

Mémoire

Auteur : Romanelli, Hugo

Promoteur(s) : Beckers, Jean-Marie

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en océanographie, à finalité approfondie

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11768>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège

Faculté des Sciences

Étude de la propagation d'une nappe de pétrole au large des îles Canaries

Romanelli Hugo

GeoHydrodynamics and Environment Research

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Océanographie à finalité approfondie

Année Académique 2020-2021

Membres du Jury

Prof. Jean-Marie Beckers (Université de Liège, GHER) (Promoteur)

Dr. Charles Troupin (Université de Liège, GHER) (Promoteur)

Dr. Alexander Barth (Université de Liège, GHER)

Dr. Pierre Lejeune (STARESO)

Conformément aux règles imposées à la rédaction, ce mémoire ne doit pas dépasser 50 pages, rédigées en Times 12 ou équivalent.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mes deux promoteurs, M.Troupin et M.Beckers de m'avoir permis de travailler sur un sujet aussi intéressant. Merci pour vos conseils et votre bienveillance. Un merci plus particulier à M.Troupin avec qui j'ai passé de nombreuses heures durant cette année. Un immense merci pour votre disponibilité et votre aide ainsi que pour la relecture de ce manuscrit. Merci pour les outils que vous avez mis à ma disposition pour réaliser ce travail.

Je remercie M.Barth pour ses conseils en modélisation et son aide durant cette année.

Merci à Arnaud, Tolga, Francois et Julian mes amis de longue date pour m'avoir soutenu durant toutes ces années d'études.

Je voudrais remercier Jonathan « LM » et Quentin « Le Béret ». Merci pour vos conseils et suggestions et surtout votre calme.

Je tiens à remercier mes parents et en particulier ma mère pour avoir toujours cru en moi. Merci d'avoir tout mis en œuvre afin que mes études se passent dans les meilleures conditions possibles.

Finalement, je tiens à remercier ma chérie Elise pour son soutien et ses encouragements dans les moments difficiles quand le moral n'était pas au rendez-vous.

Merci à tous du fond du cœur !

Hugo

Résumé

Étude de la propagation d'une nappe de pétrole au large des îles Canaries

Des simulations avec le modèle lagrangien OpenOil ont été effectuées dans le but d'étudier la propagation d'une nappe de pétrole du type IFO180 dans le cadre d'un hypothétique accident pétrolier au large des îles Canaries. L'étude se concentre sur la zone comprise entre les îles de Fuerteventura et Lanzarote jusqu'au continent nord-ouest africain. OpenOil inclut des forçages hydrodynamiques via le modèle IBI (Région Ibérique-Biscaye-Irlandaise) à $1/36^\circ$ de résolution horizontale et des champs de vents ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather) à un $1/4^\circ$ de résolution horizontale. Les simulations ont montré que Fuerteventura et Lanzarote pouvaient être touchées de manière distincte suivant la saison. Trente-deux simulations ont été faites durant la période mai 2019-2021 avec 4 points de déversements par saison. Cependant, une forte variabilité interannuelle a pu être constatée exceptée lors des étés. Pour la plupart des événements, si le temps écoulé avant l'impact est supérieur à 24h, la fraction de masse échouée est faible ($<7.3\%$). Par conséquent, l'ampleur des risques environnementaux dépend du temps passé en mer par le pétrole.

Abstract

Study of the spread of an oil slick off the Canary Islands

Simulations with the Lagrangian model OpenOil have been carried out with the purpose of studying the propagation of an oil slick of the type IFO180 in the context of a hypothetical oil accident along the Canary Islands. The study focuses on the area between the islands of Fuerteventura and Lanzarote to the northwestern African continent. OpenOil includes hydrodynamic forcing via the IBI (Iberian-Biscay-Irish Region) model at $1/36^\circ$ horizontal resolution and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather) wind fields at $1/4^\circ$ horizontal resolution. The simulations showed that Fuerteventura and Lanzarote could be both affected in a distinct way depending on the season. Thirty-two simulations were made during the period May 2019-2021 with 4 spill points per season. However, a strong interannual variability is observed except during the summer. For most events, if the period time before impact is greater than 24 h, the fraction of mass stranded is low ($< 7.3\%$). Therefore, the magnitude of the environmental risk depends on the time spent at sea by the oil.

Table des figures

<i>Figure 1.1 Déversements de 7 tonnes et plus par décennie montrant l'influence d'un nombre relativement faible de déversements importants sur le chiffre global. Les années 2020 sont exclues, seulement un an de données disponibles [5].</i>	3
<i>Figure 1.2 Nombre de déversements et quantité déversée par cause, 1970-2020 [5].</i>	4
<i>Figure 1.3 Classification des hydrocarbures selon leurs structures. Adapté de [10].</i>	5
<i>Figure 1.4 Localisation et disposition des îles Canaries. Les îles de La Graciosa, de Montaña Clara, de l'Alegranza et de Lobos sont indiquées. Le détroit de La Bocaina est situé entre Fuerteventura et Lanzarote. Adapté de [19].</i>	7
<i>Figure 2.1 Échelle temporelle et importance relative des principaux processus d'altération et de transport des produits pétroliers [34].</i>	11
<i>Figure 2.2 Le mouvement orbital dans les eaux profondes, les eaux de profondeur intermédiaire et les eaux très peu profondes selon la théorie d'Airy [50].</i>	16
<i>Figure 3.1 Opérations impliquées dans OpenOil3D.</i>	19
<i>Figure 3.2 Vitesse des courants de surface (m/s) (modèle IBI) dans la zone d'étude le 22/06/2019 12h UTC. Les formes blanches représentent les îles de Fuerteventura (F) et Lanzarote (L). La flèche rouge indique une norme de 1m/s.</i>	21
<i>Figure 3.3 Densité des routes maritimes. Les positions initiales de déversement : A, B, C, D. Se référer au Tableau 3.1 pour les coordonnées. D'après les données de [71].</i>	24
<i>Figure 4.1 Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AP1), droit (BP1). Panneau inférieur : gauche (CP1), droit (DP1).</i>	27
<i>Figure 4.2 Similaire à Figure 4.1, mais pour le printemps 2020. Panneau supérieur : gauche (AP2), droit (BP2). Panneau inférieur : gauche (CP2), droit (DP2).</i>	28
<i>Figure 4.3 Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AE1), droit (BE1). Panneau inférieur : gauche (CE1), droit (DE1).</i>	30
<i>Figure 4.4 Similaire à Figure 4.3, mais pour l'été 2020. Panneau supérieur : gauche (AE2), droit (BE2). Panneau inférieur : gauche (CE2), droit (DE2).</i>	31
<i>Figure 4.5 Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AA1), droit (BA1). Panneau inférieur : gauche (CA1), droit (DA1).</i>	33
<i>Figure 4.6 Similaire à Figure 4.5, mais pour l'automne 2020. Panneau supérieur : gauche (AA2), droit (BA2). Panneau inférieur : gauche (CA2), droit (DA2).</i>	34

Figure 4.7 Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AH1), droit (BH1). Panneau inférieur : gauche (CH1), droit (DH1).	36
Figure 4.8 Similaire à Figure 4.7, mais pour l'hiver 2021. Panneau supérieur : gauche (AH2), droit (BH2). Panneau inférieur : gauche (CH2), droit (DH2).	37
Figure 4.9 Similaire à Figure 4.1, mais avec la paramétrisation T1. Panneau supérieur : gauche (AP1), droit (BP1). Panneau inférieur : gauche (CP1), droit (DP1).	40
Figure 4.10 Similaire à Figure 4.1 (T0), mais avec un forçage du vent nul. Panneau supérieur : gauche (AP1), droit (BP1). Panneau inférieur : gauche (CP1), droit (DP1).	42
Figure 5.1 Espaces naturels dans la zone d'étude : Parc national (jaune) ; Monument naturel (bleu foncé) ; Paysage protégé (bleu clair) ; Parc naturel (orange) ; Parc rural (rouge). D'après les données de [75]. Les positions initiales de déversement : A, B, C, D. Se référer au Tableau 3.1 pour les coordonnées.	45

Table des tableaux

Tableau 1.1 - Quelques pollutions marines majeures depuis 1967. Adapté de [4].	2
Tableau 2.1 Composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers [23].	8
Tableau 2.2 Classification du pétrole brut selon le degré °API [25].	9
Tableau 2.3 Points d'éclair d'hydrocarbures communs [29], [30].	11
Tableau 3.1 Dates et positions des déversements. Les saisons : printemps, été, automne, hiver sont référencées par les lettres P, E, A et H respectivement. Les positions initiales sont nommées par les lettres A, B, C, D et les indices 1, 2 indiquent l'année du déversement. Un déversement à une saison fixe et date fixe est caractérisé par un triplet unique. Toutes les simulations sont effectuées à 12h UTC.	25
Tableau 4.1 Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des printemps 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1 ^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1 ^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.	29
Tableau 4.2 Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des étés 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1 ^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1 ^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.	32
Tableau 4.3 Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des automnes 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1 ^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1 ^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.	35

Tableau 4.4 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des hivers 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu..... 38

Tableau 4.5 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors du printemps 2019 avec la paramétrisation T1. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu..... 41

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Rappel historique d'accidents pétroliers	2
1.2	Principales causes de pollutions aux hydrocarbures	4
1.3	Toxicité des hydrocarbures et impacts environnementaux	5
1.4	Contexte de l'étude	6
2	État de l'art	8
2.1	Caractéristiques des hydrocarbures pétroliers	8
2.2	Propriétés physiques	9
2.2.1	Densité	9
2.2.2	Viscosité dynamique	10
2.2.3	Le point d'écoulement	10
2.2.4	Le point d'éclair	10
2.2.5	Tension interfaciale	11
2.3	Processus de vieillissement de la nappe d'hydrocarbures	11
2.3.1	Évaporation	12
2.3.2	Étalement	12
2.3.3	Dissolution	13
2.3.4	Dispersion	13
2.3.5	Émulsification	13
2.3.6	Photo-oxydation	14
2.3.7	Biodégradation	14
2.3.8	Sédimentation	14
2.4	Transport de la nappe d'hydrocarbures en milieu marin	14
2.4.1	Transport horizontal	15
2.4.1.1	Courants	15
2.4.1.2	Forçage direct du vent (Windage)	15
2.4.1.3	Dérive de Stokes (Stokes Drift)	16
2.4.2	Processus verticaux	17

3	<i>Matériel et méthodologie</i>	18
3.1	Le modèle	18
3.1.1	Le modèle de dérive OpenOil3D	18
3.1.1.1	Distribution de la taille des gouttelettes d'hydrocarbure	18
3.1.1.2	Transport horizontal	19
3.1.1.3	Processus verticaux	20
3.1.1.4	Processus de vieillissement	20
3.1.2	Le modèle hydrodynamique 3D	20
3.1.3	Forçage du vent	23
3.2	Cadre expérimental	24
4	<i>Résultats</i>	26
4.1	Saisons	26
4.1.1	Printemps 2019-2020	26
4.1.2	Été 2019-2020	30
4.1.3	Automne 2019-2020	33
4.1.4	Hiver 2020-2021	36
4.2	Test de sensibilité	39
4.2.1	Paramétrisation T1	39
4.2.2	Paramétrisation T2	39
4.2.3	Forçage du vent nul	41
5	<i>Discussion</i>	43
6	<i>Conclusion</i>	47
7	<i>Annexe</i>	48
8	<i>Références</i>	49

Chapitre 1

Introduction

En 1854, Abraham Gesner brevète le kérosène. Celui-ci devient le combustible principal pour l'éclairage public de tous les États-Unis. Ce dernier a contribué à motiver le développement industriel de l'exploitation et du raffinage du pétrole, aussi appelé « l'or noir ». En 1859, Edwin Drake parvint à extraire du pétrole en Pennsylvanie en améliorant une technique de forage utilisé en 1847 en Azerbaïdjan. Dès 1861, la première raffinerie de pétrole voit le jour et son exportation débuta. S'en suit la fameuse « ruée vers l'or » qui boostera l'exploitation pétrolière. La première entreprise qui perçoit une rentabilité est celle fondée par John D. Rockefeller : la Standard Oil. En 1880, John D. Rockefeller avait le monopole sur l'industrie pétrolière. L'unique concurrence était celle représentée par la famille Rothschild et l'entreprise des frères Nobel. Durant ces années, l'exploitation du pétrole s'effectuait sur des territoires inhabités. Ce qui a eu pour conséquence de construire un monde peu scrupuleux où les lois étaient régies par les hommes à la tête d'entreprises de pétrole. En particulier, John D. Rockefeller amorça l'expansion de son empire à base de méthodes illégales et de corruption, ce qui le rendit l'homme le plus riche de son époque. Ce n'est qu'en 1911 que son monopole fut entravé par le verdict de la Cour Suprême des États-Unis qui l'accuse d'entrave à la concurrence. L'empire Rockefeller et sa Standard Oil furent démantelés et d'autres compagnies virent le jour comme la Standard Oil of New Jersey (Jersey), la Standard Oil de New York (Socony) et la Standard Oil of California (Socal) qui sont devenues trois des sept grandes sociétés de pétrole mondiales au XXème siècle [1], [2].

Actuellement, environ la moitié des réserves mondiales de pétrole sont situées au Moyen-Orient (Péninsule arabique, Iran, Irak, Israël, Jordanie, Liban, Syrie) contre un tiers environ pour l'ensemble de l'Amérique du Nord (USA, Canada, Mexique, Caraïbes, Bermudes), l'Amérique centrale et du Sud [3].

1.1 Rappel historique d'accidents pétroliers

Le transport d'hydrocarbures par des navires pétroliers est un élément qui peut mener à une pollution du milieu marin dans le cas d'un déversement volontaire ou d'un accident. Les puits de forages peuvent aussi déverser d'immenses quantités d'hydrocarbures en cas de fuites. S'ensuivent des marées noires destructrices qui mettent à mal la faune et la flore marine. Ces marées noires peuvent dans certains cas atteindre les côtes et contaminer les rivages.

Tableau 1.1 | - Quelques pollutions marines majeures depuis 1967. Adapté de [4].

Accident	Date	Lieu	Quantité de pétrole déversée (en tonnes)
Sea island (8 sources : terminaux et pétroliers)	26 janvier 1991	Golfe Persique	800 000
Deepwater (plateforme)	20 avril 2010	Golfe du Mexique	700 000
Ciudad del Carmen (puit Ixtoc 1)	3 juin 1979	Golfe du Mexique	475 000
Atlantic Express (pétrolier)	19 juillet 1979	Au large du Tobago	276 000
Abt summer (pétrolier)	28 mai 1991	Au large de l'Angola	260 000
Castillo de Bellver (pétrolier)	6 août 1983	Au large de l'Afrique du Sud	252 000
Amoco Cadiz (pétrolier)	16 mars 1978	Portsall, Manche	228 000
Odyssey (pétrolier)	10 novembre 1988	Au large de Terre Neuve	143 000
Haven (pétrolier)	11 avril 1991	Golfe de Gênes	133 000
Torey Canyon (pétrolier)	18 mars 1967	Îles Scilly, Manche et proche Atlantique	121 000

La pollution des mers par les hydrocarbures est assez difficile à estimer. La plupart des hydrocarbures qui aboutissent en mer sont dus à des rejets terrestres et au transport maritime (dégazage, accident) dans la majeure partie [4]. De nombreux accidents pétroliers se sont

produits depuis les années 1960 (Tableau 1.1) déversant jusqu'à 800.000 tonnes de pétrole en mer.

La fréquence des déversements importants est faible, mais ils sont responsables d'une grande partie du volume déversée par décennie (Figure 1.1). Dans les années 1990, il y a eu 358 déversements (de 7 tonnes ou plus) pour une quantité déversée d'environ 1134 milliers de tonnes. Sur les 358 déversements, 10 sont responsables de 73% de la quantité perdue en mer. Dans les années 2000, 181 déversements ont eu lieu (de 7 tonnes ou plus) pour un total de 196 milliers de tonnes dont 75% de cette quantité furent déversés au cours de 10 incidents. Dans la dernière décennie, 63 déversements (de 7 tonnes ou plus) pour 164 milliers de tonnes déversées eurent lieu. L'accident du pétrolier MT Sanchi (2018) est responsable de 70% de la quantité déversée au cours de la dernière décennie écoulée [5]. On peut voir à travers la diminution des accidents que de plus amples mesures de préventions ont été prises progressivement et que les progrès techniques dans les traitements d'hydrocarbures sont en nette amélioration [6].

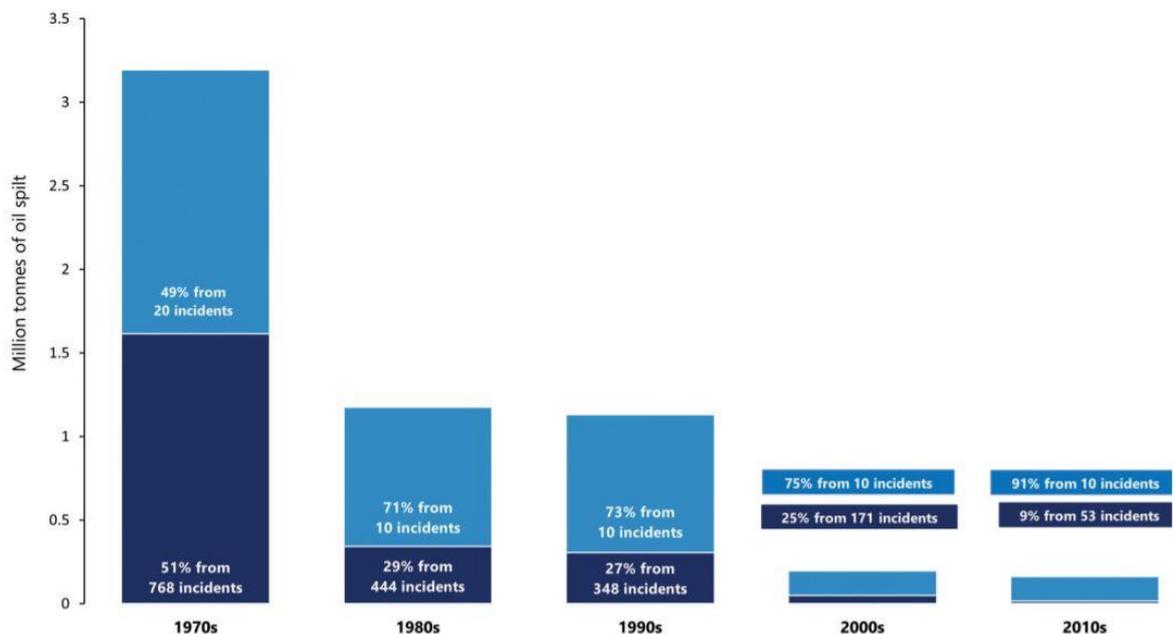


Figure 1.1 | Déversements de 7 tonnes et plus par décennie montrant l'influence d'un nombre relativement faible de déversements importants sur le chiffre global. Les années 2020 sont exclues, seulement un an de données disponibles [5].

1.2 Principales causes de pollutions aux hydrocarbures

Par définition, les hydrocarbures sont des composés chimiques contenant exclusivement du carbone et de l'hydrogène. Selon le GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution), le pétrole brut et les produits pétroliers ne sont pas les seules sources d'hydrocarbures présents dans le milieu marin. Les différentes sources sont [7] :

- Le pétrole (pétrole brut) ou ses constituants et fractions provenant
 - Du transport, y compris les opérations normales des pétroliers, la mise en cale sèche, les cales déchargées et les mazouts, les pertes dans les accidents de pétroliers et autres ;
 - Déchets domestiques et industriels, ruissellements urbains et rejets fluviaux i.e. sources terrestres d'hydrocarbures ;
 - Sources naturelles telles que les suintements marins et l'érosion des sédiments ;
 - Production pétrolière offshore
- Processus de combustion incomplets
- Biosynthèse (création (synthèse) d'hydrocarbures par les êtres vivants : microorganismes, plantes, insectes, etc. [8])

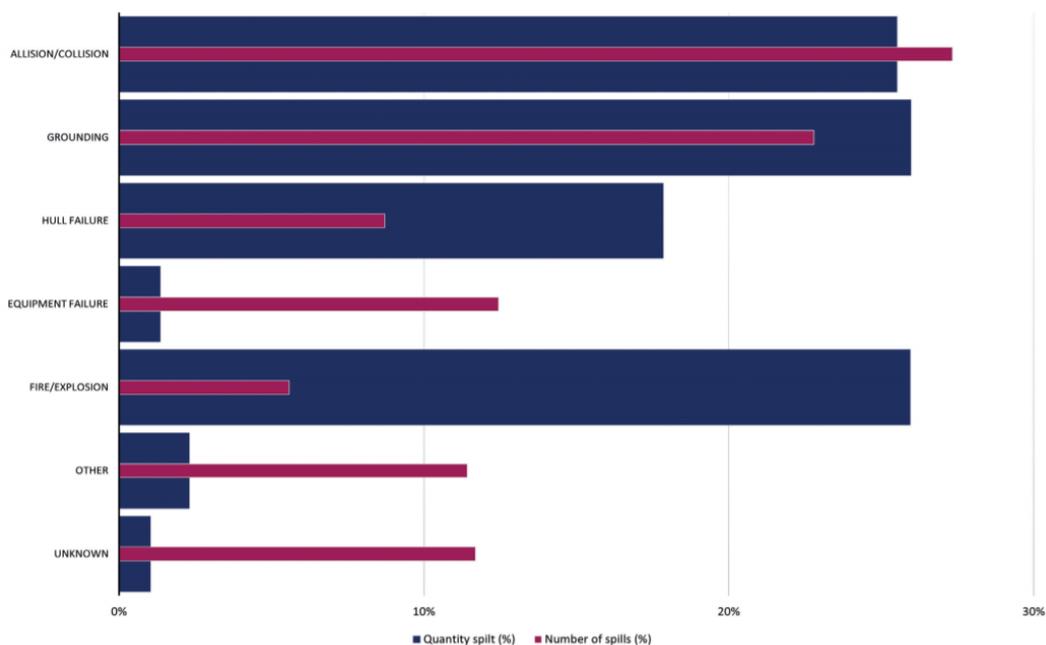


Figure 1.2 | Nombre de déversements et quantité déversée par cause, 1970-2020 [5].

En ce qui concerne les accidents impliquant des pétroliers, les causes sont indiquées en Figure 1.2. Moins de 10% des déversements (inférieure à 7 tonnes) sont causés par des incendies et des explosions. Les quantités d'hydrocarbures déversés depuis 1970 lors d'échouages et de collisions sont d'environ 26% pour chacun. Ce qui est comparable à la quantité déversée lors d'un feu ou d'une explosion qui constitue seulement 5% du nombre total de déversements en hydrocarbures depuis 1970 [5].

1.3 Toxicité des hydrocarbures et impacts environnementaux

Les hydrocarbures pétroliers sont des mélanges complexes de composés chimiques. Leur aspect et leurs caractéristiques physiques ainsi que leur comportement dépendent de leur composition. Les hydrocarbures peuvent être classés selon leurs structures (Figure 1.3) [9].

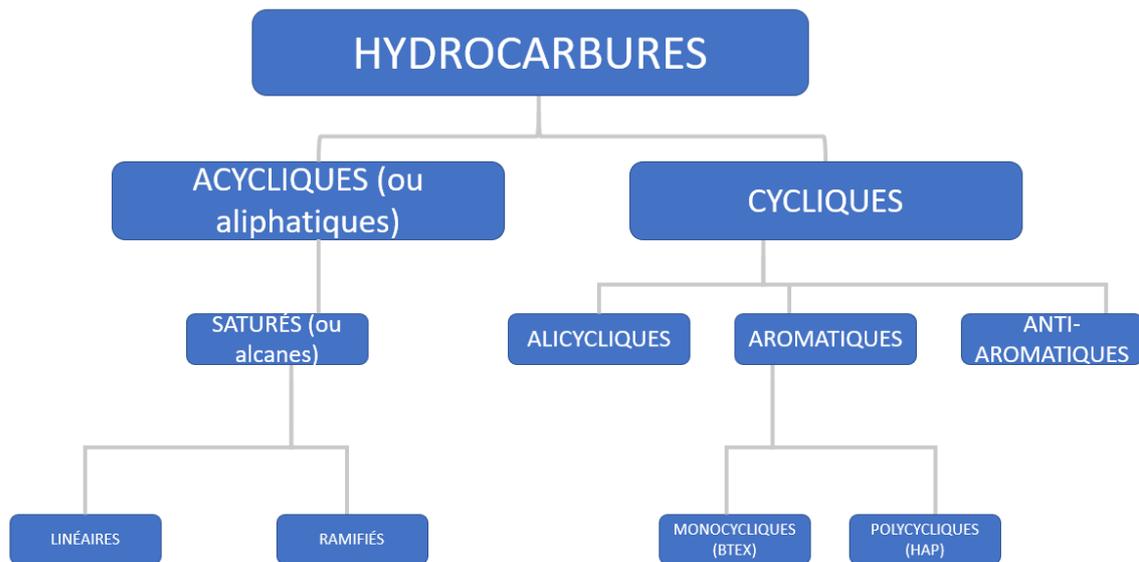


Figure 1.3 | Classification des hydrocarbures selon leurs structures. Adapté de [10].

En réalité, tous les hydrocarbures ne sont pas toxiques. Les alcanes (Figure 1.3) ont une stabilité assez élevée dans l'environnement qui leur permet d'échapper à la biodégradation. Ils ont une solubilité très faible quasi proche de l'insolubilité et ainsi qu'une tendance hydrophobe. C'est pourquoi les alcanes sont présents en très faible teneur dans une phase aqueuse. Par ailleurs, leur toxicité est relativement faible [11].

Les BTEX (hydrocarbures aromatiques monocycliques, Figure 1.3), contrairement aux alcanes, ont une solubilité élevée en phase aqueuse et une toxicité importante. Ils sont volatils, mais leur densité de vapeur est plus importante que celle de l'air. Ces vapeurs vont donc rester en surface de la nappe ce qui peut entraîner une resolubilisation des vapeurs pétrolières. Malgré tout, si une analyse en concentration des BTEX est effectuée après un déversement, il ne restera donc qu'une très faible quantité dans le milieu aqueux [9], [11].

Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycliniques, Figure 1.3) sont peu solubles et extrêmement toxiques pour l'Homme et les animaux [12]. Ces contaminants peuvent être à l'origine de cancer et causer des maux de tête, nausées, vomissements, perte d'appétit, irritation cutanée (démangeaisons, brûlures, œdème), irritation des yeux chez l'Homme, mais aussi des effets à long terme comme des impacts sur la reproduction des animaux [13], [14].

Les impacts d'hydrocarbures de manière générale causent des problèmes environnementaux. En particulier chez les organismes phytoplanctoniques qui ne peuvent se mouvoir à contrecourant et sont donc incapables de contrôler leur mouvement dans l'océan. Dans un environnement dit « océan ouvert », les mammifères marins exposés à des hydrocarbures peuvent souffrir d'hypothermie, subir une noyade voire mourir, car les hydrocarbures adhèrent à la surface extérieure des poils des mammifères [15]. Les coraux ne sont pas épargnés par les effets des hydrocarbures. En effet, lors de la catastrophe de la plateforme Deepwater Horizon en 2010 (Tableau 1.1) l'état des coraux dans le golfe du Mexique a subi un déclin. L'état des grandes colonies de coraux présentait des dommages à un taux de 28-50% en 2011 contre seulement 4-9% en 2003 [16].

1.4 Contexte de l'étude

En 2014, la compagnie pétrolière Repsol commença à effectuer des prospections au large de Fuerteventura et Lanzarote (Figure 1.4), deux îles canariennes (Espagne), visant à détecter d'éventuelles réserves d'hydrocarbures. En 2015, aucune réserve en quantité suffisante ne fut trouvée afin d'envisager un forage [17]. Toutefois, cela ne réfute pas l'hypothèse de prospections futures dans cette zone. Au large du Maroc, les prospections sont toujours d'actualité (ONYM, <http://www.onhym.com/>). Il est important de souligner que l'Espagne de manière générale est fortement dépendante de l'import de pétrole brut. En 1985, les importations de pétrole brut représentaient 33% des importations totales contre 11%

aujourd'hui [18]. Ce chiffre reste assez élevé, c'est pourquoi l'Espagne tend à rechercher du pétrole dans ses territoires afin de devenir un peu moins dépendant vis-à-vis de l'import de pétrole brut.

Actuellement, nombreux sont les navires pétroliers qui traversent les eaux canariennes. Dans le cadre de ce mémoire, il sera question de modéliser (Chapitre 3) la dérive d'une nappe d'hydrocarbures dans les eaux comprises entre ces côtes canariennes (Fuerteventura & Lanzarote) et le continent nord-ouest africain dans l'hypothèse d'un possible accident pétrolier et particulièrement au temps nécessaire pour atteindre ces côtes. Au Chapitre 4, les zones touchées ainsi que les temps d'impacts sont présentés. Nous clorons ce travail avec une large discussion sur les impacts environnementaux et sur la possibilité d'exhiber une variabilité interannuelle en Chapitre 5.

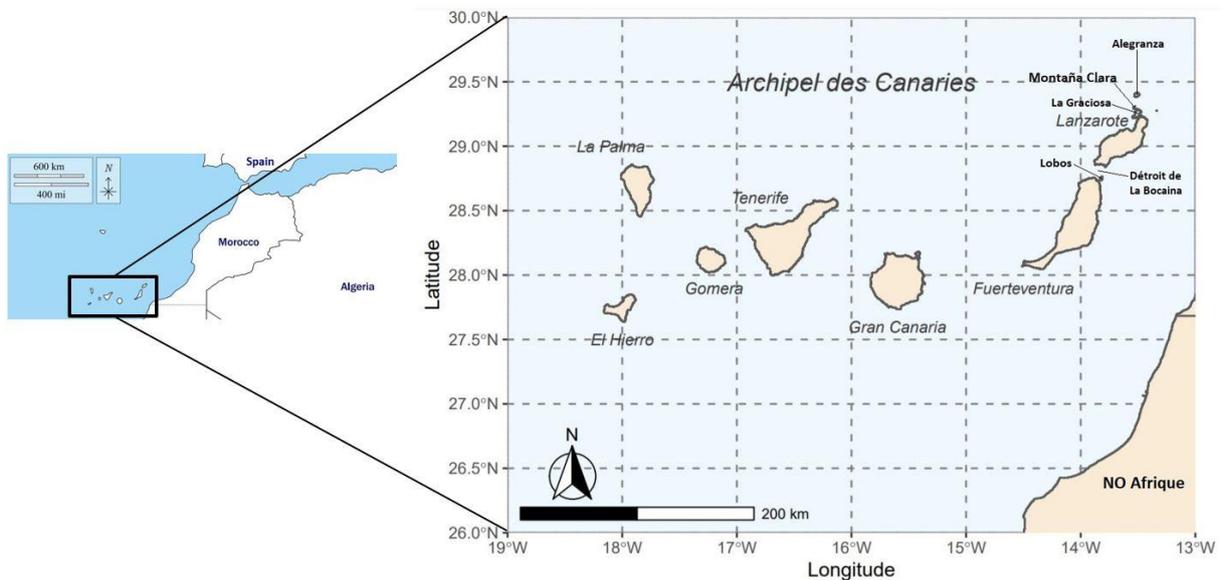


Figure 1.4 | Localisation et disposition des îles Canaries. Les îles de La Graciosa, de Montaña Clara, de l'Alegranza et de Lobos sont indiquées. Le détroit de La Bocaina est situé entre Fuerteventura et Lanzarote. Adapté de [19].

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Caractéristiques des hydrocarbures pétroliers

Le pétrole est un mélange naturel d'hydrocarbures et d'éléments non hydrocarbonés. Dans la vie quotidienne, il porte le nom de pétrole, pétrole brut ou tout simplement le brut. Pétrole vient du latin médiéval « petroleum », lui-même issu du latin classique « petra » qui signifie pierre et « oleum » signifiant huile. Les hydrocarbures pétroliers regroupent de nombreux produits pétroliers (kérosène, essence, fuel, etc.), mais parfois sont constitués principalement de trois types d'hydrocarbures : les aliphatiques, les BTEX et les HAP. Cependant, d'autres constituants sont présents dans ces hydrocarbures pétroliers comme l'azote, le soufre, l'oxygène et peuvent aussi contenir des métaux en quantités infimes (Tableau 2.1). Il est important de préciser que les hydrocarbures pétroliers ne sont pas tous en phase liquide, ils existent sous forme de gaz (gaz naturel), semi-solide (bitume) et solide (cire ou asphaltite) [20]–[22].

Tableau 2.1 | Composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers [23].

Éléments	Pourcentage
Carbone	83-87 %
Hydrogène	10-14 %
Azote	0,1-2 %
Oxygène	0,05-6 %
Soufre	0,05-6 %
Métaux	< 0,1 %

2.2 Propriétés physiques

Afin de comprendre au mieux le comportement des hydrocarbures dans l'eau de mer il est important de rappeler les propriétés physiques intrinsèques des hydrocarbures. Les états de la matière sont : solide, liquide et gazeux. Le pétrole brut existe sous ces trois phases (2.1). Lors d'un changement physique (e.g. augmentation de densité, de viscosité (2.2.1,2.2.2), la composition moléculaire reste inchangée. En d'autres termes, une même molécule est présente tout au long de ces changements [24].

2.2.1 Densité

La densité des hydrocarbures est souvent classée en degrés °API (American Petroleum Institute). °API reflète la densité d'un pétrole brut par rapport à l'eau. Il est calculé en utilisant la densité du pétrole brut à 15,6 °C et 1 atm de pression. Ces conditions de mesures sont appelées « conditions standards ». L'eau douce a un °API égal à 10 [24], [25].

Soit ρ la densité (g/mL) de l'hydrocarbure, le °API est défini par :

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\rho} - 131.5 \quad (Eq. 2.1)$$

Via l'Eq. 2.1, on peut définir des produits légers, moyens, lourds et extralourds selon les données du Tableau 2.2. Il en découle que les hydrocarbures ayant un °API > 10 seront moins denses que l'eau et auront tendance à flotter, tandis que les hydrocarbures avec un °API < 10 seront plus denses que l'eau et auront tendance à couler.

Tableau 2.2 | Classification du pétrole brut selon le degré °API [25].

Classification du pétrole brut	°API	Densité (g/cm ³)
Léger	> 31.1	< 0.87
Moyen	22.3-31.1	0.92-0.87
Lourd	10-22.3	1.0-0.92
Extra lourd	< 10	> 1.0

2.2.2 Viscosité dynamique

La viscosité dynamique μ peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un liquide. Elle influence ainsi la propagation d'une nappe d'hydrocarbures à la surface de l'eau. Des hydrocarbures pétroliers ayant une faible viscosité dynamique sont très fluides et se propagent rapidement, rendant leur confinement difficile. La viscosité dynamique est influencée par la température. En effet, plus la température est faible, plus la viscosité est élevée [23]. La viscosité dynamique de l'eau de mer est calculée par diverses approches [26]. Cependant, les ordres de grandeur sont de 10^{-3} kg/m s de manière générale. Selon [27], une eau de mer avec une salinité de 32.33 à une température de 20°C a une viscosité dynamique de $1.0663 * 10^{-3}$ kg/m s. Parfois, la viscosité cinématique ν telle que $\nu = \mu/\rho$ est utilisée.

2.2.3 Le point d'écoulement

Le point d'écoulement d'un hydrocarbure est défini comme la température à partir de laquelle le produit ne s'écoule plus dans les conditions de test en laboratoire. Cela ne signifie pas qu'en dessous de cette température l'hydrocarbure se comporte comme un solide. Le point d'écoulement est en effet mesuré en laboratoire, dans un tube de faible diamètre où il est refroidi progressivement à des plages de températures spécifiques. L'échantillon est inspecté à des intervalles de température de 2 °C par prélèvement et maintien horizontal pendant 5 secondes jusqu'à ce qu'aucun écoulement ne soit observé pendant cet intervalle de temps. Si aucun écoulement n'a lieu pendant cet intervalle de temps, la température à laquelle se trouve l'échantillon est appelée point d'écoulement. De fait, le point d'écoulement permet de prédire la température à laquelle les propriétés visqueuses du pétrole commencent à changer. L'hydrocarbure déversé en mer, dans un milieu ouvert, restera fluide à des températures inférieures à son point d'écoulement [24], [28].

2.2.4 Le point d'éclair

Le point d'éclair est la température la plus basse d'un liquide inflammable à laquelle il dégage suffisamment de vapeur pour former un mélange inflammable avec l'air près de la surface du liquide ou à l'intérieur du récipient utilisé [29]. La gamme de points d'éclairs est assez large, pouvant aller de -188°C à 104°C (Tableau 2.3).

Tableau 2.3| Points d'éclair d'hydrocarbures communs [29], [30].

Matériau	Point d'éclair (°C)
Méthane	-188
Propane	104
Heptane	-4
Hexane	-22
Kérosène F-34	44

2.2.5 Tension interfaciale

Le système eau/huile à l'état liquide est un système biphasique et immiscible. Par conséquent, il existe des forces qui agissent à l'interface regroupées en un terme : la tension interfaciale. Cependant, le terme tension de surface est utilisé pour décrire la tendance d'un seul liquide ou solide à résister aux forces extérieures. La tension interfaciale et la tension de surface sont définies comme étant une force agissant dans le plan de la surface par unité de longueur [31], [32]. En première approximation on peut assimiler le système eau de mer/pétrole au système précédent. Plus la tension interfaciale est importante, moins le pétrole aura tendance à s'étaler sur l'eau de mer. La tension interfaciale d'un tel système diminue lorsque la température augmente [33].

2.3 Processus de vieillissement de la nappe d'hydrocarbures

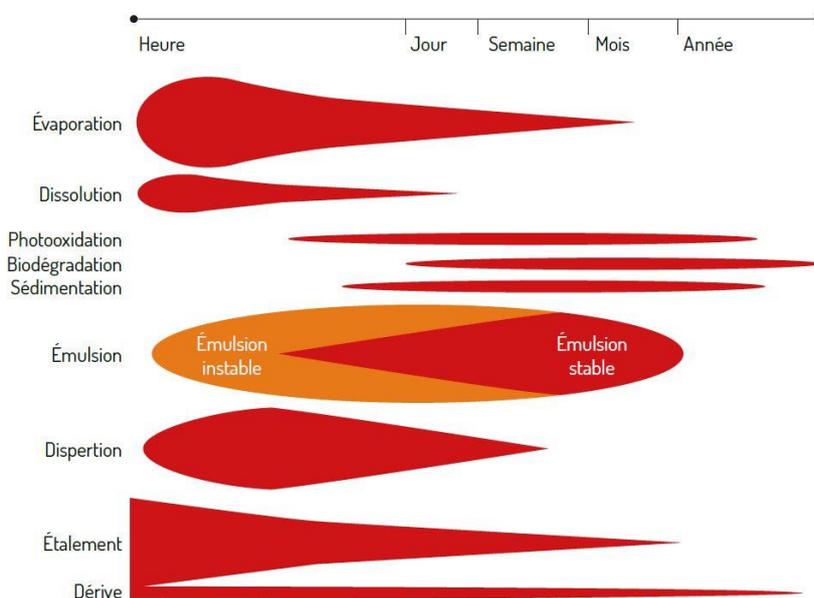


Figure 2.1 | Échelle temporelle et importance relative des principaux processus d'altération et de transport des produits pétroliers [34].

Lorsque les hydrocarbures sont présents en mer, ils subissent une série de transformations physico-chimiques. Ils sont soumis à des processus physiques, chimiques et biologiques qui modifient leur composition, leur toxicité et leur répartition dans le domaine environnant.

Ces phénomènes de dégradation sont aussi appelés « *processus de vieillissement de la nappe d'hydrocarbures* » [35] et sont : l'évaporation, l'étalement, la dissolution, la dispersion, la photo-oxydation, la biodégradation, l'émulsification, la sédimentation. La Figure 2.1 montre les différentes échelles de temps sur lesquelles les processus opèrent et leur importance relative.

2.3.1 Évaporation

L'évaporation fait partie des processus majeurs dans l'altération des hydrocarbures (Figure 2.1). La tendance naturelle de l'évaporation est régie par la pression de vapeur de chacun des constituants même si d'autres facteurs comme la vitesse du vent, la température ambiante de l'eau et de l'air affectent le taux d'évaporation. Via l'énergie cinétique des molécules, qui dépend de la température, de la masse et des vitesses des molécules, la pression de vapeur peut être dérivée. Le taux d'évaporation dépendra de la composition du pétrole en question. Les pétroles lourds subiront de pertes infimes tandis que les gazoils peuvent s'évaporer complètement en quelques heures [24], [36].

2.3.2 Étalement

Lorsque le pétrole se déverse dans l'eau, celui-ci a tendance à se répandre à la surface de l'eau sous la forme d'une fine couche continue. Si l'épaisseur de cette couche est proche de la longueur d'onde de la lumière visible (350-700 nm), on observe une iridescence sur cette couche qui est induite par une interférence lumineuse. La capacité de ce film à s'étaler est le résultat de la force de gravité, de la tension interfaciale (2.2.5), de la force d'inertie et des forces visqueuses [37]. Cependant il existe trois phases temporelles qui ont été mises en évidence par Fay (1969) :

- i. La phase de début dans laquelle seules la gravité et les forces d'inertie sont importantes
- ii. Une phase intermédiaire dans laquelle la gravité et la viscosité sont les forces dominantes

- iii. Une phase finale dans laquelle la tension superficielle est équilibrée par des forces visqueuses

2.3.3 Dissolution

Au niveau du bilan massique de la quantité déversée, la dissolution est très faible et environ 1% de la masse du déversement se dissout dans l'eau de mer. Cela est dû entre autres à un faible coefficient de transfert de masse de dissolution et à la présence d'une faible quantité d'hydrocarbures solubles dont la plupart sont susceptibles de s'évaporer. Les hydrocarbures dissous peuvent encore s'évaporer et avoir un temps de résidence très court dans l'eau [38].

2.3.4 Dispersion

En mer, la nappe de pétrole est soumise aux vagues et la turbulence qui vont causer la scission de la nappe en gouttelettes de différentes tailles et les disperser dans la colonne d'eau. La turbulence est prépondérante, car la profondeur à laquelle les gouttelettes de pétrole sont entraînées dans la colonne dépend de celle-ci. Les particules d'hydrocarbure avec un diamètre inférieur à 70 μ m restent en suspension dues à un équilibre entre la vitesse à laquelle elle remonte vers la surface et la turbulence des vagues. Les gouttes qui remontent à la surface peuvent coalescer entre elles ou avec la nappe recréant ainsi une nappe ou simplement augmentant la taille de la nappe existante. Il est possible que la distribution des tailles de gouttelettes ait un impact indirect sur les autres processus de vieillissement [39], [40].

2.3.5 Émulsification

L'émulsification mène à une émulsion d'eau et de pétrole. Différents états de l'eau dans l'huile sont formés et appelés « mousse au chocolat » en raison de sa ressemblance avec cette texture. Les émulsions ont un impact significatif sur les propriétés du pétrole déversé. Dans le cas d'une émulsion stable, celles-ci contiennent 60 à 85 % d'eau, augmentant le volume de trois à cinq fois le volume initial. La densité et la viscosité peuvent aussi être plus importantes que leurs valeurs de départ. L'émulsification a un impact sur l'évaporation. En effet, l'évaporation ralentit fortement l'étalement (2.3.2) du pétrole qui va descendre plus bas dans la colonne d'eau [41].

2.3.6 Photo-oxydation

La photo-oxydation est un processus d'oxydation de la nappe d'hydrocarbures par la lumière solaire [42]. La nappe peut se décomposer en produits solubles et créer des composés beaucoup plus toxiques qu'au début du déversement [43], le mécanisme est très lent et son importance relative est faible par rapport aux autres processus de vieillissement majeurs (Figure 2.1).

2.3.7 Biodégradation

La biodégradation est la décomposition de matières organiques par des microorganismes comme les bactéries, les champignons ou les algues. Dans le cas des hydrocarbures, des microorganismes peuvent les dégrader et utiliser les composants présents dans le pétrole. Ce processus est d'autant plus présent dans les océans en manque de carbone [44]. La dégradation des hydrocarbures pétroliers par la biodégradation commence à partir de quelques heures suivant la présence du pétrole jusqu'à l'ordre de l'année si le pétrole est toujours présent (Figure 2.1). Cependant, cela reste un processus de vieillissement relativement faible.

2.3.8 Sédimentation

La sédimentation est le processus par lequel le pétrole se dépose au fond de la mer. La majorité des sédimentations ont lieu lorsque les gouttes de pétrole ont atteint une densité plus importante que l'eau de mer après avoir interagi avec des particules. Lorsque le pétrole atteint le fond, il se dégrade très lentement. Il est possible qu'environ 10% du pétrole déversé sédimente [45].

2.4 Transport de la nappe d'hydrocarbures en milieu marin

Les processus de vieillissement explicités dans la section 2.3 ont une incidence sur les propriétés physiques et chimiques d'hydrocarbures pétroliers. À travers la littérature sur les comportements et le devenir des hydrocarbures en mer, il a été remarqué que les processus tels que l'étalement et la sédimentation via le naufrage ne sont parfois pas considérés comme processus de vieillissement au sens strict, mais comme des processus de transport de la nappe d'hydrocarbures à part entière. Dans la suite, la distinction sera unanime. Il convient naturellement de séparer les processus de transport verticaux et horizontaux.

Selon le NRC (National Research Council, U.S.A), il est nécessaire de distinguer le transport horizontal de la dispersion horizontale, car transport horizontal signifie un déplacement selon un axe prédéfini par opposition à la dispersion horizontale qui est étudiée autour d'un point de référence fixe et n'implique pas nécessairement de mouvement net [41].

2.4.1 Transport horizontal

Selon l'horizontale, les processus de transport sont l'étalement (2.3.2) ainsi que le transport horizontal induit par la somme des trois contributions suivantes [46] qui sera détaillée par la suite :

- L'advection par les courants
- Le forçage direct du vent (« *Windage* » en anglais)
- La dérive de Stokes (« *Stokes Drift* » en anglais)

2.4.1.1 Courants

Les courants ne sont pas seulement induits par les gradients horizontaux de pression et de densité, mais aussi par les vents (dérive d'Ekman) et les marées (courants de marée).

La structure des courants de surface dans la zone entre Lanzarote et la côte marocaine est constituée d'un courant de surface s'écoulant vers le sud, connu sous le nom du Courant Canarien et d'un contrecourant dirigé vers le nord. Cependant, le flux est dirigé vers le sud-ouest sur une moyenne annuelle avec un ordre de grandeur de quelques cm/s (similaire aux ordres de grandeur des courants de marée barotropes), bien que la disposition particulière de l'archipel des Canaries introduit une variabilité supplémentaire en raison de sa structure [47]. De plus, cette zone est soumise aux alizés venant du nord-est qui impliquent un upwelling côtier (transport d'Ekman) le long de la côte africaine [48].

2.4.1.2 Forçage direct du vent (Windage)

Le vent a un effet direct sur les objets avec un rebord qui dépasse de la surface et exposé au vent. Dans le cas d'une nappe de pétrole, le vent induit un déplacement direct de la nappe qui est liée à la vitesse du vent. Il est important de souligner que le « *windage* » ne correspond pas

à la fraction de courant de surface qui a été induite par le vent (2.4.1.1), mais bien à la traînée directe du vent exercée sur la nappe [49].

2.4.1.3 Dérive de Stokes (Stokes Drift)

À la surface de l'océan, on peut apercevoir des mouvements ondulatoires. Même s'il s'agit dans tous les cas d'ondes mécaniques, différentes forces physiques (force de gravité, force de Coriolis, tension du vent, etc.) peuvent être à l'origine de ces ondes (ondes barotropes de Kelvin, de Rossby ou encore la houle). Selon la théorie d'Airy (1845) sur la houle, les trajectoires des particules d'eau sont fermées, qui en fonction du rapport de la profondeur et de la longueur d'onde sont soit elliptiques, circulaires ou intermédiaires, et ce sans déplacement de matière (Figure 2.2). Par conséquent, cette théorie ne peut expliquer le déplacement de la nappe de pétrole en mer.

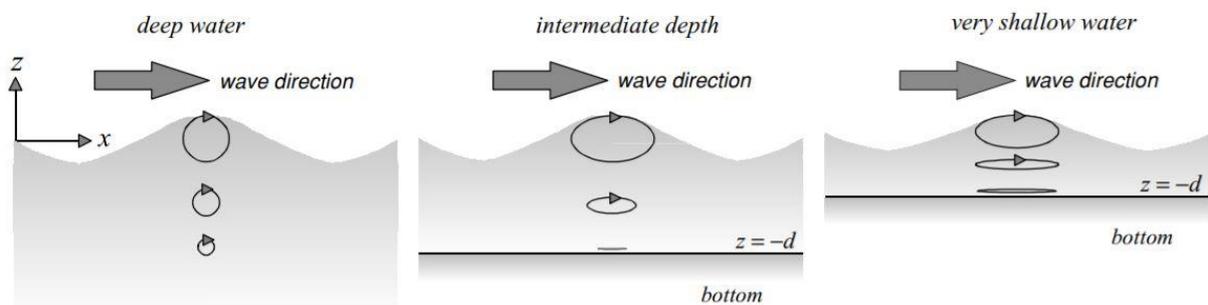


Figure 2.2 | Le mouvement orbital dans les eaux profondes, les eaux de profondeur intermédiaire et les eaux très peu profondes selon la théorie d'Airy [50].

Cette théorie n'est pas exacte, car en réalité les équations qui régissent la propagation des ondes oscillantes (houle y compris) sont fortement non-linéaires. On entend par non-linéaire, que l'on cherche une solution approchée en développant les coordonnées de la position et de la pression en série de puissances successives de l'amplitude H de l'onde oscillante en fonction de coordonnées de référence et du temps t pour chaque particule [51].

En fonction du nième ordre où la série est arrêtée, on obtient comme solution une houle du nième ordre. Au 1^{er} ordre, les théories sont dites linéaires (i.e. Théorie d'Airy). Lorsque l'on passe au 2nd ordre, le terme quadratique en l'amplitude va déformer les trajectoires qui ne seront plus fermées et va déplacer les particules dans la direction de propagation de l'onde : c'est la dérive de Stokes [52]. L'étude empirique menée par Kenyon (1969) a montré que la dérive de

Stokes était de l'ordre de 1.5% de la vitesse du vent en milieu marin ouvert [53]. Les particules d'hydrocarbures seront donc soumises elles aussi à cette dérive.

Parfois on regroupe les composantes du forçage direct du vent et de la dérive de Stokes sous un autre nom : la marge de manœuvre globale (« *leeway* » en anglais) [54] car en réalité il est difficile de quantifier l'impact de la dérive de Stokes.

Dans la Figure 2.1, le processus « Dérive » qui n'a pas encore été discuté est d'une importance relative très faible dans les transformations de la nappe, mais il est crucial dans le devenir d'une nappe d'hydrocarbure, car il peut être apparenté ici aux actions de forçage du vent, des ondes et des courants qui feront dériver la nappe d'hydrocarbures.

2.4.2 Processus verticaux

En ce qui concerne la verticale, il n'y a pas vraiment de transport de la nappe d'hydrocarbures au sens propre. Il s'agit plutôt de la dispersion verticale induite par les vagues (entraînement vertical) et à la turbulence causant la scission de la nappe en gouttes de différentes tailles en les dispersant et les entraînant dans la colonne d'eau. Un autre processus vertical est le naufrage du pétrole lorsque celui-ci devient plus dense que l'eau, imprimant une vitesse verticale au pétrole qui par inertie ira se poser au fond s'il est plus dense que toutes les densités présentes dans la colonne d'eau ainsi, la sédimentation s'en suivra. Il est vrai que les vitesses verticales peuvent induire un transport, cependant elles sont en général négligeables.

Chapitre 3

Matériel et méthodologie

3.1 Le modèle

L'outil utilisé dans le cadre de ce mémoire est OpenDrift, un logiciel de modélisation des trajectoires d'éléments ou de substances dérivant dans l'océan (formalisme lagrangien). OpenDrift est disponible en tant que logiciel à code source ouvert en langage Python à l'adresse <https://github.com/OpenDrift>. Il est composé de plusieurs modules dont OpenDrift3D et OpenOil. La combinaison de ces deux modules induit un sous-module OpenOil3D qui, en définitive, est le module utilisé afin de modéliser la trajectoire d'éléments pétroliers dans cette étude. Il permet d'intégrer les forçages du vent ainsi que des données hydrodynamiques.

3.1.1 Le modèle de dérive OpenOil3D

OpenOil3D est un modèle comprenant plusieurs sous-modèles qui prennent en compte les processus physiques tels que l'entraînement vertical causé par les vagues déferlantes, la turbulence et des processus de vieillissement tels que l'évaporation, l'émulsification et la dispersion. La Figure 3.1 présente les étapes séquentielles effectuées par le modèle OpenOil3D.

3.1.1.1 Distribution de la taille des gouttelettes d'hydrocarbure

Il existe deux paramétrisations qui peuvent décrire la distribution de la taille des gouttelettes d'hydrocarbure (DTGH) implémentées au sein d'OpenOil3D. La première est celle de Johansen et al. (2015) qui n'est pas considérée dans ce travail, car elle est conçue pour des éruptions en hydrocarbures en eau profonde voire sur le fond marin [55]. La seconde paramétrisation, utilisée dans ce travail pour la DTGH est basée sur Li et al. (2017) qui tient compte de la viscosité de l'hydrocarbure ainsi que de la tension interfaciale [56]. La DTGH est donnée par une fonction densité de probabilité (FDP) (Eq. 3.2) adapté de Röhrs et al. (2018). Elle est

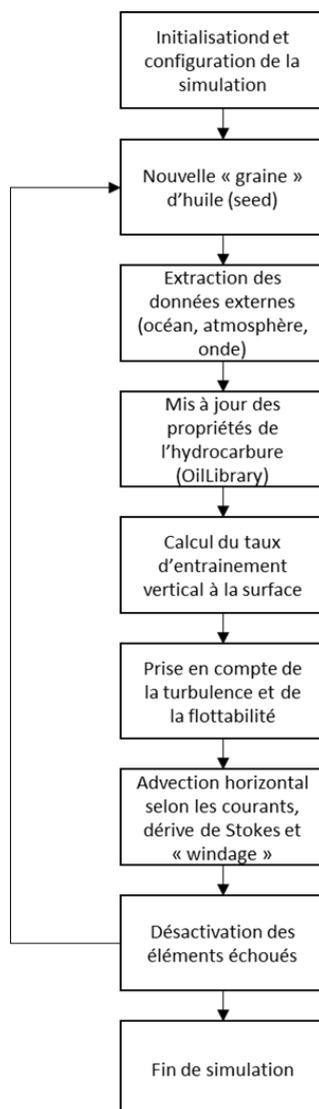
centrée en le logarithme du diamètre moyen des gouttelettes (DMV) donné par Li et al. (2017) (Eq. 3.1)

$$DMV = r \cdot d_0(1 + 100h)^p \cdot We^t \quad (Eq. 3.1)$$

avec le coefficient empirique $r = 1.791$ et les valeurs de $p = 0.460$ et $t = -0.518$ pour les exposants. Le nombre d'Ohnesorge (Oh), le nombre de Weber (We) et le diamètre maximal d'instabilité de Rayleigh-Taylor (d_0) sont définis plus en détail dans l'annexe (A. 1-A. 3)

$$FDP(d) = \frac{1}{d s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(d) - \ln(DMV))^2}{2s^2}} \quad (Eq. 3.2)$$

où $s = 0.38$ est l'écart-type et d le diamètre de chaque gouttelette [57].



Lorsque les gouttelettes d'hydrocarbures sont submergées par des vagues déferlantes, elles se voient attribuer un diamètre selon un algorithme d'entraînement des vagues [58]. Le diamètre peut aussi changer via les processus de vieillissement et les conditions atmosphériques [59].

Figure 3.1 | Opérations impliquées dans OpenOil3D

3.1.1.2 Transport horizontal

Comme déjà souligné dans le Chapitre 2 (2.4.1), les trois processus à considérer sont : l'advection par les courants, la dérive de Stokes et le forçage direct du vent qui induit un effet de dérive supplémentaire sur la nappe. Dans cette étude, la dérive de Stokes est nulle.

En modélisation des déversements d'hydrocarbures, on s'accorde à considérer que la dérive induite par la dérive de Stokes plus le forçage direct du vent est de 3 à 4 % par rapport à la vitesse du vent. C'est pourquoi l'effet de dérive direct du vent (« windage ») est souvent posé égal à 2% de la vitesse du vent. Avec les 1.5% de la dérive de Stokes par rapport au vent, on retrouve la valeur commune de 3.5% [60], [61]. Afin de compenser la dérive de

Stokes, qui est nulle dans cette étude, le forçage direct du vent est posé égal à 3% pour atteindre cette valeur commune entre 3-4%. Les composantes peuvent mener à un fort gradient de dérive dans les premiers mètres de l'océan. C'est pour cela qu'il est extrêmement important d'avoir une bonne description des processus suivant la verticale qui sont les facteurs suivants : la turbulence, l'entraînement et la flottabilité [62].

3.1.1.3 Processus verticaux

À la section 2.4.2, la turbulence et l'entraînement vertical ont été considérés comme les seuls processus suivant la verticale. Cependant, il faut ajouter à ça la flottabilité qui est un processus affectant l'entraînement vertical soit en le renforçant ou en le diminuant. La flottabilité des gouttelettes est calculée suivant des relations empiriques et la loi de Stokes provenant de Tkalic et al. (2002). La flottabilité dépend de la stratification qui est calculée à partir de la température et de la salinité issues d'un modèle hydrodynamique (3.1.2), des viscosités de l'hydrocarbure et de l'eau de mer ainsi que de leurs densités respectives [63]. La turbulence est décrite par un schéma « random walk » [64].

3.1.1.4 Processus de vieillissement

Les différents types d'hydrocarbures disponibles proviennent de la librairie NOAA OilLibrary (<https://github.com/NOAA-ORR-ERD/OilLibrary>) qui possède une gamme d'environ 1000 hydrocarbures provenant du monde entier avec leurs caractéristiques respectives. Les processus de vieillissement implémentés dans OpenOil3D sont l'évaporation, l'émulsification et la dispersion, issus du modèle PyGnome de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (<https://github.com/NOAA-ORR-ERD/PyGnome>).

3.1.2 Le modèle hydrodynamique 3D

Les courants océaniques dans la zone d'étude proviennent du service de surveillance du milieu marin Copernicus (CMEMS) pour la région Ibérique-Biscaye-Irlandaise (IBI-PHY) disponible à l'adresse <https://marine.copernicus.eu/>. Les données sont issues du modèle d'analyse et de prévision IBI_ANALYSISFORECAST_PHY_005_001. Il fournit des analyses pour des variables comme la température, les courants ou encore la salinité. Les sorties du modèle IBI-PHY sont disponibles avec différentes résolutions temporelles (mois, jour, heure).

Cependant, les données horaires ne sont disponibles que pour 7 jours d'analyse et 5 jours de prévisions en deçà de la date où le produit est téléchargé.

Par conséquent, le jeu de données avec une résolution temporelle journalière *cmems_mod_ibi_phy_anfc_0.027deg-3D_PID-m* est utilisé dans cette étude étant donné qu'il possède une plus large fenêtre temporelle (environ 2 ans de données). Les dates utilisées dans ce travail sont comprises entre le 4 mai 2019 et le 4 mai 2021. Cela permettra entre autres d'analyser la variabilité interannuelle sur deux années successives des dérives éventuelles de nappe d'hydrocarbures. Dans la suite, le modèle hydrodynamique est renommé IBI.

Le modèle IBI est défini dans une grille horizontale régulière (Figure 3.2) i.e. avec des pas constants de longitude et latitude avec une résolution d'environ $1/36^\circ \sim 2\text{-}3\text{ km}$ en latitude et longitude [65].

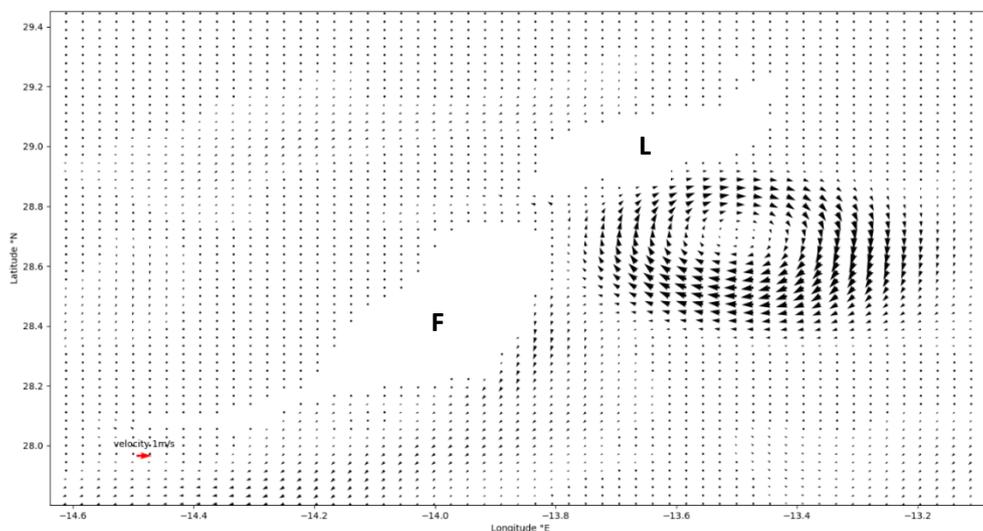


Figure 3.2 | Vitesse des courants de surface (m/s) (modèle IBI) dans la zone d'étude le 22/06/2019 12h UTC. Les formes blanches représentent les îles de Fuerteventura (F) et Lanzarote (L). La flèche rouge indique une norme de 1m/s.

IBI possède 50 niveaux verticaux en coordonnées z qui sont non uniformément espacés : 1 mètre de résolution de la surface aux 10 premiers mètres et 400 mètres de résolution dans l'océan profond. L'information provenant d'IBI est basée sur le modèle NEMO-v3.6 [66]. Le modèle NEMO résout les équations primitives tridimensionnelles (Eq. 3.3-Eq. 3.8) aux différences finies en coordonnées sphériques discrétisées sur une grille C d'Arakawa en

supposant l'équilibre hydrostatique (i.e. le gradient de pression est supposé équilibrer parfaitement la gravité) et l'approximation de Boussinesq (i.e. les variations de densité sont négligées sauf dans leur contribution à la force de flottabilité). De plus, la profondeur de l'océan a été négligée par rapport au rayon terrestre et les flux turbulents \mathbf{D} (qui représentent l'effet des processus de petites échelles sur les plus larges échelles) sont exprimés en fonction des champs moyens de grandes échelles [67].

Par souci de clarté, les équations primitives 3D sont montrées ici en coordonnées cartésiennes dans un repère orthogonal ($\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$).

Soit ∇ l'opérateur différentiel vectoriel défini comme :

$$\nabla = \mathbf{e}_1 \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_2 \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_3 \frac{\partial}{\partial z}$$

Le vecteur vitesse \mathbf{v} est décomposé en ses composantes horizontales \mathbf{u} et verticale w tel que

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} + w \mathbf{e}_3$$

Soit le système des équations primitives suivant :

Hypothèse d'incompressibilité

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Équilibre hydrostatique

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Équation d'état

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Équation de moment horizontal

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} + f \mathbf{e}_3 \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla_h p + \mathbf{D}^u + \mathbf{F}^u \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Conservation de la température

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T\mathbf{v}) = \mathbf{D}^T + \mathbf{F}^T \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Conservation de la salinité

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot (S\mathbf{v}) = D^S + F^S \quad (\text{Eq. 3.8})$$

où ∇_h est l'opérateur ∇ dans le plan horizontal ($\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$), ρ est la densité *in situ* donnée par l'équation d'état (Eq. 3.5), ρ_0 est la densité de référence, p la pression, f la fréquence de Coriolis et g l'accélération gravitationnelle. \mathbf{D}^u, D^T et D^S sont les flux turbulents pour la quantité de mouvement, la température et la salinité, paramétrisés avec une fermeture turbulente (i.e. opposés et proportionnels aux champs moyens). \mathbf{F}^u, F^T et F^S sont les termes de tensions de surface.

Les variables horizontales contenues dans IBI quel que soit le niveau vertical (vitesse méridionale et zonale, température, salinité) sont toutes situées à un même point de la grille, et ce dans tout le domaine. Par conséquent, une interpolation a été effectuée depuis NEMO afin de passer de la grille C d'Arakawa à une grille standard longitude/latitude. Le modèle IBI n'étant pas un modèle d'onde (« *wave model* »), la vitesse de dérive de Stokes n'est pas prise en compte dans ce travail. Des modèles d'ondes étaient disponibles via CMEMS, cependant seuls les effets du vent et des courants voulaient être étudiés.

Le modèle IBI est forcé toutes les heures par des prévisions atmosphériques (vent à 10 m, pression de surface, humidité relative, précipitations, flux radiatifs) fournies par le ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather) avec une résolution de $1/8^\circ \sim 12.5$ km. Il tient aussi compte des marées et des décharges en eau douce de différents fleuves/rivières [68].

3.1.3 Forçage du vent

En plus de prendre en considération les courants fournis par le modèle IBI, le système tient aussi compte toutes les heures de champs de vent à 10 mètres de la surface provenant de ERA5 qui est la cinquième génération de réanalyse ECMWF du climat mondial et de la météo des 4 aux 7 dernières décennies. La résolution horizontale est de $1/4^\circ \sim 25$ km dans une grille standard longitude/latitude [69]. Il est important de noter que même si IBI est déjà forcé par des vents à 10 m de la surface, il est intéressant de prendre en compte un champ de vent supplémentaire qui aura un effet direct sur la nappe d'hydrocarbure.

3.2 Cadre expérimental

L'étude est basée sur l'hypothèse d'un accident pétrolier où l'hydrocarbure issu du réservoir d'un bateau/navire est déversé en mer de manière instantanée en un point. L'hydrocarbure pétrolier utilisé « IFO 180 » est un mélange de fuel lourd (« Heavy fuel oil (HFO) ») présent en proportion majoritaire, avec des carburants plus légers comme le diesel marin d'où l'acronyme IFO qui signifie *intermediate fuel oils*. Le chiffre 180 fait référence à la viscosité cinématique qui est de 180 mm²/s (2.2.2) et sa densité est de 969,3 kg/m³ (2.2.1). La navigation commerciale utilise presque toujours de l'IFO, car son constituant majoritaire, le HFO est peu coûteux [70].

Les points de déversements (Figure 3.3) ont été choisis sur base de cartes de densité du trafic maritime issu du site <https://www.marinetraffic.com/>. Afin d'exhiber une possible variabilité interannuelle, un déversement est effectué par saison entre mai 2019 et mai 2021. Les dates et les points de déversement sont montrés en Tableau 3.1.

Le volume initial déversé est de 10 000 m³ étalé sur une surface de 1 km². Le nombre d'éléments est fixé à 10000 soit 969,3 kg/élément. Les simulations sont exécutées avec un pas temporel de 30 minutes. Lorsque les éléments se heurtent à la côte, ils sont désactivés de la simulation. La masse dispersée des éléments (en gouttelettes) via des événements de vagues déferlantes est considérée comme perdue et ne peut revenir à la surface. L'émulsification est considérée, mais l'IFO 180 n'est pas préémulsifié au départ i.e. il n'y a aucune présence d'eau dans la phase huileuse.

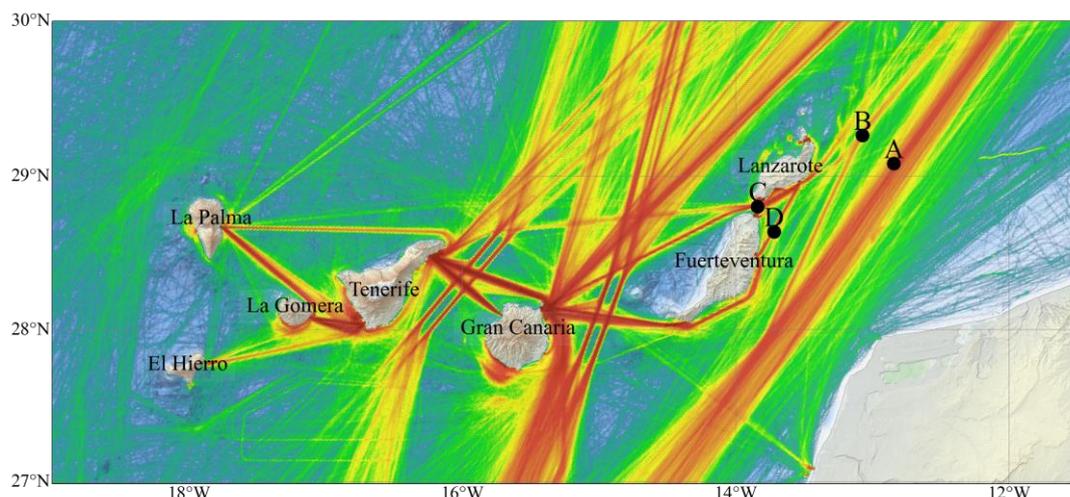


Figure 3.3 | Densité des routes maritimes. Les positions initiales de déversement : A, B, C, D. Se référer au Tableau 3.1 pour les coordonnées. D'après les données de [71].

Tableau 3.1 | Dates et positions des déversements. Les saisons : printemps, été, automne, hiver sont référencées par les lettres P, E, A et H respectivement. Les positions initiales sont nommées par les lettres A, B, C, D et les indices 1, 2 indiquent l'année du déversement. Un déversement à une saison fixe et date fixe est caractérisé par un triplet unique. Toutes les simulations sont effectuées à 12h UTC.

	Printemps (P)	Été (E)	Automne (A)	Hiver (H)
Position initiale (°N, °W)				
A = (29.0813, 12.8442)	11 mai 2019 (AP1)	22 juillet 2019 (AE1)	10 octobre 2019 (AA1)	28 janvier 2020 (AH1)
	11 mai 2020 (AP2)	22 juillet 2020 (AE2)	10 octobre 2020 (AA2)	28 février 2021 (AH2)
B = (29.2632, 13.0722)	11 mai 2019 (BP1)	22 juillet 2019 (BE1)	10 octobre 2019 (BA1)	28 janvier 2020 (BH1)
	11 mai 2020 (BP2)	22 juillet 2020 (BE2)	10 octobre 2020 (BA2)	28 février 2021 (BH2)
C = (28.8031, 13.8402)	11 mai 2019 (CP1)	22 juillet 2019 (CE1)	10 octobre 2019 (CA1)	28 janvier 2020 (CH1)
	11 mai 2020 (CP2)	22 juillet 2020 (CE2)	10 octobre 2020 (CA2)	28 février 2021 (CH2)
D = (28.6398, 13.7202)	11 mai 2019 (DP1)	22 juillet 2019 (DE1)	10 octobre 2019 (DA1)	28 janvier 2020 (DH1)
	11 mai 2020 (DP2)	22 juillet 2020 (DE2)	10 octobre 2020 (DA2)	28 février 2021 (DH2)

Chapitre 4

Résultats

4.1 Saisons

Dans ce chapitre, nous allons montrer les résultats obtenus pour les différentes saisons durant deux ans aux différents points de sources (Tableau 3.1). De plus, les îles de La Graciosa, de Montaña Clara et de l'Alegranza sont considérées comme faisant partie de Lanzarote.

4.1.1 Printemps 2019-2020

Lors de AP1 (Figure 4.1), les éléments (ELS) restent assez proches entre eux durant une grande partie de la trajectoire et se séparent vers la fin. Tous vont en direction du sud-ouest. Ceux heurtant la côte est de Fuerteventura (CEF) ont été déviés de leur trajectoire par un tourbillon anticyclonique (TA). La présence de ce TA est évidente lors de BP1 et DP1 (Figure 4.1), car les points initiaux de déversements sont à plus courte portée du TA. Par conséquent, plus d'éléments sont entraînés vers la CEF. Dans le cas de DP1, la quasi-totalité des ELS s'est échouée (Tableau 4.1). Suivant CP1, la côte nord de Fuerteventura est touchée et les ELS actifs sont entraînés vers le sud-ouest par le Courant Canarien (CC).

Durant le printemps 2020, les trajectoires de AP2 (Figure 4.2) sont subdivisées en une branche suivant le CC et une autre avortant sur le continent africain. Contrairement au printemps 2019, les vents sont dirigés vers le nord-est et imposent une composante de dérive supplémentaire. Environ 97% des ELS se sont échoués (Tableau 4.1). On dénote toujours la présence d'un TA au large de Fuerteventura, mais plus petit en diamètre et plus faible en intensité par rapport au printemps 2019, visible avec DP2 où la plupart des ELS vont en direction du sud-ouest et peu s'échouent sur la CEF (Tableau 4.1).

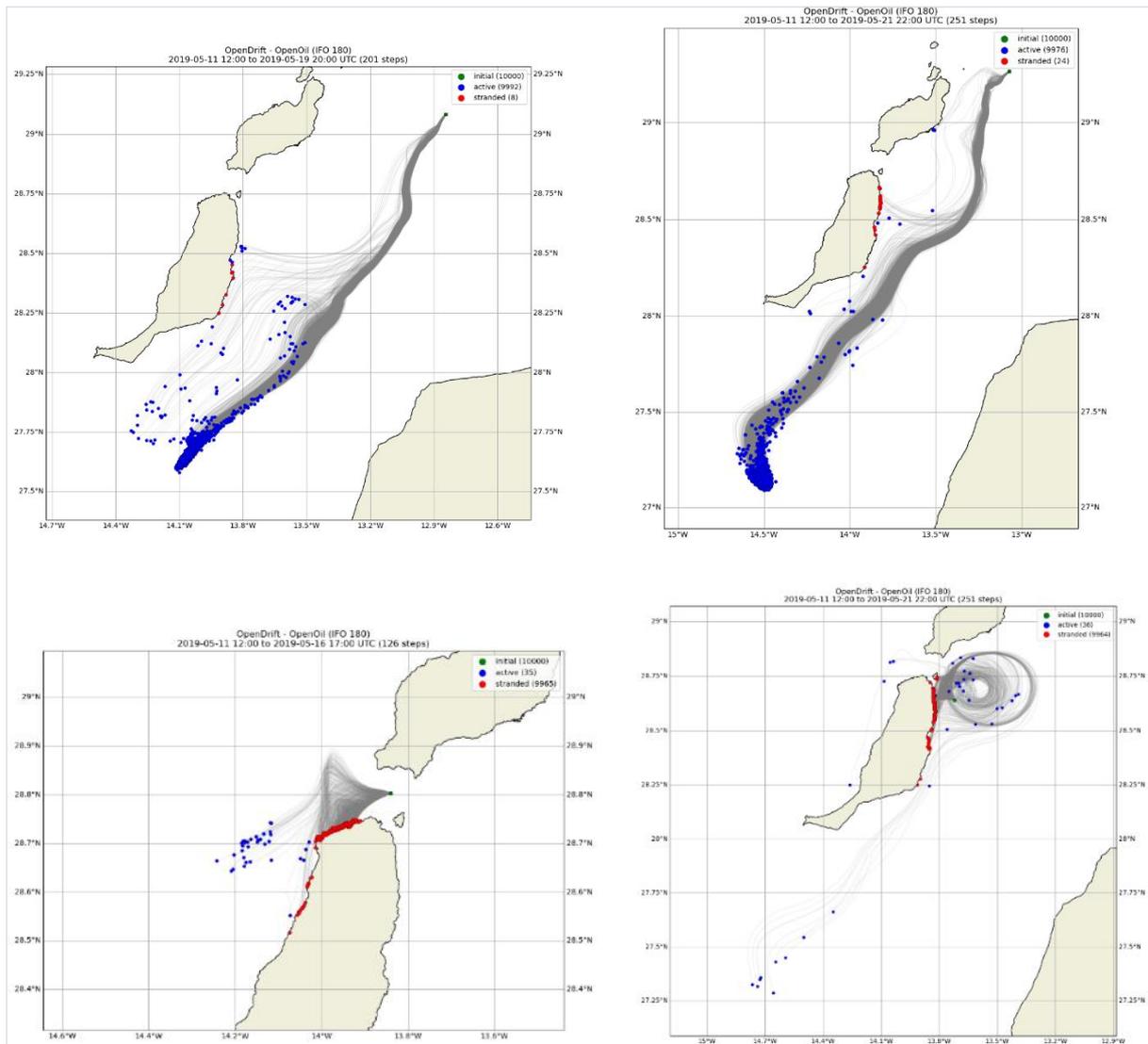


Figure 4.1 | Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AP1), droit (BP1). Panneau inférieur : gauche (CP1), droit (DP1).

Lors de BP2, la plupart des ELS suivent la même direction que BP1, mais la trajectoire est déviée par l'action du vent. Le nombre d'ELS atteignant les côtes est similaire à BP1 ($< 0.1\%$). Dans le détroit de La Bocaina, les courants ont changé de direction par rapport au printemps 2019. Par conséquent, les ELS pendant CP2 sont dirigés vers les eaux au large de la CEF et environ 84% s'échouent sur l'île de Lobos.

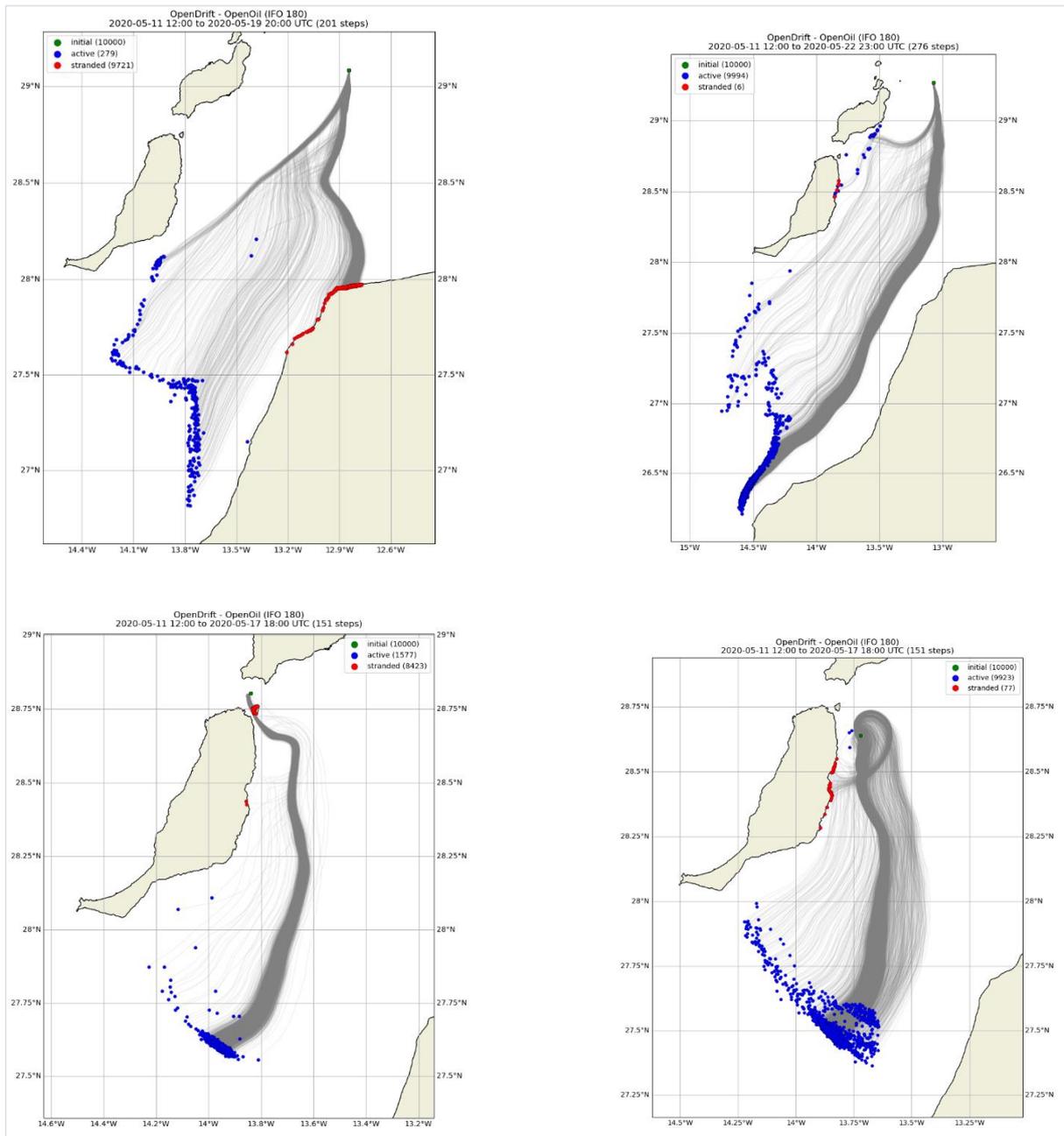


Figure 4.2 | Similaire à Figure 4.1, mais pour le printemps 2020. Panneau supérieur : gauche (AP2), droit (BP2). Panneau inférieur : gauche (CP2), droit (DP2).

Tableau 4.1 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des printemps 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.

Déversement	Éléments échoués (%)	Masse totale échouée (%)	1^{er} impact (Jour (j) et heure (h))
AP1	0.08	< 0.1	6j et 18h30 (F)
AP2	97.21	≈ 5	4j et 19h (A)
BP1	0.24	< 0.1	6j et 16h30 (F)
BP2	0.06	< 0.1	10j et 23h30 (F)
CP1	99.65	≈ 60	10h (F)
CP2	84.23	≈ 75	13h30 (Lo) 2j et 4h (F2)
DP1	99.64	≈ 55	20h30 (F) 21h (Lo2)
DP2	0.77	< 0.1	4j et 6h (F)

4.1.2 Été 2019-2020

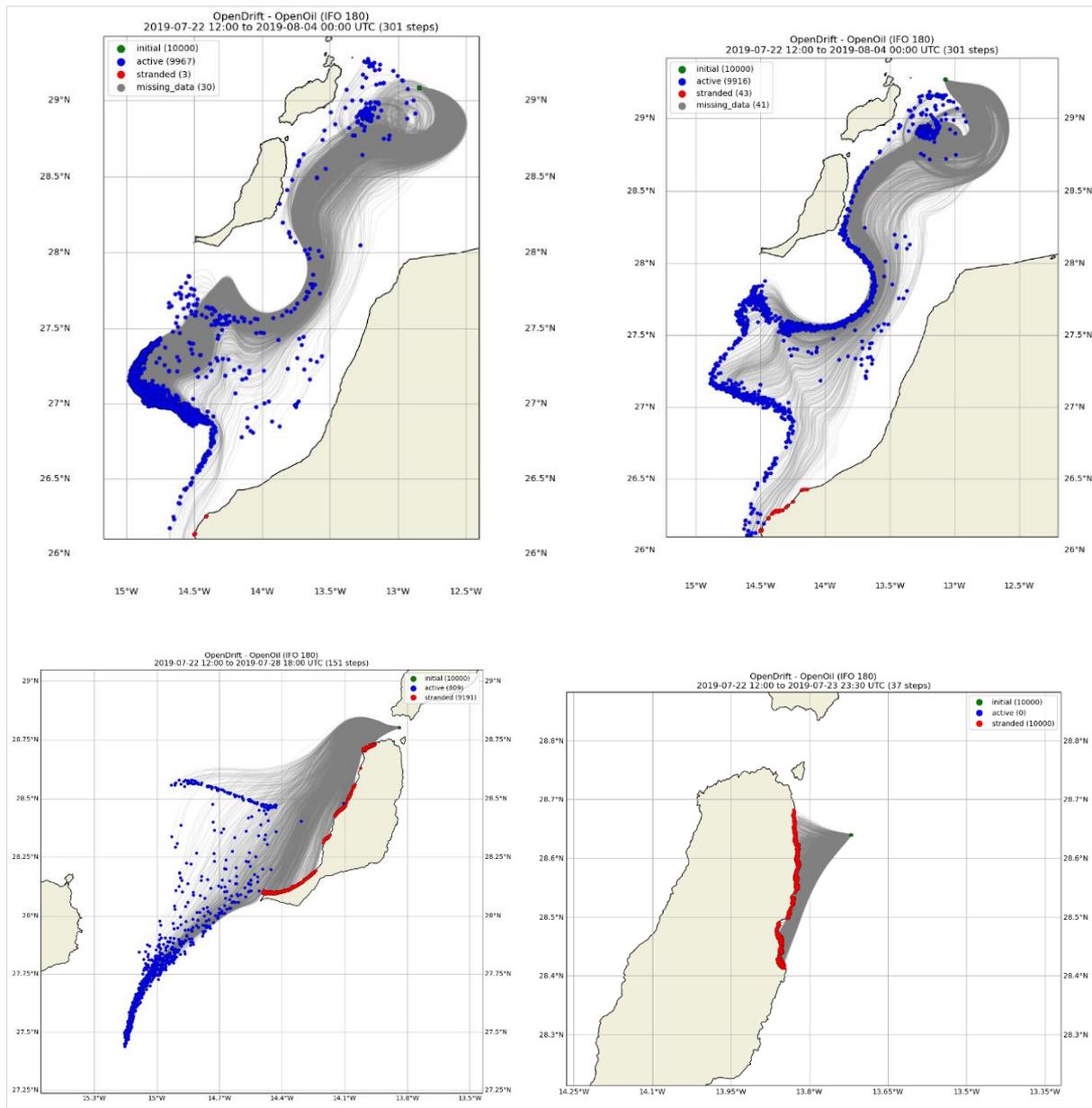


Figure 4.3 | Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AE1), droit (BE1). Panneau inférieur : gauche (CE1), droit (DE1).

Les trajectoires des ELS suivant AE1 et BE1 (Figure 4.3) sont fortement semblables. Les ELS sont entraînés autour d'un TA au large de Lanzarote puis se dirigent vers Fuerteventura où la présence d'un autre TA les amène à contourner la côte sud de Fuerteventura. Ces deux TA sont aussi présents lors de AE2 et BE2 à l'été 2020, ce qui engendre une trajectoire plutôt

similaire (Figure 4.4) des ELS excepté qu'en 2020, certains se sont échoués sur Lanzarote et sur la CEF. Il est important de noter que le TA le plus au nord n'est pas à la même position entre 2019 et 2020.

Selon le modèle IBI, les courants dans le détroit de La Bocaina sont dirigés vers l'ouest lors des étés 2019 et 2020. On constate entre CE1 et CE2 que la côte ouest de Fuerteventura est fortement touchée. Dans les deux cas, plus de 90% des ELS se sont échoués (Tableau 4.2).

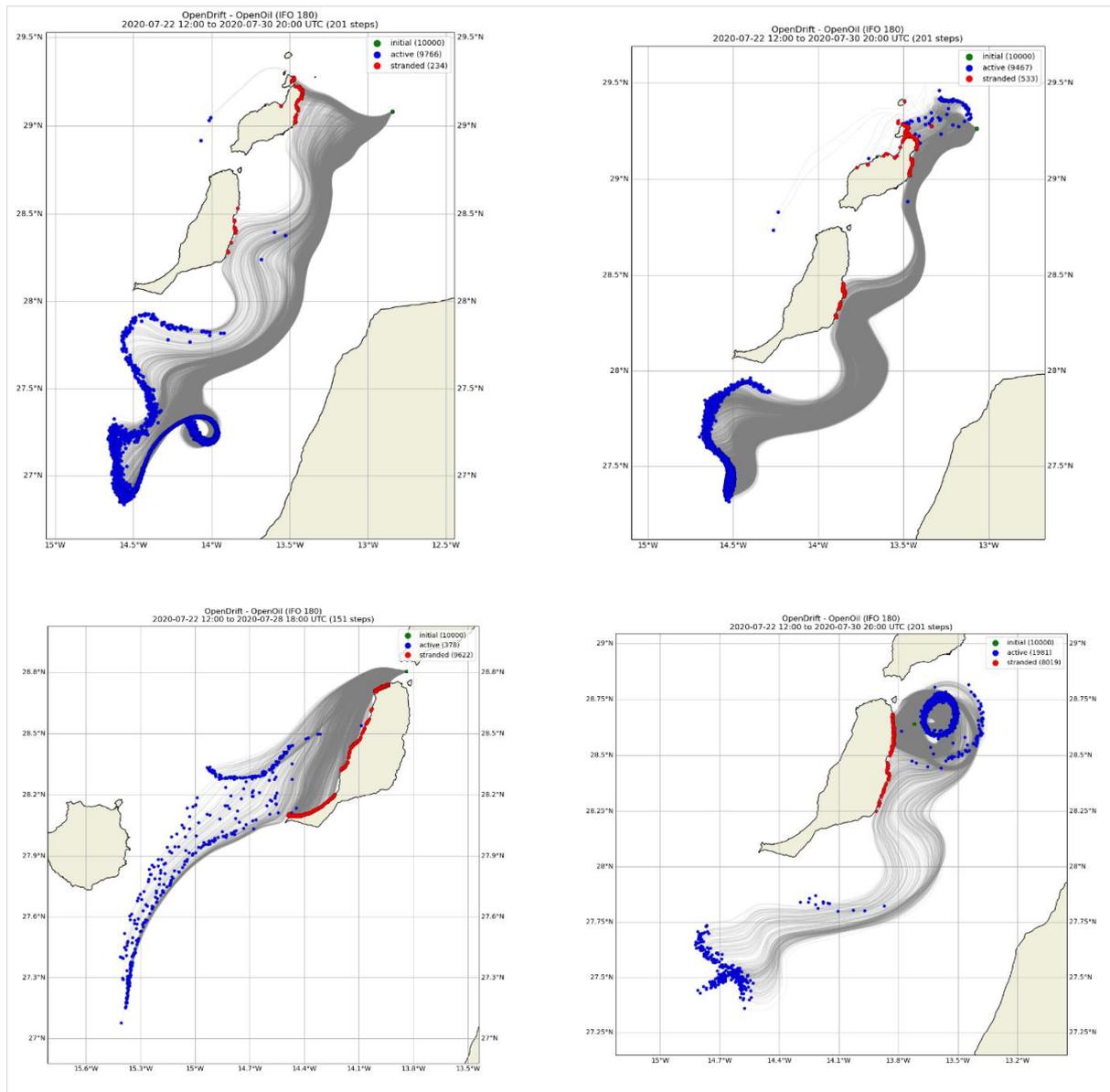


Figure 4.4 | Similaire à Figure 4.3, mais pour l'été 2020. Panneau supérieur : gauche (AE2), droit (BE2). Panneau inférieur : gauche (CE2), droit (DE2).

Lors de DE2 (Figure 4.4), le TA interagit de manière forte avec les ELS en gardant une partie en son centre. Environ 80% et 100% des ELS se sont échoués sur la CEF pendant DE2 et DE1 respectivement (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des étés 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.

Déversement	Éléments échoués (%)	Masse totale échouée (%)	1^{er} impact (Jour (j) et heure (h))
AE1	0.03	< 0.1	12j et 20h (A)
AE2	2.34	< 0.1	3j et 16h (L) 6j et 5h (F2)
BE1	0.43	< 0.1	12j et 16h (A)
BE2	5.33	< 0.1	3j et 1h30 (L) 6j et 17h (F2)
CE1	91.91	≈ 30	10h (F)
CE2	96.22	≈ 33	8h30 (F)
DE1	100	≈ 20	20h (F)
DE2	80.19	≈ 2	3j et 11h30 (F)

4.1.3 Automne 2019-2020

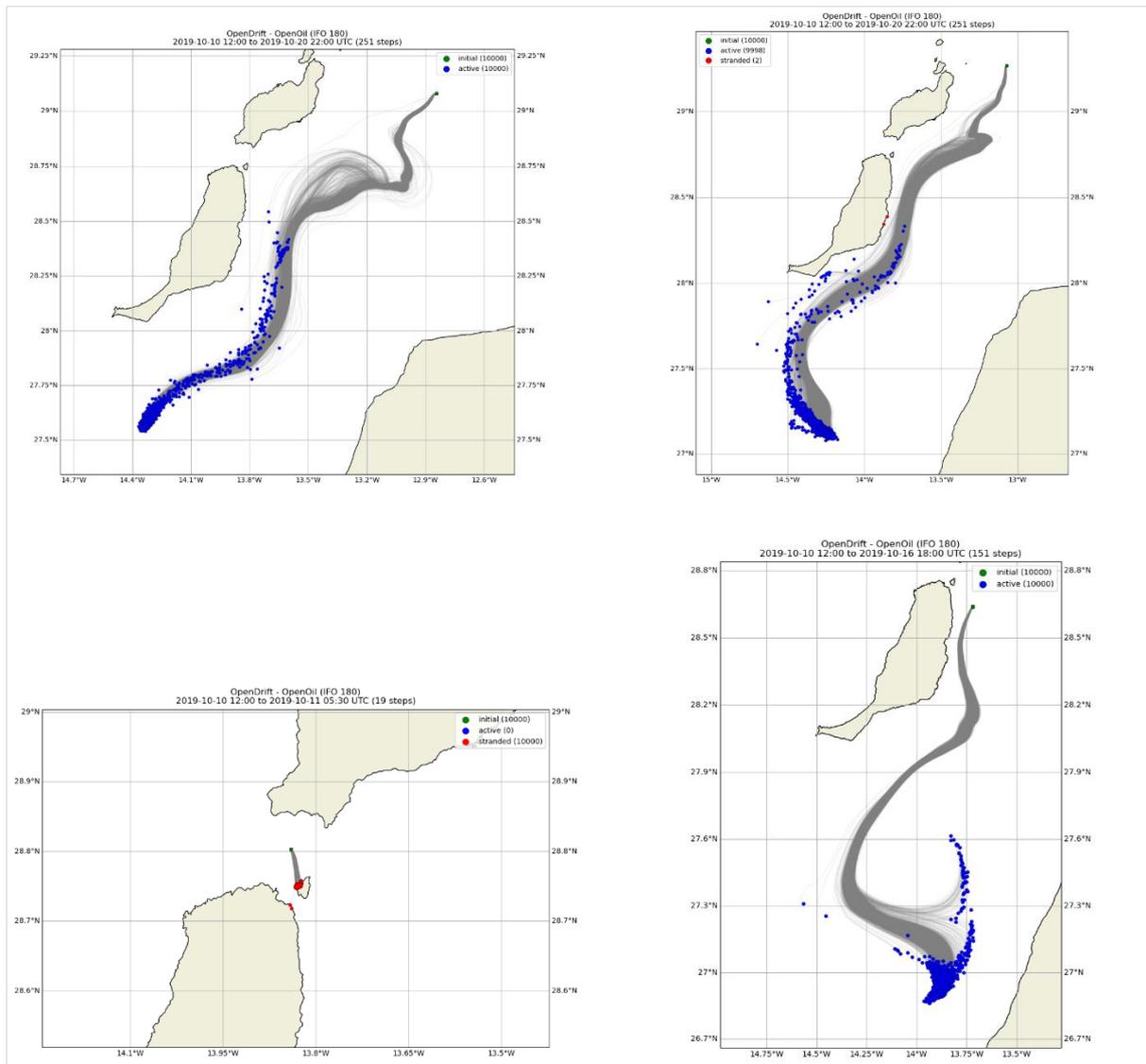


Figure 4.5 | Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AA1), droit (BA1). Panneau inférieur : gauche (CA1), droit (DA1).

En 2019 (Figure 4.5), la circulation est alternée de petits tourbillons et de méandres dans le CC rendant les trajectoires AA1, BA1 et DA1 sinueuses. Les ELS longent la CEF épousant la forme des côtes sans échouage d'ELS à l'exception de BA1 où moins de 1% s'est échoué. Dans le détroit de La Bocaina (CA1), la totalité des ELS heurte la côte de l'île de Lobos en moins de 7h (Tableau 4.3).

Chronologiquement (Figure 4.6), la simulation BA2 est effectuée jusqu'au 18/10/2020, DA2 jusqu'au 20/10/2020 et AA2 jusqu'au 27/10/2020. Cela permet de mettre en évidence la présence et le trajet d'un TA au large de la CEF. Vers le 18/10/2020, le TA est proche de la CEF (BA2) puis se décale vers l'est (DA2) et enfin remonte vers le nord centré en (13°W,28.60°N) (AA2). Pour BA2 et DA2, ce TA a pour conséquence d'entraîner une partie des ELS vers la CEF contrairement à AA2 où les ELS se propagent parallèlement à celle-ci. La côte nord de Fuerteventura est touchée lors de CA2 à hauteur de 70% d'ELS échoué (Tableau 4.3).

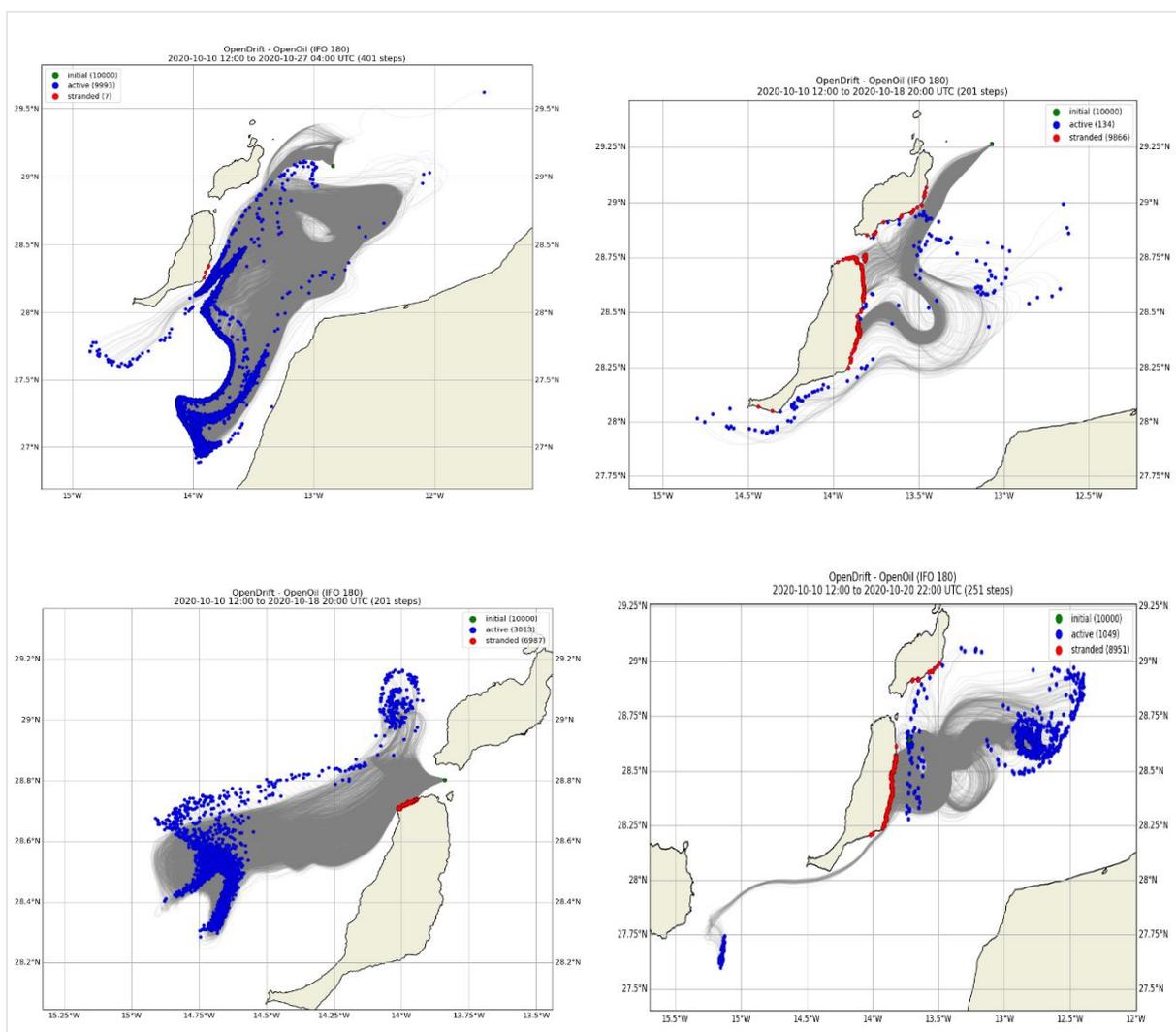


Figure 4.6 | Similaire à Figure 4.5, mais pour l'automne 2020. Panneau supérieur : gauche (AA2), droit (BA2). Panneau inférieur : gauche (CA2), droit (DA2).

Tableau 4.3 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des automnes 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.

Déversement	Éléments échoués (%)	Masse totale échouée (%)	1^{er} impact (Jour (j) et heure (h))
AA1	0	0	/
AA2	0.07	< 0.01	2j et 5h30 (F)
BA1	0.02	< 0.01	5j et 15h (F)
BA2	98.66	≈ 7.3	1j et 17h30 (L) 2j et 21h (Lo2) 2j et 21h30 (F3)
CA1	100	≈ 97.5	6h30 (Lo) 7h (F2)
CA2	69.87	≈ 20	9h30 (F)
DA1	0	0	/
DA2	89.51	≈ 5	2j et 12h (F) 8j et 8h (L2)

4.1.4 Hiver 2020-2021

En 2020 (Figure 4.7), la plupart des ELS (>95%) se sont échoués (Tableau 4.4), quel que soit le point initial de déversement. Les ELS suivent une trajectoire presque rectiligne. Mis à part DH1, les ELS actifs des autres points de déversement (AH1, BH1, CH1) ont tendance à se rendre vers les eaux de trouvant à l'est de Lanzarote et Fuerteventura. À ces dates, la présence de TA et TC n'est pas évidente à observer, car les ELS ne sont pas affectés par leur présence bien qu'il y en ait.

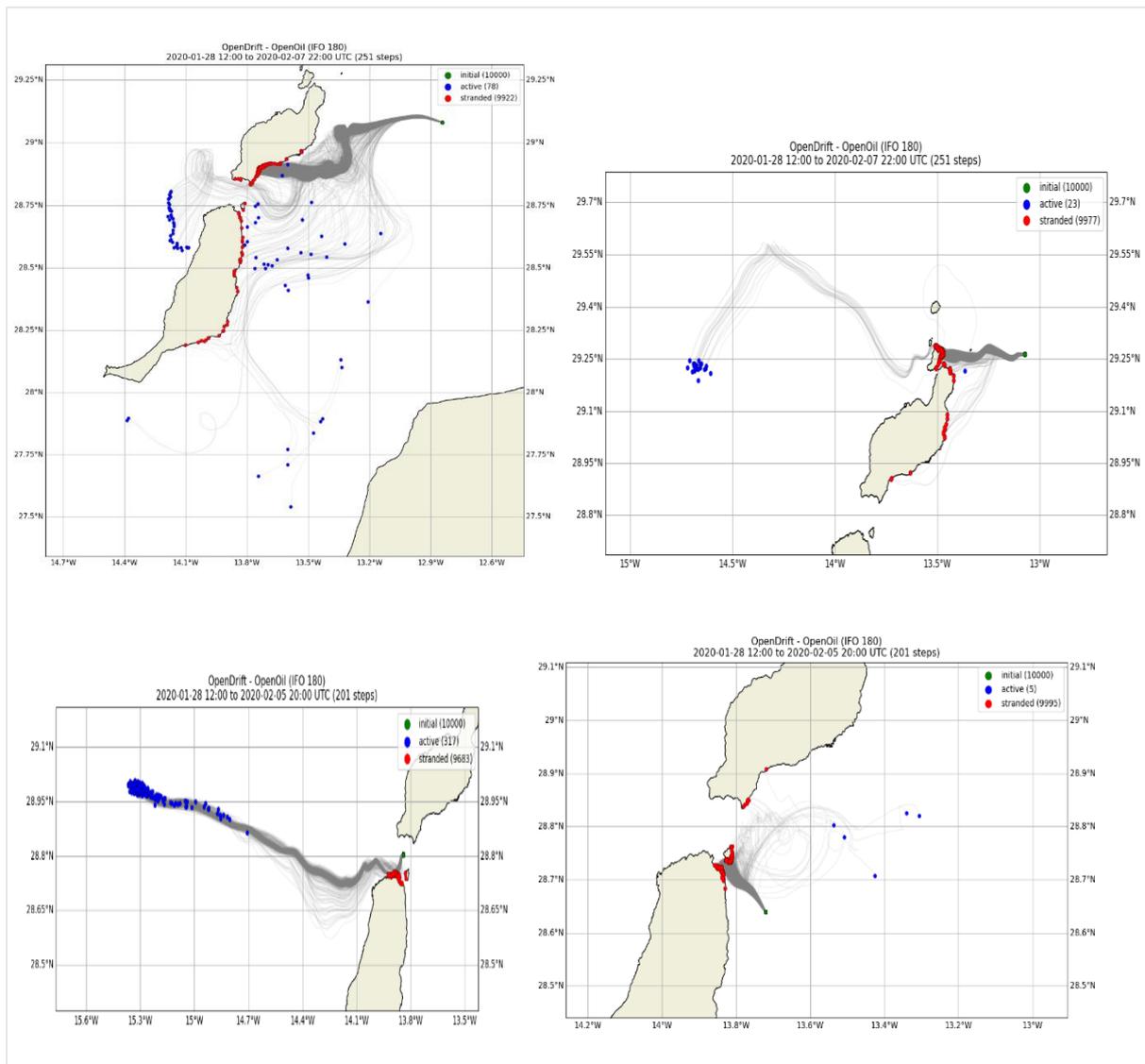


Figure 4.7 | Trajectoires des éléments IFO 180 avec différentes positions initiales (vert). Les éléments échoués (rouge) et actifs (en surface ou submergés) (bleu) sont indiqués. Panneau supérieur : gauche (AH1), droit (BH1). Panneau inférieur : gauche (CH1), droit (DH1).

À l'hiver 2021 (Figure 4.8), la totalité des ELS a atteint les côtes de Lobos et la CEF dans les cas CH2 et DH2 respectivement. Les trajectoires suivant AH2, BH2 et DH2 sont assez proches. En effet, la présence d'un TC au large de la CEF amène les ELS directement sur cette côte. Sa présence n'est pas évidente, étant que les ELS entrant dans le TC s'échouent directement par la suite. Les ELS de BH2 atteignent la côte est de Lanzarote par l'effet d'un autre TC proche de cette côte.

Contrairement à 2020, les courants dans le détroit de La Bocaina à l'hiver 2021 sont dirigés vers l'est, empêchant les ELS de traverser le détroit.

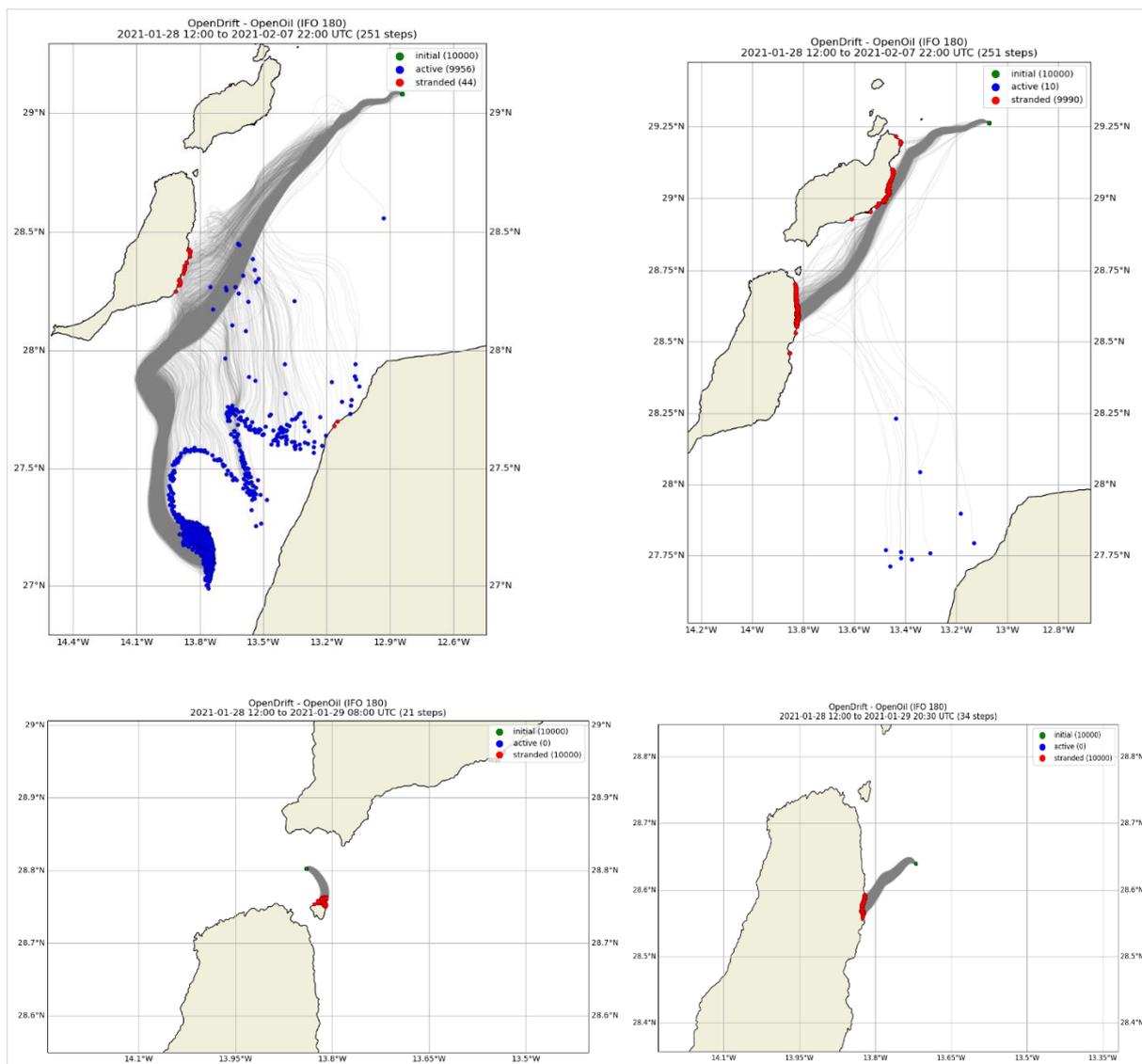


Figure 4.8 | Similaire à Figure 4.7, mais pour l'hiver 2021. Panneau supérieur : gauche (AH2), droit (BH2). Panneau inférieur : gauche (CH2), droit (DH2).

Tableau 4.4 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors des hivers 2019 et 2020. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.

Déversement	Éléments échoués (%)	Masse totale échouée (%)	1^{er} impact (Jour (j) et heure (h))
AH1	99.22	≈ 20	4j et 3h (L)
			6j et 3h (Lo)
			6j et 3h30 (F)
AH2	0.44	< 1	5j et 9h30 (F)
BH1	99.77	≈ 83	2j et 11h30 (L)
BH2	99.9	≈ 20	3j et 9h30 (L)
			4j et 17h30 (F)
CH1	96.83	≈ 82	10h (L)
			10h (Lo2)
CH2	100	≈ 98	9h30 (Lo)
DH1	99.95	≈ 90	16h (F)
			20h (Lo2)
			3j et 6h (L3)
DH2	100	≈ 95	1j et 1h (F)

4.2 Test de sensibilité

Dans la section précédente, l'évaporation, l'émulsification et la dispersion sont prises en compte (T0). Afin d'estimer leur impact respectif, des simulations ont été réalisées sans ces processus de vieillissement. Une première paramétrisation en tenant compte de l'évaporation et l'émulsification, mais pas de la dispersion (T1) et la seconde sans émulsification, mais avec dispersion et évaporation (T2). Il est assumé que les tests sur une saison sont suffisants, dès lors T1 et T2 sont effectués durant le printemps 2019.

4.2.1 Paramétrisation T1

Les trajectoires des ELS suivant T1 (Figure 4.9) sont fortement semblables à la Figure 1.1 à l'exception de la forme de la « nappe » qui est plus étalée. On perçoit toujours la présence du TA et la zone touchée est la CEF. La proportion d'éléments échouée est légèrement plus importante dans les cas AP1, BP1 avec T1 par rapport à T0, mais plus faible dans les deux autres cas (Tableau 4.5). La masse échouée est significativement plus importante dans tous les cas passant par exemple de 60% avec T0 (Tableau 4.1) à 92% avec T1 suivant CP1 et de 55% à 88% pour DP1. Le temps écoulé jusqu'au premier impact est augmenté avec T1 (Tableau 4.5).

Dans le modèle, la masse émulsifiée est calculée à partir de fraction d'eau f contenue dans la phase huileuse et de la masse totale d'IFO 180 présente dans le système. Si $f=0$ l'émulsification est nulle et $f=0.5$ signifie qu'un élément est un mélange de 50% d'eau et 50% d'IFO 180. La fraction d'eau présente au cours de la simulation est de l'ordre de 0. Cela signifie que l'IFO 180 ne s'émulsifie pas en milieu aqueux.

4.2.2 Paramétrisation T2

Les trajectoires des ELS suivant T2 sont identiques à T0. Ce résultat découle que l'émulsification n'est pas prise en compte. Ce résultat est d'autant plus naturel lorsque, suivant T1 où l'émulsification est considérée, la fraction d'eau est quand même nulle. Par conséquent, l'émulsification n'a aucun effet sur les ELS d'IFO 180.

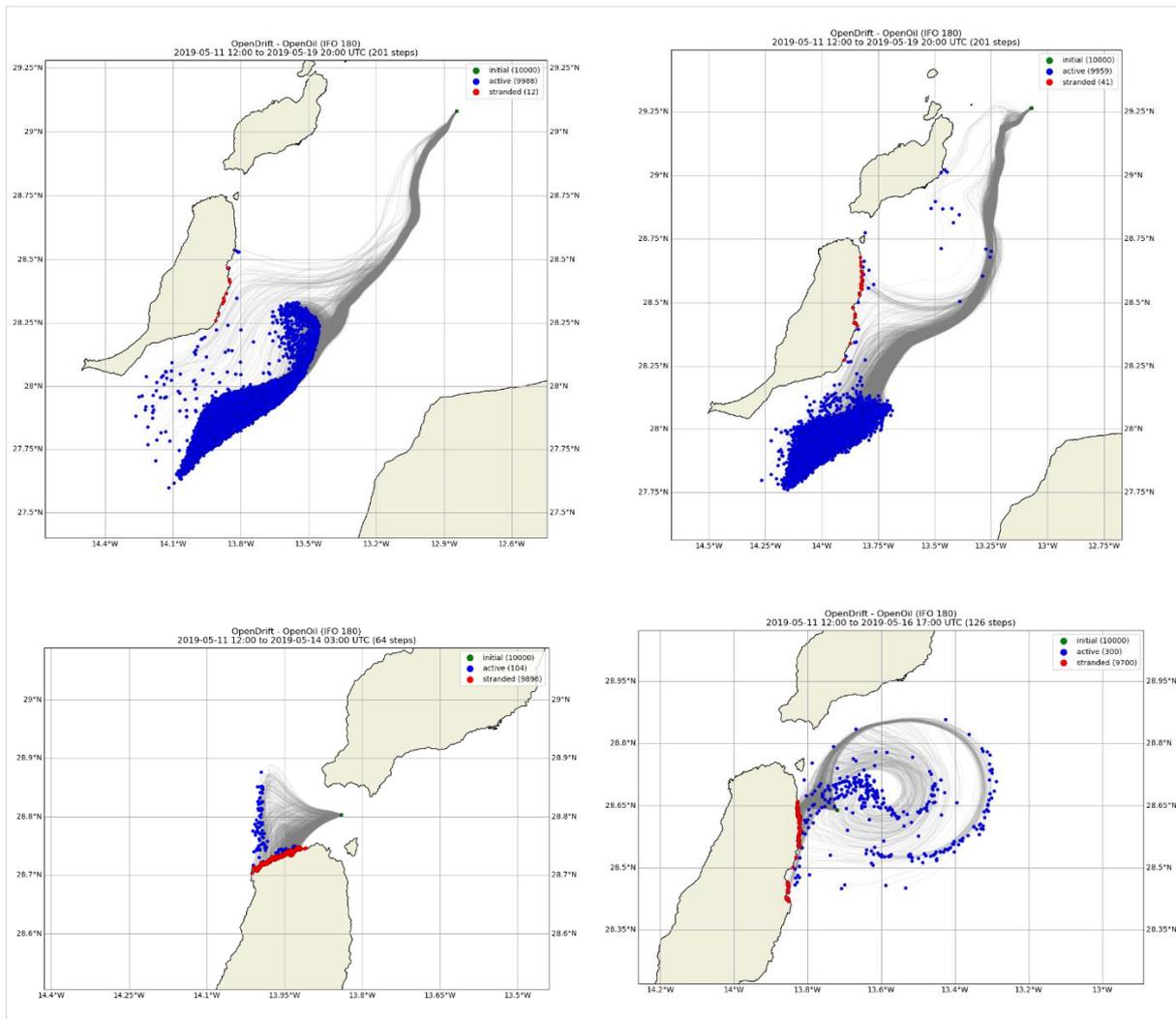


Figure 4.9 | Similaire à Figure 4.1, mais avec la paramétrisation T1. Panneau supérieur : gauche (AP1), droit (BP1). Panneau inférieur : gauche (CP1), droit (DP1).

Tableau 4.5 | Proportion d'éléments échoués, de leur masse lors du printemps 2019 avec la paramétrisation T1. Le temps écoulé depuis le déversement initial jusqu'au 1^{er} impact est indiqué. En fonction du lieu du 1^{er} impact, on notera : Fuerteventura (F), Lanzarote (L), Lobos (Lo) et l'Afrique (A). Si les éléments touchent plusieurs lieux, l'indice 2 identifiera le second lieu et 3 le troisième lieu.

Déversement	Éléments échoués (%)	Masse totale échouée (%)	1^{er} impact (Jour (j) et heure (h))
AP1	0.12	≈ 0.1	6j et 23h30 (F)
BP1	0.41	≈ 0.4	6j et 15h (F)
CP1	98.96	≈ 92	10h (F)
DP1	97	≈ 88	20h30 (F)

4.2.3 Forçage du vent nul

En prenant la paramétrisation T0, le forçage direct du vent (« windage ») est posé égal à zéro. Par conséquent, seuls les courants sont les uniques moyens de transport des ELS. Pour la même raison que les tests précédents, seul le printemps 2019 sera simulé. Les résultats sont montrés en Figure 4.10. Les trajectoires des ELS sont sensiblement différentes lorsque le forçage direct du vent n'est pas considéré. En effet, l'ensemble des ELS (i.e. la nappe) ne semble pas se disperser et reste très compact. La présence du TA est d'autant plus évidente suivant AP1 et DP1 (Figure 4.10). Il est évident qu'une telle hypothèse n'est pas réaliste, car un système géophysique sera toujours soumis à des champs de vents.

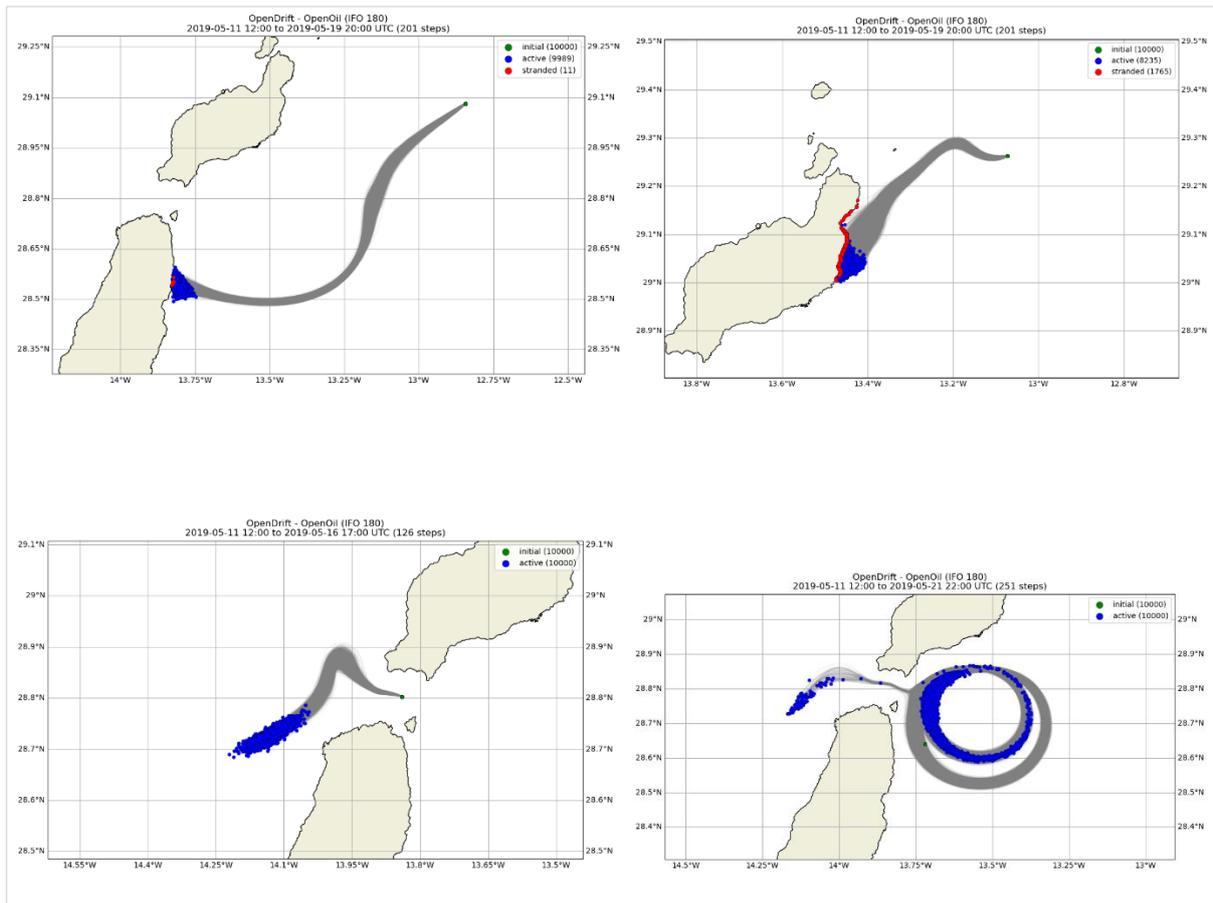


Figure 4.10 | Similaire à Figure 4.1 (T0), mais avec un forçage du vent nul. Panneau supérieur : gauche (AP1), droit (BP1). Panneau inférieur : gauche (CP1), droit (DP1).

Chapitre 5

Discussion

À travers les différents tableaux (Tableau 4.1-Tableau 4.4), on constate que si le nombre d'éléments échoués est élevé, la masse échouée n'est pas nécessairement augmentée de manière radicale. Par exemple pour BA2 (Tableau 4.3), le nombre d'ELS échoué est de 98.66% contre seulement 7.3% de la masse totale échouée. Ce résultat découle des simulations (T0) où l'évaporation, l'émulsification et la dispersion ont été prises en compte. Cependant dans les tests de sensibilité effectués (4.2), il a été démontré que l'émulsification n'avait aucune conséquence directe sur la masse totale échouée qu'elle soit ou non prise en considération étant donné que la fraction d'eau est nulle. Par conséquent, la dispersion est le processus qui a un effet sur la masse totale échouée. En effet, le modèle impose que la masse dispersée des éléments soit enlevée de la simulation, ne pouvant plus s'échouer et est considérée perdue. Les éléments ont leur masse affectée par la dispersion et une masse résiduelle atteindra la côte. Plus le temps passé en mer est élevé (i.e. les éléments seront soumis à plus d'événements de vagues déferlantes), plus la masse sera dispersée. Le nombre de déversements avec un temps écoulé jusqu'au 1^{er} impact supérieur à 24h (Tableau 4.1-Tableau 4.4) est de 19 événements sur un total de 32. Parmi les 19, quinze ont une masse totale échouée inférieure à 7.3%. Si la dispersion n'est pas considérée, les éléments perdront moins de masse et le pourcentage échoué sera plus élevé (Tableau 4.5).

L'émulsification s'est avérée n'avoir aucun effet sur la trajectoire des éléments. La fraction d'eau étant nulle tout au long de la simulation. La masse évaporée dans les simulations était en moyenne de 8-9% de la masse totale à partir de 24h en temps simulé suivant T0, T1 et T2. Des études en laboratoire ont démontré que l'IFO 180 formait des émulsions instables si 10% de la masse initiale était évaporé [72].

La direction des vents dans la zone des îles Canaries est essentiellement dirigée vers le sud-ouest. Cependant les vents peuvent tourner et leurs effets ne peuvent être négligés comme l'a montré AP2 (Figure 4.2). Les simulations effectuées sans ce forçage (Figure 4.10), démontrent

que le modèle est très sensible à ce paramètre et qu'il peut induire des différences importantes dans la magnitude de dérive. Par conséquent, le forçage direct du vent (« windage ») doit être considéré. Bien que la plupart utilisent une valeur empirique de 2%, dans cette étude elle a été considérée de 3% de la vitesse du vent afin de compenser la dérive de Stokes qui n'est pas présente dans cette étude étant donné que IBI n'est pas un modèle d'onde (« wave model »). L'incorporation d'un modèle d'onde permettrait de tester la sensibilité d'OpenOil3D par rapport à cette dérive.

Sur les 32 simulations effectuées (T0), l'île de Fuerteventura a été touchée 28 fois contre 8 pour Lanzarote et Lobos. La présence de tourbillons anticycloniques et cycloniques dans la zone était permanente avec des temps de relaxation assez différents. Cependant, la côte sud-est de Fuerteventura n'a jamais été touchée par des ELS, la laissant à l'abri de tout impact. En effet, un TA était présent la moitié de l'année, car il est piégé dans cette zone [73]. Sa présence est d'autant plus évidente en Figure 4.3 et Figure 4.4. De plus, très peu d'éléments touchent les côtes africaines et une forte variabilité interannuelle semble évidente à travers les deux ans de simulations excepté lors des étés 2019-2020 (Figure 4.3-Figure 4.4).

Un autre point important est la résolution temporelle du modèle hydrodynamique. Les trajectoires dans certains cas étant rectilignes ou bien s'enrôlant parfaitement autour d'un tourbillon peuvent être dues à un problème de résolution. En effet, la résolution temporelle étant journalière, les éléments parcourant moins de 24h de trajet avant de s'échouer seront soumis à un même schéma de courant pendant 24h. Il est clair que si les courants sont alignés suivant une direction, les ELS ne dévieront jamais de trajectoires pendant 24h.

Un système tel qu'un déversement d'hydrocarbures inclut les courants, le forçage du vent, la dérive de Stokes et d'autres paramètres, mais c'est un système régi par des structures lagrangiennes cohérentes (SLC). Les SLC sont des structures sous-jacentes aux écoulements (géophysiques dans notre cas) qui vont façonner la structure et la forme de la nappe de pétrole. Pour de plus amples informations sur les SLC, le lecteur intéressé peut se référer à [74].

Le modèle IBI ayant la limite de son domaine à 26°N, il est assez difficile de laisser tourner les simulations très longtemps, car les éléments peuvent atteindre cette limite et ne plus être considérés dans la simulation. En Figure 4.3, AE1 et BE1 ont des éléments qui ont atteint la limite du domaine. Cependant il s'agit que d'une très faible proportion des éléments (<1%). Par conséquent leur influence sur le budget de masse d'IFO180 est négligeable. La difficulté réside dans le fait que si la simulation est arrêtée trop tôt par crainte d'arriver à la limite du domaine,

elle ne peut être considérée, car des éléments auraient bien pu s'échouer sur les îles Canaries les pas de temps suivants.

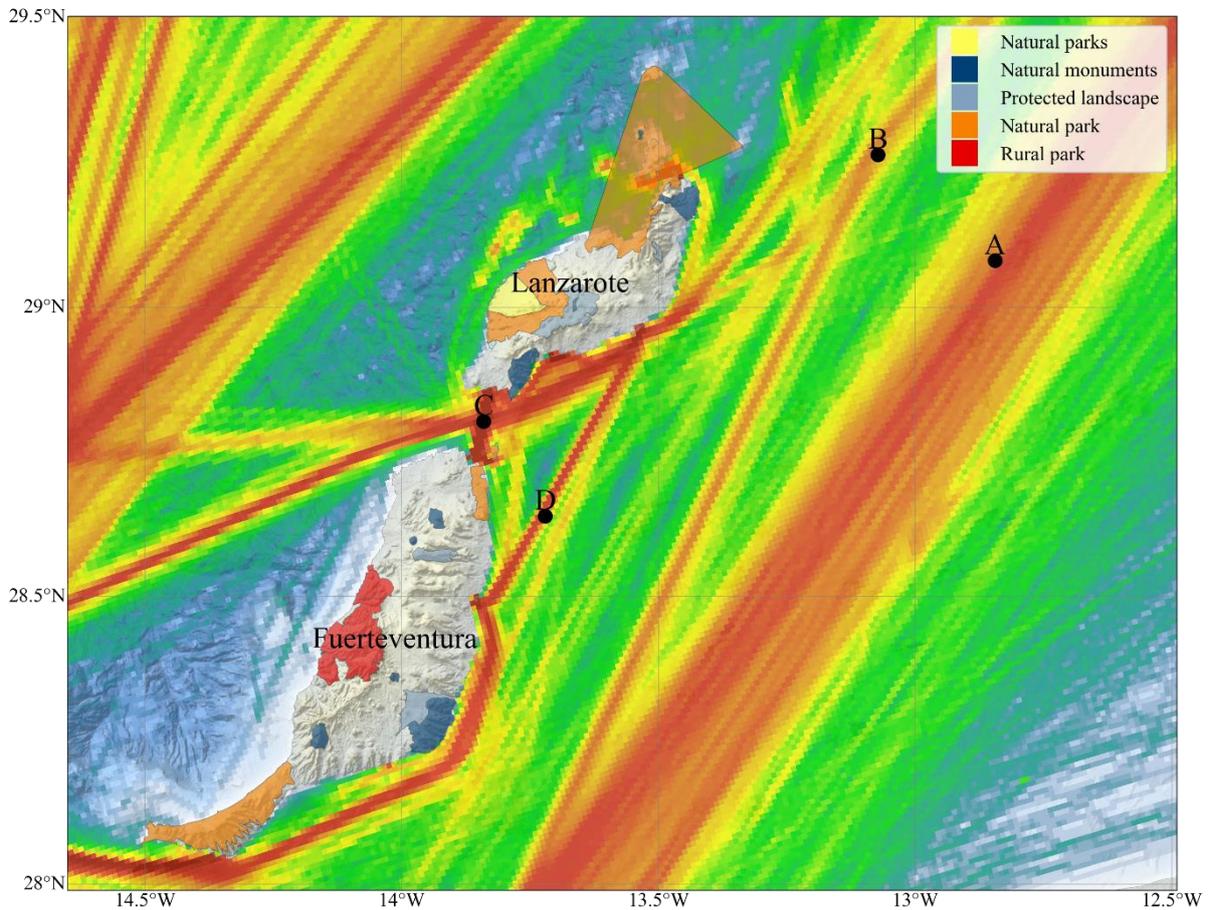


Figure 5.1 | Espaces naturels dans la zone d'étude : Parc national (jaune) ; Monument naturel (bleu foncé) ; Paysage protégé (bleu clair) ; Parc naturel (orange) ; Parc rural (rouge). D'après les données de [75]. Les positions initiales de déversement : A, B, C, D. Se référer au Tableau 3.1 pour les coordonnées.

La validation du modèle n'a pu être effectuée dans cette zone, car aucun accident n'a eu lieu aux dates simulées. L'unique en date est celui d'un bateau de pêche *Oleg Naydenov* (2015) qui ne déversa pas moins de 1400 tonnes d'IFO380 au sud de Gran Canaria [76], [77].

Finalement, au-delà de l'aspect modélisation et considérations physiques, il est important de mettre en évidence les possibles répercussions d'un déversement d'hydrocarbures au large de Lanzarote et Fuerteventura sur les espaces naturels au sein des îles. En réalité, les îles de La Graciosa, Montaña Clara et de l'Alegranza forment un archipel appelé Chinijo. L'archipel de

Chinijo contient des aires protégées (parc naturel), des aires spéciales de conservation et de protection des oiseaux. L'archipel contient aussi la plus grande réserve marine d'Europe avec 700 km² (Figure 5.1) [78]. Ces zones sont donc extrêmement importantes du point de vue environnemental et peuvent être touchées par des éléments pétroliers. Ces zones ont été touchées lors des événements AE2 et BE2 (Figure 4.4). Une autre zone particulièrement touchée est le parc naturel situé au nord de Fuerteventura (Parc naturel de Corralejo) qui abrite des dunes avec de la végétation. Cette zone est propice au maintien de l'espèce d'oiseau Courvite isabelle (*Cursorius cursor*) dont il restait 200 à 250 couples en 1999 [79]. L'espèce est classée vulnérable, c'est pourquoi une altération de leur habitat engendrerait une possible extinction de l'espèce.

Les îles Canaries renferment environ 570 espèces endémiques et de nouvelles espèces sont encore découvertes au fil des ans [80], [81]. Certaines espèces sont des bioindicateurs permettant de mesurer la distribution et les concentrations en hydrocarbure. En cas de déversement, les conséquences seraient dramatiques pour la faune et la flore. Il est important de noter que des résidus d'hydrocarbures sous forme de boules de goudron ont été détectés sur différentes plages de Canaries. Ces boules n'ont pas été produites sur terre, mais bien par déballastage des navires [82], ce qui met en évidence que les impacts d'un déversement en hydrocarbures se passant loin des îles peut être ressentis de manière directe. En plus de la pollution aux hydrocarbures, les îles Canaries sont soumises à la pollution des plastiques augmentant les problèmes écologiques. La zone d'étude est propice aux remontées d'eau ce qui en fait une zone de pêche abondante et où nombreux sont les poissons. Dans le cas du maquereau d'Atlantique (*Scomber colias*), une étude a montré (2019) que sur 120 individus, environ 78% d'entre eux avaient des traces de microplastiques dans leur système digestif [83].

Chapitre 6

Conclusion

La présente étude est basée sur la simulation de la propagation d'une nappe de pétrole au large des îles Canaries dans l'hypothèse d'un accident pétrolier. Le modèle OpenOil a permis de simuler durant deux années (2019-2021), les possibles zones touchées par le pétrole du type IFO180. Les éléments de pétrole sont forcés par le modèle hydrodynamique IBI (Région Ibérique-Biscaye-Irlandaise) ($1/36^\circ$) et des champs de vents ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather) ($1/4^\circ$). Il en découle que la zone la plus touchée est l'île de Fuerteventura suivie de Lanzarote et de l'archipel de Chinijo tandis que le continent nord-ouest africain n'est que très rarement atteint. Les temps d'impacts pour atteindre ces côtes ne dépassent généralement pas la semaine. Pour la plupart des événements, si le temps écoulé avant l'impact est supérieur à 24h, la fraction de masse échouée est faible ($<7.3\%$). Une forte variabilité interannuelle a été détectée sauf lors des étés 2019-2020. Par sa topographie, la zone des îles Canaries a la caractéristique d'engendrer des contraintes sur les écoulements géophysiques. La zone est caractérisée par de multiples tourbillons à la mésoéchelle et de nombreux méandres. Cependant, il existe très peu de recherches sur la variabilité des tourbillons dans la zone d'étude. La plupart des recherches présentent dans la littérature s'intéressent au transport du Courant Canarien ainsi que sur les effets des vents sur le transport d'Ekman induisant des remontées d'eau le long de la côte africaine. Il serait intéressant que de futures campagnes océanographiques portent sur l'étude de la variabilité des tourbillons durant quelques années afin d'en extraire des informations.

Finalement, de futures simulations avec des modèles hydrodynamiques ayant une plus grande résolution temporelle (horaire ou 12h) seraient utiles afin d'améliorer cette présente étude. De plus, avec une puissance de calcul élevée, le nombre d'éléments peut être augmenté de manière considérable, car ce travail a été réalisé avec un ordinateur portable de puissance moyenne. Par exemple, un superordinateur permettrait de modéliser la propagation d'une nappe de pétrole avec plus de 100 000 éléments dans une plus grande zone et sur une gamme de temps plus élevé en milieu ouvert comme l'Atlantique ou l'Arctique. Dans le dernier cas, la présence de glace doit être prise en compte.

Annexe

En l'absence de perturbations telles que les fluctuations turbulentes, des accélérations rapides ou encore des contraintes de cisaillement, la taille maximale atteinte par des gouttes de pétrole isolées montant ou tombant librement à travers des milieux stagnants est appelé le diamètre maximum d'instabilité de Rayleigh-Taylor (d_0) [84]

$$d_0 = 4 * \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\Delta\rho * g}\right)} \quad (A. 1)$$

où $\Delta\rho$ est la différence de densité entre l'eau de mer ρ_s et l'hydrocarbure ρ_o , g est l'accélération gravitationnelle et σ la tension interfaciale entre l'eau de mer et l'hydrocarbure.

Le nombre de Weber, We est un nombre sans dimension qui décrit l'importance relative de force d'inertie et la tension interfaciale σ , défini par

$$We = \frac{\rho_s g H^s d_0}{\sigma} \quad (A. 2)$$

où H^s est la hauteur significative.

Le nombre d'Ohnesorge, Oh est un nombre sans dimension qui décrit l'importance relative de forces visqueuses et des forces de tension de surface, défini par

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho_o \sigma d_0}} \quad (A. 3)$$

où μ est la viscosité dynamique du pétrole.

Références

- [1] J. Noguera, "The Seven Sisters versus OPEC: Solving the mystery of the petroleum market structure," *Energy Economics*, vol. 64, pp. 298–305, 2017, doi: 10.1016/j.eneco.2017.03.024.
- [2] G. M. Moisé, "Corruption in the oil sector: A systematic review and critique of the literature," *Extractive Industries and Society*, vol. 7, no. 1, pp. 217–236, 2020, doi: 10.1016/j.exis.2020.01.002.
- [3] BP, "Statistical Review of World Energy 2020," 2020. Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [4] P. Daniel, "Modélisation de la dérive des nappes d'hydrocarbures en mer," *La Météorologie*, vol. 8, no. 19, p. 6, 1997, doi: 10.4267/2042/47021.
- [5] International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), "Oil Tanker Spill Statistics 2020," 2020. Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: https://www.itopf.org/fileadmin/data/Documents/Company_Lit/Oil_Spill_Stats_publication_2020.pdf.
- [6] J. Chen, W. Zhang, Z. Wan, S. Li, T. Huang, and Y. Fei, "Oil spills from global tankers: Status review and future governance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 227, pp. 20–32, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.020.
- [7] GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution), "Impact of oil and related chemicals and wastes on the marine environment," *GESAMP Rep. Studies*, vol. 50, 1993, Accessed: Apr. 07, 2021. [Online]. Available: <http://www.gesamp.org/site/assets/files/1228/impact-of-oil-and-related-chemicals-on-the-marine-environment-en.pdf>.
- [8] L. P. Wackett and C. M. Wilmot, "Hydrocarbon Biosynthesis in Microorganisms," in *Direct Microbial Conversion of Biomass to Advanced Biofuels*, Elsevier, 2015, pp. 13–31.
- [9] C. Goeury, "Modélisation du transport des nappes d'hydrocarbures en zone continentale et estuarienne.," *Thèse Ph.D, Sciences de la Terre, Université Paris-Est, Paris, 2012*. Accessed: Apr. 08, 2021. [Online]. Available: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00778087>.

- [10] Encyclopædia Universalis France, “Hydrocarbures : classification,” 2021. <https://www.universalis.fr/media/TA071672/> (accessed Apr. 06, 2021).
- [11] S. Colombano *et al.*, “Nature des produits pétroliers et origine du vieillissement : tentative de l’identification de la source via la prise en compte des impacts et l’analyse de l’âge approximatif des déversements. Rapport final. Rapport BRGM RP-64174-FR, 163 p., 62 fig., 33 tabl.,” 2014. Accessed: Apr. 19, 2021. [Online]. Available: <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64174-FR.pdf>.
- [12] G. K. Gaurav *et al.*, “Review on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) migration from wastewater,” *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 236, p. 103715, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103715>.
- [13] A. K. Haritash and C. P. Kaushik, “Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 169, no. 1–3, pp. 1–15, 2009, doi: [10.1016/j.jhazmat.2009.03.137](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137).
- [14] A. Eykelbosh, “Short- and long-term health impacts of marine and terrestrial oil spills. A literature review prepared for the Regional Health Protection Program,” Office of the Chief Medical Health Officer, Vancouver Coastal Health. Vancouver, 2014. Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: <http://www.vch.ca/Documents/VCH-health-impacts-oil-spill.pdf>.
- [15] H. Singh, N. Bhardwaj, S. K. Arya, and M. Khatri, *Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials*, vol. 14 (100305). Elsevier B.V., 2020.
- [16] J. Beyer, H. C. Trannum, T. Bakke, P. v. Hodson, and T. K. Collier, “Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 110, no. 1, pp. 28–51, 2016, doi: [10.1016/j.marpolbul.2016.06.027](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027).
- [17] REPSOL S.A., “Sandia-1X, Offshore Spain (Canary Islands): Repsol’s Management from a Sensitive Project into a Safe and Uneventful Operation,” 2015. Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: https://www.repsol.com/imagenes/global/en/8.Sustainability_Day_Canary_Islands_tcm14-31523.pdf.
- [18] R. Myro, “Determinants of economic growth in Spain: A historical viewpoint,” in *Economic Miracles in the European Economies*, Springer International Publishing, 2019, pp. 61–78.
- [19] “Carte d’Afrique du nord.” <https://d-maps.com/m/africa/afnord/afnord09.pdf> (accessed Jun. 09, 2021).

- [20] B. Lemière, J. J. Seguin, C. le Guern, D. Guyonneî, and P. Baranger, “Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d’évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau,” BRGM RP-50662.FR, 103 p., 20 fig., 9 tabl., 5 ann., 2001. Accessed: Apr. 30, 2021. [Online]. Available: <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50662-FR.pdf>.
- [21] V. Vishnyakov, B. Suleimanov, A. Salmanov, and E. Zeynalov, “Hydrocarbon and oil reserves classification,” in *Primer on Enhanced Oil Recovery*, Elsevier, 2020, pp. 5–26.
- [22] I. C. Ossai, A. Ahmed, A. Hassan, and F. S. Hamid, “Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review,” in *Environmental Technology and Innovation*, vol. 17, Elsevier, 2020.
- [23] Centre d’expertise en analyse environnementale du Québec, “Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale, 41 p. et annexes.,” 2015. Accessed: Apr. 30, 2021. [Online]. Available: <https://mern.gouv.qc.ca/energie/filiere-hydrocarbures/etudes/GENV22-23.pdf>.
- [24] J. G. Speight, “Chemical and physical properties of hydrocarbons,” in *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*, Elsevier, 2020, pp. 387–420.
- [25] R. E. Correa Pabón and C. R. de Souza Filho, “Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity,” *Fuel*, vol. 237, pp. 1119–1131, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.09.098.
- [26] M. H. Sharqawy, J. H. Lienhard, and S. M. Zubair, “Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 16, no. 1–3, pp. 354–380, 2010, doi: 10.5004/dwt.2010.1079.
- [27] J. D. Isdale, C. M. Spence, and J. S. Tudhope, “Physical properties of sea water solutions: viscosity,” *Desalination*, vol. 10, no. 4, pp. 319–328, 1972, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80002-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80002-8).
- [28] CEDRE, “Aerial observation of oil spills at sea. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel,” 2015. Accessed: Mar. 25, 2021. [Online]. Available: <https://www.giwacaf.net/en/publications/aerial-observation-ipeca-gpg>.
- [29] D. P. Nolan, “Physical Properties of Hydrocarbons and Petrochemicals,” in *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities*, Elsevier, 2019, pp. 65–88.

- [30] I. Sochet and P. Gillard, "Flammability of kerosene in civil and military aviation," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, no. 5, pp. 335–345, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00031-1).
- [31] K. Ling and J. He, "A New Correlation to Calculate Oil-Water Interfacial Tension," *Paper presented at the SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition*. Kuwait City, Kuwait, 2012, doi: <https://doi.org/10.2118/163328-MS>.
- [32] A. Rostami, H. Ebadi, M. Arabloo, M. K. Meybodi, and A. Bahadori, "Toward genetic programming (GP) approach for estimation of hydrocarbon/water interfacial tension," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 230, pp. 175–189, 2017, doi: 10.1016/j.molliq.2016.11.099.
- [33] D. L. Flock, T. H. Le, and J. P. Gibeau, "The effect of temperature on the interfacial tension of heavy crude oils using the pendant drop apparatus," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 25, no. 02, 1986, doi: 10.2118/86-02-06.
- [34] M. Cusson, P. Archambault, K. Lemarchand, J. Verreault, and É. Pelletier, "Toxicité des hydrocarbures et impacts des déversements sur les organismes marins et leur environnement.," 2017. Accessed: Apr. 25, 2021. [Online]. Available: https://constellation.uqac.ca/5981/1/CussonM_Chap3_livre_NotreGolfe.pdf.
- [35] K. J. Brassington *et al.*, "Weathered hydrocarbon wastes: A risk management primer," in *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 37, no. 3, 2007, pp. 199–232.
- [36] S. A. Stout and Z. Wang, "Chemical fingerprinting methods and factors affecting petroleum fingerprints in the environment," in *Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification: Second Edition*, Elsevier, 2016, pp. 61–129.
- [37] Fay J.A., "The spread of oil slicks on a calm sea.," in *Hoult D.P. (eds) Oil on the Sea. Ocean Technology*, Springer, 1969, pp. 53–63.
- [38] D. Mackay and C. D. McAuliffe, "Fate of hydrocarbons discharged at sea," *Oil and Chemical Pollution*, vol. 5, no. 1, pp. 1–20, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/S0269-8579\(89\)80002-4](https://doi.org/10.1016/S0269-8579(89)80002-4).
- [39] International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), "TIP 02: Fate of marine oil spills," 2014. Accessed: Mar. 30, 2021. [Online]. Available: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-02-fate-of-marine-oil-spills/>.
- [40] I. D. Nissanka and P. D. Yapa, "Oil slicks on water surface: Breakup, coalescence, and droplet formation under breaking waves," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 114, no. 1, pp. 480–493, 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.006.

- [41] National Research Council (U.S.), "Oil in the sea III : Inputs, Fates, and Effects.," National Academies Press, Washington (DC), 2003. Accessed: Apr. 01, 2021. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK220706/>.
- [42] R. M. Garrett, I. J. Pickering, C. E. Haith, and R. C. Prince, "Photooxidation of crude oils," *Environmental Science and Technology*, vol. 32, no. 23, pp. 3719–3723, 1998, doi: 10.1021/es980201r.
- [43] J. Ducreux, "Étude du vieillissement d'un pétrole brut répandu à la surface de l'eau de mer dans des conditions naturelles," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, vol. 24, no. 2, pp. 85–111, 1986, doi: 10.1080/03067318608076462.
- [44] T. C. Hazen, R. C. Prince, and N. Mahmoudi, "Marine Oil Biodegradation," *Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 5, pp. 2121–2129, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b03333.
- [45] M. Fingas, "Introduction to Spill Modeling," in *Oil Spill Science and Technology*, Elsevier, 2011, pp. 187–200.
- [46] C. E. Jones *et al.*, "Measurement and modeling of oil slick transport," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 121, no. 10, pp. 7759–7775, 2016, doi: 10.1002/2016JC012113.
- [47] M. Knoll *et al.*, "The Eastern Boundary Current system between the Canary Islands and the African Coast," *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 49, no. 17, pp. 3427–3440, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00105-4).
- [48] E. D. Barton *et al.*, "The transition zone of the Canary Current upwelling region," *Progress in Oceanography*, vol. 41, no. 4, pp. 455–504, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(98\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(98)00023-8).
- [49] E. Sebille *et al.*, "The physical oceanography of the transport of floating marine debris," *Environmental Research Letters*, vol. 15, 2020, doi: 10.1088/1748-9326/ab6d7d.
- [50] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007.
- [51] Oliveros C, "Étude la houle en théorie linéaire - Modèle de réfraction," 1985. Accessed: Apr. 19, 2021. [Online]. Available: <http://infoterre.brgm.fr/rapports/85-SGN-300-MAR.pdf>.
- [52] A. D. D. Craik, "George Gabriel Stokes on water wave theory," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 37, no. 1, pp. 23–42, 2005, doi: 10.1146/annurev.fluid.37.061903.175836.
- [53] K. E. Kenyon, "Stokes drift for random gravity waves," *J Geophys Res*, vol. 74, no. 28, pp. 6991–6994, 1969, doi: 10.1029/jc074i028p06991.

- [54] P. L. Richardson, "Drifting in the wind: leeway error in shipdrift data," *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 44, no. 11, pp. 1877–1903, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00059-9).
- [55] Ø. Johansen, "DeepBlow – a Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts," *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 6, no. 2, pp. 103–111, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(00)00042-6).
- [56] Z. Li, M. Spaulding, D. French McCay, D. Crowley, and J. R. Payne, "Development of a unified oil droplet size distribution model with application to surface breaking waves and subsea blowout releases considering dispersant effects," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 114, no. 1, pp. 247–257, 2017, doi: [10.1016/j.marpolbul.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.008).
- [57] J. Röhrs *et al.*, "The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills," *Ocean Science*, vol. 14, no. 6, pp. 1581–1601, 2018, doi: [10.5194/os-14-1581-2018](https://doi.org/10.5194/os-14-1581-2018).
- [58] Z. Li, M. L. Spaulding, and D. French-McCay, "An algorithm for modeling entrainment and naturally and chemically dispersed oil droplet size distribution under surface breaking wave conditions," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 119, no. 1, pp. 145–152, 2017, doi: [10.1016/j.marpolbul.2017.03.048](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.048).
- [59] L. R. Hole *et al.*, "The Deepwater horizon oil slick: Simulations of river front effects and oil droplet size distribution," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 10, 2019, doi: [10.3390/jmse7100329](https://doi.org/10.3390/jmse7100329).
- [60] H. G. Schwartzberg, "The movement of oil spills," *International Oil Spill Conference Proceedings*, vol. 1971, no. 1, pp. 489–494, 1971, doi: [10.7901/2169-3358-1971-1-489](https://doi.org/10.7901/2169-3358-1971-1-489).
- [61] M. Reed *et al.*, "Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art," *Spill Science and Technology Bulletin*, vol. 5, no. 1, pp. 3–16, 1999, doi: [10.1016/S1353-2561\(98\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(98)00029-2).
- [62] K. F. Dagestad, J. Röhrs, O. Breivik, and B. Ådlandsvik, "OpenDrift v1.0: A generic framework for trajectory modelling," *Geoscientific Model Development*, vol. 11, no. 4, pp. 1405–1420, 2018, doi: [10.5194/gmd-11-1405-2018](https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018).
- [63] P. Tkalich and E. S. Chan, "Vertical mixing of oil droplets by breaking waves," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 44, no. 11, pp. 1219–1229, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00178-9).

- [64] A. W. Visser, "Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 158, pp. 275–281, 1997.
- [65] G. Reffray, M. G. Sotillo, R. Aznar, and K. Guihou, "Product user manual for Atlantic-Iberian Biscay-Irish ocean physics analysis and forecast product: IBI_ANALYSISFORECAST_PHY_005_001." 2020, Accessed: May 03, 2021. [Online]. Available: <https://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-IBI-PUM-005-001.pdf>.
- [66] M. G. Sotillo *et al.*, "The myocean IBI ocean forecast and reanalysis systems: Operational products and roadmap to the future copernicus service," *Journal of Operational Oceanography*, vol. 8, no. 1, pp. 63–79, 2015, doi: 10.1080/1755876X.2015.1014663.
- [67] G. Madec *et al.*, "NEMO ocean engine," 2019, doi: 10.5281/ZENODO.3878122.
- [68] G. García-Sánchez *et al.*, "Very High Resolution Tools for the Monitoring and Assessment of Environmental Hazards in Coastal Areas," *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, 2021, doi: 10.3389/fmars.2020.605804.
- [69] H. Hersbach *et al.*, "ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present.," *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. 2018, doi: 10.24381/cds.adbb2d47.
- [70] Oiltanking, "Heavy Fuel Oil (HFO)," 2015. <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/details/term/heavy-fuel-oil-hfo.html> (accessed May 19, 2021).
- [71] Marine Traffic, "Carte de densité des routes maritimes." <https://www.marinetraffic.com/> (accessed Jun. 05, 2021).
- [72] SL Ross Environmental Research Ltd, "Spill Related Properties of IF0180 Fuel Oil for," 2004. Accessed: May 27, 2021. [Online]. Available: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/osrr-oil-spill-response-research/506ab.pdf>.
- [73] E. D. Barton, J. Arístegui, P. Tett, and E. Navarro-Pérez, "Variability in the Canary Islands area of filament-eddy exchanges," *Progress in Oceanography*, vol. 62, no. 2–4, pp. 71–94, 2004, doi: 10.1016/j.pocean.2004.07.003.
- [74] M. R. Allshouse *et al.*, "Impact of windage on ocean surface Lagrangian coherent structures," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 17, no. 3, pp. 473–483, 2017, doi: 10.1007/s10652-016-9499-3.
- [75] Gouvernement des îles Canaries, "Espaces naturels." <https://visor.grafcan.es/visorweb/#> (accessed Jun. 03, 2021).

- [76] V. J. García-Garrido, A. Ramos, A. M. Mancho, J. Coca, and S. Wiggins, “A dynamical systems perspective for a real-time response to a marine oil spill,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 112, no. 1–2, pp. 201–210, 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.08.018.
- [77] L. de la Torre and J. Albaigés, “Oil Pollution in Spanish Waters,” in *Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part II: National Case Studies*, Springer International Publishing, 2018, pp. 13–49.
- [78] E. Pérez-Chacón Espino, C. Peña-Alonso, A. M. Santana-Cordero, and L. Hernández-Calvento, “The Integrated Coastal Zone Management in the Canary Islands,” in *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*, J. A. Morales, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 789–814.
- [79] BirdLife International, “Species Action Plan for the Cream-Coloured Courser *Cursorius cursor* in Europe,” 1999. Accessed: Jun. 06, 2021. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.386.158&rep=rep1&type=pdf>.
- [80] D. Bramwell, “The Endemic Flora of the Canary Islands; Distribution, Relationships and Phytogeography,” in *Biogeography and Ecology in the Canary Islands*, G. Kunkel, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 1976, pp. 207–240.
- [81] J. Francisco-Ortega, A. Santos-Guerra, S. C. Kim, and D. J. Crawford, “Plant genetic diversity in the Canary Islands: A conservation perspective,” *American Journal of Botany*, vol. 87, no. 7, pp. 909–919, 2000, doi: 10.2307/2656988.
- [82] E. Ma. Peña-Méndez, Ma. S. Astorga-España, and F. J. García-Montelongo, “Chemical fingerprinting applied to the evaluation of marine oil pollution in the coasts of Canary Islands (Spain),” *Environmental Pollution*, vol. 111, no. 2, pp. 177–187, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00079-8).
- [83] A. Herrera *et al.*, “Microplastic ingestion by Atlantic chub mackerel (*Scomber colias*) in the Canary Islands coast,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 139, pp. 127–135, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.022>.
- [84] J. R. Grace, T. Wairegi, and J. Brophy, “Break-up of drops and bubbles in stagnant media,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 56, no. 1, pp. 3–8, 1978, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450560101>.