

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

Zhour Najoui^a, Nellya Amoussou^c, Serge Riazanoff^{a,b}, Guillaume Aurel^a, Frédéric Frappart^d

^a VisioTerra, 14 rue Albert Einstein Champs-sur-Marne, France, zhour.najoui-nafai@visioterra.fr,
serge.riazanoff@visioterra.fr, guillaume.aurel@visioterra.fr.

^b Université Gustave Eiffel – Institut Gaspard Monge -IGM, 5 boulevard Descartes, Champs sur Marne, serge.riazanoff@univ-mlv.fr.

^c Université de Sorbonne Université - Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
(LOCEAN), 4 Place Jussieu, 75005 Paris.

^dINRAE, ISPA, UMR 1391 INRAE/Bordeaux Sciences Agro, Villenave d'Ornon, France, frederic.frappart@inrae.fr

Soumi à [Earth System Science Data](#)

1. Résumé

Le Golfe de Guinée est une zone très active tant en matière de trafic maritime que d'exploitation de pétrole et de gaz (plateformes). Du fait de certains acteurs des deux secteurs qui ne respectent pas les normes environnementales, la région est soumise à un grand nombre de pollutions pétrolières. Cette étude vise à détecter les nappes de pétrole déversées dans le golfe de Guinée et à analyser leur distribution spatiale à l'aide d'images radar. Si certaines études ont déjà cartographié localement les nappes de pétrole dans cette zone, ce document est le premier à mener une étude globale et statistique basée sur un très grand nombre d'images radar couvrant 17 Zones Economiques Exclusives du Golfe de Guinée. Pour mener à bien la présente étude, une base de données de 3644 images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO), collectées entre 2002 et 2012 auprès de la mission Envisat de l'Agence spatiale européenne (ESA) a été utilisée. Cette base de données a permis d'identifier 18 063 nappes de pétrole. Ces "nappes d'huile" détectées ici regroupent : les « *oil spills* » - d'origine anthropique - et les "*oil seeps*" - d'origine naturelle (fuites de réservoirs naturels).

2. Introduction

La catastrophe du *Deep Water Horizon* (DWH) survenue le 20 avril 2010 dans le Golfe du Mexique a suscité l'indignation du monde entier tant pour ses impacts humains qu'environnementaux Leifer et al., « State of the Art Satellite and Airborne Marine Oil Spill Remote Sensing ». On a pu remarquer un grand intérêt du public, des médias, des politiques et des scientifiques caractérisé par un suivi minutieux de la progression des nappes d'hydrocarbures (Caruso et al., 2013; William et al., 2019). Cela vient de l'atteinte à l'environnement des pays développés où la sensibilité des gens est beaucoup plus forte. Et pourtant, une catastrophe semblable à celle du DWH ne serait pas étonnante le long des côtes africaines et en particulier dans le Golfe de Guinée où l'on observe des pollutions récurrentes d'hydrocarbures. Il s'agit entre autres, des opérations de déballastages (Albakjaji, 2010) et des rejets dus à des naufrages (Fuhrer, 2012)

Si d'un point de vue économique, le pétrole constitue une ressource économique importante pour les pays du Golfe de Guinée, l'impact environnemental causé par les déversements fréquents d'hydrocarbures provoque de graves effets négatifs tant sur l'environnement que sur

l'économie locale (Jafarzadeh et al., 2021; Okafor-Yarwood, 2018; Yaghmour et al., 2022). La faiblesse du suivi national et du contrôle de la législation est de nature à limiter la conformité aux principaux standards suivis par les grandes compagnies. Ainsi, la mise à disposition d'outils d'observation pouvant permettre aux populations africaines d'assurer un bon suivi et une meilleure gestion du Golfe de Guinée est nécessaire.

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 et de petite gravité, 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, la mission Envisat de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a été utilisée. Envisat, la deuxième génération de satellites RSO développée par l'ESA, a été lancée le 1er mars 2002 et avait à bord dix instruments de grande envergure (Louet and Bruzzi, 1999). Le radar à synthèse d'ouverture avancée (ASAR) utilisé dans cette étude est l'un de ces instruments. Sa durée de vie nominale (5 ans) a été doublée jusqu'à la perte du satellite le 8 avril 2012 (10 ans).

Le Golfe de Guinée fait aujourd'hui partie des plus grandes zones de la production mondiale du pétrole. Sauf qu'à l'heure actuelle, très peu d'études ont réellement analysé sa situation en matière de déversements d'hydrocarbures. Les études qui ont été menées jusqu'à présent restent localisées (ne s'effectuent que sur des Zones Economiques Exclusives bien précises). C'est le cas des études de Jatiault et al. (2017) dans le bassin du Congo. La présente étude se concentre sur la distribution spatiale des nappes d'huile survenues de 2002 à 2012 par Zone Economique Exclusive (ZEE) dans tout le Golfe de Guinée à l'aide d'images radar Envisat ASAR.

3. Présentation de la zone d'étude

3.1. Situation géographique

Les images radar sur lesquelles a porté notre étude ont été acquises dans le Golfe de Guinée. Le Golfe de Guinée se situe 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. Il couvre les ZEE de 16 pays en bordure littorale sur plus de 7000 km (fig. 1) : Guinée Bissau (GNB), Guinée Conakry (GIN), Sierra Léone (SLE), Libéria (LBR), Côte d'Ivoire (CIV), Ghana (GHA), Togo (TGO), Bénin (BEN), Nigéria (NGA), Cameroun (CMR), Guinée Équatoriale (GNQ), Sao Tomé et Príncipe (STP), Gabon (GAB), République du Congo (COG), République Démocratique du Congo (COD) et Angola (AGO) (fig. 1).

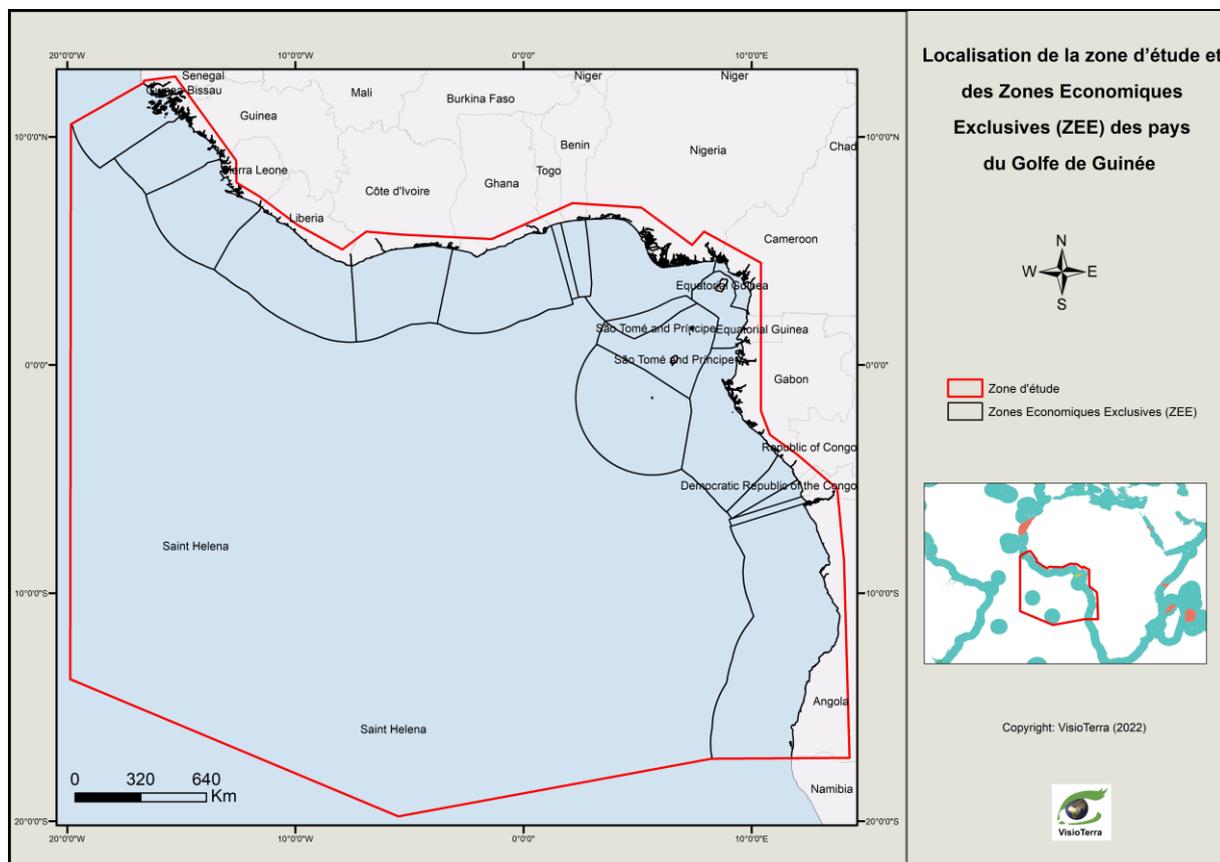


fig. 1 - Localisation de la zone d'étude dans le Golfe de Guinée et les zones économiques exclusives des différents pays.

3.2. 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 pétroliers 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).

3.3. Exploration pétrolière dans le Golfe de Guinée

La région du golfe de Guinée est entrée récemment dans le paysage mondial du pétrole. En 1982, grâce à la signature de la convention de Montego Bay a étendu les territoires maritimes des pays riverains, sur leur ZEE, à 200 milles marins au large de leurs côtes ce qui a encouragé l'exploration offshore (Bassou 2016). Le golfe de Guinée est désormais 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 (Favenec et al.2003), le Golfe de Guinée est devenu l'une des destinations préférées des investisseurs pétroliers internationaux (Tull, 2008). La bonne qualité de son pétrole justifie l'attractivité des pays étrangers dans la région (Ngodi 2005). Depuis les années 2000, il 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 quotidienne totale de pétrole brut en Afrique subsaharienne. L'épuisement de la ressource en eau côtière (*eaux peu profondes* ; ≤ 200 m) fait qu'on assiste de plus en plus aujourd'hui à la mise en place d'une exploration en eau profonde (450 m – 1800 m), voire en eau ultra-profonde (1800 m – 3000 m). C'est le cas, par exemple, au large des côtes gabonaises.

3.4. Pollution pétrolière et impacts environnementaux

Le Golfe de Guinée est une zone très active dans l'exploration pétrolière. Les déversements d'hydrocarbures qui s'y trouvent sont d'une fréquence inégalée et leur toxicité induit de graves répercussions à la fois sur le milieu marin et sur 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 sont documentés. En dehors de ces cas, plusieurs accidents se sont produits suite à l'exploitation de gisements pétroliers offshore. La fréquence des déversements de pétrole dans le golfe de Guinée serait due, entre autres, aux opérations de production pétrolière, à un équipement de production inadéquat entraînant la corrosion des pipelines et des réservoirs, aux catastrophes, au sabotage et au vandalisme (Adelana and Adeosun, 2011).

Les conséquences sur l'environnement des côtes comprennent la perte d'habitat pour les coraux et les herbiers), 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).

4. Méthodologie

4.1. Données radar

Plusieurs systèmes RSO ont été utilisés pour la surveillance et la cartographie de la pollution marine (Brekke and Solberg, 2008; Del Frate et al., 2000; Espedal, 1999; Fiscella et al., 2000; Gade et al., 1998; Garcia-Pineda et al., 2008; Kanaa et al., 2003; Li and Johnson, 2019; Liu et al., 1997; Marghany, 2015; Solberg et al., 1999; Suresh et al., 2015). Dans cette étude, nous avons utilisé des images radar acquises par Envisat ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), une mission de l'ESA qui a duré de 2002 à 2012. Envisat ASAR fonctionnait en bande C (4,20 - 5,75 GHz) dans une variété de modes, y compris le mode WSM (*Wide Swath Medium-resolution*) qui acquérait des images de 400 km par 400 km de large. Sa résolution spatiale était d'environ 150 m sur 150 m avec une taille de pixel de 75 m

sur 75 m. Il fonctionnait dans l'un des deux types de polarisations HH ou VV. ASAR. WSM fonctionnait selon le principe ScanSAR, en utilisant cinq faisceaux d'antenne se chevauchant qui couvraient la large fauchée. Le principe ScanSAR consiste à réaliser l'élargissement de la fauchée en utilisant 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 le 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 du vent idéale pour la détection des nappes de pétrole se situe dans un intervalle qui dépend des auteurs: 2 2 m/s à 10 m/s (MacDonald et al., 2015)), - 1.5 m/s à 6.5 m/s (Jatiaux et al., 2017), - 2.09 m/s à 8.33 m/s (Najoui, 2017)... La polarisation verticale (VV) est le mode le plus efficace pour détecter les déversements d'hydrocarbures à la surface de la mer (Brekke and Solberg, 2008; Jatiaux et al., 2017; Najoui et al., 2018a, 2018b).

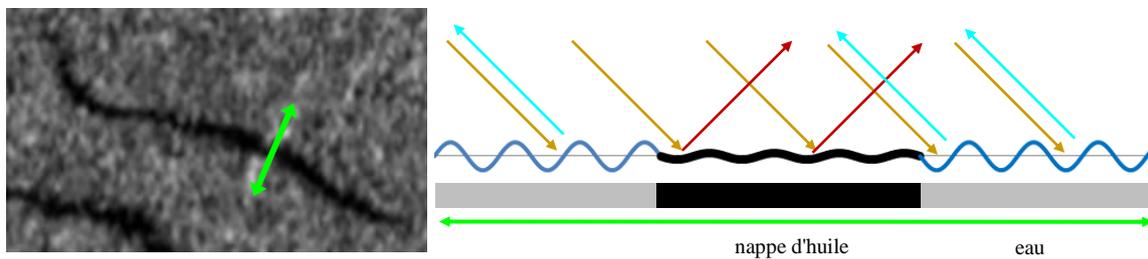


fig. 2 - Rétrodiffusion du signal radar en présence et en absence d'huile (Najoui, 2017).

Un nombre de **3644** images Envisat ASAR WSM provenant de l'Agence Spatiale Européenne a été collecté. La figure 3 illustre la distribution spatiale des occurrences d'observations WSM Envisat ASAR entre 2002 et 2012 dans le Golfe de Guinée. On peut remarquer que les occurrences des observations sont favorisées près des côtes.

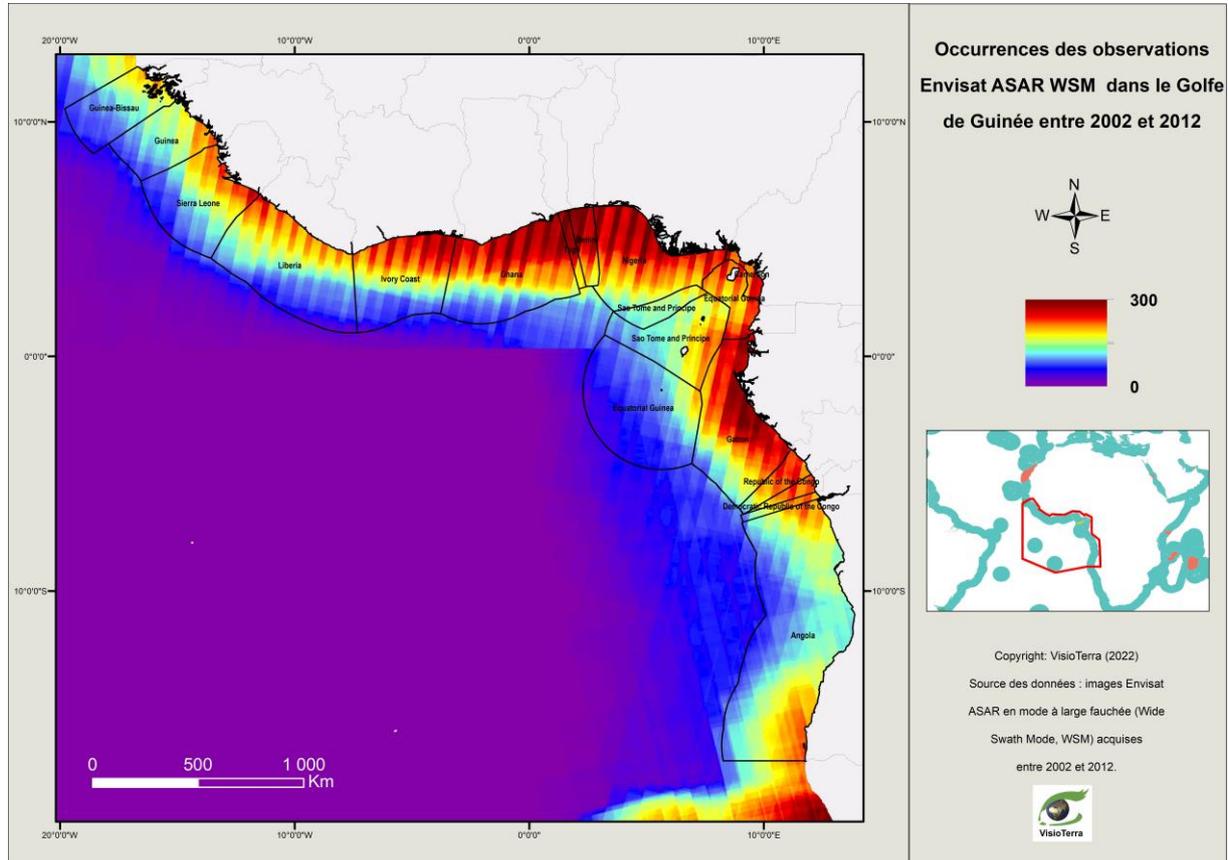


fig. 3 - Occurrences des observations Envisat ASAR WSM entre 2002 et 2012.

4.2. 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 sur la zone offshore est principalement guidée par des réflexions non lambertiennes (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. Les images sont traitées en compte numérique (CN). Le prétraitement appliqué consiste à utiliser un étirement local avec une moyenne de 140 et un écart type de 60 sur une fenêtre glissante de 301 pixels afin d'optimiser la détectabilité des nappes de pétrole (fig. 4) (Najoui, 2017; Najoui et al., 2018b).

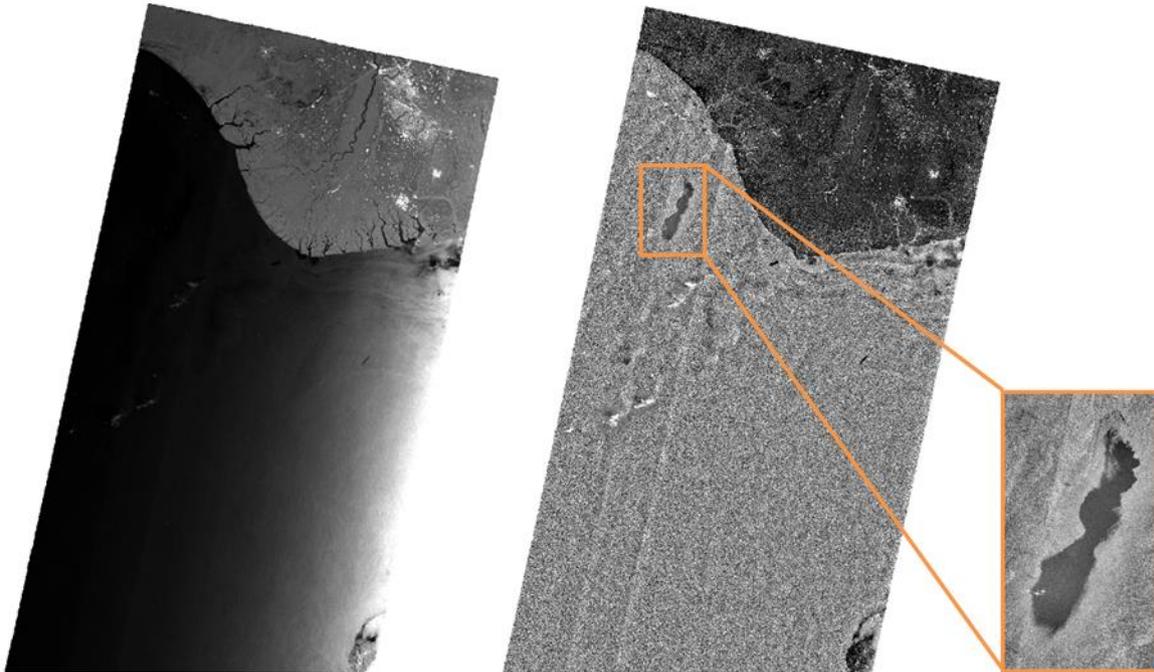


fig. 4 - Images ASAR WSM avant (gauche) et après (droite) stretching local montrant une fuite en provenance de plateforme pétrolière.

4.3. Détection manuelle

Les nappes de pétrole apparaissent sous forme de taches sombres sur les images radar car elles lissent la surface de la mer. Cependant, en plus des nappes d'huile, de nombreux phénomènes peuvent également apparaître comme des taches sombres. Les taches sombres non pétrolières incluent les upwelling, les tourbillons, les pluies torrentielles, les abris vent, la bathymétrie, les vagues internes, les zones de courant, etc. (Brekke and Solberg, 2005; Espedal, 1999; Xu et al., 2015).

Trois approches existent pour la détection des nappes de pétrole dans les images radar: une approche manuelle menée par des opérateurs humains formés qui analysent les images pour détecter les nappes de pétrole, l'approche semi-automatique où un ordinateur détecte tous les objets sombres dans l'image RSO en utilisant différentes techniques de segmentation après qu'un opérateur humain expérimenté classe ces objets comme des nappes ou des sosies, et enfin le système automatique qui utilise des techniques compliquées de traitement et de programmation d'images pour effectuer à la fois la segmentation et la classification.

Si nous n'avons pas trouvé d'exemples de détection manuelle dans la bibliographie, la segmentation et la classification semi-automatique et automatique sont largement illustrées ci-dessous. Certaines techniques de segmentation ou d'extraction de points noirs utilisées sont le seuillage adaptatif (Solberg et al., 1999), le seuillage à hystérésis (Kanaa et al., 2003), la détection des bords à l'aide de Laplace of Gaussians ou Difference of Gaussians (Chang et al., 2008), ondelettes (Liu et al., 1997). Des techniques de segmentation basées sur un réseau neuronal ont été démontrées dans Garcia-Pineda et al. (2008) Del Frate et al. (2013). Certains algorithmes de détection automatique des nappes de pétrole sont des "classificateurs" utilisant une fonction de densité gaussienne basée sur une approche de modèle statistique (Solberg et al., 1999), un classificateur de Mahalanobis (Fiscella et al., 2000), des réseaux de neurones (Del Frate et al., 2013, 2000; Garcia-Pineda et al., 2008), analyse de texture, (Marghany, 2001), algorithme génétique (Marghany, 2015) et Automatic Seep Location Estimator (Suresh et al., 2015).

En raison de la réelle précision inconnue de l'approche semi-automatique et automatique, nous nous concentrons ci-dessous sur une approche de détection manuelle fiable. La détection manuelle est basée sur le "Manuel de l'utilisateur du radar à synthèse d'ouverture marine" (Jackson et al., 2004). Chacune des 3644 images RSO a été interprétée manuellement indépendamment des autres. Chaque nappe de pétrole a été classée en fonction de l'interprétation basée sur des critères morphologiques et texturaux. Les nappes de pétrole sont divisées en deux catégories principales : biogénique et minérale. Les nappes d'hydrocarbures biogéniques sont produites par le plancton et les substances de poisson naturellement rejetées dans l'environnement. Les huiles minérales sont subdivisées en celles de suintements naturels et nappes d'huile anthropiques provenant de navires, de raffineries, de terminaux pétroliers, d'installations industrielles, de plateformes pétrolières et de pipelines (Espedal, 1999). Par exemple, les déversements d'hydrocarbures depuis des plateformes ou des navires entraînent des pièges importants (Johannessen et al., 2000; Leifer et al., 2012; Trivero and Biamino, 2010). Si les huiles biogéniques apparaissent comme des points de diffraction lisses sur les données RSO, les suintements d'huile (*oil seeps*) sont caractérisés par des formes curvilignes dues aux changements à court terme de la force et de l'orientation du vent et des courants de surface (Espedal, 1999). Par la suite, une analyse à plusieurs dates a été effectuée. Nous utilisons toutes les interprétations à différentes dates afin d'évaluer l'interprétation manuelle. En effet, les nappes répétitives sont plus probablement dues aux fuites à partir de sources statiques : une couche géologique pour les suintements de pétrole, 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 court terme des vents et des courants de surface de la mer. Généralement, ce type de nappes provenant de suintements d'hydrocarbures naturels et de déversements d'hydrocarbures provenant de plates-formes pétrolières constitue des formes de «astroseeps» ou de «structure de fleurs». En général, les navires rejettent leur déballastage en cours de route, laissant derrière eux des déversements ou des traînées de forme linéaire. Lorsque le pétrole est déversé dans une mer calme et sans courant, la géométrie globale du déversement qui en résulte suivra la route du navire. Cette linéarité est utilisée pour identifier de tels déversements d'hydrocarbures. Cependant, lorsque le navire 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 du navire en mouvement, il se propage également latéralement, ce qui entraîne une traînée de pétrole dont la largeur augmente avec la distance du navire.

Pour effectuer et valider notre analyse, le résultat de détection manuelle a été intégrée dans un SIG avec plusieurs données (données géologiques, trafic maritime, plateformes pétrolières, champs de pétrole et de gaz, champs de vent, bathymétrie, etc.). Ce travail a permis la constitution d'un ensemble de données avec 18 063 nappes de pétrole interprétées.

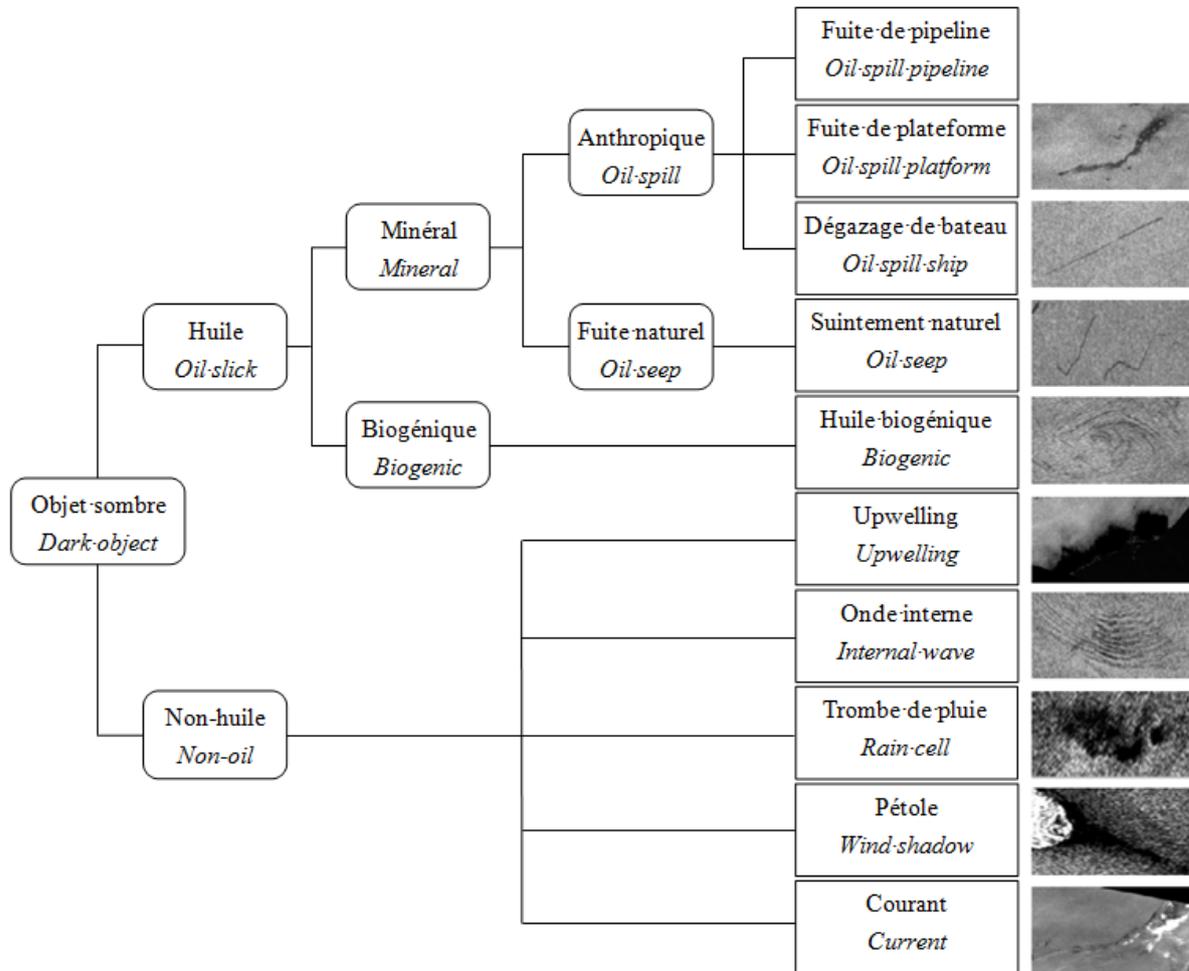


fig. 5 - Principales taches sombres visibles en surface de la mer sur les images radar.

4.4. La superficie moyenne couverte par l'huile

La photo-interprétation de la section précédente produit des polygones fermés délimitant les nappes. 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 imagé un nombre égal de fois par le satellite Envisat, une carte des occurrences d'observation a été produite (fig. 3). En effet, 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. Par conséquent, il a été nécessaire de normaliser localement la distribution du nombre de nappes d'huile en divisant le nombre d'occurrences de nappes d'huile par le nombre d'observations faites par Envisat ASAR sur la zone d'étude. On obtient ainsi la fréquence relative de la présence d'huile par pixel.

La probabilité de présence d'huile X par pixel ($P_X(l,p)$) est égal au nombre d'occurrences de l'huile X dans un pixel ($S_X(l,p)$) divisée par l'occurrence d'observation ($O(l,p)$) du même pixel (équation 1).

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

Où :

- $S_x(l,p)$ est l'occurrence de présence d'huile X détectée sur un pixel par photo-interprétation,
- X est le type d'huile. Il peut être des nappes naturelles (*oil seepages*), pollution de bateaux (*oil spill ships*) et pollution de plateformes (*oil spill platforms*),
- (l,p) sont les coordonnées (l,p) représentant les numéros des lignes et des colonnes de l'image,
- O(l,p) sont les occurrences d'observation telles qu'elles apparaissent dans les empreintes au sol des images Envisat ASAR WSM traitées,
- $P_x(l,p)$ est l'occurrence normalisée également appelée probabilité de présence d'huile au pixel (l,p).

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

Où :

- $S_e(l,p)$, $S_s(l,p)$ et $S_p(l,p)$ sont les occurrences de présence d'huile détectées sur un pixel par photo-interprétation des nappes naturelles (*oil seepages*), pollution de bateaux (*oil spill ships*) et pollution de plateformes (*oil spill platforms*) respectivement,
- (l,p) sont les coordonnées (l,p) représentant les numéros des lignes et des colonnes de l'image,
- O(l,p) sont les occurrences d'observation telles qu'elles apparaissent dans les empreintes au sol des images Envisat ASAR WSM traitées.

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

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

Ainsi, on note \hat{A}_x , la surface moyenne couverte en pétrole d'origine X dans le golfe de Guinée entre 2002 et 2012. Cette surface moyenne est donnée par l'équation 4.

$$A_x = \sum_{GG}^l \sum_{GG}^p (P_x(l,p) \times A(l,p)) \approx \sum_{GG}^l \sum_{GG}^p (P_x(l,p)) \times \bar{A} \quad (\text{eq. 4})$$

Où :

- A(l,p) est l'aire du pixel (l,p),
- \bar{A} est la surface moyenne d'un pixel. La variation de la surface du pixel (75 m x 75 m) est inférieure à 2.5 % sur le golfe de Guinée.

Pour une année Y donnée, la surface moyenne recouverte d'huile d'origine X ($\hat{A}_{x,Y}$) est donnée par l'équation 5.

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

Où :

- $P_{x,Y}(l,p)$ est la probabilité de présence d'huile d'origine X pour une année donnée Y 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 l'équation 6.

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

4.5. Fraction moyenne couverte par l'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 ($P_{X,Y,EEZ}$) 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.

$$P_{X,Y,EEZ} = \frac{A_{X,Y,EEZ}}{A_{EEZ}} \quad (\text{eq. 7})$$

5. Résultats et discussion

5.1. Répartition spatiale des nappes d'huile dans le golfe de Guinée

L'analyse spatio-temporelle sur le Golfe de Guinée a permis la photo-interprétation de **18 063** nappes d'hydrocarbures. Sur ces 18 063 nappes identifiées, deux classes de pollutions d'origine minérale *oil slicks* ont été détectées. Ce sont d'une part les pollutions d'origine anthropique (provenant des plateformes *oil spill platforms* et des déballastages récurrents *oil spill ships*, et d'autre part des résurgences naturelles *oil seepages* qui sont des témoins de la présence de réservoir d'hydrocarbures dans la sub-surface du Golfe de Guinée. La figure 6 représente l'*hyperlook* d'un *oil spill platform* rencontré près des côtes Nigériennes.

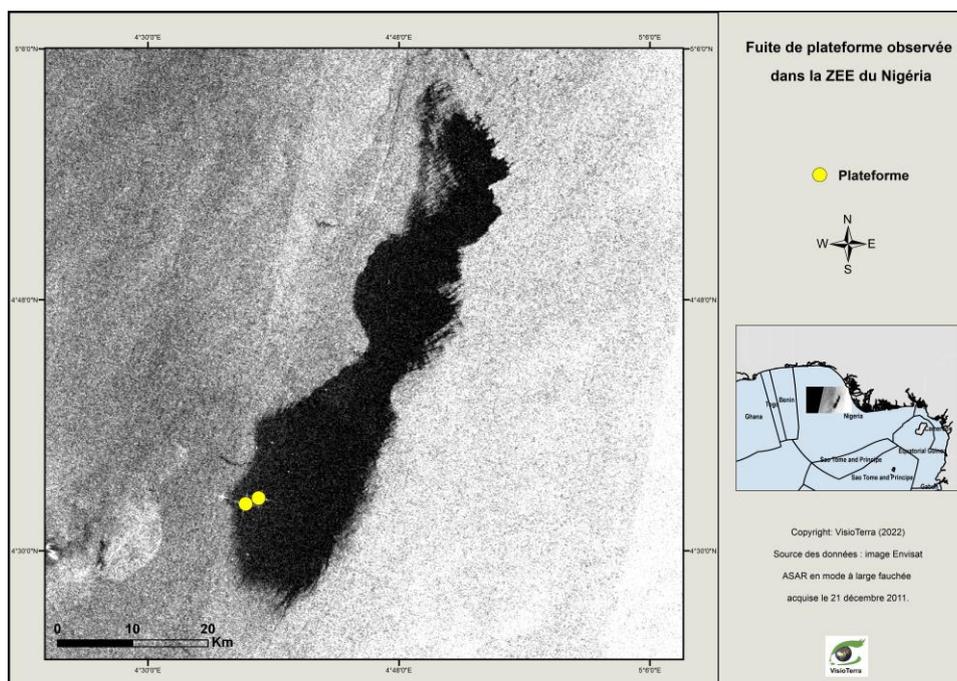


fig. 6 – Fuite de plateforme observée dans la ZEE du Nigéria. Les plateformes sont représentées par les points jaunes
<http://visioterra.org/ViWeb/hyperlook/504c7208cc184c12b42ed036bc9912f3>.

La figure 7 illustre la répartition spatiale des **18063** nappes d'hydrocarbures qui ont été détectées puis cartographiées dans le Golfe de Guinée sur la période 2002-2012. les fig. 8, fig. 9, et fig. 10 montrent respectivement les cartes de densité des suintements naturels d'huile, des déversements des navires et des déversements des plateformes.

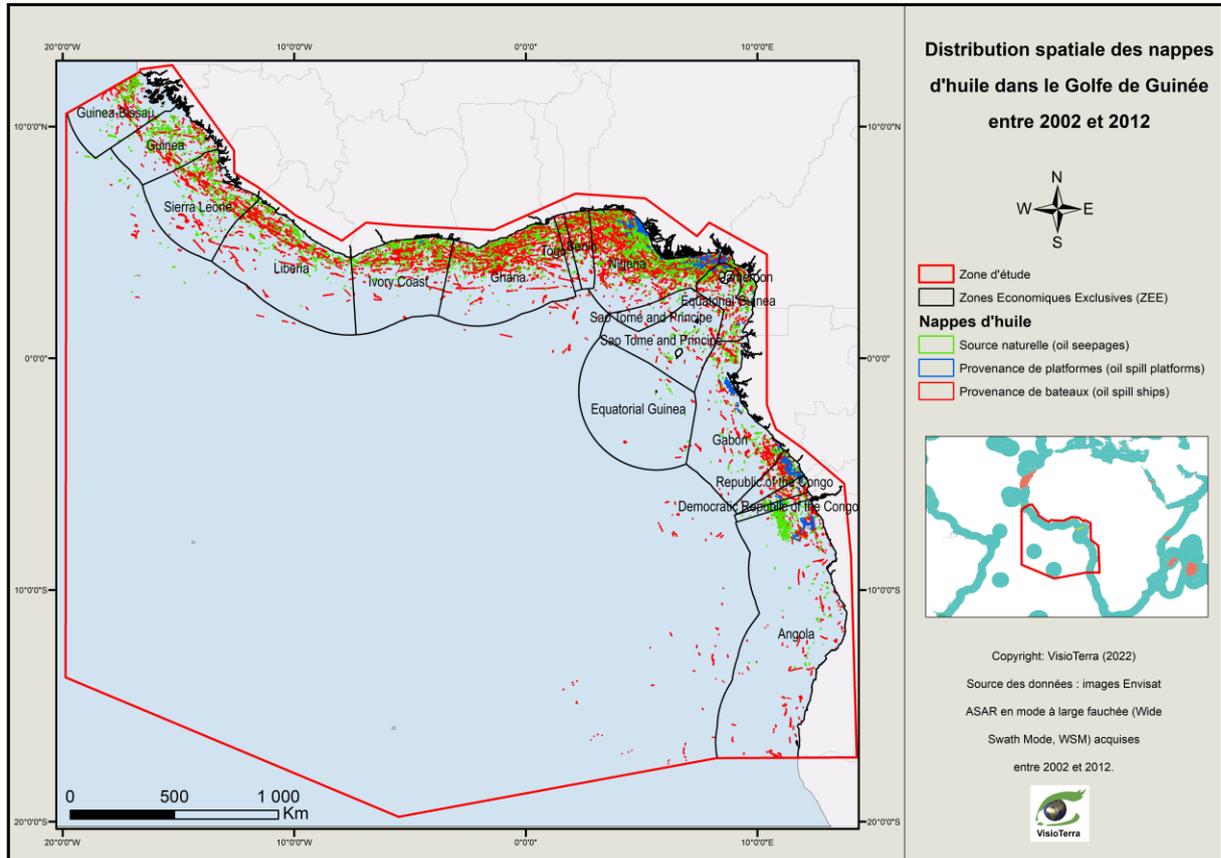


fig. 7 - Répartition spatiale des nappes d'huile dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

La fig. 8 montre que les suintements d'huile sont répartis sur l'ensemble des ZEE du Golfe de Guinée. Cette quantité importante de suintements d'huile pourrait s'expliquer en partie par sa géologie résultant de l'ouverture du domaine sud-atlantique initiée au Crétacé inférieur et par l'apport sédimentaire important du delta du Niger.

La proximité des principales voies maritimes avec les côtes contribue à la concentration des rejets en ces lieux. Ce phénomène est particulièrement remarqué le long des côtes du Nigeria qui est l'une des principales routes maritimes et occupe une place dans la piraterie maritime (voir fig. 9). Ainsi, les déversements de navires y sont importants, malgré la convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL 73/78), entrée en vigueur en 1983. Les opérations de déversement illégal comprennent le déballastage et le nettoyage des moteurs de navires.

Des plateformes pétrolières offshore ont été trouvées tout le long des côtes des ZEE des principaux pays producteurs de pétrole (Nigeria, Angola, République du Congo, Ghana...) dans le golfe de Guinée (voir fig. 10). Les déversements d'hydrocarbures provenant de plateformes qui ont été observés dans notre étude sont très bien corrélés avec les installations offshore.

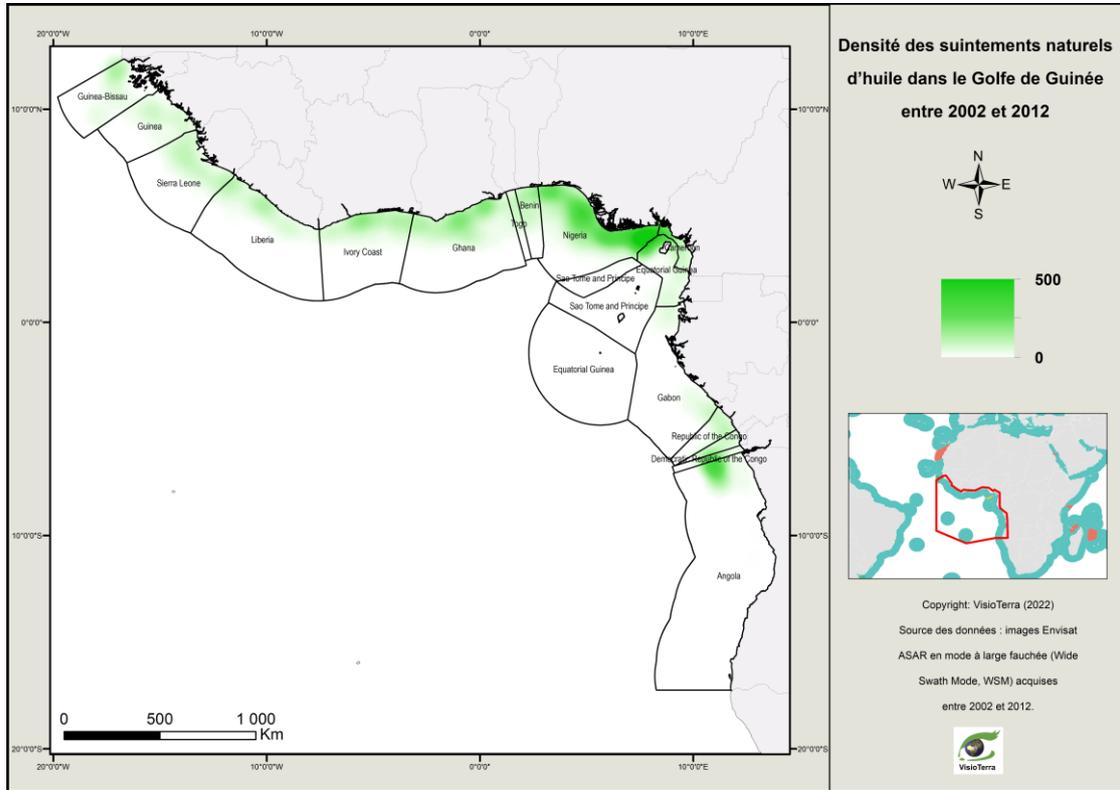


fig. 8 - Carte de densité des suintements naturels d'huile dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

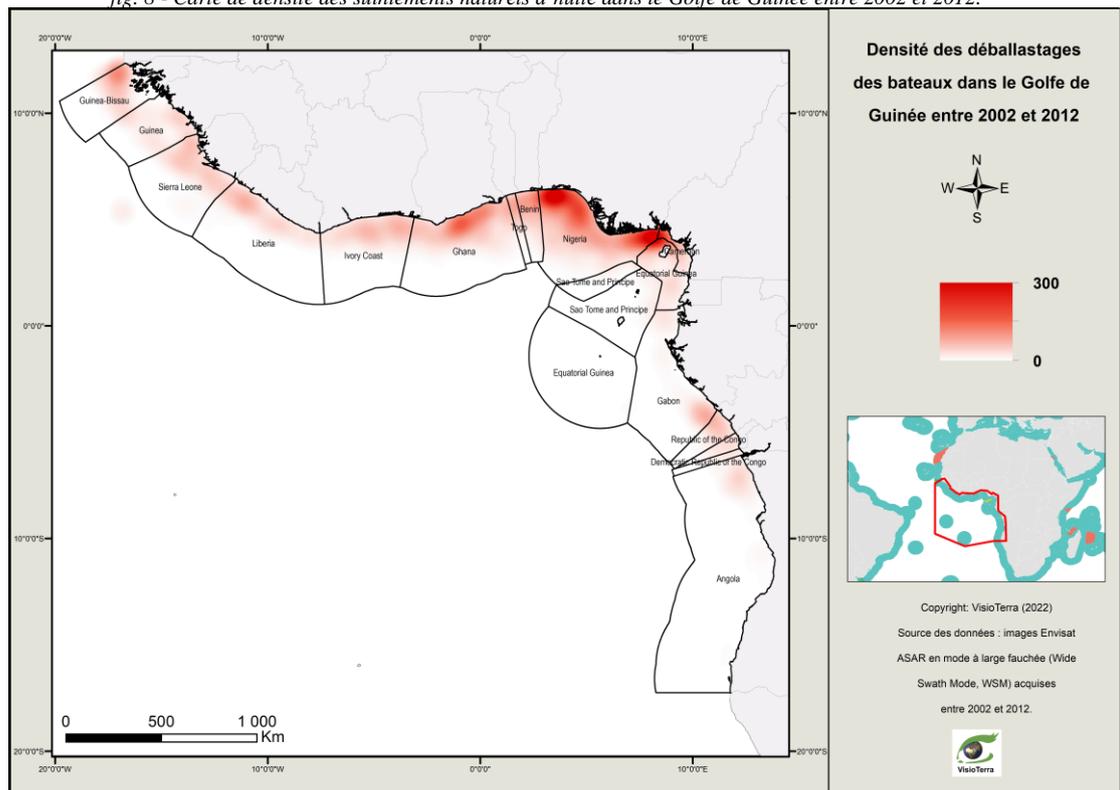


fig. 9 - Carte de densité des déballastages des bateaux dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

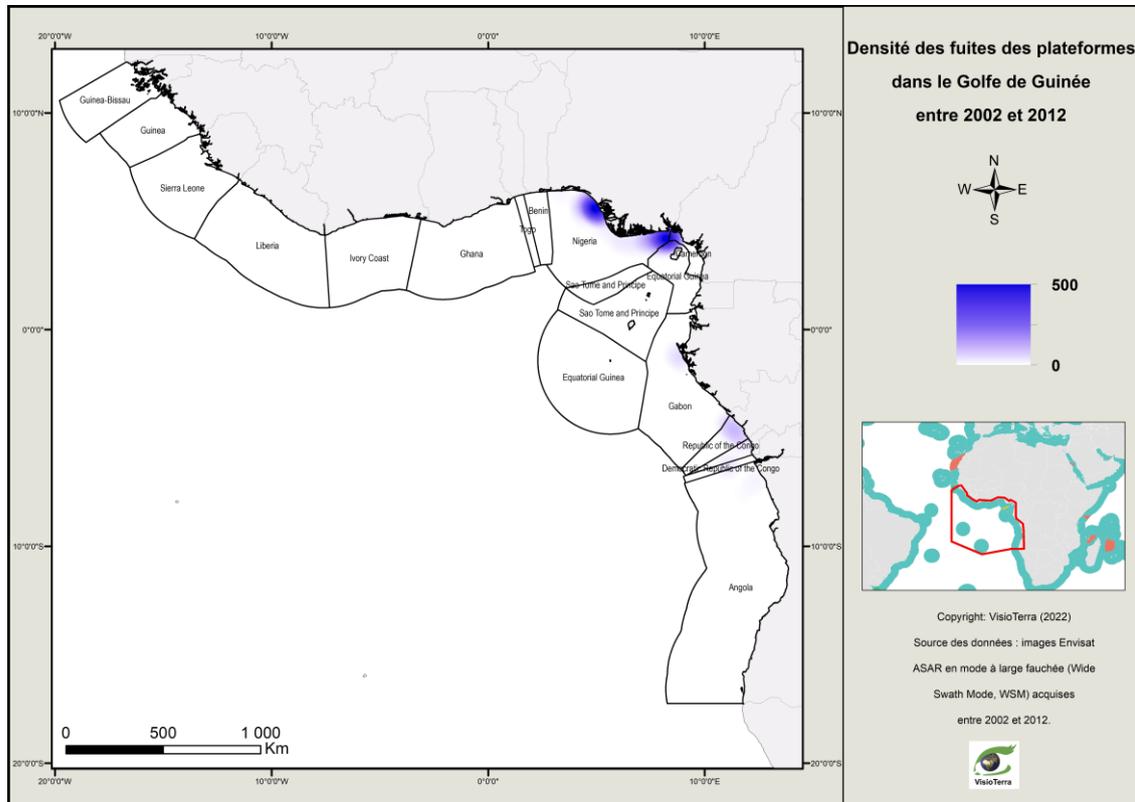


fig. 10 - Carte de densité des fuites de plateformes dans le Golfe de Guinée entre 2002 et 2012.

5.2. La superficie moyenne couverte par l'huile ($\hat{A}_{X,Y,ZEE}$)

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

La fig. 11 montre la superficie moyenne couverte par l'huile dans le Golfe de Guinée par année. On peut remarquer que :

- la superficie moyenne couverte par l'huile d'origine naturelle (oil seeps) reste plus ou moins stable sur tout le Golfe de Guinée durant la période 2002-2012,
- la superficie moyenne couverte par l'huile en provenance des plateformes pétrolières (oil spill platforms) semble avoir connu une légère augmentation durant l'année 2008 puis un retour à la normale en 2009 jusqu'à la fin de la période d'étude.
- la superficie moyenne couverte par l'huile en provenance des bateaux (oil spill ships) semble avoir connu une augmentation qui a commencé en 2004 avec un pic entre 2007 et 2008 puis une baisse en 2009 et reste stable jusqu'à la fin de la période d'étude.

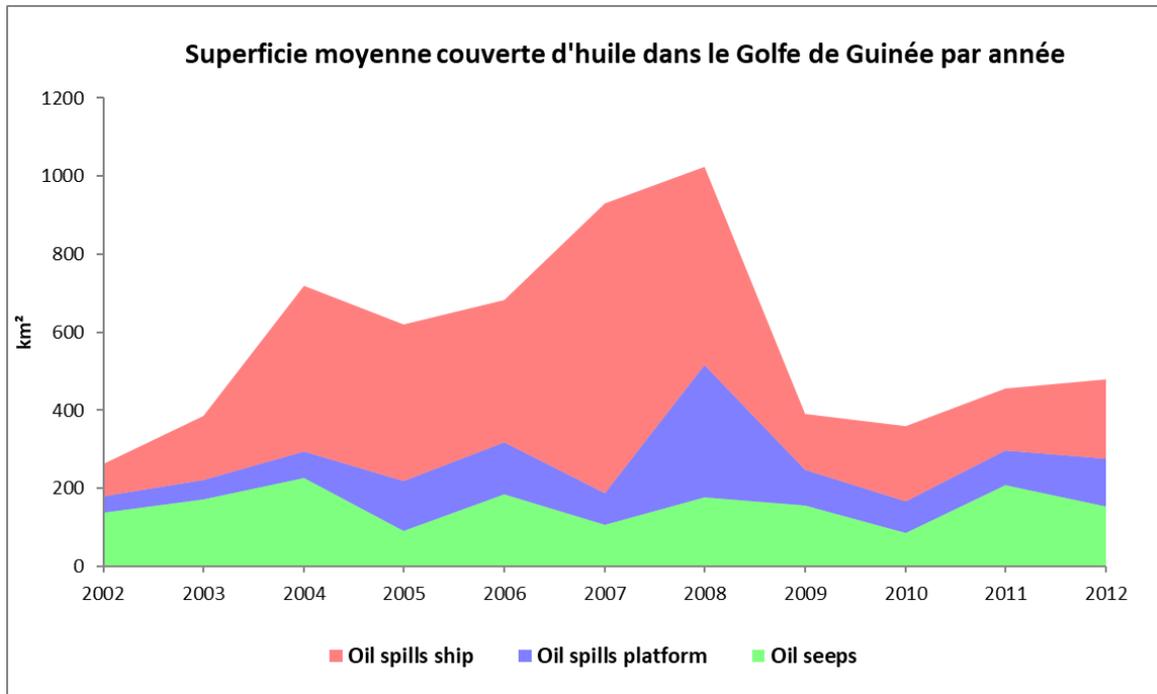


fig. 11 - Superficie moyenne couverte d'huile dans le Golfe de Guinée par année ($\hat{A}_{x,y}$).

5.2.2. Superficie moyenne couverte d'huile par ZEE de pays ($\hat{A}_{x,y,EEZ}$)

La fig. 12 montre la superficie moyenne couverte d'huile par ZEE de pays entre 2002 et 2012. La fig. 13 montre la superficie moyenne couverte d'huile par ZEE de pays par année. On peut noter que les ZEE les plus polluées sont le Nigeria suivi de l'Angola, de la République du Congo et du Cameroun.

L'analyse par ZEE montre que la diminution des pollutions marines observée entre 2008 et 2009 (fig. 11) est régie par les grands pays producteurs de pétrole : Angola, Nigeria et République du Congo (fig. 13).

La baisse de la superficie moyenne couverte par l'huile des plateformes et des navires peut s'expliquer par la crise économique de 2008. En effet, la crise mondiale de 2008 avait entraîné la chute des prix du pétrole induisant un déficit dans le budget 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).

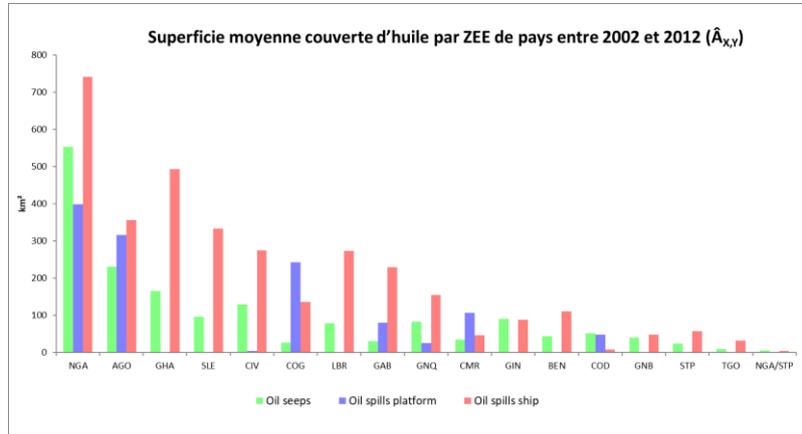


fig. 12 - Superficie moyenne couverte d'huile par ZEE de pays entre 2002 et 2012.

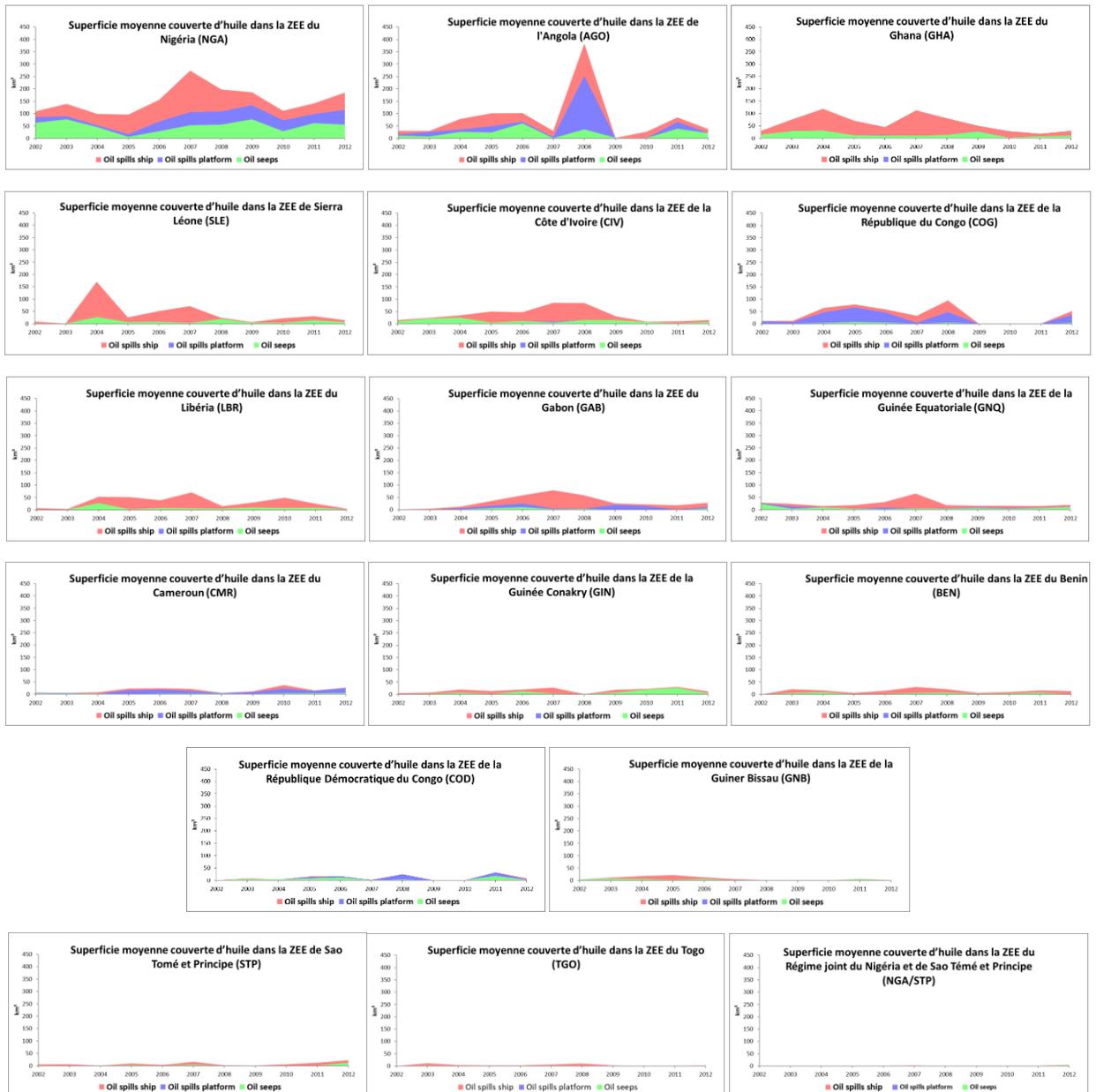


fig. 13 - Superficie moyenne couverte d'huile par ZEE de pays par année.

5.3. Fraction moyenne couverte par le pétrole par ZEE ($\widehat{P}_{X,Y,EEZ}$)

La fig. 14 montre la fraction moyenne couverte par l'huile par les ZEE des pays entre 2002 et 2012. La fig. 15 montre la fraction moyenne couverte par l'huile par ZEE des pays par année. La fraction moyenne du pays couverte par l'huile qui divise la surface moyenne couverte par l'huile par la surface de la ZEE du pays (eq.7) donne une idée de la probabilité moyenne à être couverte par l'huile par ZEE. Ainsi, plus la fraction moyenne est grande, plus la zone peut être couverte. On peut voir que la probabilité qu'une pollution (bateau/plateforme) se produise est élevée pour la République du Congo, le Cameroun et le Nigeria tandis que la probabilité qu'un suintement naturel d'huile se produise est élevée pour la République démocratique du Congo, le Nigeria et le Cameroun.

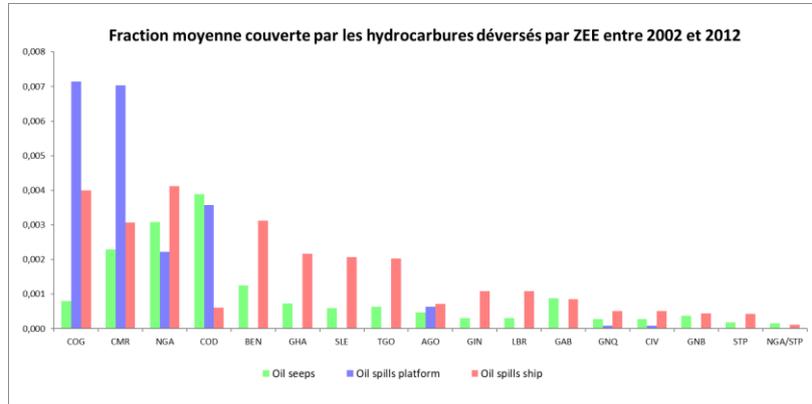
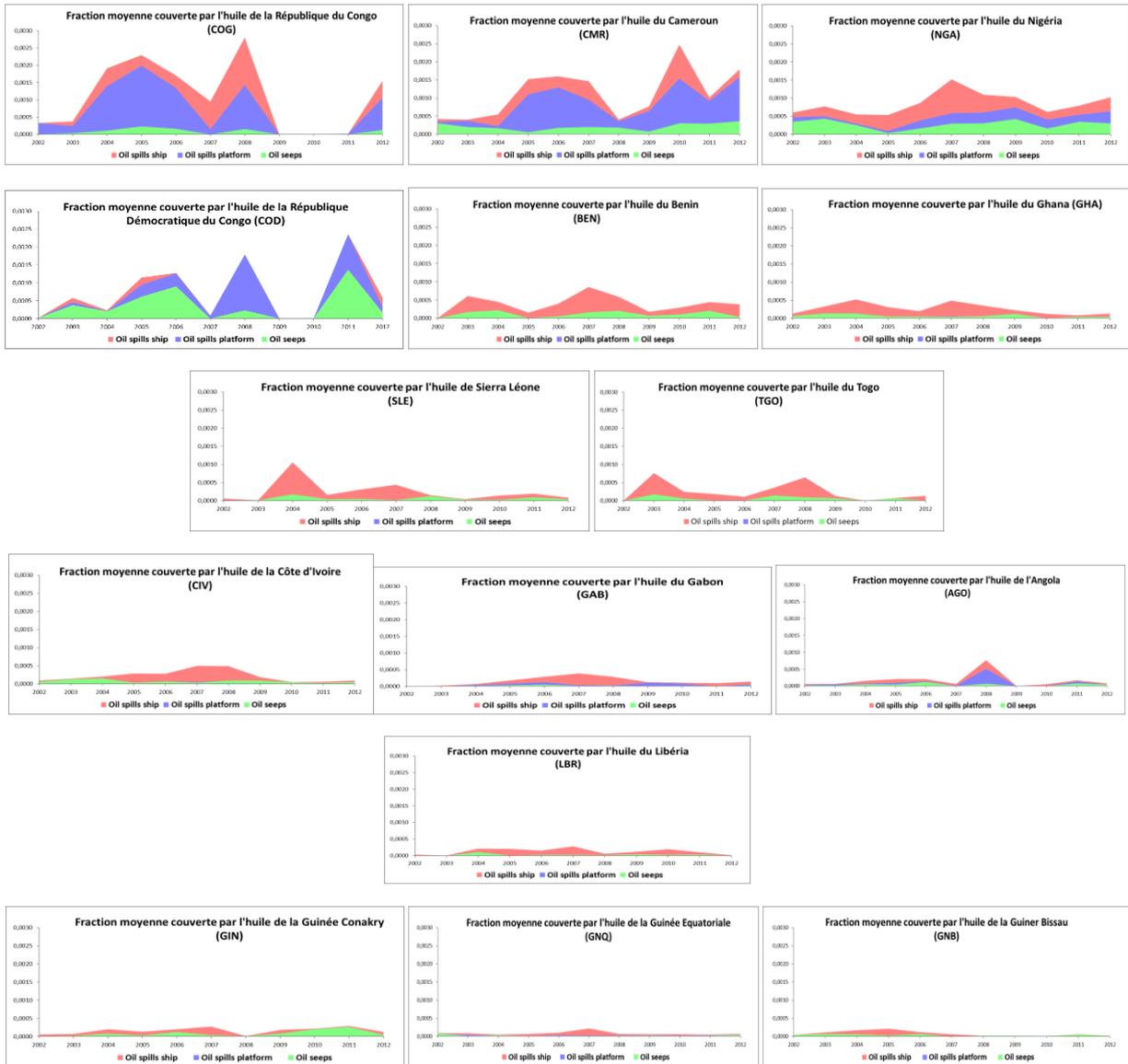


fig. 14 - Fraction moyenne couverte par les hydrocarbures déversés par ZEE entre 2002 et 2012.



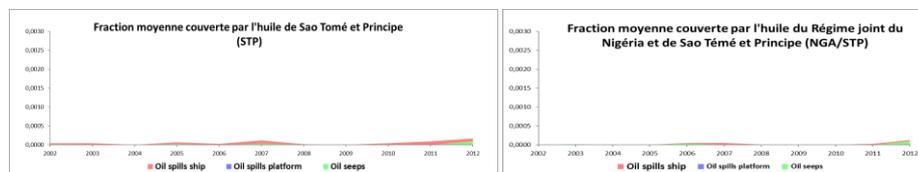


fig. 15 - Fraction moyenne couverte par les hydrocarbures par année.

6. Conclusion et perspectives

Une base de données inédite sur les marées noires a été générée sur la ZEE du Golfe de Guinée à partir des 10 années d'acquisitions d'images SAR en bande C par ASAR en mode large fauchée (150 m de résolution spatiale) contenues dans l'archive 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 aux routes maritimes le long des côtes des 17 ZEE du golfe de Guinée tandis que les déversements d'hydrocarbures provenant 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 surface moyenne couverte par le pétrole entre 2008 et 2009. Cette diminution est probablement due au ralentissement économique mondial après 2008.

La surveillance des suintements naturels et des déversements d'hydrocarbures bénéficiera de la mission Sentinel-1, lancée en 2014, en raison de sa résolution spatiale plus élevée (10 m), de son échantillonnage temporel (5 jours) 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.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ESA (Agence Spatiale Européenne) pour avoir fourni les scènes radar utilisées dans cette étude.

REFERENCES

- Adelana, S., Adeosun, T., 2011. 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>
- Albakjaji, M., 2010. La pollution de la mer méditerranée par les hydrocarbures liée au trafic maritime.
- Alpers, W., Holt, B., Zeng, K., 2017. 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>
- Bagby, S.C., Reddy, C.M., Aeppli, C., Fisher, G.B., Valentine, D.L., 2017. Persistence and biodegradation of oil at the ocean floor following *Deepwater Horizon*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, E9–E18. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610110114>
- Brekke, C., Solberg, A.H.S., 2008. Classifiers and Confidence Estimation for Oil Spill Detection in ENVISAT ASAR Images. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 5, 65–69. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.907174>
- Brekke, C., Solberg, A.H.S., 2005. Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 95, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>
- Caruso, M., Migliaccio, M., Hargrove, J., Garcia-Pineda, O., Graber, H., 2013. Oil Spills and Slicks Imaged by Synthetic Aperture Radar. *Oceanography* 26. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.34>

Chalghmi, H., 2015. Etude de la pollution marine par les hydrocarbures et caractérisation de leurs effets biochimiques et moléculaires sur la palourde de *Ruditapes* sp.

Chang, L., Tang, Z.S., Chang, S.H., Chang, Y.-L., 2008. A region-based GLRT detection of oil spills in SAR images. *Pattern Recognit. Lett.* 29, 1915–1923. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.05.022>

Del Frate, F., Latini, D., Pratola, C., Palazzo, F., 2013. PCNN for automatic segmentation and information extraction from X-band SAR imagery. *Int. J. Image Data Fusion* 4, 75–88. <https://doi.org/10.1080/19479832.2012.713398>

Del Frate, F., Petrocchi, A., Lichtenegger, J., Calabresi, G., 2000. Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 2282–2287. <https://doi.org/10.1109/36.868885>

Espedal, H.A., 1999. Satellite SAR oil spill detection using wind history information. *Int. J. Remote Sens.* 20, 49–65. <https://doi.org/10.1080/014311699213596>

Favennec, J.-P., Copinschi, P., Cavatorta, T., Esen, F., 2003. Les nouveaux enjeux pétroliers en Afrique. *Polit. Afr.* 89, 127. <https://doi.org/10.3917/polaf.089.0127>

Fingas, M., Brown, C., 2017. A Review of Oil Spill Remote Sensing. *Sensors* 18, 91. <https://doi.org/10.3390/s18010091>

Fiscella, B., Giancaspro, A., Nirchio, F., Pavese, P., Trivero, P., 2000. Oil spill detection using marine SAR images. *Int. J. Remote Sens.* 21, 3561–3566. <https://doi.org/10.1080/014311600750037589>

Fuhrer, M., 2012. Transport maritime de produits chimiques liquides et flottants : étude expérimentale du rejet accidentel sous-marin suite à un naufrage.

Gade, M., Alpers, W., Hühnerfuss, H., Masuko, H., Kobayashi, T., 1998. 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>

Garcia-Pineda, O., MacDonald, I., Zimmer, B., 2008. Synthetic Aperture Radar Image Processing using the Supervised Textural-Neural Network Classification Algorithm, in: *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Presented at the IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Boston, MA, USA, p. IV-1265-IV-1268. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779960>

Jackson, C.R., Apel, J.R., United States (Eds.), 2004. Synthetic aperture radar: marine user's manual. U.S. Dept. of Commerce : National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.

Jafarzadeh, H., Mahdianpari, M., Homayouni, S., Mohammadimanesh, F., Dabboor, M., 2021. 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>

Jatiaux, R., Dhont, D., Loncke, L., Dubucq, D., 2017. 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>

Johannessen, O.M., Sandven, S., Jenkins, A.D., Durand, D., Pettersson, L.H., Espedal, H., Evensen, G., Hamre, T., 2000. 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)

Kanaa, T.F.N., Tonye, E., Mercier, G., Onana, V.P., Ngono, J.M., Frison, P.L., Rudant, J.P., Garello, R., 2003. 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)*. Presented at the IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium., IEEE, Toulouse, France, pp. 2750–2752. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294573>

Khanna, S., Santos, M., Ustin, S., Shapiro, K., Haverkamp, P., Lay, M., 2018. Comparing the Potential of Multispectral and Hyperspectral Data for Monitoring Oil Spill Impact. *Sensors* 18, 558. <https://doi.org/10.3390/s18020558>

Kubat, M., Holte, R.C., Matwin, S., 1998. Machine Learning for the Detection of Oil Spills in Satellite Radar Images. *Mach. Learn.* 30, 195–215. <https://doi.org/10.1023/A:1007452223027>

Langangen, Ø., Olsen, E., Stige, L.C., Ohlberger, J., Yaragina, N.A., Vikebø, F.B., Bogstad, B., Stenseth, N.C., Hjermann, D.Ø., 2017.

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>

Lawrence, S.R., Munday, S., Bray, R., 2002. 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>

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., Svejksky, J., Swayze, G., Wozencraft, J., 2012. 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>

Li, Y., Hu, C., Quigg, A., Gao, H., 2019. 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>

Li, Z., Johnson, W., 2019. 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>

Liu, A.K., Peng, C.Y., Chang, S.Y.-S., 1997. Wavelet analysis of satellite images for coastal watch. *IEEE J. Ocean. Eng.* 22, 9–17. <https://doi.org/10.1109/48.557535>

Louet, J., Bruzzi, S., 1999. ENVISAT mission and system, in: *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99* (Cat. No.99CH36293). Presented at the IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99, IEEE, Hamburg, Germany, pp. 1680–1682. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772059>

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., Swayze, G., 2015. Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 8364–8380. <https://doi.org/10.1002/2015JC011062>

Marghany, M., 2015. 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>

Marghany, M., 2001. RADARSAT automatic algorithms for detecting coastal oil spill pollution. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 3, 191–196. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85011-X](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85011-X)

Mercier, G., Girard-Ardhuin, F., 2006. Partially Supervised Oil-Slick Detection by SAR Imagery Using Kernel Expansion. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 2839–2846. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.881078>

Mfewou, A., Tchekote, H., Lemouogue, J., 2018. 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>

Mikidadu, M., 2018. Oil Production and Economic Growth in Angola. *Int. J. Energy Econ. Policy* 8, 127–131.

Miranda, N., Rosich, B., Meadows, P.J., Haria, K., Small, D., Schubert, A., Lavalle, M., Collard, F., Johnsen, H., Monti-Guarnieri, A., D'Aria, D., 2013. The Envisat ASAR mission: A look back at 10 years of operation. <https://doi.org/10.5167/UZH-96146>

NAE-NRC, 2012. Macondo Well Deepwater Horizon Blowout: Lessons for Improving Offshore Drilling Safety. National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/13273>

Najoui, Z., 2017. 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.

Najoui, Z., Riazanoff, S., Deffontaines, B., Xavier, J.-P., 2018a. 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. Pet. Geol.* 91, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.12.035>

Najoui, Z., Riazanoff, S., Deffontaines, B., Xavier, J.-P., 2018b. A Statistical Approach to Preprocess and Enhance C-Band SAR Images in Order to Detect Automatically Marine Oil Slicks. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 56, 2554–2564. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2760516>

Ngodi, E., 2005. Gestion des ressources pétrolières et développement en Afrique.

Okafor-Yarwood, I., 2018. 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>

Ovadia, J.S., 2016. *The petro-developmental state in Africa: making oil work in Angola, Nigeria and the Gulf of Guinea*. Hurst & Company, London.

Pinkston, F.W.M., Flemings, P.B., 2019. 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>

Reuscher, M.G., Baguley, J.G., Montagna, P.A., 2020. 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>

Scheren, P.A., Ibe, A.C., Janssen, F.J., Lemmens, A.M., 2002. 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)

Shu, Y., Li, J., Yousif, H., Gomes, G., 2010. 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>

Solberg, A.H.S., Storvik, G., Solberg, R., Volden, E., 1999. Automatic detection of oil spills in ERS SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37, 1916–1924. <https://doi.org/10.1109/36.774704>

Suresh, G., Melsheimer, C., Korber, J.-H., Bohrmann, G., 2015. Automatic Estimation of Oil Seep Locations in Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 53, 4218–4230. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2393375>

The ENVISAT Mission and System, n.d.

Trivero, P., Biamino, W., 2010. Observing Marine Pollution with Synthetic Aperture Radar, in: Imperatore, P., Riccio, D. (Eds.), *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*. InTech. <https://doi.org/10.5772/9106>

Tull, D.M., 2008. *Oil and Politics in the Gulf of Guinea* by Ricardo Soares de Oliveira London: Hurst & Co/New York: Columbia University Press, 2007. Pp. 379. £20.00 (pb). *J. Mod. Afr. Stud.* 46, 692–694. <https://doi.org/10.1017/S0022278X08003558>

Xu, L., Shafiee, M.J., Wong, A., Li, F., Wang, L., Clausi, D., 2015. 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). Presented at the 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), IEEE, Boston, MA, USA, pp. 79–86. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2015.7301386>

Yaghmour, F., Els, J., Maio, E., Whittington-Jones, B., Samara, F., El Sayed, Y., Ploeg, R., Alzaabi, A., Philip, S., Budd, J., Mupandawana, M., 2022. 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>

Zhang, Y., Li, Y., Lin, H., 2014. Oil-Spill Pollution Remote Sensing by Synthetic Aperture Radar, in: Marghany, M. (Ed.), *Advanced Geoscience Remote Sensing*. InTech. <https://doi.org/10.5772/57477>