

Évaluation par télédétection de la pollution marine par hydrocarbures au Gabon de 2015 à 2017 : cas de Port-Gentil et Mayumba

Remote sensing assessment of marine oil pollution in Gabon from 2015 to 2017 : the case of Port-Gentil and Mayumba

Konan KE • Nziengui HSJ

Received: 08 August 2022 / Accepted: 03 November 2022 / Published online: 15 June 2023
© PASRES Abidjan Côte d'Ivoire 2023

Résumé Le Gabon occupe le 5^{ème} rang des pays producteurs de pétrole en Afrique Sub-saharienne. Près de 70 % de ses réserves exploitées se situent en milieu off-shore et il n'est pas rare d'enregistrer des déversements en hydrocarbures en milieu marin causés par cette exploitation pétrolière. Ce qui n'est pas sans conséquences pour l'écosystème marin terrestre et pour l'homme. La surveillance des pollutions peut être abordée par le biais de la Télédétection. La mission Sentinel-1A présente un potentiel pour la détection des déversements en milieu marin et l'avantage de pouvoir opérer de nuit et par temps nuageux.

Les résultats obtenus révèlent pour les façades de Port-Gentil et de Mayumba la présence de 154.65 km² de surface de pollution en hydrocarbures dont 53 % à Port-Gentil et 47 % à Mayumba. Ces nappes de pollution proviennent à 38 % d'opérateurs non identifiés, 25,66 % de TOTAL Gabon SA, 16,61 % PERENCO Gabon SA, 11,35 %, CANADIAN Natural Resources Ltd, 6,54 % STREAM Oil Holding, 1,84 % VAALCO Gabon Inc. Cette étude a confirmé la présence des nappes d'hydrocarbures issues de plateformes pétrolières dans les façades de Port-Gentil et de Mayumba pour la période de 2015 à 2017, et aussi la limite de Sentinel-1A dans la détection des hydrocarbures.

Mots clés : Télédétection, Hydrocarbure, Pollution marine, Gabon, Port-Gentil, Mayumba.

Abstract Gabon is the fifth largest oil producer in Sub-Saharan Africa. Nearly 70% of its exploited reserves are in the offshore, it is not uncommon to record oil spills in the marine environment caused by this oil exploitation. This is not without consequences for the terrestrial marine ecosystem, and for man. Pollution monitoring can be addressed through Remote Sensing. The Sentinel-1A mission has the potential to detect spills in the marine environment and the advantage of being able to operate at night and in cloudy conditions. The results obtained reveal for the facades of Port-Gentil and Mayumba the presence of 154.65 km² of surface oil pollution including 53% in Port-Gentil and 47% in Mayumba. Unidentified, 25.66% of TOTAL Gabon SA, 16.61% PERENCO Gabon SA, 11.35%, CANADIAN Natural Resources Ltd, 6.54% STREAM Oil Holding, 1.84% VAALCO Gabon (Etame) Inc. This study confirmed the presence of oil slicks from oil platforms in the facades of Port-Gentil and Mayumba for the period 2015 to 2017, and also the boundary of Sentinel-1A in the detection of hydrocarbons which represents an obstacle for the monitoring, assessment of marine oil pollution and the identification of polluters with a view to safeguarding the marine and terrestrial ecosystem.

Key words: Remote sensing, oil, Marine pollution, Gabon, Port-Gentil, Mayumba.

Introduction

Le Gabon occupe le 5^{ème} rang des producteurs pétroliers en Afrique Sub-saharienne, après le Nigeria, l'Angola, le Congo (Brazzaville) et la Guinée Équatoriale. Selon la BP Statistical (2014), le Gabon dispose de 2 milliards de barils de réserves prouvés et 70 % des réserves off-shore exploitées se situent en milieu.

Au cours de ces exploitations off-shore il, y a des déversements d'hydrocarbures qui entraînent la pollution du milieu marin et des zones côtières qui sont des milieux d'interface entre les écosystèmes terrestres et marins. La pollution des côtes par les hydrocarbures détruit les habitats naturels tels que les mangroves, les herbiers marins, les frayères en asphyxiant les poissons et en détruisant leurs œufs.

Les mangroves sont sensibles au pétrole directement par contamination des racines et des feuilles des palétuviers, entraînant une défoliation, une fanaison, et une réduction du succès de germination des graines. Les composés toxiques (fractions aromatiques à faible température ébullition) attaquent en profondeur les membranes cellulaires des racines et perturbent le processus normal d'exclusion du sel provoquant ainsi un influx de sel, source de stress pour les plantes (NOAA, 2004). En effet, les palétuviers sont très sensibles à la contamination par les hydrocarbures. Le recouvrement des systèmes racinaires aériens par les hydrocarbures peut bloquer l'arrivée de l'oxygène et causer la mort des palétuviers. Aussi, les composantes toxiques des hydrocarbures perturbent les systèmes de maintien de la salinité des végétaux, ce qui affecte leur tolérance à l'eau salée. Ainsi, les organismes vivant dans les écosystèmes de mangrove peuvent subir les effets directs des hydrocarbures et à long terme, la perte de leur habitat (ITOPF, 2013).

Au niveau des animaux, lors d'une pollution par les hydrocarbures, on observe une rapide réduction en nombre et en diversité des invertébrés. Les oiseaux et les prédateurs associés subissent des dommages liés au contact direct ou par l'ingestion de nourriture contaminée. Les impacts peuvent être sérieux à long terme si des résidus de pétrole sont incorporés dans le sédiment (Commission européenne, 1998).

Lors d'un déversement d'hydrocarbures, la fraction volatile légère peut pénétrer les plantes, traverser la membrane des cellules qui sont alors détruites (Dandonneau, 1978).

Tout comme les herbiers, les zones marécageuses présentent une très grande productivité biologique. Elles exportent également des détritiques et des nutriments vers les eaux côtières adjacentes et servent de nurseries pour beaucoup d'espèces de poissons. Comme dans tous les littoraux, les hydrocarbures provoquent dans les marais un impact sur la végétation par asphyxie (pétrole lourd), par toxicité directe (pétrole léger ainsi que la stérilisation de la surface du sol) (Fingas et Brown, 1997). Aussi, les schorres qui sont « bitumés » rendent la recolonisation impossible.

Le contrôle, le suivi de la qualité des eaux côtières ainsi que la détection des nappes d'hydrocarbures est un objectif très important de la télédétection active et passive aussi bien dans les applications d'exploration que de protection de l'environnement.

Il est possible de distinguer principalement deux types de pollution marine :

- la pollution chimique causée par des hydrocarbures, des métaux tels que le plomb, le mercure ou par des solvants et différents produits destinés à l'agriculture, etc.
- la pollution thermique causée, par exemple, par des rejets d'eau plus chaude ou plus froide que le milieu environnant.

La télédétection est très bien adaptée à la détection marine en permettant la mise en évidence des phénomènes de pollution marine, en utilisant l'analyse diachronique ainsi que la délimitation des zones par degré de pollution

Les données peuvent aussi être intégrées à des modèles de dérive et peuvent faciliter la planification des efforts de contrôle et de nettoyage. Les systèmes de télédétection utilisés sont : la vidéo infrarouge et les photos aériennes, les images infrarouges thermiques, les lasers fluoromètres aéroportés, les images optiques satellitaires, et les images RSO aéroportées et satellitaires. Cependant, les capteurs RSO ont un avantage sur les capteurs optiques car ils peuvent acquérir des images durant la nuit et les journées ennuagées.

Aussi, les nappes d'hydrocarbures ne sont pas visibles sur les surfaces océaniques lorsque le contraste entre la nappe et l'eau environnante n'est pas suffisamment élevé (par exemple à faible vitesse du vent). De plus, à des vitesses de vent élevées, les nappes d'hydrocarbures ont tendance à

se diviser en petits morceaux, ce qui empêche leur détection par les capteurs RSO (Garcia-Pineda *et al.*, 2009). Diverses études ont été réalisées sur la plage de vitesse du vent qui optimise la détection des nappes d'hydrocarbures sur les images RSO. La vitesse du vent requise pour la détection des nappes d'hydrocarbures a été estimée être en dessous de 10 m/s (Fingas et Brown, 1997; Brekke et Solberg, 2005 ; Garcia-Pineda *et al.*, 2009 ; Marghany, 2014 ; Najoui , 2017).

De nombreuses études ont exploré le potentiel de la polarisation des capteurs pour la détection des nappes d'hydrocarbures (Elachi, 1988 ; Fortuny-Guasch, 2003 ; Jackson et Apel, 2004 ; Najoui *et al.*, 2017) et soulignent que la polarisation croisée (VH, HV) est considérablement moins efficace que la co-polarisation (VV, HH).

La polarisation VV donne également de meilleurs résultats que les autres types de polarisations pour la détection et la surveillance des scénarios de déversement d'hydrocarbures en milieu marin (Marghany, 2014).

De ce fait, les progrès dans la détection, la localisation, la caractérisation, la quantification, l'évolution des indices d'hydrocarbures à la surface des étendues d'eau et l'identification du pollueur sont des préalables pour toute action visant la sauvegarde des écosystèmes marins (Najoui, 2017).

C'est dans ce cadre que la présente étude est menée au Gabon.

En effet, la Loi n°011/2014 du 28 août 2014 sur réglementation du secteur des Hydrocarbures en République Gabonaise en son Art.195 portant sur les obligations environnementales et de sécurité intègrent notamment la lutte contre la pollution et la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre, les nuisances et les déchets.

En dépit de cette loi, il n'est pas rare d'enregistrer les déversements en hydrocarbure, dans la zone côtière et marine, dont les responsables restent inconnus. Cette situation interpelle les autorités et suscite une interrogation : Comment suivre et évaluer de manière efficace l'ampleur des déversements d'hydrocarbures en milieu marin ?

Cette étude a pour objectif général de faire le suivi et l'évaluation de la pollution marine en hydrocarbures pour les façades de Port-Gentil et Mayumba sur la période de 2015 à 2017.

De façon plus spécifique, il s'est agi d'estimer les surfaces d'hydrocarbures déversés chaque

année dans la Zone Economique Exclusive (ZEE) précisément dans les façades des villes de Port-Gentil et Mayumba en utilisant l'imagerie Radar SAR, classer les zones concernées par l'étude en terme de pollution en hydrocarbures par année et d'identifier les pollueurs.

Zone d'étude

Le présent travail s'appuiera sur deux villes pétrolières situées sur la façade Maritime du Gabon à savoir Port-Gentil située entre 0°47'47" de Latitude Sud et 8°46'31" E de longitude ; et Mayumba située entre 3°30'48"S de latitude et 10°39'14" E de longitude (Figure 1).

Elles font partie des régions littorales larges d'environ 50 km entre Cocobeach et les Monts de Cristal (extrémité nord, région de l'estuaire du Rio Mouni), 90 km au niveau de Libreville, 200 km au centre entre le Cap Lopez et Lambaréné, et de 7 à 25 km entre le Mayombe et le trait de côte (extrémité sud, région de la lagune Banio), d'où sa configuration en losange.

Le Gabon appartient à un domaine climatique de type équatorial, caractérisé par une chaleur constante, une hygrométrie élevée, des précipitations abondantes et fréquentes. Selon les régions, la pluviométrie varie de 1 500 à 3 000 mm d'eau par an. Les températures varient de 21 °C au sud-ouest du pays à 27 °C sur la côte et à l'intérieur du pays (Guihy et N'guetta, 2017).

Port Gentil et Mayumba appartiennent au bas-pays côtier du Gabon (Sautter, 1966), situé entre le rivage Atlantique à l'ouest et à l'est, respectivement du nord au sud, l'escarpement des Monts de Cristal qui domine la plaine de la Noya d'environ 800 m de dénivellation, les Monts de Ndjolé au centre (est de Lambaréné) et la retombée septentrionale de la chaîne du Mayombe (Figure 2).

Le pays côtier était une basse péninsule, fini-tertiaire, à lambeaux de cuirasses. Il est aujourd'hui un ensemble complexe de collines à versants convexes, de bas plateaux démantelés et de dépressions marécageuses, à altitude oscillant entre 0 et 300 mètres (Perrusset, 1983 et Pottier *et al.*, 2017).

Partout, la présence du réseau hydrographique y est remarquable et, par conséquent l'eau très souvent omniprésente (Figure 3).

La présence d'un réseau hydrographique dense témoigne d'un milieu très humide favorable aux

inondations. Cette morphologie dans la partie nord du pays est caractéristique des côtes à rias, estuaires et baies. Vasières, mangroves et forêts inondées y occupent de vastes surfaces, au sein d'un système terre-mer fait de pénétrations subtiles, de zones basses naturellement submersibles et de mouvements quotidiens des marées vers l'intérieur des terres (Figure 4).

Selon la Direction Générale de la Statistique (DGS) du Gabon, en 2021 Port-Gentil comptait 109 163 habitants et Mayumba 3 996 habitants.

À Port-Gentil, le secteur pétrolier est prédominant et constitue le poumon de l'activité économique (Guihy et N'guetta, 2017). Il se résume à l'implantation des sièges sociaux des grandes

entreprises, à l'existence d'un important réseau d'acheminement des produits pétroliers et gaziers ainsi qu'à la présence de la Raffinerie SOGARA. L'agriculture y est peu développée du fait des conditions peu favorables du sol (inondations, nappe phréatique à moins de 1 m). En dehors d'AGRIPOG qui pratiquait la culture hors sol avec des résultats mitigés, quelques petits maraîchers se sont installés dans certaines zones libres de la ville (Guihy et N'guetta, 2017).

À Mayumba, l'activité économique repose essentiellement sur la pêche et la chasse. L'agriculture itinérante (manioc, bananes et maïs), l'exploitation industrielle du bois, l'exploitation pétrolière et le tourisme y sont également pratiqués.

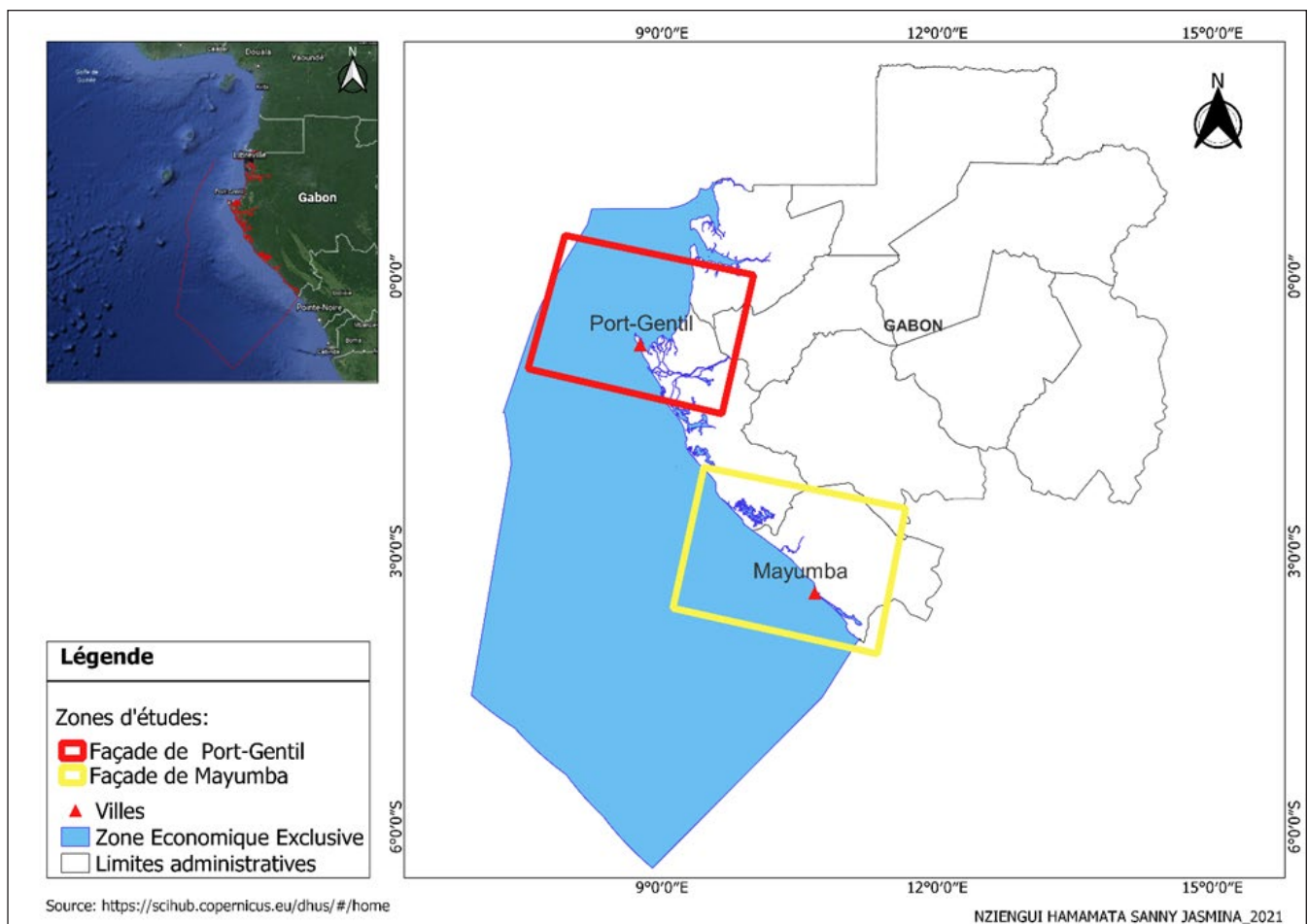


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

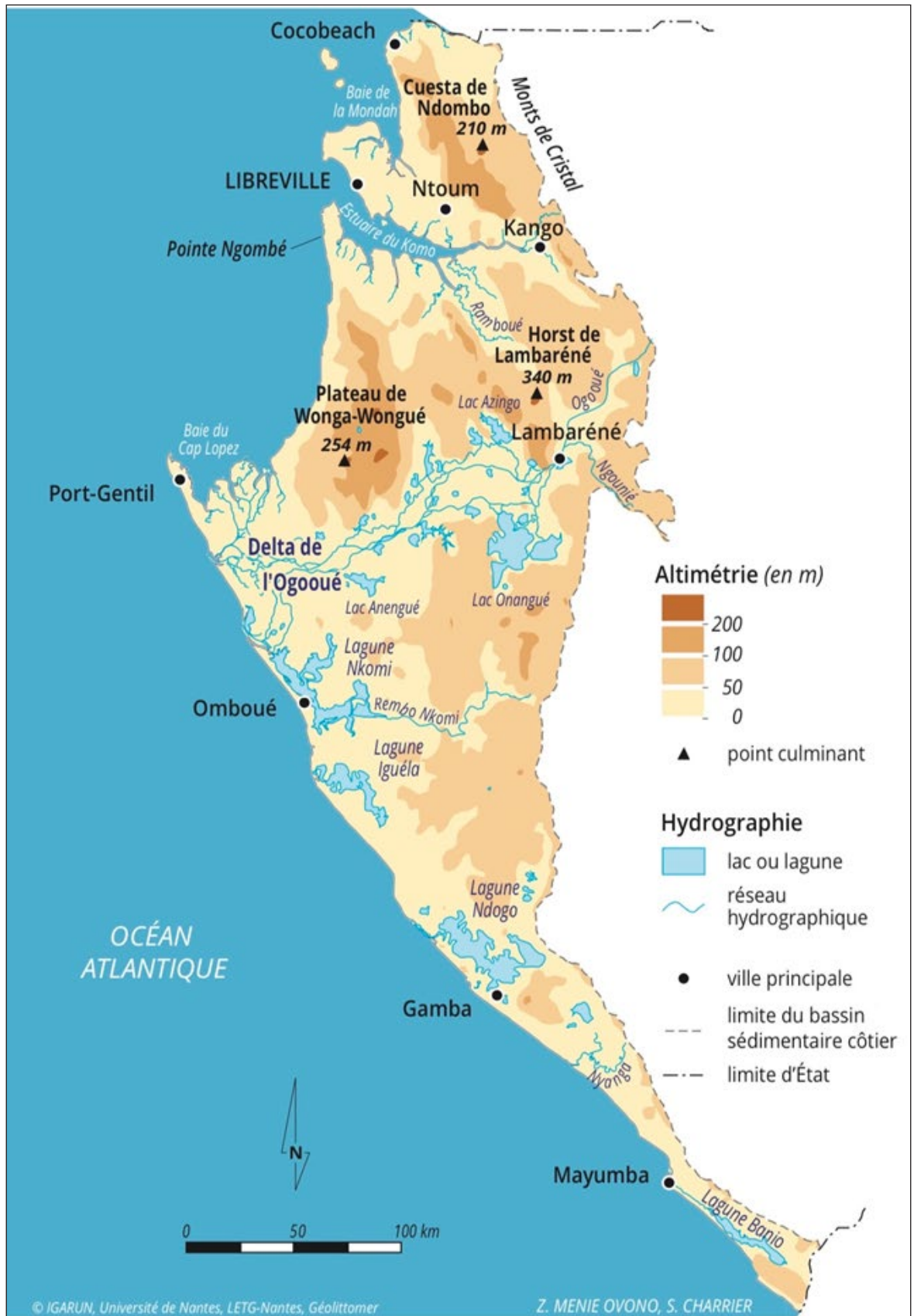


Figure 2 : Relief des régions littorales du Gabon

Source : Pottier et Ovono.(2017)

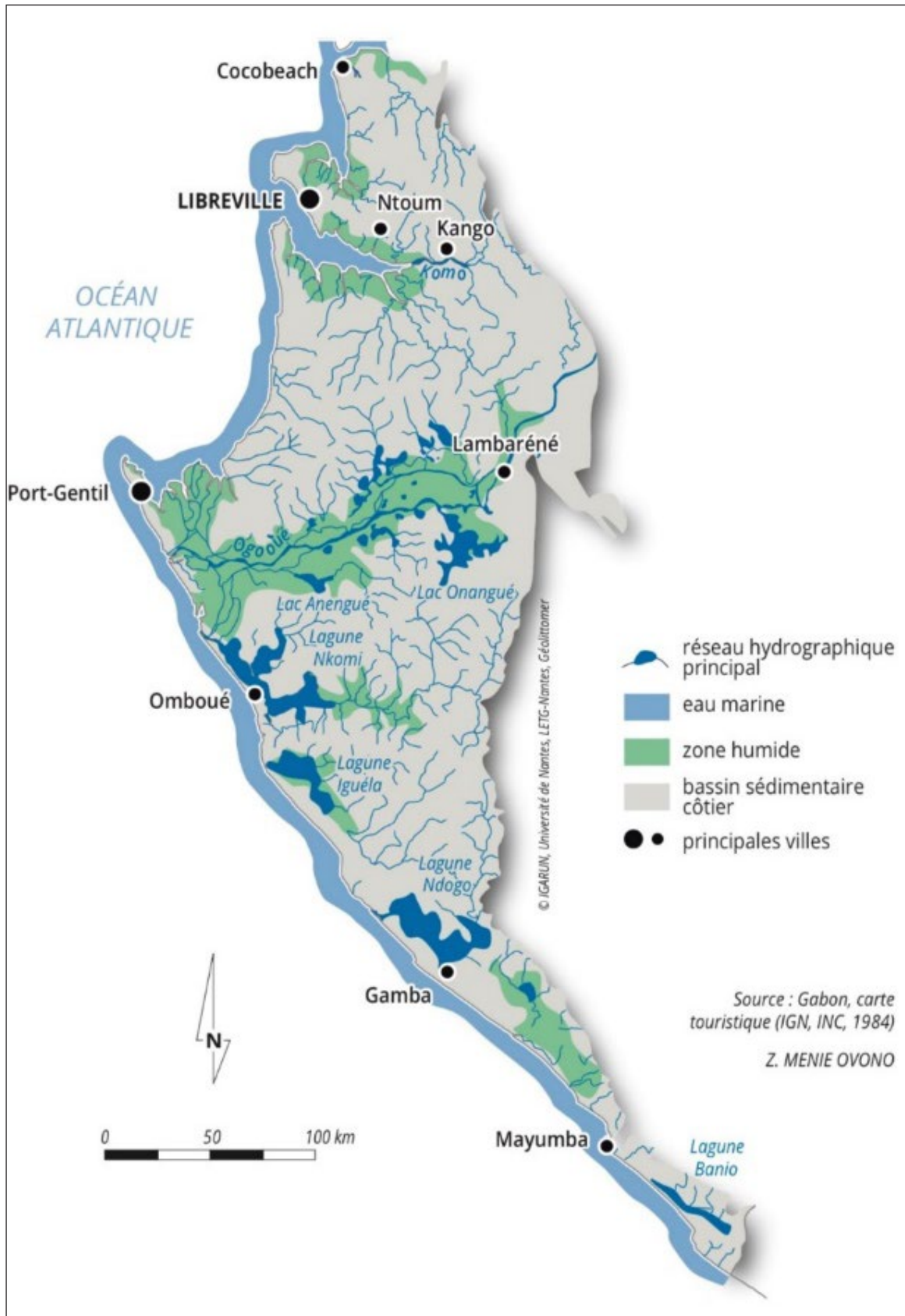


Figure 3. Contexte hydrogéomorphologique

Source : Gabon, carte touristique (IGN, INC, 1984)

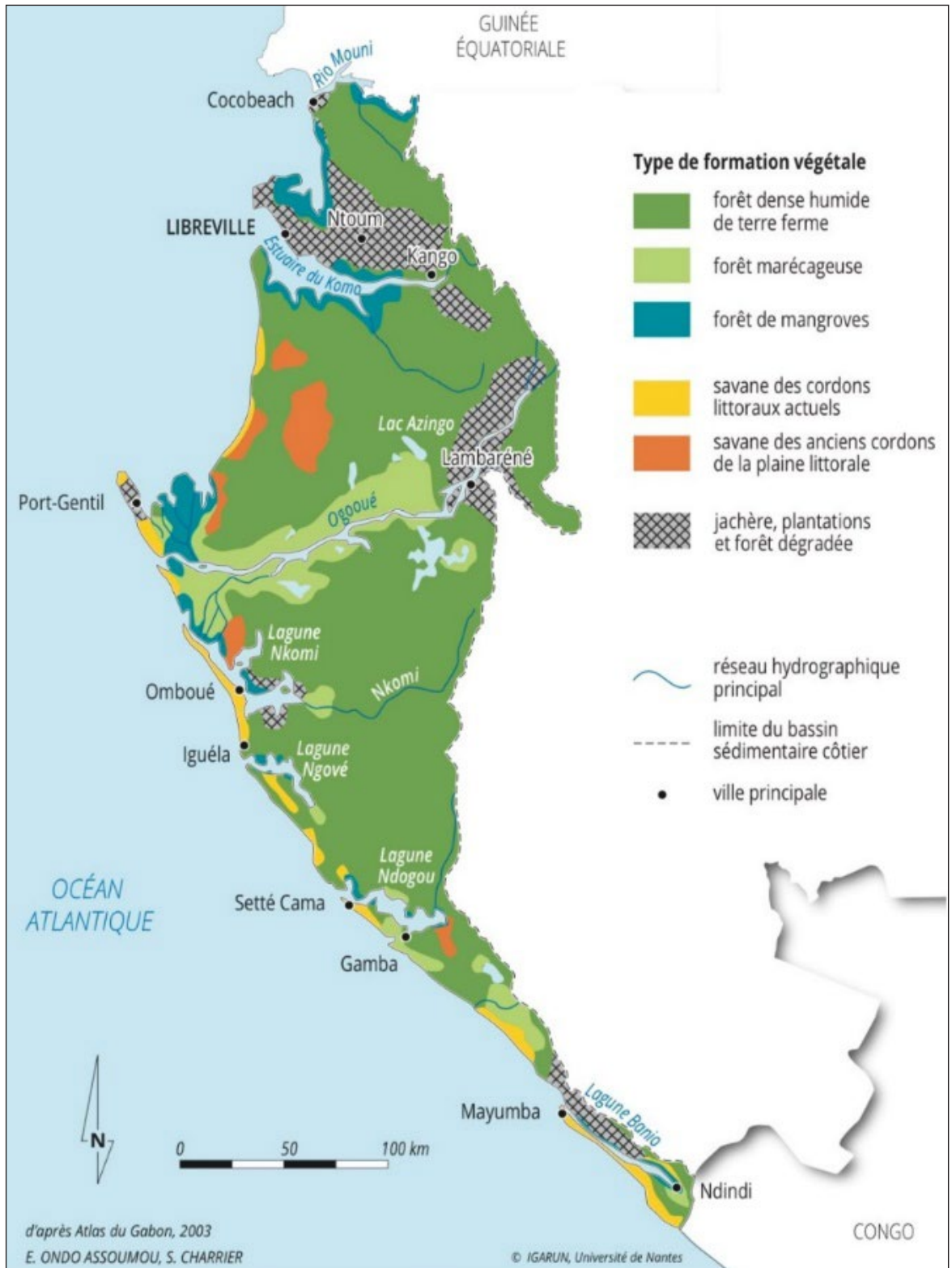


Figure 4. Les formations végétales

Source : Atlas du Gabon, 2003

Matériel et Méthodes

Matériel

La réalisation de cette étude a mobilisé du matériel composé de :

- interface en ligne des données de Sentinel-1A du Copernicus Open Access Hub <https://scihub.copernicus.eu> pour le téléchargement d'images satellitaires,
- logiciel d'application Sentinel (SNAP) utilisé pour l'identification des nappes d'hydrocarbure et l'extraction des données de vent,
- logiciel QGIS, pour la production cartographique,
- logiciel Excel pour l'analyse statistique des données collectées.

Méthodes

Les données utilisées sont essentiellement des images satellitaires de haute résolution (GRDH) détectées de la portée au sol SAR Sentinel-1 A de niveau 1. Elles ont été acquises de Janvier 2015 à Décembre 2020 avec le mode interférométrique à large fauchée (IW) et la polarisation verticale-horizontale (VV) (Tableau 1). Les données GRD de niveau 1 ont été projetées à l'aide d'une approche de modélisation terrestre ellipsoïde (Najoui, 2017). Le passage de Sentinel-1 A se fait tous les 12 jours. Pour cette étude 139 images ont été initialement collectées et après prétraitement 30 images ont été retenues.

Tableau 1 : Caractéristiques des images SAR Sentinel-1

Caractéristiques	Données
Mission	Sentinel-1 A
Date d'acquisition	Janvier 2015 à Décembre 2020
Mode d'acquisition	IW
Direction du passage	Ascendant
Polarisation	VH, VV
Type de produit	GRDH
Nom de l'instrument	Radar à synthèse d'ouverture (bande C)
Résolution	10 m

Source : <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Traitement des données

Le traitement des données se résume au prétraitement des images et à la cartographie des plateformes pétrolières, des nappes d'hydrocarbures et de la direction du vent.

Les prétraitements sont des opérations normalement requises avant l'analyse principale

et l'extraction de l'information sur les images. En effet, la large couverture que le capteur de SAR peut fournir est d'une grande importance, que les déversements de pétrole peuvent couvrir des kilomètres, ainsi que d'autres informations contextuelles, telles que la région côtière ou les plateformes pétrolières, peuvent être incluses dans l'image acquise (Brekke et Solberg, 2005).

Les opérations de prétraitement ont été réalisées avec le logiciel SNAP sur la bande ouverture d'Amplitude VV.

La première opération du prétraitement a été la calibration des images. En effet, afin de convertir l'intensité en un coefficient de rétrodiffusion exploitable et de pouvoir comparer les images acquises à des dates différentes, entre elles, une calibration radiométrique a été appliquée sur les images. La calibration permet de corriger l'intensité du signal selon les caractéristiques du capteur et de l'angle d'incidence local.

La deuxième opération est le masque de Terre et mer (land/sea mask) qui consiste à masquer les zones terrestres pour éviter les fausses détections de cibles sur mer.

La troisième opération concerne la correction géométrique « Terrain Correction » qui permet d'orthorectifier l'image pour la corriger des effets de distorsion survenus lors de l'acquisition de l'image. Cette opération a permis de géoréférencer les images en les projetant dans un référentiel terrestre géographique (WGS 1984) et cartographique (UTM 32S). Elle a permis à la fois de reprojeter les images dans le bon sens, d'attribuer une projection et de corriger les effets liés au terrain.

La dernière étape des prétraitements Sentinel-1 a consisté à convertir les coefficients de rétrodiffusion (x) en décibels dB en utilisant la transformation logarithmique suivante : $x \text{ db} = 10 \log(x)$. À la fin de la chaîne de prétraitements, on obtient un produit standardisé sur lequel les traitements peuvent être effectués.

La cartographie des plateformes pétrolières et des nappes d'hydrocarbure a été réalisée à partir d'une interprétation visuelle. Elle s'est faite en examinant l'imagerie numérique sur un écran d'ordinateur et s'est limitée à la seule image issue des bandes Sigma0_VV_DB. L'interprétation a consisté à distinguer les entités sur l'image selon les caractéristiques de chacune d'elle. Cependant, une grande attention a été portée sur les entités correspondant aux plateformes pétrolières et aux nappes d'hydrocarbure. Ces entités ont été par la suite extraites des images à travers une numérisation manuelle des formes sous QGIS.

La cartographie de la direction du vent a été réalisée à partir des images satellitaires Sentinel-1 A. Elle a consisté en un prétraitement réalisé sur SNAP et à la construction d'un champ de direction du vent interpolé à partir de plusieurs mesures locales. La technique retenue est basée sur le principe d'interpolation bi-harmonique spline (Sandwell, 1987). Ainsi, la direction du vent est extraite à l'emplacement de chaque pixel de 400 mètres des images Sentinel-1.

Résultats

Prétraitements des images

Les prétraitements ont porté sur les 139 images Sentinel-1A de 2015 à 2017 initialement collectées et ont permis de sélectionner 30 images jugées utiles pour la détection des nappes d'hydrocarbures. La calibration radiométrique, la correction géométrique et le masque de Terre et Mer (land/sea mask) appliqués aux images ont permis d'obtenir des images exploitables (Figure 5). Cette figure montre une image acquise le 30 Juin 2015 à 0 :06 :43 UTC au-dessus

de la façade de Mayumba a été choisie pour l'estimation de la direction du vent dans cette étude.

La méthodologie générale utilisée s'est appuyée sur l'acquisition des données via Copernicus Open Access Hub, le prétraitement avec la plateforme d'application Sentinel (SNAP), le traitement sur QGIS (digitalisation et mise en forme cartographique).

de la ZEE du Gabon. La chaîne de prétraitement appliquée permet d'obtenir une image qui peut être traitée afin d'extraire les plateformes et les nappes d'hydrocarbures (Figure 6). Sur l'image, il est possible d'identifier des points lumineux correspondants à des plateformes pétrolières (jaune) et des taches sombres parmi lesquelles les nappes d'hydrocarbures sont identifiables (rouge). Les autres objets sombres sont des sosies de pollutions liés probablement aux courants marins ou aux nappes biogéniques.

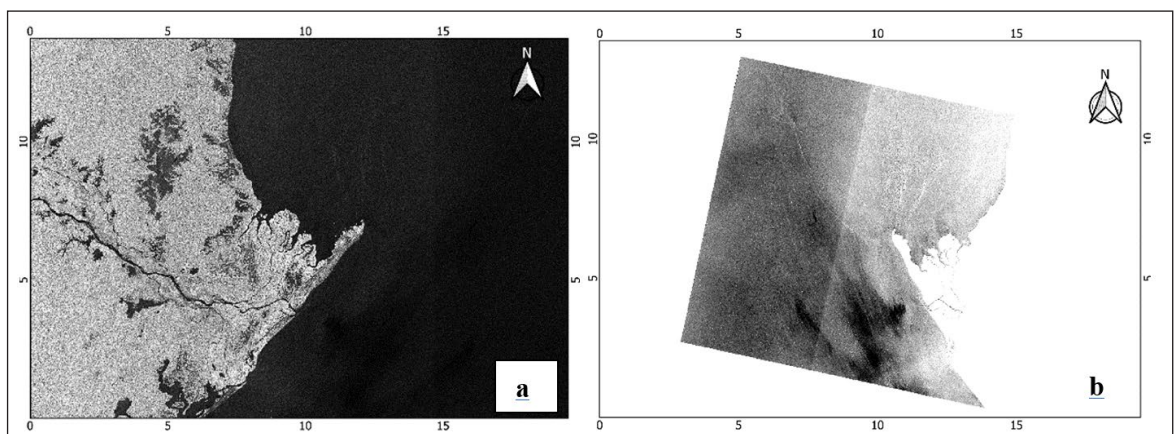


Figure 5. a) Image non projetée sans masque de terre et b) Image orthorectifiée avec masque de terre

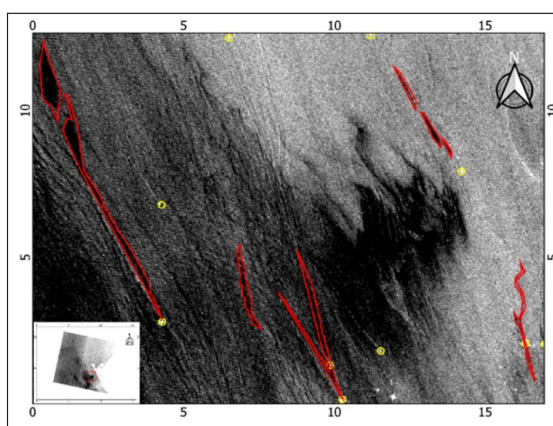


Figure 6. Plateformes (jaune) et nappes d'hydrocarbures (rouge) identifiables sur une image.

Répartition spatiale des plateformes pétrolières

Au large de Port-Gentil, 50 plateformes pétrolières réparties au Nord, au centre et au Sud de la façade ont été identifiées. Cet effectif se répartit entre 42 plateformes pour TOTAL Gabon SA, 06 plateformes pour PERENCO Gabon SA, 01 plateforme pour STREAM Oil Holding Ltd et 01 plateforme British gaz pétrole Gabon (Figure 7).

La façade de Mayumba, laisse apparaitre 23 plateformes pétrolières situées au Nord et au Sud de la façade (Figure 8). Ces plateformes se répartissent entre CANADIAN Natural Resources Ltd (05 plateformes), PERENCO Gabon Sa (15 plateformes) et VAALCO Gabon (Etame) Inc (03 plateformes).

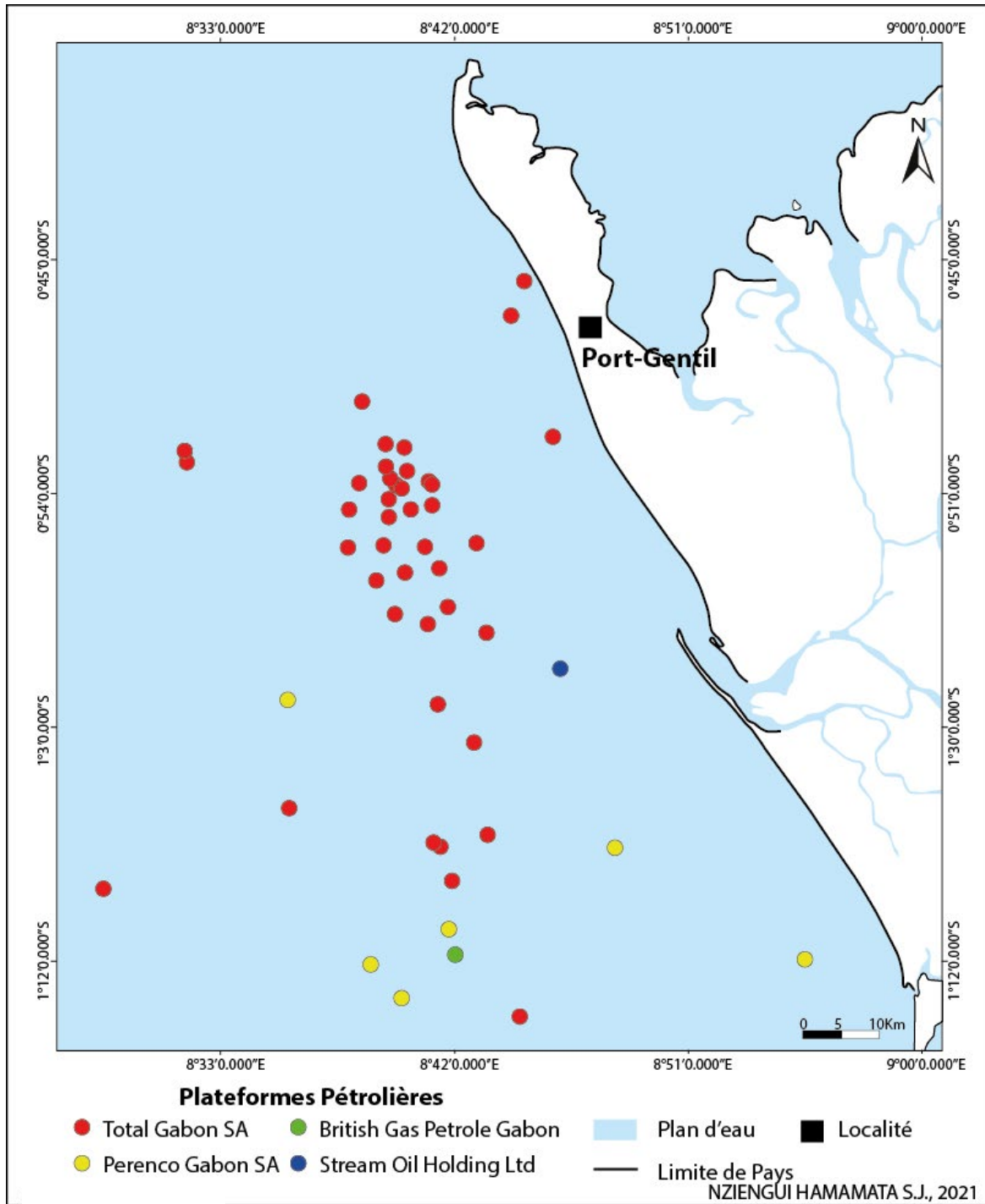


Figure 7. Plateformes pétrolières à la façade de Port-Gentil

Source : Copernicus

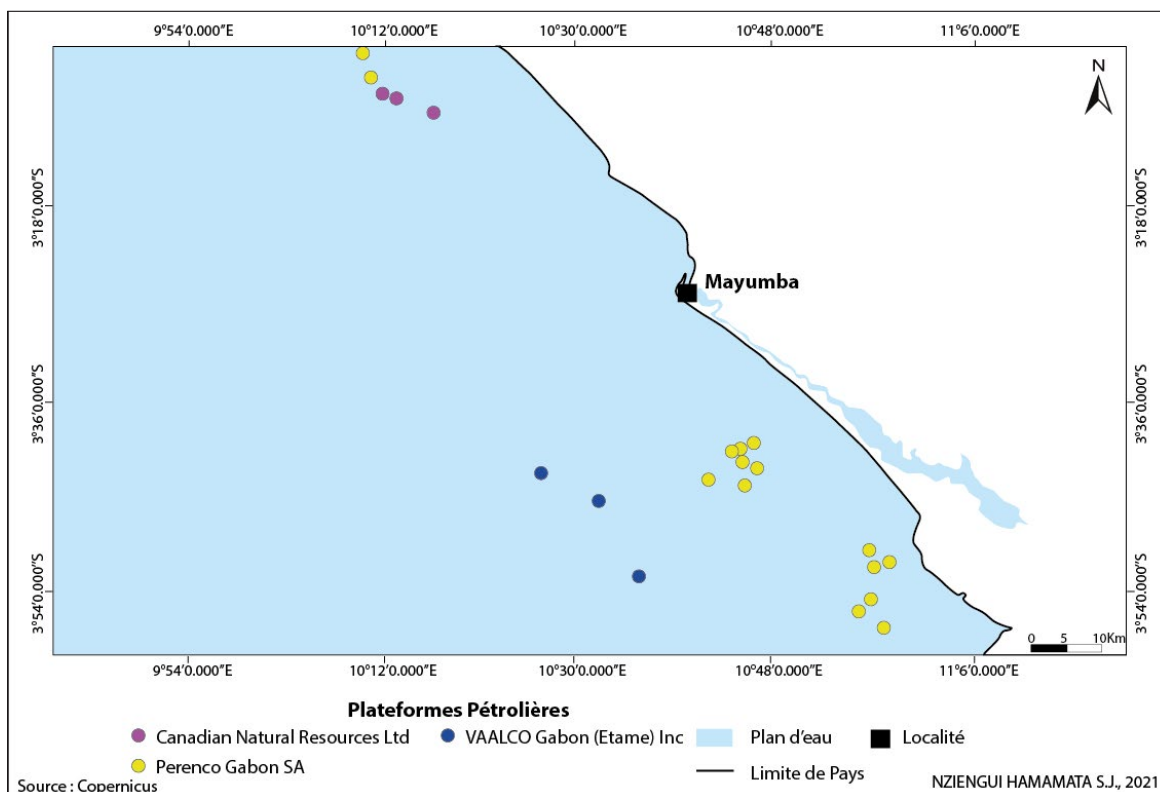


Figure 8. Plateformes pétrolières à la façade de Mayumba

Répartition spatiale des traces d'hydrocarbures

La façade de Port-Gentil a été la scène de nombreuses pollutions en hydrocarbures sur la période de 2015 à 2017. Elle a enregistré un total de 56 nappes d'hydrocarbures réparties au Nord, au Centre et au Sud de la façade (Figure 9). Ces nappes d'hydrocarbures sont de formes et de tailles variées.

En 2015, 17 nappes d'hydrocarbures ont été identifiées avec une couverture spatiale allant de 0,09 à 8,37 km². En 2016, il s'agit de 26 nappes identifiées qui occupent une superficie comprise entre 0,05 et 13,67 km². En 2017, ce sont 13 nappes hydrocarbures observées qui s'étendent sur 0,12 à 5,92 km².

Sur la période de 2015 à 2017, la façade de Mayumba a enregistré également des traces de pollutions en hydrocarbures. Il s'agit d'un total de 40 nappes d'hydrocarbures de formes et de tailles variées réparties au Nord, au Centre et du Sud et à l'Ouest de la façade qui ont été identifiées (Figure 10).

En 2015 au-dessus de la ZEE du Gabon à la façade de Mayumba 06 nappes d'hydrocarbures réparties du Sud, et à l'Ouest Est ont été identifiées. La superficie occupée par ces nappes d'hydrocarbures est comprise entre 0.71 et 9 km².

En 2016 la façade de Mayumba présente 9 nappes d'hydrocarbures situées au Nord et au Sud. Elles occupent une superficie comprise entre 0.17 et 6 km².

En 2017, 25 nappes d'hydrocarbures ont été observées au Nord et au Sud de Mayumba. La superficie de ces nappes d'hydrocarbures est comprise entre 0.4 et 11.08 km².

De façon générale, sur la période de 2015 à 2017, la façade de Port-Gentil a enregistré plusieurs traces de pollutions en hydrocarbures avec respectivement 28,50 km² en 2015, 40,39 km² en 2016 et 13,08 km² de superficie en 2017. Ainsi, de 2015 à 2016, la superficie occupée par les nappes d'hydrocarbures sur cette façade a connu une hausse, et de 2016 à 2017, elle a enregistré une baisse.

Sur la période de 2015 à 2017, la façade de Mayumba présente également de nombreuses traces de pollutions en hydrocarbures. Elles occupent respectivement en terme de superficie, 17,91 km² en 2015, 12,2 km² en 2016 et 42,57 km² en 2017. On constate donc une baisse de 2015 à 2016 et augmentation en surface de 2016 à 2017.

L'analyse des résultats montre que pour les années 2015 et 2016, la façade de Port-Gentil possède 28,5 km² et 39,4 km² ce qui est supérieur à celle de Mayumba qui a été la scène de 17,91 km² en 2015 et 13,16 km² en 2016 (Figure 11).

En 2017, c'est la façade Mayumba qui est la plus polluée avec 39,88 km² contre 12,75 km² pour la façade de Port-Gentil.

Globalement la pollution des deux zones d'étude sur la période de 2015 à 2017, montre que la façade de Port-Gentil a enregistré 53 % des surfaces de pollution contre 47 % pour Mayumba. De ce fait, au vue de l'ensemble des surfaces de pollution de 2015 à 2017, la façade de Port-Gentil a été plus polluée que la façade de Mayumba.

Ainsi, de 2015 à 2016 la façade de Port Gentil a connu une forte pollution en hydrocarbure qui traduit une augmentation des nappes voire des superficies occupées par celles-ci. Cette situation peut être liée à une intensification des activités

pétrolières dans cette zone. La faible occupation spatiale des nappes d'hydrocarbure pourrait s'expliquer par une baisse des activités pétrolières sur les façades maritimes de Port-Gentil et de Mayumba.

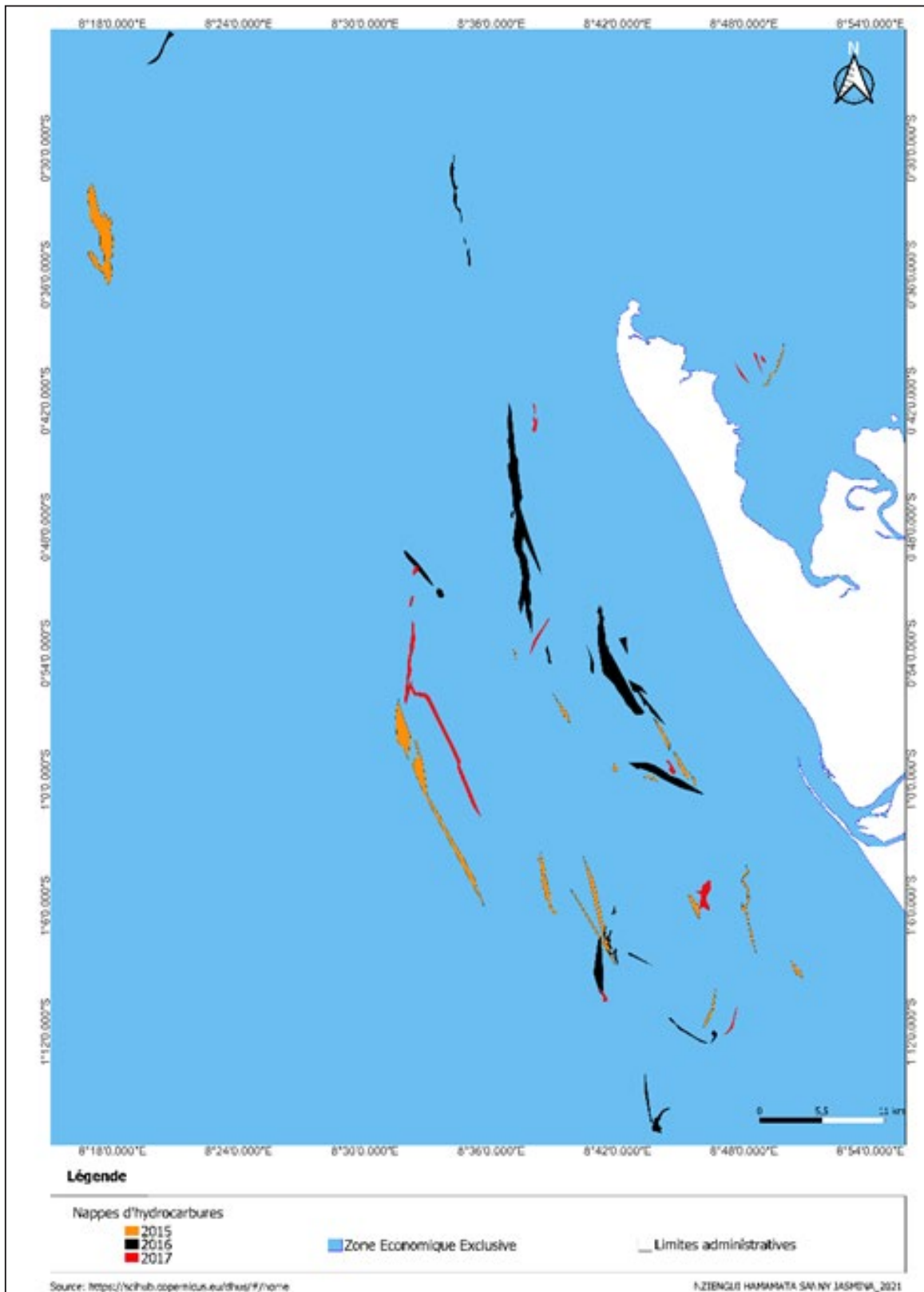


Figure 9. Pollutions en hydrocarbures à la façade de Port-Gentil (2015-2017).

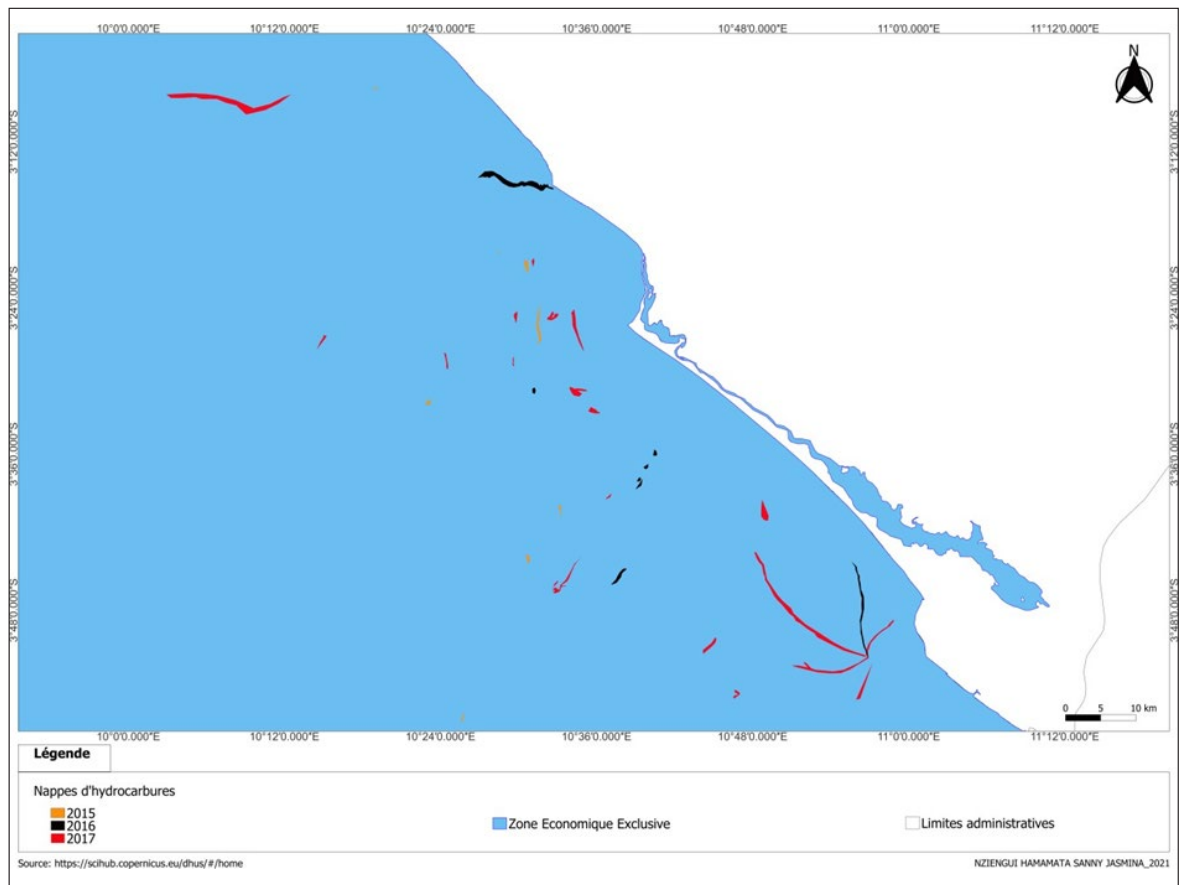


Figure 10. Pollutions en hydrocarbures à la façade de Mayumba de 2015 à 2017

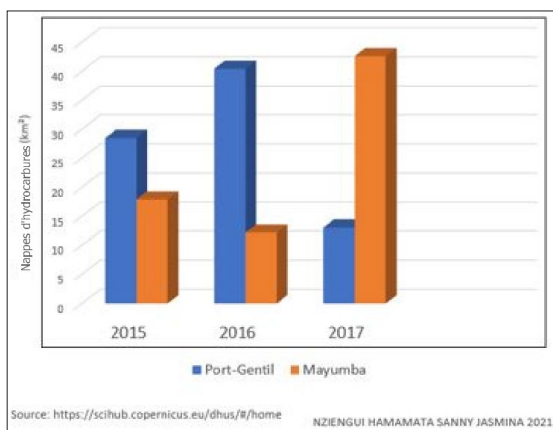


Figure 11. État de la pollution en hydrocarbures pour les façades de Port-Gentil et de Mayumba.

Traces d’hydrocarbures et types de pollueurs

L’analyse faite ici porte sur les origines des pollutions observées au large de Port-Gentil et de Mayumba. La détection des sources de pollution s’est faite par la mise en relation des plateformes et des traces d’hydrocarbure. De cette analyse, il ressort qu’au-dessus de la ZEE du Gabon à la façade de Port-Gentil, sur la période de 2015 à 2017, les pollutions proviennent de TOTAL Gabon SA, de

PERENCO Gabon SA, de STREAM Oil Holding Ltd et de pollueurs Non identifiés (Figure 12).

En 2015, sur un total de 17 nappes d’hydrocarbures, 11 proviennent de pollueurs non identifiés, 3 proviennent de TOTAL Gabon SA et 3 proviennent de STREAM Oil Holding.

En 2016, le plus grand nombre de nappes émane de TOTAL GABON SA qui est à l’origine de 14 nappes d’hydrocarbures, 11 nappes d’hydrocarbure sont issues de pollueurs Non identifiés, et 01 nappe de STREAM Oil Holding Ltd.

En 2017, parmi les nappes identifiées, 8 proviennent de pollueurs non identifié, 3 nappes de PERENCO Gabon SA et 1 nappe issue de TOTAL Gabon SA.

Au-dessus de la ZEE du Gabon à la façade de Mayumba, sur la période de 2015 à 2017 les pollueurs en hydrocarbures identifiés sont PERENCO Gabon SA, VAALCO Gabon (Etame) Inc, CANADIAN Natural Ressources Ltd et des pollueurs Non identifiés.

En 2015, à la façade de Mayumba, 4 nappes d’hydrocarbures appartiennent à des pollueurs Non identifiés et 1 à VAALCO Gabon (Etame) Inc.

En 2016, sur 9 nappes d'hydrocarbures observées, la plus grande provient de CANADIAN Natural Resources Ltd, 7 nappes issues de pollueurs Non identifiés et 1 de PERENCO Gabon SA.

En 2017, sur 25 nappes d'hydrocarbures observées, 5 émanent de PERENCO Gabon SA, 17 de pollueurs Non identifiés, 1 de VAALCO Gabon (Etame) Inc et 1 plus grande de CANADIAN Natural Ressources Ltd (Figure 13).

Sur la période de 2015 à 2017, la façade de Port-Gentil a été marquée par la pollution du milieu marin en hydrocarbures, l'identification des pollueurs révèle que pour l'année 2015, 53,33 % des pollutions en hydrocarbures proviennent de pollueurs Non identifiés, 43,54 % de TOTAL Gabon SA et 3,13 % de SREAM Oil Holdings Ltd. L'année 2016 quant à elle est marquée par 73,91 % de pollution de TOTAL Gabon SA, 16,9 % issues de pollueurs Non identifiés et 9,19 % de SREAM Oil Holdings Ltd. Pour l'année 2017, 49,73 % proviennent de PERENCO, 25,56 % de pollueurs Non identifiés, et 24,71 % de TOTAL Gabon SA (Figure 14).

Sur la période de 2015 à 2017, la façade de Mayumba a été la scène de pollution marine en hydrocarbures, l'identification des pollueurs révèle que pour l'année 2015, 92,75 % provient de pollueurs Non identifiés, et 7,25 % de VAALCO Gabon (Etame)Inc.

Pour l'année 2016, il y a 42,24 % de pollution issue de CANADIAN Natural Resources Ltd, 38,08 % de TOTAL Gabon SA, et 19,68 % de PERENCO Gabon SA.

En 2017, 42 % des pollutions sont issues de PERENCO Gabon SA, 27,78 % de CANADIAN Natural Resources Ltd et 26,38 % de pollueurs

Non identifiés et 3,84 % de VAALCO Gabon (Etame) Inc (Figure 15).

Les données recueillies sur les façades de Port-Gentil et de Mayumba de 2015 à 2017, permettent de classer les opérateurs en fonction des taux d'occupation des nappes d'hydrocarbures (Figure 16). Ainsi, le premier rang est occupé par les pollueurs Non identifiés (38 %). Le deuxième rang par TOTAL Gabon SA qui est responsable de 25,66 % des pollutions. La troisième est occupée par PERENCO Gabon SA avec 16,61 % et la quatrième par CANADIAN Natural Resources Ltd avec 11,35 %. Quant à la cinquième et la sixième place, elles sont respectivement occupées par STREAM Oil Holdings (6,54 %) et VAALCO Gabon (Etame) Inc (1,84 %)

Rôle du vent dans la dispersion des nappes d'hydrocarbure

La cartographie de la direction du vent montre le rôle que le vent joue dans la dispersion des nappes d'hydrocarbure (Figure 17). En effet, les nappes se déplacent dans une direction égale ou non à celle du vent car la dispersion des nappes peut également être influencée par les vagues. Le champ de direction du vent dévie dans la façade de Mayumba où nous avons une direction sud-nord-est. Ainsi, le vent propage les nappes d'hydrocarbures situées au Sud de la façade de Mayumba vers la côte. Le vent permet ainsi l'étalement et la dispersion des nappes mais surtout leur délocalisation. En effet, certaines nappes ne sont plus situées dans les zones où elles ont été émises et peuvent se retrouver à des distances éloignées des plates formes pétrolières qui sont les sources d'émissions des nappes d'hydrocarbure.

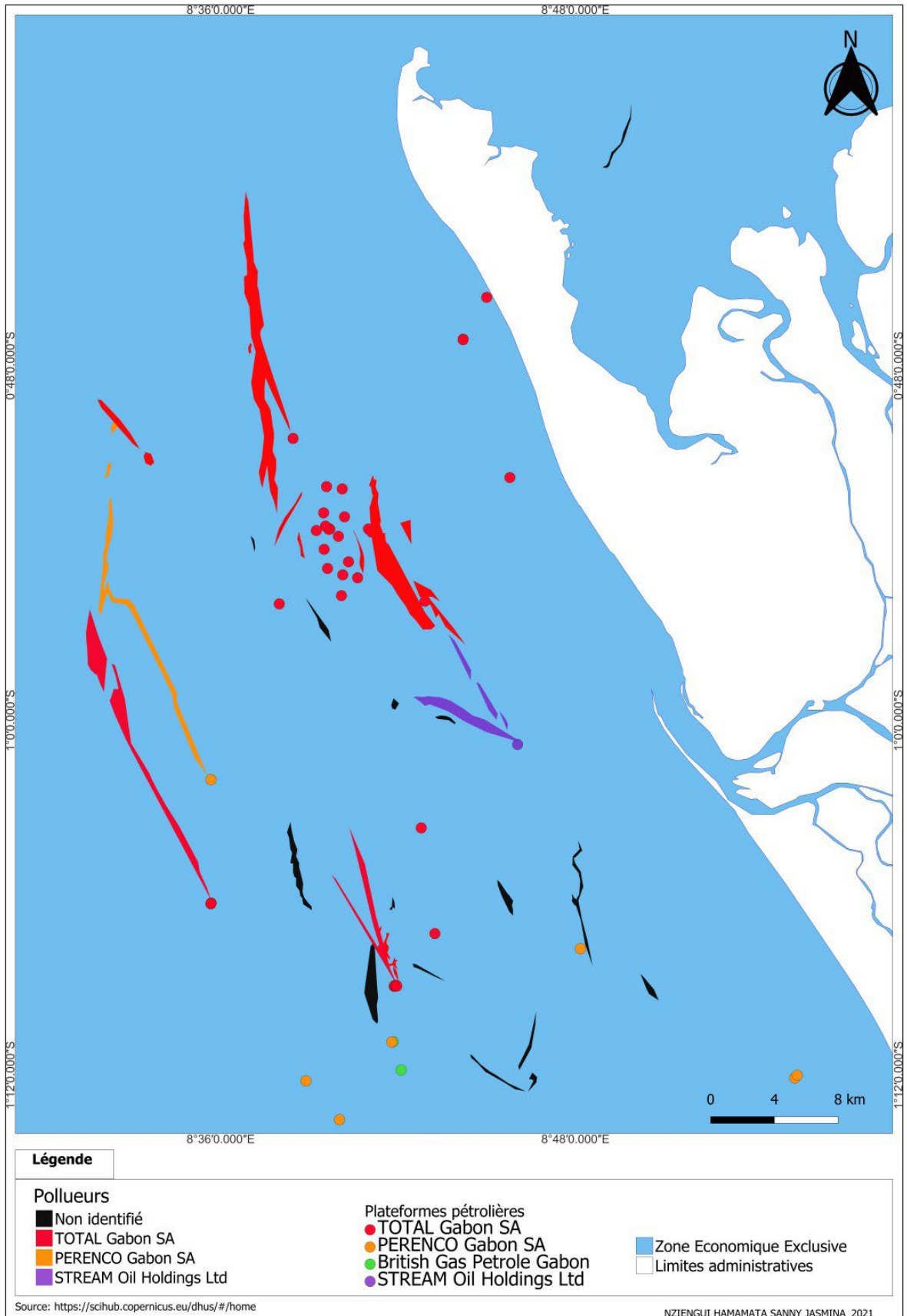


Figure 12. Synthèse des traces d'hydrocarbures à la façade de Port-Gentil (2015-2017).

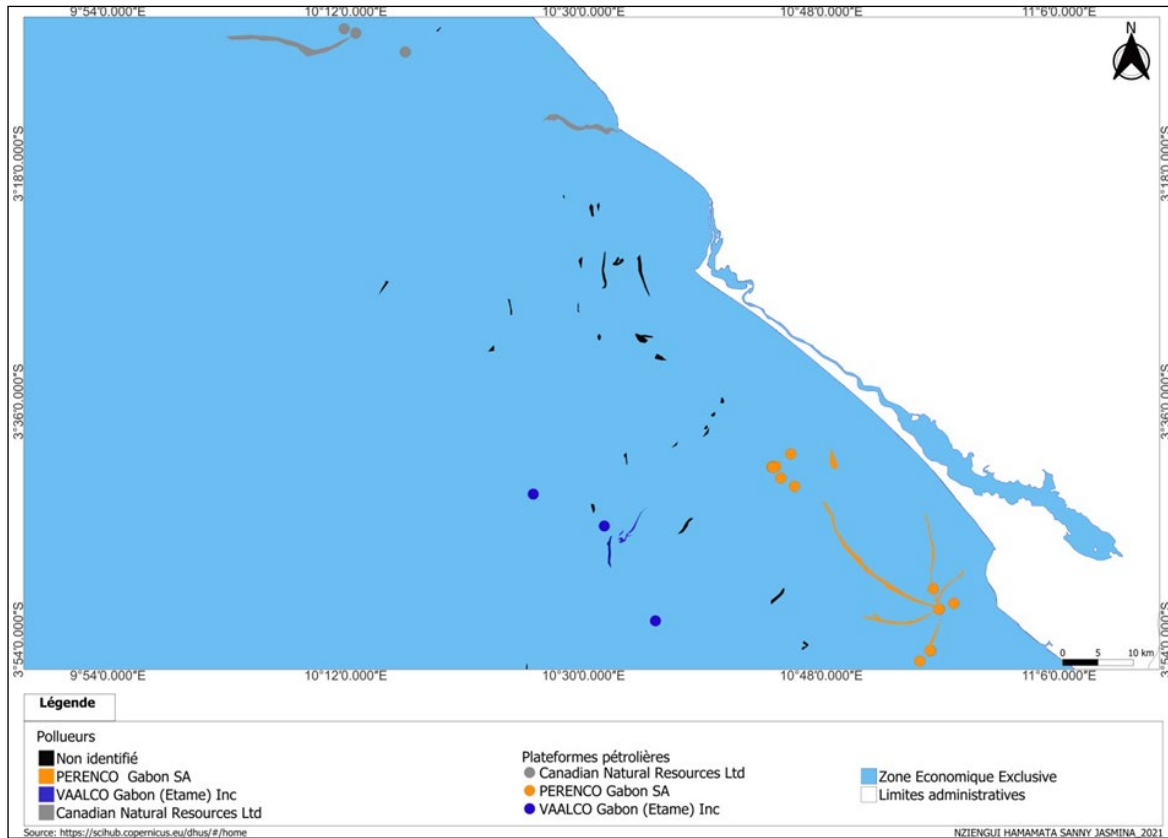


Figure 13. Synthèse des traces d’hydrocarbures à la façade de Mayumba (2015-2017).

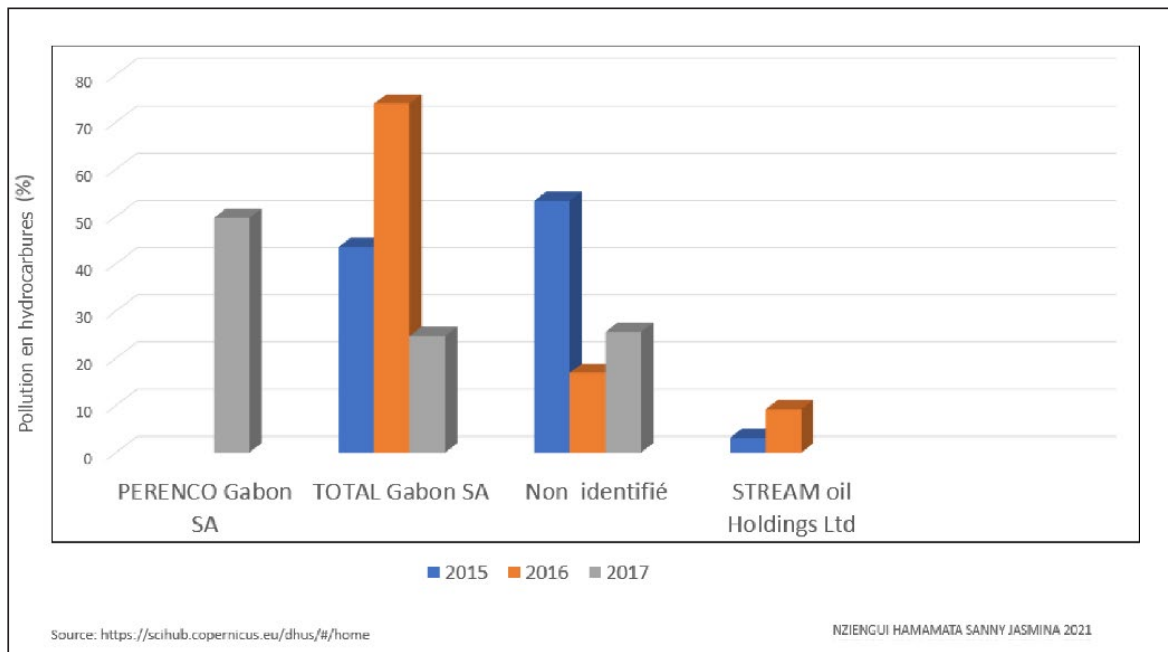


Figure 14. Répartition des pollueurs à la façade de Port-Gentil (2015-2017)

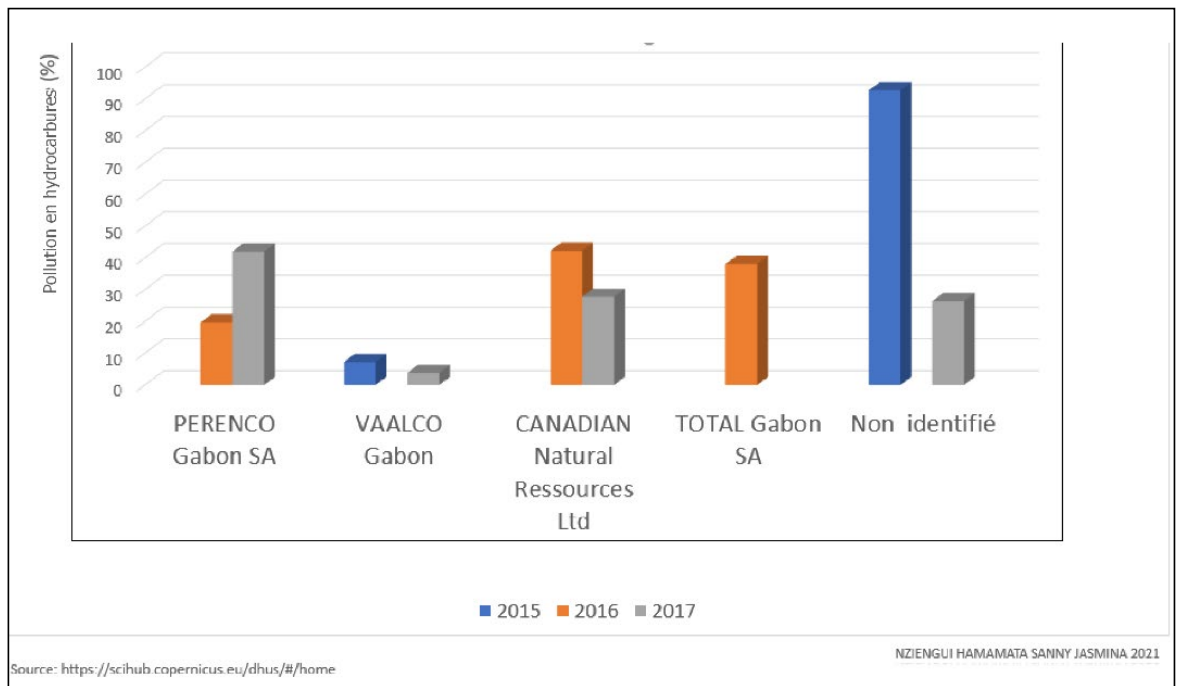


Figure 15. Répartition des pollueurs à la façade de Mayumba (2015-2017)

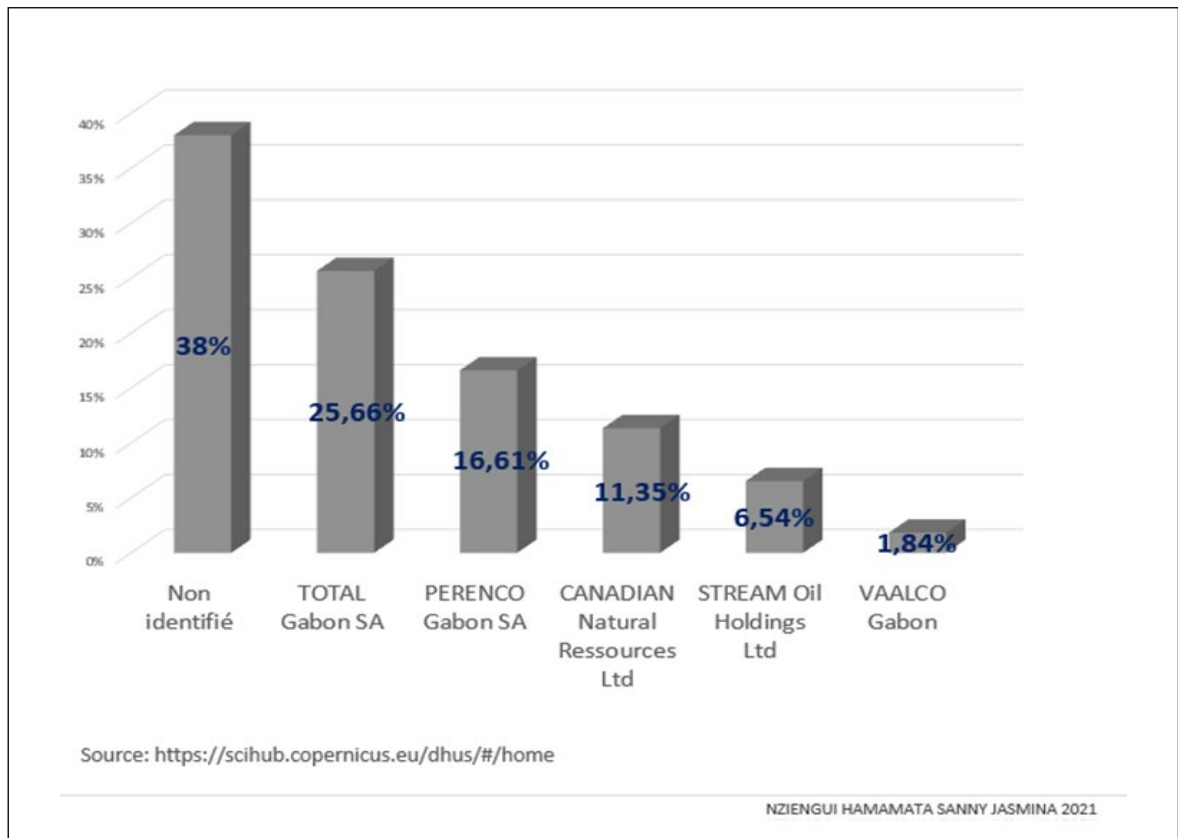


Figure 16. Pollution en hydrocarbures par opérateur des façades de Port-Gentil et de Mayumba (2015-2017)

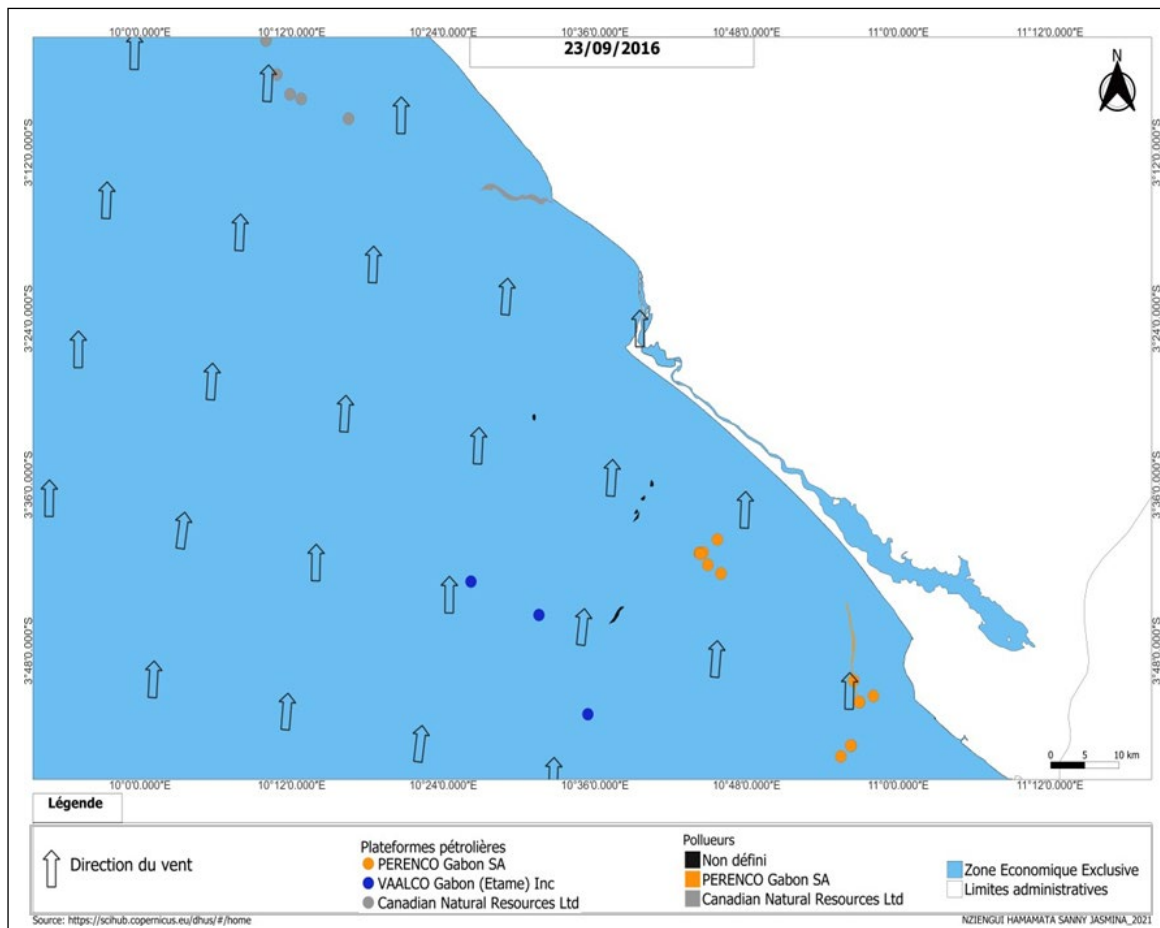


Figure 17. État de la direction du vent à la façade de Mayumba

Discussion

La présente étude a consisté à faire le suivi et l'évaluation de la pollution marine en hydrocarbures sur les façades de Port-Gentil et de Mayumba sur la période de 2015 à 2017. La méthodologie utilisée a été principalement axée sur la télédétection afin de détecter et de cartographier les nappes d'hydrocarbures.

Cette étude s'est basée sur l'utilisation des données de télédétection, plus précisément sur des images Sentinel-1 pour mettre en exergue les plateformes pétrolières et les nappes d'hydrocarbure. En effet, plusieurs études se sont également appuyées sur la télédétection à partir des images Radar SAR pour détecter et cartographier les nappes d'hydrocarbures. Il s'agit des études menées dans le Golfe de Guinée (Nellya, 2018), en mer d'Azov en Russie (Sandwell, 1987), dans le bassin du Congo (Jatiaux, 2017), dans le Golfe du Mexique (MacDonald *et al.*, 2015), en mer Caspienne (Holstein *et al.*, 2018) et au sud de l'île de Zakythos

(Kolokoussis et Karathanassi 2018). Ces études ont montré la capacité de la télédétection à travers le radar à acquérir des données de jour comme de nuit et quelles que soient les conditions atmosphériques et qu'il constitue un atout majeur pour la détection des nappes.

Cependant, Fingas et Brown (1997) soutiennent qu'en plus du radar, d'autres données satellitaires telles que l'infrarouge (IR), proche infrarouge (NIR), ultraviolet (UV), fluorocapteurs laser, capteurs micro-ondes passifs peuvent être également utilisées pour la détection des déversements d'hydrocarbures.

Ce travail a permis de constater les limites de l'imagerie Radar dans la détection des nappes d'hydrocarbures et l'identification des responsables de pollution. En effet, la fréquence de passage de la mission Sentinel-1 (qui est d'une fois tous les 12 jours) représente de mauvaises performances en temps réel et réduit toute action visant à l'identification des responsables de pollution. Cette

observation est soutenue par Choisnard *et al.* (2004) qui affirment que les principales contraintes pour l'utilisation d'images satellites dans la cartographie des nappes d'hydrocarbure et des plateformes pétrolières sont liées à la qualité des données satellites en terme de précision radiométrique et géométrique, et aux conditions atmosphériques et océaniques au moment de l'acquisition de l'image.

Les résultats du prétraitement ont permis d'identifier un ensemble de 30 images utiles à la détection des nappes d'hydrocarbures à cause de la qualité de l'image et de ses différentes composantes qui rendent la détection des nappes d'hydrocarbures difficile comme l'ont démontré Smara *et al.* (2006). De plus, Fingas et Brown (1997) soutiennent que l'image doit répondre à certaines exigences de qualité pour avancer dans un traitement ultérieur.

La détection des nappes d'hydrocarbures a donné des nappes avec une diversité en termes de forme et de taille, ce qui corrobore les travaux de Yu *et al.* (2018).

Les résultats ont révélé 97 nappes d'hydrocarbures

étalées sur 154,65 km² sur les façades de Port-Gentil et de Mayumba de 2015 à 2017. Cela confirme l'étude de Nellya (2018) qui atteste la présence de nappes d'hydrocarbures dans la ZEE gabonaise. Ces nappes d'hydrocarbures sont généralement issues des plateformes appartenant à des filiales pétrolières. La présence des nappes peut être liée à des opérations de production pétrolière, à des accidents pendant les exploitations ou à l'usure des installations.

Aussi, les résultats montrent que certains pollueurs ne sont pas identifiés. Cette situation peut être attribuée à la fréquence de passage de la Mission Sentinel-1. En effet, lors de son passage, les nappes de pollution étant dispersées, cela rend difficile l'identification du pollueur ou ce sont des nappes d'hydrocarbures issues de navires.

Cette observation met également en évidence l'impact de la direction du vent sur la dispersion des nappes d'hydrocarbures. Choisnard *et al.* (2004), dans une étude dans le golfe du St-Laurent, ont montré que le vent de par sa direction, influence énormément la dispersion des nappes d'hydrocarbure.

Conclusion

L'objectif de cette étude était de faire le suivi et l'évaluation de la pollution marine en hydrocarbures pour les façades de Port-Gentil et de Mayumba sur la période de 2015 à 2017. Elle a regroupé un certain nombre de techniques de prétraitement et traitement d'images satellitaires pour l'identification des nappes d'hydrocarbures et des plateformes responsables des pollutions. Les statistiques effectuées ont révélé que la façade de Port-Gentil est la plus polluée avec 57 % des pollutions observées contre 43 % à Mayumba.

En prenant en considération les plateformes présentes et les nappes d'hydrocarbures, il ressort que 62 % des nappes d'hydrocarbures proviennent des plateformes pétrolières et 38 % d'opérateurs non identifiés.

La mise en place d'une mission de surveillance aéromaritime réelle à travers des approches pertinentes effectives, permettra d'assurer un réel suivi des pollutions marines en hydrocarbures, afin de minimiser les impacts potentiels des déversements sur les habitats marins, côtiers, et les usagers.

Références Bibliographiques

BP Statistical. 2014. *Review of World Energy June 2014*, 48p.

Brekke C, and Solberg AHS. 2005. Oil Spill Detection by Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 95 (2005) : 1-13.

Commission Européenne. 1998. Impact Reference System, Effects of oil in the marine environment: Impact of hydrocarbons on fauna and flora. Community Information System for the Control

and Reduction of Pollution, Bruxelles, (CEDRE, Brest) 139p.

Dandonneau Y. 1978. Effets biologiques de la pollution des mers par les hydrocarbures. *In* : Séminaire de la Compagnie Nouvelle de Navigation. *La Pêche Maritime*, 57 (1203) : 342-345.

Elachi C. 1988. "Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques," IEEE Press, New York : 72-77.

- Ebner F.** 2017. Évaluation et cartographie de la vulnérabilité des côtes face aux pollutions par les hydrocarbures : le cas du littoral des Pays de la Loire et de la côte Est de la mer d'Azov Thèse de Doctorat Université de Nantes, 182p.
- Fingas MF., Brown CM.** 1997. "Review of oil spill Remote Sensing". *Spill Science and Technology Bulletin*, 4(4) :199-208.
- Fortuny-Guasch J.** 2003. Amélioration de la détection et de la classification des déversements d'hydrocarbures avec SAR polarimétrique. Atelier sur l'application de la polarimétrie SAR et de l'interférométrie polarimétrique. *ESA- ESRIN Frascati, Italie*. 14-16.
- Garcia-Pineda O, Zimmer B, Howard M, Pichel W, Li X, MacDonald IR.** 2009. Using SAR images to delineate ocean oil slicks with a texture-classifying neural network algorithm (TCNNA). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(5): 411-421.
- Guihy B., N'guetta J L-R.** 2017. Notice d'Impact Environnemental et Social (NIES) des travaux de pavage et d'assainissement pour 750 ml de voirie à Port-Gentil. Bureau National d'Études Techniques et de Développement GABON et CIIC, 150p.
- Hannah R.** 1981. Resource protection measures. The IXTOX I oil spill : the federal scientific response ». Rapport NOAA, United States Department of Commerce, (CEDRE, Brest). 105-118.
- Holstein, A., Kappas, M., Propastin, P., & Renchin, T.** 2018. Oil spill detection in the Kazakhstan sector of the Caspian Sea with the help of ENVISAT ASAR data. *Environmental Earth Sciences*, 77(5): 1-11.
- ITOPF.** 2013. Effets de la pollution par les hydrocarbures sur l'environnement. Guide d'informations techniques. 13. 12p.
- Jackson CR, Apel JR.** 2004. Synthetic Aperture Radar marine user's manual. NOAA, Washington, DC, 464p.
- Choisnard J, Bernier M, Lafrance G.** 2004. Cartographie des vents dans le golfe du Saint-Laurent à l'aide de l'imagerie RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(4): 604-616.
- Jatiaux R.** 2017. Les émanations naturelles d'hydrocarbures lourds depuis les sédiments vers l'hydro-atmosphère : approche intégrée multi échelle dans le bassin profond du bas-congo. Océan, Atmosphère. Université de Perpignan : 100-158.
- Kolokoussis P, Karathanassi V.** 2018. Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*:4-6.
- MacDonald IR, Garcia-Pineda O, Beet A, Daneshgar A S, Feng L, Graettinger G, French-McCay D, Holmes J, C, F. Huffer F, Leifer I, Muller-Karger F, Solow A, Silva M, Swayze G.** 2015. Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico: Oil slicks in the gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 120 (12): 8364-8380.
- Marghany M.** 2014. Utilization of a genetic algorithm for the automatic detection of oil spill from RADARSAT-2 SAR satellite data. *Marine Pollution Bulletin*, 89 (1): 20-29.
- 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, Thèse de Doctorat, Paris Est, 125p.
- Najoui Z, Deffontaines B, Xavier JP, Riazanoff S.** 2017. Wind Speed and Instrument Modes Influence on the Detectability of Oil Slicks using SAR Images: a Stochastic Approach. Document technique, 124 p.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).** 2014. Oil spills in Mangroves. Planning and response considerations. National Ocean Service - Office of Response and Restoration. U.S. Department of Commerce Ed, 96p.
- Nellya LA.** 2018. Les nappes d'hydrocarbures dans le Golfe de Guinée. Master Sciences de l'Univers, Environnement, Écologie Spécialité Océanographie, Environnements Marins, Université de la Sorbonne, Paris, France: 1-14.
- Perrusset AC.** 1983. Morphologie, Atlas illustré Géographie et Cartographie du Gabon, Gabon, IPN, Laboratoire National de Cartographie, *EDICEF/ EDIG*: 26-29.
- Pottier P, Ovono ZM.** 2017. Introduction générale. *In* : Les régions littorales du Gabon, éléments de réflexion pour une planification stratégique du territoire. Eds. LETEG-Nantes Géolittomer (Nantes) & Raponda Walker (Gabon), 439 p.
- Sandwell D.T.** 1987. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 14(2) :139-142.
- Sautter G.** 1966. De l'Atlantique au fleuve Congo. Une géographie du sous-peuplement, République du Congo, République gabonaise, Thèse d'État, 2 tomes, Paris - La Haye, Mouton, SEA 1102 p.
- Smara Y, Bouchaib S, Salvatori L, Frate FD, Lichten-Neger J.** 2006. Detection et Identification des nappes d'hydrocarbures à partir des images satellitaires Radar Sar. 3^{ème} Symposium International des Hydrocarbures et de la Chimie. Ghardaia, Algérie : 1-10.
- Yu X, Zhang H, Luo C, Qi H, Ren P.** 2018. Oil spill segmentation via adversarial f-divergence learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* : 1-16.