléculaire dont la toxicité est des plus aiguës (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes, généralement évoqués sous le terme « composés BTEX ») sont également volatils et partiellement solubles dans l'eau. Le pétrole brut fraîchement déversé a une toxicité bien plus aiguë que celle des dispersants modernes utilisés contre les nappes d'hydrocarbures.

Les **hydrocarbures aromatiques polycycliques** (HAP) sont des composés de poids moléculaire élevé, présents en faible concentration dans plusieurs hydrocarbures. Leur toxicité est préoccupante. En effet, les HAP sont réputés carcinogènes et peuvent causer d'autres effets en cas d'exposition chronique.

Toxicité des hydrocarbures dispersés

La dispersion des hydrocarbures déversés transforme la nappe d'hydrocarbures à la surface de l'eau en un panache ou « nuage » constitué de très fines gouttelettes d'hydrocarbures disséminées dans la colonne d'eau. Il est possible que ces gouttelettes d'hydrocarbures soient ingérées par des organismes filtreurs tels que les copépodes, les huîtres, les pétoncles et les palourdes.

L'élargissement de la surface de la nappe d'hydrocarbures accroît le taux de dilution dans la mer de leurs composés chimiques partiellement solubles dans l'eau. La concentration localisée de ces **fractions solubilisées dans l'eau** (WAF) potentiellement toxiques va augmenter avant leur dilution. C'est de cette observation que découle l'argument selon lequel l'utilisation des dispersants ne constitue jamais une méthode valable de lutte contre les déversements car, lorsqu'ils sont efficaces, ils causent inévitablement une augmentation de la concentration d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau, ce qui engendre des effets toxiques sur la faune et la flore marines. Il est néanmoins important de distinguer :

- (i) la forte **éventualité** d'engendrer des effets toxiques, et
- (ii) la probabilité que les **effets toxiques se manifestent concrètement**.

Les concentrations d'hydrocarbures dispersés seront certainement plus élevées avec l'utilisation de dispersants. Cela ne signifie pas pour autant que ces concentrations seront assez denses ou qu'elles subsisteront assez longtemps pour causer de réels effets toxiques. La plupart des hydrocarbures se disperseront naturellement dès le début de leur déversement dans une certaine mesure, avant émulsification. L'utilisation concluante des dispersants entraînera évidemment une augmentation de la concentration d'hydrocarbures dispersés dans la mer. Il s'agit donc davantage d'une question de proportion que de différence absolue de concentration. Certains hydrocarbures sont susceptibles de se dissoudre et/ou de se disperser naturellement même en l'absence de dispersants.

L'exposition des organismes vivant sur la couche supérieure de la colonne d'eau de mer est exacerbée par la dispersion d'hydrocarbures dans cette dernière. Cependant elle sera faible si le panache d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau se dilue rapidement. L'expérience issue des tests réalisés sur le terrain ainsi que des opérations de dispersion offshore effectuées sur des pollutions réelles a montré que les **hydrocarbures dispersés se diluent rapidement dans l'eau de mer**. La concentration d'hydrocarbures dans l'eau situés sous la nappe décroît rapidement, passant d'une fourchette maximale de 30-50 ppm très peu de temps après le traitement, à des concentrations inférieures à 1-10 ppm sur les 10-20 premiers mètres en-dessous du niveau de la mer au bout de quelques heures.

La dispersion naturelle entraînant la dissémination des hydrocarbures dans l'environnement étant particulièrement rapide lorsqu'il s'agit d'hydrocarbures de faible viscosité dispersés en mer agitée, certains organismes marins seront exposés à une certaine concentration d'hydrocarbures, et ceci même sans recours aux dispersants.

Une fois entrés en contact avec les cellules, les dispersants peuvent affecter leur fonctionnement et métabolisme en provoquant des altérations sur l'intégrité de la membrane et un déséquilibre des électrolytes avec une perte de la perméabilité osmotique des cellules et une lyse cellulaire (Singer *et al.* 1991, 1996 ; National Research Council, 2005). L'EPA (2001) a publié une étude comparative sur les crustacés et poissons exposés à quatre dispersants qui montre des effets toxiques plus importants pour les hydrocarbures dispersés que pour les hydrocarbures et le dispersant individuellement. D'autres études ont confirmé que les dispersants sont moins toxiques que les hydrocarbures testés (Hemmer *et al.* 2011 ; Barron *et al.* 2013 ; Claireaux *et al.* 2013 ; McConville *et al.* 2018). La NASEM (2020) a fait état d'un recueil de données qui a mis en lumière que les hydrocarbures dispersés ne sont pas plus toxiques que les hydrocarbures non traités à des concentrations inférieures à 100 mg d'hydrocarbure/L, mais qu'au-delà de cette valeur les dispersants peut faire augmenter la toxicité des hydrocarbures. Enfin, Fingas (2021) a analysé des études sur l'écotoxicité publiées entre 2017 et 2021, et en a conclu que les hydrocarbures dispersés chimiquement étaient plus toxiques que les hydrocarbures dispersés mécaniquement.

Tableau 7. Données de l'incident du Sea Empress.

Lors du naufrage du « Sea Empress » (Pays de Galles, 1996), qui a été à l'origine de la plus grande opération de traitement aux dispersants (440 tonnes de dispersants ont été épandus en mer sur du pétrole brut frais), les concentrations en hydrocarbures suivantes ont été relevées dans la colonne d'eau superficielle :	
Temps écoulé après l'application du dispersant	Concentration en hydrocarbures dans la colonne d'eau superficielle (en ppm)
Immédiatement	10
2 jours	1
1 semaine	0,5
1 mois	0,2
3 mois	Niveau initial

**Figure 30. Incident du Sea Empress (Royaume-Uni) (© Cedre).**

De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer les procédures de test de toxicité qui permettent d'exposer les organismes témoins dans des conditions proches du terrain. Les tests de toxicité réalisés avec des « pics d'exposition » réalistes montrent que l'utilisation de dispersants est sans effets conséquents sur les embryons et les larves lorsque les concentrations en hydrocarbures dispersés sont inférieures à la fourchette de 5-10 ppm. Il apparaît par ailleurs qu'un niveau de 10-40 ppm-heures (concentration en ppm multipliée par l'exposition en heures) n'engendre aucun effet significatif sur des organismes marins plus évolués tels que les larves plus âgées, les poissons et les crustacés.

Des études récentes (par ex. : le projet Discobiol) montrent toutefois que :

- les concentrations léthales sur les populations adultes et juvéniles sont bien plus élevées que les concentrations effectivement observées lors des incidents réels ;
- les effets sublétaux peuvent être observés après la période d'exposition (bioaccumulation, métabolites dans le foie, indicateurs de stress) ; toutefois la plupart des effets observés sont réversibles dans des délais relativement courts : au bout de 2 semaines de convalescence, les effets observés disparaissent ou se résorbent à un niveau proche de la situation initiale.



Figure 31. Évaluation de l'impact des hydrocarbures dispersés sur les poissons et les moules – Programme Discobiol (© Cedre, © Laurent Mignaux).

Lorsque les exigences concernant la profondeur et les échanges d'eau pour une dilution adéquate sont respectées, l'utilisation des dispersants pour disséminer les hydrocarbures présente peu de risques d'atteindre des concentrations assez fortes et des périodes assez prolongées pour entraîner des effets critiques sur la plupart des créatures marines.

De manière générale, l'observation montre que l'impact sur l'environnement de l'épandage de grandes quantités de dispersants en mer à l'issue d'incidents impliquant de grandes quantités d'hydrocarbures déversées en mer (par ex. : Sea Empress) est moins fort que prévu. De plus, l'ensemble des avantages résultant de l'utilisation des dispersants sont confirmés.

9.2. Dégradation microbienne

Qu'elle soit mécanique ou chimique, la dispersion des hydrocarbures les rend plus disponibles pour les micro-organismes présents dans l'eau de mer. L'influence des dispersants sur la dégradation microbienne des hydrocarbures est donc importante.

Des micro-organismes capables de survivre au contact des hydrocarbures sont présents dans toutes les mers et le taux de dégradation microbienne est directement lié au degré de dispersion des hydrocarbures. Les fractions paraffiniques et fortement et moyennement aromatiques des hydrocarbures sont biodégradables, tandis que la biodégradabilité des hydrocarbures polyaromatiques (4, 5 cycles) et des asphaltènes n'est pas rigoureusement prouvée. Il n'existe pas de données corroborant la biodégradation des fractions polaires, des composés azotés, soufrés ou oxygénés, et des questions subsistent quant à la persistance de ces composés.

Les dispersants améliorent le taux de biodégradation des hydrocarbures en augmentant :

- leur rapport surface/volume ;
- leur biodisponibilité (réduction de la tendance des hydrocarbures à former des boules de goudron ou de la mousse ; stabilisation des gouttelettes d'hydrocarbures dans la colonne d'eau pour les empêcher d'échouer sur le littoral ou de se sédimenter).

À l'inverse, les dispersants peuvent réduire le taux de biodégradation des hydrocarbures en constituant un nouveau substrat bactérien (le dispersant). En effet, ils peuvent exercer une attraction des micro-organismes supérieure à celle des hydrocarbures, ou accroître les concentrations d'hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau, ce qui peut avoir des effets de toxicité ou d'inhibition temporaires sur les populations microbiennes naturellement présentes dans le milieu.

De même que pour la toxicité, la plupart des connaissances concernant la dégradation des hydrocarbures dispersés se limitent à des résultats en laboratoire ou à des études à petite échelle. Certaines études en laboratoire et toutes les études en mésocosme ont montré une amélioration du taux de biodégradation des hydrocarbures lorsque des dispersants sont utilisés. Une inhibition temporaire de la biodégradation des hydrocarbures dispersés a été observée lors de tests en laboratoire. Cependant, cette inhibition semble se produire pour des concentrations d'hydrocarbures dispersés supérieures à celles envisagées sur le terrain. Des résultats d'études menées en étangs et en mésocosme indiquent clairement que l'utilisation des dispersants améliore le taux de biodégradation des hydrocarbures dispersés. Il faudrait réaliser des études plus poussées pour déterminer si les dispersants améliorent le degré de biodégradation. Les informations disponibles suggèrent que les composés réfractaires resteraient insensibles malgré l'adjonction de dispersants.

9.3. Effets sur les organismes marins

La réponse des organismes marins évoluant à la surface de la mer, comme les oiseaux marins, les tortues et les mammifères, lorsqu'ils sont exposés à des hydrocarbures dépend de leur sensibilité au polluant et de la durée de l'exposition. Il existe en somme **quatre modes** de contact avec les hydrocarbures :

- 1) **Absorption dans l'eau** : les organismes marins peuvent être exposés aux hydrocarbures naturellement dispersés dans la colonne d'eau via l'absorption de composés d'hydrocarbures biodisponibles à travers leurs membranes externes et systèmes respiratoires.
- 2) **Contact direct** : ces organismes peuvent entrer directement en contact avec les hydrocarbures lorsqu'ils nagent ou remontent à la surface pour respirer. Leurs corps peuvent être recouverts d'hydrocarbures, altérant alors l'imperméabilité et les propriétés isolantes de leur plumage ou fourrure, ce qui peut entraîner une hypothermie voire le décès. D'autres tissus particulièrement sensibles tels que les yeux peuvent également être affectés.
- 3) **Inhalation et aspiration** : les organismes qui respirent à la surface de l'eau peuvent être exposés aux composés organiques volatils des hydrocarbures et éventuellement à des gouttelettes d'hydrocarbures qui ont été transformées en aérosols depuis les nappes en surface par l'action du vent, de l'énergie de brassage ou de la pluie. Les animaux tels que les cétacés peuvent avaler de l'eau contenant des hydrocarbures liquides, ce qui cause des irritations du système respiratoire, des maladies pulmonaires et des pneumonies. Ces animaux peuvent aussi être exposés à des gouttelettes

d'hydrocarbures transformées en aérosols par les dispersants, qu'ils peuvent inhaler par leurs événements.

- 4) **Ingestion** : lorsqu'ils se nourrissent, les organismes marins peuvent être exposés aux hydrocarbures directement en ingérant de l'eau, des sédiments ou une source de nourriture contaminée par des composés d'hydrocarbure. Si certains de ces composés peuvent être éliminés par le système digestif en raison de leur insolubilité, d'autres fractions, plus solubles dans les fluides intestinaux, peuvent être absorbées et passer dans le flux sanguin. L'ingestion indirecte peut également survenir lors du toilettage ou du lissage.

La réduction de ces effets par l'utilisation de dispersants n'a pas fait l'objet d'études exhaustives, mais il est attendu que des gouttelettes d'hydrocarbure de plus petite taille favorisent la dissolution des composés solubles et semi-volatils présents dans les hydrocarbures, ce qui réduit la concentration en substances volatiles en suspension dans l'interface air/eau. Les impacts potentiels sur la faune vivant à la surface de l'eau devraient donc être réduits.

Mais les effets de l'utilisation de dispersants sur la faune marine ne sont pas entièrement compris, notamment en raison du manque d'études sur site et de la difficulté à faire la distinction entre les impacts des hydrocarbures dispersés chimiquement et ceux des hydrocarbures dispersés naturellement par le processus physique.

Il est reconnu que les déversements d'hydrocarbures présentent un plus fort risque de contamination pour les oiseaux marins, les tortues et les mammifères à fourrure car ils passent plus de temps à la surface de l'eau que les cétacés. Dans ce cas, une dispersion chimique efficace représente un bon moyen pour réduire l'épaisseur et la concentration des nappes d'hydrocarbures, et donc la toxicité potentielle et l'exposition de ces organismes aux polluants. Les expériences en laboratoire ont montré que les hydrocarbures dispersés chimiquement altèrent la structure et l'imperméabilité des plumes de certains oiseaux marins ainsi que leur flottabilité. Elles ont également démontré qu'il était difficile de faire la distinction entre l'ampleur des effets des hydrocarbures dispersés et ceux des hydrocarbures non dispersés.

Il est évident que de plus amples études sont nécessaires afin d'évaluer l'impact des hydrocarbures dispersés chimiquement sur la faune marine. Néanmoins, afin de limiter les potentiels effets toxiques liés à l'utilisation de dispersants, il est important d'adopter un ensemble de bonnes pratiques lors de l'application de dispersants. Ces pratiques incluent, par exemple, la présence d'observateurs de la faune lors de l'application de dispersants, qui peuvent confirmer l'absence d'animaux sensibles (par ex. des cétacés, des mammifères à fourrure, des oiseaux marins, des tortues) dans un périmètre défini autour de la zone de dispersion. Il est également possible d'envisager de prendre des mesures pour dissuader la faune d'approcher de la zone.

9.4. Impact sur les pêcheries

L'utilisation de dispersants peut avoir un impact sur l'industrie de la pêche car les poissons ou fruits de mer peuvent se retrouver en contact avec les gouttelettes d'hydrocarbures dans la colonne d'eau et être contaminés. Dans certains cas, les zones de pêche peuvent être temporairement fermées pour protéger la santé publique.

10. OUTILS D'ÉVALUATION DES AVANTAGES POUR L'ENVIRONNEMENT DE L'INTERVENTION

Plusieurs techniques sont disponibles pour lutter contre la pollution par les hydrocarbures ; chacune présentant des avantages et des limitations. Par conséquent, la décision d'employer l'une ou l'autre de ces techniques peut se révéler difficile pour les intervenants, en gardant à l'esprit que chaque cas de pollution est unique et que de nombreux facteurs doivent être étudiés. L'objectif de la lutte contre les déversements étant de réduire les impacts écologiques et socio-économiques globaux, plusieurs outils d'aide à la décision ont été développés pour faciliter la sélection d'une option de lutte.

Un des premiers outils développés dans les années 2000 est l'analyse NEBA (analyse des avantages nets pour l'environnement). Basée sur l'évaluation des risques environnementaux (ERA), l'analyse NEBA est un processus qui cherche à comparer les avantages environnementaux (écologiques, socio-économiques, culturels) de chaque technique de lutte possible, en se basant sur les données disponibles sur le contexte du déversement. De telles comparaisons permettent aux décideurs de trouver un compromis et de guider les stratégies vers les techniques et méthodes les moins préjudiciables pour l'environnement dans son ensemble.

Lorsque des dispersants sont utilisés, il est essentiel d'employer ces outils d'aide à la décision car les dispersants ne permettent pas de retirer la pollution de l'environnement mais plutôt de la transférer dans un autre compartiment environnemental (de la surface de l'eau vers la colonne d'eau), où elle sera plus facilement diluée et biodégradée. Il convient donc d'analyser finement les conséquences de ce transfert afin d'établir que cette technique n'a pas d'effets plus nocifs sur l'environnement que les autres techniques d'intervention.

Dans le cadre du développement d'un plan de lutte contre les déversements, il est recommandé d'évaluer certains scénarios de déversement avec une analyse NEBA afin de déterminer à l'avance les possibilités en matière de techniques de lutte. De cette manière, si l'utilisation de dispersants est la technique la plus appropriée, la fenêtre de dispersibilité est plus susceptible d'être respectée en cas de déversement d'hydrocarbures, ce qui améliore l'efficacité du dispersant. Ce processus doit inclure :

- **une évaluation des données disponibles** : identifier les scénarios de déversements d'hydrocarbures crédibles (sources/emplacement, type d'hydrocarbure, modélisation du devenir et de la trajectoire, etc.) ainsi que, sur consultation des parties prenantes locales, les ressources écologiques, économiques et sociales. À partir de cet inventaire, déterminer quelles ressources peuvent être menacées (par ex. les espèces sensibles, la proximité d'écosystèmes sensibles et de zones protégées, la météo, les changements saisonniers, les zones de pêche, les usines de dessalement, etc.), en tenant compte de leur sensibilité et de la récupération potentielle ;
- **la prévision des résultats** : examiner les déversements passés pour identifier les principaux facteurs ayant permis de prévoir et de prévenir les effets potentiels. Pour chaque ressource menacée, l'impact potentiel d'une absence d'intervention est évalué et sert de référence pour estimer les effets des autres options de lutte ;
- **l'identification de compromis** : comparer les différentes ressources écologiques, socio-économiques et culturelles précédemment identifiées dans les scénarios pour déterminer quelles techniques d'intervention seront les plus efficaces tout en minimisant les impacts et en garantissant la protection de l'environnement dans son ensemble ;

- **la sélection des meilleures options** : en tenant compte de l'impact des hydrocarbures selon qu'ils sont dispersés ou non, il est recommandé d'élaborer des plans de protection des ressources prioritaires. Les techniques de lutte qui minimisent les effets du déversement tout en permettant une récupération plutôt rapide de l'environnement sont, après les étapes précédentes, clairement identifiées.

Au cours des 20 dernières années, d'autres outils d'aide à la décision ont été développés pour améliorer le processus de l'analyse NEBA, notamment :

- *Évaluation des risques environnementaux par consensus (CERA)* : cet outil se base principalement sur les travaux collaboratifs des parties prenantes sur les plans d'urgence et les plans d'intervention en cas de déversement. C'est une approche longue, qui est plus utilisée dans le cadre de la planification d'urgence que comme un outil adaptable en cas d'accident.
- *Évaluation de l'atténuation de l'impact des déversements (SIMA)* : cette approche réunit toutes les parties prenantes afin de définir les ressources à protéger en priorité. Elle peut être appliquée relativement rapidement et réévaluée en fonction de l'évolution de la situation à la suite d'un déversement.
- *Évaluation comparative des risques (CRA)* : c'est le dernier outil à avoir été développé et il inclut la modélisation du devenir/de la dérive ainsi que des effets. Il permet d'évaluer les effets potentiels du déversement de manière quantitative plutôt que de se fier aux évaluations qualitatives comme dans le cas des concepts de CRA/SIMA. Les simulations des modèles peuvent cependant prendre un certain temps, ce qui n'est pas forcément adapté dans le contexte d'un déversement réel.

La lutte contre les déversements d'hydrocarbures accidentels demande une réaction rapide. Ainsi, une planification préalable efficace augmente considérablement la réussite des opérations de lutte en encourageant les discussions entre les parties prenantes et en permettant une analyse détaillée des différentes ressources à protéger en priorité. L'adoption de bonnes pratiques est alors encouragée.

Des informations pratiques concernant la réalisation d'une analyse NEBA sont disponibles dans la Partie III des présentes Lignes directrices.

11. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES CONCERNANT L'UTILISATION DE DISPERSANTS EN MER MÉDITERRANÉE

La décision d'avoir recours à des dispersants comme moyen de lutte contre un déversement d'hydrocarbures doit être motivée par la nécessité de réduire les impacts environnementaux et socio-économiques de ce déversement en évitant que les hydrocarbures n'atteignent les littoraux ou des zones écologiques sensibles.

D'un autre côté, il faut impérativement prendre en considération les particularités de la mer Méditerranée, qui pourraient aggraver les effets négatifs découlant de l'utilisation de dispersants :

- c'est un bassin fermé dans lequel la circulation de l'eau est plutôt limitée, ce qui réduit la dilution des produits dispersés ;
- certains écosystèmes des fonds marins (par ex. les prairies de posidonie et les récifs coralligènes) qui sont endémiques de la Méditerranée et protégés au niveau international pourraient être impactés par les hydrocarbures dispersés.

Cette décision doit se baser sur un certain nombre de considérations, qui peuvent être évaluées en appliquant le processus d'analyse NEBA/SIMA, et doit répondre aux questions suivantes :

- i. la dispersion est-elle physiquement et chimiquement **possible** dans les conditions dominantes ?
- ii. la dispersion est-elle la technique la plus **bénéfique** pour l'environnement (écologiquement et socio-économiquement) ?
- iii. la dispersion est-elle logistiquement **réalisable** ?

Si ces trois conditions sont réunies, alors l'utilisation de dispersants peut être envisagée. En cas de réponse négative à l'une de ces questions, les autres options de lutte doivent être envisagées.

Les diagrammes ci-dessous présentent le processus de prise de décision pour chacune de ces questions portant sur l'utilisation de dispersants, à adapter aux conditions réelles de chaque déversement.

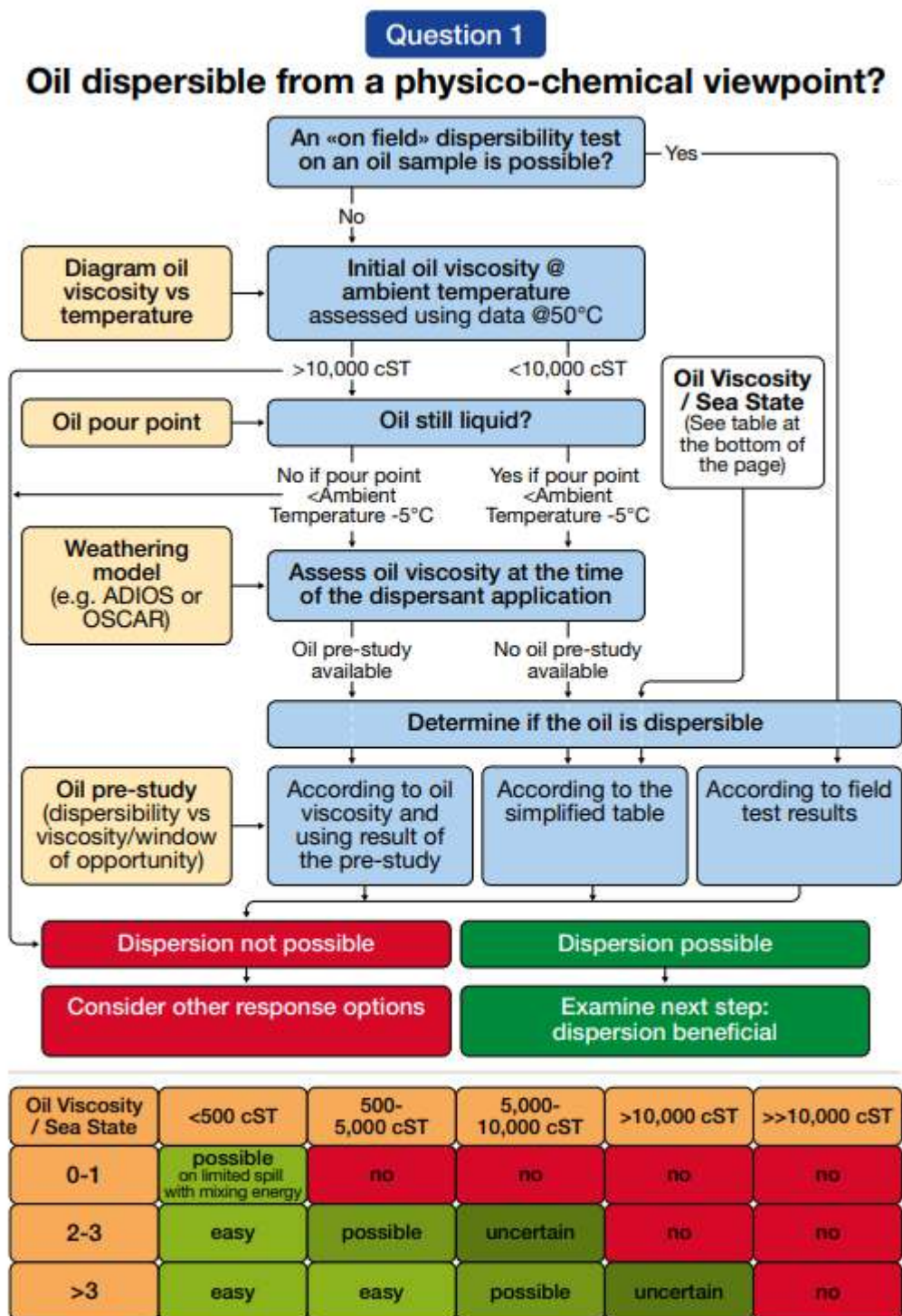


Figure 32. Première étape pour décider de l'utilisation de dispersants (de Merlin (Cedre) & Lee (COOGER)).

L'hydrocarbure est-il dispersible d'un point de vue physicochimique ?			
	Un test de dispersibilité « sur site » sur un échantillon d'hydrocarbure est-il réalisable ?		Oui
	Non		
Diagramme viscosité de l'hydrocarbure vs. température	Viscosité initiale de l'hydrocarbure à température ambiante évaluée en utilisant les données à 50 °C		
	>10 000 cST	<10 000 cST	
Point d'écoulement de l'hydrocarbure	Hydrocarbure toujours sous forme liquide ?		Viscosité de l'hydrocarbure / État de mer (voir tableau au bas de la page)
	Non si le point d'écoulement < température ambiante -5 °C	Oui si le point d'écoulement < température ambiante -5 °C	
Modèle de vieillissement (par ex. ADIOS ou OSCAR)	Évaluer la viscosité de l'hydrocarbure au moment de l'application du dispersant		
	Étude préalable sur l'hydrocarbure disponible	Pas d'étude préalable sur l'hydrocarbure	
Déterminer si l'hydrocarbure est dispersible			
Étude préalable sur l'hydrocarbure (dispersibilité vs. viscosité/fenêtre d'opportunité)	Selon la viscosité de l'hydrocarbure et à l'aide des résultats de l'étude préalable	Selon le tableau simplifié	Selon les résultats de test sur le terrain
Dispersion impossible		Dispersion possible	
Envisager d'autres options d'intervention		Examiner l'étape suivante : dispersion bénéfique ?	

Viscosité de l'hydrocarbure / État de mer	<500 cST	500 – 5 000 cST	5 000 – 10 000 cST	>10 000 cST	>>10 000 cST
0-1	Possible sur déversement limité avec énergie de brassage	Non	Non	Non	Non
2-3	Facile	Possible	Incertaine	Non	Non
>3	Facile	Facile	Possible	Incertaine	Non

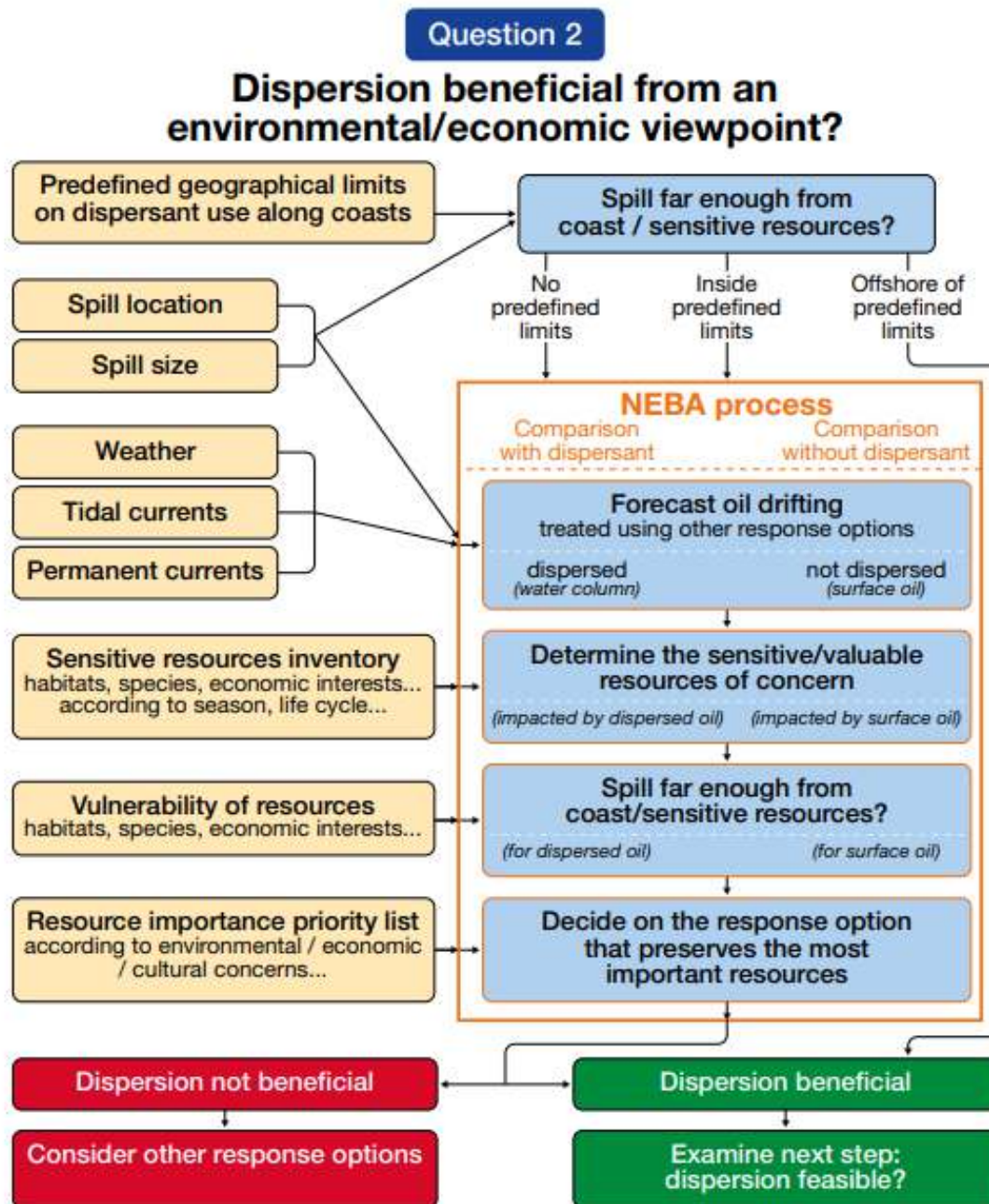


Figure 33. Deuxième étape pour décider de l'utilisation de dispersants (de Merlin (Cedre) & Lee (COOGER)).

Dispersion bénéfique du point de vue de l'environnement/économique ?			
Limites géographiques prédéfinies sur l'utilisation de dispersant le long des côtes	Déversement suffisamment au large des côtes / des ressources sensibles ?		
Localisation du déversement	Pas de limites prédéfinies	Dans les limites prédéfinies	Au large des limites prédéfinies
Taille du déversement	Processus NEBA		
Météo	Comparaison avec dispersant		Comparaison sans dispersant
Courants de marée	Prévisions de dérive de l'hydrocarbure traité à l'aide d'autres options de lutte		
Courants permanents	Dispersé (colonne d'eau)		Non dispersé (en surface)
Inventaire des ressources sensibles	Déterminer les ressources sensibles / importantes		
habitats, espèces, intérêts économiques... Selon les saisons, cycles de vie...	(impactées par l'hydrocarbure dispersé)		(impactées par l'hydrocarbure en surface)
Vulnérabilité des ressources	Déversement suffisamment au large des côtes / des ressources sensibles ?		
habitats, espèces, intérêts économiques...	(pour l'hydrocarbure dispersé)		(pour l'hydrocarbure en surface)
Liste de priorité des ressources Selon les préoccupations environnementales / économiques / culturelles...	Opter pour l'option d'intervention qui préserve les ressources les plus importantes		
Dispersion non bénéfique	Dispersion bénéfique		
Envisager une autre option d'intervention	Examiner l'étape suivante : dispersion réalisable		

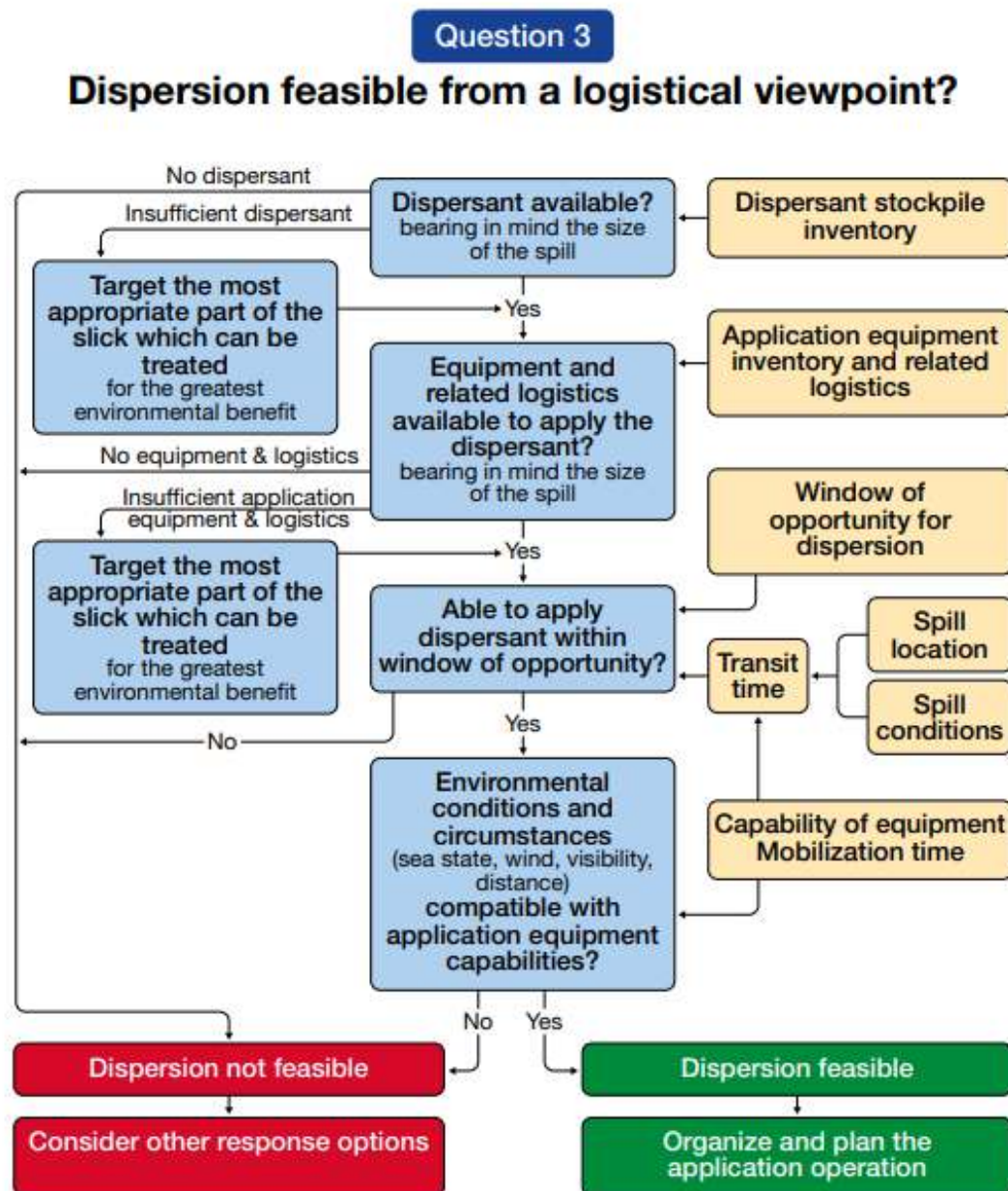
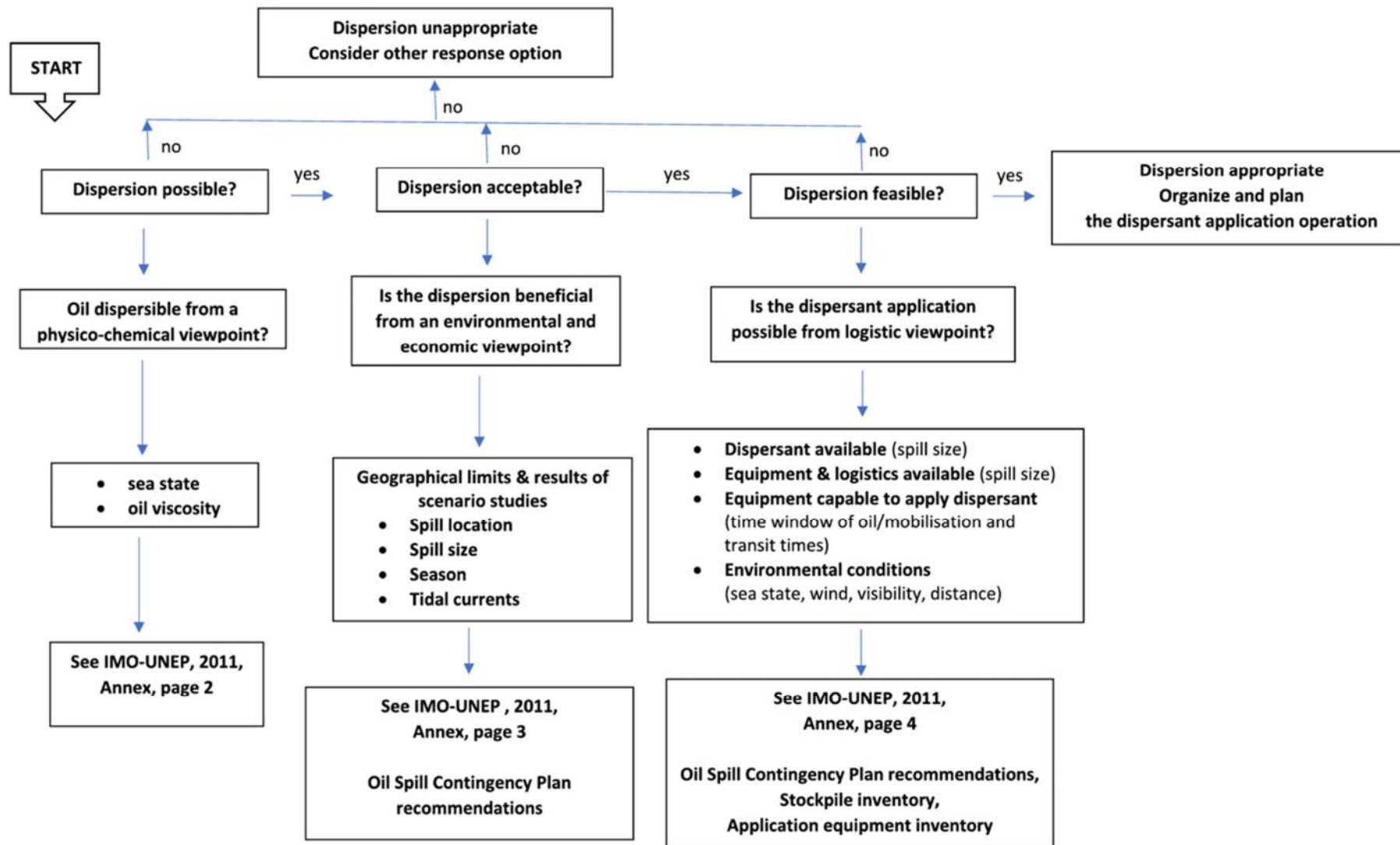


Figure 34. Dernière étape pour décider de l'utilisation de dispersants (de Merlin (Cedre) & Lee (COOGER)).

Dispersion réalisable d'un point de vue logistique ?			
Pas de dispersant	Dispersant disponible ? en tenant compte de la taille du déversement	Inventaire des stocks de déversant	
Dispersant insuffisant			
Cibler la partie la plus appropriée de la nappe pouvant être traitée pour obtenir le plus d'avantages pour l'environnement	Oui	Inventaire des équipements d'application et de la logistique connexe	
Pas d'équipements et logistique	Équipements et logistique connexe disponibles pour l'application de dispersant ? en gardant à l'esprit la taille du déversement		
Équipements d'application et logistique insuffisant			
Cibler la partie la plus appropriée de la nappe pouvant être traitée pour obtenir le plus d'avantages pour l'environnement	Oui	Fenêtre d'opportunité pour la dispersion	
	Possibilité d'appliquer le dispersant dans la fenêtre d'opportunité ?	Temps de transit	Emplacement du déversement
Non			Conditions du déversement
	Conditions environnementales et circonstances (état de mer, vent, visibilité, distance) compatibles avec les capacités des équipements d'application ?	Capacité des équipements Temps de mobilisation	
	Non	Oui	
Dispersion non réalisable		Dispersion réalisable	
Envisager une autre option d'intervention		Organiser et planifier l'opération d'application	



DÉBUT	Dispersion non adaptée Envisager une autre option d'intervention					
Non	Non		Non	Non		
Dispersion possible ?	Oui	Dispersion acceptable	Oui	Dispersion réalisable ?	Oui	Dispersion appropriée Organiser et planifier les opérations d'application de dispersant
Hydrocarbure dispersible du point de vue physico-chimique ?		La dispersion est-elle bénéfique du point de vue de l'environnement et économique ?		L'application de dispersant est-elle possible d'un point de vue logistique ?		
- État de mer - Viscosité de l'hydrocarbure		Limites géographiques et résultats des études de scénarios Emplacement du déversement Taille du déversement Saison Courants de marée		Dispersant disponible (taille du déversement) Équipements et logistique disponibles (taille du déversement) Équipements en mesure d'appliquer le dispersant (âge de l'hydrocarbure/temps de mobilisation et transit) Conditions environnementales (état de mer, vent, visibilité, distance)		
Voir OMI-PNUE, 2011, Annexe, page 2		Voir OMI-PNUE, 2011, Annexe, page 3 Recommandations pour les plans d'urgence en cas de déversements d'hydrocarbures		Voir OMI-PNUE, 2011, Annexe, page 4 Recommandations pour les plans d'urgence en cas de déversements d'hydrocarbures, inventaire des stocks, inventaire des équipements d'application		

Figure 35. Processus de prise de décision

Une fois l'utilisation des dispersants approuvée, leur application implique de mettre en œuvre des bonnes pratiques pour garantir leur efficacité et atteindre l'objectif qui est de minimiser l'impact de la pollution, plus particulièrement :

- Appliquer les dispersants le plus tôt possible pour rester dans la fenêtre de dispersibilité des hydrocarbures ;
- Choisir le système d'application le plus adapté et adopter une approche méthodique pour le traitement afin d'éviter de perdre du temps et du produit ;
- Protéger les intervenants en fournissant des équipements de protection individuelle appropriés ;
- Appliquer les dispersants sur les parties épaisses et moyennement épaisses de la nappe et non sur les pellicules irisées ;
- Traiter la nappe en tenant compte des conditions dominantes (par ex. appliquer les dispersants contre le vent) ;
- Éviter l'épandage trop près de zones où des mammifères marins, des tortues ou des oiseaux peuvent être présents.

La faisabilité de la dispersion chimique dépend de la disponibilité des stocks ainsi que des équipements et des capacités opérationnelles. Ces aspects logistiques, propres à chaque pays, sont essentiels pour évaluer la possibilité d'appliquer des dispersants et la fenêtre d'opportunité pour leur utilisation.

Tout en rappelant que chaque État bordant la mer Méditerranée dispose d'un droit souverain à interdire l'utilisation de dispersants dans ses eaux territoriales pour lutter contre la pollution marine par les hydrocarbures, voici quelques **recommandations d'ordre général** sur l'utilisation de dispersants en mer Méditerranée :

- La **bathymétrie** et la **distance avec la côte** sont des considérations importantes pour l'utilisation de dispersants. Les dispersants ne doivent être utilisés que lorsque les conditions permettent une dilution suffisante (par ex. dans des eaux de plus de 50 m de profondeur et à une distance d'environ 2 kilomètres de la côte pour protéger les éventuelles prises d'eau), ces valeurs dépendent également de l'intensité et de la direction des courants. Toutefois, si la protection d'une zone sensible (écologique, culturelle, économique) ne réunit pas ces conditions mais que l'utilisation de dispersants est requise, une analyse devra être effectuée pour évaluer les avantages et les risques que posent cette décision ;
- La région méditerranéenne est vaste et compte de nombreuses ressources devant être protégées. Les **atlas de sensibilité** sont des outils d'aide à la décision intéressants à développer car ils tiennent compte des caractéristiques géomorphologiques, écologiques et socio-économiques du littoral. Ils peuvent être utilisés pour classer la sensibilité des côtes et adapter les techniques de lutte en cas de déversement d'hydrocarbures. Une possibilité d'harmonisation devrait être portée à l'attention des pays bordant un même bassin, en se basant sur les particularités environnementales communes qui affectent l'efficacité de l'action de dispersion.
- La mer Méditerranée abritant une grande **biodiversité**, une attention particulière doit être accordée à la présence d'espèces sensibles, vulnérables ou protégées lors de l'application de dispersants. En particulier, l'utilisation de dispersants pourrait avoir des

effets nocifs sur des écosystèmes benthiques protégés, endémiques du bassin méditerranéen : es prairies de posidonie (*Posidonia oceanica*) et les récifs coralligènes.

Une planification préalable efficace de l'utilisation de dispersants est un processus essentiel pour garantir la réussite des opérations d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures. La planification préalable peut impliquer la préparation de cartes permettant de délimiter des zones en mer où l'utilisation de dispersants est **autorisée**, **limitée** ou **interdite**. Dès que cela est possible, elle doit permettre la **coopération** entre les différentes parties prenantes pour assurer la protection de l'environnement et de la santé publique.

Évidemment, la planification préalable doit se faire en coopération avec les pays voisins. Elle doit tenir compte des zones en mer où la dispersion chimique est autorisée, limitée ou interdite pour garantir des avantages pour l'environnement et l'économie. Cette cartographie impose de définir les limites géographiques en se basant sur les composantes environnementales et économiques (par ex. les littoraux, les habitats spécifiques, les zones de frayères, les zones conchylicoles, les changements saisonniers, etc.) et les conditions marines types (par ex. les courants, les marées, les vents). Quoi qu'il en soit, la profondeur de la mer et l'évaluation de la distance avec des zones sensibles doivent être prises en compte lors de la définition des zones d'application de dispersants ainsi que dans le processus de prise de décision, tout comme les conditions météorologiques en mer et les prévisions. C'est un point encore plus crucial en l'absence d'un processus de cartographie.

BIBLIOGRAPHIE

Al Shami, A., Harik, G., Alameddine, I., Bruschi, D., Garcia, D.A., El-Fadel, M. (2017). Risk assessment of oil spills along the Mediterranean coast: A sensitivity analysis of the choice of hazard quantification, *Science of the Total Environment*. 234–245. Available on : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716319830>

Aprin, L., Heymes, F., Lauret, P., Slangen, P., & Le Floch, S. (2015). Experimental characterization of the influence of dispersant addition on rising oil droplets in water column. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 2287-2292.

Amundsen, T. (2022). The use and environmental impacts of dispersants for marine oil spill cleanup focusing on Corexit: a literature review.

Barron, M. G., Hemmer, M. J., & Jackson, C. R. (2013). Development of aquatic toxicity benchmarks for oil products using species sensitivity distributions. *Integrated environmental assessment and management*, 9(4), 610-615.

Bonn Agreement (1991), Amended Chapter 20 of the Bonn Agreement Counter Pollution Manual (working paper), Bonn Agreement, Paris, France.

Boyd, J. N., Scholz, D., & Walker, A. H. (2001, March). Effects of oil and chemically dispersed oil in the environment. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 2001, No. 2, pp. 1213-1216). American Petroleum Institute.

Cedre (Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux) (1979). Traitement des hydrocarbures par épandage aérien de dispersant.

Cedre (1996). Lutte contre les pollutions accidentelles par hydrocarbures.

Cedre (2007a). SPREEX - State of the Art - Use of Dispersants. With the participation of Merlin F.X.

Cedre (2007b). Évaluation de système d'épandage aérien de dispersants - Essais à la base aéronavale de Cuers du 29 mai au 2 juin 2006. Avec la participation de De Nanteuil E., et Merlin F.

Cedre (2009). Journée technique - Évolution en France et développements récents à l'étranger.

Cedre (2014). Bulletin d'information du Cedre n°31.

Cedre (2015). Guide opérationnel : Traitement aux dispersants des nappes de pétrole en mer.

Claireaux, G., Théron, M., Prineau, M., Dussauze, M., Merlin, F. X., & Le Floch, S. (2013). Effects of oil exposure and dispersant use upon environmental adaptation performance and fitness in the European sea bass, *Dicentrarchus labrax*. *Aquatic Toxicology*, 130, 160-170.

Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Ben Rais Lasram, F., Aguzzi, J., ... & Voultsiadou, E. (2010). The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PloS one*, 5(8), e11842.

Convention de Barcelone pour la protection de la Méditerranée | EUR-Lex, (s.d.). Available on : <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/barcelona-convention-for-the-protection-of-the-mediterranean.html>

Convention sur la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée (Convention de Barcelone), (1976). Available on : <https://planbleu.org/wp-content/uploads/2022/03/Convention-de-Barcelone-1976-protection-du-milieu-marin-et-du-littoral-de-la-mediterranee.pdf>.

Convention sur la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée et ses protocoles, (2007). Available on : https://planbleu.org/sites/default/files/upload/files/Barcelona_convention_and_protocols_2007_fr%282%29.pdf

Ducrocq, V., Drobinski, P., Gualdi, S., & Raimbault, P. (2016). The water cycle in the Mediterranean. *The Mediterranean Region under Climate Change: A Scientific Update*; Moatti, J., Thiébaud, S., Eds, 73-81.

Dussauze, M., Marguerie, J., Auffret, M., Merlin, F. X., & Le Floch, S. (2011). DISCOBIOL program: investigation of dispersant use in coastal and estuarine. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 2011, No. 1, p. 173).

EMSA (2022). Inventory of national policies regarding the use of oil spill dispersants in the EU member states 2022. EMSA.

Energy Institute (2004). Operational guidelines on the use of oil spill dispersants at sea. Energy Institute.

Farahani, M. D., & Zheng, Y. (2022). The formulation, development and application of oil dispersants. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 425.

Fingas, M. (2021). A summary of dispersants research : 2017 – 2021. 17p.

Fritt-Rasmussen, J., Linnebjerg, J. F., Nordam, T., Rigét, F. F., Kristensen, P., Skancke, J., ... & Gustavson, K. (2023). Effects of chemical dispersants on feathers from Arctic seabirds. *Marine Pollution Bulletin*, 188, 114659.

G. Zodiatis, R. Lardner, D.R. Hayes, D. Soloviev, G. Georgiou. (2007). The successful application of the Mediterranean oil spill model in assisting eu decision makers during the oil pollution crisis of Lebanon in Summer 2006, *Rapp Comm Int Mer Medit*. Available on : https://ciesm.org/online/archives/abstracts/pdf/38/CIESM_Congress_2007_Istanbul_article_0214.pdf

Giakoumi, S., Sini, M., Gerovasileiou, V., Mazor, T., Beher, J., Possingham, H. P., ... & Katsanevakis, S. (2013). Ecoregion-based conservation planning in the Mediterranean: dealing with large-scale heterogeneity. *PloS one*, 8(10), e76449.

Giwa, A., Chalermthai, B., Shaikh, B., & Taher, H. (2023). Green dispersants for oil spill response: A comprehensive review of recent advances. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115118.

Guidi, G., Sliskovic, M., Violante, A. C., & Vukic, L. (2016). Best available techniques (BATs) for oil spill response in the Mediterranean Sea: calm sea and presence of economic activities. *Environmental science and pollution research*, 23, 1944-1953.

Hemmer, M. J., Barron, M. G., & Greene, R. M. (2011). Comparative toxicity of eight oil dispersants, Louisiana sweet crude oil (LSC), and chemically dispersed LSC to two aquatic test species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30(10), 2244-2252.

IMO (2024). Guidelines on the use of dispersants for combating oil pollution at sea, IMO, London, U.K.

IPIECA (2017). Dispersant storage, maintenance, transport and testing.

IPIECA (International Petroleum Industry Environmental Consideration Association) (2016). Dispersants: surface application. Good practices guidelines for incident management and emergency response personnel.

IPIECA. (2015). Dispersants: surface application. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel.

ITOPF (2011). Technical Information Paper - The use of chemical dispersants to treat oil spills. ITOPF, London.

ITOPF, Countries, Territories & Regions - Seas: Mediterranean Sea - ITOPF, (n.d.). Available on : https://www.itopf.org/knowledge-resources/countries-territories-regions/?tx_llcatalog_pi%5Bfilters%5D%5Bsea%5D=752&cHash=d09843d55c2f30a1bb98eb84dcc8d269

Kapsimalis, V. (2009). Geography of the Mediterranean Sea. Soil Protection in Sloping Mediterranean Agri-Environments: lectures and exercises.

Krair A, S.S, & Alkabu, H.A (2020) Oil spills and their effects upon the mediterranean, International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology. Available on : https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3722865

Le Bihan, T., Giraud, W., & Le Floch, S. (Cedre) (2022). Subsea Dispersant Injection: How to Assess Oil Droplets Behavior in the Water Column from Pilot-Scale Experiments. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU22-7911).

Le Floch, S., Dussauze, M., Merlin, F. X., Claireaux, G., Theron, M., Le Maire, P., & Nicolas-Kopec, A. (2014). DISCOBIOL: assessment of the impact of dispersant use for oil spill response in coastal or estuarine areas. In *International Oil Spill Conference Proceedings* (Vol. 2014, No. 1, pp. 491-503). American Petroleum Institute.

Lewis, A., Merlin, F.X., Darling, P., Reed, M. (2006). Applicability of oil spill dispersants. Part 1 – Overview. EMSA.

McConville, M. M., Roberts, J. P., Boulais, M., Woodall, B., Butler, J. D., Redman, A. D., ... & Brander, S. M. (2018). The sensitivity of a deep-sea fish species (*Anoplopoma fimbria*) to oil-associated aromatic compounds, dispersant, and Alaskan North Slope crude oil. *Environmental toxicology and chemistry*, 37(8), 2210-2221.

Manfra, L. A. Tornambè, J. Guyomarch, P. Le Guerrouge, L. Kerambrun, A. Rotini, F. Savorelli, F. Onorati, E. Magaletti. (2017). Dispersant approval procedures in France and Italy: A comparative ecotoxicity study, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 143 180–185. Available on : <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.044>.

Manfra, L., Tornambè, A., Guyomarch, J., Duboscq, K., Faraponova, O., Sebbio, C. (2020). Could a harmonized tiered approach assess dispersant toxicity in Italy and France?, *Environ Sci Pollut Res* 2730927–30932. Available on : <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06535-7>.

Manfra, L. M. Mannozi, . F. Onorati, (2022). Current Knowledge of approval procedures of dispersant use at sea: looking for potential harmonization from global to Mediterranean scale. *Environmental Science and Pollution Research*. Available on: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23462-2>

Manfra, L., Mannozi, M., & Onorati, F. (2023). Current knowledge of approval procedures of dispersant use at sea: looking for potential harmonization from global to Mediterranean scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 18380-18394.

Merlin, F. (1991). Cedre, Selecting dispersants and periodic checking of their quality, Cedre, Brest, France.

Merlin, F., Zhu, Z., Yang, M., Chen, B., Lee, K., Boufadel, M. C., ... & Zhang, B. (2021). Dispersants as marine oil spill treating agents: a review on mesoscale tests and field trials. *Environmental Systems Research*, 10, 1-19.

Mukherjee, B., J. Turner and B. A. Wrenn (2011). Effect of oil composition on chemical dispersion of crude oil. *Environ. Eng. Sci.*, 28: 497-506.

National Academies of Sciences, Division on Earth, Life Studies, Board on Environmental Studies, Ocean Studies Board, & Committee on the Evaluation of the Use of Chemical Dispersants in Oil Spill Response. (2020). *The use of dispersants in marine oil spill response*. National Academies Press.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2005). *Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11283>

National Research Council (2005). *Oil spill dispersant. Efficacy and effects*. National Academic Press.

Natura 2000 Esterel (s.d.). Les habitats marins. Available on: <https://esterel.n2000.fr/site-natura-2000-de-l-esterel/les-habitats-naturels-et-les-especes-vegetales/les-habitats-marins>

NOWPAP MERRAC (2005). Guideline for the use of dispersant.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture & Commission Générale des pêches pour la Méditerranée (2020). *La situation des pêches en Méditerranée et en mer Noire*, 2020. Available on: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3d28932d-a62b-404f-bab5-ab8d0cba14cf/content>

Osborne, O. E., Willie, M. M., & O'Hara, P. D. (2022). The effects of oil spill dispersant use on marine birds: a review of scientific literature and identification of information gaps. *Environmental Reviews*, 31(2), 243-255.

P. Nasr, E. Smith. (2006). Simulation of oil spills near environmentally sensitive areas in Egyptian coastal waters, *Water & Environment J* 20 11–18. Available on : <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2005.00013.x>.

Pelletier, E. (2015). Revue des connaissances scientifiques sur la composition et le mode d'action des agents chimiques de traitement utilisés lors de déversements pétroliers ainsi que le devenir des mélanges hydrocarbures/agents de traitement en milieu aquatique. Étude GENV31, réalisée dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique globale sur les hydrocarbures.

Programme des Nations Unies pour l'Environnement/Plan d'Action pour la Méditerranée et Plan Bleu (2020). État de l'Environnement et du Développement en Méditerranée. Nairobi.

R.M. Abou Samra, M. El-Gammal, R. Eissa, Oceanographic factors of oil pollution dispersion offshore the Nile Delta (Egypt) using GIS, *Environ Sci Pollut Res* 28 (2021) 25830–25843. Available on : <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12570-0>.

R.M. Abou Samra, R. Eissa, M. El-Gammal, Applying the environmental sensitivity index for the assessment of the prospective oil spills along the Nile Delta Coast, Egypt, *Geocarto International* 35 (2020) 589–601. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1533592>.

Rades, C. V., & Tilesman, E. B. (Eds.). (2008). *Advances in environmental research* (Vol. 1). Nova Publishers.

REMPEC, Profils des pays, Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea (REMPEC) (s.d.). Available on : <https://www.rempec.org/fr/resources/profil-des-pays>

Silva, I. A., Almeida, F. C., Souza, T. C., Bezerra, K. G., Durval, I. J., Converti, A., & Sarubbo, L. A. (2022). Oil spills: impacts and perspectives of treatment technologies with focus on the use of green surfactants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 143.

Singer, M. M., Smalheer, D. L., Tjeerdema, R. S., & Martin, M. (1991). Effects of spiked exposure to an oil dispersant on the early life stages of four marine species. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 10(10), 1367-1374.

Singer, M. M., George, S., Jacobson, S., Lee, I., Weetman, L. L., Tjeerdema, R. S., & Sowby, M. L. (1995). Acute toxicity of the oil dispersant Corexit 9554 to marine organisms. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 32(1), 81-86.

SPA/RAC (Specially Protected Areas Regional Activity Center) (s.d.). Biodiversity in the Mediterranean. Available on: <https://www.rac-spa.org/fr/biodiversite>

Swedmark, M., Granmo, Å., & Kollberg, S. (1973). Effects of oil dispersants and oil emulsions on marine animals. *Water Research*, 7(11), 1649-1672.

Taupier-Letage, I. (2020). Le circuit 3D des masses d'eau en Méditerranée. CNRS. Available on : <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-circuit-3d-des-masses-deau-en-mediterranee>

Y. Shai. (2019). The Effect of Oil Pollution on Marine Microbial Populations in the Southeastern Mediterranean Sea, Master's Thesis, University of Haifa (Israel), available on : <https://search.proquest.com/openview/0bdde1d239c78504580a939469772f56/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Ye, X., Zhu, Z., Merlin, F.X., Yang, M., Chen, B., Lee, K., & Zhang, B. (2021). Ecological impact analysis of dispersants and dispersed oil: An overview. *JEIL*, 5, 120-133.

Zhu, Z., Merlin, F., Yang, M., Lee, K., Chen, B., Liu, B., ... & Zhang, B. (2022). Recent advances in chemical and biological degradation of spilled oil: a review of dispersants application in the marine environment. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129260.