

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**« Utilisation du logiciel OSERIT pour l'aide à la gestion d'une
pollution aux hydrocarbures dans la zone côtière belge »**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
EVRARD Laetitia
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement Ma120ECTS ENVI5G-T

Année Académique : 2011-2012

Promoteurs : Prof. Christiane Lancelot
Dr Sébastien Legrand

Remerciements

Je voudrais en premier lieu remercier Monsieur Sébastien Legrand, mon promoteur, pour m'avoir permis de réaliser un travail sur les marées noires comme je le souhaitais, mais également pour l'aide, le temps et les conseils qu'il m'a accordés tout au long de ce travail.

Je remercie également Madame Christiane Lancelot, ma promotrice, pour son précieux soutien, ses conseils et son indispensable relecture.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes m'ayant aidée d'une manière ou d'une autre à l'UGMM comme Valérie Dulière, Jean-Sébastien Houziaux, Francis Kerckhof et Ronny Schallier, ainsi qu'à l'ULB comme Walter Hecq, Pierre Servais et Anne Steenhout.

Et enfin, je n'oublie pas de dire un merci tout particulier aux personnes qui m'ont soutenue et qui se reconnaîtront.

Résumé

La partie belge de la mer du Nord constitue une des routes marchandes les plus empruntées au monde et subit de fortes pressions dues aux activités humaines comme le dragage, l'exploitation de sable et de gravier, la production d'énergie éolienne, la mariculture, le stockage de munitions militaires et la pêche. Sans oublier le tourisme qui est une des principales activités économiques de la mer du Nord. A côté de toutes ces activités, le plancton, les organismes benthiques, les poissons, les oiseaux et les mammifères sont bien présents et peuvent souffrir des impacts négatifs que peuvent avoir ces exploitations.

Le pétrole est un des principaux polluants des océans et les déversements sont importants en mer du Nord. Dans la partie belge de la mer du Nord, relativement peu de pollutions majeures ont eu lieu depuis une trentaine d'année mais, en moyenne 25 rejets par an sont encore dénombrés actuellement.

Il existe diverses techniques de lutte dont les barrages flottants et les dispersants chimiques, qui doivent être utilisés en tenant compte des particularités locales et de la sensibilité des espèces présentes. Différents acteurs interviennent dans la lutte afin d'appliquer une gestion opérationnelle et efficace, tout en respectant la législation en place.

Différents paramètres permettent de mesurer la toxicité d'un produit sur une espèce. Dans le cas d'une pollution marine aux hydrocarbures, la toxicité aiguë est définie pour les crustacés, les mollusques et les poissons. Une revue de la littérature a permis de recueillir 196 données de toxicité.

Le logiciel OSERIT simule l'évolution physico-chimique d'une marée noire. L'évolution d'hydrocarbures chimiquement dispersés dans la colonne d'eau a été simulée pour un déversement de 100 m³ dans la zone du Westhinder, c'est-à-dire au-delà de la mer territoriale, sous un vent Sud-Ouest de 4,5 m/s. La nappe se déplace vers le Nord-Est de la zone de déversement jusqu'à traverser une future zone de mariculture au niveau des parcs éoliens et pénétrer la zone maritime néerlandaise. Presque un tiers de la partie belge de la mer du Nord sera polluée. Cette pollution aura des effets négatifs sur la mytiliculture, les organismes benthiques, les zones de frayère et d'alevinage et dans une moindre mesure, sur les oiseaux plongeurs et les mammifères qui pourraient se trouver dans la zone.

Certaines des données toxicologiques recueillies permettent d'évaluer l'impact écologique de ce déversement simulé sur l'huître creuse et sur le turbot avec pour conclusion que les mélanges de pétrole et de dispersant testés sont létaux pour ces espèces selon où elles se situent.

Cependant, pour effectuer une réelle analyse des toxicités en regard des résultats de ces simulations, il serait nécessaire de réaliser des tests de toxicité plus pertinents. C'est-à-dire des tests en lien avec la ZEE belge qui concerneraient donc les espèces présentes mais également les produits qui pourraient être déversés dans la zone. Pour être encore plus précis, il serait nécessaire de localiser les espèces afin de mieux comparer les effets et les zones polluées.

Table des matières

Remerciements	II
Résumé	IV
Abréviations	VIII
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Annexe.....	XI
Introduction.....	1
Chapitre 1 - La Zone Economique Exclusive (ZEE) belge : description et pressions anthropiques.....	3
Introduction	5
1. Situation de la ZEE belge	6
2. Ecosystème de la ZEE belge : description générale des espèces, habitats et valeur écologique	7
2.1. Description générale des espèces	7
2.2. Habitats et zones protégées.....	10
3. Usages économiques.....	14
3.1. Le déversement en mer de boues de dragage	14
3.2. Le Paardenmarkt	14
3.3. L'exploitation de sable et de gravier	15
3.4. Les parcs à éoliennes.....	15
3.5. La mariculture.....	16
3.6. La pêche.....	17
Conclusion	18
Chapitre 2 - Gestion des marées noires dans la ZEE belge.....	19
Introduction, qu'est-ce qu'une marée noire ?	21
1. Les hydrocarbures	24
1.1. Les caractéristiques du pétrole	24
1.2. Le vieillissement du pétrole.....	25
2. Les impacts socio-économiques des marées noires	27
2.1. Effets directs de la pollution.....	28
2.2. Effets indirects de la pollution.....	28
3. Les pollutions aux hydrocarbures dans la ZEE belge.....	29
4. Les techniques de lutte	30
4.1. Les barrages flottants	31
4.2. Les dispersants chimiques	31
4.2.1. Définition.....	31
4.2.2. Quand les utiliser ?.....	32
5. Gestion opérationnelle d'une pollution en ZEE belge.....	34
5.1. La législation.....	34
5.2. Les acteurs.....	36
5.3. Le déroulement d'une intervention dans ou menaçant la ZEE belge	38
Conclusion	39
Chapitre 3 - Toxicité des marées noires et leurs effets sur l'environnement	41
Introduction.....	43
1. Paramètres de toxicité	43

2. Sensibilités des différents organismes marins aux hydrocarbures	46
3. Classification GESAMP	49
4. Revue de la littérature.....	52
Conclusion	55
Chapitre 4 - Description et application du modèle OSERIT	57
Introduction	59
1. Description du modèle OSERIT.....	59
2. Dispositif expérimental	62
3. Applications	64
3.1. Déversement de 100 m ³ dans la zone Westhinder sous un vent Sud-Ouest de 4,5 m/s avec dispersion chimique	64
3.1.1. Le devenir de la pollution au cours du temps	64
3.1.2. Les concentrations.....	65
3.1.3. Les temps d'exposition	69
3.2. Sensibilité au volume de pollution déversé	71
3.2.1. Le devenir de la pollution au cours du temps	71
3.2.2. L'évolution de la concentration au cours du temps.....	72
3.2.3. Les temps d'exposition	73
3.3. Impact écologique	78
3.4. Sensibilité au lieu de déversement	80
3.4.1. Zone côtière orientale le long du port de Zeebruges	80
3.4.2. Zone côtière occidentale le long de Nieuport	81
3.4.3. Zone offshore orientale centrée autour du parc éolien C-Power	82
3.4.4. Zone offshore centrée sur une route marchande	83
Conclusion	84
Conclusion générale	85
Bibliographie.....	86
Annexe.....	95

Abréviations

AGHO - Autonom Gemeentebedrijf Haven Oostende
AIEA - Agence internationale de l'énergie atomique
Cedre - Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux
CROSERF - Forum de recherche environnementale sur les réponses chimiques aux marées noires
DAB - Dienst met Afzonderlijk Bestuur
EC₅₀ - Concentration Efficace pour 50% de la population
EL₅₀ - Effect Load (charge qui provoque des effets néfastes) pour 50% de la population
FAO - Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GESAMP - Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection
IC₅₀ - Concentration d'Inhibition pour 50% de la population
INRA - Institut National de la Recherche Agronomique français
IPIECA - International Petroleum Industry Environmental Association
IRSNB - Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique
LA₅₀ - Dose où 50% d'éclosion contrôlée a été observée
LC₅₀ - Concentration Létale pour 50% de la population
LD₅₀ - Dose Létale pour 50% de la population
LL₅₀ - Lethal Load (charge mortelle) pour 50% de la population
LOEC - Lowest Observed Effect Concentration (Concentration minimale provoquant un effet)
MARPOL (convention) - Marine pollution
MFO – Medium Fuel Oil
MMM (loi) - protection du milieu marin dans les espaces marins sous juridiction de la Belgique
MRCC - Maritime Rescue and Coordination Centre
NEBA - Net Environmental Benefit Analysis
NOEC - No Observed Effect Concentration (Concentration maximale sans effet)
OILPOIL - International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil
OMI - Organisation maritime internationale
OMM - Organisation météorologique mondiale
OMS - Organisation mondiale de la Santé
ONU - Organisation des Nations unies
OPEC – Organization of the Petroleum Exporting Countries
OSC - On Scene Commander
OSERIT - Oil Spill Evaluation and Response Integrated Tool
OSPAR (convention/commission) - Oslo-Paris
PNUE - Programme des Nations Unies pour l'environnement
SPF – Service Public Fédéral
UGMM – Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord et de l'estuaire de l'Escaut
UNEP GPA – United Nations Environment Programme Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities
UNESCO-COI - Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture - Commission Océanographique Intergouvernementale
ZEE - Zone Economique Exclusive

Liste des figures

Figure 1 : Aperçu global de la ZEE belge (bleu : ZEE ; blanc : banc de sable ; rouge : route ; vert : zones protégées ; jaune : éoliennes ; rose : mariculture)	5
Figure 2 : Zone marine sous juridiction belge dans la mer du Nord (B), entre les ZEE anglaise (UK), néerlandaise (NL) et française (F).....	6
Figure 3 : La mer territoriale et la Zone Economique Exclusive belge	6
Figure 4 : Routes de navigation et zone d’ancrage	7
Figure 5 : Aires d’alevinage et de frayère pour diverses espèces de poissons de la ZEE belge	9
Figure 6 : Répartition dans ZEE belge du plongeon catamarin (<i>Gavia stellata</i>) à gauche et du grèbe huppé (<i>Podiceps cristatus</i>) à droite.....	10
Figure 7 : Bancs de sable dans la ZEE belge.....	11
Figure 8 : Zone Spéciale de Conservation selon la Directive Habitat (92/43/EEC) et Zones de Protection Spéciale selon la Directive Oiseaux (79/409/EEC).....	11
Figure 9 : Zone d’importance internationale selon la convention de Ramsar : les Kustbanken (bancs côtiers).....	12
Figure 10 : Valorisation écologique de la ZEE belge.....	13
Figure 11 : Zones de dragage et de déversement et zone de dépôt des munitions de guerre	14
Figure 12 : En jaune, les parcs éoliens de la ZEE belge.....	16
Figure 13 : En rose, les zones de mariculture de la ZEE belge.....	16
Figure 14 : Les zones de pêche dans la ZEE belge rapportées par les pêcheurs pour la période février - juin : (a) poissons plats (sole, limande et plaine), (b) poissons ronds (cabillaud et hareng) et (c) crevettes.....	17
Figure 15 : Origines de la pollution marine par les hydrocarbures.....	21
Figure 16 : OPEC flux de pétrole brut et raffiné (2009) {Unité : 1000 barils/jour}.....	22
Figure 17 : Répartition mondiale des déversements pétroliers d’au moins 700 tonnes entre 1970 et 2004.....	23
Figure 18 : Différents types d’hydrocarbure	24
Figure 19 : Devenir du pétrole déversé en mer	25
Figure 20 : Topographie des nappes de pétrole selon le déversement et le vent.....	25
Figure 21 : Typologie des dommages d’une marée noire	28
Figure 22 : Zones où la pollution aux hydrocarbures en mer est fréquente, superposées aux observations de la pollution aux hydrocarbures dans la période 1996-2002.....	29
Figure 23 : Epave du Tricolor le 22 janvier 2003 à marée basse (gauche) et guillemot mazouté lors de cet accident (droite)	30
Figure 24 : Une île de la Méditerranée protégée par un barrage statique.....	31
Figure 25 : Exercice de lutte anti-pollution en mer du Nord à l’aide d’un écremeur.....	31
Figure 26 : Dispersion et émulsification des hydrocarbures dans l’eau, sans dispersant et avec	32
Figure 27 : Dispersion appropriée du pétrole en mer.....	33
Figure 28 : Organigramme des acteurs du Plan catastrophe de la mer du Nord.....	36
Figure 29 : Déroulement logique d’une intervention en cas de pollution en mer.....	38
Figure 30 : Schéma général de la contamination des chaînes trophiques océaniques	46
Figure 31 : Les 5 sous-régions de la ZEE belge considérées dans cette étude	62

Figure 32 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m ³ centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.....	64
Figure 33 : Logiciel OSERIT : Concentrations de pétrole en ppm dans le fond après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, de 12 à 216 h. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	66
Figure 34 : Logiciel OSERIT : Concentrations de pétrole en ppm dans la colonne d'eau après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, de 12 à 216 h. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	67
Figure 35 : Logiciel OSERIT : Concentrations de pétrole en ppm à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, de 12 à 216 h. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	68
Figure 6 : Logiciel OSERIT : Maxima de concentration de pétrole en ppm dans le fond (à gauche), dans la colonne d'eau (au milieu) et à la surface (à droite) après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.	69
Figure 37 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 0, 1, 10, 100 et 1000 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.	70
Figure 38 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100, 1000 ou 10 000 m ³ centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s dans le fond et dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.	71
Figure 39 : Logiciel OSERIT : Concentration de pétrole maximum en ppm dans le fond dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement de 100, 1000 ou 10 000 m ³ centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	72
Figure 40 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 0 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	73
Figure 41 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 1 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	74
Figure 42 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 10 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	75
Figure 43 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 100 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	76

Figure 44 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 1000 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.....	77
Figure 45 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m ³ dans la zone côtière orientale le long du port de Zeebruges avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles ; en blanc, les bancs de sable et en vert les zones protégées.	80
Figure 46 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m ³ dans la zone côtière occidentale le long de Nieuport avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles ; en blanc, les bancs de sable et en vert les zones protégées.	81
Figure 47 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m ³ dans la zone offshore orientale centrée autour du parc éolien C-Power avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.	82
Figure 48 : Figure 19 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m ³ dans la zone offshore centrée sur une route marchande avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.	83

Liste des tableaux

Tableau 1 : Accidents et pollutions maritimes touchant la ZEE belge	29
Tableau 2 : Système de notation révisé GESAMP pour la toxicité aquatique aiguë et la toxicité aquatique chronique	52
Tableau 3 : Résultat de l'étude de Beaupoil et Nedelec (2004) rangé selon le classement GESAMP ..	52
Tableau 4 : Résultats de l'étude de Clark et al. (2001) rangés selon le classement GESAMP	53
Tableau 5 : Résultats de l'étude de Lassus <i>et al.</i> (1982) rangés selon le classement GESAMP	54
Tableau 6 : Résultats de l'étude de Whright et Coehlo (1996) rangés selon le classement GESAMP ..	55
Tableau 7 : Coordonnées des 5 stations utilisées dans cette étude	62

Annexe

Tableau : Données de toxicité des pétroles et des dispersants sur les organismes aquatiques.....	95
--	----

Introduction

L'économie mondiale actuelle dépend fortement de la marine marchande alors que la pollution pétrolière marine est un problème environnemental majeur.

La pollution accidentelle et ses impacts dramatiques sur l'environnement et l'économie sont vivement diffusés par les médias comme par exemple lors de l'accident du navire *Prestige* au large de la Galice en 2002 ou, plus récemment, de la plate-forme pétrolière *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique en 2010.

La partie belge de la mer du Nord constitue une des routes marchandes les plus empruntées au monde et subit de fortes pressions dues aux activités humaines comme le dragage, l'exploitation de sable et de gravier, la production d'énergie éolienne, la mariculture, le stockage de munitions militaires et la pêche. Sans oublier le tourisme, qui est une des principales activités économiques de la mer du Nord. A côté de toutes ces activités, le plancton, les organismes benthiques, les poissons, les oiseaux et les mammifères sont bien présents et peuvent souffrir des impacts négatifs que peuvent avoir ces exploitations.

Au cours des 30 dernières années, seulement cinq pollutions majeures ont touché la partie belge de la mer du Nord alors qu'en moyenne, 25 rejets illicites (dégazages, etc.) par an sont encore dénombrés actuellement.

De nombreuses espèces sont présentes dans la partie belge de la mer du Nord comme des crevettes, du cabillaud ou encore des goélands et des dauphins. La pollution aux hydrocarbures a d'importants effets nocifs sur ces espèces et il est donc nécessaire de les protéger.

Lors d'une telle pollution, les équipes d'intervention doivent donc choisir une technique de lutte. Soit elles tentent de récupérer une partie des hydrocarbures à l'aide de barrages flottants, soit elles utilisent des dispersants chimiques afin de diminuer la présence des hydrocarbures à la surface et d'accélérer les processus naturels de dégradation.

Ce choix se fait actuellement dans l'urgence et suivant l'avis de l'expert autorisé. Le choix entre les deux stratégies dépend des conditions en mer et doit minimiser les impacts environnementaux. Dans ce contexte, le logiciel OSERIT (Oil Spill Evaluation and Response Integrated Tool) a été développé par l'UGMM (Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord et de l'estuaire de l'Escaut) comme un outil d'aide à la décision permettant de justifier une éventuelle utilisation d'un dispersant chimique. En particulier, cet outil permet de simuler l'évolution physico-chimique de la pollution.

Dans ce mémoire de fin d'étude, il s'agit de réaliser une étude de faisabilité démontrant la possibilité d'estimer le volume maximum d'hydrocarbure que l'on pourrait disperser chimiquement sans impacter l'écosystème en cas de marée noire au large des eaux belges. Pour cela, le travail est divisé en plusieurs étapes.

Nous commencerons par une mise en contexte de la partie belge de la mer du Nord en décrivant ce qui la compose. Une meilleure défense et gestion contre les rejets d'hydrocarbures nécessite une bonne connaissance de la situation et des conditions écologiques de la région. Toutefois dans un souci de développement durable, il est important de maintenir un équilibre entre les activités économiques et la protection de l'environnement de la région.

Ensuite, la mer du Nord étant une des régions les plus touchées par les marées noires, nous réaliserons une brève analyse de ce que sont les hydrocarbures et de la manière dont ces pollutions sont gérées en Belgique.

Après cela, nous développerons la toxicité des marées noires et leurs effets sur les organismes. Nous réaliserons une revue de la littérature des tests de toxicité existants afin de pouvoir estimer un volume maximum d'hydrocarbure que l'on pourrait disperser chimiquement sans impacter l'écosystème.

Et enfin, des simulations de déversements d'hydrocarbures chimiquement dispersés dans la partie belge de la mer du Nord par le logiciel OSERIT seront analysées et mises en relation avec les résultats des tests de toxicité sur les espèces présentes pour les mélanges de pétrole et de dispersant, toujours dans l'objectif d'estimer un volume maximum d'hydrocarbure dispersable.

Chapitre 1

La Zone Economique Exclusive (ZEE) belge : description et pressions anthropiques



Introduction

La ZEE belge située dans la Baie Sud de la mer du Nord est entourée de pays fortement industrialisés qui ont une incidence sur ce milieu. Elle est directement soumise à de fortes pressions dues aux activités humaines comme la pêche, la navigation et le tourisme.

En effet, cette mer est traversée par certaines routes maritimes densément utilisées et peut donc être soumise à d'importantes pollutions aux hydrocarbures.

De plus, plusieurs activités économiques s'y déroulent, notamment l'exploitation de sable et de gravier, ainsi que des travaux de dragage. Le tourisme est également une activité socio-économique très importante dans la région. Chaque année, 30 millions de personnes fréquentent le littoral belge (UGMM, s.d.) avec des incidences sur l'environnement. Sans oublier, la mariculture, la production d'énergie éolienne et les zones protégées qui font de la ZEE belge, une région complexe (Figure 1).



Figure 1 : Aperçu global de la ZEE belge (bleu : ZEE ; blanc : banc de sable ; rouge : route ; vert : zones protégées ; jaune : éoliennes ; rose : mariculture)

Source : Google Earth, 2012 et BMDC, s.d.

C'est pourquoi, une meilleure défense et gestion contre les rejets d'hydrocarbures nécessite une bonne connaissance de la situation et des conditions écologiques de la région. Toutefois dans un souci de développement durable, il est important de maintenir un équilibre entre les activités économiques et la protection de l'environnement de la région.

1. Situation de la ZEE belge

La ZEE belge fait partie de la baie Sud de la mer du Nord qui se situe sur le plateau continental Nord-Ouest européen, entre la Norvège, la Suède, le Danemark, l'Allemagne, les Pays-Bas, la France, la Grande-Bretagne et la Belgique (Figure 2) (OSPAR, 2000). La longueur du littoral belge est de 66 km et son étendue vers le large est d'environ 87 km. Sa superficie totale est estimée à 3454 km² (UGMM, s.d.), soit 1/9^{ème} de la surface de la Belgique (Maes *et al.*, 2005) et 0,6 % de la surface de la mer du Nord (Degreear *et al.*, 2006).



Figure 2 : Zone marine sous juridiction belge dans la mer du Nord (B), entre les ZEE anglaise (UK), néerlandaise (NL) et française (F)
Source : UGMM, s.d.

La Zone Economique Exclusive (ZEE) comprend les eaux surjacentes aux fonds marins, les fonds marins, leur sous-sol ainsi que la mer territoriale limitée à une largeur de 12 milles¹ marins, soit environ 22 km (Figure 3) (UGMM, s.d.).

Selon l'article 55 de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, la ZEE est « *une zone située au-delà de la mer territoriale et adjacente à celle-ci, soumise au régime juridique particulier établi par la présente partie, en vertu duquel les droits et la juridiction de l'Etat côtier et les droits et libertés des autres Etats sont gouvernés par les dispositions pertinentes de la Convention.* »

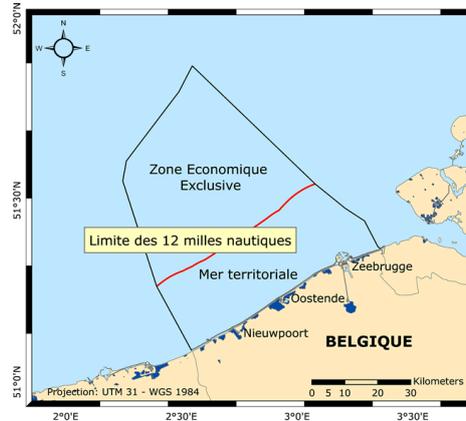


Figure 3 : La mer territoriale et la Zone Economique Exclusive belge
Source : UGMM, s.d.

¹ Unité de mesure de longueur pour exprimer les distances en navigation

L'Etat côtier a des droits souverains en matière d'exploration, d'exploitation, de conservation et de gestion des ressources naturelles, biologiques ou non biologiques, des eaux surjacentes aux fonds marins, des fonds marins et de leur sous-sol. Le Royaume de Belgique exerce également sa juridiction pour la mise en place et l'utilisation d'îles artificielles, d'installations et d'ouvrages ; la recherche scientifique marine, la protection et la préservation du milieu marin ainsi que d'autres droits prévus par le droit international (UGMM, s.d.).

La ZEE belge est une zone marine intensément utilisée. Malgré que ce soit une petite partie de la mer du Nord méridionale, elle constitue une des routes marchandes les plus empruntées au monde avec un trafic de 200 000 à 300 000 bateaux par an (Figure 4) (UGMM, s.d.).

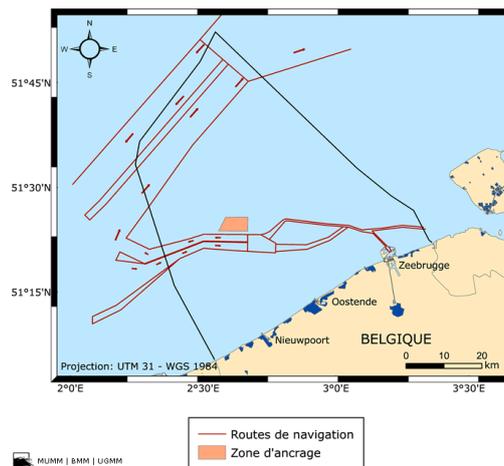


Figure 4 : Routes de navigation et zone d'ancrage
Source : UGMM, s.d.

Outre le transport commercial, d'autres activités s'y déroulent tel que l'extraction de sable et de graviers, les activités touristiques, la pêche, la production d'énergie éolienne,... (Maes et Le Roy, 2006).

2. Ecosystème de la ZEE belge : description générale des espèces, habitats et valeur écologique

2.1. Description générale des espèces

Le plancton

La ZEE belge est enrichie par des nutriments apportés directement par l'Escaut et indirectement par la Seine et la Somme (qui se jettent dans la Manche) via la circulation générale Sud-Ouest - Nord-Est des masses d'eau. Ces apports de nutriments stimulent la production primaire réalisée par le phytoplancton, dominé par les diatomées et le flagellé non siliceux *Phaeocystis globosa*. Celui-ci forme au printemps des colonies mucilagineuses dont la taille (0,5-1 mm) ne permet pas son ingestion directe par les copépodes. Cette matière s'accumule, sédimente et forme des agrégats de mousses sur les plages suite à l'action dynamique des vagues. Cette matière non-ingérée sera cependant « récupérée » par les bactéries et le microzooplancton qui transféreront leur matière et énergie aux copépodes. Les agrégats sédimentés constituent un apport de nourriture au benthos (Lancelot et Mathot, 1987).

En hiver, les copépodes crustacés représentent 90% de la totalité du zooplancton, représenté principalement par *Temora longicornis*, *Pseudocalanus elongatus* et *Centropages hamatus*. *Acartia clausi*, *Paracalanus parvus* et *Calanus belgolandicus*. D'autres organismes sont présents en moindre quantité (M'Harzi et al., 1998).

Les organismes benthiques

Le benthos est composé par les organismes vivants sur les fonds marins. Le benthos est divisé en cinq groupes d'organismes distinguables selon leur taille et/ou présence dans le substrat (Degrear et al., 2006) :

- méiobenthos (< 1 mm et > 38 µm) avec comme groupes dominants les copépodes et les nématodes comme par exemple le *Halectinosoma Hermani* et le *Daptonema tenuispiculum* (Cattrijsse, 2001)
- macrobenthos (> 1 mm) avec principalement des coquillages bivalves, des chétopodes et des gammares. Sur les digues et murs portuaires de la partie ZEE belge, se trouvent des patelles (*Pattela vulgaris*), des bigorneaux, des moules, des huitres, des bernaches, des anémones (Cattrijsse, 2001), des arénicoles (*Arenicola marina*), des vers turbicoles (*Lanice conchilega*),... (Degrear et al., 2006)
- microbenthos (bactéries et organismes unicellulaires) (Cattrijsse, 2001) avec par exemple des diatomées et des ciliats (Degrear et al., 2006). Ceux-ci sont encore actuellement très peu étudiés (Kerckhof et Houziaux, 2003)
- hyperbenthos (quelques millimètres) avec principalement des petits crustacés comme des mysidacés, des amphipodes, des isopodes, des œufs et des larves de poissons des fonds (Cattrijsse, 2001). Parmi les mysidacés se trouvent le *Schistomysis kervillei*, le *Schistomysis spiritus*, le *Gastrosaccus spinifer* et le *Mesopodopsis slabberi* (Dewicke et al., 2003).
- Epibenthos avec de grands animaux actifs comme les étoiles de mer, ophiures, crabes, écrevisses, poissons des fonds marins, céphalopodes (Degrear et al., 2006) et éponges comme la *Haliclona oculata* (Kerckhof et Houziaux, 2003).

Les poissons

Les bancs de sable situés dans la ZEE belge sont des aires de reproduction (frayères) pour les poissons. Un poisson ne vit pas dans la même zone au cours de ses différents stades de vie, c'est-à-dire, œuf, larve, juvénile, sous-adulte et adulte. Par exemple, les jeunes larves d'un poisson de fond telles que la sole se situent dans la colonne d'eau (pélagique) alors que les poissons juvéniles et adultes se trouvent plutôt au niveau du fond (démersal) (Kerckhof et Houziaux, 2003).

Daan et al. (1990) ont recensé 224 espèces en mer du Nord dont : la sole (*Solea solea*), le turbot (*Scophthalmus maximus*), la barbus (*scophthalmus rhombus*), la plie (*Pleuronectes platessa*), le flet (*Platichthys flesus*), la limande (*limanda limanda*), l'églefin (*Melanogrammus aeglefinus*), le merlan (*Merlangus merlangus*), le goujon (*Gobio gobio*), la vive, le blennie (famille des *Blenniidae*), l'anguille de mer (*Anguilla anguilla*), le loup de mer (*Anarhichas lupus*), l'aiguillat (*Squalus acanthias*), la poule de mer (*Cyclopterus lumpus*), le hareng (*Clupea harengus*), le sprat (*Sprattus sprattus*), le maquereau

(*Scomber scombrus*), la morue (*Gadus morrhua*), la muge à grosse lèvre (*Chelon labrosus*) et l'éperlan (*Osmerus eperlanus*).

La ZEE belge accueille diverses espèces en faisant office d'aire d'alevinage² et de frayère³ (Figure 5) (Kerckhof et Houziaux, 2003). Pour le cabillaud, le maquereau et le sprat, la totalité de la zone est importante. D'autres espèces utilisent une certaine partie de la zone pour se reproduire.

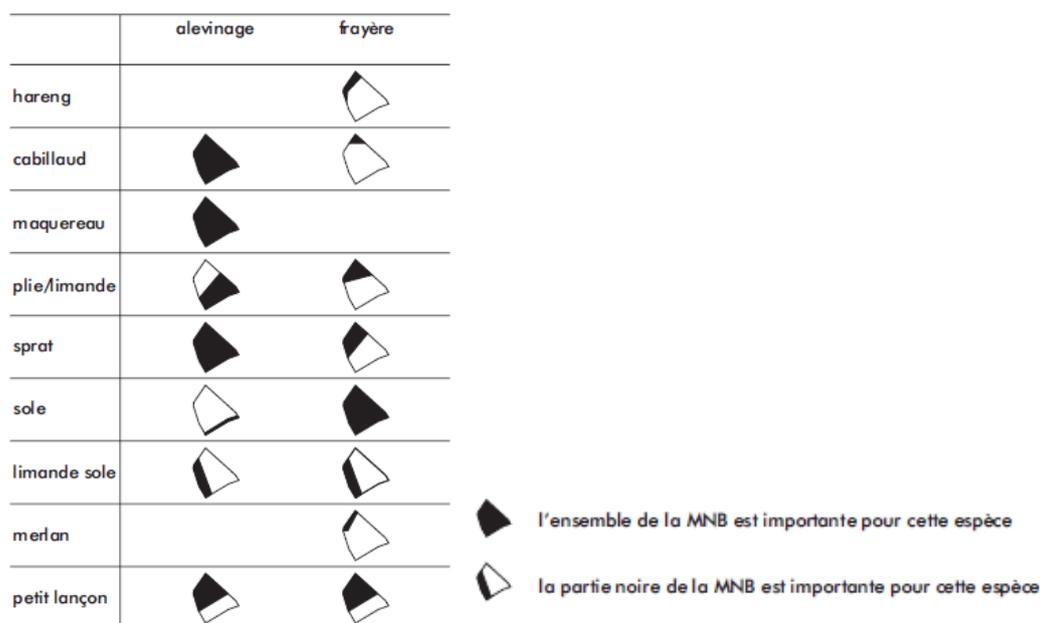


Figure 5 : Aires d'alevinage et de frayère pour diverses espèces de poissons de la ZEE belge
 Source : tableau réalisé par Maes *et al.*, 2005

Les oiseaux de mer

Entre 1992 et 1998, 124 espèces d'oiseaux ont pu être observées dans la ZEE belge. Parmi celles-ci, 23 espèces marines se trouvent en nombre relativement important dont 6 étant retenues comme « espèces focales », c'est-à-dire des espèces qui nécessitent une attention particulière suite à des efforts de conservation au niveau international insuffisants et une abondance remarquablement élevée dans les zones belges. Ces espèces sont la mouette (*Larus minutus*), le plongeur catamarin (*Gavia stellata*), la macreuse noire (*Melanitta nigra*), la sterne gaucek (*Sterna sandvicensis*), la sterne naine (*Sterna albifrons*) et la sterne pierregarin (*Sterna hirundo*). Cinq espèces sont considérées comme « espèces importantes localement », c'est-à-dire le grèbe huppé (*Podiceps cristatus*), le grand labbe (*Stercorarius skua*), le goéland brun (*Larus fuscus*), le goéland argenté (*Larus argentatus*), le goéland marin (*Larus marinus*) (Seys, 2001).

² Alevin = jeune poisson

³ Lieu de reproduction

A titre d'illustration, la Figure 6 présente la répartition de deux espèces importantes et sensibles aux perturbations : le plongeon catamarin (*Gavia stellata*) et le grèbe huppé (*Podiceps cristatus*).

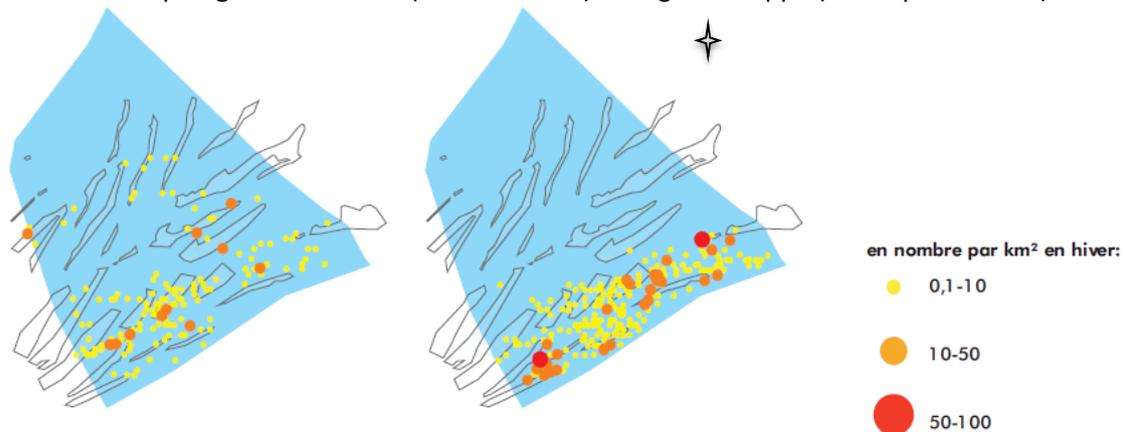


Figure 6 : Répartition dans ZEE belge du plongeon catamarin (*Gavia stellata*) à gauche et du grèbe huppé (*Podiceps cristatus*) à droite

Source : carte réalisée par Maes *et al.*, 2005

Les mammifères marins

Il n'est pas rare d'observer sur notre littoral :

- le marsouin (*Phocaena phocaena*) qui est essentiellement présent dans les eaux côtières peu profondes,
- le dauphin à bec blanc (*Lagenorhynchus albirostris*) que nous trouvons principalement du côté des bancs de Hinder et des bancs flamands,
- le phoque commun (*Phoca vitulina*) qui vit dans les zones de marées et aux embouchures. Il utilise les bancs de sable asséchés pour mettre à bas, muer et s'arrêter,
- le phoque gris (*Halichoerus grypus*) qui se trouve le long des côtes (Cattrijsse, 2001),

Très rarement, le grand dauphin (*Tursiops truncatus*) peut encore être observé au large de la ZEE belge (Kerckhof et Houziaux, 2003).

2.2. Habitats et zones protégées

Des eaux peu profondes et bien mélangées sous l'effet de la marée caractérisent la ZEE belge. Sa profondeur est de 0 à 20 mètres au niveau de la côte et peut aller jusqu'à 40 mètres de profondeur au large (Lacroix *et al.*, 2004).

Des bancs de sable orientés parallèlement au littoral confèrent à la zone des conditions hydrodynamiques et sédimentaires particulières. Parallèlement au littoral se situent successivement (Figure 7) :

- « les bancs côtiers (Kustbanken: Trapegeer, Broersbank, Smal Bank, Nieuwpoortbank, Stroombank, Wenduinebank et Vlakte van de Raan);
- les bancs des Flandres (Vlaamse Banken: Oostdyck, Buiten Ratel, Kwintebank, Middelkerkebank et Oostendebank);
- les bancs de Zélande (Zeelandbanken: Akkaertbank, Gootebank et Thorntonbank);

- les bancs du large (Fairy Bank, Westhinder, Noordhinder, Oosthinder et Bligh Bank) ».

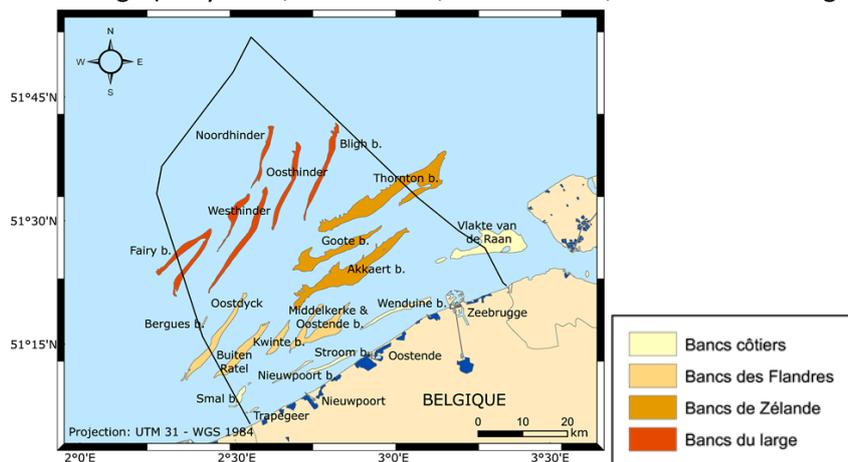


Figure 7 : Bancs de sable dans la ZEE belge

Source : UGMM, s.d.

Ces bancs constituent divers types d'habitats sableux qui permettent la présence d'une grande diversité biologique.

Outre ces bancs, ils existent deux directives et un traité définissant des zones de conservation et de protection.

La directive Habitat concerne la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages. Elle « vise à contribuer au maintien de la biodiversité dans les États membres en définissant un cadre commun pour la conservation des habitats, des plantes et des animaux d'intérêt communautaire » (EUROPA, s.d.). Celle-ci comprend notamment le réseau Natura 2000 et la directive « Oiseaux » (EUROPA, s.d.).

En application de la directive « Oiseaux », l'arrêté royal du 14 octobre 2005 a permis de créer trois Zones de Protection Spéciale en mer et en application de la directive Habitat, cette directive a créé une Zone Spéciale de Conservation (Figure 8).

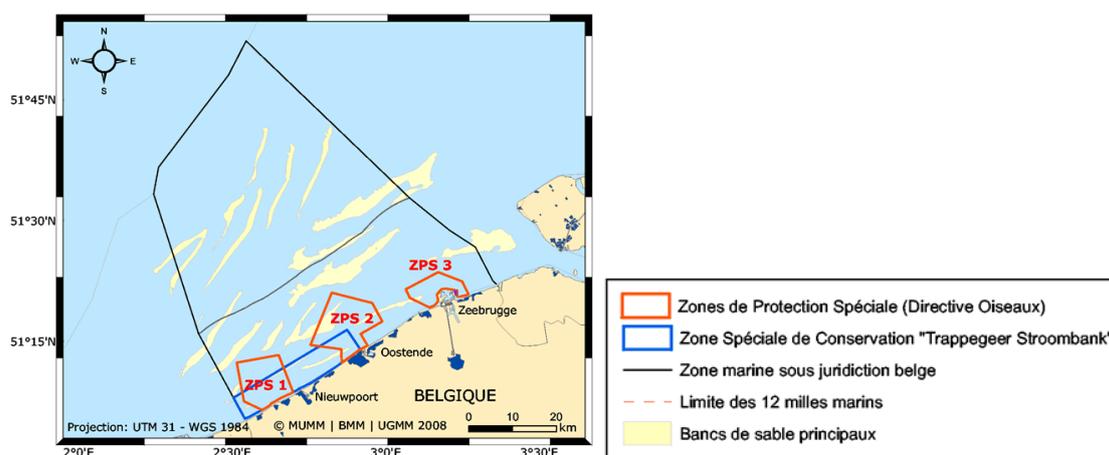


Figure 8 : Zone Spéciale de Conservation selon la Directive Habitat (92/43/EEC) et Zones de Protection Spéciale selon la Directive Oiseaux (79/409/EEC)

Source : UGMM, s.d.

Le traité de Ramsar est une Convention sur les zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, qui a comme mission « *la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides par des actions locales, régionales et nationales et par la coopération internationale, en tant que contribution à la réalisation du développement durable dans le monde entier* » (Ramsar, s.d.). En 1984, une partie peu profonde (< 6 m) dans la partie occidentale des eaux côtières devient d'importance internationale en vertu de ce traité et en raison du grand nombre de macreuses (*Melanitta nigra*) qui, chaque année, y passent l'hiver (Figure 9).

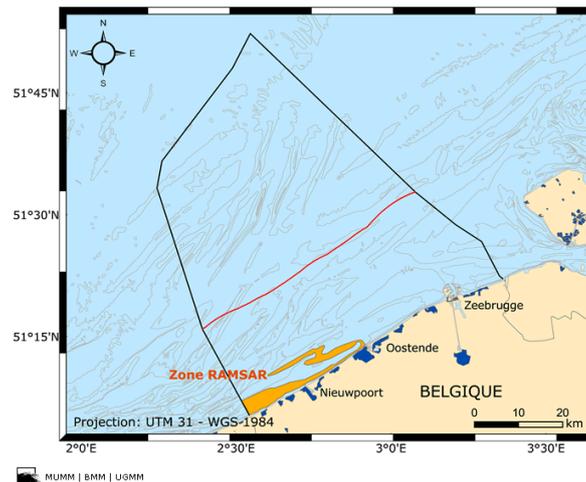


Figure 9 : Zone d'importance internationale selon la convention de Ramsar : les Kustbanken (bancs côtiers)
Source : UGMM, s.d.

2.3. Valeur écologique

Il existe une première évaluation écologique de la ZEE belge réalisée par l'université de Gand à partir d'une étude des communautés macrobenthiques vivant dans les couches supérieures du fond marin (Maes *et al.*, 2005). Les communautés macrobenthiques sont très sensibles à la pollution et à la modification de leur habitat, ce qui en fait de bons indicateurs (Degraer *et al.*, 2003, 2008 ; Van Hoey *et al.*, 2004). De plus, ces communautés ont un rôle important car elles représentent une grande source de nourriture pour les espèces des niveaux trophiques supérieurs comme le cabillaud (*Gadus morhua*) (État belge, 2012).

Plusieurs critères ont été utilisés pour évaluer cette valeur écologique (Maes *et al.*, 2005) :

- la rareté des espèces (= si présentes dans moins de 2% des échantillons) ;
- la rareté des communautés ;
- la diversité structurelle du macrobenthos ;
- le rôle fonctionnel du macrobenthos (ex : source de nourriture pour les oiseaux marins) ;
- le facteur structurant du macrobenthos pour la communauté ;
- la diversité fonctionnelle du macrobenthos.

Ceux-ci sont associés à un indice de valeur permettant d'obtenir une carte de la valeur écologique des régions étudiées (Figure 10).



Figure 10 : Valorisation écologique de la ZEE belge

Source : Maes *et al.*, 2005

La comparaison de la distribution géographique des valeurs écologiques et des caractéristiques hydro-sédimentaires de la ZEE suggère un contrôle par la force des vagues et la vitesse du courant.

De manière générale :

- les chenaux entre les bancs de sable subissent un courant important et sont donc moins riches ;
- la force des vagues est importante au sommet des bancs de sable, ce qui explique que ce sont les zones les moins riches ;
- les flancs subissent peu de mouvement et sont dès lors très riches en macrobenthos ;
- la zone côtière et principalement les bancs côtiers peu profonds à l'Ouest sont très intéressants contrairement à la partie Est, très dynamique, qui subit des travaux de dragage et de l'érosion (Maes *et al.*, 2005).

Cette carte doit être considérée comme un premier travail car elle se limite au macrobenthos or, il faudrait également tenir compte des espèces trophiques inférieures et supérieures tels que les planctons, crustacés, mollusques et poissons. De plus, certains paramètres importants ne sont pas définis ici comme par exemple la vulnérabilité des espèces aux divers polluants ou la capacité de régénération des espèces et de l'habitat (Maes *et al.*, 2005).

3. Usages économiques

Différentes activités humaines sont développées dans la ZEE belge.

3.1. Le déversement en mer de boues de dragage

Il est indispensable d'effectuer des travaux de dragage afin d'entretenir les voies de navigation maritime et de maintenir la profondeur des ports côtiers (Figure 11). Il s'agit d'une compétence de la région flamande. Ces déblais de dragage peuvent être relativement pollués et peuvent donc impacter les organismes marins lorsqu'ils sont déversés (UGMM, s.d.).

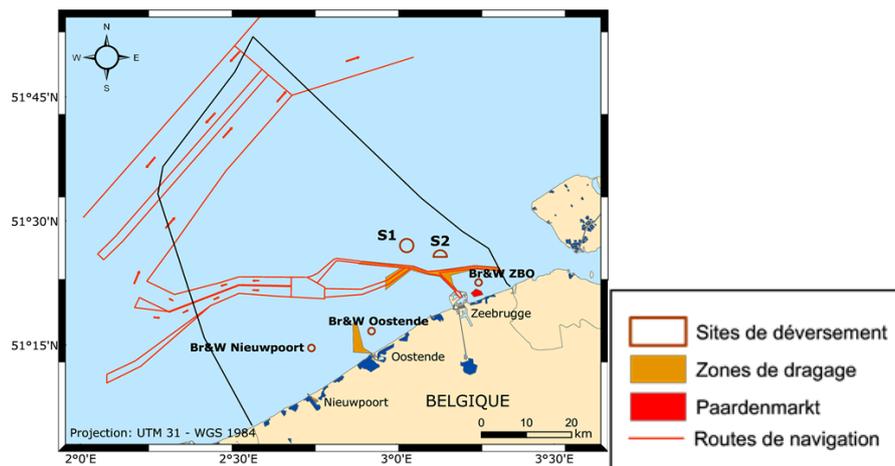


Figure 11 : Zones de dragage et de déversement et zone de dépôt des munitions de guerre
Source : UGMM, s.d.

3.2. Le Paardenmarkt

Le banc de sable peu profond du "Paardenmarkt" se situe le long de Knokke-Heist (Figure 11). C'est là qu'en 1919, le gouvernement décida de rejeter les munitions restantes de la première guerre mondiale. La quantité de matériel militaire est estimée à 35 000 tonnes.

En 1971, les travaux de dragage à l'Est du port de Zeebrugge ont permis de localiser ces munitions. La force navale a alors réalisé une étude sous-marine permettant d'indiquer précisément cette zone sur une carte (carré d'environ 1,5 km²) afin d'y interdire la pêche et l'ancrage. De nouvelles études effectuées dans les années 1980 ont donné à la zone la forme d'un pentagone de 3 km².

Cette zone se situe le long de la côte. Il est donc nécessaire de la contrôler régulièrement. En cela, la Belgique répond aux accords internationaux concernant les dépôts de munitions : contrôler régulièrement sans rien déplacer (UGMM, s.d.).

3.3. L'exploitation de sable et de gravier

En Belgique, l'exploitation de sable et de gravier en mer existe depuis 1976 où 29 000 m³ étaient exploités (UGMM, s.d.). En 2007, la production annuelle était de 1 897 000 m³. L'épuisement des exploitations de sable sur le continent explique cette importante croissance (SPF Economie (2), s.d.). Ces extractions sont utilisées en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas, en France et en Belgique (SPF Economie (2), s.d.) dans divers secteurs :

- la construction en tant que sable de drainage et de stabilisation ;
- le béton ;
- les grands travaux d'infrastructures comme par exemple la pose de conduites de gaz sous-marines ;
- la gestion des plages et la protection des côtes (UGMM, s.d.).

Une gestion durable stricte des quantités exploitées permet de prendre en compte l'intérêt économique et l'impact écologique. Pour cela, une autorisation de concession est nécessaire pour toute exploitation de sable ou de gravier en mer (introduction d'un dossier de demande auprès du SPF Economie et d'un rapport d'incidence sur l'environnement auprès de l'UGMM). De plus, un contrôle scientifique est appliqué au niveau de la gestion des provisions et un registre doit être tenu par les exploitants (SPF Economie (2), s.d.).

3.4. Les parcs à éoliennes

En Belgique, le Ministre de l'Energie du gouvernement fédéral octroie des concessions domaniales pour « *la construction et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'eau, des courants ou des vents, dans les espaces marins sur lesquels la Belgique peut exercer sa juridiction conformément au droit international de la mer* » (SPF Economie (1), s.d.) selon l'arrêté royal du 28 décembre 2008.

Il existe une procédure à suivre qui exige une évaluation environnementale conformément à la loi sur la protection du milieu marin du 20 janvier 1999 et une évaluation d'incidences environnementales par l'UGMM se basant sur un rapport d'incidence réalisé par le demandeur (UGMM, s.d.).

Il faut également passer par une procédure d'obtention d'un permis pour l'installation des câbles de l'exploitation à introduire auprès du SPF des affaires économiques qui rend son avis au Ministre de l'Energie (UGMM, S.d.).

Actuellement, cinq projets de parcs éoliens ont obtenu une concession domaniale (Figure 12) :

- les projets « C-Power », 2003,
- « Northwind » (anciennement « Eldepasco »), 2006
- « Belwind », 2007
- « Rentel », 2009
- « Norther », 2009 (SPF Economie (1), s.d.)



Figure 12 : En jaune, les parcs éoliens de la ZEE belge
Source : Google Earth, 2012 et BMDC, s.d.

Ces cinq projets comprennent 344 turbines aérogénératrices avec une capacité de 1460 à 1610 MW et une surface d'environ 130 km² (SPF Economie (1), s.d.).

3.5. La mariculture

Depuis 2005, 3 zones de la ZEE belge sont affectées à la mytiliculture (aquaculture de moules) de pleine mer. Le Ministre compétent pour l'environnement en mer du Nord a octroyé des permis de production, suite à une évaluation d'incidence de ces activités réalisée par l'UGMM. De plus, la zone de parcs éoliens pourra probablement accueillir de la mariculture d'ici une dizaine d'année (UGMM, s.d.) (Figure 13).



Figure 13 : En rose, les zones de mariculture de la ZEE belge
Source : Google Earth, 2012 et BMDC, s.d.

3.6. La pêche

5% de la pêche mondiale est réalisée en mer du Nord. Les prises réalisées dans la ZEE belge ne représentent que 1% des prises totales de la mer du Nord. En 1995, ces 1% correspondaient à 3,5 millions de tonnes de poissons et de coquillages (UGMM, s.d.).

Les ressources halieutiques⁴ de la région sont essentiellement la sole (*Solea solea*), la plie (*Pleuronectes platessa*), le merlan (*Merlangius merlangus*), la morue (*Gadus morrhua*), le hareng (*Clupea harengus*), le maquereau (*Scomber scombrus*) et le sprat (*Sprattus sprattus*) (Jacques, 2010).

Les zones de pêches sont indiquées sur la Figure 14.

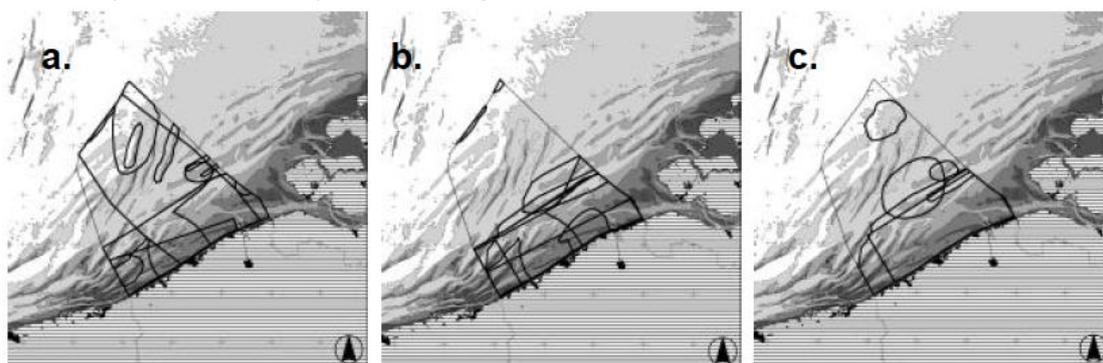


Figure 14 : Les zones de pêche dans la ZEE belge rapportées par les pêcheurs pour la période février - juin : (a) poissons plats (sole, limande et plaine), (b) poissons ronds (cabillaud et hareng) et (c) crevettes
Source : Rousseau *et al.*, 2004

Cette activité a un important impact sur l'écosystème marin. Certaines espèces comme le cabillaud sont surpêchées et donc menacées. Les techniques de pêche détruisent les fonds marins et sont dommageables pour les mammifères marins pris dans les filets ainsi que pour les poissons trop nombreux ou petits en regard des quotas et des tailles imposées par l'Union Européenne. Le by-catch (poissons endommagés et déchets) profite aux oiseaux charognards tels les goélands. Une étude réalisée en Mer du Nord (Garthe *et al.*, 1996) estime le by-catch à 789 000 T/an soit 4% de la biomasse totale de poissons et 22% de la capture.

⁴ Qui concerne la pêche

Conclusion

Comme ce chapitre le décrit, la ZEE belge est une zone intensément utilisée mais pourtant biologiquement riche.

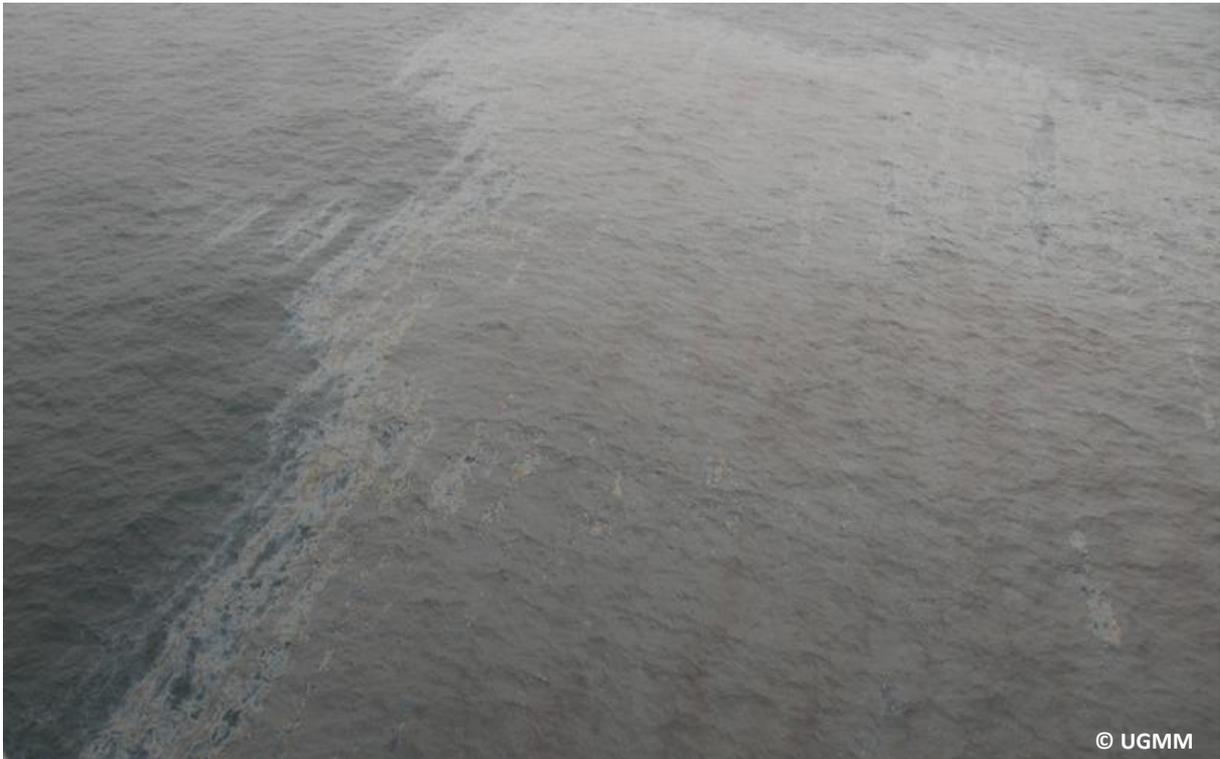
Dans cette zone se trouvent des zones de dragage, d'exploitation de sable et de gravier, de production d'énergie éolienne, de mariculture, de stockage de munitions militaires et de la pêche. Sans oublier le tourisme qui est une des principales activités économiques de la mer du Nord.

A côté de toutes ces activités, le plancton, les organismes benthiques, les poissons, les oiseaux et les mammifères sont bien présents et peuvent souffrir des impacts négatifs que peuvent avoir ces exploitations. Par exemple, le risque d'accident de navigation et donc de pétrole déversé en mer, augmente avec la présence d'infrastructures éoliennes. De plus, celles-ci sont relativement proches de la côte de sorte que la fenêtre de temps pour lutter contre le déversement avant que le pétrole n'atteigne les côtes ou des zones sensibles est très étroite.

Il est donc important de définir le contexte de la ZEE belge afin d'effectuer la meilleure gestion possible en cas d'accident.

Chapitre 2

Gestion des marées noires dans la ZEE belge

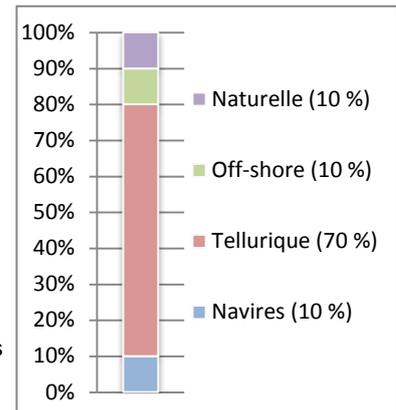


Introduction, qu'est-ce qu'une marée noire ?

« L'expression « marée noire » naît du choc provoqué en 1967 par la pollution du Torrey Canyon. Elle marque l'émergence d'un nouveau risque : le déversement en mer de produits polluants et dangereux... » (Toutain, 2004). Une marée noire est donc un déversement, principalement accidentel, en mer d'hydrocarbures.

De nombreuses pollutions sont liées à l'extraction, le transport et l'usage des hydrocarbures. Le développement socio-économique et la mondialisation du commerce qui ont eu lieu au cours du dernier siècle ont poussé la consommation à son maximum. Les océans peuvent être pollués au pétrole suite à son extraction avec des fuites de puits Off-Shore ou, suite à son transport avec des accidents de type « marées noires » (Ramade, 2007). Ils peuvent également et principalement provenir des rejets telluriques, soit les déversements d'eaux usées industrielles ou urbaines, sans oublier les sources « naturelles », c'est-à-dire les hydrocarbures provenant de fissures dans les fonds marins (Figure 15) (Troyat, s.d.).

Figure 15 : Origines de la pollution marine par les hydrocarbures
Source : d'après Troyat, s.d.



Une marée noire est donc le « terme utilisé pour désigner les catastrophes écologiques provoquées par la pollution accidentelle des eaux littorales par suite de volumes considérables de pétrole lors d'accidents survenus à des puits « off-shore » ou à des tankers » (Ramade, 2000). Ces catastrophes écologiques représentent 5% de la pollution des mers et des océans (Toutain, 2004).

Le pétrole est un des principaux polluants des océans avec plus d'un milliard de tonnes par an transportées sur les océans et 2 à 5 millions de tonnes par an rejetées dans les océans (Ramade, 2000). Les principales voies maritimes de transport du pétrole sont visibles sur la carte ci-dessous (Figure 16).

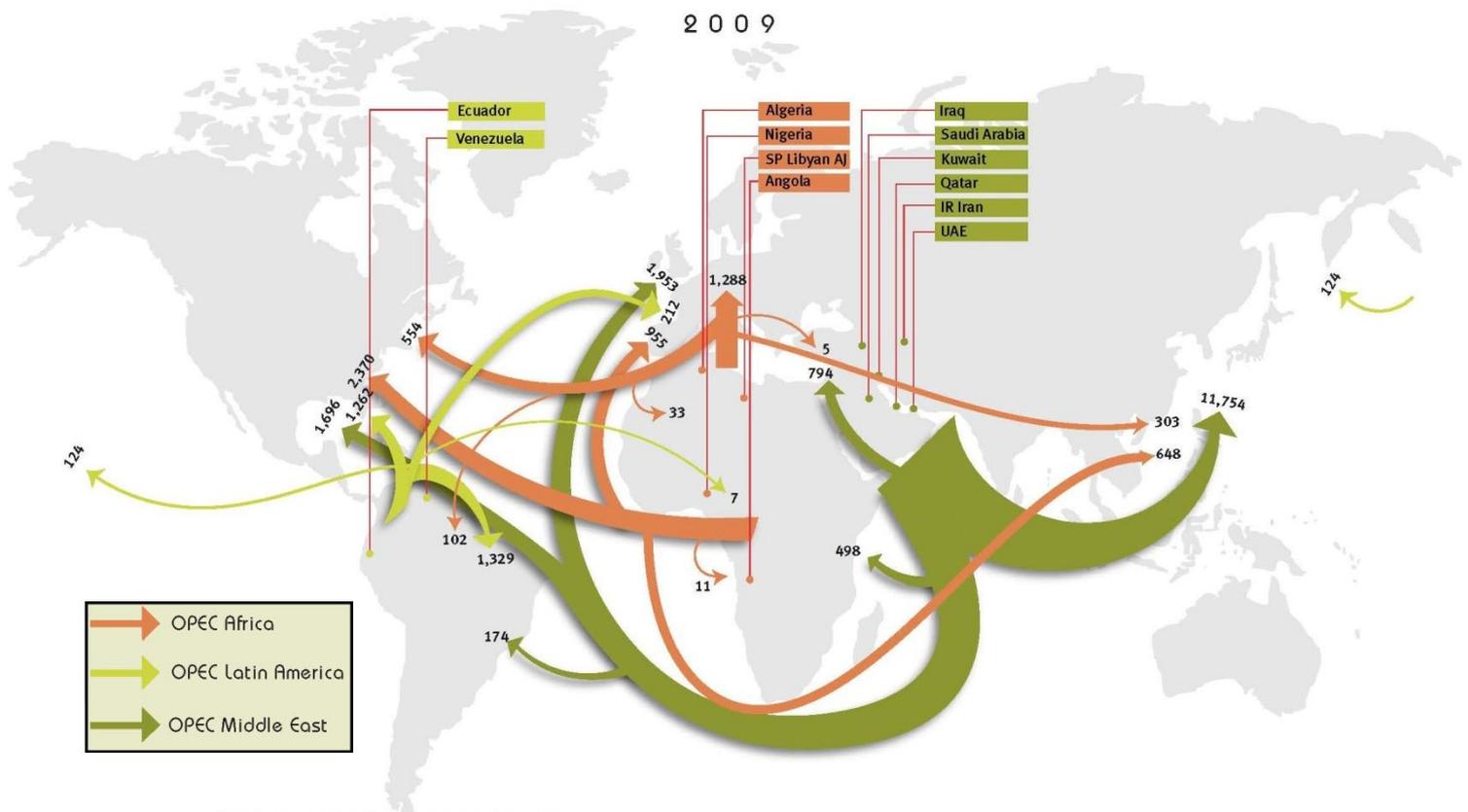


Figure 16 : OPEC flux de pétrole brut et raffiné (2009) (Unité : 1000 barils/jour)
Source : Qabazard, 2009

Cette carte des principales voies maritimes pour le transport des hydrocarbures peut-être mise en parallèle avec une carte de la répartition mondiale des déversements pétroliers d'au moins 700 tonnes entre 1970 et 2004 (Figure 17). Des carrés de 10° de latitude sur 10° de longitude (Individual Marsden Squares) sont grisés selon le volume déversé dans cette zone. Le chiffre au sein de chaque carré représente le nombre de déversement(s) survenu(s) et les lettres font références aux déversements d'au moins 100 000 tonnes (Burgherr, 2007).

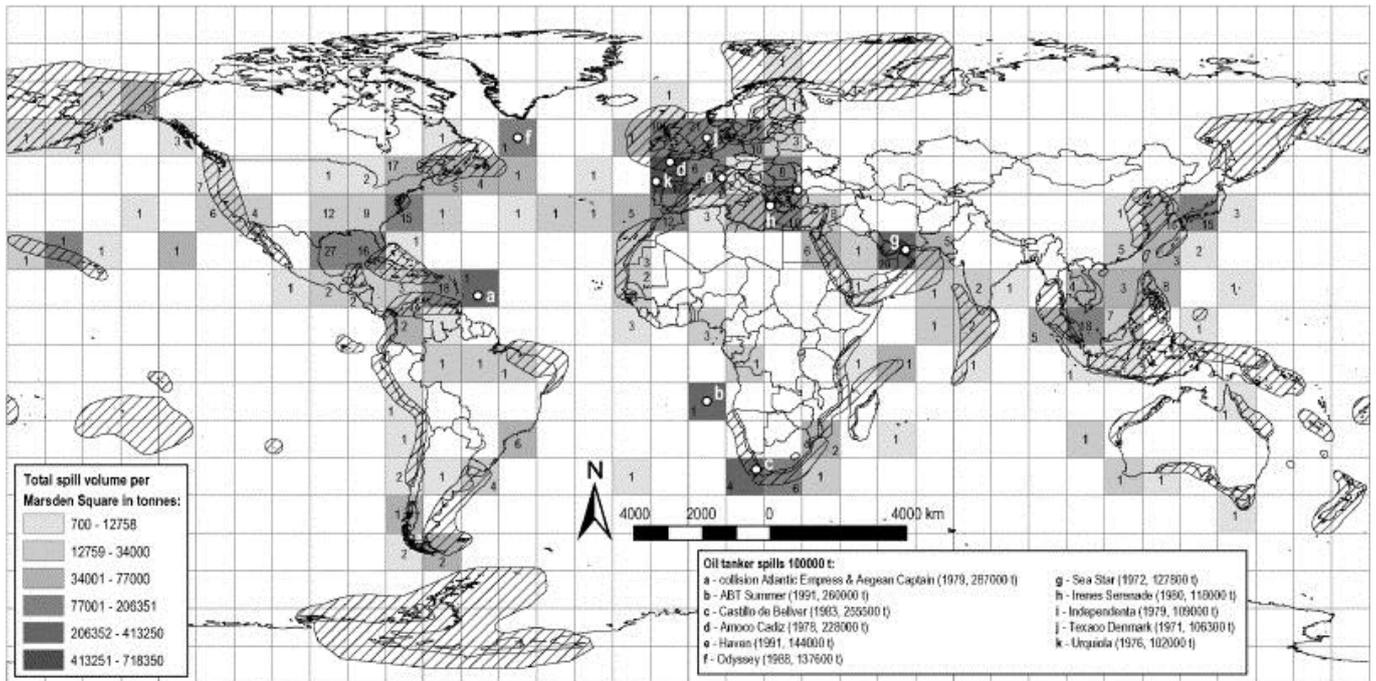


Figure 17 : Répartition mondiale des déversements pétroliers d'au moins 700 tonnes entre 1970 et 2004
Source : Burgherr, 2007

Les déversements sont importants dans plusieurs régions (Burgherr, 2007) :

- le Nord de l'Atlantique européen, particulièrement la côte de Galice en Espagne, la Manche et la mer du Nord ;
- la Méditerranée orientale ;
- le golfe du Mexique, les Caraïbes et certaines parties de l'Atlantique Sud vers le Sud du Venezuela et du Brésil ;
- le contour de la pointe Sud de l'Afrique où l'Atlantique et l'océan Pacifique se rejoignent ;
- le golfe Persique, y compris la mer d'Arabie ;
- le détroit de Malacca, le golfe de Thaïlande et la mer de Chine méridionale.

La mer du Nord est une des régions les plus touchées et les côtes belges doivent donc se protéger des effets néfastes directs et indirects de ce polluant.

1. Les hydrocarbures

1.1. Les caractéristiques du pétrole

Le pétrole est constitué d'alcane, de naphènes, d'oléfines et/ou d'hydrocarbures aromatiques polycycliques soit des composés formés essentiellement de carbone et d'hydrogène. Ils peuvent également contenir d'autres composés tels que de l'azote, du soufre, de l'oxygène et des métaux à l'état de trace (vanadium, nickel,...) (Ventura *et al.* 2005). Ils se présentent sous forme de produits pétroliers bruts ou de produits pétroliers raffinés. Le pétrole brut est directement issu des puits pétroliers tandis que le pétrole raffiné a subi des traitements et des transformations afin d'en extraire les fractions utiles comme par exemple le kérosène ou le diesel (Hoffman *et al.*, 1995).

Les hydrocarbures peuvent être différenciés par leurs caractéristiques physico-chimiques : la couleur (Hoffman *et al.*, 1995), la densité, la viscosité, la tension de vapeur, le point d'écoulement et le point éclair (Ventura *et al.* 2005).

Tous les pétroles sont différents. Leur gamme de couleur va du jaune-brun clair au noir comme l'illustre la Figure 18 ci-dessous.



Figure 18 : Différents types d'hydrocarbure
Source : Gregg et Walrond, 2009

La densité de l'hydrocarbure dépend de la densité de ses composants. Elle diminue lorsque la température augmente. Elle varie généralement entre 780g/L et 1000 g/L, ce dernier chiffre étant similaire à la densité de l'eau.

La viscosité, tout comme la densité, diminue lorsque la température augmente. La résistance du pétrole à l'étalement est définie par la viscosité.

La tension de vapeur est à l'origine du taux d'évaporation qui définit la concentration d'hydrocarbures dans l'air. Les pétroles lourds ont un taux d'évaporation inférieur aux pétroles légers.

Le point d'écoulement représente la température minimale nécessaire pour que le pétrole puisse s'étaler lorsqu'il est soumis à un faible mouvement. Lorsque la viscosité du pétrole est faible, le point d'écoulement peut être inférieur à -40°C alors que pour les pétroles paraffiniques, le point d'écoulement peut être supérieur à 30°C.

Le point éclair est la limite de température à laquelle le gaz ou la vapeur provenant du chauffage du pétrole peuvent brûler. Ce point éclair est lié à la volatilité du pétrole.

Il existe des bases de données pour les hydrocarbures comme par exemple celle de l'*Environmental Technology Center* de Environnement Canada (Environment Canada, 2001).

1.2. Le vieillissement du pétrole

Source : Ventura *et al.* 2005

Une fois en mer, le pétrole va être soumis à des modifications biologiques, ainsi qu'à des modifications physiques et chimiques au cours du temps appelées « vieillissement » (Figure 19).

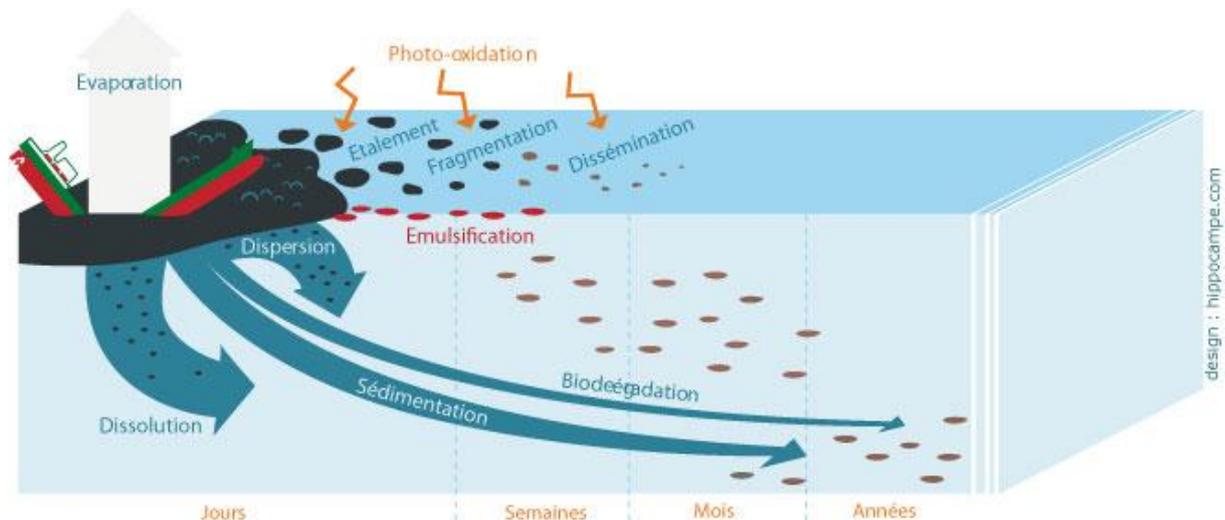


Figure 19 : Devenir du pétrole déversé en mer

Source : Cedre, s.d. (2)

L'étalement du pétrole se fait sous forme de nappe de taille et d'épaisseur variables. Elle se déplace sous l'action du vent, des marées et des courants (Figure 20). La densité va définir la flottabilité de la nappe. Si le pétrole est plus dense que l'eau, il s'enfoncera dans la colonne d'eau et s'il est moins dense, il flottera. L'épaisseur quant à elle est dépendante de la viscosité du produit déversé. Si la viscosité est importante, la nappe sera plus épaisse. Elle peut avoir une épaisseur de quelques micromètres à quelques centimètres.

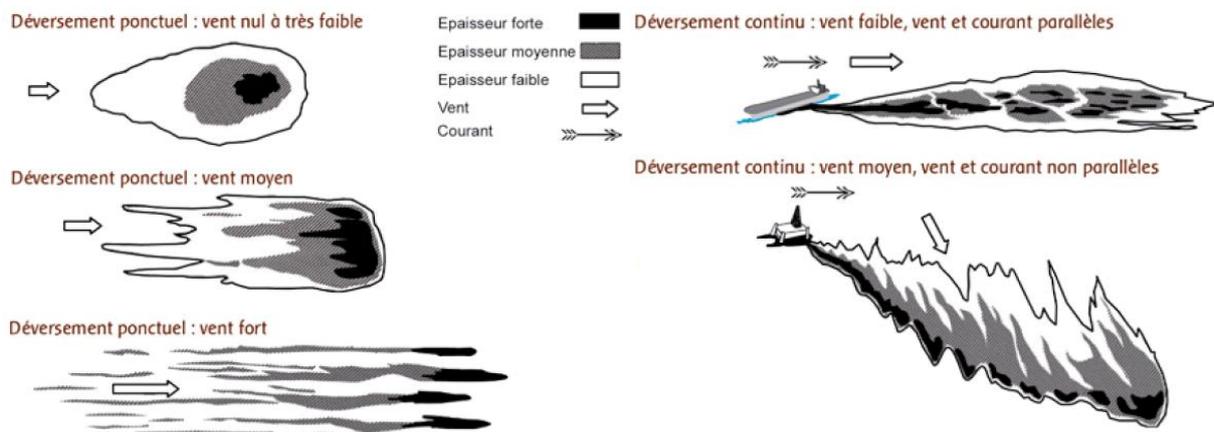


Figure 20 : Topographie des nappes de pétrole selon le déversement et le vent

Source : Cedre, 2009

L'évaporation est le processus majeur de vieillissement mais également le plus difficile à estimer. Cette perte d'hydrocarbure peut aller jusqu'à 2/3 de la masse du polluant mais elle n'est pas systématique et dépend du type d'hydrocarbure et des conditions environnementales. En effet, les pétroles légers ont un taux d'évaporation plus important que les pétroles lourds. Et, plus la nappe est étalée et donc peu visqueuse, plus son taux d'évaporation sera important. Si la mer est agitée, que la température est élevée et que les vents sont forts, l'évaporation sera également plus forte.

La photo-oxydation oxyde certains composés (principalement les aromatiques) sous l'effet de la lumière en alcools, acides ou sulfoxydes. Ce processus se produit sur les couches minces ou superficielles d'une nappe visqueuse. Les composés ainsi formés sont plus solubles et peuvent former une croûte à la surface de la nappe, protégeant ainsi les couches inférieures des autres processus de vieillissement.

La dissolution est un processus mineur qui se traduit par la dispersion des composés du pétrole dans l'eau. Elle dépend du taux de solubilité du polluant, de la turbulence et de la température de l'eau. Tout comme l'évaporation, la dissolution concerne essentiellement les fractions légères.

L'émulsification se produit car le pétrole et l'eau sont non miscibles. L'émulsification peut être soit de type « hydrocarbure-dans-eau » soit de type « eau-dans-hydrocarbure ». Dans le premier cas, le pétrole est dispersé dans la colonne d'eau et dans le second, l'eau est dispersée dans l'hydrocarbure. Ce dernier est également appelé émulsion inverse ou « mousse au chocolat » à cause de son aspect de mousse marron. Si le brassage des vagues est insuffisant, l'émulsion ne se fera pas et à l'inverse, si ce brassage est trop important, l'émulsion ne sera pas stable et le pétrole sera dispersé dans la colonne d'eau. La teneur en résines, cires et asphaltènes joue dans la stabilité des émulsions en formant un film entre le pétrole et les gouttes d'eau. Les pétroles à forte densité sont donc plus touchés par ce processus. Un produit émulsionné sera plus visqueux que lorsqu'il est à l'état naturel et plus l'émulsion est stable, plus elle sera visqueuse. De plus, le volume de la nappe sera plus important une fois émulsionnée.

La dispersion résulte de l'effet des vagues qui fractionne les nappes sous forme de gouttelettes de 0,0001 à 1 mm de diamètre dans la colonne d'eau. Il s'agit d'une émulsion de type « hydrocarbure-dans-eau ». Lorsqu'il y a formation d'émulsion de type « eau-dans-hydrocarbure » et que l'évaporation diminue, le produit devient plus visqueux et ainsi moins dispersable.

La biodégradation est la dégradation des hydrocarbures par des micro-organismes qui consomment le carbone comme des bactéries. Ce processus peut être partiel et entraîner la formation de composés oxydés tels que des alcools et des acides. Lorsque la biodégradation est complète, le pétrole est totalement éliminé en étant transformé en dioxyde de carbone et en eau, c'est-à-dire qu'il se minéralise. On distingue la biodégradation aérobie et la biodégradation anaérobie. La première a lieu en présence d'oxygène, c'est-à-dire dans l'eau de mer, à sa surface et dans les couches supérieures des sédiments et du sol. La seconde se déroule sans présence d'oxygène soit, plus profondément dans le sédiment. Les pétroles légers sont plus sensibles à la biodégradation que les pétroles lourds riches en résines et en asphaltènes qui ne se dégradent pas facilement. Un rapport surface/volume important est favorable à la biodégradation. Les hydrocarbures dispersés ou sous forme de plaque favorisent le contact des bactéries contrairement aux émulsions inverses et

aux galettes, boulettes et autres agrégats. Des températures élevées et la présence d'azote et de phosphore favorisent une biodégradation rapide.

La sédimentation est issue de divers processus expliqués précédemment (évaporation, émulsification, photo-oxydation et résidus de combustion) qui mènent à une augmentation de la densité du pétrole. Le pétrole est susceptible de sédimenter lorsque sa densité est supérieure à celle de l'eau. Il est également possible que les particules en suspension dans l'eau absorbent le pétrole, deviennent plus lourdes que l'eau et sédimenter. Généralement ces particules sont plus nombreuses près des côtes. De plus, le pétrole suffisamment visqueux qui arrive près des côtes peut se mélanger avec le sable et, sous l'action des vagues et des marées, se remettre en suspension et être transporté vers le large.

La combustion accidentelle peut avoir lieu suite à une explosion ou une collision. Les incendies qui en résultent peuvent être difficilement maîtrisables et ont pour conséquences d'émettre de la fumée polluée vers l'atmosphère ainsi que de projeter des petites particules partiellement brûlées, poussées par les vents, sur de longues distances. Il se peut également que des résidus de combustion et des suies relativement denses voire même solides précipitent dans l'eau et contaminent les sédiments.

L'arrivage à la côte peut se faire massivement « *sous différentes formes : plaques de plusieurs millimètres d'épaisseur et de diamètre supérieur au mètre, galettes de diamètre inférieur au mètre, boulettes de diamètres inférieur à 10 cm, festons ou zébrures d'hydrocarbures correspondant à de faibles quantités de pétrole déposées en laisse⁵ de haute mer lors du retrait de la vague, écume ou mousse aérées brunâtres déposées sur les estrans⁶ très fortement exposés résultant d'un intense brassage par les vagues plus ou moins fortes poussées à la côte, taches ou souillures correspondant à des projections de pétrole sur les surfaces dures, irisations⁷ ou film gras* » (Ventura et al. 2005). L'adhérence au substrat sera plus importante si le pétrole est visqueux. Aussi, la viscosité et le type de substrat ont une influence sur la capacité du pétrole à s'infiltrer dans le sol.

Chaque pétrole étant différent, il est difficile d'évaluer les impacts d'une telle pollution. Un pétrole brut léger, en présence d'un vent de terre, n'atteindra pas les côtes et sera facilement dégradé en mer alors qu'un pétrole lourd, en présence d'un vent de mer, sera émulsionné et très visqueux et aura donc un impact important sur les organismes marins et sur terre. Il existe un nombre infini de cas intermédiaires dont les impacts dépendront d'une multitude de caractéristiques.

2. Les impacts socio-économiques des marées noires

Outre les problèmes environnementaux, les activités économiques présentes en mer ne sont pas à l'abri des marées noires et divers problèmes socio-économiques peuvent en découler. Dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude, il n'est pas pertinent de réaliser une évaluation économique des dommages causés par une marée noire car ce sujet nécessiterait un travail à lui seul. Cependant, quelques bases permettant de visualiser les types de dommages occasionnés seront présentées ci-dessous.

⁵ Espace à découvert par la mer lors des marées

⁶ Partie du littoral située entre les plus hautes et les plus basses marées

⁷ Couleur de l'arc en ciel

Selon l'Institut National de la Recherche Agronomique français (INRA), il existe une typologie des dommages des marées noires comme l'illustre le schéma ci-dessous (Figure 21).

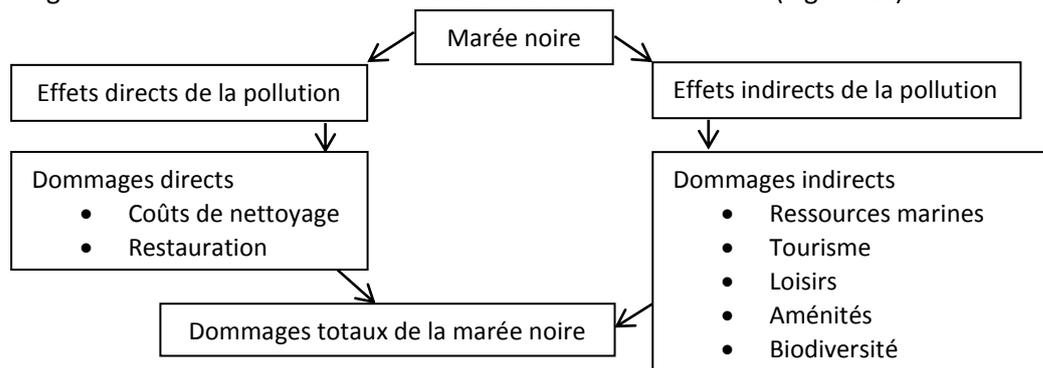


Figure 21 : Typologie des dommages d'une marée noire
Source : Bonnieux et Rainelli, 2002

Elle implique des effets directs et des effets indirects de la pollution qui forment les dommages totaux de la marée noire (Bonnieux et Rainelli, 2002).

2.1. Effets directs de la pollution

Les effets directs de la pollution représentent les coûts de nettoyage et de remise en état des équipements et des infrastructures. Ces coûts sont relativement faciles à définir bien que ces dépenses se font dans un contexte d'urgence. De plus, les incertitudes concernant l'impact de la pollution ou de sa remédiation sur l'écosystème marin affecté font qu'il n'est pas aisé d'atteindre un niveau optimal de nettoyage (Bonnieux et Rainelli, 2002).

2.2. Effets indirects de la pollution

Les effets indirects représentent « *la diminution des services des écosystèmes touchés par la pollution* » (Bonnieux et Rainelli, 2002). Ils prennent en compte les secteurs marchands tels que la pêche et le tourisme mais également les secteurs non marchands comme la perte d'agrément (valeur patrimoniale) des habitants, les atteintes aux loisirs (par exemple la pêche à pied) et l'impact sur l'écosystème (Bonnieux et Rainelli, 2002). Les effets indirects sont variés, en voici quelques exemples.

Les pêcheurs peuvent se trouver dans l'incapacité de pratiquer leur activité suite à l'encrassement des bateaux et du matériel de pêche. Aussi, les poissons et crustacés peuvent être contaminés et donc être impropres à la consommation. Des zones d'exclusions où la pêche est interdite pour certaines espèces peuvent être imposées jusqu'à ce qu'elles soient exemptes de contamination. Cela a nécessairement un impact sur le revenu des pêcheurs (IPIECA, 2000).

Les installations touristiques et les aménagements côtiers sur les plages, ainsi que les marinas, les jetées et autres installations pour les bateaux de plaisance, les activités de pêches et le commerce touristique peuvent devenir inutilisables. Aussi, la réputation des zones touchées peut être endommagée et les réservations touristiques diminuer. Sans parler des espaces protégés contenant des ressources sensibles tels que les oiseaux, les mammifères ou la flore qui amènent de nombreux touristes et qui peuvent être fortement affectés par une telle pollution (IPIECA, 2000).

De plus, certaines industries utilisent de l'eau de mer comme refroidissement et certains pays détiennent des usines de dessalement pour l'eau potable. Si les composés pétroliers sont captés par ces industries, les effets peuvent être graves même si le risque est réduit lorsque les prises d'eau sont profondes ou lorsque les installations sont protégées par des barrages flottants (IPIECA, 2000).

3. Les pollutions aux hydrocarbures dans la ZEE belge

Les activités humaines en mer décrites au chapitre 1 augmentent le risque d'accidents maritimes et de pollutions.

Selon la loi du 20 janvier 1999, visant la protection du milieu marin dans les espaces marins sous juridiction de la Belgique, une pollution est définie comme « l'introduction directe ou indirecte, par l'homme, de substances ou d'énergie dans les espaces marins, lorsqu'elle a ou, selon toute vraisemblance, peut avoir des effets nuisibles tels que des dommages aux ressources biologiques de la mer et aux écosystèmes marins, risques pour la santé de l'homme, entraves aux activités maritimes, y compris la pêche et les autres utilisations légitimes de la mer, une altération de la qualité de l'eau de mer ou une dégradation des valeurs d'agrément ».

La base de données du Cedre (Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux) nous permet d'identifier les types de rejets et leurs volumes. Cinq pollutions majeures ont touché la ZEE belge au cours des 30 dernières années (Tableau 1) :

Tableau 1 : Accidents et pollutions maritimes touchant la ZEE belge

Source : d'après Cedre, s.d. (1)

Nom	Date	Lieu	Quantité transportée	Nature du polluant	Quantité déversée	Cause
<i>Mont Louis</i> Roulier français	25/08/1984	Ostende	450 t	Hydrocarbures de soute	Inconnue	Collision
<i>Skyron</i> Pétrolier lybérien	30/05/1987	Manche, Dunkerque	136 000 t	Fioul léger	160 m ³	Collision
<i>British Trent</i> Pétrolier bermudéen	03/06/1993	ZEE belge	24 000 t	Essence sans plomb	5 100 t	Collision
<i>Bona Fulmar</i> Pétrolier bahaméen	18/01/1997	Manche, Dunkerque	60 000 t	Essence	7 000 t	Collision
<i>Tricolor</i> Porte-conteneurs norvégien	14/12/2002	Manche, Dunkerque	1 990 t	Fioul lourd (IFO 380)	170 t sur 1 an	Collision

Outre ces accidents, la surveillance aérienne de l'UGMM a dépisté 655 infractions probables comprenant des résidus pétroliers entre 1991 et 2010 (Figure 22) (UGMM, s.d.).

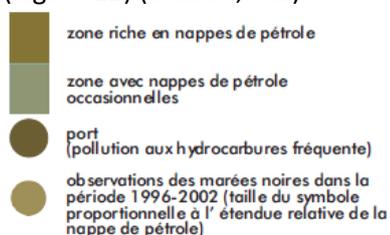


Figure 22 : Zones où la pollution aux hydrocarbures en mer est fréquente, superposées aux observations de la pollution aux hydrocarbures dans la période 1996-2002

Source : Maes et al., 2005



Nous remarquons que la majorité de ces déversements d'hydrocarbure se situent au niveau des routes maritimes et dans les ports (Maes *et al.*, 2005).

Cependant, une diminution significative des rejets s'observe. Dans les années 1990, en moyenne 50 rejets étaient repérés par an alors que depuis 2000, 25 rejets sont relevés par an. Une diminution des volumes est également observée avec une moyenne de 100 tonnes dans les années 1990 contre 30 tonnes depuis 2000. Cette diminution peut s'expliquer par les procès-verbaux engagés envers les navires pollueurs détectés par surveillance aérienne (UGMM, s.d.).

Une des plus récentes et importantes catastrophes ayant touché la ZEE belge est l'accident du Tricolor, un transporteur de véhicules norvégien (Figure 23). Ce navire transportait 1 990 tonnes de fioul lourd (IFO 380) de viscosité moyenne. Le 14 décembre 2002, il est entré en collision avec le porte-conteneurs Kariba immatriculé aux Bahamas. La nuit suivante, le Nicola, cargo allemand et le 1er janvier 2003, le Vicky, pétrolier turc, entrèrent en collision avec le Tricolor. Plusieurs m³ du fioul du Tricolor se sont répandus en mer (Cedre, 2004 ; Haelters *et al.*, 2003). Cinq semaines après l'accident, environ 170 tonnes de pétrole se sont échappés de l'épave suite aux travaux de renflouage.

De nombreux oiseaux se sont retrouvés mazoutés et ont échoués sur les côtes néerlandaises, belges et françaises. Le long de la côte belge, 9177 oiseaux de 32 espèces ont été comptabilisés (morts ou vivants) avec une majorité de guillemots (Figure 23) et de petits pingouins (Haelters *et al.*, 2003). En France, 5500 oiseaux ont été ramassés et en Hollande, environ 7000 oiseaux ont été recensés (Cedre, 2004).



Figure 23 : Epave du Tricolor le 22 janvier 2003 à marée basse (gauche) et guillemot mazouté lors de cet accident (droite)
Source : Haelters *et al.*, 2003

4. Les techniques de lutte

Lors d'une pollution aux hydrocarbures en mer, les équipes d'intervention ont le choix entre deux stratégies. La première consiste en l'utilisation de barrages flottants afin de contenir et de récupérer une partie de la pollution. La seconde est l'utilisation de surfactants pour disperser dans la colonne d'eau les hydrocarbures sous forme de microgouttelettes. Ce choix se fait actuellement dans l'urgence et suivant l'avis de l'expert autorisé. Le choix entre les deux stratégies dépend des conditions en mer et doit minimiser les impacts environnementaux (UGMM, s.d.).

Les dispersants n'ont encore jamais été utilisés dans la ZEE belge. En effet, plusieurs conditions sont nécessaires pour assurer l'efficacité de ces produits. Elle dépend notamment de l'état de la mer. De plus, pour que le dispersant soit efficace, il faut une colonne d'eau profonde, or la ZEE belge l'est peu et le pétrole risque donc de rester fort concentré et d'avoir des effets néfastes sur les espèces benthiques. Outre ces conditions, il existe également des contraintes plus psychologiques, telle que l'idée qu'on ajoute un produit chimique, qui ont poussé les gestionnaires belges à suivre le principe de précaution.

4.1. Les barrages flottants

Les barrages flottants peuvent être de deux types. Les premiers servent à protéger les endroits sensibles à l'aide de protection statique qui peut être placée autour ou le long de la zone considérée. La Figure 24 ci-dessous illustre bien le procédé.



Figure 24 : Une île de la Méditerranée protégée par un barrage statique
Source : MEDESS-4MS, s.d.

Les seconds sont des écremeurs (*skimmer* en anglais). Il s'agit de deux bateaux tirant la pollution à l'aide d'un barrage du même type que la technique précédente (Figure 25).



Figure 25 : Exercice de lutte anti-pollution en mer du Nord à l'aide d'un écremeur
Source : DG Leefmilieu

4.2. Les dispersants chimiques

Le guide opérationnel de « Traitement aux dispersants des nappes de pétrole en mer » rédigé par Merlin X. du Cedre en 2005 définit et précise quand utiliser les dispersants. Il permet donc aux acteurs de la lutte antipollution de réagir en cas de nécessité.

4.2.1. *Définition*

Le dispersant disperse le polluant pétrolier dans la colonne d'eau tout en favorisant et accélérant les processus naturels de dégradation ainsi qu'en évitant que celui-ci n'accède à la côte sous l'effet du vent. Le polluant ne disparaît pas mais sa présence à la surface de l'eau est réduite.

Les produits dispersants sont composés à la fois de tensio-actifs liquides et de solvants. L'agitation naturelle de l'eau ajoutée à l'action du dispersant permet de réduire l'incorporation de gouttes d'eau dans le polluant pétrolier, c'est-à-dire l'émulsion inverse également appelée « mousse au chocolat » (Figure 26). Sa mise en suspension dans l'eau est alors augmentée. Il s'agit de la phase primaire de la dispersion. Les gouttelettes de polluant se dispersent ensuite dans un plus grand volume d'eau suite à l'action des courants et de la turbulence, c'est ce qu'on appelle la phase secondaire de la dispersion.

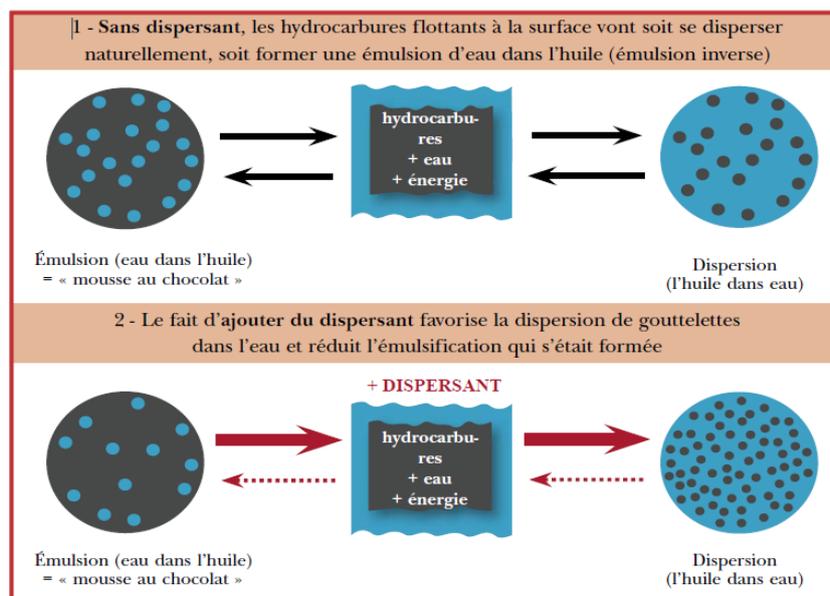


Figure 26 : Dispersion et émulsification des hydrocarbures dans l'eau, sans dispersant et avec
Source : Merlin, 2005

4.2.2. Quand les utiliser ?

D'un point de vue physico-chimique, il est possible de disperser la nappe lorsque « la viscosité du polluant à la température de l'eau de mer n'est pas trop élevée » (Merlin, 2005). Il est nécessaire de traiter rapidement car les fractions plus légères du polluant peuvent s'évaporer et une émulsion d'eau peut se former dans l'hydrocarbure (« mousse au chocolat »). Le polluant vieillit donc en mer, ce qui rend le polluant plus visqueux et moins dispersible. Le « créneau de temps » ou « fenêtre de dispersibilité » est la période durant laquelle le polluant est dispersible.

La possibilité de traiter varie également selon les caractéristiques des hydrocarbures présents.

En ce qui concerne les hydrocarbures paraffiniques, c'est-à-dire ceux qui se solidifient très rapidement lorsqu'ils sont en dessous de la température du point d'écoulement (lorsque le produit commence à s'écouler), il est impossible de disperser lorsque la température est de 4 à 8 degrés en dessous du point d'écoulement.

Pour les produits raffinés légers, soit l'essence, le kérosène et le gazole, dans la plupart des cas, il est inutile de traiter, même si cela est possible, car ces hydrocarbures disparaissent naturellement par évaporation et dispersion naturelle.

Les émulsions fraîchement formées peuvent être traitées par deux applications de dispersants. La première à faible dosage permettra de couper l'émulsion et donc de réduire la viscosité et la seconde application dispersera alors réellement la nappe.

Lorsque l'agitation de la mer est bien présente, le brassage naturel dû au vent et aux vagues peut fractionner la nappe en gouttelettes. Tandis que lorsque cette agitation est nulle, l'hydrocarbure se retrouvera presque systématiquement à la surface.

Cependant, lorsque la mer est trop agitée ou le vent trop fort, il est presque impossible d'appliquer le traitement car la pulvérisation n'arrivera pas à destination, le navire ou l'avion étant trop mouvants.

D'un point de vue environnemental, l'utilisation de dispersant ne peut se faire que lorsque les conditions de dilution et de dissémination sont réunies afin que la toxicité ne soit pas augmentée. En effet, dans certains cas, l'utilisation des dispersants peut avoir des effets néfastes pour l'environnement. Tant que le pétrole dispersé ne s'est pas disséminé, la toxicité de celui-ci peut être localement plus importante jusqu'à ce qu'il revienne à des concentrations inoffensives. Il faut donc être particulièrement attentif à la présence de zone sensible au niveau du site pollué ainsi qu'à ce que le volume d'eau soit suffisant.

Dans le cas d'un déversement d'hydrocarbure en mer, avant de décider d'utiliser des dispersants chimiques, il est nécessaire de réaliser une analyse du bénéfice environnemental net (Net Environmental Benefit Analysis – NEBA) afin d'être sûr de réduire l'impact du polluant. Le pétrole dispersé doit être moins nocif que la nappe de pétrole en elle-même (Figure 27).

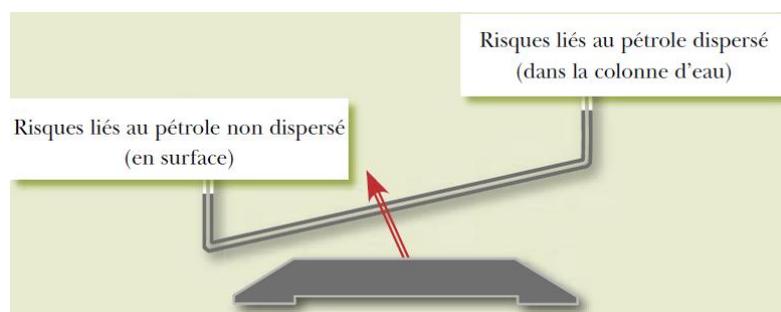


Figure 27 : Dispersion appropriée du pétrole en mer
Source : Merlin, 2005

En conséquence, des zones où il est possible de disperser doivent être définies en fonction des conditions de dilution, des particularités locales (réserves écologiques, aquacultures, zones touristiques,...) et de la sensibilité des espèces présentes. Celle-ci peut être évaluée par des tests de toxicité du polluant.

5. Gestion opérationnelle d'une pollution en ZEE belge

5.1. La législation

Des règlements ont été mis en place afin de protéger l'écosystème marin des rejets d'hydrocarbures depuis les années 1950 avec OILPOIL 1954/1962 pour la prévention de la pollution des eaux de la mer par les hydrocarbures, et ses modifications ultérieures. Celles-ci ont été considérablement renforcées par la Convention Internationale pour la prévention de la pollution par les navires MARPOL 73/78, appliquée en 1983 (Lagring *et al.*, 2012).

MARPOL est la principale convention internationale visant à lutter contre la pollution dans le secteur maritime. « *Elle couvre tous les aspects techniques de la pollution par les navires, sauf l'élimination des déchets dans la mer par le dumping et s'applique aux navires de tous types, même si elle ne s'applique pas à la pollution résultant de l'exploration et l'exploitation des ressources minérales des fonds marins. La Convention régleme le type et la quantité de substance polluante que les navires peuvent décharger dans la mer, en tenant compte de la sensibilité écologique des différentes zones maritimes* » (UNEP GPA, s.d.).

La mer du Nord étant particulièrement sensible à cause de sa faible profondeur, en 1987, les Etats côtiers de cette mer ont décidé d'intensifier la surveillance aérienne afin de faire respecter les réglementations internationales anti-pollution. Cette obligation de surveillance a été inscrite dans l'Accord de Bonn modifié de 1989 (Lagring *et al.*, 2012).

L'Accord de Bonn de 1983 est un « *Accord concernant la coopération en matière de lutte contre la pollution de la mer du Nord par les hydrocarbures et autres substances dangereuses* » (Accord de Bonn, 2010). Il s'agit d'un « *mécanisme selon lequel les Etats de la mer du Nord et la Communauté européenne (les Parties contractantes), travaillent conjointement afin :*

- *d'assurer une assistance réciproque de lutte contre la pollution, dans la zone de la mer du Nord, due à des catastrophes maritimes et à la pollution chronique découlant de la navigation et des installations offshore;*
- *d'exercer une surveillance à titre d'aide à la détection et à la lutte contre la pollution en mer* » (Accord de Bonn, 2010).

Les Parties contractantes sont l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, la France, l'Irlande, la Norvège, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Suède et la Commission Européenne. Cette coopération internationale fonctionne donc au niveau du nettoyage après des catastrophes maritimes, des délits de pollution et de la prévention (Accord de Bonn, 2010).

Les déversements restant malgré tout trop nombreux, les Etats côtiers ont pris de nouvelles mesures au sein de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) en 1999 où les eaux du Nord-Ouest européens, y compris la mer du Nord, ont reçu le statut de zone spéciale en vertu de MARPOL annexe I. Dans ces zones spéciales, écologiquement sensibles à la pollution pétrolière et avec une forte densité de trafic maritime, les déversements de pétrole opérationnels sont désormais interdits (Lagring *et al.*, 2012).

Par la suite, diverses mesures complémentaires de prévention de la pollution par les hydrocarbures ont été prises au niveau européen, régional et national, notamment la ratification de la Belgique à la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (1982) qui structure les droits et obligations des Etats envers le milieu marin (SPF DG Environnement, 2010). Cela a permis la coordination des États côtiers de la mer du Nord par la création de zones économiques exclusives (ZEE) (avec la ZEE de la Belgique en 1999) et la création de la convention OSPAR en 1992. Cette convention est un instrument légal qui permet de guider la coopération internationale pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-Est. Les travaux au nom de la Convention sont menés par la Commission OSPAR, composée des représentants des gouvernements des 15 Parties Contractantes et de la Commission Européenne (Lagring *et al.*, 2012). Tous les 10 ans, OSPAR publie un rapport sur l'état de la qualité marine (*Quality Status Report*) grâce à la mise en place d'un programme de monitoring et d'une méthodologie harmonisée permettant de comparer les données. Le dernier rapport date de 2010 (OSPAR, 2010).

C'est également dans ces années-là, en 1999, qu'a été votée la loi visant la protection du milieu marin dans les espaces marins sous juridiction de la Belgique (aussi appelée « Loi MMM ») dont une des dispositions majeures est qu'un permis est nécessaire pour toutes activités humaines exercées en mer y compris des procédures d'étude d'incidence (SPF DG Environnement, 2010).

Selon l'article 2 de l'Arrêté ministériel du 11 juin 1999 portant désignation de l'autorité compétente pour donner l'autorisation d'utiliser des produits chimiques dans les espaces marins pour lutter contre la pollution et l'abandon d'objets dans les espaces marins après utilisation, l'UGMM « *est désignée comme autorité compétente pour autoriser le déversement ou l'épandage de produits chimiques dans les espaces marins afin de combattre une pollution et l'abandon d'objets dans les espaces marins après leur usage dans la lutte.* »

Une seconde étape vers la réglementation de réduction de la pollution pétrolière date de 2000 lorsque la Communauté européenne a adopté la directive européenne sur les installations de réception portuaires pour les déchets d'exploitation et résidus de cargaison (2000/59/EC), obligeant les navires à livrer leurs déchets avant de quitter un port au sein de la Communauté européenne. Cette directive a eu un effet radical sur la pollution par les hydrocarbures si on en croit les chiffres de déchets d'hydrocarbures livrés dans les installations de réception d'Anvers et de Rotterdam. A Anvers, la quantité de déchets huileux recueillis est passée de 42 346 m³ en 2004 à 118 694 m³ en 2010. Et, à Rotterdam, le volume est passé de 131 650 m³ en 2004 à 227 569 m³ en 2010 (Lagring *et al.*, 2012).

Enfin, lorsqu'une catastrophe se produit en mer, le Plan *Rampenplan Noordzee* dirigé par le gouverneur de Flandre occidentale est mis en place. Ce plan existe depuis 1987 mais n'a été approuvé officiellement qu'après un décret ministériel en 2005. Il a pour objectif d'aider à déployer immédiatement les moyens disponibles pour lutter contre la pollution lors d'une catastrophe et à mettre en place une coordination entre les autorités concernées (RBN, 2009).

5.2. Les acteurs

Lors d'une catastrophe en mer du Nord, le Plan catastrophe en mer du Nord est lancé et différents acteurs interviennent (Figure 28) (SPF DG Environnement, 2006).

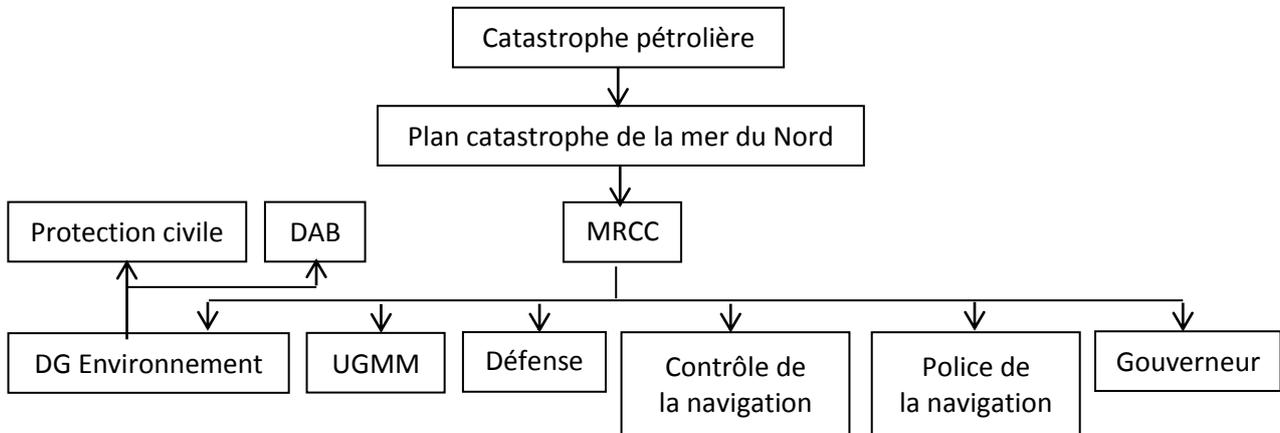


Figure 28 : Organigramme des acteurs du Plan catastrophe de la mer du Nord
Source : d'après SPF DG Environnement, 2006

Voici une brève description des principaux acteurs (SPF DG Environnement, 2006) :

Le Centre de sauvetage maritime et de coordination (MRCC) :

- sert de point de contact pour des rapports d'incidents de pollution
- alerte les départements concernés
- donne un avis à la batellerie

Il alerte le Gouverneur de Flandre Occidentale, la Police de la navigation, le Contrôle de la navigation, la Défense, l'UGMM et la DG Environnement.

Au niveau de la Province de Flandre Occidentale, le gouverneur est le "coordinateur général" pour le respect du Plan catastrophe de la mer du Nord (*Rampenplan Noordzee*).

La police de la navigation :

- sécurise la zone d'intervention
- exécute les enquêtes judiciaires sous la direction du magistrat
- effectue la collecte d'informations et de preuves (échantillonnage, toutes les données à expédier en tant que cargaison, propriétaire, etc)

La compagnie responsable du contrôle de la navigation effectue le contrôle de l'état du port (recherches techniques et administratives), fournit une expertise maritime et évalue l'état de navigabilité des navires

La Composante Marine de la Défense :

- est le « point focal international » en ce qui concerne la pollution marine (Accord de Bonn, Commission Européenne)
- comprend la MARSAC (Maritime Situation Awareness Center) qui peut diriger les opérations

- peut fournir une assistance logistique
- a la tâche de « On Scene Commander » (OSC) pour les opérations de lutte contre la pollution comme le définit le « Rampenplan Noordzee » (communications, rapports de situation, etc)

L'UGMM a en charge :

- l'évaluation scientifique (simulations, mesures, analyses, etc)
- la surveillance aérienne
- de donner des conseils pour l'utilisation des dispersants chimiques et pour lutter contre la pollution

La direction générale Environnement du Service Public Fédéral santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement s'occupe de :

- la coordination des opérations de contrôle de la pollution
- l'expertise et les équipements spécialisés pour la lutte contre les déversements d'hydrocarbure
- représenter le ministre fédéral de l'environnement marin dans la responsabilité politique de lutte contre la pollution

Cette dernière prévient la Protection civile et la flotte DAB.

La Protection Civile s'occupe du déploiement des dispersants chimiques sur terre et apporte un soutien logistique en mer.

La flotte DAB (Dienst met Afzonderlijk Bestuur) est la fonction publique flamande responsable du bétonnage et du balisage des eaux navigables. Elle exploite les navires qui peuvent être équipés pour le déploiement de l'équipement de contrôle de la pollution (contrat avec la DG Environnement).

D'autres acteurs interviennent également :

- Le port d'Ostende (AGHO) gère le stockage et de la maintenance du matériel antipollution, ainsi que la préparation et le placement de l'équipement à bord des navires de lutte.
- Les firmes privées fournissent une assistance logistique et technique aux autorités compétentes.
- L'assistance internationale (Accord de Bonn, Communauté européenne) offre des ressources et de l'expertise supplémentaires sur demande et sous le suivi des autorités compétentes.
- Les navires en eux-mêmes sont tenus d'assurer la prévention et l'atténuation de la pollution pétrolière. Ils peuvent également déployer des dispersants chimiques avec le consentement et sous la supervision des autorités compétentes.

Ces acteurs vont ensuite procéder aux diverses étapes brièvement décrites dans le point suivant.

5.3. Le déroulement d'une intervention dans ou menaçant la ZEE belge

En bref, une intervention de lutte de la pollution se déroule de la manière suivante :

La pollution aux hydrocarbures est signalée à la *Maritime Rescue and Coordination Centre* (MRCC) qui est responsable d'alerter les services compétents. Ce premier rapport contient des informations standards sur l'accident. Les autorités compétentes évaluent ensuite la situation et toutes les données sur l'accident et la pollution nécessaires pour les mesures d'interventions sont collectées. L'UGMM va mettre en place une évaluation scientifique préliminaire grâce à des observations et des simulations de la trajectoire et de l'impact possible de la pollution.

Les premières mesures vont être prises, soit toutes les mesures qui empêchent ou minimisent les dommages comme par exemple préparer les équipements indispensables en cas de nécessité.

Après avoir évalué la situation, la première action consiste à choisir la technique de lutte la plus appropriée. Conformément à la Loi MMM, le choix de la technique doit être conforté par une étude scientifique en faveur de la sauvegarde de l'environnement marin.

Le choix se fera entre la récupération mécanique, la dispersion chimique, la dispersion mécanique ou « ne rien faire ». Dans certains cas, en vertu de l'Accord de Bonn, une assistance peut être demandée à d'autres pays ou à des ressources privées.

La lutte comprendra les éléments suivants : la communication, la sécurité, le suivi et l'évaluation, l'échantillonnage, l'aspect judiciaire et les enquêtes administratives, le stockage et l'élimination des produits récupérés ainsi qu'un journal de bord de la lutte. Ensuite, il y a un certain nombre de choix opérationnels qui dépendent du choix de la technique de lutte avec des configurations et des acteurs différents.

Après la lutte, les navires et le matériel utilisé sont nettoyés et enfin, un compte-rendu est réalisé afin de tirer des leçons de l'opération et d'améliorer la démarche.

Cette démarche logique (Figure 29) est une séquence théorique des différentes phases d'intervention qui ont en réalité lieu simultanément.

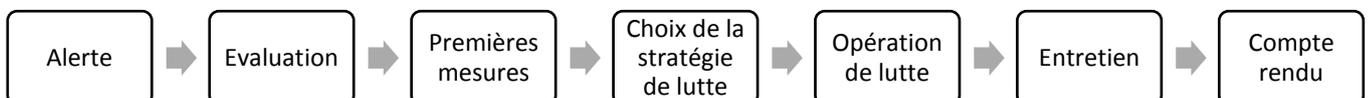


Figure 29 : Déroulement logique d'une intervention en cas de pollution en mer
Source : d'après DG Environnement, 2006

Conclusion

Le pétrole est un des principaux polluants des océans et les déversements sont importants en mer du Nord. Dans la ZEE belge, relativement peu de pollutions majeures ont eu lieu depuis une trentaine d'année mais, en moyenne 25 rejets par an sont encore dénombrés actuellement.

Tous les pétroles sont différents et leur vieillissement dépendra de l'état de la mer. Il est donc difficile d'évaluer les impacts d'une telle pollution, qu'ils soient socio-économiques ou environnementaux.

Il existe diverses techniques de lutte dont les barrages flottants et les dispersants chimiques, qui doivent être utilisés en tenant compte des particularités locales et de la sensibilité des espèces présentes. Différents acteurs interviennent dans la lutte afin d'appliquer une gestion opérationnelle et efficace, tout en respectant la législation en place.

Ce chapitre a donc permis de mieux comprendre ce qu'est une marée noire et de quelle manière la Belgique gère ce type d'accident.

Chapitre 3

Toxicité des marées noires et leurs effets sur l'environnement



Introduction

Après avoir défini les caractéristiques de la ZEE belge et la gestion lors d'accident pétrolier dans la zone, nous devons définir la toxicité du pétrole ainsi que le volume limite de dispersants chimiques qui peut être utilisé pour lutter efficacement contre une pollution aux hydrocarbures tout en limitant les dommages pour l'écosystème.

Dans ce chapitre, les paramètres de toxicité vont être définis, ainsi que les effets néfastes sur les différents types d'organismes. Ensuite, une méthode de classification des toxicités utilisées dans la réglementation des substances en vertu de la convention MARPOL 73/78 va être déterminée afin de pouvoir utiliser des seuils de toxicité standardisés.

Enfin, une revue de la littérature va permettre de rassembler des données de tests de toxicité afin de pouvoir les utiliser avec les simulations effectuées par modèle OSERIT.

1. Paramètres de toxicité

La toxicité est une « *particularité propre à diverses substances dont l'absorption a pour effet de perturber le métabolisme des êtres vivants, provoquant des troubles physiologiques pouvant aller jusqu'à la mort des individus exposés* » (Ramade, 2000).

Différents types d'effets peuvent se manifester sur les organismes.

D'une part, les effets directs du polluant sur les organismes marins vivants, c'est-à-dire :

- la toxicité létale qui peut être immédiate ou différée
- les effets sublétaux, soit sous le seuil entraînant la mort
- les interférences physiques à travers la locomotion, l'alimentation ou d'autres comportements
- le recouvrement direct ou l'étouffement qui peut provoquer un stress thermique sous certaines conditions
- le changement de couleur ou l'accumulation d'hydrocarbures (Jacques, 2010)

D'autre part, les effets indirects qui se manifestent par le biais d'altérations dans la fonction et la structure des écosystèmes marins :

- l'élimination sélective de certaines espèces ou groupes fonctionnels d'organismes qui servent de nourriture à d'autres espèces
- l'élimination sélective de certaines espèces ou groupes fonctionnels d'organismes qui sont les prédateurs d'autres espèces
- la perturbation de l'alimentation des détritivores (Jacques, 2010)

Il existe plusieurs types de toxicité selon les quantités absorbées et la durée d'exposition à une substance. La toxicité aigüe est la plus dangereuse. Elle est définie comme « *celle qui provoque la mort ou de très graves troubles physiologiques après un court délai suivant l'absorption par voie tégumentaire, respiratoire ou trophique – en une seule exposition ou à plusieurs reprises – d'une dose*

importante d'une substance nocive » (Ramade, 2007). En ce qui concerne la toxicité subaigüe, un grand pourcentage de la population, voir toute la population peut survivre à la contamination mais les individus auront présenté des symptômes de l'exposition au polluant. « *Elle correspond pour une substance donnée à une contamination par des concentrations suffisantes pour provoquer éventuellement la mort de certains des individus exposés* » (Ramade, 2007). Et enfin, la toxicité chronique qui résulte de « *l'exposition permanente à de faibles concentrations d'un toxique. Certains toxicologues réservent le terme de toxicité chronique aux séquelles prolongées (voire irréversibles) d'une intoxication dont les effets se manifestent longtemps après qu'ait disparu l'exposition au toxique qui en est la cause* » (Ramade, 2000).

Nous pouvons évaluer ces toxicités à l'aide de plusieurs paramètres « *qui caractérisent les effets physio-toxicologiques et éco-physiologiques les plus fréquents et présentent les conséquences les plus importantes pour les populations exposées* » (Ramade, 2007).

La mortalité donne une mesure significative du degré de toxicité d'un polluant. Il s'agit d'un paramètre démo-écologique⁸ car le taux de mortalité n'est pas un caractère individuel mais s'évalue sur l'ensemble de la population (Ramade, 2007).

La dose représente la quantité de substance absorbée et la concentration représente la quantité de substance dissoute par unité de volume. Toutes deux sont en relation avec la mortalité. Elles « *causent une proportion de mort prédéterminée dans un échantillon de population d'une espèce donnée après un temps d'exposition déterminé* » (Ramade, 2007). Les paramètres les plus fréquemment utilisés pour mesurer cette relation sont :

- la LD₅₀, soit la « *dose létale 50%. Dose d'un toxique qui cause 50 % de mortalité dans une population exposée au bout d'un temps donné. C'est donc en règle générale une mesure de la toxicité aiguë qui s'évalue après un temps d'exposition de 24 h à 96 h selon l'espèce considérée* » (Ramade, 2000).
- la LC₅₀, soit la « *concentration létale 50 %, c'est à dire la concentration d'un polluant toxique de l'air ou des eaux provoquant 50 % de mortalité dans une population exposée à ce dernier* » (Ramade, 2000).

Ces deux paramètres sont en général évalués sous 24 ou 48 heures lorsqu'il s'agit de tests de toxicité aiguë voire jusqu'à 96 heures pour les tests d'écotoxicologie aquatique (Ramade, 2007).

Les mesures de dose létale ne peuvent se faire qu'en laboratoire car il est impossible d'administrer des doses inhalées ou ingérées sur le site même. Dans les eaux, les espèces seront exposées à des substances solubles ou en suspension (Ramade, 2007).

⁸ Ecologie des populations

D'autres paramètres sont utilisés pour mesurer les effets non létaux, soit la concentration d'inhibition ou efficace (Ramade, 2007) :

- IC_{50} : « symbole de concentration d'inhibition 50%. Il s'agit de la concentration d'un toxique qui, après un temps donné d'action, par exemple 24 heures, provoque une inhibition d'activité (motrice ou autre) chez 50% des individus faisant l'objet du bioessai » (Ramade, 2000). L' IC_{50} est très utilisé dans les tests d'organismes aquatiques peu actifs comme par exemple certains microcrustacés du zooplancton comme les cladocères, car elle permet de mesurer l'inhibition de la motricité là où il serait impossible de différencier un individu immobile d'un individu mort (Ramade, 2007).
- EC_{50} : « symbole de concentration efficace 50%. Concentration d'un polluant qui produit un effet toxique donné chez 50% des individus exposés après un temps d'exposition normalisé, par exemple 24h » (Ramade, 2000). Ce paramètre concerne « en particulier les effets sur la fécondité (stérilisation partielle de la population), sur le succès de reproduction, sur la croissance, sur la productivité primaire, voire chez les animaux les effets de perturbations éco-éthologiques qui se traduisent par des anomalies dans le comportement reproducteur ou de fuite, face à un prédateur par exemple » (Ramade, 2007).

D'autres paramètres peuvent également être utilisés, notamment :

- LL_{50} : la charge mortelle (Lethal Load), soit la dose « qui est létale pour 50% de la population exposée. Il s'agit de la mesure la toxicité normalement utilisée pour exprimer les résultats à court terme des tests de toxicité de substances faiblement solubles dans l'eau et de mélanges complexes effectués sur les poissons » (Peter Fisk Associates, s.d.)
- EL_{50} : la charge qui provoque des effets (Effect Load) « néfastes à 50% de la population exposée. Il s'agit de la mesure de toxicité normalement utilisée pour exprimer les résultats à court terme des tests de toxicité de substances faiblement solubles dans l'eau et de mélanges complexes effectués sur les daphnies et les algues » (Peter Fisk Associates, s.d.)
- NOEC : « abréviation de l'anglais No Observed Effect Concentration. Concentration maximale sans effet atteinte par un polluant dans l'environnement » (Ramade, 2000).
- LOEC : « abréviation de Lowest Observed Effect Concentration. Concentration minimale d'un polluant provoquant un effet cliniquement décelable chez les organismes exposés » (Ramade, 2000).

Chaque paramètre a son avantage et sa spécificité. Les chercheurs choisissent le paramètre adéquat pour leur étude en fonction de la spécificité de la substance et des caractéristiques de l'espèce testée.

Une particularité des réseaux trophiques aquatiques est que, de manière générale, le facteur de bioaccumulation est plus important dans les chaînes trophiques aquatiques que dans les chaînes trophiques terrestres. Ce phénomène peut-être expliqué par deux de leurs caractéristiques propres :

- elles ont un nombre moyen de niveaux trophiques supérieur aux chaînes terrestres,
- le phytoplancton et le zooplancton à la base de ces réseaux trophiques présentent une forte aptitude à la bioconcentration des polluants des eaux ce qui signifie que les organismes se situant plus haut dans le réseau consomment des proies qui, en règle générale, sont déjà fortement contaminées (Ramade, 2007).

Un schéma général de la contamination des chaînes trophiques océanique se dégage (Figure 30):



Figure 30 : Schéma général de la contamination des chaînes trophiques océaniques
Source : Ramade, 2007

Théoriquement, la prise de deux ou plusieurs substances de manière simultanée peut engendrer l'antagonisme ou la potentiation de la toxicité ce qui peut modifier l'expression de leur toxicité.

L'antagonisme représente une atténuation voire même une quasi-disparition de la toxicité de plusieurs substances lorsqu'elles sont prises simultanément.

La potentiation est l'opposé de l'antagonisme, c'est-à-dire que la toxicité des substances est augmentée lorsqu'elles sont administrées conjointement.

2. Sensibilités des différents organismes marins aux hydrocarbures

L'ensemble des populations vivant dans les écosystèmes marins soumis à une pollution au pétrole peuvent subir des dommages catastrophiques (Ramade, 2000). Les conséquences écotoxicologiques varient selon le type d'organisme atteint.

Le phytoplancton

Les végétaux autotrophes marins peuvent être impactés car le pétrole peut inhiber l'activité photosynthétique du phytoplancton. Des expériences menées sur des phytoflagellés (*Phaecodactylum*, *Dunaliella*) et des diatomées marines (*Amphora*, *Navicula*) ont montré que la fixation photosynthétique du carbone était significativement diminuée (Ramade, 2000).

Les crustacés et les mollusques

Les crustacés et les mollusques filtrent l'eau et peuvent ainsi absorber des grandes quantités d'hydrocarbures. Par exemple, une huitre pesant 20 grammes filtre 48 litres d'eau de mer par jour et ainsi multiplie par 70 000 la concentration d'un polluant dans ses tissus par rapport à la concentration dans l'eau (Cedre, s.d. (3)). Cependant, lorsque la source de pollution est évacuée, l'organisme de certaines espèces filtre la pollution jusqu'à éliminer toute contamination (Environnement Canada, 2006).

Les poissons

Les poissons sauvages sont en général peu impactés. Les bancs de poissons vont éviter les effets aigus en fuyant la pollution (Ramade, 2000). Toutefois, leurs branchies peuvent absorber les hydrocarbures dissous ou dispersés qui vont ensuite s'accumuler dans le foie, l'estomac et la vésicule biliaire. Bien que les poissons peuvent décomposer de petites quantités d'hydrocarbures, ils peuvent tout de même subir des effets sublétaux comme une perte de vigueur, un faible taux de reproduction et des effets sur l'alimentation et la respiration (Environnement Canada, 2006). Les poissons d'aquaculture ne pouvant fuir la pollution seront quant à eux plus sujets aux effets létaux du pétrole.

Lorsque le déversement d'hydrocarbure se produit dans une zone de frayères ou de nurseries, les oeufs et les larves planctoniques ou démersales⁹ seront affectés. L'impact sur les poissons va donc dépendre du stade de vie (Ramade 2000).

De plus, certains poissons pélagiques¹⁰ peuvent avaler des nodules bitumineux, ce qui les rendra impropre à la consommation (Ramade, 2000).

L'avifaune

Les plumes des oiseaux sont enduites de graisse afin de les rendre imperméables à l'eau. Un oiseau est « mazouté » lorsque le pétrole dissout ces graisses et que le corps de l'oiseau est en contact avec l'eau (Ramade, 2000). Cette perte d'étanchéité peut provoquer un risque de noyade (Ventura *et al.* 2005) et comme l'eau a une température inférieure à celle du corps, l'oiseau peut entrer en hypothermie. De plus, ces oiseaux ingèrent des proies contaminées et de l'eau polluée et ils tentent de nettoyer leurs plumes tout en avalant le pétrole. (Ramade, 2000). L'engluement peut également obstruer les voies respiratoires (Ventura *et al.* 2005).

Il a également été démontré que les œufs mis en contact avec les plumes polluées de leurs géniteurs sont contaminés et que le pétrole est embryotoxique. Par exemple, 20 µg de fuel lourd suffisent à tuer un embryon d'Eider (*Somateria*, *Camptorhynchus*, *Polysticta*) (Ramade, 2000).

Les alcidés¹¹ sont la famille d'oiseaux de pleine mer la plus sensible car ils sont des « plongeurs de surface », c'est-à-dire qu'ils plongent pour se nourrir et pour fuir leurs prédateurs. En période de mue ces oiseaux sont encore plus fragilisés. Parmi ceux-ci, nous trouvons notamment les canards marins, les plongeurs, les pingouins, les guillemots et les macareux (Ventura *et al.* 2005).

Les oiseaux de rivage quant à eux, sont moins dépendants de l'eau et donc moins vulnérables (Ventura *et al.* 2005).

⁹ Vivant près du fond marin.

¹⁰ Vivant en pleine mer.

¹¹ Oiseaux à ailes développées et pattes très en arrière du corps

Toutefois, il n'est pas aisé de visualiser la différence entre les symptômes dus à l'engluement, la contamination aux hydrocarbures ou la captivité (qui augmente le stress de ces animaux lorsqu'ils sont capturés par l'homme afin de recevoir des soins). Il est également difficile d'estimer le rapport entre la mortalité réelle et la mortalité constatée car tous les cadavres ne sont pas retrouvés. En effet, ils peuvent être éloignés par le vent, s'être dissociés (putréfaction) ou être consommés par des prédateurs (Ventura *et al.* 2005).

Les mammifères

Ils sont également très sensibles à cette pollution. Par exemple, lors de la catastrophe de l'Exxon Valdez, des centaines de loutres de mer ont été intoxiquées et de nombreux individus n'y ont pas survécus (Ramade, 2000).

Les mammifères peuvent être atteints suite à l'engluement, l'ingestion et l'inhalation d'hydrocarbures (Ventura *et al.* 2005).

En ce qui concerne l'engluement, les mammifères à fourrure comme les loutres seront plus ou moins impactés selon la superficie du corps mazoutée. « *La conductance thermique à travers un pelage mouillé et mazouté est de cinq à six fois plus rapide qu'un pelage sec. La perte de chaleur est donc beaucoup plus importante lorsque les animaux touchés sont dans l'eau* » (Ventura *et al.* 2005). Ils peuvent alors mourir d'hypothermie bien avant que des effets toxicologiques dus aux hydrocarbures se manifestent. Aussi, le stress thermique provoque une augmentation du métabolisme et un déclin dans la prise de nourriture. Une hypoglycémie, une déshydratation et une perte de poids s'en suivent. De plus, ils cherchent à nettoyer leur fourrure et ingèrent ainsi les hydrocarbures (Ventura *et al.* 2005).

Des changements physiologiques, biochimiques et comportementaux peuvent également apparaître ainsi qu'une altération de la capacité de nage avec un risque de noyade (Ventura *et al.* 2005).

Les pinnipèdes quant-à-eux, comme le phoque, ont une couche graisseuse qui assure une partie de leur thermorégulation et sont donc moins sensibles à l'engluement. Celui-ci provoque tout de même une irritation des muqueuses et donc des dommages qui seront fonction du temps d'exposition et de la volatilité du pétrole. Ceci aura pour effet de masquer l'odeur des petits, avec pour conséquence que les parents ne pourront plus les reconnaître et ne les nourriront plus (Ventura *et al.* 2005).

L'impact sur les cétacés comme les baleines est moins important car ils sont protégés par une épaisse couche de graisse sous-cutanée. L'engluement aura sans doute comme unique effet de diminuer les capacités de filtrage de la nourriture de ces animaux (Ventura *et al.* 2005).

L'ingestion d'hydrocarbures peut alors contaminer les tissus mais « *il n'a pas été montré que cela entraîne des changements physiologiques ni, a fortiori, la mort. En revanche, en cas d'ingestion répétée, l'organisme accumule les fractions toxiques du pétrole, c'est-à-dire celles contenant des hydrocarbures aromatiques ou des fractions chimiques susceptibles d'être cancérogènes ou mutagènes* » (Ventura *et al.* 2005).

De plus, l'ingestion inhibe le métabolisme énergétique et affaiblit ainsi l'organisme en provoquant divers dégâts tels que des ulcérations gastro-intestinales ou des obstructions des poumons (Ventura *et al.* 2005).

Les derniers effets observés sont dus à l'inhalation du pétrole par ces mammifères, ce qui « *peut avoir diverses conséquences : irritation du système respiratoire, inflammation des muqueuses, dommages neurologiques et désordres hépatiques liés à l'accumulation des fractions volatiles dans le cerveau et dans le foie* » (Ventura *et al.* 2005). Les prédateurs supérieurs peuvent métaboliser les hydrocarbures aromatiques, ce qui les transforme en métabolites encore plus toxiques (Ventura *et al.* 2005).

Il existe aussi des effets à long terme mais, comme pour l'avifaune, il est difficile de différencier les causes des symptômes observés et il est donc difficile de trouver l'origine d'un décès mais il est « *estimé que les polluants peuvent causer des désordres métaboliques, immunologiques, reproductifs et endocriniens* » (Ventura *et al.* 2005). Cependant, contrairement aux oiseaux, peu de cadavres de mammifères sont retrouvés après une marée noire, il n'est donc pas évident de définir si la cause de la mort est liée au pétrole (Ventura *et al.* 2005).

Commentaires

En résumé, le phytoplancton est sensible à la pollution mais, en tant que microorganisme unicellulaire, il est présent en très grand nombre et se renouvelle rapidement.

Les crustacés et les mollusques peuvent absorber une quantité importante de polluants et donc être fortement atteints. Mais, lorsque la pollution a disparu, un grand nombre d'entre eux peuvent éliminer le produit.

Les poissons se déplacent aisément et sont donc plutôt affectés par des effets sublétaux mais les œufs et les larves sont quant à eux beaucoup plus touchés car beaucoup plus sensible de par leur surface de contact plus importante que les adultes et le fait que les petits organismes accumulent plus que les grands (Steenhout, 2011-2012).

Les oiseaux et les mammifères sont des organismes qui bénéficient d'une médiatisation très importante lors d'une marée noire. Plusieurs Instituts s'occupent de les traiter après la catastrophe afin de limiter les effets chroniques du pétrole sur ces espèces.

Les spécimens faisant l'objet d'analyse de toxicité aigüe sont principalement les crustacés, mollusques et poissons.

3. Classification GESAMP

Source : IMO *et al.*, 2002

Le « Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection – GESAMP », existant depuis 1969, est un organe consultatif composé d'experts spécialisés nommés par plusieurs organismes (OMI, FAO, UNESCO-COI, OMM, OMS, AIEA, ONU, PNUE). Sa tâche principale est de fournir des avis scientifiques concernant la prévention, la réduction et le contrôle de la dégradation de l'environnement marin aux différents organismes.

Ce groupe propose des critères d'évaluation des risques des substances chimiques qui peuvent polluer le milieu marin. Ces risques, aussi bien pour les humains que pour l'environnement marin, sont examinés et les informations sont rassemblées sous la forme d'un « profil de risque » pour être ensuite régulièrement publiés. Une liste est mise à disposition par l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

La méthode traite plusieurs aspects : l'environnement aquatique, la santé humaine et les interférences avec les autres usages de la mer. Ici uniquement la partie sur l'environnement aquatique sera développée. Celle-ci est divisée en deux parties : la bioaccumulation/biodégradation et la toxicité aquatique. La toxicité aquatique est le sujet de cette étude.

Cette partie de l'évaluation est subdivisée en toxicité aiguë et en toxicité chronique. Ici, la toxicité aquatique est exprimée en LC/LL₅₀, EC/EL₅₀ ou IC/IL₅₀ pour la toxicité aiguë et en NOEC pour la toxicité chronique.

Afin de quantifier le taux de danger posé par les substances chimiques pour les organismes aquatiques, la solution la plus aisée et disponible est l'utilisation de données de test de toxicité aiguë. Les données de toxicité chronique sont utilisées dans des cas plus spécifiques (voir ci-dessous). Les données relatives aux organismes des niveaux supérieurs d'une chaîne alimentaire aquatique (par exemple les crustacés et les poissons), mais également les micro-algues représentant les producteurs primaires à la base de la chaîne alimentaire sont couramment utilisées.

Une cote est donnée à chaque classe de toxicité. La plus basse donnée, soit la plus forte toxicité sera utilisée pour attribuer la cote de la toxicité.

Toutefois, les tests standardisés ne représentent pas forcément ce qu'il va se produire lorsque les substances de faible solubilité, de faible densité et de forte volatilité sont déversées ou rejetées à la mer mais, il est nécessaire que toutes les substances soient analysées selon les mêmes principes, dans des conditions standardisées et contrôlées, d'où l'intérêt de cette méthode.

La majorité de ces classes de toxicité sont utilisées à l'heure actuelle dans la réglementation des substances en vertu de la convention MARPOL 73/78.

Plus précisément, voici comment sont réalisées les classes pour la toxicité aiguë et pour la toxicité chronique :

Toxicité aiguë :

En ce qui concerne les tests de toxicité, la LC₅₀ est généralement déterminée pour les poissons et les crustacés, et la EC₅₀ (immobilité) pour la *Daphnia magna*, le crustacé d'eau douce le plus couramment utilisé. Tandis que la IC₅₀ ou EC₅₀ (reproduction et/ou la croissance) s'applique généralement aux microalgues.

Les classes de toxicité aquatique aiguë couvrent la gamme de >1000 ppm¹² jusqu'à <0,01 ppm comme indiqué dans le Tableau 2. Une note est attribuée à chacune de ces classes. Celles-ci sont définies selon une échelle logarithmique de manière à refléter le risque associé, soit à un volume très élevé de substances dont la toxicité est relativement faible, soit à des classes de toxicité de 10-100, 1-10 et <1 ppm ou encore à des substances qui, par leur très grande voire extrême toxicité, peuvent être dangereuses en petites quantités.

Les trois tests suivant sont généralement utilisés :

- LC/LL₅₀ de 96 h sur les poissons
- LC/LL₅₀ / EC/EL₅₀ de 48-96 h sur les crustacés
- Inhibition de croissance EC/EL₅₀ / IC/IL₅₀ de 72-96 h sur les micro-algues

Toxicité chronique :

La toxicité chronique est une composante essentielle de l'évaluation des dangers dans le milieu marin. Elle prend en compte l'influence des rejets opérationnels des navires dans les voies de navigation très fréquentées, en particulier près des zones marines protégées, ainsi que les déversements accidentels des navires où le temps de séjour est parfois plus long que prévu et où les importants volumes de polluant peuvent être bioaccumulés ou se dégrader lentement.

Les classes de concentrations pour la toxicité aquatique chronique (Tableau 2) s'échelonnent de >1 ppm à <0,001 ppm. Elles sont définies selon une échelle logarithmique basée principalement sur les NOEC soit les concentrations sans effet observé.

Les données de toxicité chronique peuvent être utilisées dans les cas suivants :

- pour les substances peu solubles quand la toxicité aiguë est difficile à estimer avec précision et où il y a une suspicion d'effets, ou lorsque l'on prétend que la substance est non toxique dans les limites de solubilité
- où des effets chroniques précis sont suspectés, par exemple sur la croissance, le développement ou la reproduction
- où un mécanisme spécifique de la toxicité est prévu, cela peut être le cas pour les pesticides
- pour les substances qui sont connues pour se dégrader lentement et/ou se bioaccumuler

¹² partie par million = mg/L

Le tableau ci-dessous synthétise la classe et les toxicités qui y sont associées dans le cas d'une pollution aquatique.

Tableau 2 : Système de notation révisé GESAMP pour la toxicité aquatique aiguë et la toxicité aquatique chronique
Source : GESAMP, 2002

Toxicité aquatique				
Classement	Description	Toxicité aiguë LC/LL/EC/EL/IC/IL ₅₀ (ppm)	Description	Toxicité chronique NOEC (ppm)
0	Non toxique	>1000	Négligeable	>1
1	Pratiquement non toxique	>100 - ≤1000	Faible	>0,1 - ≤1
2	Légèrement toxique	>10 - ≤100	Modéré	>0,01 - ≤0,1
3	Modérément toxique	>1 - ≤10	Elevé	>0,001 - ≤0,01
4	Hautement toxique	>0,1 - ≤1	Très élevé	<0,001
5	Très hautement toxique	>0,01 - ≤0,1		
6	Extrêmement toxique	<0,01		

Dans cette étude, ce classement va permettre de classer les données de toxicité existantes et de mieux visualiser les produits les plus toxiques sur telle ou telle espèce.

4. Revue de la littérature

Il s'agit maintenant d'appliquer le classement GESAMP à des données de toxicité marine. Une importante recherche bibliographique a permis de recueillir 196 données (voir tableau en Annexe). Parmi celles-ci, il a fallu isoler les espèces présentes dans la ZEE belge. Seules 21 données correspondent à ce critère et ont fait l'objet de 4 articles scientifiques.

L'étude de Beaupoil et Nedelec (1994) porte sur la crevette blanche (*Palaemonetes varians*) soumise au dispersant Corexit 9500.

Les tests ont été réalisés selon une procédure modifiée de CEDRE pour l'agrément des produits dispersants.

Les résultats (Tableau 3) sont rangés selon le classement GESAMP afin de visualiser les espèces les plus sensibles et les produits les plus dangereux. Pour rappel, plus la classe est grande, plus la toxicité est élevée.

Tableau 3 : Résultat de l'étude de Beaupoil et Nedelec (2004) rangé selon le classement GESAMP

	Classe GESAMP	Produit testé	Nom commun	Nom latin	Durée d'exposition (h)	Paramètre	ppm
Crustacé	0	Corexit® 9500	Crevette blanche	<i>Palaemonetes variens</i>	6	LC50	8103

Les auteurs ont conclu de cette étude que le Corexit 9500 satisfait pleinement aux normes d'agrément du Cedre pour cette espèce et, selon le classement GESAMP (Tableau 2), le Corexit 9500 est non toxique pour la crevette blanche.

Dans l'étude de Clark *et al.* (2001), les auteurs ont voulu développer les tests standardisés sous le Forum de recherche environnementale sur les réponses chimiques aux marées noires (CROSERF) afin de pouvoir appliquer les résultats à des scénarios réels.

Pour cela, ils ont utilisé plusieurs espèces au stade embryo-larvaire :

- L'huître creuse (*Crassostrea gigas*)
- Deux crevettes marines : la crevette des forêts de varech (*Holmesimysis costata*) et la crevette de mysid (*Mysidopsis bahia*)
- Deux poissons marins : le turbot (*Scophthalmus maximus*) et la capucette (*Menidia beryllina*)

Seuls l'huître creuse et le turbot se situent dans la région de la mer du Nord belge, nous nous focaliserons donc sur ces deux espèces.

Les auteurs ont dispersé chimiquement trois hydrocarbures avec les dispersants COREXIT®9527 et COREXIT®9500 :

- Kuwait Crude
- Forties Crude
- Medium Fuel Oil (MFO) mix

Ils ont utilisé un rapport hydrocarbure/dispersant de 10:1 afin de générer des concentrations maximales d'exposition. Les tests sont en exposition continue et suivent les protocoles de tests standardisés sous 48 heures. Les résultats sont donnés sous forme de toxicité aiguë LC₅₀ ou LL₅₀.

Dans le tableau ci-dessous se trouvent les résultats pour les deux espèces présentes en mer du Nord et testées dans cette étude (Tableau 4).

Tableau 4 : Résultats de l'étude de Clark et al. (2001) rangés selon le classement GESAMP

	Classe GESAMP	Produit testé	Nom commun	Nom latin	Durée d'exposition (h)	Paramètre	ppm
Mollusque	0	Medium Fuel Oil	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	>1108
	2	Forties + C9500	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	34.4
	2	Kuwait + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	29.7
	2	MFO + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	23
	3	Corexit® 9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	3.09
	3	Medium Fuel Oil	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	>1.14
	4	Forties + C9500	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	0.81
	4	MFO + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	0.53
	4	Kuwait + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	0.5

Poisson	1	Forties	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LL ₅₀	156
	1	Kuwait + C9527	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LL ₅₀	138
	2	Corexit® 9500	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	74.7
	2	Forties + C9500	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LL ₅₀	36.2
	3	Kuwait + C9527	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	2
	4	Forties + C9500	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	0.44
	4	Forties	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	0.35

Dans le classement GESAMP (Tableau 2), les toxicités pour l'huître vont de « non toxique » à « hautement toxique » et pour le turbot de « pratiquement non toxique » à « hautement toxique » selon le(s) produit(s) testé(s).

Lassus *et al.* (1982) ont étudié la toxicité des hydrocarbures solubles du 'Gino'¹³. Ils ont réalisé des tests de toxicité aigues sur trois espèces présentes en mer du Nord belge :

- La civelle (post-larve d'*Anguilla*)
- La crevette grise (*Crangon crangon*)
- La moule (*Mytilus edulis*)

Ils ont analysé la toxicité du pétrole « carbon black oil » transporté par le « Gino » lors de son naufrage survenu en 1979 pour une LD₅₀ sur 96h. Les résultats de cette étude se trouvent dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Résultats de l'étude de Lassus *et al.* (1982) rangés selon le classement GESAMP

	Classe GESAMP	Produit testé	Nom commun	Nom latin	Durée d'exposition (h)	Paramètre	ppm
Crustacé	1	Carbon black oil	Crevette grise	<i>Crangon crangon</i>	96	LD ₅₀	750-1500
Mollusque	0	Carbon black oil	Moule commune	<i>Mytilus edulis</i>	96	LD ₅₀	>12000
Poisson	0	Carbon black oil	Civelle (post-larve)	<i>Anguilla anguilla</i>	96	LD ₅₀	>12000

Les auteurs déduisent de cette étude que la toxicité est faible malgré une accumulation importante d'hydrocarbures par les coquillages, ce que confirme le classement GESAMP (Tableau 2).

Whright et Coehlo (1996) ont réalisé une étude sur les effets des hydrocarbures dispersés et des dispersants sur diverses espèces dont l'*Eurytemora affinis*, un copépode présent dans la ZEE belge. Cette espèce a été testée pour une LC₅₀ sur une durée d'exposition de 96h pour le Corexit 9500.

¹³ Le navire 'Gino' a provoqué une marée noire en 1979 au large de l'île d'Ouessant (France)

Les résultats de cette étude se trouvent dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Résultats de l'étude de Whright et Coehlo (1996) rangés selon le classement GESAMP

	Classe GESAMP	Produit testé	Nom commun	Nom latin	Durée d'exposition (h)	Paramètre	ppm
Zooplankton	3	Corexit® 9500	Copépode (adulte)	<i>Eurytemora affinis</i>	96	LC ₅₀	5.2

Selon la méthode GESAMP (Tableau 2), le Corexit 9500 est modérément toxique pour le copépode *Eurytemora affinis*.

Conclusion

Différents paramètres permettent de mesurer la toxicité d'un produit sur une espèce. Dans le cas d'une pollution marine aux hydrocarbures, la toxicité aigüe est définie pour les crustacés, les mollusques et les poissons.

A partir d'une revue de la littérature, il a été possible de rassembler des données pour diverses espèces. Cependant, il existe très peu de données toxicologiques pour les organismes présents dans la ZEE belge. Mais, il est tout de même possible d'en tirer quelques conclusions.

Le Corexit 9500 n'est pas du tout toxique pour la crevette blanche alors que, suivant le classement GESAMP, il est légèrement toxique pour le turbot. On observe cependant un léger antagonisme entre le Corexit 9500 et le pétrole Forties sur cette espèce bien que le mélange est tout de même hautement toxique.

Pour l'huitre creuse, la LL₅₀ montre que le Medium Fuel Oil n'est pas toxique pour cette espèce, avec une classe GESAMP de 0. Lorsque le Corexit 9527 est ajouté à ce pétrole, une potentiation est observée et la toxicité est augmentée jusqu'à une classe 2 soit une légère toxicité. La LC₅₀ pour le Medium Fuel Oil, ainsi que pour le Corexit 9527 est d'un niveau 3, c'est-à-dire modérément toxique. Elle augmente à un niveau 4 lorsqu'ils agissent conjointement, en étant ainsi hautement toxique pour l'huitre creuse.

En ce qui concerne le turbot, la LL₅₀ du pétrole Forties seul est de 1 dans le classement GESAMP alors que le mélange Forties/Corexit 9500 est de 2. La LC₅₀ du Corexit 9500 pour le turbot se situe dans la classe 2 et le Forties dans la classe 4. Lors du mélange des deux produits, une légère potentiation s'observe.

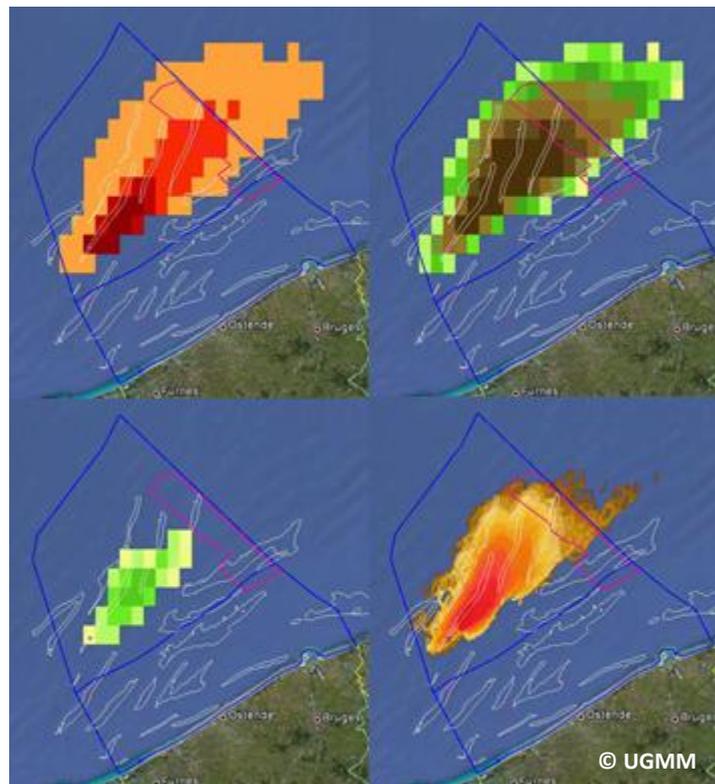
Enfin, le Carbon Black Oil n'est pratiquement pas toxique voire pas du tout toxique pour la crevette grise, la moule commune et la civelle avec une LD₅₀ située dans les classes GESAMP 0 et 1.

Il n'est pas facile de conclure sur ces résultats car ils ne sont pas toujours complets mais, globalement, d'un point de vue toxicité, le Corexit 9500 semble être plus efficace lorsqu'il est en présence d'un pétrole que le Corexit 9527.

Les pétroles sont tous différents, mais c'est également le cas des dispersants et des espèces atteintes. Il serait donc nécessaire de réaliser des tests de toxicité pour les pétroles passant dans et à proximité de la ZEE belge, pour les dispersants les plus récents et pour les espèces présentes afin de pouvoir effectuer une réelle analyse des toxicités.

Chapitre 4

Description et application du modèle OSERIT



Introduction

En cas de marée noire, la cellule de crise doit pouvoir connaître aussi vite que possible le type d'hydrocarbure déversé, la trajectoire de la nappe d'hydrocarbure et son évolution physico-chimique au cours du temps afin de pouvoir déterminer la meilleure stratégie de lutte et d'en organiser les modalités pratiques. Par exemple, une connaissance, même approximative, de la trajectoire de la nappe permet d'évaluer le risque d'échouage de la marée sur les plages, l'évolution des concentrations en hydrocarbures qui sont dispersés chimiquement dans la colonne d'eau ou encore le temps d'exposition des organismes sensibles aux hydrocarbures et/ou aux dispersants. Ces données sont essentielles pour estimer les impacts sur l'environnement de la marée noire, déterminer la pertinence de l'utilisation de dispersant chimique, choisir l'emplacement des barrages, diriger les bateaux d'intervention vers la pollution et définir des zones d'exclusion à la navigation pour les autres bateaux.

Prédire la dérive et l'évolution physico-chimique d'une marée noire en condition opérationnelle reste aujourd'hui encore un véritable défi. Le nombre de processus mis en jeu et l'influence des conditions météorologiques et hydrodynamiques (courants et vagues principalement) obligent à recourir à l'utilisation de modèles numériques spécifiques.

Ce chapitre illustre l'importance des critères de toxicité définis au chapitre précédent lors de l'analyse et de l'interprétation des résultats produits par ces modèles. L'objectif étant de définir si l'utilisation de dispersant chimique est pertinente dans le cas d'une marée noire dans la ZEE belge.

1. Description du modèle OSERIT

Le modèle OSERIT (Oil Spill Evaluation and Response Integrated Tool) est le dernier modèle en date des pollutions aux hydrocarbures de l'UGMM. Il a été développé entre février 2010 et août 2012 dans le cadre du programme « Science for a Sustainable Development » de la Politique Scientifique Fédérale Belge (BELSPO). Basé en partie sur le modèle hydrodynamique COHERENS (Luyten, 2011), il met en œuvre les dernières techniques de modélisation afin de répondre au mieux aux attentes des utilisateurs de la garde côtière, à savoir être un outil flexible et rapide qui permet de simuler la dérive tridimensionnelle de la nappe, tout en tenant compte de l'influence des courants, du vent, de la turbulence, des processus d'étalement, d'évaporation, de dispersion naturelle et chimique de la nappe.

Le modèle OSERIT a été écrit afin de pouvoir simuler la dérive de la nappe de pétrole, soit selon une approche Lagrangienne, soit selon une approche Eulérienne (Legrand et Dulière, 2012). Dans ce mémoire de fin d'étude, seule l'approche Lagrangienne a été utilisée si bien que nous limitons la description du modèle à cette seule approche.

L'approche Lagrangienne considère que le comportement d'une nappe d'hydrocarbure peut être décrit par un ensemble de particules. Le comportement d'une particule décrit donc le comportement d'une fraction de la pollution. En utilisant un grand nombre de particules et des techniques classiques de marches aléatoires (« random walk »), l'approche Lagrangienne permet de décrire une évolution temporelle de la nappe qui soit statistiquement réaliste. Toutefois, afin de tenir compte du

comportement particulier des hydrocarbures en mer, plusieurs situations distinctes peuvent être considérées.

Cas 1 : Hydrocarbure à la surface de la mer

Les hydrocarbures ont naturellement tendance à former des nappes ou des films fins dérivant à la surface de la mer.

Afin de simuler ce phénomène, OSERIT calcule à chaque pas de temps¹⁴ du modèle le déplacement de chaque particule se trouvant en surface en fonction de la vitesse du vent, des courants de surface, des vagues et de la diffusion turbulente horizontale de sorte qu'une particule se trouvant en surface reste en surface.

Une fois qu'une particule est en surface, la fraction d'hydrocarbure qui lui est associée est supposée former une nappe soumise aux processus de vieillissement comme l'évaporation et l'émulsification ou l'étalement. Pour chaque particule en surface et à chaque pas de temps, OSERIT peut donc calculer à l'aide de lois empiriques les fractions d'hydrocarbures intactes, évaporées et émulsifiées ainsi que la densité et la viscosité de l'hydrocarbure.

Cas 2 : Hydrocarbure naturellement dispersé dans la colonne d'eau

Bien que les hydrocarbures soient généralement plus légers que l'eau de mer, il arrive que, sous l'effet d'une mer agitée, une fraction des hydrocarbures se trouvent naturellement dispersées dans la colonne d'eau sous forme de gouttelettes. Leur diamètre peut varier typiquement de quelques dixièmes de millimètres à quelques centimètres. Ces gouttelettes se déplacent alors avec les courants tridimensionnels et sont dispersées sous l'effet des processus de diffusion turbulente horizontale et verticale. De plus, suivant la loi de Stokes, ces gouttelettes auront tendance à remonter vers la surface d'autant plus vite que leur diamètre est grand. Ce dernier effet explique pourquoi seuls les premiers mètres de la colonne d'eau sont pollués en cas de dispersion naturelle.

OSERIT est capable de prendre en compte tous ces processus. Une paramétrisation spécifique permet de représenter la dispersion naturelle de la nappe d'hydrocarbure en fonction de la hauteur significative des vagues. Cette paramétrisation détermine le nombre de particules lagrangiennes qui sont entraînées dans la colonne d'eau, ainsi que la profondeur d'intrusion. A noter que les particules effectivement entraînées dans la colonne d'eau sont choisies de manière entièrement aléatoire.

Une fois qu'une particule lagrangienne se retrouve dans la colonne d'eau, elle se déplace comme une gouttelette naturellement dispersée dont le diamètre a été choisi aléatoirement entre 1/10 de millimètre et 1 centimètre. Plus précisément, comme chaque particule représente une fraction du volume d'hydrocarbure initial, on doit interpréter le mouvement de chaque particule Lagrangienne comme celui d'un grand nombre de gouttelettes correspondant à la fraction du volume considéré.

Dans sa version actuelle, OSERIT ne tient compte d'aucun processus de vieillissement pour les hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau.

¹⁴ Ici le pas de temps est de 10 minutes, c'est-à-dire que le modèle évolue de 10 minutes en 10 minutes. La règle veut que le pas de temps soit d'au moins $1/10^{\text{ième}}$ de la période de simulation. Ici 10 minutes est un bon compromis car il s'agit de $1/54^{\text{ième}}$ de la période, ce qui permet une bonne précision avec erreur de +/- 3 km.

Cas 3 : Hydrocarbure chimiquement dispersé dans la colonne d'eau

Un dispersant chimique fractionne une nappe d'hydrocarbure en des micro-gouttelettes dont le diamètre varie de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres. Ces micro-gouttelettes ont un comportement semblable aux gouttelettes naturellement dispersées si ce n'est qu'elles sont trop petites pour remonter à la surface et y reformer des films.

OSERIT est incapable de prédire l'efficacité d'un dispersant sur une nappe d'hydrocarbure. Toutefois, un utilisateur peut imposer qu'un dispersant sera appliqué à un instant précis de la simulation avec une efficacité spécifiée (un pourcentage de volume de nappe dispersée).

A l'instar de la dispersion naturelle, les particules lagrangiennes dispersées chimiquement, qui sont ainsi entraînées dans la colonne d'eau, se déplacent comme des micro-gouttelettes chimiquement dispersées dont le diamètre a été choisi aléatoirement entre 1 et 100 micromètres. Plus précisément, comme chaque particule représente une fraction du volume d'hydrocarbure initial, le mouvement de chaque particule Lagrangienne doit être interprété comme celui d'un grand nombre de micro-gouttelettes correspondant à la fraction du volume considéré.

Dans sa version actuelle, OSERIT ne tient compte d'aucun processus de vieillissement pour les hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau.

Choix des conditions initiales

Le principal avantage de l'approche lagrangienne d'OSERIT est la flexibilité avec laquelle les conditions initiales peuvent être imposées. Il est ainsi facile de générer une distribution initiale de particules correspondant aux scénarios suivants :

- Déversement instantané ou continu d'une source ponctuelle fixe se trouvant en surface (ex : bateau amarré)
- Déversement instantané ou continu d'une source ponctuelle fixe se trouvant dans la colonne d'eau (ex : bateau échoué)
- Déversement instantané ou continu d'une source ponctuelle fixe se trouvant au fond (ex : puits de pétroles)
- Déversement instantané d'une source fixe non ponctuelle (dérivante) se trouvant en surface (ex : une pollution détectée par avion ou image satellitaire)
- Déversement continu d'une source mobile se trouvant en surface (ex : le dégazage d'un bateau)
- Déversement continu d'une source mobile se trouvant dans la colonne d'eau (ex : un conteneur dérivant)

2. Dispositif expérimental

Dans ce mémoire de fin d'étude, c'est le « Cas 3 : Hydrocarbure chimiquement dispersé dans la colonne d'eau » qui est étudié. Un dispersant avec une efficacité de 100% est appliqué dès le premier pas de temps.

Pour les premiers tests du logiciel OSERIT, nous avons choisi de simuler le devenir d'une pollution aux hydrocarbures dans 5 sous-régions de la ZEE belge (Figure 31) :

- la région côtière occidentale centrée autour de la station W03 se situe le long des Kustbanken, Zone d'importance internationale selon la convention de Ramsar, et dans une Zone de Protection Spéciale selon la Directive Oiseaux, au large de Nieuport.
- la zone côtière orientale centrée sur W01 se situe dans une Zone de Protection Spéciale selon la Directive Oiseaux le long du port de Zeebruges ;
- la zone off-shore occidentale centrée sur le mat de mesure du Westhinder se situe sur une zone de mariculture le long de la route du Westhinder ;
- la zone offshore orientale W07 est centrée autour du parc éolien C-Power ;
- la zone centrée autour de la station W10 se situe en plein centre d'une des routes marchandes les plus empruntées au monde.



Figure 31 : Les 5 sous-régions de la ZEE belge considérées dans cette étude
Source : d'après Google Earth

Les coordonnées exactes de ces 5 stations sont données dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Coordonnées des 5 stations utilisées dans cette étude

Nom de la station	Latitude (DD)	Longitude (DD)
W01	51.375000 N	3.189167 E
W03	51.168333 N	2.666667 E
W07	51.583333 N	3.008333 E
Westhinder	51.383336 N	2.441650 E
W10	51.683333 N	2.416667 E

Un vent du Sud-Ouest de 4,5 m/s sera appliqué, car il s'agit de la situation la plus commune dans la ZEE belge.

Trois volumes de déversement sont pris en compte, soit 100 m³, 1000 m³ et 10 000 m³. Ce choix permet de couvrir les différents volumes qui pourraient se répandre dans la ZEE belge et sont basés sur les accidents passés (170 m³ (*Tricolor*) à 7000 m³ (*Bona Fulmar*)).

La simulation se déroule du 29 novembre 2008 à 00h00 au 8 décembre 2008 à 00h00, soit 9 jours. Ce choix est motivé par l'existence de forçages hydrodynamiques pour cette période.

10000 particules ont été rejetées dans un cercle de rayon de 1 km successivement autour d'une des 5 stations à la date de début de simulation. La progression des particules est calculée au cours du temps. Le choix de 10 000 particules suit une règle de bonne pratique qui dit qu'il faut +/- 1000 particules par jour de simulation. Les particules représentent un volume différent selon le volume déversé :

- 100 m³ déversé : 1 particule représente 0,01 m³ d'hydrocarbure (= 10 litres)
- 1000 m³ déversé : 1 particule représente 0,1 m³ d'hydrocarbure (= 100 litres)
- 10 000 m³ déversé : 1 particule représente 1 m³ d'hydrocarbure (= 1000 litres)

Il s'agit ici de réaliser une étude de faisabilité. La simulation peut donc être simplifiée et ne pas tenir compte des processus de vieillissement.

Dans le modèle, 3 zones d'impact sont distinguées : la zone du fond, la colonne d'eau et la couche de surface. L'épaisseur de la couche de surface est de 3 mètres, le fond prend en compte les trois premiers mètres situés au-dessus du sédiment et la colonne d'eau se situe entre les trois mètres de surface et les trois mètres de fond. Son épaisseur varie donc selon la bathymétrie¹⁵ et l'élévation due à la marée.

Dans son développement actuel, le modèle permet de visualiser trois paramètres géo-référencés : la trajectoire des particules, la concentration, et le temps d'exposition.

La trajectoire des particules permet de simuler la dérive géographique de la nappe dans le fond et dans la colonne d'eau au cours du temps à partir d'une grille fine (mailles de 1/360 degré de côté, ou plus ou moins 200 x 320 m, sur 1 m d'épaisseur). Cela permet notamment aux gestionnaires d'anticiper les zones touchées, non seulement de la ZEE belge mais également des ZEE voisines.

La concentration exprimée en ppm par maille du modèle permet d'estimer la quantité d'hydrocarbure présente dans une zone considérée. Ce paramètre est représenté selon une grille grossière (mailles de 2,5/60 degré de côté, soit plus ou moins 3000 x 4800 m, sur 1 m d'épaisseur), sur les trois niveaux, surface, colonne d'eau et fond.

Le temps d'exposition permet de connaître le temps durant lequel plus de 0, 1, 10, 100 ou 1000 ppm ont pollué une maille de grille grossière. Ce paramètre permet donc de connaître le temps durant lequel une certaine concentration s'est maintenue dans une zone bien précise, sur les trois niveaux, surface, colonne d'eau et fond.

¹⁵ Profondeur de l'océan

3. Applications

Une simulation va être expliquée en détail (une sous-région pour un volume) afin de mettre en évidence toutes les possibilités du logiciel OSERIT. Elle sera ensuite comparée aux simulations obtenues avec les autres volumes et, lorsqu'il sera possible, les données des tests de toxicité seront utilisées pour évaluer l'impact environnemental. Enfin, l'importance géographique de la source de pollution sera mise en évidence par une étude comparative des trajectoires d'hydrocarbure rejeté au niveau des cinq stations sous des conditions de vent identiques.

3.1. Déversement de 100 m³ dans la zone Westhinder sous un vent Sud-Ouest de 4,5 m/s avec dispersion chimique

3.1.1. *Le devenir de la pollution au cours du temps*

Lors d'un déversement de 100 m³ dans la zone du Westhinder, c'est-à-dire au-delà de la mer territoriale, la nappe se déplace vers le Nord-Est de la ZEE belge jusqu'à traverser la future zone de mariculture au niveau des parcs éoliens et pénétrer la ZEE néerlandaise 8 jours après l'accident dans le fond et 5 jours après l'accident dans la colonne d'eau (Figure 32).

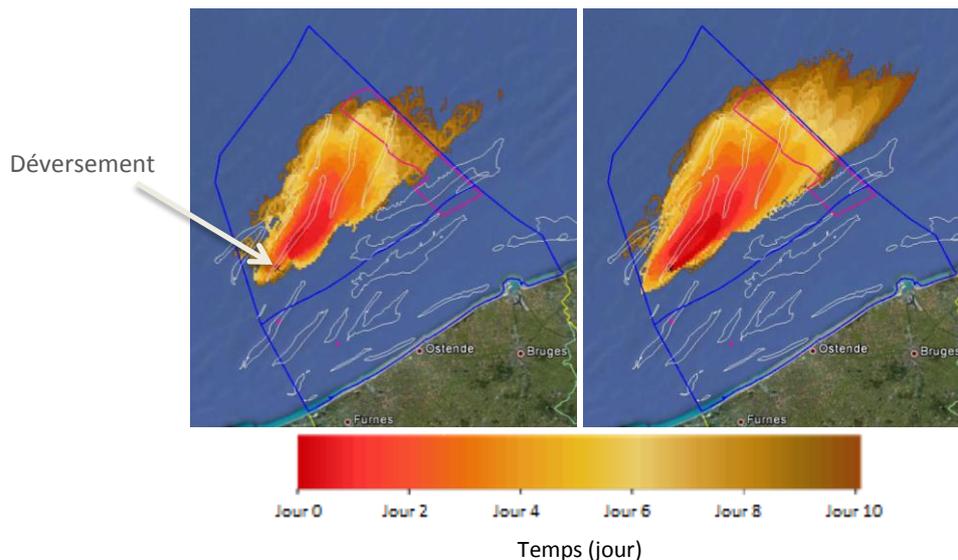


Figure 32 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m³ centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.

L'examen de la Figure 32 montre que la pollution s'étend plus fortement dans la colonne d'eau que dans le fond. En effet, à cause de la friction de fond (Davies, 1977), les vitesses près du fond sont plus faibles que les vitesses près de la surface. En un temps donné, la fraction de la pollution près du fond ne peut donc que parcourir des distances plus faibles. Le déplacement de cette fraction est également contraint par la présence, la forme et l'orientation des bancs de sable.

Presque un tiers de la ZEE belge sera polluée. Ces hydrocarbures et dispersants auront des effets sur la petite zone de mytiliculture la plus au Nord-Ouest, sur les organismes benthiques vivants dans les bancs de sable, sur les zones de frayère et d'alevinage et dans une moindre mesure, sur les oiseaux plongeurs et les mammifères qui pourraient se trouver dans la zone.

Les activités économiques ne seront pas épargnées, c'est notamment le cas de la pêche qui devra être interdite suite à la contamination des poissons devenus impropres à la consommation.

3.1.2. Les concentrations

Le logiciel OSERIT permet de visualiser la concentration dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface. Deux types de cartes sont présentés ci-dessous : (i) l'évolution des concentrations au cours du temps dès 12 h après le déversement et (ii) les maxima de concentrations observés dès le déversement. Les maxima se produisent entre le déversement et 12 h après celui-ci, c'est la raison pour laquelle ces valeurs ne se retrouvent pas dans les cartes d'évolution des concentrations au cours du temps.

(i) Evolution des concentrations au cours du temps

Dans le fond (Figure 33), la concentration ne dépasse pas 10 ppm par maille et il faudra 168 h, soit 7 jours pour qu'elle passe sous 1 ppm dans toutes les mailles. Plus l'hydrocarbure est dispersé au cours du temps, plus sa concentration diminue.

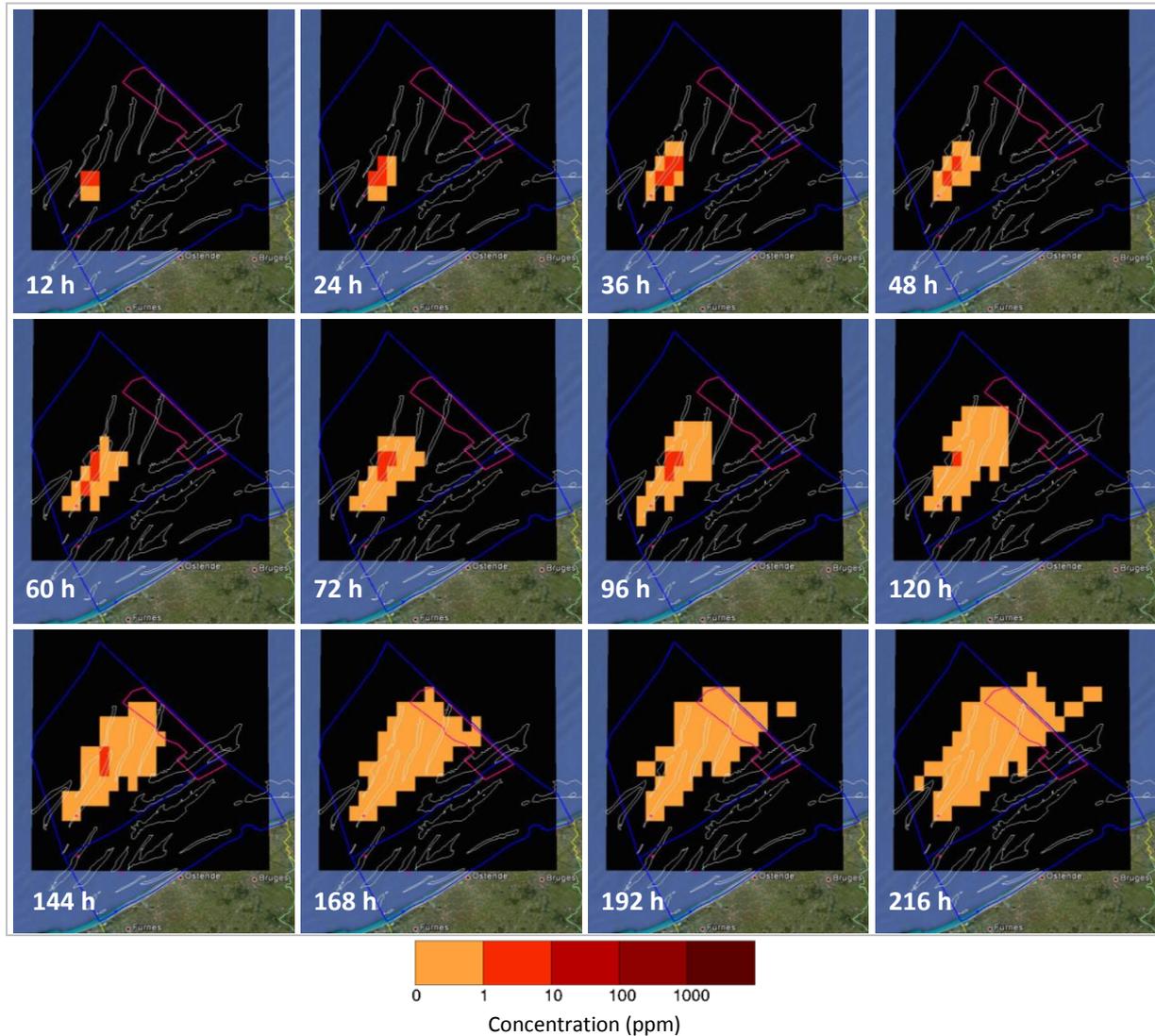


Figure 33 : Logiciel OSERIT : Concentrations de pétrole en ppm dans le fond après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, de 12 à 216 h. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

Remarque : Le fond noir visible sur les cartes ne représente rien. Cela est dû au fait que le modèle n'est pas encore finalisé.

Dans la colonne d'eau (Figure 34), la concentration ne dépasse pas non plus les 10 ppm par maille mais elle descendra plus rapidement sous 1 ppm par maille que dans le fond, c'est-à-dire après 60 h, soit deux jours et demi.

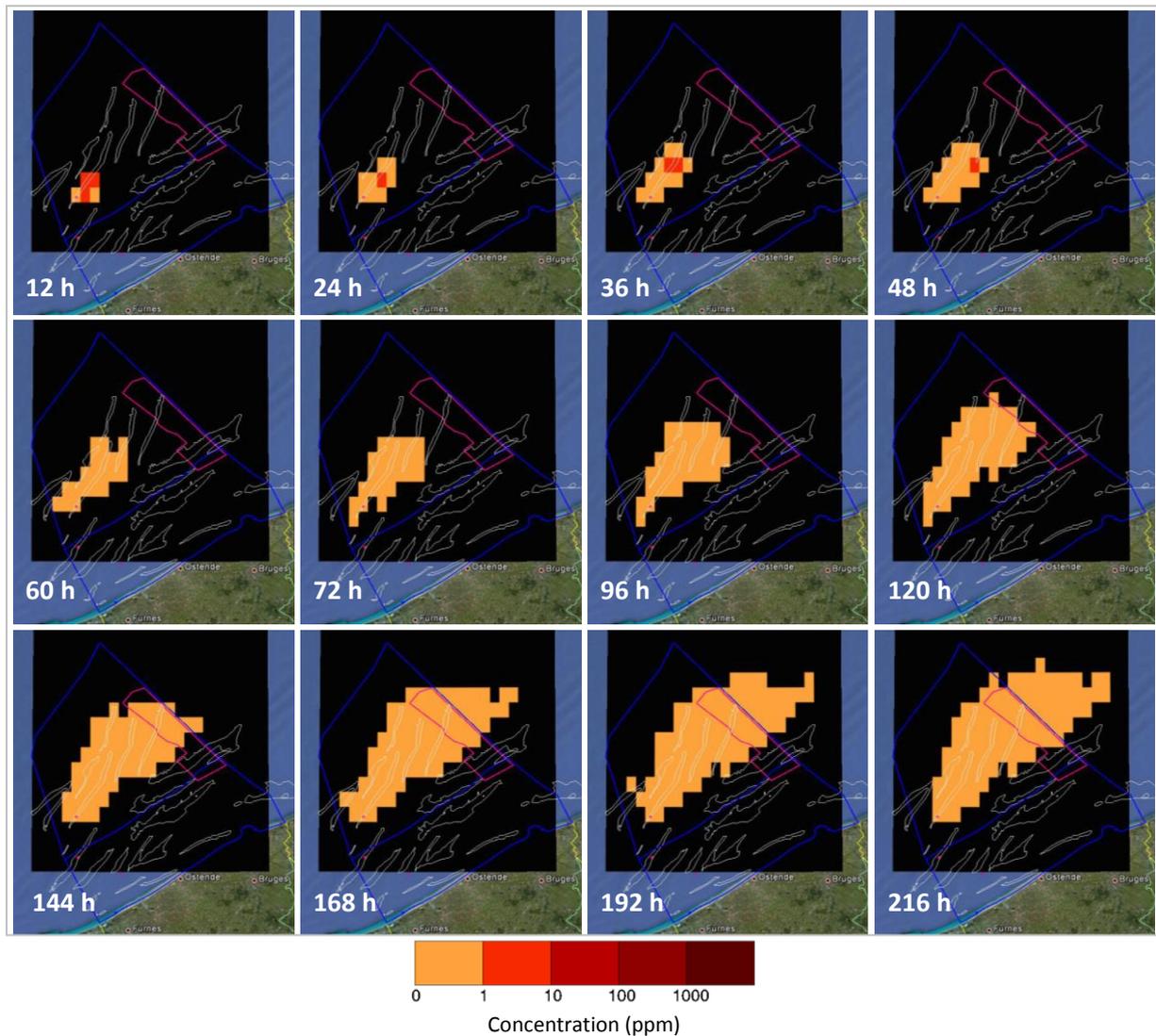


Figure 34 : Logiciel OSERIT : Concentrations de pétrole en ppm dans la colonne d'eau après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, de 12 à 216 h. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

A la surface (Figure 35), la concentration est plus importante que dans le fond et dans la colonne d'eau, elle atteint les 100 ppm par maille. Après 24h, elle ne dépassera plus les 10 ppm par maille mais il faudra 168 h, soit 7 jours, pour qu'elle diminue sous les 1 ppm par maille.

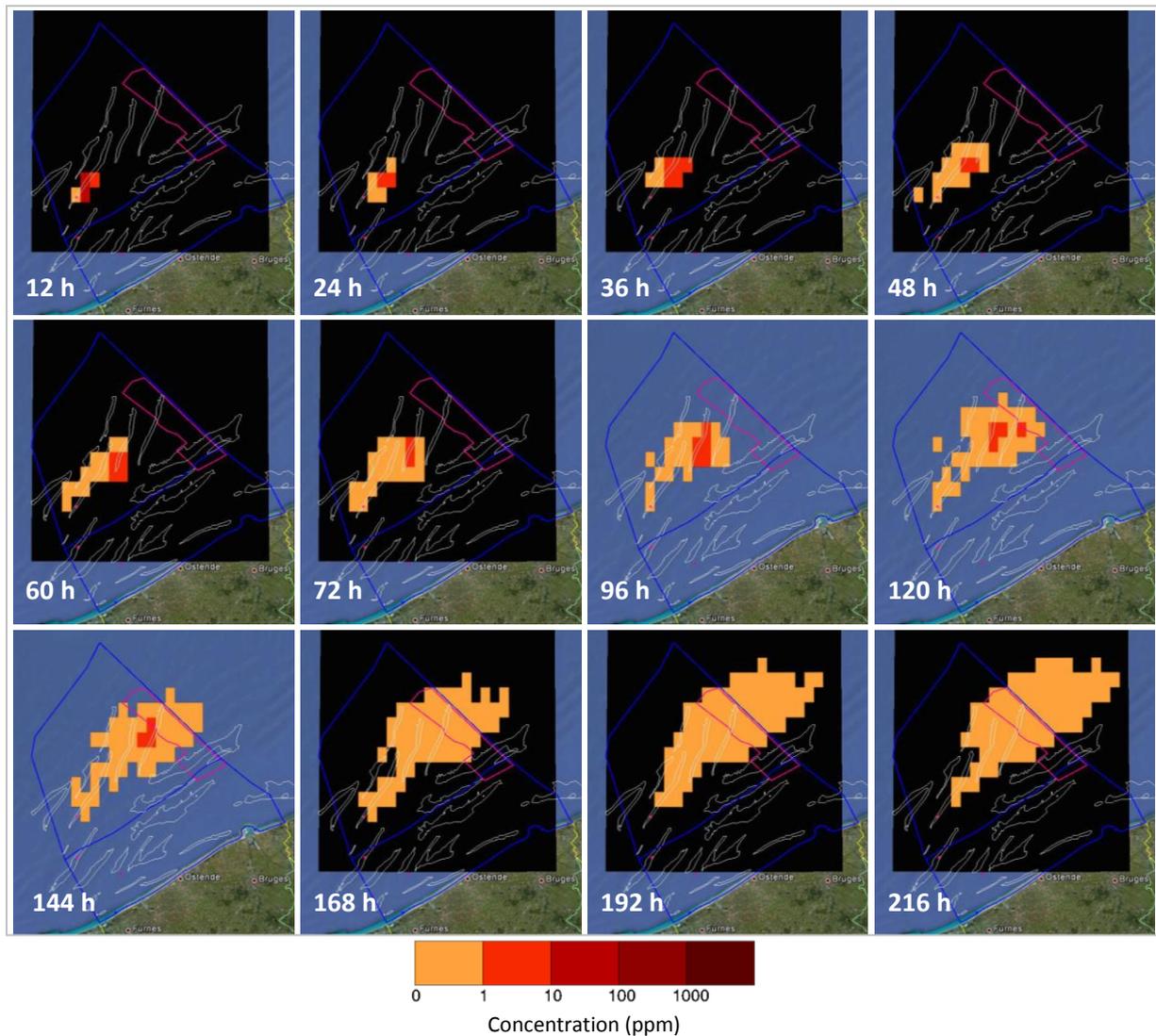


Figure 35 : Logiciel OSERIT : Concentrations de pétrole en ppm à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s, de 12 à 216 h. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

(ii) Les maxima de concentration

Les maxima de concentration simulés (Figure 36) sont supérieurs à 10 ppm par maille dans le fond, supérieur à 100 ppm par maille dans la colonne d'eau et supérieur à 1000 ppm par maille à la surface.

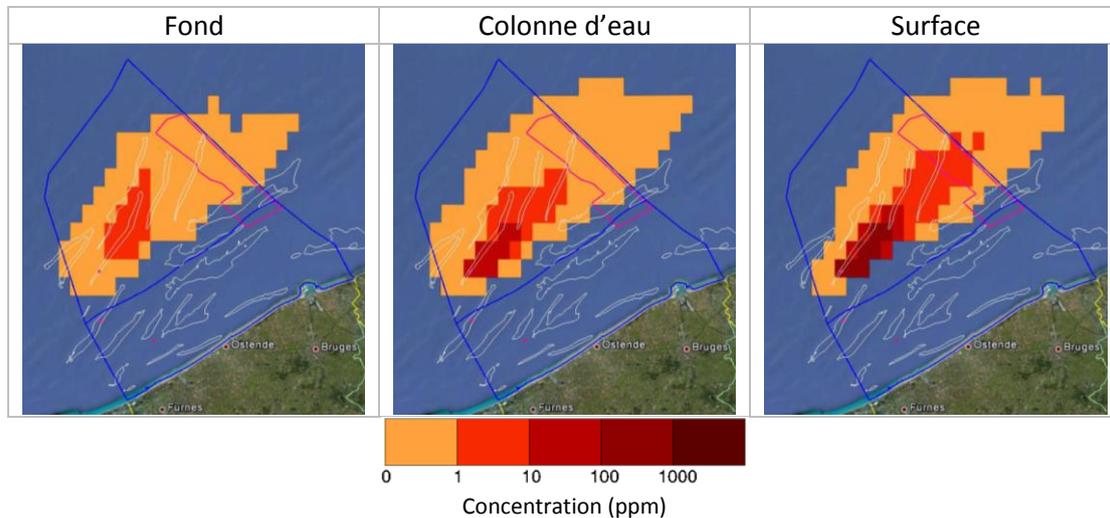


Figure 36 : Logiciel OSERIT : Maxima de concentration de pétrole en ppm dans le fond (à gauche), dans la colonne d'eau (au milieu) et à la surface (à droite) après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

3.1.3. Les temps d'exposition

Les temps d'exposition (Figure 37) permettent de visualiser la durée durant laquelle plus de 0, 1, 10, 100 ou 1000 ppm ont contaminé le fond, la colonne d'eau et la surface.

Dans les conditions de simulation, les concentrations de pétrole ne dépasseront pas 10 ppm au fond, alors que dans la colonne d'eau, elles monteront jusqu'à 100 ppm et à la surface jusqu'à 1000 ppm.

La nappe étant relativement similaire dans les trois couches, plus de 0 ppm se maintiennent pendant toute la durée de la simulation. A partir de plus de 1 ppm, on observe des différences selon la couche.

Dans le fond, une concentration entre 0 et 10 ppm pourra se maintenir pendant 96 h.

Dans la colonne d'eau, une concentration entre 0 et 1 ppm se maintiendra durant les 9 jours de simulation. Mais, une concentration entre 1 et 10 ppm ne durera pas plus de 24 h et une concentration entre 10 et 100 ppm persistera pendant maximum 6 h.

A la surface, la nappe est plus étendue que dans le fond et dans la colonne d'eau mais, une concentration entre 1 et 10 ppm subsistera pendant maximum 72 h. Elle n'atteindra pas 1000 ppm et les concentrations supérieures à 100 ppm ne persisteront pas plus de 6 h.

Même si les concentrations sont plus importantes dans la surface et dans la colonne d'eau que dans le fond, elles peuvent persister plus longtemps dans le fond (jusqu'à 96h) que dans les autres couches (maximum 24 h pour la colonne d'eau et maximum 72 h pour la surface). Ceci est dû au fait que les particules du fond se déplacent moins vite et restent donc plus longtemps au même endroit.

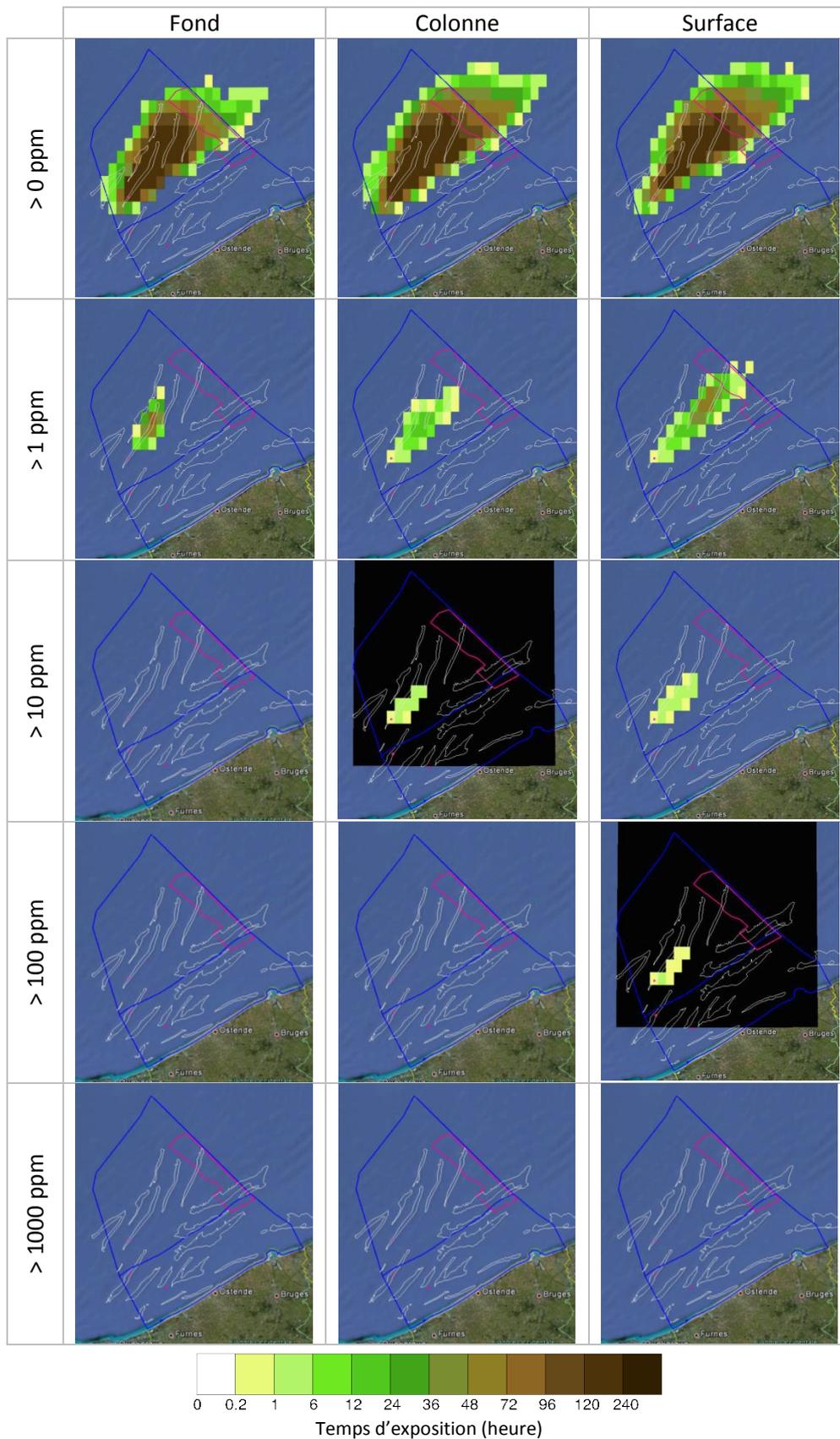


Figure 37 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 0, 1, 10, 100 et 1000 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

Après avoir décrit un déversement de 100 m³ en détail, il est intéressant de comparer les résultats simulés des déversements de 1000 et 10 000 m³.

3.2. Sensibilité au volume de pollution déversé

3.2.1. Le devenir de la pollution au cours du temps

Les trajectoires sont très similaires pour les trois déversements (Figure 38). En effet, le modèle considère un nombre de 10 000 particules et peu importe le volume déversé, celles-ci sont contraintes aux mêmes forçages (vent, courant, vague) et aux mêmes conditions initiales (rejet au même instant et au même endroit). La nappe fait environ 50 km de long sur 26 km de large dans le fond. Et elle fait environ 79 km de long sur 30 km de large dans la colonne d'eau.

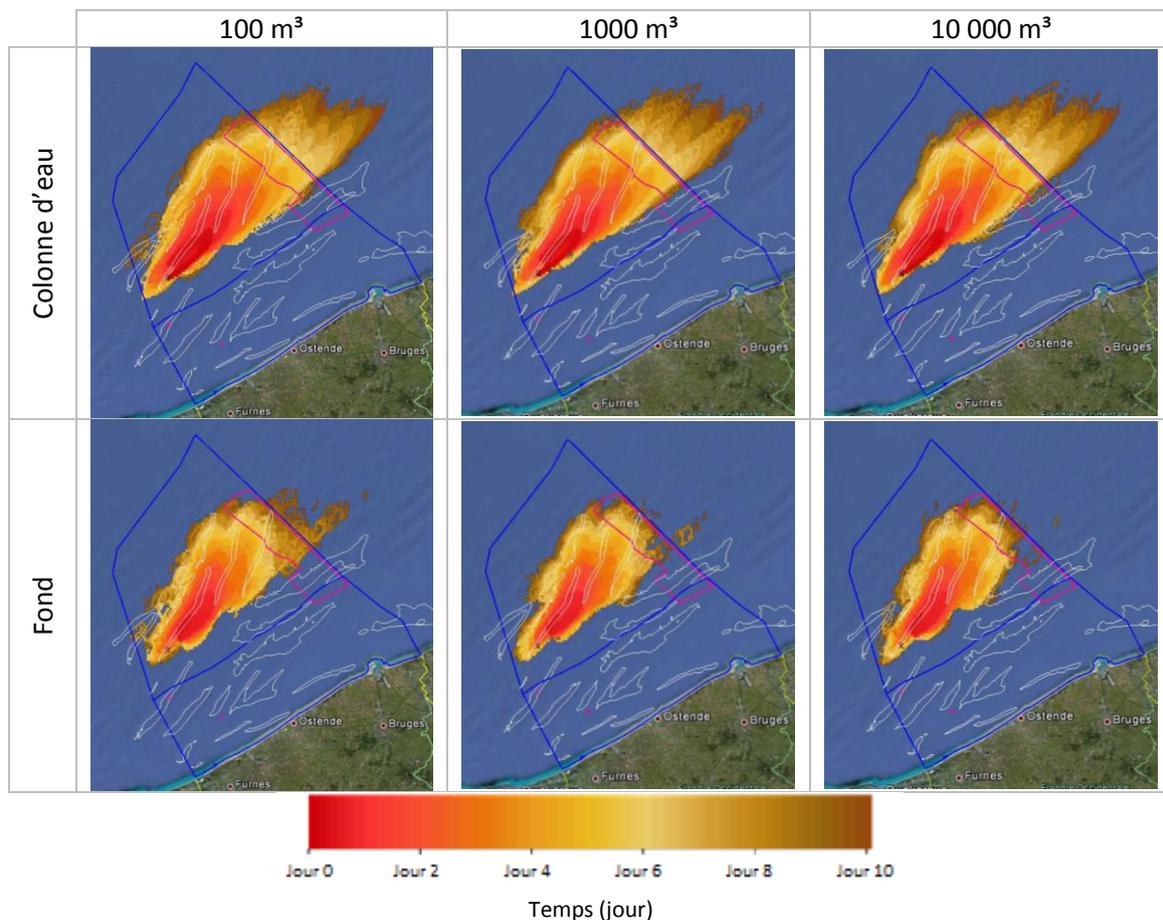


Figure 38 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100, 1000 ou 10 000 m³ centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s dans le fond et dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.

3.2.2. L'évolution de la concentration au cours du temps

Les maxima de concentration simulés (Figure 39) varient d'un volume à l'autre. Ils augmentent d'un facteur dix tout comme les volumes.

Dans le fond, avec un déversement de 100 m³, les concentrations maximales ne dépassent pas 10 ppm au centre et 1 ppm aux extrémités de la nappe. Pour un déversement de 1000 m³, les concentrations au centre de la nappe sont de maximum 100 ppm et aux extrémités de 10 ppm. Et pour un déversement de 10 000 m³, les concentrations sont de maximum 1000 ppm au centre et de 100 ppm aux extrémités de la nappe.

Les concentrations dans la colonne d'eau sont plus importantes que dans le fond. Pour un déversement de 100 m³, elles varient de maximum 1 ppm aux extrémités de la nappe à maximum 10 ou 100 ppm au centre. Pour un déversement de 1000 m³, les concentrations passent de 1 à 10 à 1000 ppm en se rapprochant du centre de la nappe. Et pour 10 000 m³, la concentration va de 10 à 100 à plus de 1000 ppm.

En surface, les concentrations sont encore plus importantes d'un facteur 10 que dans la colonne d'eau et vont jusqu'à 1000 ppm au fond et plus 1000 ppm dans la colonne d'eau et à la surface.

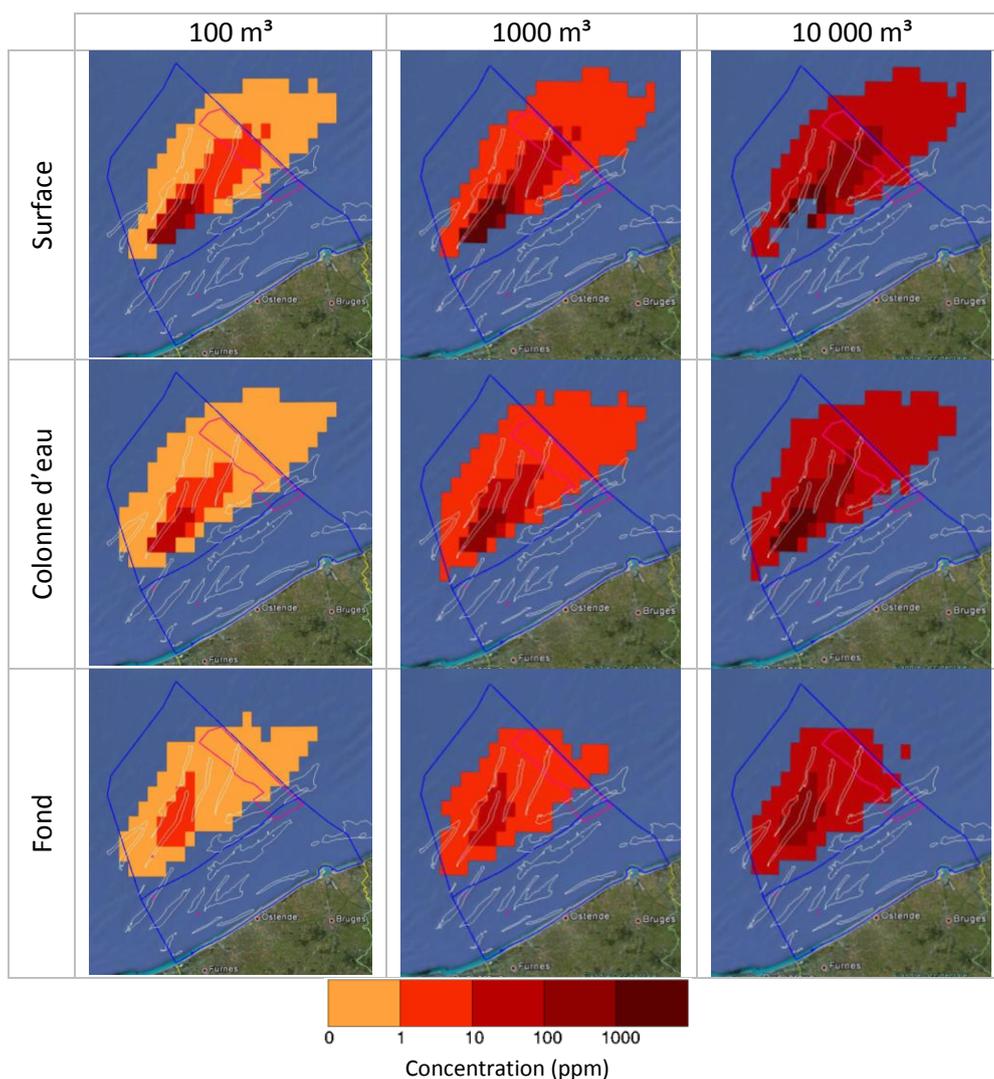


Figure 39 : Logiciel OSERIT : Concentration de pétrole maximum en ppm dans le fond dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement de 100, 1000 ou 10 000 m³ centré sur le mat de mesure du Westinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

3.2.3. Les temps d'exposition

Plus de 0 ppm (Figure 40)

Logiquement peu de différence existe pour les temps d'exposition de plus de 0 ppm selon le volume déversé. Une concentration significativement différente de 0 ppm persistera durant les 9 jours de simulations autour de la zone de déversement. La pollution apparaîtra au cours du temps autour du centre de déversement et sera donc présente pendant une moins longue période.

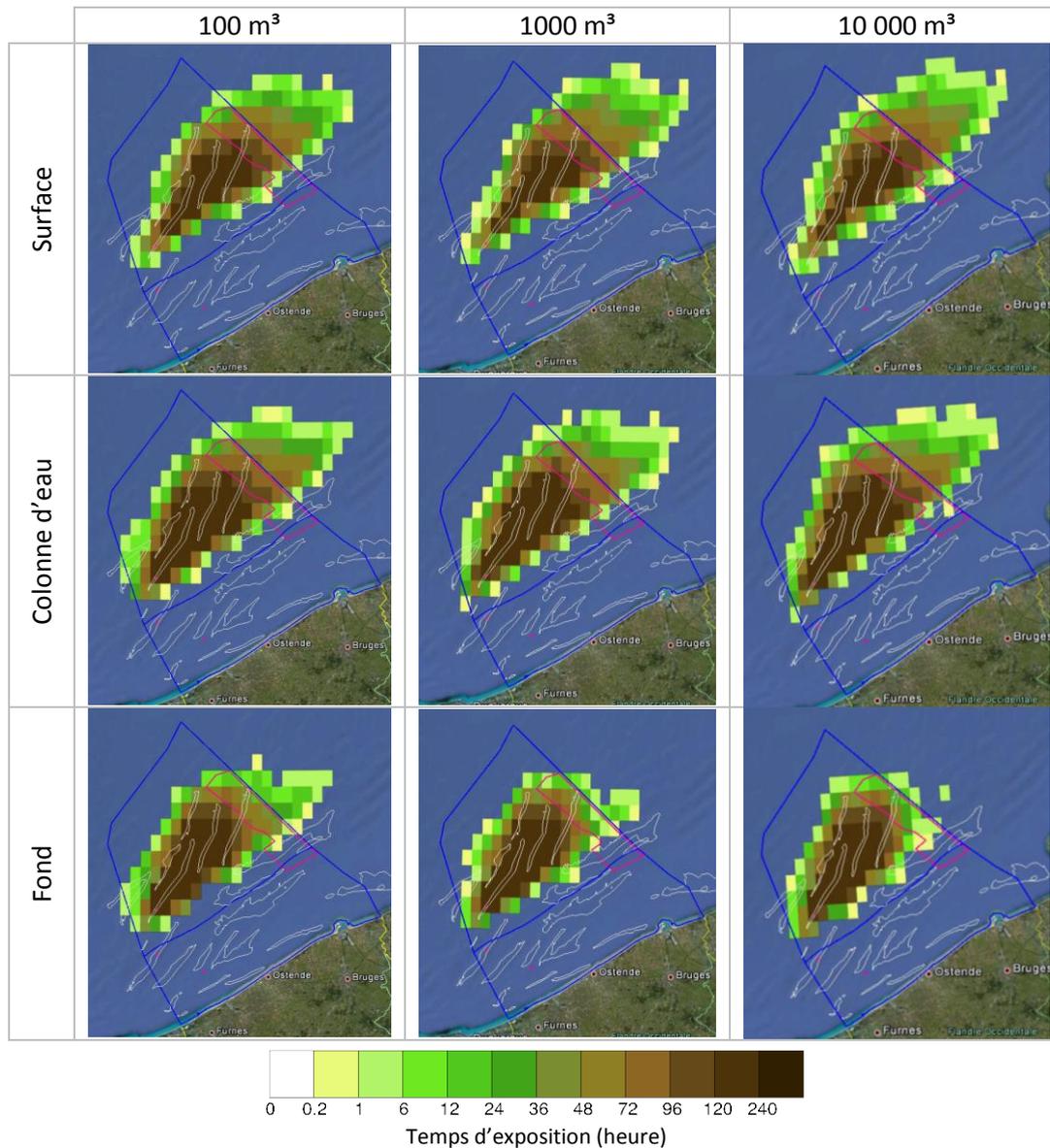


Figure 40 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 0 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

Plus de 1 ppm (Figure 41)

Pour un déversement de 100 ppm, une différence de concentration entre les trois couches (surface, colonne d'eau et fond) est visible dès plus de 1 ppm comme vu précédemment dans le cas détaillé. Par contre, quasi aucune différence n'apparaît pour les déversements de 1000 et 10 000 m³.

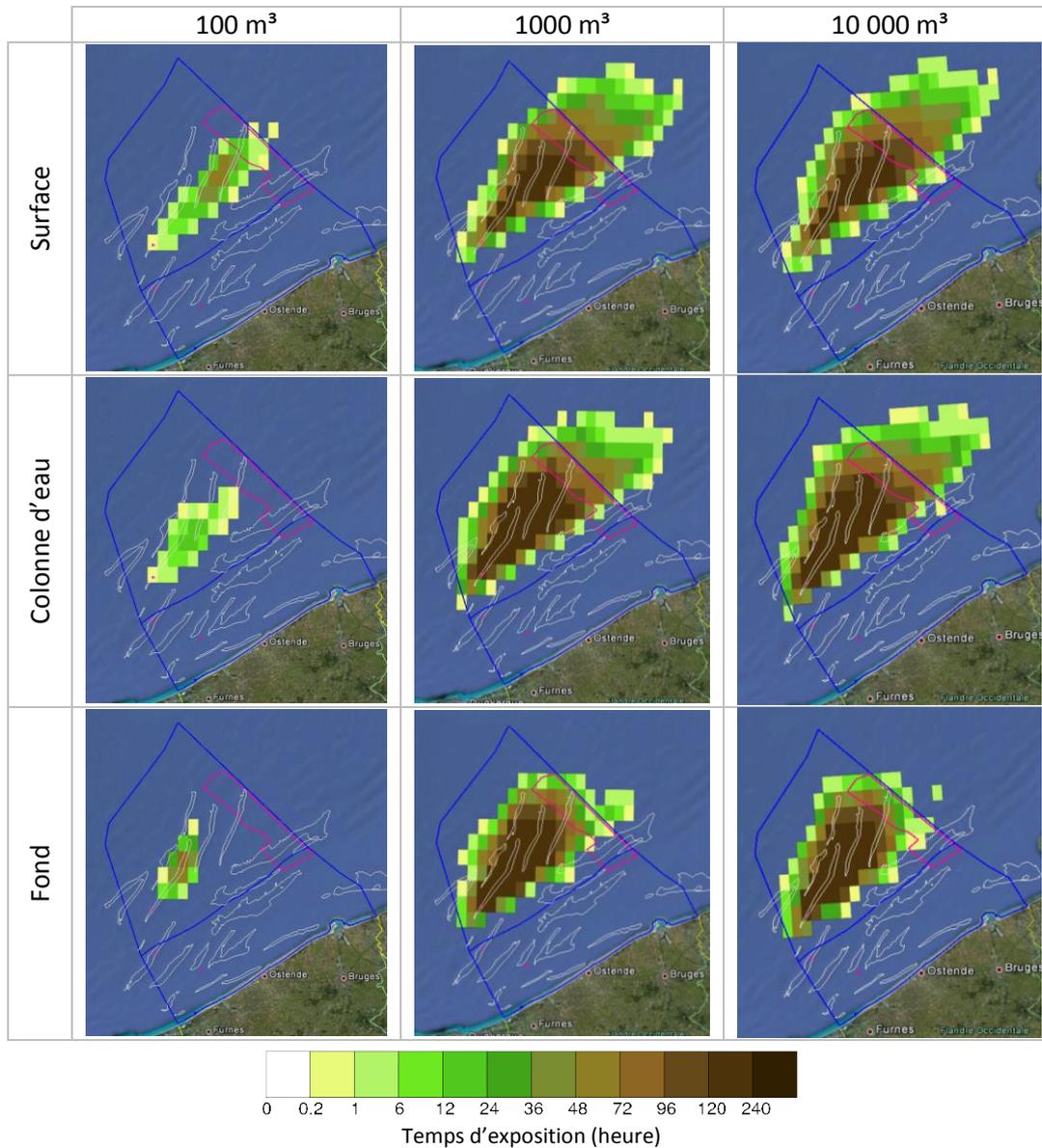


Figure 41 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 1 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

Plus de 10 ppm (Figure 42)

Alors que pour un déversement de 100 m³ la contamination du fond reste supérieure à 10 ppm, pour un déversement 1000 et 10 000 m³, la pollution reste bien présente.

Dans le cas d'un déversement de 1000 m³, dans le fond, une maille comportera plus de 10 ppm pendant les 9 jours de simulations. Dans la colonne d'eau, plus de 10 ppm pourra subsister pendant 24h. Et à la surface, la pollution pourra être de plus de 10 ppm pendant 96 h.

Et dans le cas d'un déversement de 10 000 m³, le fond, la colonne d'eau et la surface contiennent plus de 10 ppm pendant les 9 jours de simulations.

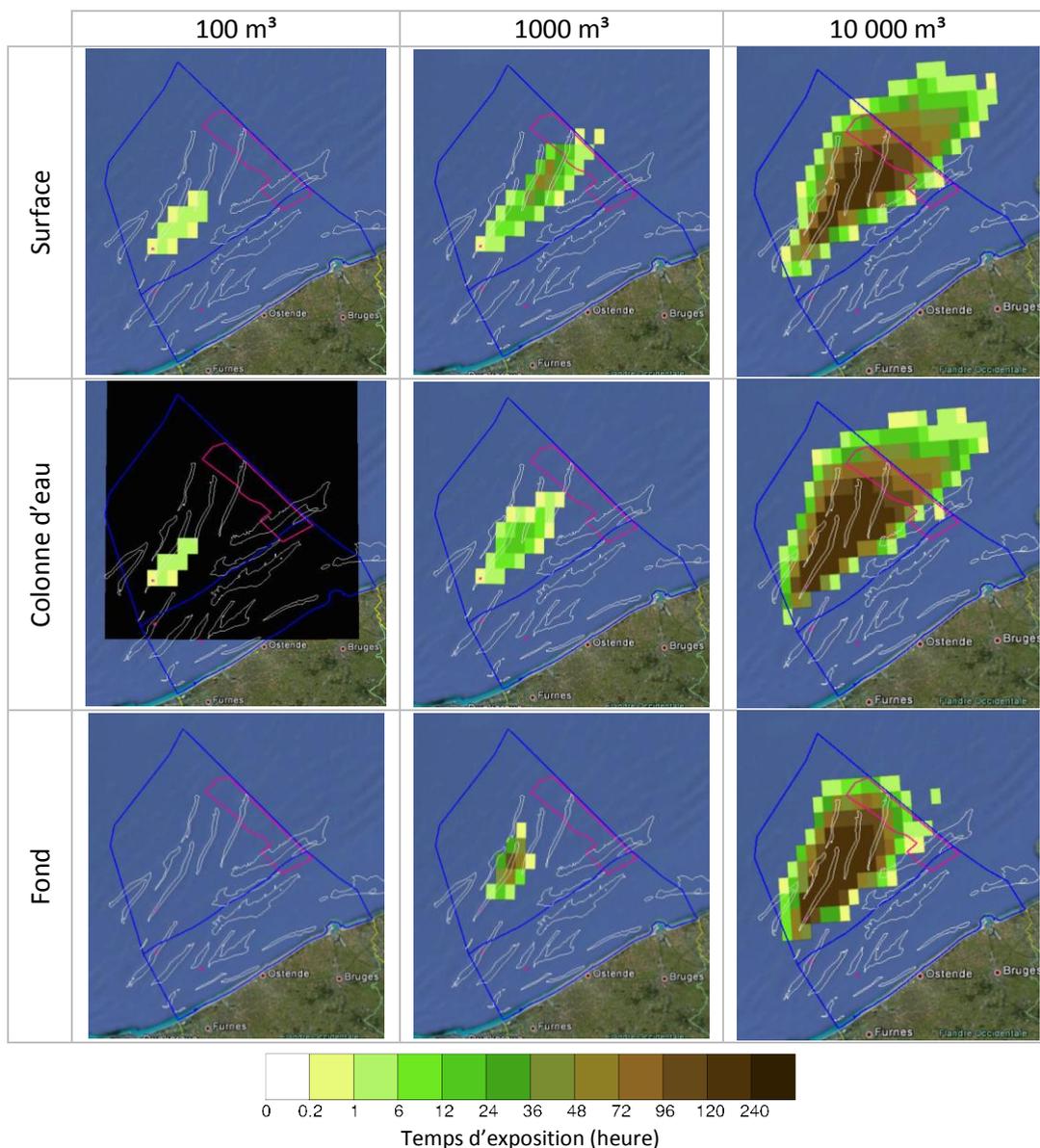


Figure 42 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 10 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

Plus de 100 ppm (Figure 43)

Lors d'un déversement de 100 m³ et de 1000 m³, la contamination du fond restera inférieure à 100 ppm. Tandis que lors d'un déversement de 10 000 m³, plus de 100 ppm pourront persister pendant 96 h.

Alors que 100 ppm ne seront pas atteints dans la colonne d'eau lors d'un déversement de 100 m³, plus de 100 ppm seront présents pendant maximum 6 h lors d'une déversement de 1000 m³. Et lors d'un déversement de 10 000 m³, une pollution de plus de 100 ppm persistera pendant 24 h.

En surface, la pollution persiste pour les trois volumes déversés mais à des degrés différents. Pour un déversement de 100 m³ plus de 100 ppm seront présents pendant 6h dans une seule maille. Pour un déversement de 1000 m³ plus de 100 ppm seront présents pendant 6h dans 9 mailles. Et pour un déversement de 10 000 m³ une pollution de plus de 100 ppm pourra se maintenir jusqu'à 72h.

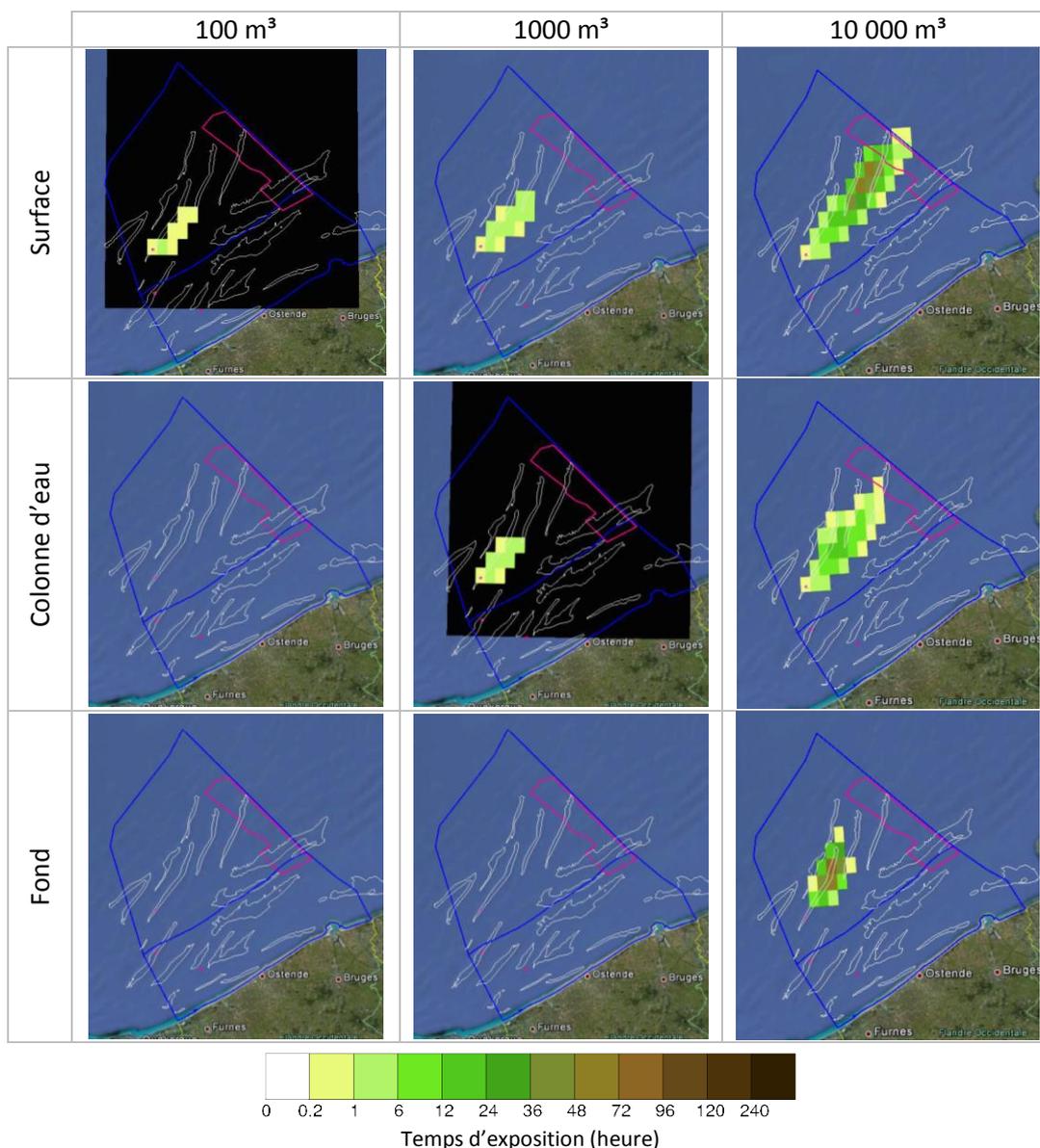


Figure 43 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 100 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

Plus de 1000 ppm (Figure 44)

Lors d'un déversement de 100 m³, la concentration n'attendra jamais les 1000 ppm à la surface.

Lors d'un déversement de 1000 m³, la concentration ne dépassera pas 1000 ppm dans la colonne d'eau.

Et lors d'un déversement de 10 000 m³, la concentration ne dépassera pas 1000 ppm dans le fond mais bien dans la colonne d'eau et à la surface où cette concentration pourra être dépassée pendant maximum 6h.

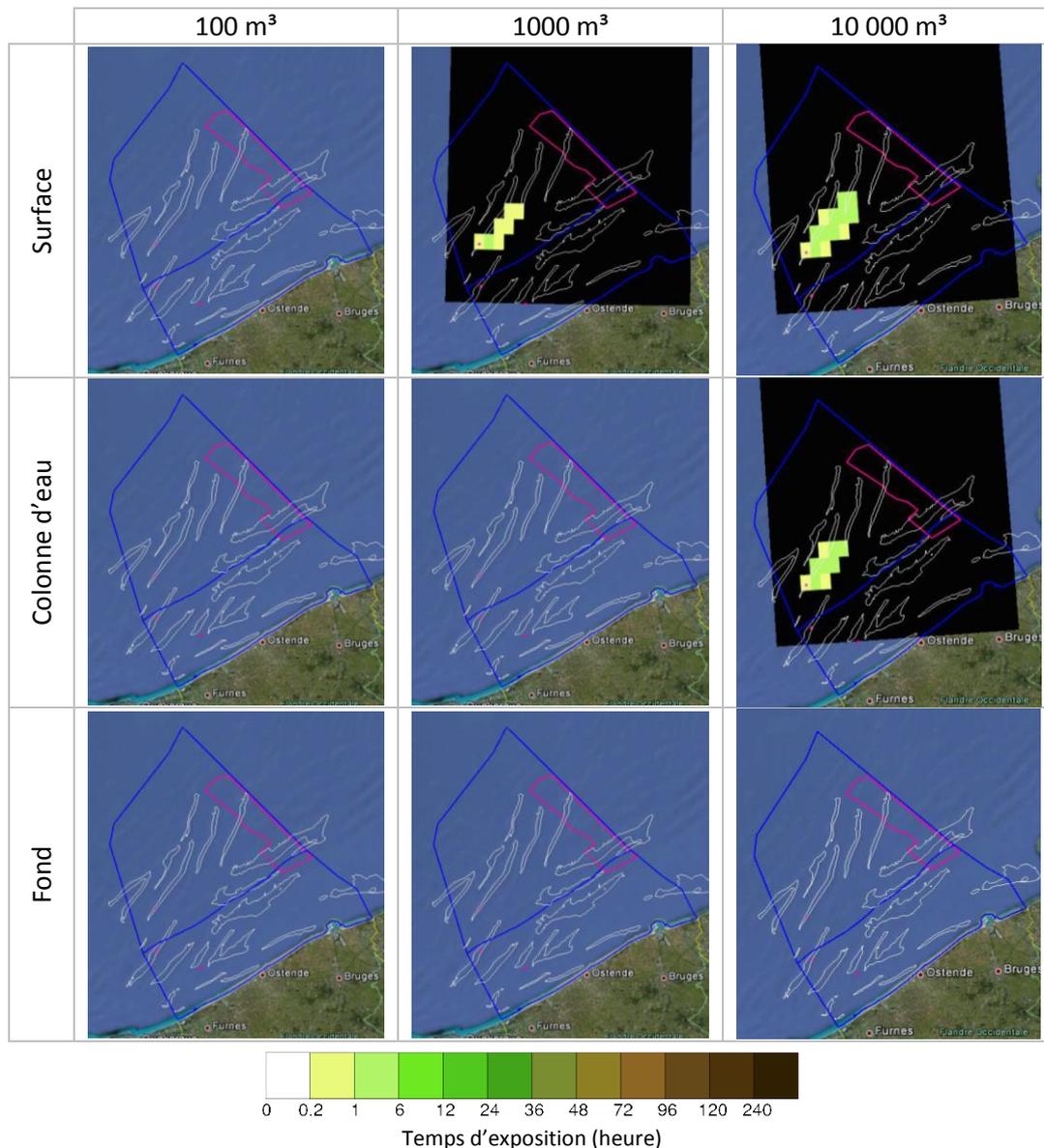


Figure 44 : Logiciel OSERIT : Temps d'exposition en heure pour plus de 1000 ppm dans le fond, dans la colonne d'eau et à la surface après un déversement centré sur le mat de mesure du Westhinder avec un vent SO de 4,5 m/s. En rose sont délimitées les zones de maricultures et en blanc les bancs marins.

3.3. Impact écologique

En combinant les concentrations et les temps d'exposition simulés par OSERIT, il est possible d'évaluer l'impact écologique qu'aura une pollution en comparant les simulations avec les résultats des tests de toxicité existants pour les organismes présents dans la ZEE belge (cf. Chapitre 3). Le peu de données disponibles limite fortement cette comparaison mais ouvre des perspectives sur le type de tests de toxicité expérimentaux qui pourraient être effectués.

Notre comparaison porte sur les LC₅₀ de (i) l'huître creuse (*Crassostrea gigas*) et (ii) du turbot (*Scophthalmus maximus*), dont l'habitat correspond aux simulations du fond.

Pour rappel, la LC₅₀ (ou concentration létale 50%) est la concentration d'un polluant provoquant 50 % de mortalité dans la population exposée. Nous travaillons avec ce paramètre de toxicité car il est couramment utilisé et ouvre une plus grande possibilité de comparaison avec d'éventuels autres tests.

En l'absence de données précises, nous faisons l'hypothèse que l'huître creuse et le turbot sont présent dans toute la zone affectée.

(i) L'huître creuse

En ce qui concerne cet organisme, nous disposons de tests effectués avec le dispersant Corexit 9527 en présence de trois hydrocarbures différents : Forties, Kuwait et Medium Fuel Oil. La LC₅₀ varie de 0,5 à 0,81 ppm donc supérieure à 0 ppm mais inférieure à 1 ppm, pour des tests réalisés sous 48 h, soit un classement GESAMP de 4 c'est-à-dire une haute toxicité.

Pour les trois volumes de déversement, la concentration est létale pour l'huître. En effet, la LC₅₀ se situant entre 0 et 1 ppm, nous pouvons donc nous limiter aux cartes simulant le temps d'exposition supérieur à 0 ppm (Figure 40). Nous observons que l'entièreté de la nappe contient au moins une concentration entre 0 et 1 ppm. Le centre de la nappe sera une zone létale pour l'huître car la concentration se maintient pendant plus de 48 h. Les huîtres se situant vers les extrémités de la nappe, dans une zone où les temps d'exposition sont inférieurs à 48 h, auront une chance de se trouver dans une zone sous 0,5 ppm et ne pas mourir de la pollution.

(ii) Le turbot

Pour le turbot, nous disposons de deux concentrations létales pour des tests de 48h : 2 ppm pour le mélange de pétrole et de dispersant Kuwait/Corexit 9527 et 0,44 ppm pour le mélange de pétrole et de dispersant Forties/Corexit 9500. Cela représente respectivement une classe GESAMP 3 soit modérément toxique et une classe GESAMP 4 soit hautement toxique.

Le mélange Kuwait/Corexit 9527 est léthal pour le turbot à une concentration de 4 ppm, soit entre 1 et 10 ppm. Nous pouvons donc nous limiter à l'analyse de la carte des temps d'exposition de plus de 1 ppm (Figure 41).

Pour un volume d'hydrocarbure déversé de 100 m³, une concentration supérieure à 1 ppm peut se maintenir pendant 96 h dans une maille du modèle, pendant 72 h dans une maille du modèle et pendant 48 h dans 2 mailles du modèle. Ces 4 mailles, soit une superficie d'environ 12 sur 19 km, rassemblent donc les conditions de toxicité léthale pour le turbot. Dans le reste de la nappe, cette espèce pourra normalement survivre à la pollution.

En ce qui concerne les volumes de 1000 et 10 000 m³, l'entièreté de la nappe est soumise à une concentration entre 1 et 10 ppm. Cette concentration se maintient dans le centre de la nappe pendant plus de 48 h, cette région sera donc léthale pour le turbot. C'est aux extrémités de la nappe, où une concentration entre 1 et 10 ppm se maintient pendant moins de 48 h que le turbot aura une chance de survivre, à condition que la concentration soit bien inférieure à sa LC₅₀ de 4 ppm.

Le mélange Forties/Corexit 9500 a une toxicité léthale pour le turbot qui se situe entre 0 et 1 ppm, nous pouvons nous limiter à l'analyse les cartes de temps d'exposition supérieurs à 0 ppm (Figure 40).

Pour les trois volumes, tout comme pour l'huître, l'entièreté de la nappe contient au moins une concentration entre 0 et 1 ppm et le centre de la nappe sera une zone léthale, car la pollution se maintient pendant plus de 48 h. Ce sera vers les extrémités de la nappe où les concentrations se maintiennent pendant moins de 48h que le turbot pourra survivre si la concentration est inférieure à 4 ppm.

Conclusion

Nous pouvons conclure de cette brève analyse que selon le lieu où se trouvera l'espèce concernée (au centre de la pollution ou aux extrémités de la nappe), la marée noire sera léthale.

La position de l'espèce est importante car, si l'on prend l'exemple du turbot et du mélange de pétrole et de dispersant Kuwait/Corexit 9527, uniquement une zone de 12 sur 19 km sera réellement dangereuse pour l'espèce.

Il serait donc intéressant de réaliser une cartographie des espèces présentes en mer du Nord afin de mieux cibler la toxicité.

De plus, il serait nécessaire d'avoir plus de données de toxicité pertinentes pour effectuer une réelle analyse. Ces données doivent concerner les espèces présentes en mer du Nord et les produits qui peuvent y être déversés.

Remarquons qu'il n'est pas pertinent ici d'analyser les tests pour les dispersants seuls, car nous ne connaissons pas la concentration de dispersant utilisé, nous savons uniquement que 100% de la nappe de pétrole est dispersée. Il n'est également pas pertinent d'analyser la toxicité des pétroles seuls, car ici la nappe est dispersée et n'aura donc pas la même toxicité que si elle était concentrée.

3.4. Sensibilité au lieu de déversement

Cinq lieux de déversement ont été définis dans cette étude. Il n'est pas nécessaire d'analyser les concentrations et les temps d'exposition, car les résultats resteront dans les mêmes ordres de grandeur que pour la situation analysée en détail. Mais, il est intéressant de commenter la trajectoire de la nappe pour une question de gestion immédiate de la pollution. Un déversement de 100 m³ est pris en compte pour visualiser ces différentes trajectoires sous un vent du Sud-Ouest de 4,5 m/s.

3.4.1. Zone côtière orientale le long du port de Zeebruges

Lors d'un déversement de 100 m³ dans la zone côtière orientale le long du port de Zeebruges sous un vent du Sud-Ouest de 4,5 m/s, la nappe reste très concentrée autour de la zone de déversement (Figure 45). Celui-ci a lieu en plein centre d'une Zone de Protection Spéciale selon la Directive Oiseaux et aura donc d'importants impacts sur l'avifaune.

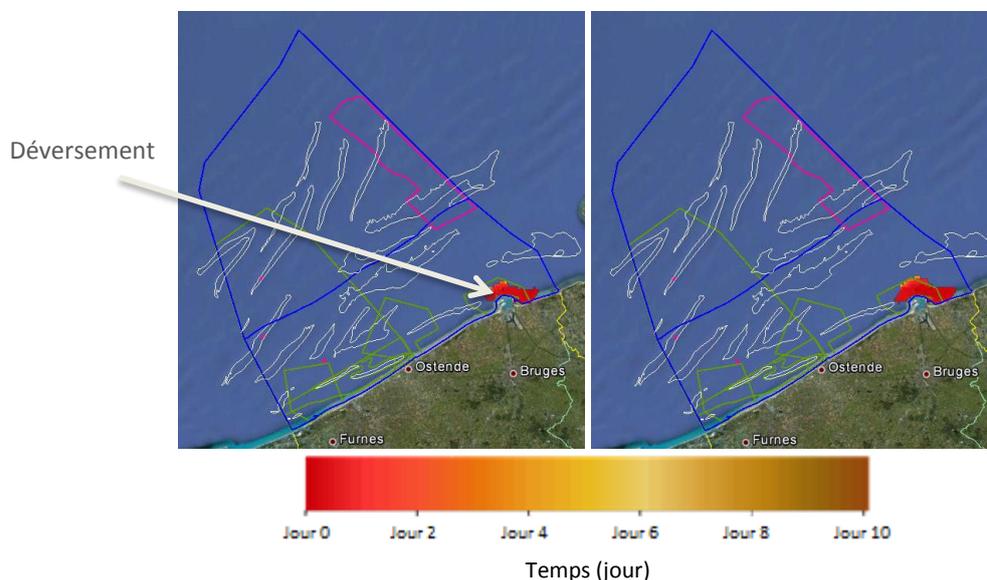


Figure 45 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m³ dans la zone côtière orientale le long du port de Zeebruges avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles ; en blanc, les bancs de sable et en vert les zones protégées.

Cette marée noire aura des effets négatifs sur le planctons, les poissons, les crustacés et tous les organismes vivants dans l'estran.

La dispersion géographique est faible en comparaison du déversement centré sur la zone du Westhinder (cas détaillé) comme le montre les cartes de la Figure 45. En effet, près de la côte, la profondeur et le courant sont relativement faibles. La pollution ne peut donc pas se mélanger à de grands volumes d'eau et dans ce cas, un dispersant chimique ne sera pas efficace.

Les plages seront touchées par la pollution, il faudra donc placer des barrages flottants pour les protéger et pour récupérer un maximum d'hydrocarbures avant d'organiser le nettoyage des plages si cela est nécessaire.

Aussi, le port de Zeebruges (Port of Zeebrugge, 2012) est un des ports les plus importants d'Europe et il est probable que cette pollution perturbe le trafic maritime ainsi que son importante activité de pêche.

3.4.2. Zone côtière occidentale le long de Nieuport

Lors d'un déversement de 100 m³ dans la zone côtière occidentale le long de Nieuport sous un vent du Sud-Ouest de 4,5 m/s, la nappe forme une ellipse allongée vers le Nord-Est de la zone de déversement et dépasse la ville d'Ostende (Figure 46).

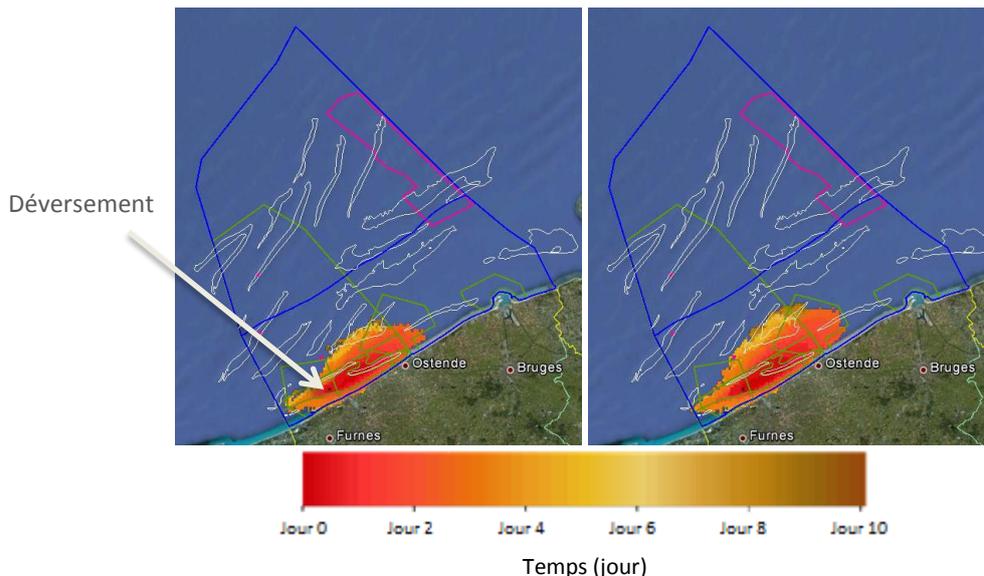


Figure 46 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m³ dans la zone côtière occidentale le long de Nieuport avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles ; en blanc, les bancs de sable et en vert les zones protégées.

Deux Zones de Protection Spéciale en mer selon la Directive Oiseaux, la Zone Spéciale de Conservation et la Zone d'importance internationale selon la convention de Ramsar sont polluées par ce déversement qui touchera donc de nombreux oiseaux dont des macreuses (*Melanitta nigra*).

La zone de mytiliculture la plus au Sud est également située dans les limites de la nappe d'hydrocarbures dispersée. Sans oublier les organismes benthiques qui seront impactés par la pollution dans le fond.

Contrairement à la situation précédente (déversement en zone côtière orientale au niveau du port de Zeebruges), la nappe est relativement dispersée. La concentration en surface sera donc moindre et l'impact sur l'avifaune pourrait être moins important que si la nappe n'était pas dispersée et restait presque totalement en surface.

Ici aussi, les activités des ports de Nieuport et d'Ostende risquent d'être perturbées.

3.4.3. Zone offshore orientale centrée autour du parc éolien C-Power

Lors d'un déversement de 100 m³ dans la zone offshore orientale centrée autour du parc éolien C-Power sous un vent du Sud-Ouest de 4,5 m/s, le nappes s'étend fortement vers le Nord-Est de la zone de déversement, parallèlement à la côte. La nappe s'étend plus loin dans la colonne d'eau que dans le fond. La majorité de la pollution atteint la ZEE néerlandaise (Figure 47).

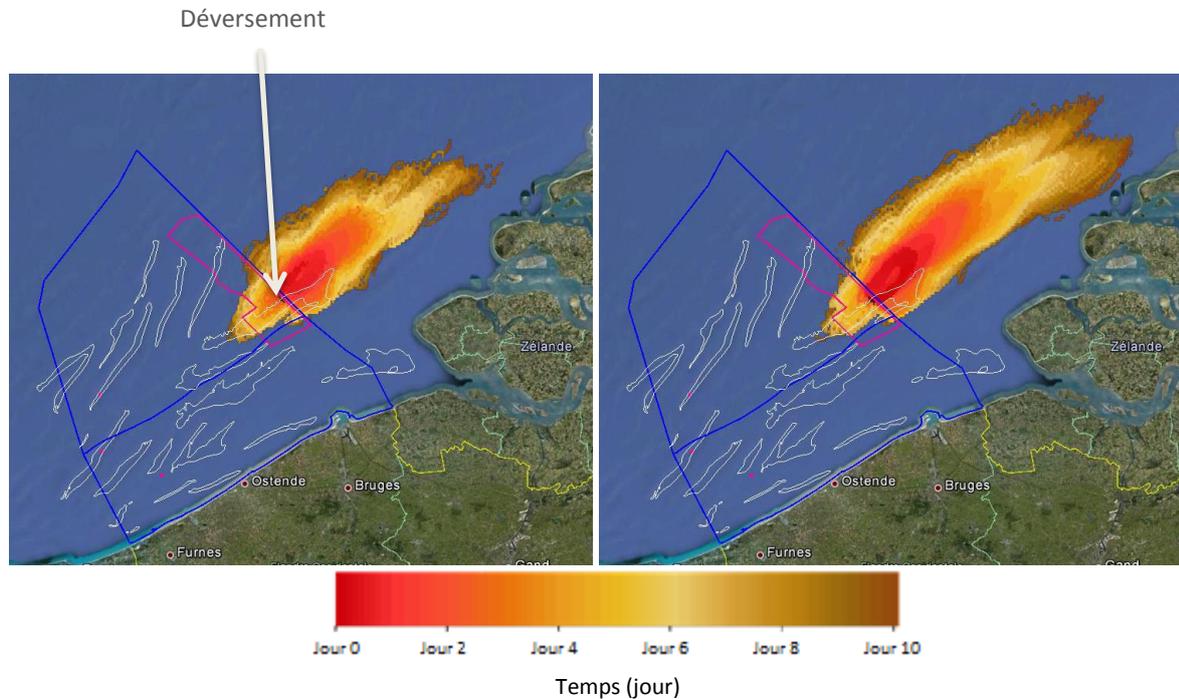


Figure 47 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m³ dans la zone offshore orientale centrée autour du parc éolien C-Power avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.

La future zone de mariculture au niveau de la zone d'éoliennes serait polluée. Les organismes se trouvant dans les bancs de sable, les larves, les oiseaux et la majorité des autres organismes se trouvant sur le chemin de cette longue nappe d'hydrocarbure seront touchés par la pollution.

Aussi, il est relativement difficile de naviguer au sein d'un champ d'éoliennes offshore, nous pouvons donc imaginer que des opérations de lutte telles que l'utilisation d'un barrage flottant seront difficiles à mettre en place.

3.4.4. Zone offshore centrée sur une route marchande

Lors d'un déversement de 100 m³ dans la zone offshore centrée sur une route marchande sous un vent du Sud-Ouest de 4,5 m/s, la pollution s'étend largement vers le Nord-Est de la zone de déversement. Les hydrocarbures seront dispersés sur une plus longue distance dans la colonne d'eau quand dans le fond (Figure 48).

Cette pollution est fort éloignée des côtes et impactera la ZEE néerlandaise et, dans une moindre mesure, la ZEE anglaise. Les organismes vivant dans les sédiments, les larbres, les oiseaux plongeurs, la mammifères et autres organismes se situant dans la zone impactée subiront les effets négatifs de la pollution.

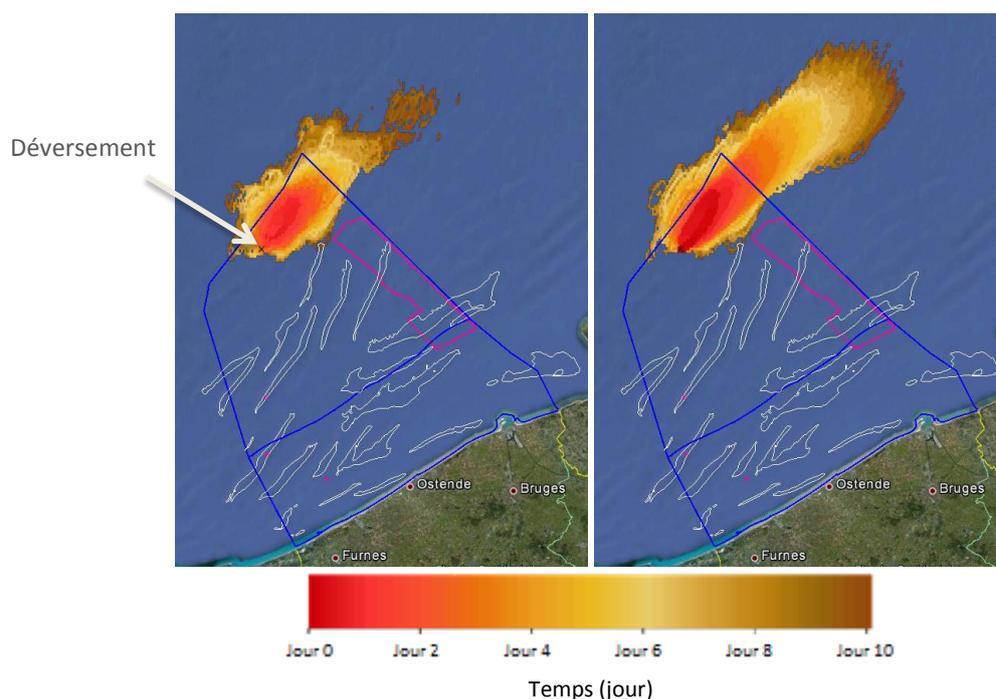


Figure 48 : Figure 49 : Logiciel OSERIT : Prédiction de la trajectoire du pétrole en jour après un déversement de 100 m³ dans la zone offshore centrée sur une route marchande avec un vent SO de 4,5 m/s, à gauche, dans le fond et, à droite, dans la colonne d'eau. En rose sont délimitées les zones de maricultures existantes et potentielles et en blanc, les bancs de sable.

Conclusion

Le logiciel OSERIT simule l'évolution physico-chimique d'une marée noire et permet de tester la pertinence d'une utilisation de dispersant chimique. Dans ce chapitre, c'est l'évolution d'hydrocarbures chimiquement dispersés dans la colonne d'eau qui a été simulée. Cinq sous-régions de la ZEE belge ont été considérées mais une seule a été détaillée, soit un déversement de 100 m³ dans la zone du Westhinder, c'est-à-dire au-delà de la mer territoriale, sous un vent Sud-Ouest de 4,5 m/s.

Le modèle a simulé les trajectoires dans le fond et dans la colonne d'eau ainsi que les concentrations au cours du temps, les maxima de concentration et les temps d'exposition de plus de 0, 1, 10, 100 et 1000 ppm dans le fond, la colonne d'eau et la surface.

Les résultats suggèrent que la nappe se déplace parallèlement à la côte en direction du Nord-Est de la ZEE belge jusqu'à impacter la future zone de mariculture au niveau des parcs éoliens et pénétrer la ZEE néerlandaise. Dans le fond, une concentration entre 0 et 10 ppm pourra se maintenir pendant 96 h. Dans la colonne d'eau, une concentration entre 10 et 100 ppm subsistera pendant maximum 6 h. Et à la surface, une concentration entre 100 et 1000 ppm pourra persister pendant maximum 6 h.

Presque un tiers de la ZEE belge sera polluée. Cette pollution aura des effets négatifs sur la mytiliculture, les organismes benthiques, les zones de frayère et d'alevinage et dans une moindre mesure, sur les oiseaux plongeurs et les mammifères qui pourraient se trouver dans la zone.

Les activités économiques ne seront pas épargnées et subiront également des dommages. Notamment, les activités portuaires seront perturbées et la pêche devra être interdite car les organismes marins seront contaminés, ce qui provoquera une diminution du revenu des pêcheurs.

Ces données permettent d'évaluer l'impact écologique de ce déversement sur l'huître creuse et sur le turbot avec pour conclusion que les mélanges de pétrole et de dispersant testés, soit Forties/Corexit 9527, Kuwait/Corexit 9527 et Medium Fuel Oil/Corexiti 9527 pour l'huître et les mélanges Kuwait/Corexit 9527 et Forties/Corexit 9500 pour le turbot, sont létaux pour ces espèces selon où elles se situent.

Cependant, pour effectuer une réelle analyse des toxicités en regard des résultats de ces simulations, il serait nécessaire de réaliser des tests de toxicité plus pertinents. C'est-à-dire des tests en lien avec la ZEE belge qui concerneraient donc les espèces présentes mais également les produits qui pourraient être déversés dans la zone. Pour être encore plus précis, il serait nécessaire de localiser les espèces afin de mieux comparer les effets et les zones polluées.

Conclusion générale

Malgré les catastrophes dues au transport maritime, l'économie mondiale actuelle est toujours basée sur l'industrie pétrolière. Les effets de ces pollutions sont difficilement mesurables et il faut des années pour pouvoir évaluer les dommages écologiques réels. Les impacts d'une catastrophe comme une marée noire doivent être analysés avec un esprit scientifique.

Nous savons que la ZEE belge est une zone intensément utilisée et qu'il est nécessaire de se préparer en cas de catastrophe maritime. L'urgence est dans l'imminence des menaces potentielles. Dès lors, quand une de ces pollutions se révèle, des moyens d'interventions efficaces et rapides sont nécessaires. C'est à cette fin que des outils de modélisation sont développés et plus particulièrement le modèle OSERIT décrit dans ce mémoire de fin d'étude.

L'analyse réalisée ici n'a pas permis d'estimer un volume maximum d'hydrocarbure que l'on pourrait disperser chimiquement sans impacter l'écosystème, mais elle ouvre la marche à suivre afin de définir ce volume. Nos recommandations sont de :

- recenser les pétroles et dispersants susceptibles d'être répandus dans la ZEE belge
- effectuer des tests de toxicité ciblés sur les espèces présentes dans la ZEE belge et sur les produits susceptibles d'être répandus dans la zone
- réaliser une cartographie des espèces présentes dans la ZEE belge

Une fois ces données collectées, il faudra les comparer à des simulations réalisées à l'aide du modèle OSERIT. Afin de mieux visualiser la toxicité des produits sur les espèces, il serait imaginable de réaliser des cartes de toxicité spécifiques à la ZEE belge basées sur le classement GESAMP.

Pour conclure, les impacts réels des marées noires ne sont encore que trop méconnus et ne sont pas suffisamment importants pour les industries, pour que le système soit modifié en profondeur. Pourtant, l'emballement des médias et des populations locales est de plus en plus vif et ouvre une porte au changement.

C'est par la gestion de l'environnement et les changements de mentalités que le développement pourra se faire de manière durable. Et c'est là que le logiciel OSERIT occupera certes un petit créneau dans l'échelle des remèdes mais combien indispensable.

Bibliographie

- Accord de Bonn, (2010), « Accord de Bonn », En ligne, <http://www.bonnagreement.org/>, dernière consultation le 19 juillet 2012
- Aquatic Testing Laboratories, (1994), Abalone larval development short term toxicity test for oil spill cleanup agents, *Laboratory report*, Ventura, CA
- Arrêté ministériel du 11 juin 1999 portant désignation de l'autorité compétente pour donner l'autorisation d'utiliser des produits chimiques dans les espaces marins pour lutter contre la pollution et l'abandon d'objets dans les espaces marins après utilisation, M.B. du 7 août 1999, p. 29706
- BACA B.J., GETTER C.D., (1984) The toxicity of oil and chemically dispersed oil to the seagrass *Thalassia testudinum*, In : Allen T.E. (Ed.), *Oil Spill Chemical Dispersants: Research, Experience, and Recommendations*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 314-323
- BEAUPOIL C., NEDELEC D., (1994) Etude de la toxicité du produit de lavage Corexit® 9500 vis-à-vis de la crevette blanche *Palaemonetes varians*, *Laboratoire de Biologie Marine*, Concarneau, France, pp. 1-5
- BMDC, s.d., « Belgian Marine Data Centre - Databases and tools », En ligne, <http://www.mumm.ac.be/datacentre/>, Dernière consultation le 7 août 2012
- BONNIEUX F. et RAINELLI R., (2002), Évaluation des dommages des marées noires : une illustration à partir du cas de l'Erika et des pertes d'agrément des résidents, *Économie et statistique*, n° 357-358, pp. 173-187
- BRICENO J., MCKEE W.J., CLARK J.R., WHITING D.D., (1992), Relative sensitivity of Gulf of Mexico species and national test species in acute toxicity tests with dispersants. Poster presentation, In : *Thirteenth Annual Meeting, Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, Cincinnati, OH
- BURGHERR P., (2007), In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources, *Journal of Hazardous Materials*, n° 140, pp. 245–256
- BURRIDGE T.R., SHIR M., (1995), The comparative effects of oil, dispersants, and oil/dispersant conjugates on germination of marine macroalga *Phyllospora comosa* (Fucales: Phaeophyta), *Marine Pollution Bulletin*, n° 31, pp. 446-452
- Cedre, (2004), « Tricolor », En ligne, <http://www.cedre.fr/fr/accident/tricolor/tricolor.php>, dernière consultation le 28 juillet 2012
- Cedre, (2009), « L'observation aérienne des pollutions pétrolières en mer – Guide opérationnel », En ligne, <http://www.cedre.fr/fr/publication/guides/observation-aerienne.pdf>

- Cedre, s.d. (1), « Classement alphabétique des accidents », En ligne, <http://www.cedre.fr/fr/accident/classement-alphabetique.php>, dernière consultation le 7 juillet 2012
- Cedre, s.d. (2), « Le polluant », En ligne, <http://www.cedre.fr/fr/lutte/lutte-terre/polluant.php>, dernière consultation le 7 juillet 2012
- Cedre, s.d. (3), « Mieux comprendre les marées noires – Altération du goût et de l'odeur », En ligne, <http://www.marees-noires.com/fr/impact/impact-faune-flore/alteration-gout-odeur.php>, dernière consultation le 3 mai 2012
- CLARK J.R., BRAGIN G.E., FEBBO E.J., LETINSKI D.J., (2001), Toxicity of physically and chemically dispersed oils under continuous and environmentally realistic exposure conditions: applicability to dispersant use decisions in spill response planning, *International Oil Spill Conference*, pp. 1249-1255
- COELHO, G.M., AURAND, D.V., (1997) In : *Proceedings of the Sixth Meeting of the Chemical Response to Oil Spills : Ecological Effects Research Forum*, Ecosystem Management and Associates, Purcellville, VA
- DAAN N., BROMLEY P.J., HISLOP J.R.G., NIELSEN N.A., (1990), Ecology of North Sea Fish, *Netherlands Journal of Sea Research*, n° 26 2-4, pp. 343-386
- DAVIES A.M., (1977), Three-Dimensional Model with Depth-Varying Eddy Viscosity, *Elsevier Oceanography Series*, n° 19, pp. 27-48
- DEGRAER S., VAN LANCKER V., MOERKERKE G., VAN HOEY G., VANSTAEN K., VINCX M., HENRIET J.-P., (2003), Evaluation of the ecological value of the foreshore : habitat-model and macrobenthic side-scan sonar interpretation : extension along the Belgian Coastal Zone, *Final report*, Ministry of the Flemish Community, Environment and Infrastructure Department, Waterways and Marine Affairs Administration, Coastal Waterways.
- DEGREARER, S., *et al.*, (2006), « L'atlas du macrobenthos de la partie belge de la mer du Nord », Politique Scientifique Fédérale, Bruxelles, 163 pages
- DEGRAER S., VERFAILLIE E., WILLEMS W., ADRIAENS E., VINCX M., VAN LANCKER V., (2008), Habitat suitability modelling as a mapping tool for macrobenthic communities : An example from the Belgian part of the North Sea, *Continental Shelf Research*, n°28, pp. 369-379
- DEWICKE A., CATTRIJSE A., MEES J., VINCX M., (2003), Spatial patterns of the hyperbenthos of subtidal sandbanks in the southern North Sea, *Journal of Sea Research*, n° 49-1, pp. 27-45
- DUVAL, W.S., HARWOOD, L.A., FINK, R.P., (1982), The sublethal effects of dispersed oil on an estuarine isopod, *Technology Development Report*, EPS-4-EC-82-1, Environment Canada, Ottawa

- Environment Canada, (1994), Laboratory aquatic toxicity data for Corexit 9500, File 4808-13-1, 27 April, Ottawa, Ont
- Environment Canada (2001), « Environmental Technology Centre - Oil Properties », En ligne, <http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/oilproperties/>, dernière consultation le 7 août 2012
- Environnement Canada, (2006), « Effets sur la faune et les poissons », En ligne, <http://www.ec.gc.ca/ee-ue/default.asp?lang=Fr&n=0BB98D3F>, dernière consultation le 3 juillet 2012
- État belge, (2012), « Évaluation initiale pour les eaux marines belges. Directive-cadre Stratégie pour le milieu marin - Art 8, paragraphes 1a & 1b », UGMM, Service Public Fédéral Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, Bruxelles, Belgique, 82 pages
- EUROPA, s.d., « Habitats naturels (Natura 2000) », En ligne, http://europa.eu/legislation_summaries/environment/nature_and_biodiversity/l28076_fr.htm, dernière consultation le 10 février 2012
- Exxon Biomedical Sciences Inc., (1992), Microtox toxicity tests. Test material : Corexit 9527, East Millstone, NJ
- Exxon Biomedical Sciences Inc., (1993 (1)), Mysid acute toxicity test. Flowthrough continuous exposure with *Mysidopsis bahia*. Test material : Corexit 9527, East Millstone, NJ
- Exxon Biomedical Sciences Inc., (1993 (2)), Mysid acute toxicity test. Continuous exposure with *Holmesimysis costata*. Test material : Corexit 9527, East Millstone, NJ
- Exxon Biomedical Sciences Inc., (1993 (3)), Mysid acute toxicity test. Flowthrough continuous exposure with *Holmesimysis costata*. Test material : Corexit 9527, East Millstone, NJ
- Exxon Biomedical Sciences Inc., (1993 (4)), Fish acute toxicity test ow-through continuous exposure with *Menidia beryllina*. Test material : Corexit 9527, East Millstone, NJ
- FOY M.G., (1982), Acute lethal toxicity of Prudhoe Bay Crude oil and Corexit 9527 to Arctic marine fish and invertebrates, *Technology Development Report*, EPS 4-EC-82-3, Environment Canada, Ottawa
- FUCIK K.W., CARR K.A., BALCOM B.J., (1995), Toxicity of oil and dispersed oil to the eggs and larvae of seven marine fish and invertebrates from the Gulf of Mexico, In : Lane, P. (Ed.), *The Use of Chemicals in Oil Spill Response*, American Society for Testing and Materials, PA, pp. 135-171
- FULLER C., BONNER J.S., (2001), Comparative Toxicity of Oil, Dispersant and Dispersed Oil to Texas Marine Species, In *Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference*, Tampa, Florida, American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 1243–1248
- GARTHE S., CAMPHUYSEN K., FURNESS R.W., (1996), Amounts of discards by commercial fisheries and their significance as food for seabirds in the North Sea, *Marine Ecology Progress Series*, n° 136, pp. 1–11

- Google Earth, (2012), Disponible sur <http://www.google.fr/earth/index.html>
- GREGG R., WALROND C., (2009), Oil and gas, *Te Ara - the Encyclopedia of New Zealand*, En ligne, <http://www.TeAra.govt.nz/en/oil-and-gas/1/1>, dernière consultation le 15 juillet 2012
- GULEC I., HOLDAWAY D.A., (2000), Toxicity of crude oil and dispersed crude oil to ghost shrimp *Palaemon serenus* and larvae of Australian Bass *Macquaria novemaculeata*, *Environmental Toxicology*, n° 15, pp. 91–98
- GULEC I., LEONARD B., HOLDAWAY D.A., (1997), Oil and Dispersed Oil Toxicity to Amphipods and Snails, *Spill Science and Technology Bulletin*, n° 4, pp. 1–6
- GULEC I., LEONARD B., HOLDWAY D.A., (1994), Oil and dispersed oil toxicity to amphipods and snails, *Spill Science & Technology Bulletin*, n°4, pp. 1-6
- HAELTERS J., KERCKHOF F., STIENEN E., (2003), Het TRICOLOR incident - de gevolgen voor zeevogels in de Belgische zeegebieden, *KBIN/BMM*, 36 pages, En ligne, http://www.mumm.ac.be/Downloads/tricolor_brochure.pdf, dernière consultation le 28 juillet 2012
- HARTWICK E.B., WU R.S.S., PARKER D.B., (1982), Effects of a crude oil and an oil dispersant Corexit 9527 on populations of the littleneck clam *Protothaca staminea*, *Marine Environment Ressource*, n° 6, pp. 291-306.
- HEMMER M.J., BARRON M.G., GREENE R.M., (2010), Comparative Toxicity of Eight Oil Dispersant Products on Two Gulf of Mexico Aquatic Test Species, *U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development*, pp. 1-11
- HOFFMAN D.J., RATTNER B.A., BURBON G.A., CAIRNS J., (1995), « Handbook of ecotoxicology », Lewis Publishers/CRC Press, First edition, USA, 680 pages
- IMO, FAO, UNESCO-IOC, WMO, WHO, IAEA, UN, UNEP, (2002), The Revised GESAMP Hazard Evaluation Procedure for Chemical Substances Carried by Ships, *GESAMP Reports and Studies*, n° 64, En ligne, http://www.jodc.go.jp/info/ioc_doc/GESAMP/GESAMP64.pdf, dernière consultation le 15 juillet 2012
- Inchcape Testing Services, (1995), Laboratory test data for Corexit 9500 and Corexit 9527, Houston, Texas
- IPIECA, (2000), Choosing spill response options to minimize damage - Net Environmental Benefit Analysis, *IPIECA Report Series*, n° 10, 24 pages, En ligne, http://www.ipieca.org/sites/default/files/publications/Vol10_NEBA_1.pdf, dernière consultation le 1 novembre 2011
- JACQUES T., 2010, Formation pour l'équipe de surveillance aérienne Surv sur les impacts écologiques des marées noires, UGMM

- KERCKHOF F., HOUZIAUX J-S., (2003), Biodiversity of the Belgian marine areas, In PEETERS M., FRANKIJN A., VAN GOETHEM J.L., (2003), *Biodiversity in Belgium, Biodiversity of the Regions and North Sea*, RBINS, Bruxelles, 416 pages, pp. 350-385
- LACROIX G., RUDDICK K., OZER J., LANCELOT C., (2004), Modelling the impact of the Scheldt and Rhine/Meuse plumes on the salinity distribution in Belgian waters (Southern North Sea), *Journal of Sea Research*, n° 52, pp. 149-163
- LAGRING R., DEGREAR, S., DE MONTPELLIER G., JAKES T., VAN ROY W., SCHALLIER R., (2012), Twenty years of Belgian North Sea aerial surveillance : A quantitative analysis of results confirms effectiveness of international oil pollution legislation, *Marine Pollution Bulletin*, n° 64-3, pp. 644-652
- LANCELOT C., MATHOT S., (1987), Dynamics of a *Phaeocystis*-dominated spring bloom in Belgian coastal waters. 1. Phytoplanktonic activities and related parameters, *Marine Ecology Progress Series*, n° 37, pp. 239-248
- LASSUS P., MICHEL P., MAGGI P., (1982), Toxicité des hydrocarbures solubles du 'GINO', *Archimer*, 11 pages
- LEGRAND S., DULIERE V., (2011), OSERIT : a downstream service dedicated to the Belgian Coast Guard Agencies, *EuroGOOS Conference 2011*, pp. 1-8
- LESSARD R.R., (1995), Personal communication, Exxon Research and Engineering Company, Florham Park, NJ (17 January and 4 May, 1995), In CLARK J.R. *and al.* (2001)
- Loi du 20 janvier 1999 visant la protection du milieu marin dans les espaces marins sous juridiction de la Belgique, M.B du 12 mars 1999, p.08033, En ligne, http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/loi_a.pl?language=fr&caller=list&cn=1999012033&la=f&fromtab=loi&sql=dt=%27loi%27&tri=dd+as+rank&rech=1&numero=1, dernière consultation le 30 mars 2012
- LONG S.M., HOLDAWAY D.A., (2002), Acute toxicity of crude and dispersed oil to *Octopus pallidus* (Hoyle, 1885) hatchlings, *Water Research*, n° 36, pp. 2769–2776
- LUYTEN P., (2011), COHERENS – a coupled hydrodynamic - ecological model for regional shelf seas : user documentation, Version 2.0, *MUMM report*, Royal Belgian Institute for Natural Sciences, 1203 pages
- M'HARZI A., TACKX M., DARO M.H., KESAULIA I., CATURAO R., PODOOR N., (1998), Winter distribution of phytoplankton and zooplankton around some sandbanks of the Belgian coastal zone, *Journal of Plankton Research*, n°20-11, pp. 2031-2052

- MAES F., LE ROY D., (2006), "RAMA – Risk analysis of marine activities in the Belgian part of the North sea", Politique scientifique fédérale, 204 pages, En ligne,
http://www.belspo.be/belspo/organisation/Publ/pub_ostc/EV/rappEV36_en.pdf, dernière consultation le 8 juillet 2012
- MAES F., SCHIJVERS J., VANHULLE A., (2005), « Un océan d'espace – Vers un plan de structure d'aménagement pour la gestion durable de la mer du Nord – GAUFRE », Politique Scientifique Fédérale, 208 pages, En ligne,
http://www.belspo.be/belspo/organisation/publ/pub_ostc/MA/GaufreZVR_fr.pdf, dernière consultation le 8 juillet 2012
- Marine and Freshwater Resources Institute, (1998), Toxicity and effectiveness of the oil spill dispersant Corexit 9500, *Laboratory report*, Queenscliff, Australia.
- MEDESS-4MS, s.d., « Mediterranean Decision Support System for Marine Safety - Project outline », En ligne,
http://oceania.research.um.edu.mt/cms/MEDESS4MS/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=102, dernière consultation le 23 juillet 2012
- MERLIN F.-X., (2005), « Traitement aux dispersants des nappes de pétrole en mer - Traitements par voie aérienne et par bateau – Guide opérationnel », Cedre, 54 pages, En ligne,
<http://www.cedre.fr/fr/lutte/prod/dispersant.pdf>, dernière consultation le 1 novembre 2011
- MITCHELL F.M., HOLDAWAY D.A., (2000), The acute and chronic toxicity of the dispersants Corexit 9527 and 9500, water accommodated fraction (WAF) of crude oil and dispersant enhanced WAF (DEWAF) to *Hydra viridissima* (green hydra), *Water Research*, n° 34, pp. 343–348
- National Research Council, (1989), « Using Oil Spill Dispersants on the Sea », National Academy Press, Washington, DC (Chapter 3)
- Nations Unies, (1994), « Convention des Nation Unies sur le droit de la mer », En ligne,
<http://www.un.org/french/law/los/unclos/closindx.htm>, dernière consultation le 5 juillet 2012
- Norwegian Institute for Water Research, (1994), Marine algal growth inhibition test, *Laboratory Report*, Oslo, Norway
- ORDSIE C.J., GAROFALO G.C., (1981), Lethal and sublethal effects of short term acute doses of Kuwait crude oil and a dispersant Corexit 9527 on bay scallops *Argopecten irradians* and two predators at different temperatures, *Marine Environmental Research*, n° 5, pp. 195-210
- OTITOLOJU A.A., (2005), Crude oil plus dispersant: Always a boon or bane?, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, n° 60-2, pp. 198-202
- PACE C.B., CLARK J.R., (1993), Evaluation of a toxicity test method used for dispersant screening in California, *MSRC Technical Report Series*, n° 93-028, Marine Spill Response Corp., Washington, DC

- PERKINS R.A., RHOTON S., BEHR-ANDRES C., (2005), Comparative Marine Toxicity Testing: A Cold-Water Species and Standard Warm-Water Test Species Exposed to Crude Oil and Dispersant, *Cold Regions Science and Technology*, n° 42, pp. 226-236
- Peter Fisk Associates, s.d., « Glossary of terms and abbreviations », En ligne, <http://www.ecotoxchem.co.uk/downloads/glossary.pdf>, dernière consultation le 22 mars 2012
- Port of Zeebrugge, 2012, En ligne, <http://www.portofzeebrugge.be>, dernière consultation le 14 août 2012
- QABAZARD H., (2009), Annual Statistical Bulletin, *Organization of the Petroleum Exporting Countries*, 106 pages, En ligne, http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2009.pdf, dernière consultation le 20 juillet 2012
- RAMADE F., (2000), « Dictionnaire encyclopédique des pollutions », EDISCIENCE internationale, Paris, 689 pages
- RAMADE F., (2007), « Introduction à l'écotoxicologie – Fondements et applications », Ed. TEC&DOC, Paris, 618 pages
- Ramsar, s.d., « La Convention de Ramsar et sa mission », En ligne, http://www.ramsar.org/cda/fr/ramsar-about-mission/main/ramsar/1-36-53_4000_1__, dernière consultation le 5 juillet 2012
- RBN – Regionaal Beheersteam Noordzeerampen, (2009), Rampenplan voor de Noordzee, 90 pages, En ligne, http://www.noordzeeloket.nl/Images/Rampenplan%20vd%20Noordzee%202009%20drukversie_tcm14-4410.pdf, dernière consultation le 2 août 2012
- RHOTON S.L., PERKINS R.A., BRADDOCK J.F., BEHR-ANDRES C., (2001), A cold-weather species' response to chemically dispersed fresh and weathered Alaska North Slope crude oil, In *Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference*, Tampa, Florida, American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 1231–1236
- ROUSSEAU V., BRETON E., DE WACHTER B., BEJI A., DECONINCK M., HUIJGHAND J. *et al.*, (2004), Identification of Belgian maritime zones affected by eutrophication (IZEUT). Towards the establishment of ecological criteria for the implementation of the OSPAR Common Procedure to combat eutrophication, Belgian Science Policy, Brussels, Final report, 77 pages
- SEYS J., (2001), « Sea- and coastal bird data as tools in the policy and management of Belgian marine waters », PhD thesis Ghent University, 133 pages
- SINGER M.M., GEORGE S., JACOBSON S., LEE I., WEETMAN L.L., TJEERDEMA R.S., SOWBY M.L., (1996), Comparison of acute aquatic effects of the oil dispersant Corexit 9500 with those of other Corexit series dispersants, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, n° 35, pp. 183-189

- SINGER M.M., GEORGE S., LEE I., JACOBSON S., WEETMAN L.L., BLONDINA G., TJEERDEEMA R.S., AURAND D., SOWBY M.L., (1998), Effects of dispersant treatment on the acute toxicity of petroleum hydrocarbons, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, n° 34 -2, pp. 177–187
- SINGER M.M., SMALHEER D.L., TJEERDEEMA R.S., MARTIN M., (1990), Toxicity of an oil dispersant to the early life stages of four California marine species, *Environmental Toxicology and Chemistry*, n° 9, pp. 1389-1397
- SINGER M.M., SMALHEER D.L., TJEERDEEMA 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*, n° 10, pp. 1367-1374
- SLADE G.J., (1982). Effect of Ixtoc I crude oil and Corexit 9527 on spot (*Leiostomus xanthurus*) egg mortality, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, n° 29, pp. 525-530
- SPF DG Environnement, 2006, « Operationele Interventieplannen voor pollutiebestrijding op zee », 77 pages
- SPF Economie (1), s.d., « Développement de l'exploitation des sources d'énergie renouvelable en mer du Nord », En ligne, http://economie.fgov.be/fr/consommateurs/Energie/Energies_renouvelables/Eolien_offshore/, dernière consultation le 7 juillet 2012
- SPF Economie (2), s.d., « Extraction de sable et de gravier en mer », En ligne, http://economie.fgov.be/fr/entreprises/domaines_specifiques/Extraction_sable_gravier_mer/, dernière consultation le 7 juillet 2012
- SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, DG Environnement, (2010), « Rapport fédéral en matière d'environnement 2004-2008 », 548 pages, En ligne, http://fed-health-env.be/docs/wp-content/uploads/2010/11/Rapport_RFE_FR.pdf, dernière consultation le 19 juillet 2012
- STEENHOUT A., (2011-2012), « Cours d'écotoxicologie ENVI-F-513 », Université Libre de Bruxelles, Faculté des sciences, Institut pour la Gestion de l'Environnement et l'Aménagement du Territoire, 339 pages
- TOUTAIN C., (2004), « Prévenir les catastrophes écologiques ? Les marées noires », Les essentiels Milan, Toulouse, 63 pages
- TROYAT J-D., s.d., « Dossier juridique - Pollution par hydrocarbures et transport maritime », En ligne, http://www.afcan.org/dossiers_juridiques/pollution_transport.html, dernière consultation le 15 juin 2012
- UGMM, (2008), « Exercice de lutte contre les pollutions », En ligne, <http://alpha2.mumm.ac.be/FR/News/index.php?page=28&total=154>, dernière consultation le 22 juillet 2012

UGMM, s.d., « Unité de Gestion du modèle mathématique de la mer du Nord et de l'estuaire de l'Escaut », En ligne, <http://www.mumm.ac.be/>, dernière consultation le 20 juillet 2012

UNEP GPA, s.d., « MARPOL », En ligne, <http://marine-litter.gpa.unep.org/framework/global-next.htm#marpol>, dernière consultation le 19 juillet 2012

United States Testing Company Inc., (1994), Report No. 066234

VAN HOEY G., DEGRAER S., VINCX M., (2004), Macrobenthic communities of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 59, pp. 601-615

VENTURA, C., GIRIN, M., RAOUL-DUVAL, J., (2005), « Marées noires et environnement », Institut Océanographique, Paris, 407 pages

WALSH, M.A., 1995. Personal communication, Nalco/Exxon Energy Chemicals, L.P. Sugar Land, Texas (June 7), In CLARK J.R. *and al.* (2001)

WELLS P., DOE K.G., (1976), Results of the E.P.S. oil dispersant testing program : concentrates, effectiveness testing, and toxicity to marine organisms, *Spill Technology Newsletter*, n° 1, pp. 9-16

WELLS P.G., ABERNETHY S., MACKAY D., (1982), Study of oil water partitioning of a chemical dispersant using an acute bioassay with marine crustaceans, *Chemosphere*, n° 11, pp. 1071-1086

WOOTEN K.J., FINCH B.E., SMITH P.N., (2012), Embryotoxicity of Corexit 9500 in mallard ducks (*Anas platyrhynchos*), *Ecotoxicology*, n° 21-3, pp. 662-666

WRIGHT D.A., COEHLO G.M., (1996), Dispersed oil and dispersant fate and effects research : MD program results for 1995, *MSRC Technical Report Series*, n° 95-013, Draft report, Marine Spill Response Corp., Washington DC

Annexe

Tableau : Données de toxicité des pétroles et des dispersants sur les organismes aquatiques

	Classe GESAMP	Produit testé	Nom commun	Nom latin	Durée d'exposition (h)	Paramètre	ppm	Référence
Espèces présentes en mer du Nord								
Zooplankton	3	Corexit® 9500	Copépode (adulte)	<i>Eurytemora affinis</i>	96	LC ₅₀	5.2	Wright and Coehlo (1996)
Crustacé	0	Corexit® 9500	Crevette blanche	<i>Palaemonetes varians</i>	6	LC ₅₀	8103	Beaupoil and Nedelec (1994)
	1	Carbon black oil	Crevette grise	<i>Crangon crangon</i>	96	LD ₅₀	750-1500	Lassus et al. (1982)
Mollusque	0	Carbon black oil	Moule commune	<i>Mytilus edulis</i>	96	LD ₅₀	>12000	Lassus et al. (1982)
	0	Medium Fuel Oil	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	>1108	Clark et al. (2001)
	2	Forties + C9500	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	34.4	Clark et al. (2001)
	2	Kuwait + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	29.7	Clark et al. (2001)
	2	MFO + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LL ₅₀	23	Clark et al. (2001)
	3	Corexit® 9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	3.09	Clark et al. (2001)
	3	Medium Fuel Oil	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	>1.14	Clark et al. (2001)
	4	Forties + C9500	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	0.81	Clark et al. (2001)
	4	MFO + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	0.53	Clark et al. (2001)
	4	Kuwait + C9527	Huître creuse	<i>Crassostrea gigas</i>	48	LC ₅₀	0.5	Clark et al. (2001)
Poisson	1	Forties	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LL ₅₀	156	Clark et al. (2001)
	1	Kuwait + C9527	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LL ₅₀	138	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9500	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	74.7	Clark et al. (2001)
	2	Forties + C9500	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LL ₅₀	36.2	Clark et al. (2001)
	3	Kuwait + C9527	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	2	Clark et al. (2001)
	4	Forties + C9500	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	0.44	Clark et al. (2001)
	4	Forties	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	48	LC ₅₀	0.35	Clark et al. (2001)
	0	Carbon black oil	Civelle (post-larve)	<i>Anguilla anguilla</i>	96	LD ₅₀	>12000	Lassus et al. (1982)

Espèces absentes en mer du Nord								
Bactérie	1	Corexit® 9500	Bactérie	<i>Vibrio fisheri</i>	0.25	EC ₅₀	104-242	Fuller and Bonner (2001)
	3	Corexit® 9527	Bactérie	<i>Vibrio fisheri</i>	0.25	EC ₅₀	4.9-12.8	George-Ares et al. (1999); Exxon Biomedical Sciences (1992)
Zooplankton	3	Corexit® 9527	Copépode	<i>Pseudocalanus minutus</i>	48	LC ₅₀	8-12	Wells et al. (1982)
	3	Corexit® 9527	Copépode	<i>Pseudocalanus minutus</i>	96	LC ₅₀	5-25	Wells et al. (1982)
Cnidaire	1	Corexit® 9527	Hydre verte	<i>hydra viridissima</i>	96	LC ₅₀	230	Mitchell et al. (2000)
	2	Corexit® 9527	Hydre verte	<i>hydra viridissima</i>	168	NOEC	<15	Mitchell et al. (2000)
Algue	2	Corexit® 9500	Diatomée	<i>Skeletonema costatum</i>	72	EC ₅₀	20	Norwegian Institute for Water Research (1994)
	4	Corexit® 9500	Algue brune (zygote)	<i>Phyllospora comosa</i>	48	EC ₅₀	0.7	Burrige and Shir (1995)
Herbe de mer	1	Corexit® 9527	Herbe à tortue	<i>Thalassia testudinum</i>	96	LC ₅₀	200	Baca and Getter (1984)
Macroalgue	2	Corexit® 9527	Varech géant (zoospores)	<i>Macrocystis pyrifera</i>	/	IC ₅₀	86.6-102	Singer et al. (1991)
	2	Corexit® 9527	Algue brune	<i>Phyllospora comosa</i>	48	EC ₅₀	30	Burrige and Shir (1995)
	2	Corexit® 9527	Varech géant (zoospores)	<i>Macrocystis pyrifera</i>	/	NOEC	12.2-16.4	Singer et al. (1991)
	3	Corexit® 9527	Varech géant (zoospores)	<i>Macrocystis pyrifera</i>	48	NOEC	1.3-2.1	Singer et al. (1990, 1991)
Crustacé	0	Corexit® 9527	Isopode	<i>Gnorimospaeroma oregonensis</i>	96	LC ₅₀	>1000	Duval et al. (1982)
	1	Corexit® 9500	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	/	LC ₅₀	>789-1038	Coehlo and Aurand (1997)
	1	Corexit® 9527	Crevette	<i>Palaemonetes pugio</i>	96 (17°C)	LC ₅₀	840	National Research Council (1989)
	1	JD-2000	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	788	Hemmer et al. (2010)
	1	Alaska North Slope oil	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96 (25°C)	LL ₅₀	654	Perkins et al. (2005)
	1	Corexit® 9527	Crevette	<i>Palaemonetes pugio</i>	96 (27°C)	LC ₅₀	640	National Research Council (1989)
	1	Kuwait	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LL ₅₀	618	Clark et al. (2001)

	1	Corexit® 9500	Crabe tanner (larve)	<i>Chionocetes bairdi</i>	/	EC ₅₀	355	Rhoton et al. (2001)
	1	Alaska North Slope oil	Crabe tanner (larve)	<i>Chionocetes bairdi</i>	(7°C)	EL ₅₀	285	Perkins et al. (2005)
	1	Corexit® 9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	/	LC ₅₀	195	Georges-Ares and Clark (2000), Clark et al. (2001)
	1	Wheathe red Kuwait	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LL ₅₀	184	Clark et al. (2001)
	1	Corexit® 9527	Amphipode	<i>Boeckosimus sp.</i>	96	LC ₅₀	>175	Foy (1982)
	1	Corexit® 9500	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	/	LC ₅₀	158-245	Singer et al. (1996)
	1	Corexit® 9527	Amphipode	<i>Anonyx laticoxae</i>	96	LC ₅₀	>140	Foy (1982)
	1	Corexit® 9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	/	LC ₅₀	120-163	Singer et al. (1991)
	1	Saf-Ron Gold	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	118	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9527	Amphipode	<i>Anonyx nugax</i>	96	LC ₅₀	97-111	Foy (1982)
	2	Kuwait + C9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LL ₅₀	92.9	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9527	Crevette géante d'eau douce (embryon/larve)	<i>Macrobrachium rosenbergii</i>	288	EC ₅₀	80.4	Law (1995)
	2	Corexit® 9527	Amphipode	<i>Boeckosimus edwardsi</i>	96	LC ₅₀	>80	Foy (1982)
	2	Corexit® 9527	Amphipode (juvénile)	<i>Gammarus oceanicus</i>	96	LC ₅₀	>80	Foy (1982)
	2	Corexit® 9527	Amphipode	<i>Onisimus litoralis</i>	96	LC ₅₀	80-160	Foy (1982)
	2	Corexit® 9527	Crabe bleu	<i>Callinectes sapidus</i>	96	LC ₅₀	77.9-81.2	Fucik et al. (1995)
	2	Sea Brat #4	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	65	Hemmer et al. (2010)
	2	ZI-400	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	55	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9527	Crevette de saumure	<i>Artemia salina</i>	48	LC ₅₀	53-84	Briceno et al. (1992)
	2	Corexit® 9527	Crevette de saumure	<i>Artemia sp.</i>	48	LC ₅₀	52-104	Wells et al. (1982)
	2	Corexit® 9527	Crevette bouquet	<i>Palaemon serenous</i>	96	LC ₅₀	49.4	Gulec and Holdaway (2000)

	2	Corexit® 9500	Crevette (larve)	<i>Penaeus monodon</i>	96	LC ₅₀	48	Marine and Freshwater Resources Institute (1998)
	2	Corexit® 9500A	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	42	Hemmer et al. (2010)
	2	Nokomis 3-4F	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	42	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9500	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	/	NOEC	41.4-142	Singer et al. (1996)
	2	Kuwait	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LL ₅₀	39.5	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9500	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	35.9	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9500	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	35.9	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9527	Crevette	<i>Penaeus monodon</i>	96	LC ₅₀	35-45	Fucik et al. (1995)
	2	Wheathe red Kuwait + C9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LL ₅₀	32.6	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9500	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	48	LC ₅₀	32.2	Inchcape Testing Services (1995)
	2	Nokomis 3-AA	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	30	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	29.2	Clark et al. (2001)
	2	Forties + C9500	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LL ₅₀	27.1	Clark et al. (2001)
	2	Prudhoe Bay Crude Oil	Crevette	<i>Holmesimysis</i>	96	EC/LC ₅₀	>25.45- >34.68	Singer et al. (1998)
	2	Kuwait + C9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LL ₅₀	24.7	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	48	LC ₅₀	24.1	Inchcape Testing Services (1995)
	2	Corexit® 9500	Crevette de saumure	<i>Artemia salina</i>	48	LC ₅₀	21	United States Testing Company (1994)
	2	Corexit® 9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	19-34	Briceno et al. (1992); George-Ares et al. (1999); Exxon; Biomedical Sciences (1993 (1)); Pace and Clark (1993)
	2	Dispersit SPC 1000	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	12	Hemmer et al. (2010)

	2	Corexit® 9527	Crevette blanche (postlarve)	<i>Penaeus setiferus</i>	96	LC ₅₀	11.9	Fucik et al. (1995)
	2	Prudhoe Bay Crude Oil + C9527	Crevette	<i>Holmesimysis</i>	96	EC/LC ₅₀	10.16-56.85	Singer et al. (1998)
	3	Corexit® 9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LC ₅₀	9.74	Clark et al. (2001)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + ZI-400	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	9.7	Hemmer et al. (2010)
	3	Alaska North Slope oil	Crabe tanner (larve)	<i>Chionocetes bairdi</i>	/ (7°C)	EC ₅₀	9.61	Perkins et al. (2005)
	2	Prudhoe Bay Crude Oil	Crevette	<i>Holmesimysis</i>	Initial narcosis	EC/LC ₅₀	9.14-17.18	Singer et al. (1998)
	3	Alaska North Slope oil	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	(25°C)	LC ₅₀	7.654	Perkins et al. (2005)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Nokomis 3-4F	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	7.4	Hemmer et al. (2010)
	3	Corexit® 9500	Crabe tanner (larve)	<i>Chionocetes bairdi</i>	96	EC ₅₀	5.6	Rhoton et al. (2001)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Corexit® 9500A	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	5.4	Hemmer et al. (2010)
	3	Corexit® 9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LC ₅₀	4.3-7.3	Singer et al. (1990, 1991)
	3	Corexit® 9500	Amphipode	<i>Allorchestes compressa</i>	96	LC ₅₀	3.5	Gulec et al. (1994)
	3	Forcados light	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	48	LC ₅₀	3.5	Otitoloju (2005)
	3	Biosolve	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	48	LC ₅₀	3.2	Otitoloju (2005)
	3	Corexit® 9527	Amphipode	<i>Allorchestes compressa</i>	96	LC ₅₀	3.0	Gulec et al. (1994)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Saf-Ron old	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	2.9	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	2.7	Hemmer et al. (2010)

	3	Biosolve	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	24	LC ₅₀	2.6	Otitoloju (2005)
	3	Corexit® 9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LC ₅₀	2.4-15.3	Pace and Clark (1993); Exxon; Biomedical Sciences (1993 (2;3)); Singer et al. (1990, 1991); Coelho and Aurand (1996)
	3	Biosolve	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	72	LC ₅₀	2.2	Otitoloju (2005)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Dispersit SPC 1000	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	2.1	Hemmer et al. (2010)
	3	Biosolve	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	96	LC ₅₀	1.9	Otitoloju (2005)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + JD-2000	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	1.4	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Sea Brat #4	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	1.4	Hemmer et al. (2010)
	3	Forcados light	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	24	LC ₅₀	1.2	Otitoloju (2005)
	4	Kuwait + C9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	0.65	Clark et al. (2001)
	4	Kuwait	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	0.63	Clark et al. (2001)
	4	Forties + C9500	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	0.42	Clark et al. (2001)
	4	Louisiane Sweet Crude Oil + Nokomis 3-AA	Mysis	<i>Americamysis bahia</i>	48	LC ₅₀	0.39	Hemmer et al. (2010)
	4	Forcados light	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	72	LC ₅₀	0.3	Otitoloju (2005)
	4	Forcados light	Crevette à pinces bleues	<i>Macrobrachium vollenhovenii</i>	96	LC ₅₀	0.28	Otitoloju (2005)
	4	Kuwait + C9527	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LC ₅₀	0.17	Clark et al. (2001)

	4	Wheathe red Kuwait + C9527	Mysis	<i>Mysidopsis bahia</i>	96	LC ₅₀	0.11	Clark et al. (2001)
	5	Kuwait	Crevette des forêts de varech	<i>Holmesimysis costata</i>	96	LC ₅₀	0.1	Clark et al. (2001)
	5	Prudhoe Bay Crude Oil + C9527	Crevette	<i>Holmesimysis</i>	96	EC/LC ₅₀	0.08-12.22	Singer et al. (1998)
Mollusque	0	Corexit® 9527	Pétoncle	<i>Argopecten irradians</i>	6 (2°C)	LC ₅₀	2500	Ordsie and Garofalo (1981)
	0	Corexit® 9527	Pétoncle	<i>Argopecten irradians</i>	6 (10°C)	LC ₅₀	1800	Ordsie and Garofalo (1981)
	1	Corexit® 9527	Pétoncle	<i>Argopecten irradians</i>	6 (20°C)	LC ₅₀	200	Ordsie and Garofalo (1981)
	2	Corexit® 9527	Palourde	<i>Protothaca staminea</i>	96	LC ₅₀	100	Hartwick et al. (1982)
	2	Corexit® 9500	Escargot de sable	<i>Polinices conicus</i>	24	EC ₅₀	42.3	Gulec et al. (1997)
	2	Corexit® 9527	Escargot de sable	<i>Polinices conicus</i>	24	EC ₅₀	33.8	Gulec et al. (1994)
	2	Prudhoe Bay Crude Oil	Ormeau	<i>Haliotis</i>	Larval abnormality	EC/LC ₅₀	>33.58- >46.99	Singer et al. (1998)
	2	Prudhoe Bay Crude Oil + C9527	Ormeau	<i>Haliotis</i>	Larval abnormality	EC/LC ₅₀	17.65-33.30	Singer et al. (1998)
	2	Corexit® 9527	Ormeau rouge (embryon)	<i>Haliotis rufescens</i>	/	EC50	13.6-18.1	Singer et al. (1991)
	2	Corexit® 9500	Ormeau rouge (embryon)	<i>Haliotis rufescens</i>	/	LC ₅₀	12.8-19.7	Singer et al. (1996)
	3	Corexit® 9500	Ormeau rouge (embryon)	<i>Haliotis rufescens</i>	/	NOEC	5.7-9.7	Singer et al. (1996)
	3	Bass strait + C9527	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	48	LOEC	3.3	Long et al. (2002)
	3	Bass strait + C9527	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	24	LC ₅₀	3.11	Long et al. (2002)
	3	Bass strait + C9527	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	48	LC ₅₀	1.8	Long et al. (2002)
	3	Corexit® 9527	Ormeau rouge	<i>Haliotis rufescens</i>	48	EC ₅₀	1.6-2.2	Singer et al. (1990, 1991)
	3	Bass strait + C9527	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	48	NOEC	1.4	Long et al. (2002)

	4	Bass strait	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	48	LOEC	0.71	Long et al. (2002)
	4	Corexit® 9500	Ormeau rouge (embryon)	<i>Haliotis rufescens</i>	48	NOEC	0.7	Aquatic Testing Laboratories (1994)
	4	Bass strait	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	24	LC ₅₀	0.51	Long et al. (2002)
	4	Bass strait	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	48	LC ₅₀	0.39	Long et al. (2002)
	4	Bass strait	Pieuvre (nouveaux-nés)	<i>Octopus pallidus</i>	48	NOEC	0.36	Long et al. (2002)
Poisson	0	Prudhoe Bay Crude Oil	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96 (25°C)	LL ₅₀	>8152	Perkins et al. (2005)
	0	JD-2000	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	>5600	Hemmer et al. (2010)
	0	Kuwait	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LL ₅₀	5020	Clark et al. (2001)
	0	Wheathe red Kuwait	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LL ₅₀	2319	Clark et al. (2001)
	1	Corexit® 9500	Fondule tête de mouton	<i>Cyprinodon variegatus</i>	/	LC ₅₀	593-750	Fuller and Bonner (2001)
	1	Corexit® 9500	Poisson zèbre	<i>Brachydanio rerio</i>	24	LC ₅₀	>400	Walsh (1995)
	1	Wheathe red Kuwait + C9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LL ₅₀	381	Clark et al. (2001)
	1	Corexit® 9500	Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	96	LC ₅₀	354	Environment Canada (1994)
	1	Corexit® 9500	Fondule tête de mouton	<i>Cyprinodon variegatus</i>	96	LC ₅₀	170-193	Fuller and Bonner (2001)
	1	Corexit® 9500	Tilapia du Mozambique	<i>Sarotherodon mozambicus</i>	96	LC ₅₀	150	Lessard (1995)
	1	Corexit® 9500	Barramundi (juvenile)	<i>Lates calcarifer</i>	96	LC ₅₀	143	Marine and Freshwater Resources Institute (1998)
	1	Corexit® 9500	Choquemort	<i>Fundulus heteroclitus</i>	96	LC ₅₀	140	United States Testing Company (1994)
	1	Corexit® 9527	Médaka	<i>Oryzias latipes</i>	24	LC ₅₀	130-150	Lessard (1995)
	1	Corexit® 9500A	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	130	Hemmer et al. (2010)
	1	Kuwait + C9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LL ₅₀	112	Clark et al. (2001)

	1	Corexit® 9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	>100	Fucik et al. (1995)
	1	Corexit® 9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	>100	Fucik et al. (1995)
	2	Corexit® 9527	Choquemort	<i>Fundulus heteroclitus</i>	96	LC ₅₀	99-124	Briceno et al. (1992)
	2	Corexit® 9527	Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	96	LC ₅₀	96-293	Wells and Doe (1976)
	2	Corexit® 9527	Fondule tête de mouton	<i>Cyprinodon variegatus</i>	96	LC ₅₀	74-152	Briceno et al. (1992)
	2	Corexit® 9527	Leiostomus (embryon)	<i>Leiostomus xanthurus</i>	48	LC ₅₀	61.2-62.3	Slade (1982)
	2	Corexit® 9527	Eperlan d'eau d'eau douce (larve)	<i>Atherinops affinis</i>	/	LC ₅₀	59.2-104	Singer et al. (1991)
	2	Corexit® 9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	/	LC ₅₀	58.3	Georges-Ares and Clark (2000), Clark et al. (2001)
	2	Sea Brat #4	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	55	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9527	Tambour rouge (embryon/larve)	<i>Sciaenops ocellatus</i>	48	LC ₅₀	52.6	Fucik et al. (1995)
	2	Corexit® 9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	52.3	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9500	Hardy heads (juvenile)	<i>Atherinosoma microstoma</i>	96	LC ₅₀	50	Marine and Freshwater Resources Institute (1998)
	2	Saf-Ron Gold	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	44	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9527	Menhaden de l'Atlantique (embryon/larve)	<i>Brevoortia tyrannus</i>	48	LC ₅₀	42.4	Fucik et al. (1995)
	2	Corexit® 9500	Capucette (larve)	<i>Menidia beryllina</i>	/	LC ₅₀	40.7-116.6, 205	Fuller and Bonner (2001)
	2	Corexit® 9527	Chaboisseau à quatre cornes	<i>Myoxocephalus quadricornis</i>	96	LC ₅₀	<40	Foy (1982)
	2	Forties + C9500	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LL ₅₀	37.3	Clark et al. (2001)
	2	Corexit® 9527	Leiostomus (embryon/larve)	<i>Leiostomus xanthurus</i>	48	LC ₅₀	27.4	Fucik et al. (1995)

	2	Corexit® 9527	Eperlan d'eau d'eau douce (larve)	<i>Atherinops affinis</i>	96	LC ₅₀	25.5-40.6	Singer et al. (1990b, 1991)
	2	Corexit® 9500	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	25.2	Inchcape Testing Services (1995)
	2	ZI-400	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	21	Hemmer et al. (2010)
	2	Corexit® 9527	Bar australien (larve)	<i>Macquaria novemaculeata</i>	96	LC ₅₀	19.8	Gulec and Holdaway (2000)
	2	Prudhoe Bay Crude Oil	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	(25°C)	LC ₅₀	>19.55	Perkins et al. (2005)
	2	Nokomis 3-AA	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	19	Hemmer et al. (2010)
	2	Nokomis 3-4F	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	19	Hemmer et al. (2010)
	2	No.2 Fuel + Corexit® 9527	Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	96	LC ₅₀	16-79	Wells and Doe (1976)
	2	Corexit® 9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	14.6-57	Briceno et al. (1992); Fucik et al. (1995); Pace and Clark (1993); Inchcape Testing Services (1995) and Exxon Biomedical Sciences (1993 (4))
	2	Louisiane Sweet Crude Oil + ZI-400	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	13.1	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Nokomis 3-4F	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	9.6	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Corexit® 9500A	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	7.6	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + JD-2000	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	4.6	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Sea Brat #4	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	3.4	Hemmer et al. (2010)

	3	Louisiane Sweet Crude Oil	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	>2.9	Hemmer et al. (2010)
	2	Dispersit SPC 1000	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	2.9	Hemmer et al. (2010)
	3	Louisiane Sweet Crude Oil + Saf-Ron old	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	1.6	Hemmer et al. (2010)
	4	Wheathe red Kuwait + C9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	1.09	Clark et al. (2001)
	4	Kuwait	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	0.97	Clark et al. (2001)
	4	Louisiane Sweet Crude Oil + Nokomis 3-AA	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	0.96	Hemmer et al. (2010)
	4	Louisiane Sweet Crude Oil + Dispersit SPC 1000	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	0.64	Hemmer et al. (2010)
	4	Kuwait + C9527	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	0.55	Clark et al. (2001)
	4	Forties + C9500	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	96	LC ₅₀	0.49	Clark et al. (2001)
	4	Wheathe red Kuwait	Capucette	<i>Menidia beryllina</i>	48	LC ₅₀	0.14	Clark et al. (2001)
Oiseau	?	Corexit® 9500	Canard colvert (embryon)	<i>Anas platyrhynchos</i>	/	LA ₅₀	15.5	Wooten et al. (2012)