

Ce document est la traduction française de l'article publié dans ESSD sous la référence suivante ;

Earth Syst. Sci. Data, 14, 4569–4588, 2022
<https://doi.org/10.5194/essd-14-4569-2022>



Les nappes d'huile dans le Golfe de Guinée - 10 ans d'observation par Envisat ASAR

Zhour Najoui¹, Nellya Amoussou³, Serge Riazanoff^{1,2}, Guillaume Aurel¹, and Frédéric Frappart⁴

¹VisioTerra, 14 rue Albert Einstein, Champs-sur-Marne, France

²Institut Gaspard Monge (IGM), Université Gustave Eiffel, 5 boulevard Descartes, Champs sur Marne, France

³Laboratoire d'Océanographie et du Climat ; Expérimentations et Approches Numériques (LOCEAN), Sorbonne Université, 4 Place Jussieu, Paris, France

⁴INRAE, ISPA, UMR 1391 INRAE/Bordeaux Sciences Agro, Villenave d'Ornon, France

Correspondance ; Zhour Najoui (zhour.najoui-nafai@visioterra.fr)

Version anglaise reçue ; 8 avril 2022 – Discussion débutée ; 3 mai 2022

Révisé ; 7 septembre 2022 – Accepté ; 13 septembre 2022 – Publié ; 18 octobre 2022

Résumé. Le Golfe de Guinée est une zone très active en ce qui concerne le trafic maritime ainsi que l'exploitation pétrolière et gazière. En raison du non-respect des normes environnementales par certains acteurs, cette région a été soumise à un grand nombre d'épisodes de pollution par les hydrocarbures. Cette pollution anthropique par les hydrocarbures s'ajoute aux suintements naturels d'hydrocarbures provenant du fond de l'océan. Cette étude vise à détecter des nappes d'hydrocarbures dans le Golfe de Guinée et à analyser leur distribution spatiale à l'aide d'images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO). Des travaux antérieurs ont déjà cartographié localement les nappes de pétrole dans cette zone ; cependant, à notre connaissance, cette étude est la première à réaliser une analyse statistique globale basée sur 10 ans d'images radar couvrant 17 Zones Economiques Exclusives (ZEE) du Golfe de Guinée. La présente étude est basée sur une base de données de 3644 images RSO collectées entre 2002 et 2012 par le capteur ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) à bord de la mission Envisat de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ces images ont permis l'identification de 18 063 nappes de pétrole. La répartition spatiale de ces nappes de pétrole est disponible sur Zenodo ; <https://doi.org/10.5281/zenodo.6470470> (Najoui, 2022b). Les nappes d'hydrocarbures détectées dans ce travail englobent à la fois des déversements d'hydrocarbures d'origine anthropique et des suintements d'hydrocarbures d'origine naturelle (fuites naturelles de réservoirs d'hydrocarbures). Un ensemble de 100 nappes de pétrole anthropiques géoréférencées est également disponible sur Zenodo ; <https://doi.org/10.5281/zenodo.6907743> (Najoui, 2022a).

1. Introduction

La catastrophe du *Deep Water Horizon* (DWH) survenue le 20 avril 2010 dans le golfe du Mexique a suscité l'indignation mondiale en raison de ses impacts humains et environnementaux (Leifer et al., 2012). On a pu remarquer un intérêt du public, des médias, des politiciens et des scientifiques, caractérisé par un suivi minutieux de la progression de la nappe de pétrole (Caruso et al., 2013; Pinkston and Flemings, 2019). Néanmoins, la survenue future d'une catastrophe similaire au DWH ne serait pas surprenante le long des côtes africaines et, en particulier, dans le Golfe de Guinée, où des marées noires récurrentes sont observées. Ces déversements peuvent être causés par des

opérations de déballastage (Albakjaji, 2010) ou des déversements d'hydrocarbures dus à des naufrages (Fuhrer, 2012).

Bien que le pétrole constitue une ressource importante pour les pays du Golfe de Guinée d'un point de vue économique (Ovadia, 2016), l'impact environnemental causé par les déversements fréquents de pétrole a provoqué de graves effets négatifs à la fois sur l'environnement et sur l'économie locale (Jafarzadeh et al., 2021; Okafor-Yarwood, 2018; Yaghmour et al., 2022). De plus, la faiblesse de la surveillance nationale et du contrôle de la législation risque de limiter la conformité aux grandes normes suivies par les grandes entreprises. Ainsi, la mise à disposition d'outils d'observation pouvant permettre aux

africains d'assurer un suivi suffisant et une meilleure gestion du Golfe de Guinée est nécessaire. Une solution possible pour les pays africains pour surveiller les concessions d'exploitation pétrolière offshore est une installation locale utilisant des données gratuites telles que celles fournies par l'ESA et maintenant l'Union européenne (UE) dans le cadre du programme Copernicus.

Les images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) se sont révélées être un outil utile pour la cartographie des nappes de pétrole en raison de l'effet d'amortissement que le pétrole a sur les ondes capillaires, appelées vagues de Bragg. Ces dernières sont générées sur l'eau par les vents locaux et sont responsables de la rétrodiffusion radar (Gade et al., 1998; Jackson et al., 2004; Mercier and Girard-Arduin, 2006; Shu et al., 2010; Xu et al., 2015). En conséquence, les nappes de pétrole apparaissent plus sombres que la surface de l'eau non couverte par l'huile, où les vagues de Bragg produisent une rétrodiffusion radar plus importante. De plus, les images radar historiques sont disponibles gratuitement depuis 1991 (la mission ERS-1 a été lancée en 1991, ERS-2 en 1995, Envisat en 2002, Sentinel-1a en 2014 et Sentinel-1b en 2016) tandis que les images radar en temps quasi réel devraient être disponibles

gratuitement au moins jusqu'en 2030 en raison de la constellation Sentinel. Cette disponibilité des données permet des études approfondies des pollutions passées et futures ainsi que la détection opérationnelle des nappes de pétrole à l'aide de l'imagerie radar par satellite (Kubat et al., 1998).

Dans cette étude, les images RSO acquises par la mission Envisat de l'ESA (lancée le 1^{er} mars 2002) ont été utilisées. La charge utile d'Envisat contenait 10 instruments, dont le capteur ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), qui est la deuxième génération d'instruments RSO développés par l'ESA. (Louet and Bruzzi, 1999). La durée de vie nominale d'Envisat (5 ans) a été doublée jusqu'à la perte du satellite le 8 avril 2012 (10 ans).

Le Golfe de Guinée est aujourd'hui l'une des plus grandes régions productrices de pétrole du monde ; cependant, très peu d'études ont réellement analysé sa situation vis-à-vis des nappes d'huile (déversements et suintements). La présente étude porte sur la répartition spatiale des nappes d'hydrocarbures survenues de 2002 à 2012 dans le Golfe de Guinée, par Zone Economique Exclusive (ZEE), à l'aide d'images radar Envisat ASAR.

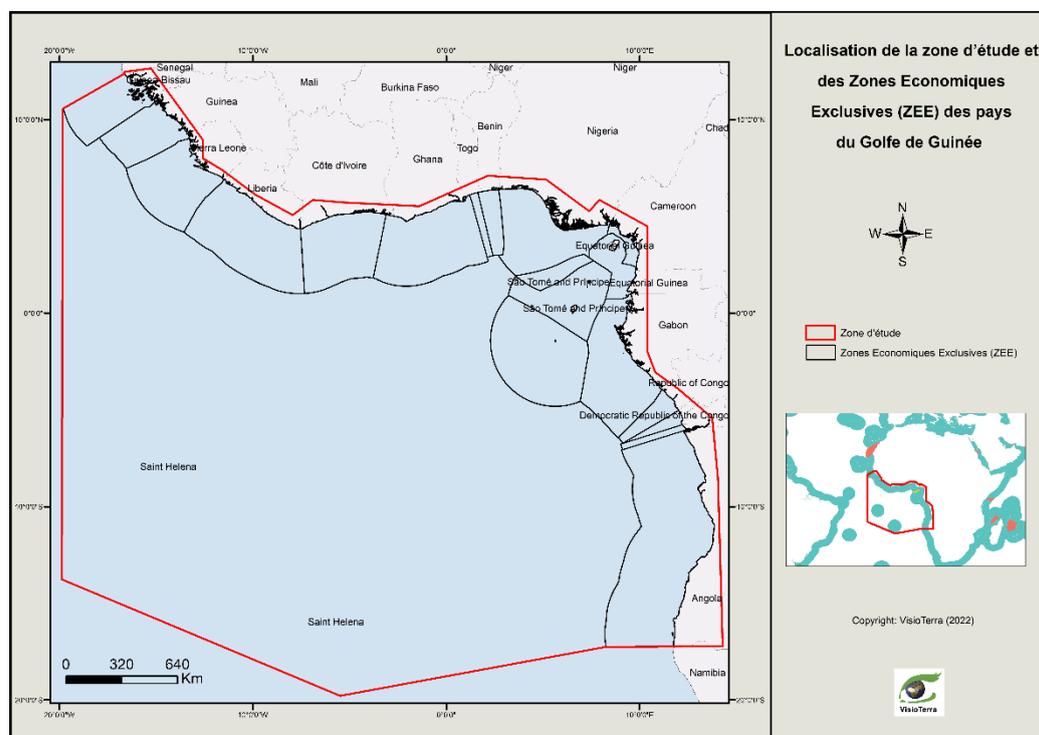


Figure 1. Localisation de la zone d'étude dans le Golfe de Guinée et les zones économiques exclusives des différents pays.

2. Présentation de la zone d'étude

2.1. Situation géographique

Les images radar utilisées dans cette étude ont été acquises dans le Golfe de Guinée. Cette région est située dans l'océan Atlantique au sud-ouest de l'Afrique. Selon l'Organisation Hydrographique Internationale (Bassou, 2016), il s'étend de la Guinée-Bissau à l'Angola et couvre les ZEE de 16 pays

riverains de la côte (s'étendant sur 7000 km) ; Guinée-Bissau (GNB), Guinée-Bissau Conakry (GIN), Sierra Léone (SLE), Liberia (LBR), Côte d'Ivoire (CIV), Ghana (GHA), Togo (TGO), Bénin (BEN), Nigeria (NGA), Cameroun (CMR), Guinée Equatoriale (GNQ), Sao Tomé et Principe (STP), Gabon (GAB), République du Congo (COG), République Démocratique du Congo (COD) et Angola (AGO) (Figure 1).

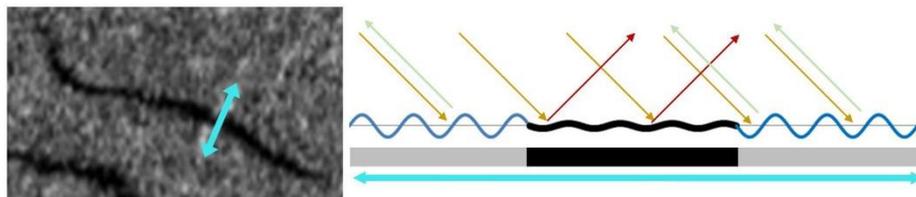


Figure 2. Rétrodiffusion du signal radar en présence et en absence d'huile (Najoui, 2017).

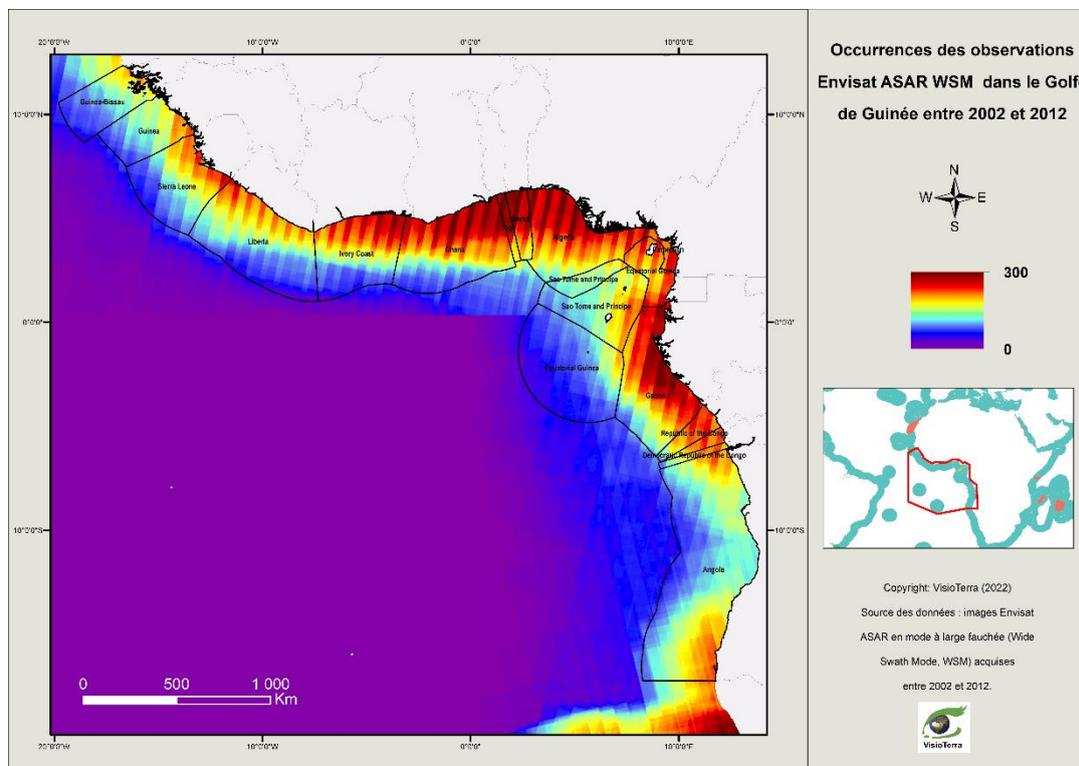


Figure 3. Occurrences des observations Envisat ASAR Wide-Swath Mode- (WSM) entre 2002 et 2012.

2.2. Situation géologique

Le pétrole est un mélange naturel composé essentiellement d'hydrocarbures. Il se forme au sein de certaines roches sédimentaires par transformation de la matière organique (plancton, plantes, animaux, etc.) qui y est incorporée au dépôt. C'est un processus lent et progressif se produisant dans un bassin sédimentaire.

En effet, la transformation de la matière organique en pétrole s'étend sur des millions d'années, et est ponctuée de plusieurs étapes parmi lesquelles la formation d'une substance intermédiaire appelée kérogène. Une couche donnée de sédiments s'enfonce et se retrouve enfouie sous d'autres couches de sédiments. En fonction du remplissage du bassin, du flux thermique et des phénomènes de pression, la matière organique passe du kérogène au pétrole. Le pétrole moins dense que l'eau aura tendance à se déplacer vers les zones hautes à travers des strates sédimentaires. Les strates sédimentaires ont une certaine configuration géométrique. C'est la structuration tectonique

du bassin. Au cours de cette structuration, se différencie pour chaque strate des zones relativement hautes (anticlinaux) et basses (synclinaux). Lorsque ces zones hautes sont surmontées d'une couverture permettant au pétrole de s'échapper à travers les failles ou les fractures, elles constituent des gisements pétrolifères exploités de nos jours en offshore c'est-à-dire au large des côtes ou en onshore c'est-à-dire sur la terre ferme.

Le Golfe de Guinée est situé dans une zone passive résultant de l'ouverture du domaine de l'Atlantique Sud initiée au Crétacé inférieur divisant le sud-ouest du Gondwana. Le climat pendant cette période était chaud, humide et stable, ce qui favorise l'altération chimique du continent. Des matériaux érodés ont apporté des éléments chimiques dans le Golfe de Guinée, en particulier, le Delta du Niger a transporté des sédiments riches en hydrocarbures. Ces nombreuses caractéristiques font de cette zone une source de suintements naturels d'hydrocarbures encore appelés *oil seepages* (Lawrence et al., 2002).

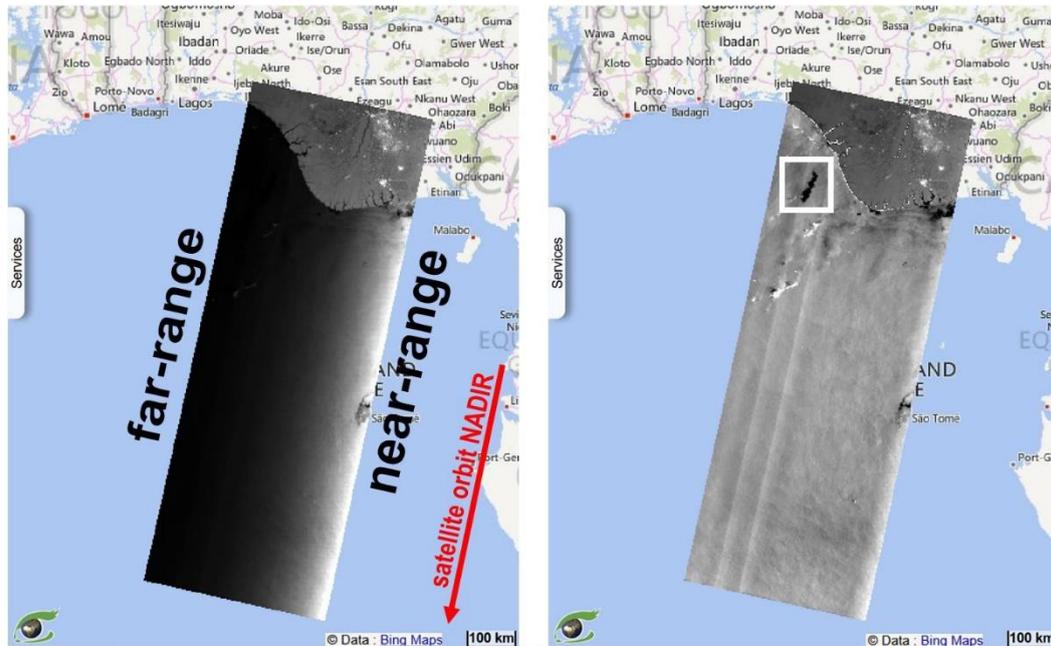


Figure 4. Images ASAR en mode large fauchée (WSM) acquise le 21 décembre 2011, avant (gauche) et après (droite) le stretching (étirement) local, montrant une fuite d'une plate-forme pétrolière (voir Figure 5).

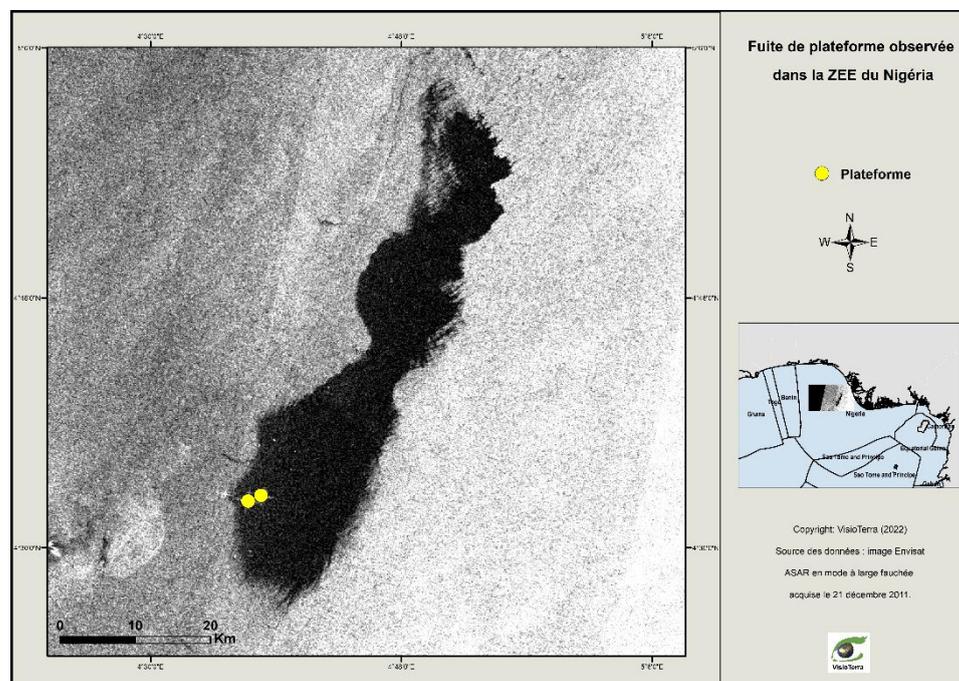


Figure 5. Nappe d'huile en provenance d'une plateforme observée dans la ZEE du Nigéria le 21 décembre 2011. Les plateformes sont représentées par les points jaunes (voir hyperlook : <http://visioterra.org/VtWeb/hyperlook/504c7208cc184c12b42ed036bc9912f3>, dernier accès ; 13 octobre 2022).

2.3. Exploration pétrolière dans le Golfe de Guinée

Par rapport à d'autres zones, la région du Golfe de Guinée est entrée assez récemment dans le paysage pétrolier mondial. En 1982, la signature de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer a étendu les territoires maritimes des pays riverains (sur leurs ZEE) à 200 milles marins (≈ 370 km) au large de leurs côtes, ce qui a encouragé l'exploration offshore (Bassou, 2016).

Le Golfe de Guinée est aujourd'hui l'une des plus grandes régions productrices de pétrole au monde.

En effet, depuis l'installation de ses premières plateformes pétrolières (plateformes ancrées et flottantes) entre 1960 et 1970 (Favennec et al., 2003), le Golfe de Guinée est devenu l'une des destinations les plus prisées des investisseurs pétroliers internationaux (Tull, 2008). La bonne qualité de son pétrole justifie l'attrait des pays étrangers dans la région (Ngodi, 2005). Depuis les années 2000, la zone a fourni plus de 55 milliards de barils, soit

5 % de la production mondiale de pétrole (Mfewou et al., 2018) et 60 % de la production totale quotidienne de pétrole brut en Afrique subsaharienne. L'exploitation en mer est le mode par défaut d'extraction du pétrole dans le Golfe de Guinée (Favennec et al., 2003). L'épuisement des ressources côtières en eaux peu profondes (≤ 200 m) fait que la part relative de l'exploration en eaux profondes (450–1800 m) voire ultra-profonde (1800–3000 m) augmente. C'est le cas, par exemple, au large de l'Angola ou du Gabon.

2.4. Pollution pétrolière et impacts environnementaux

Le Golfe de Guinée est une zone très active en matière d'exploration pétrolière. Les déversements d'hydrocarbures constatés dans la région sont d'une fréquence sans précédent et leur toxicité entraîne de graves répercussions tant pour le milieu marin que pour l'écosystème (Bagby et al., 2017; Chalghmi, 2015; Khanna et al., 2018; Langangen et al., 2017; Li et al., 2019; Li and Johnson, 2019; NAE- NRC, 2012; Reuscher et al., 2020).

Plusieurs cas d'accidents causés par l'exploitation du pétrole offshore ont été documentés. La fréquence des déversements d'hydrocarbures dans le Golfe de Guinée serait due à des facteurs tels que les opérations de production pétrolière, l'inadéquation des équipements de production entraînant la corrosion des pipelines et des réservoirs, les catastrophes, le sabotage et le vandalisme (Adelana and Adeosun, 2011).

Les conséquences environnementales incluent la perte d'habitat pour les coraux et les herbiers ainsi que la destruction de la flore (réduction des mangroves et de certaines espèces d'algues) et de la faune (extinction des tortues marines) (Scheren et al., 2002). Les nappes de pétrole ont un effet dévastateur sur l'activité de pêche. De nombreux pêcheurs nigériens ne peuvent plus exercer leur métier, notamment au large du Delta du Niger.

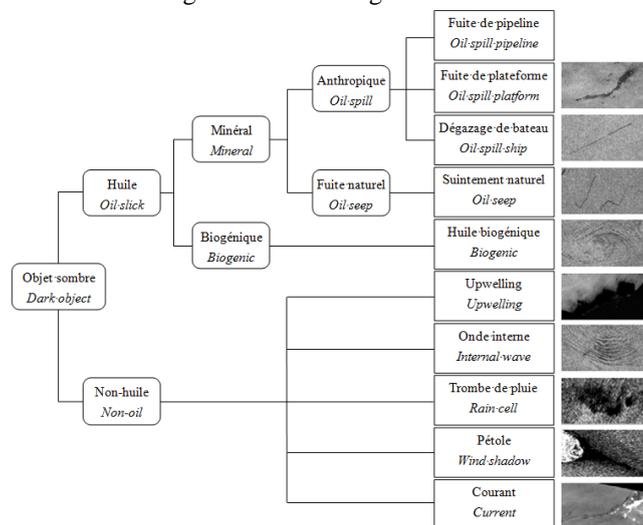


Figure 6. Les principales taches sombres visibles sur la surface de la mer dans les images RSO (Najoui et al., 2018a).

3. Données et méthode

3.1. Données radar

Plusieurs systèmes RSO spatiaux ont été largement utilisés pour la surveillance et la cartographie de la pollution marine (Brekke et Solberg, 2008 ; Del Frate et al., 2000 ; Dong et al., 2022 ; Espedal, 1999 ; Fiscella et al., 2000 ; Gade et al., 1998 ; Garcia-Pineda et al., 2008 ; Kanaa et al., 2003 ; Li et Johnson, 2019 ; Liu et al., 1997 ; Marghany, 2015 ; Solberg et al., 1999 ; Suresh et al. , 2015). Dans cette étude, nous avons utilisé des images RSO acquises par l'instrument Envisat ASAR entre 2002 et 2012. Envisat ASAR fonctionnait à une fréquence radar de 5,331 GHz dans la bande C (4,20–5,75 GHz) dans divers modes, y compris le mode WSM (mode large fauchée). Les images WSM ASAR ont été acquises le long de bandes larges de 400 km à une résolution spatiale d'environ $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$. Les produits WSM sont livrés avec une taille de pixel de 75 m sur 75 m. Envisat ASAR fonctionnait dans l'un des deux types de polarisation ; HH (émission horizontale - réception horizontale) ou VV (émission verticale - réception verticale). L'ASAR WSM fonctionnait selon le principe ScanSAR, en utilisant cinq faisceaux d'antenne se chevauchant pour couvrir la large fauchée. Le principe ScanSAR consiste à obtenir un élargissement de fauchée grâce à l'utilisation d'un faisceau d'antenne orientable électroniquement en élévation (Miranda et al., 2013).

Sur une image radar, les zones couvertes de pétrole apparaissent comme des régions sombres et lisses avec une faible rétrodiffusion. Cela est dû à l'effet d'amortissement que l'huile produit sur les ondes capillaires et les petites ondes de gravité. Sur une surface sans huile, une partie importante du signal sera rétrodiffusée vers le radar, ce qui la rendra plus claire (Alpers et al., 2017). La rétrodiffusion du signal radar est également influencée par les conditions environnementales qui sont ; la vitesse du vent et l'état de la mer (Fingas and Brown, 2017; Zhang et al., 2014). La vitesse idéale du vent pour la détection des nappes de pétrole fait débat et diffère selon l'étude référencée ; -2 à 10 m s^{-1} (MacDonald et al., 2015), $-1,5$ à $6,5 \text{ m s}^{-1}$ (Jatiaux et al., 2017), soit $-2,09$ à $8,33 \text{ m s}^{-1}$ (Najoui, 2017), la polarisation verticale (VV) est le mode le plus efficace pour détecter les nappes d'huile à la surface de la mer (Brekke et Solberg, 2008 ; Jatiaux et al., 2017 ; Najoui et al., 2018b, 2018a).

Toutes les scènes Envisat ASAR WSM disponibles dans la zone d'étude ont été traitées, résultant en 3644 scènes après élimination des produits redondants. La figure 3 illustre la distribution spatiale de l'occurrence des observations Envisat ASAR WSM dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012. Le nombre d'observations WSM est sensiblement plus élevé près des côtes.

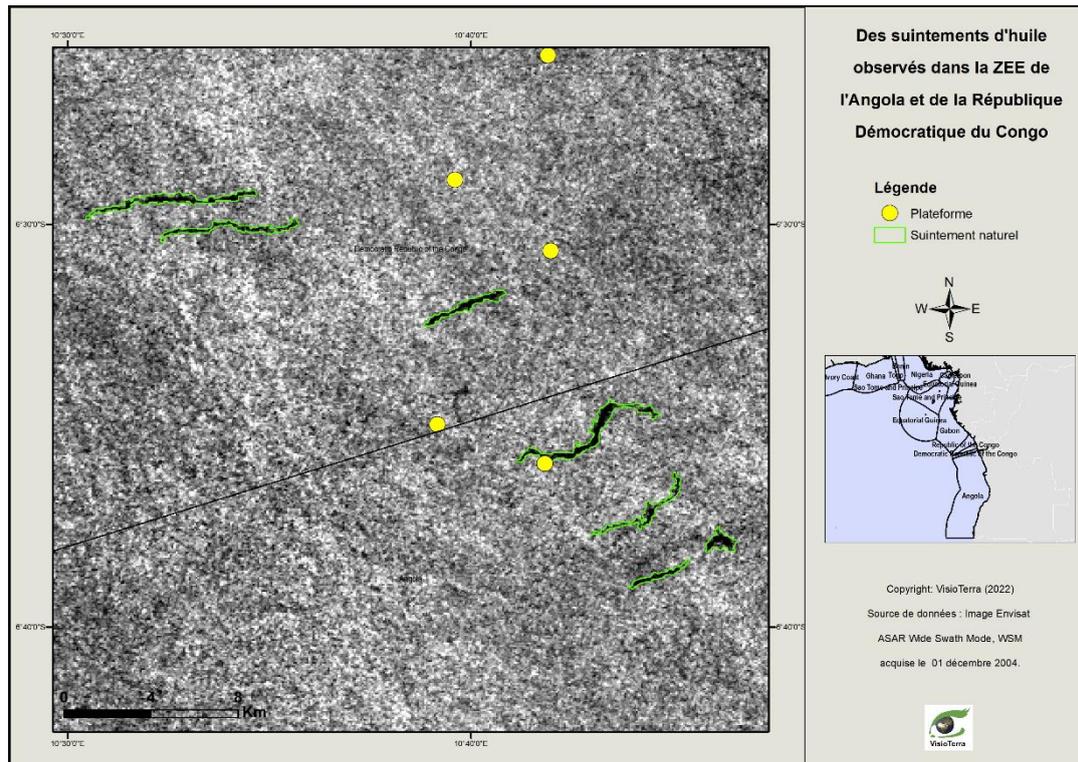


Figure 7. Des suintements naturels de pétrole (1^{er} décembre 2004) observés dans les ZEE d'Angola et de la République Démocratique du Congo. Les plateformes sont représentées par les points jaunes.

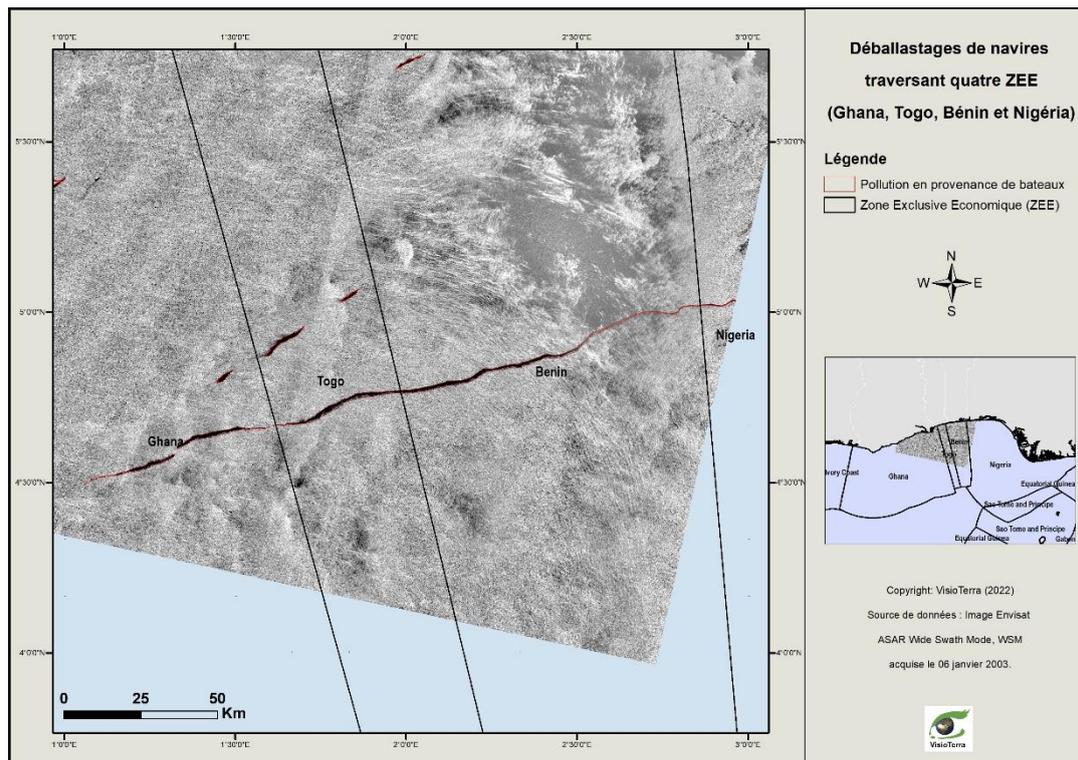


Figure 8. Nappes d'huile provenant de navires (5 janvier 2003) traversant quatre ZEE (Ghana, Togo, Bénin et Nigéria).

3.2. Prétraitement des images

La base de données de 3644 images a été géoréférencée dans le système de référence de coordonnées géographiques

sur l'ellipsoïde WGS84, datum WGS84. Un masque terre a été appliqué et les images ont été radiométriquement corrigées. La correction radiométrique consiste à corriger les variations de luminosité dues aux particularités RSO. En

effet, la rétrodiffusion radar dans la zone offshore est dominée par des réflexions non lambertiennes (c'est-à-dire que la surface ne réfléchit pas le rayonnement uniformément dans toutes les directions). Cette réflexion non lambertienne conduit à une hétérogénéité de la luminosité de l'image radar ; elle est plus lumineuse à courte distance (proche de la ligne de nadir du satellite) et plus sombre à longue distance. Les images d'entrée ont une dynamique de compte numérique (CN) de 16 bits qui nécessite une réduction à 8 bits pour être affichable sur un écran habituel. Le prétraitement consiste à appliquer un étirement local avec une moyenne de 140 et un écart type de 60 sur une fenêtre glissante de 301x301 pixels afin d'optimiser la détectabilité des nappes de pétrole (Figure 4; Najoui, 2017 ; Najoui et al., 2018a).

3.3. Détection manuelle

Les nappes de pétrole apparaissent comme des taches sombres sur les images radar car elles aplatissent la surface de la mer. Cependant, outre les nappes de pétrole, de nombreux phénomènes peuvent également apparaître sous forme de taches sombres (Figure 6). Les taches sombres non liées au pétrole sont appelées « sosies » et comprennent les résurgences d'eau, les tourbillons, les pluies torrentielles, les ombres du vent, les ondes internes, les nappes biogéniques... (Brekke et Solberg, 2005 ; Espedal, 1999 ; Najoui et al., 2018a ; Xu et al., 2015). Ces caractéristiques non liées au pétrole sont principalement

dues aux conditions météorologiques.

La détection des nappes d'hydrocarbures a été réalisée à l'aide d'une approche de détection manuelle fiable, comme expliqué dans Najoui et al. (2018b) et Jackson et al. (2004). En fait, les 3644 images radar utilisées dans cette publication ont toutes été interprétées manuellement. La détection des nappes d'hydrocarbures et leur catégorisation ont été réalisées suivant trois étapes d'analyse ; (1) interprétation basée sur des critères morphologiques et texturaux, (2) analyse multivariate des nappes de pétrole répétitives et (3) validation à l'aide de données auxiliaires.

Selon des critères morphologiques et texturaux, les nappes d'hydrocarbures peuvent être subdivisées en deux grandes classes ; biogéniques et minérales. Les nappes de pétrole biogéniques sont des films organiques constitués de substances produites par le plancton et d'autres organismes marins. Les nappes d'huile minérale peuvent être subdivisées en suintements naturels (Figure 7), émis naturellement par le fond marin, et en déversements d'hydrocarbures anthropiques provenant de navires (Figure 8), de raffineries, de terminaux pétroliers, d'installations industrielles, de plates-formes pétrolières. (Figure 9) et de pipelines (Espedal, 1999). Si les nappes de pétrole biogéniques apparaissent comme des points de diffraction brillants sur les images radar, les suintements de pétrole sont caractérisés par des formes curvilignes dues à des changements à courte portée de la force et de l'orientation du vent et des courants de surface (Espedal, 1999).

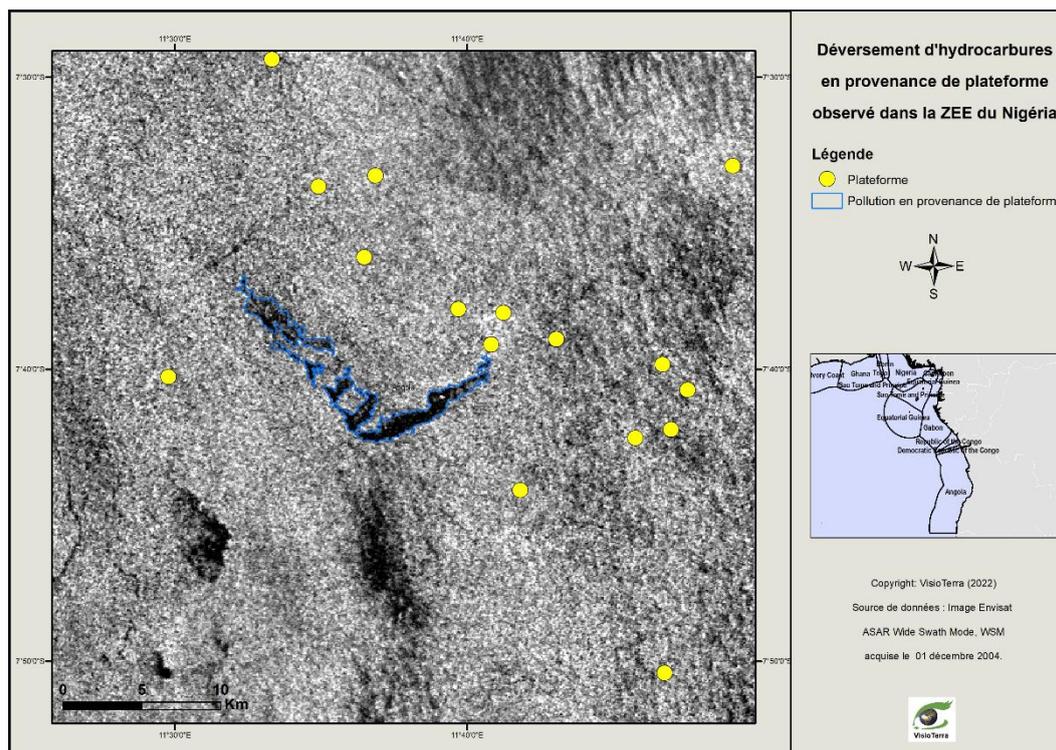


Figure 9. Nappe d'huile en provenance d'une plateforme (1^{er} décembre 2004) observée dans la ZEE de l'Angola. Les plateformes sont représentées par les points jaunes.

Par exemple, les déversements d'hydrocarbures provenant de plateformes ou de navires induisent des nappes importantes (Johannessen et al., 2000 ; Leifer et al., 2012 ; Trivero et Biamino, 2010). Les nappes d'huile en provenance des plateformes se caractérisent par une forme géométrique irrégulière. Elles peuvent atteindre des étendues importantes et ont la particularité de se répéter dans le temps. Leur caractéristique la plus distinctive est leur proximité avec les plateformes pétrolières. Les nappes d'huile en provenance des navires ont une forme géométrique fine et linéaire qui peut être continue ou intermittente lorsque les bateaux se déplacent. Lorsque le navire est immobile, la nappe de pétrole a une forme géométrique irrégulière qui peut être confondue avec un déversement de pétrole depuis une plateforme. La figure 6 montre quelques exemples de taches liées et non liées au pétrole, visibles sur les images radar.

Dans ce qui suit, une analyse multi-date a été réalisée. Nous utilisons toutes les interprétations de différentes dates afin d'évaluer l'interprétation manuelle. En effet, les nappes répétitives sont plus susceptibles d'être dues à des fuites provenant de sources statiques - par exemple, une caractéristique géologique pour les suintements de pétrole ou une plateforme ou un pipeline pour les déversements de

pétrole. La forme de ces nappes de pétrole provenant de sources statiques est induite par la force et l'orientation des changements à courte portée du vent et du courant de surface de la mer. Habituellement, ces types de nappes provenant de suintements de pétrole naturels et de déversements de pétrole provenant de plateformes pétrolières forment des « astroseeps » ou des structures en forme de fleurs (Figure 10). En général, les navires qui rejettent des effluents huileux le font en route, laissant des déversements ou des traînées de forme linéaire dans leur sillage. Lorsque le pétrole est déversé dans une mer sans courant et calme, la géométrie globale du déversement qui en résulte suit la route du navire. Cette linéarité est utilisée pour identifier ces nappes d'huile. Cependant, lorsqu'un navire de déballastage manœuvre ou lorsqu'un courant de surface non uniforme est présent, le contour du déversement peut s'écarter considérablement de la linéarité. Lorsque le pétrole est déchargé d'un navire en mouvement, il se répand également latéralement, ce qui entraîne une traînée de pétrole dont la largeur augmente en fonction de la distance au navire. Dans de nombreux cas, un point blanc devant la traînée de déballastage témoigne de la structure métallique du navire, et la taille (voire la forme) du point peut être un indicateur de la taille du navire.

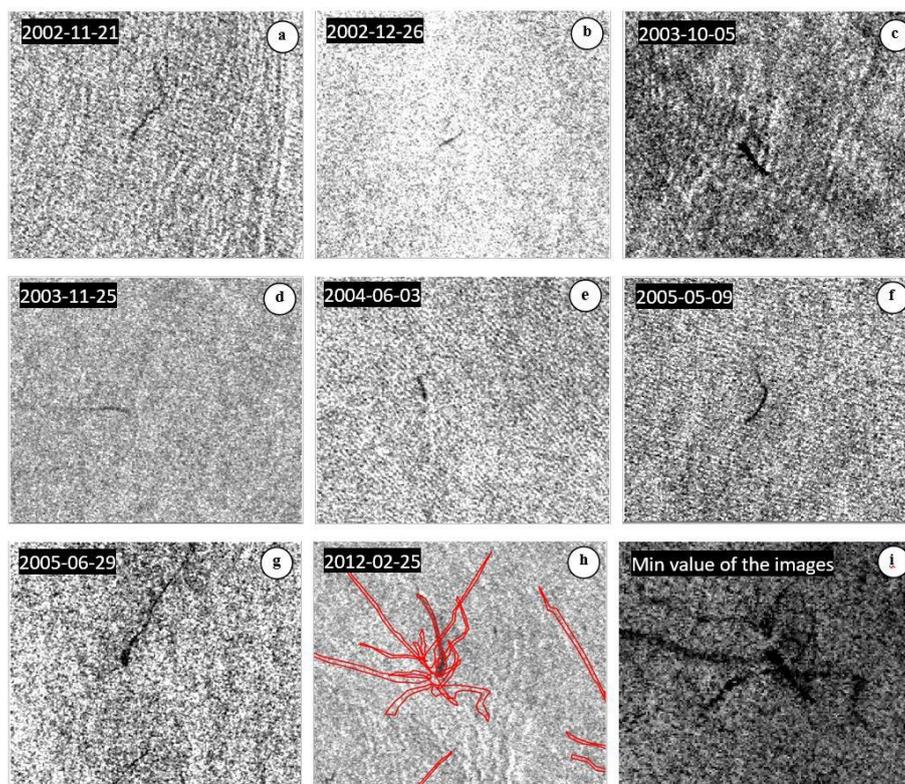


Figure 10. Un exemple d'analyse multi-date avec une structure « astroseep » (en forme de fleur) observée dans le bassin du Bas-Congo. Images (a), (b), (c), (d), (e), (f) et (g) sont des images Envisat ASAR acquises à différentes dates avec des suintements observés. L'image (h) montre une image Envisat ASAR avec des suintements naturels interprétés. L'image (i) montre l'image minimale Envisat ASAR (c'est-à-dire que chaque pixel est le minimum observé pour les 7 dates) avec une structure « astroseep ».

Enfin, la validation de l'analyse a été effectuée par l'intégration du résultat de la détection manuelle dans un Système d'Information Géographique (SIG) avec d'autres

données auxiliaires. Ces données auxiliaires comprennent l'emplacement des plateformes pétrolières et des champs de pétrole et de gaz ; les données bathymétriques, géologiques

et structurales disponibles ; le trafic maritime ; la direction du vent et du champ de courant. Ce travail a abouti à un jeu de données avec 18 063 nappes de pétrole interprétées (Najoui, 2022b).

3.4. Superficie moyenne couverte d'huile

L'interprétation des images décrite dans la section précédente a abouti à la délimitation de polygones fermés correspondant aux nappes de pétrole. Ces polygones sont « incrustés » dans une image raster pour réaliser l'étude statistique. Comme chaque emplacement dans la zone d'intérêt n'a pas été observé un nombre égal de fois par le satellite Envisat, une « carte des occurrences d'observation » a été produite (Figure 3). En fait, chaque emplacement n'a pas été observé de la même manière en raison du chevauchement partiel des fauchées voisines et de l'utilisation d'orbites à la fois ascendantes et descendantes. Il a donc été nécessaire de normaliser localement la distribution du nombre de nappes d'hydrocarbures en divisant le nombre d'occurrences de nappes d'hydrocarbures par le nombre d'observations faites par l'Envisat ASAR sur la zone d'étude, ce qui donne la fréquence relative de la présence d'hydrocarbures par pixel.

La probabilité de présence de pétrole X par pixel ($P_X(l, p)$) est égale au nombre d'occurrences de l'huile X dans un pixel ($S_X(l, p)$) divisé par le nombre d'observations ($O(l, p)$) du même pixel:

$$P_X(l, p) = \frac{S_X(l, p)}{O(l, p)} \quad (1)$$

Où $S_X(l, p)$ est le nombre d'occurrences de la présence d'huile X détecté sur un pixel par interprétation d'image ; X est le type d'hydrocarbures (il peut s'agir de fuites naturelles – « *oil seepage* », de pollution par des bateaux – « *oil spills from ships* » ou de pollution par des plateformes – « *oil spills from platforms* »); (l, p) désigne les coordonnées du pixel courant, (l, p) représentant les lignes et les colonnes de l'image ; $O(l, p)$ indique le nombre d'observations telles qu'elles apparaissent dans les empreintes des images Envisat ASAR WSM traitées; et $P_X(l, p)$ est l'occurrence normalisée, également appelée probabilité de présence d'huile au point (l, p). Pour chaque classe X de nappe de pétrole parmi «*seepage*» (e), «*spill from ship*» (s), et «*spill from platform*» (p), la définition générique donnée par (Eq. 1) devient

$$P_e(l, p) = \frac{S_e(l, p)}{O(l, p)}, P_s(l, p) = \frac{S_s(l, p)}{O(l, p)}, P_p(l, p) = \frac{S_p(l, p)}{O(l, p)} \quad (2)$$

Ici, $S_e(l, p)$, $S_s(l, p)$, et $S_p(l, p)$ sont le nombre d'occurrences de présence d'hydrocarbures détectées sur un pixel par interprétation d'image en ce qui concerne respectivement les fuites naturelles, les déversements d'hydrocarbures provenant des navires et la pollution provenant des

plateformes ; (l, p) désigne les coordonnées du point courant, (l, p) représentant les lignes et les colonnes de l'image ; et $O(l, p)$ désigne le nombre d'observations telles qu'elles apparaissent dans les empreintes des images Envisat ASAR WSM traitées.

La probabilité totale de présence d'huile X par pixel ($P_t(l, p)$) est égale à :

$$P_t(l, p) = \frac{S_e(l, p)}{O(l, p)} + \frac{S_s(l, p)}{O(l, p)} + \frac{S_p(l, p)}{O(l, p)} \quad (3)$$

Ainsi, en utilisant \hat{A}_X , nous désignons la surface moyenne recouverte d'huile d'origine X dans le GG entre 2002 et 2012. Cette aire moyenne est donnée par

$$A_X = \sum_{GG}^l \sum_{GG}^p (P_X(l, p) \times A(l, p)) \approx \sum_{GG}^l \sum_{GG}^p (P_X(l, p)) \times \bar{A} \quad (4)$$

Où $A(l, p)$ est l'aire du pixel (l, p), et \bar{A} est l'aire moyenne d'un pixel. En raison du Système de Référence de Coordonnées géographiques (SRC) choisi, la variation de la surface du pixel (75 m × 75 m) est inférieure à 2,5 % sur le Golfe de Guinée (GG).

Pour une année Y donnée, la superficie moyenne couverte en pétrole d'origine X ($\hat{A}_{X,Y}$) est donnée par :

$$A_{X,Y} = \sum_{GG}^l \sum_{GG}^p (P_{X,Y}(l, p)) \times \bar{A} \quad (5)$$

Où $P_{X,Y}(l, p)$ est la probabilité de présence d'huile d'origine X pour une année donnée Y et pour un pixel donné (l, p).

Pour une année Y donnée et pour une ZEE donnée, la surface moyenne couverte en pétrole d'origine X ($\hat{A}_{X,Y,ZEE}$) est donnée par :

$$A_{X,Y,ZEE} = \sum_{ZEE}^l \sum_{ZEE}^p (P_{X,Y}(l, p)) \times \bar{A} \quad (6)$$

3.1. Fraction moyenne couverte d'huile pour une ZEE donnée

Pour la ZEE de chaque pays sur une période de temps donnée, nous avons estimé la fraction moyenne couverte par l'huile d'origine X et pour une année donnée Y ($\widehat{P_{X,Y,ZEE}}$) en divisant la surface moyenne couverte par l'huile d'origine X pour une année donnée Y pour une ZEE donnée ($\hat{A}_{X,Y,ZEE}$) par la superficie de la ZEE (A_{ZEE}) du pays (Eq.7). Lors de la présentation des résultats, le terme ZEE a été remplacé par le code ISO du pays.

$$\widehat{P_{X,Y,ZEE}} = \frac{\widehat{A_{X,Y,ZEE}}}{A_{ZEE}} \quad (7)$$

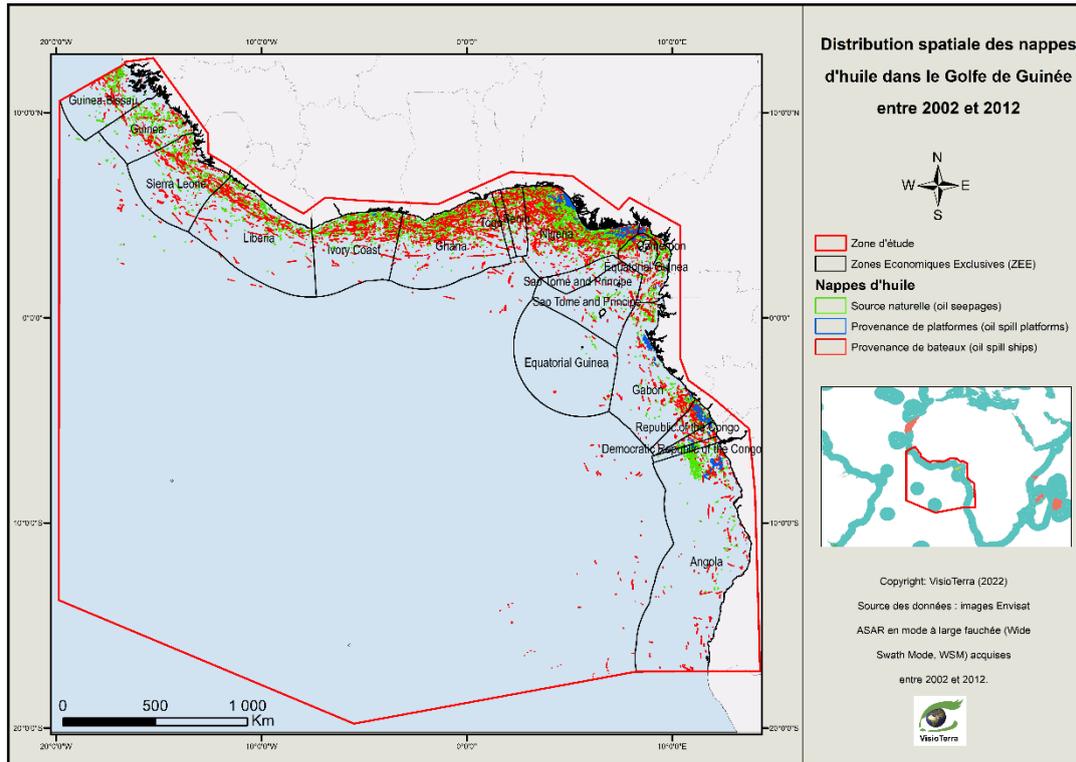


Figure 11. Répartition spatiale des nappes d’huile dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

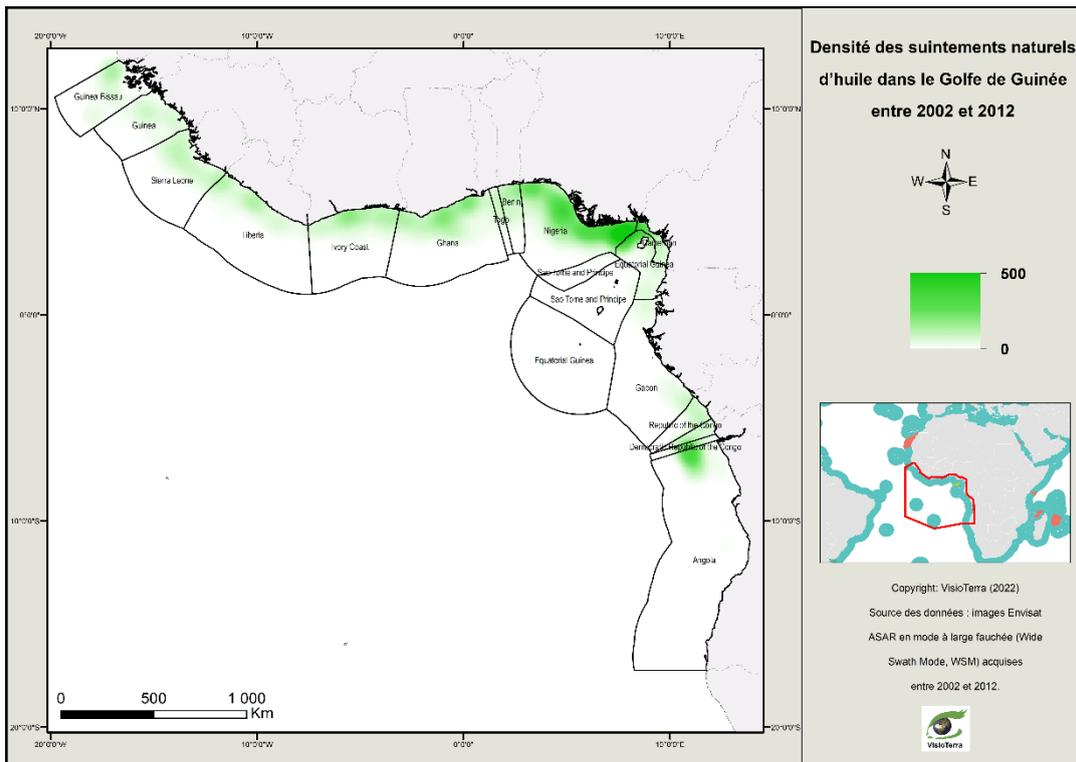


Figure 12. Carte de densité des suintements d’huile dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

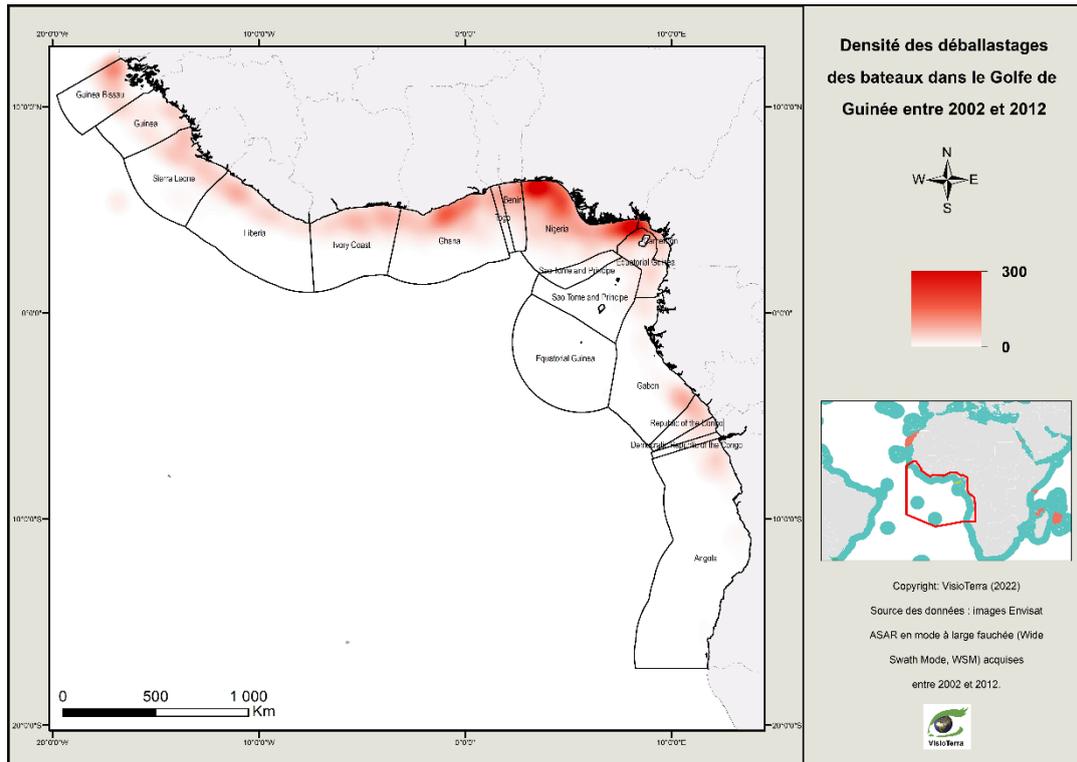


Figure 13. Carte de densité des nappes d’huile provenant des navires dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

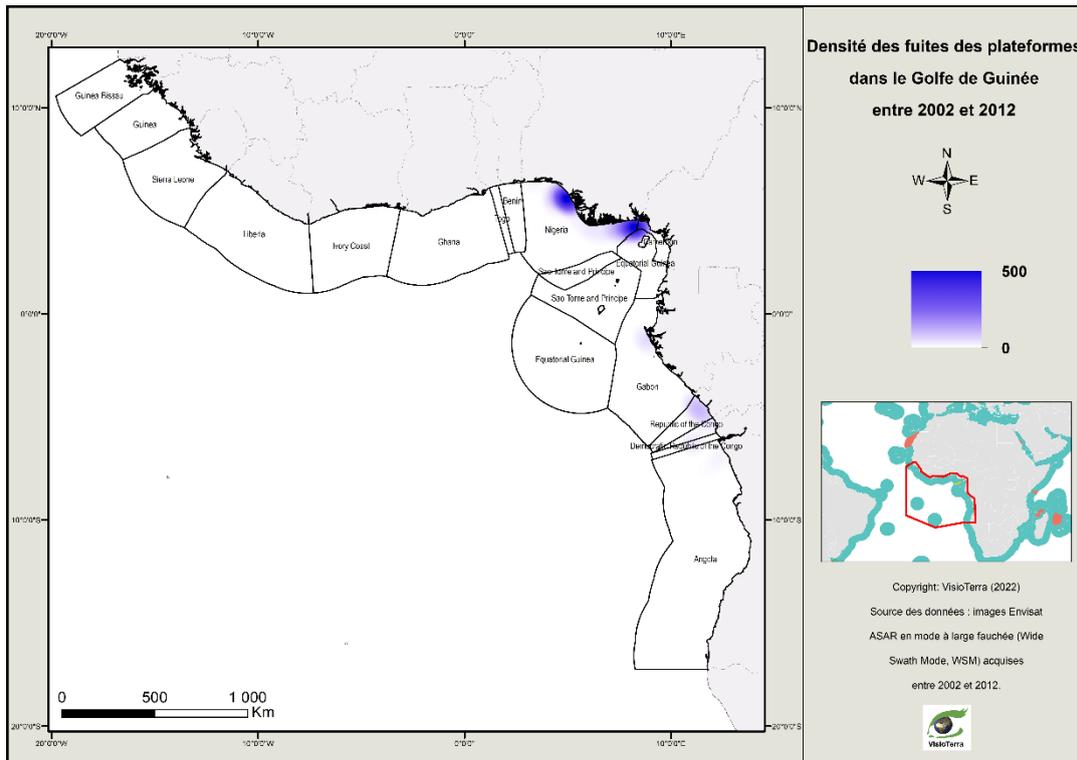


Figure 14. Carte de densité des nappes d’huile provenant des plateformes dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

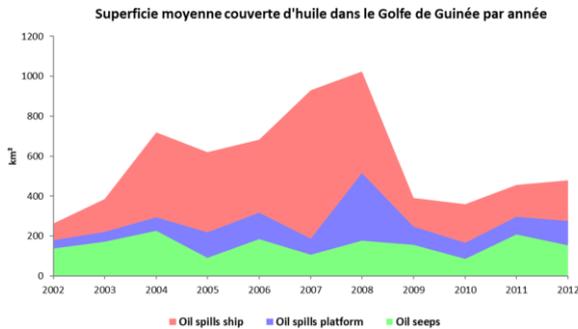


Figure 15. Superficie moyenne couverte de pétrole dans le Golfe de Guinée par année ($\hat{A}_{X,Y}$).

4. Résultats et discussion

4.1. Répartition spatiale des nappes d'huile dans le Golfe de Guinée

L'analyse spatiale et temporelle des images du Golfe de Guinée a permis l'interprétation de 18 063 nappes de pétrole. La base de données des 18 063 objets identifiés comprend deux classes d'huiles minérales ; (1) la pollution anthropique qui provient des plateformes et les déballastages récurrents en provenance des navires et (2) les résurgences naturelles de suintement d'huile qui sont des indices de la présence des réservoirs d'hydrocarbures dans la subsurface du Golfe de Guinée.

La Figure 11 illustre la répartition spatiale des 18 063 nappes d'hydrocarbures qui ont été détectées puis cartographiées dans le Golfe de Guinée sur la période de 2002 à 2012. Pour chacune des nappes N , un point a été désigné comme source, formant une carte de points discrets. Afin d'obtenir une carte de densité continue, chaque point source de cette carte de points a été convolé par une fonction noyau 2-D. En fait, la carte de densité est la somme de chacune de ces N fonctions noyaux. Les Figure 12, Figure 13 et Figure 14 montrent respectivement les cartes de densité des suintements de pétrole, des déballastages des navires et des déversements des plateformes. La fonction noyau qui a été utilisée est

$$K(r) = (1 - (r/0.7)^2)^2 \text{ si } r \leq 0.7$$

$$K(r) = 0 \text{ si } r > 0.7, \quad (8)$$

où r est la distance euclidienne au point source en degrés.

La Figure 12 montre que les emplacements des suintements pétroliers sont répartis sur l'ensemble des ZEE du Golfe de Guinée. Ce grand nombre d'événements de suintement d'hydrocarbures dans le Golfe de Guinée pourrait s'expliquer en partie par la géologie, qui a résulté de l'ouverture du domaine de l'Atlantique Sud qui a commencé au Crétacé inférieur, et par l'important apport de sédiments du Delta du Niger (Grimaud et al., 2018).

La proximité des principales voies maritimes par rapport à la côte contribue également à la concentration des rejets dans ces zones. Ce phénomène est particulièrement notable le long de la côte du Nigeria, qui abrite l'une des principales

routes maritimes et est également bien connue pour la piraterie maritime (voir Figure 13). Ainsi, il y a d'importants déversements liés aux navires dans cette région, malgré la promulgation de la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL 73/78), qui est entrée en vigueur en 1983. Les opérations de décharge illégales dans la zone comprennent le déballastage et le nettoyage de réservoirs de navires.

Les plateformes pétrolières offshore se trouvent tout le long des côtes des ZEE des principaux pays producteurs de pétrole (Nigéria, Angola, République du Congo et Ghana) dans le Golfe de Guinée (voir Figure 14). Les nappes d'huile de ces plateformes qui ont été observées dans notre étude sont très bien corrélées avec les installations offshore.

4.2. Superficie moyenne recouverte d'huile ($\hat{A}_{X,Y,ZEE}$)

4.2.1. Superficie moyenne recouverte d'huile dans le Golfe de Guinée ($\hat{A}_{X,Y}$)

La Figure 15 montre la superficie moyenne couverte de pétrole dans le Golfe de Guinée par année. A partir de cette figure, on peut remarquer ce qui suit ;

- la surface moyenne recouverte de nappes de pétrole d'origine naturelle (*oil seepages*) reste relativement stable au cours de la période 2002 à 2012 ;
- la surface moyenne couverte de nappes d'hydrocarbures issues de déversements en provenance des plateformes pétrolières semble avoir sensiblement augmenté au cours de l'année 2008, revenu à la normale en 2009, puis est resté stationnaire jusqu'à la fin de la période d'étude ;
- la surface moyenne couverte par les nappes d'hydrocarbures en provenance des navires semble avoir augmenté après 2004 (avec un pic entre 2007 et 2008), diminué en 2009, puis est restée stable jusqu'à la fin de la période d'étude.

La superficie moyenne couverte par les nappes d'hydrocarbures sur l'ensemble du Golfe de Guinée (GG) entre 2002 et 2012 était de 145 km² pour les suintements d'hydrocarbures, de 111 km² pour les déversements d'hydrocarbures depuis les plateformes, de 308 km² pour les déversements d'hydrocarbures depuis les navires et de 547 km² pour l'ensemble des nappes d'hydrocarbures. (Table 1). Ainsi, nous avons détecté une surface de nappe de pétrole de 574 km² par « observation en pleine couverture » durant la période 2002-2012. Ce résultat est très similaire à celui obtenu par Dong et al. (2022), qui ont détecté une zone de nappe de pétrole de 568 km² par observation à couverture complète au cours de la période 2014-2019 à l'aide des données Sentinel-1.

Table 1. Moyenne temporelle de la superficie moyenne annuelle recouverte d'huile dans le Golfe de Guinée (GG) entre 2002 et 2012

Nappe d'huile	Superficie moyenne couverte d'huile dans le GG
Oil seep	154 km ²
Oil spill platform	111 km ²
Oil spill ship	308 km ²
Total	574 km ²

4.2.2. Superficie moyenne couverte d'huile par ZEE de pays ($\hat{A}_{X,Y,ZEE}$)

La Figure 16 montre la superficie moyenne couverte de pétrole par rapport aux ZEE des pays entre 2002 et 2012. La Figure 17 montre la superficie moyenne couverte de pétrole par les ZEE des pays et par année. On peut remarquer que

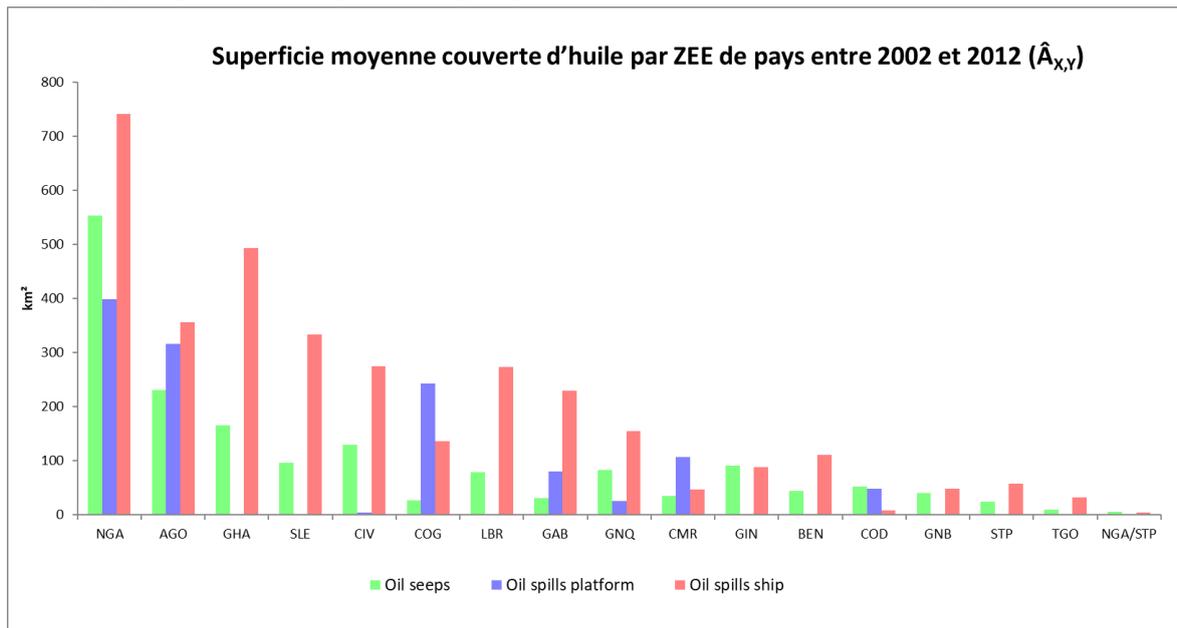


Figure 16. Superficie moyenne couverte en pétrole par les ZEE des pays ($\hat{A}_{X,Y}$) dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

4.3. Fraction moyenne couverte par l'huile et par ZEE ($P_{X,Y,ZEE}$)

Comme le montre la Figure 15, le Nigeria détient le record de pollution par les plateformes ainsi que par les navires. Ces données intègrent la pollution observée dans toute la ZEE du pays. Cependant, ces niveaux élevés de pollution peuvent également être dus au fait que le Nigéria a une ZEE étendue. Pour rendre l'analyse indépendante de la taille de la ZEE, nous calculons la « Fraction moyenne couverte par l'huile par ZEE ».

La Figure 18 montre la fraction moyenne couverte par le pétrole par la ZEE des pays entre 2002 et 2012. La Figure 19 montre la fraction moyenne couverte par le pétrole par la ZEE des pays et par année.

La fraction moyenne du pays couverte par le pétrole, qui divise la surface moyenne couverte par le pétrole par la surface de la ZEE du pays (Eq. 7), donne une idée de la probabilité moyenne d'être couverte par le pétrole pour

la ZEE la plus polluée est celle du Nigéria, suivi de l'Angola, de la République du Congo et du Cameroun.

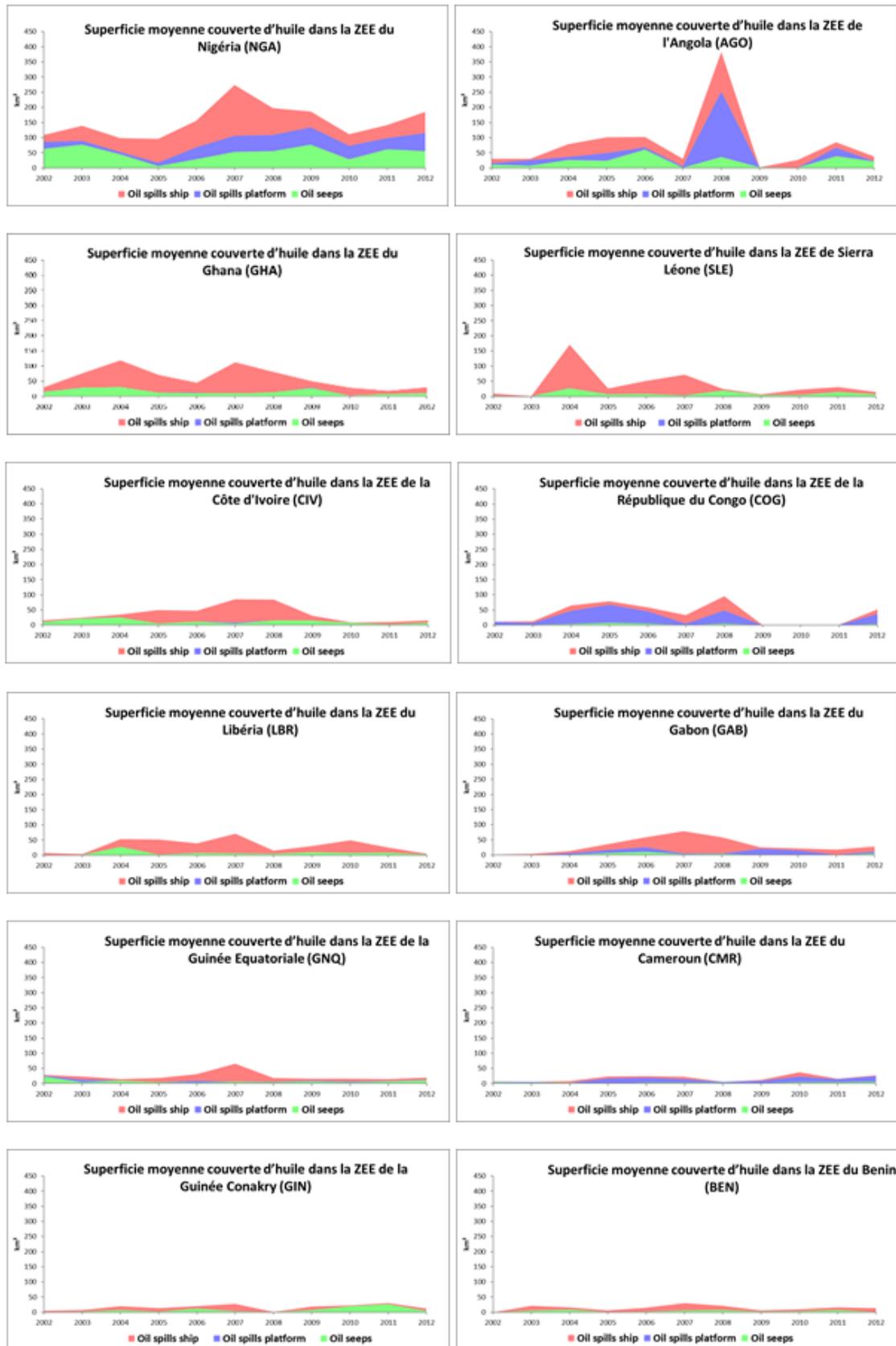
L'analyse par ZEE montre que la diminution des marées noires observée entre 2008 et 2009 (Figure 15) a été dictée par les grands pays producteurs de pétrole ; Angola, Nigéria et République du Congo (Figure 17).

La baisse de la surface moyenne couverte par le pétrole provenant des plateformes et des navires peut s'expliquer par la crise économique de 2008, qui a entraîné la chute des prix du pétrole, induisant ainsi un déficit budgétaire des compagnies pétrolières et des gouvernements. Par exemple, la production de pétrole en Angola a diminué en 2009 à la suite du ralentissement de l'activité économique mondiale après 2008 et de la surabondance de pétrole qui en a résulté sur le marché mondial (Mikidadu, 2018).

chaque ZEE. Ainsi, plus la fraction moyenne est grande, plus la zone est susceptible d'être couverte de pétrole. On peut voir que la probabilité d'un déversement de pétrole est élevée pour la République du Congo, le Cameroun et le Nigeria, tandis que la probabilité d'un suintement de pétrole est élevée pour la République Démocratique du Congo, le Nigeria et le Cameroun.

5. Disponibilité des données

Toutes les images Envisat ASAR (2002-2012) utilisées dans cette étude sont disponibles dans la collection ESA ; <https://doi.org/10.5270/EN1-4c37krv> (European Space Agency, 2021). La répartition spatiale des nappes de pétrole dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012 est disponible auprès de Zenodo : <https://doi.org/10.5281/zenodo.6470470> (Najoui, 2022b). Un ensemble de 100 marées noires géoréférencées est également disponible auprès de Zenodo ; <https://doi.org/10.5281/zenodo.6907743> (Najoui, 2022a).



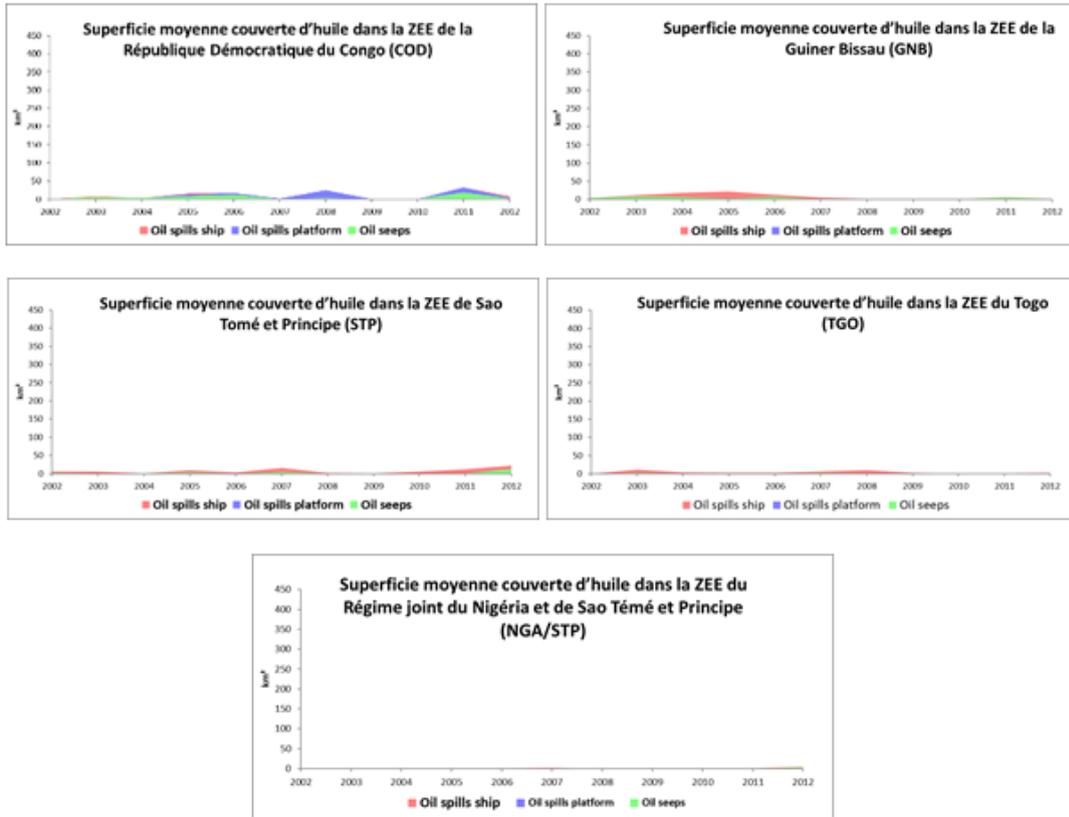


Figure 17. Superficie moyenne couverte en pétrole par les ZEE des pays par an ($\hat{A}_{X,Y,ZEE}$).

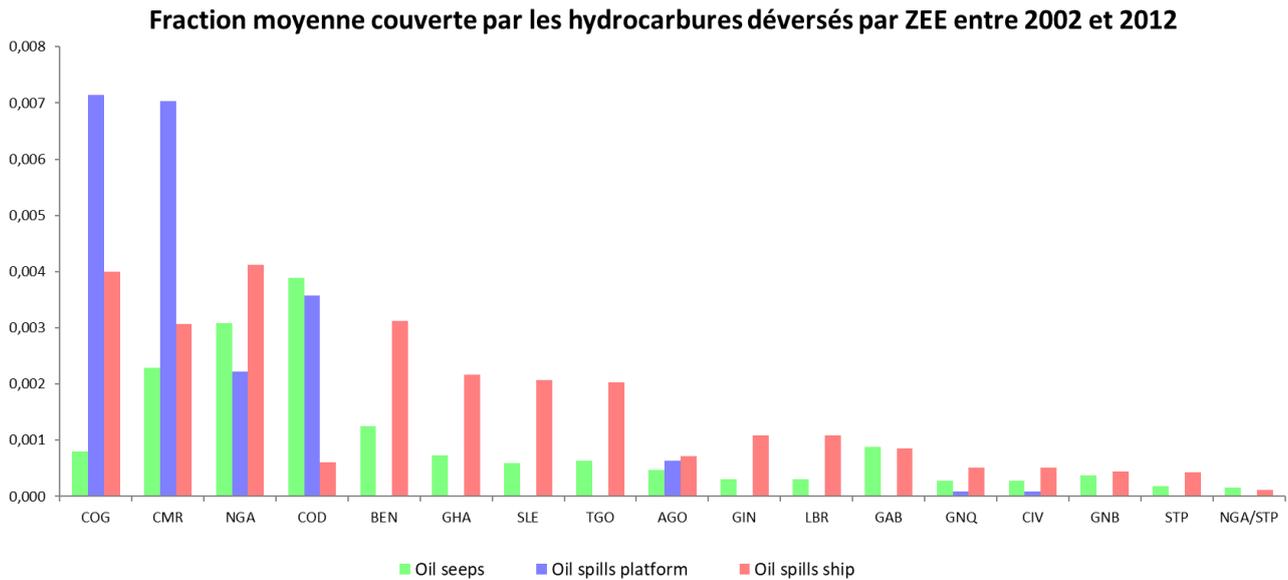
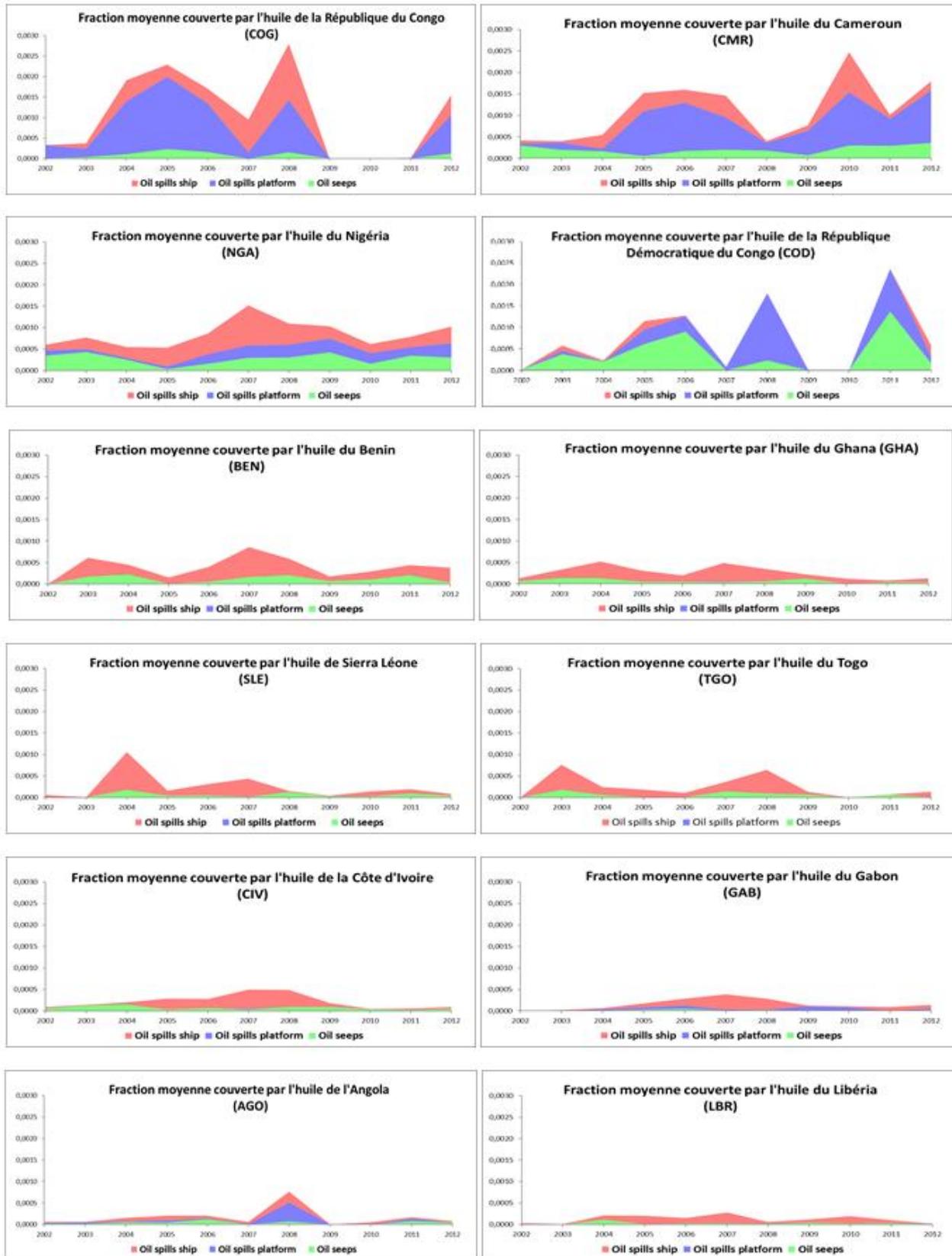


Figure 18. Fraction moyenne couverte par les hydrocarbures déversés par ZEE entre 2002 et 2012.



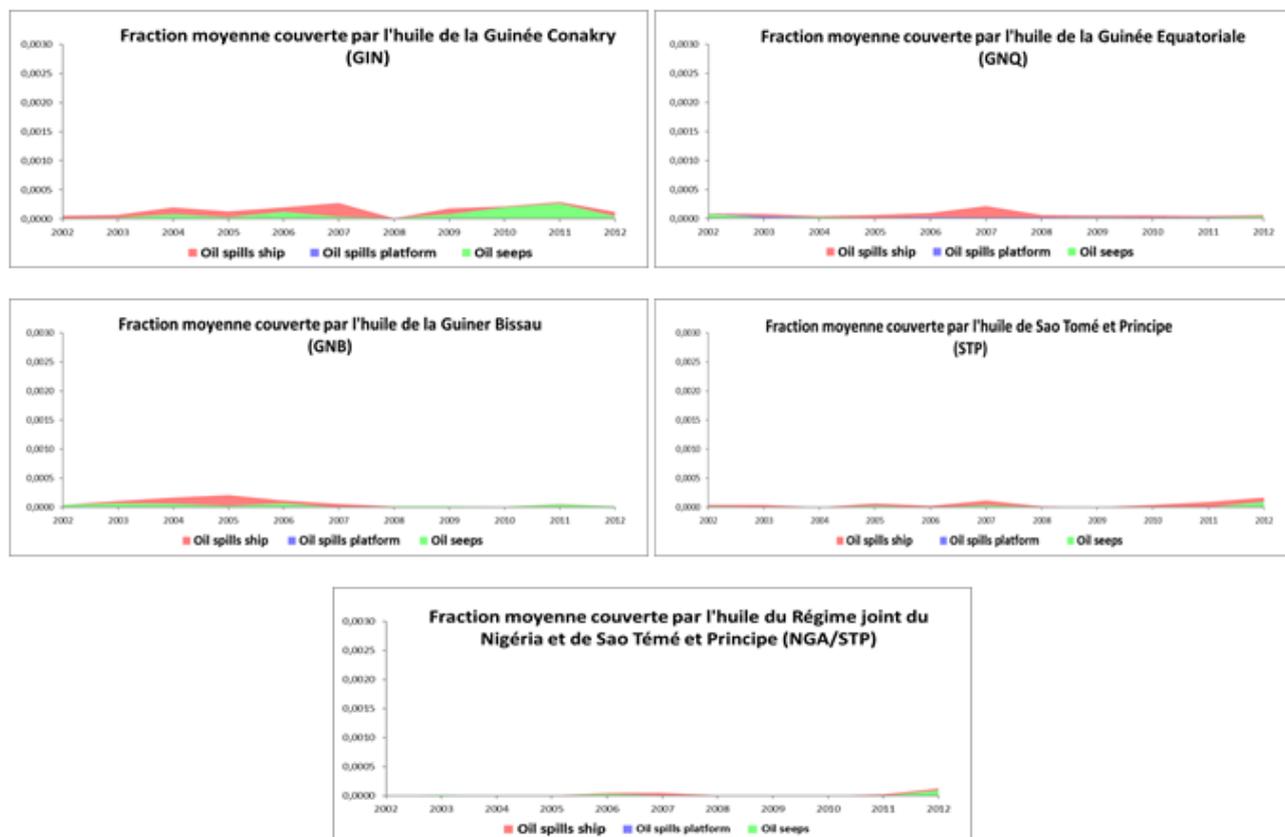


Figure 19. Fraction moyenne couverte par le pétrole par ZEE et année.

6. Conclusion et perspectives

Une base de données inédite sur les marées noires a été générée sur les ZEE du Golfe de Guinée à partir de 11 années d'acquisitions ASAR en mode large fauchée WSM (150 m de résolution spatiale) en bande C contenues dans les archives de la mission Envisat. Cette base de données a été réalisée en utilisant une approche manuelle. La présente étude montre que toutes les ZEE des pays sont des sites de suintements naturels de pétrole en raison du contexte géologique extensif du Golfe de Guinée. Elle montre également que les déversements d'hydrocarbures des navires sont bien corrélés avec les routes maritimes le long des côtes des 17 ZEE du Golfe de Guinée, tandis que les déversements d'hydrocarbures en provenance des plateformes pétrolières sont concentrés le long des côtes des pays producteurs de pétrole comme le Nigeria, la République du Congo, Angola et Ghana. L'analyse temporelle sur 10 ans (2002-2012) montre une diminution de la superficie moyenne couverte par le pétrole entre 2008 et 2009. Cette diminution est probablement due au ralentissement économique mondial post-2008.

La surveillance des suintements et déversements d'hydrocarbures bénéficie aussi de la mission Sentinel-1, lancée en 2014, en raison de sa résolution spatiale plus élevée (10 m), de sa haute résolution temporelle (12 jours de temps de cycle d'un satellite voire 6 jours pour une constellation de deux satellites) et de sa période d'acquisition plus longue (au-delà de 2032). Cet ensemble

de données offrira des informations plus fiables et opportunes pour les politiques d'urgence et d'atténuation.

Contributions des auteurs. Tous les auteurs ont conçu la méthode. ZN, NA et SR ont traité, analysé et validé l'ensemble des données. ZN et SR ont rédigé le manuscrit. Tous les auteurs ont lu et approuvé le document final.

Clause de non-responsabilité. Note de l'éditeur ; Copernicus Publications reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier l'ESA pour avoir fourni les scènes RSO utilisées dans cette étude.

Déclaration de révision. Cet article a été édité par David Carlson et revu par Chuanmin Hu et deux examinateurs anonymes.

Références

Adelana, S. and Adeosun, T.: Environmental pollution and remediation: challenges and management of oil Spillage in

- the Nigerian coastal areas, *Am. J. Sci. Ind. Res.*, 2, 834–845, <https://doi.org/10.5251/ajsir.2011.2.6.834.845>, 2011.
- Albakjaji, M.: La pollution de la mer méditerranée par les hydrocarbures liée au trafic maritime, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00598492/document> (last access: 14 October 2022), 2010.
- Alpers, W., Holt, B., and Zeng, K.: Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls, *Remote Sens. Environ.*, 201, 133–147, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.002>, 2017.
- Bagby, S. C., Reddy, C. M., Aeppli, C., Fisher, G. B., and Valentine, D. L.: Persistence and biodegradation of oil at the ocean floor following *Deepwater Horizon*, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 114, E9–E18, <https://doi.org/10.1073/pnas.1610110114>, 2017.
- Bassou, A.: Le Golfe de Guinée, Zone de Contrastes: Richesses et Vulnérabilités/The Gulf of Guinea, an Area of Contrasts: Wealth and Vulnerabilities, <https://www.africaportal.org/publications/le-golfe-de-guinée-zone-de-contrastes-richesses-et-vulnérabilités-gulf-guinea-area-contrasts-wealth-and-vulnerabilities/> (last access: 17 October 2022), 2016.
- Brekke, C. and Solberg, A. H. S.: Oil spill detection by satellite remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 95, 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>, 2005.
- Brekke, C. and Solberg, A. H. S.: Classifiers and Confidence Estimation for Oil Spill Detection in ENVISAT ASAR Images, *IEEE Geosci. Remote S.*, 5, 65–69, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.907174>, 2008.
- Caruso, M., Migliaccio, M., Hargrove, J., Garcia-Pineda, O., and Graber, H.: Oil Spills and Slicks Imaged by Synthetic Aperture Radar, *Oceanography*, 26, 112–123, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.34>, 2013.
- Chalghmi, H.: Etude de la pollution marine par les hydrocarbures et caractérisation de leurs effets biochimiques et moléculaires sur la palourde de *Ruditapes* sp, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01583022> (last access: 14 October 2022), 2015.
- Del Frate, F., Petrocchi, A., Lichtenegger, J., and Calabresi, G.: Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data, *IEEE T. Geosci. Remote*, 38, 2282–2287, <https://doi.org/10.1109/36.868885>, 2000.
- Dong, Y., Liu, Y., Hu, C., MacDonald, I. R., and Lu, Y.: Chronic oiling in global oceans, *Science*, 376, 1300–1304, <https://doi.org/10.1126/science.abm5940>, 2022.
- Espedal, H. A.: Satellite SAR oil spill detection using wind history information, *Int. J. Remote Sens.*, 20, 49–65, <https://doi.org/10.1080/014311699213596>, 1999.
- European Space Agency: Envisat ASAR Wide Swath Medium Resolution L1 Product, IPF version 6.03, <https://doi.org/10.5270/ENI-4c37krv>, 2021.
- Favennec, J.-P., Copinschi, P., Cavatorta, T., and Esen, F.: Les nouveaux enjeux pétroliers en Afrique, *Polit. Afr.*, 89, 127–148, <https://doi.org/10.3917/polaf.089.0127>, 2003.
- Fingas, M. and Brown, C.: A Review of Oil Spill Remote Sensing, *Sensors*, 18, 91, <https://doi.org/10.3390/s18010091>, 2017.
- Fiscella, B., Giancaspro, A., Nirchio, F., Pavese, P., and Trivero, P.: Oil spill detection using marine SAR images, *Int. J. Remote Sens.*, 21, 3561–3566, <https://doi.org/10.1080/014311600750037589>, 2000.
- Fuhrer, M.: Transport maritime de produits chimiques liquides et flottants: étude expérimentale du rejet accidentel sous-marin suite à un naufrage, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00849580> (last access: 14 October 2022), 2012.
- Gade, M., Alpers, W., Hühnerfuss, H., Masuko, H., and Kobayashi, T.: Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 103, 18851–18866, <https://doi.org/10.1029/97JC01915>, 1998.
- Garcia-Pineda, O., MacDonald, I., and Zimmer, B.: Synthetic Aperture Radar Image Processing using the Supervised Textural- Neural Network Classification Algorithm, in: *IGARSS 2008– 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7–11 July 2008, Boston, MA, USA, IV-1265–IV-1268, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779960>, 2008.
- Grimaud, J.-L., Rouby, D., Chardon, D., and Beauvais, A.: Cenozoic sediment budget of West Africa and the Niger delta, *Basin Res.*, 30, 169–186, <https://doi.org/10.1111/bre.12248>, 2018.
- Jackson, C. R., Apel, J. R., and United States (Eds.): *Synthetic aperture radar: marine user's manual*, U.S. Dept. of Commerce: National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C., 464 pp., ISBN 10 016073214X, 2004.
- Jafarzadeh, H., Mahdianpari, M., Homayouni, S., Mohammadianesh, F., and Daboor, M.: Oil spill detection from Synthetic Aperture Radar Earth observations: a meta-analysis and comprehensive review, *GIScience Remote Sens.*, 58, 1022–1051, <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1952542>, 2021.
- Jatiault, R., Dhont, D., Loncke, L., and Dubucq, D.: Monitoring of natural oil seepage in the Lower Congo Basin using SAR observations, *Remote Sens. Environ.*, 191, 258–272, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.031>, 2017.
- Johannessen, O. M., Sandven, S., Jenkins, A. D., Durand, D., Pettersson, L. H., Espedal, H., Evensen, G., and Hamre, T.: Satellite Earth observation in operational oceanography, *Coast. Eng.*, 41, 155–176, [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00030-2), 2000.
- Kanaa, T. F. N., Tonye, E., Mercier, G., Onana, V. P., Ngono, J. M., Frison, P. L., Rudant, J. P., and Garello, R.: Detection of oil slick signatures in SAR images by fusion of hysteresis thresholding responses, in: *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, Toulouse, France, 2750–2752, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294573>, 2003.
- Khanna, S., Santos, M., Ustin, S., Shapiro, K., Haverkamp, P., and Lay, M.: Comparing the Potential of Multispectral and Hyper-spectral Data for Monitoring Oil Spill Impact, *Sensors*, 18, 558, <https://doi.org/10.3390/s18020558>, 2018.
- Kubat, M., Holte, R. C., and Matwin, S.: Machine Learning for the Detection of Oil Spills in Satellite Radar Images, *Mach. Learn.*, 30, 195–215, <https://doi.org/10.1023/A:1007452223027>, 1998.
- Langangen, Ø., Olsen, E., Stige, L. C., Ohlberger, J., Yaragina, N. A., Vikebø, F. B., Bogstad, B., Stenseth, N. C., and Hjermann, D. Ø.: The effects of oil spills on marine fish: Implications of spatial variation in natural mortality, *Mar. Pollut. Bull.*, 119, 102–109, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.037>, 2017.
- Lawrence, S. R., Munday, S., and Bray, R.: Regional geology and geophysics of the eastern Gulf of Guinea (Niger Delta to Rio Muni), *Lead. Edge*, 21, 1112–1117, <https://doi.org/10.1190/1.1523752>, 2002.
- Leifer, I., Lehr, W. J., Simecek-Beatty, D., Bradley, E., Clark, R., Dennison, P., Hu, Y., Matheson, S., Jones, C. E., Holt, B., Reif, M., Roberts, D. A., Svejtkovsky, J., Swayze, G., and Wozencraft, J.: State of the art satellite and airborne

- marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill, *Remote Sens. Environ.*, 124, 185–209, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.024>, 2012.
- Li, Y., Hu, C., Quigg, A., and Gao, H.: Potential influence of the Deepwater Horizon oil spill on phytoplankton primary productivity in the northern Gulf of Mexico, *Environ. Res. Lett.*, 14, 094018, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3735>, 2019.
- Li, Z. and Johnson, W.: An Improved Method to Estimate the Probability of Oil Spill Contact to Environmental Resources in the Gulf of Mexico, *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 41, <https://doi.org/10.3390/jmse7020041>, 2019.
- Liu, A. K., Peng, C. Y., and Chang, S. Y.-S.: Wavelet analysis of satellite images for coastal watch, *IEEE J. Oceanic Eng.*, 22, 9–17, <https://doi.org/10.1109/48.557535>, 1997.
- Louet, J. and Bruzzi, S.: ENVISAT mission and system, in: *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293)*, IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 28 June–2 July 1999, IGARSS'99, Hamburg, Germany, 1680–1682, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772059>, 1999.
- MacDonald, I. R., Garcia-Pineda, O., Beet, A., Daneshgar Asl, S., Feng, L., Graettinger, G., French-McCay, D., Holmes, J., Hu, C., Huffer, F., Leifer, I., Muller-Karger, F., Solow, A., Silva, M., and Swayze, G.: Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 120, 8364–8380, <https://doi.org/10.1002/2015JC011062>, 2015.
- Marghany, M.: Automatic detection of oil spills in the Gulf of Mexico from RADARSAT-2 SAR satellite data, *Environ. Earth Sci.*, 74, 5935–5947, <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4617-y>, 2015.
- Mercier, G. and Girard-Ardhuin, F.: Partially Supervised Oil-Slick Detection by SAR Imagery Using Kernel Expansion, *IEEE T. Geosci. Remote*, 44, 2839–2846, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.881078>, 2006.
- Mfewou, A., Tchekote, H., and Lemouogue, J.: Frontières Et Dynamiques Socio-Spatiales En Afrique: Une Analyse À Partir Des Frontières Sud- Camerounaises, *Eur. Sci. J. ESJ*, 14, 285, <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n5p285>, 2018.
- Mikidadu, M.: Oil Production and Economic Growth in Angola, *Int. J. Energy Econ. Policy*, 8, 127–131, 2018.
- Miranda, N., Rosich, B., Meadows, P. J., Haria, K., Small, D., Schubert, A., Lavalle, M., Collard, F., Johnsen, H., Monti-Guarnieri, A., and D'Aria, D.: The Envisat ASAR mission: A look back at 10 years of operation, *European Space Agency Special Publication: Paris, France*, <https://doi.org/10.5167/UZH-96146>, 2013.
- NAE-NRC: Macondo Well Deepwater Horizon Blowout: Lessons for Improving Offshore Drilling Safety, *National Academies Press, Washington, D.C.*, <https://doi.org/10.17226/13273>, 2012.
- Najoui, Z.: Prétraitement optimal des images radar et modélisation des dérives de nappes d'hydrocarbures pour l'aide à la photo-interprétation en exploration pétrolière et surveillance environnementale, https://pdfs.semanticscholar.org/92b2/e8e06b49d7f31c0847c694f4b4f3bea41222.pdf?_ga=2.235046721.1549874629.1594648502-969427726.1594648502 (last access: 14 October 2022), 2017.
- Najoui, Z.: 100 geolocated oil spills in the Gulf of Guinea (1.0), *Zenodo*, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6907743>, 2022a.
- Najoui, Z.: Spatial distribution of oil slicks in the Gulf of Guinea between 2002 and 2012, *Zenodo*, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6470470>, 2022b.
- Najoui, Z., Riazanoff, S., Deffontaines, B., and Xavier, J.-P.: A Statistical Approach to Preprocess and Enhance C-Band SAR Images in Order to Detect Automatically Marine Oil Slicks, *IEEE T. Geosci. Remote*, 56, 2554–2564, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2760516>, 2018a.
- Najoui, Z., Riazanoff, S., Deffontaines, B., and Xavier, J.-P.: Estimated location of the seafloor sources of marine natural oil seeps from sea surface outbreaks: A new “source path procedure” applied to the northern Gulf of Mexico, *Mar. Petrol. Geol.*, 91, 190–201, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.12.035>, 2018b.
- Ngodi, E.: Gestion des ressources pétrolières et développement en Afrique, *Présentation à la 11ème Assemblée générale du CODESRIA (6–10 December 2005)*, Maputo, Mozambique, 2005.
- Okafor-Yarwood, I.: The effects of oil pollution on the marine environment in the Gulf of Guinea—the Bonga Oil Field example, *Transnatl. Leg. Theory*, 9, 254–271, <https://doi.org/10.1080/20414005.2018.1562287>, 2018.
- Ovadia, J. S.: The petro-developmental state in Africa: making oil work in Angola, Nigeria and the Gulf of Guinea, *Hurst & Company, London*, 246 pp., <https://doi.org/10.1017/S0022278X16000926>, 2016.
- Pinkston, F. W. M. and Flemings, P. B.: Overpressure at the Macondo Well and its impact on the Deepwater Horizon blowout, *Sci. Rep.*, 9, 7047, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42496-0>, 2019.
- Reuscher, M. G., Baguley, J. G., and Montagna, P. A.: The expanded footprint of the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico deep-sea benthos, *PLOS ONE*, 15, e0235167, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235167>, 2020.
- Scheren, P. A., Ibe, A. C., Janssen, F. J., and Lemmens, A. M.: Environmental pollution in the Gulf of Guinea – a regional approach, *Mar. Pollut. Bull.*, 44, 633–641, [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00305-8), 2002.
- Shu, Y., Li, J., Yousif, H., and Gomes, G.: Dark-spot detection from SAR intensity imagery with spatial density thresholding for oil-spill monitoring, *Remote Sens. Environ.*, 114, 2026–2035, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.009>, 2010.
- Solberg, A. H. S., Storvik, G., Solberg, R., and Volden, E.: Automatic detection of oil spills in ERS SAR images, *IEEE T. Geosci. Remote*, 37, 1916–1924, <https://doi.org/10.1109/36.774704>, 1999.
- Suresh, G., Melsheimer, C., Korber, J.-H., and Bohrmann, G.: Automatic Estimation of Oil Seep Locations in Synthetic Aperture Radar Images, *IEEE T. Geosci. Remote*, 53, 4218–4230, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2393375>, 2015.
- Trivero, P. and Biamino, W.: Observing Marine Pollution with Synthetic Aperture Radar, in: *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*, edited by: Imperatore, P. and Riccio, D., *InTech*, <https://doi.org/10.5772/9106>, 2010.
- Tull, D. M.: *Oil and Politics in the Gulf of Guinea* by Ricardo Soares de Oliveira *London: Hurst & Co/New York, Columbia University Press*, 2007, 46, 692–694, <https://doi.org/10.1017/S0022278X08003558>, 2008.
- Xu, L., Shafiee, M. J., Wong, A., Li, F., Wang, L., and Clausi, D.: Oil spill candidate detection from SAR imagery using a thresholding-guided stochastic fully-connected conditional random field model, in: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Boston, MA, USA, 79–86, <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2015.7301386>, 2015.

- Yaghmour, F., Els, J., Maio, E., Whittington-Jones, B., Samara, F., El Sayed, Y., Ploeg, R., Alzaabi, A., Philip, S., Budd, J., and Mupandawana, M.: Oil spill causes mass mortality of sea snakes in the Gulf of Oman, *Sci. Total Environ.*, 825, 154072, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154072>, 2022.
- Zhang, Y., Li, Y., and Lin, H.: Oil-Spill Pollution Remote Sensing by Synthetic Aperture Radar, in: *Advanced Geoscience Remote Sensing*, edited by: Marghany, M., InTech, <https://doi.org/10.5772/57477>, 2014.