

Méthodologie retenue pour l'estimation des dérives de nappes d'hydrocarbure, pollutions urbaines et transports larvaires par modélisation lagrangienne sur le long du littoral nord du Gabon

Brice Didier Celce KOUMBA MABERT
Centre National des Données et Information Géographiques
IRSH - CENAREST (Gabon)
Koumbamabertb@gmail.com

Résumé

L'estimation des dérives des nappes d'hydrocarbures, la pollution urbaine et le transport larvaire autour de l'Arc d'Emeraude ont été analysés par modélisation numérique avec SYMPHONIE. La dérive des nappes d'hydrocarbures en simulant un accident sur une plateforme en activité a permis d'analyser, sur le plan spatio-temporel, la probabilité de présence des nappes et leur temps d'arrivée sur les différents secteurs de la côte. L'analyse de la probabilité de présence révèle que la Baie de la Mondah est la zone la plus vulnérable avec un temps d'arrivée de la nappe compris entre 30 et 50 jours. La dispersion des rejets urbains par les cours d'eau dans le Komo et la baie de la Mondah confirme le caractère vulnérable de la baie de la Mondah. Enfin, l'estimation de la dispersion et de la rétention larvaire d'espèces cibles sur le littoral gabonais a déterminé les zones probables de rétention, ainsi que la connectivité larvaire des différentes zones littorales.

Mots-clés : Côtes, Gabon, Modélisation, Nappes d'hydrocarbures, Pollution, Vulnérabilité.

Abstract

The estimation of oil slick drift, urban pollution and larval transport around the Arc d'Émeraude was analyzed by numerical modeling with SYMPHONIE. The drift of oil slicks by simulating an accident on an active platform enabled us to analyze spatio-temporally the probability of the presence of slicks and their arrival time on different sectors of the coastline. The analysis of the probability of occurrence reveals that the Baie de la Mondah is the most vulnerable zone, with a slick arrival time of between 30 and 50 days. The dispersion of urban discharges via watercourses in the Komo and Mondah Bay confirms the vulnerability of Mondah Bay. Finally, the estimation of larval dispersal and retention of target species along the Gabonese coastline has determined the probable retention zones, as well as the larval connectivity of the various coastal zones.

Keywords : Coast, Gabon, Modeling, Oil slicks, Pollution, Vulnerability,.

Introduction

Ce travail porte sur l'estimation des dérives de nappes d'hydrocarbures, les pollutions et transports larvaires autour des parcs nationaux de Pongara et d'Akanda. Ces aires protégées constituent l'Arc d'Émeraude, logé, respectivement, dans l'Estuaire du Komo et la Baie de la Mondah. L'objectif principal relatif aux simulations numériques lagrangiennes est double :

D'une part, en général, de déterminer la vulnérabilité des côtes gabonaises et, d'autre part, en particulier, celle de l'Arc d'Émeraude. Cette vulnérabilité concerne, *primo*, des fuites d'hydrocarbures issues de plateformes pétrolières en activité dans la région de Port-Gentil ; et, *secundo*, des rejets urbains de contaminants, en particulier plastiques, issus de l'agglomération de Libreville.

D'autre part, d'estimer les zones côtières les plus favorables à la rétention ou à la dispersion larvaire, et d'évaluer leur connectivité le long du littoral gabonais.

Les méthodologies synthétisées ici ont été mises en œuvre pour chacune des problématiques étudiées. Ainsi, cette étude de la vulnérabilité et de la dispersion/rétention larvaire est basée sur une approche lagrangienne. Celle-ci permet de suivre le déplacement d'un très grand nombre de particules fictives (typiquement plusieurs milliers) induit par un champ de courant variant spatialement et temporellement. Ici, est utilisé le module de transport lagrangien du modèle hydrodynamique tridimensionnel (ou 3D) SYMPHONIE et les champs de courants journaliers simulés par ce même modèle (P. Marsaleix et *al.*, 2008 ; 2009 ; 2012). Ces méthodologies retenues sont explicitées pour les différents volets d'étude (accidents pétroliers, rejets urbains, transports larvaires).

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude couvre un domaine marin qui s'étend entre 1.5°S et 2.2°N en latitude et entre 9,5°E et 10.1°E en longitude. Dans l'Estuaire du Komo, la grille remonte jusqu'à Kango. Il s'agit d'une grille qui prend en compte aussi bien les processus estuariens, notamment la partie amont de l'Estuaire jusqu'à Kango, le domaine océanique suffisamment large pour prendre en compte les installations pétrolières situées au sud du delta de l'Ogooué, et les environnements sensibles que sont les Estuaires du Komo et de la Baie de la Mondah dans leur globalité (figure 1).

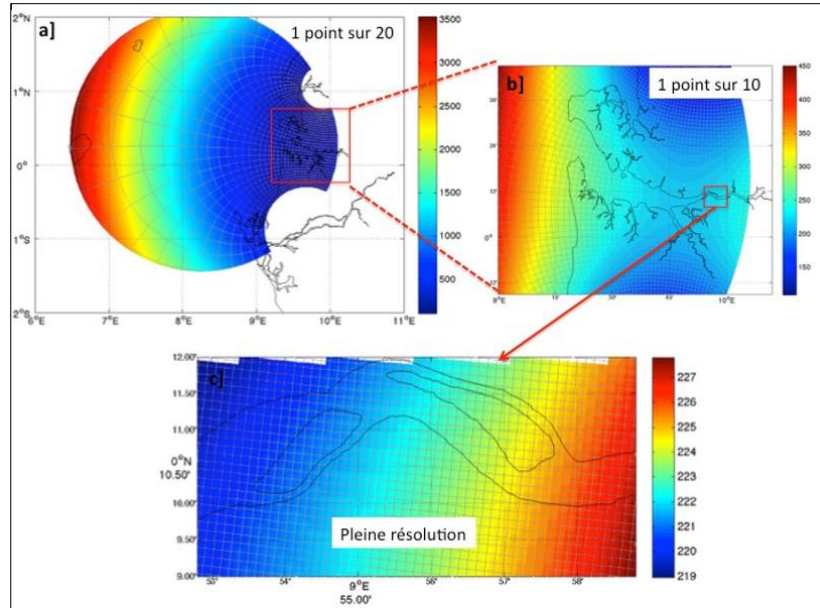


Figure 1: Domaine retenu pour les grilles bipolaires du modèle SYMPHONIE proposée pour Arc d'Emeraude

1.2. Méthodologie

Le modèle numérique de circulation océanique SYMPHONIE est un modèle de circulation océanique 3D à surface libre. Il fait partie du système SIROCCO (Simulation Réaliste de L'OCéan COTier qui a pour mission de fournir des outils numériques de modélisation océanique de l'environnement côtier. Afin de représenter les différents processus, il tient compte des forçages relatifs aux zones frontalières (forçage de marée, de vent, de chaleur et de salinité ; apport d'eau douce par les fleuves...). Le modèle est basé sur les équations de Navier-Stokes adaptées à l'océanographie sous différentes hypothèses. Ce modèle a été utilisé pour simuler la vulnérabilité côtière en fonction des cas de pollutions par les hydrocarbures et les rejets urbains. Sur le plan de la conservation, il a servi pour la compréhension de la dispersion et rétention larvaire.

1.2.1. Méthodologie d'estimation des dérives de nappes d'hydrocarbures

Particulièrement autour de l'Arc d'Émeraude, une détermination est faite pour les zones littorales, les plus vulnérables à des fuites ou accidents pétroliers (déversements accidentels d'hydrocarbures) pouvant survenir principalement au niveau des forages et donc des plateformes pétrolières en activité. Aujourd'hui, potentiellement susceptibles de connaître un accident au large du Gabon, 50 infrastructures pétrolières opérationnelles existent et toutes situées au sud du Cap Lopez (figure 2).

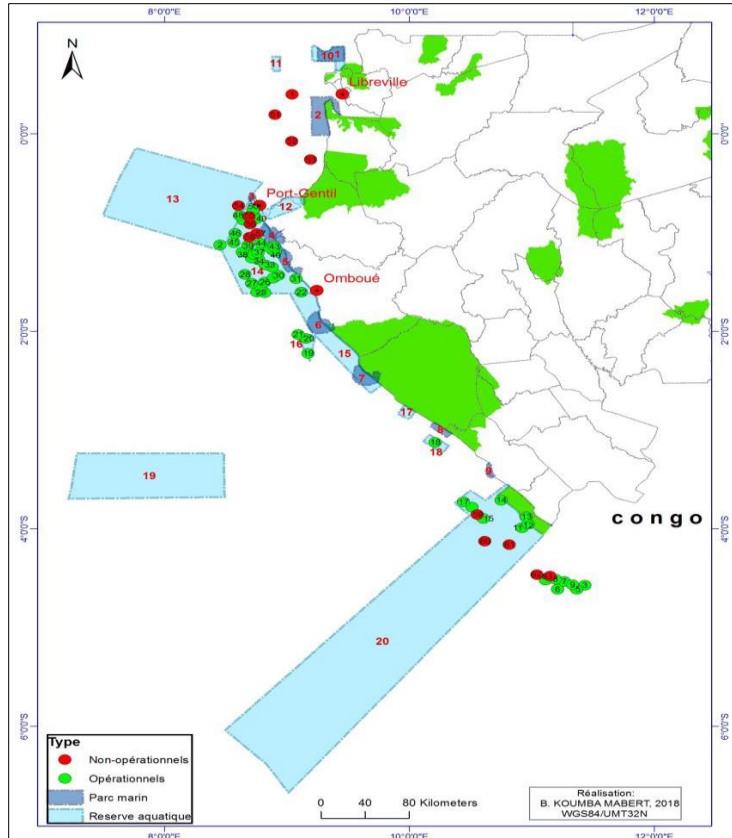


Figure 2: Localisation des plateformes pétrolières opérationnelles (en vert) et non opérationnelles (en rouge) le long du littoral Gabonais.

Parmi ces infrastructures, 9 sont localisées dans le domaine simulé dont la frontière sud se situe à 1.15°S (figure 2). Basé sur le fait qu'un accident pétrolier peut également survenir autour des plateformes (par exemple sur un tanker, ou un pipeline reliant les gisements entre eux ou acheminant le pétrole à terre), un risque de déversement d'hydrocarbures peut avoir lieu sur l'ensemble de la zone côtière modélisée incluant les 7 plateformes en activité et délimitée en noir sur la figure 3.

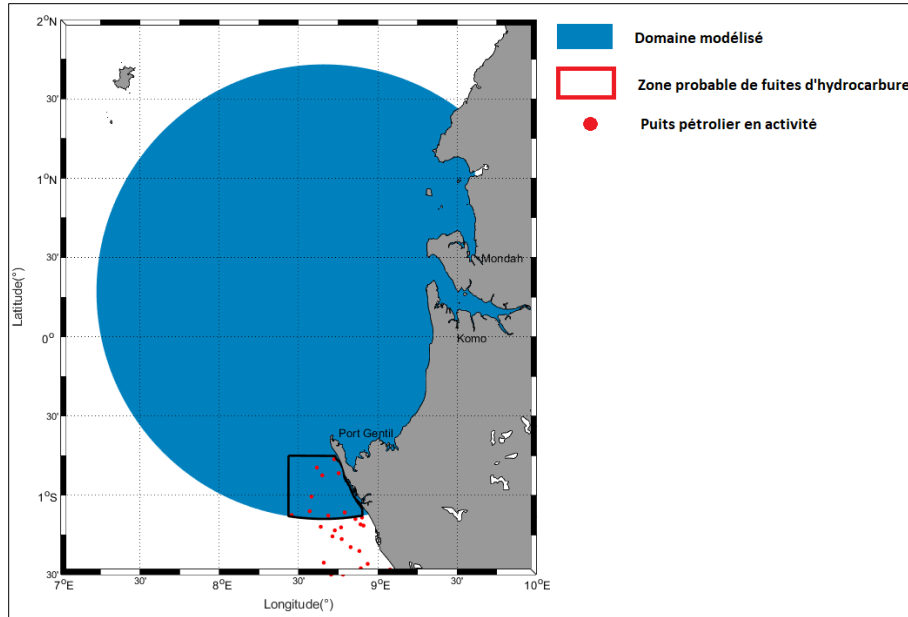


Figure 3: Domaine modélisé, position des plateformes pétrolières en activité et zone probable de fuites d'hydrocarbures.

Après différents tests de sensibilité, et afin d'avoir un bon compromis entre un temps de calcul numérique raisonnable et une représentativité correcte des transports lagrangiens, il a été décidé de considérer 1000 sites possibles d'accidents pétroliers, distribués aléatoirement dans cette zone maritime de 1885 km² (figure 4). À chacun de ces 1000 sites, des particules fictives sont libérées dans le champ de courant de surface, simulant ainsi des fuites d'hydrocarbures, supposées passives, dont les trajectoires seront suivies dans l'ensemble du domaine simulé par le modèle.

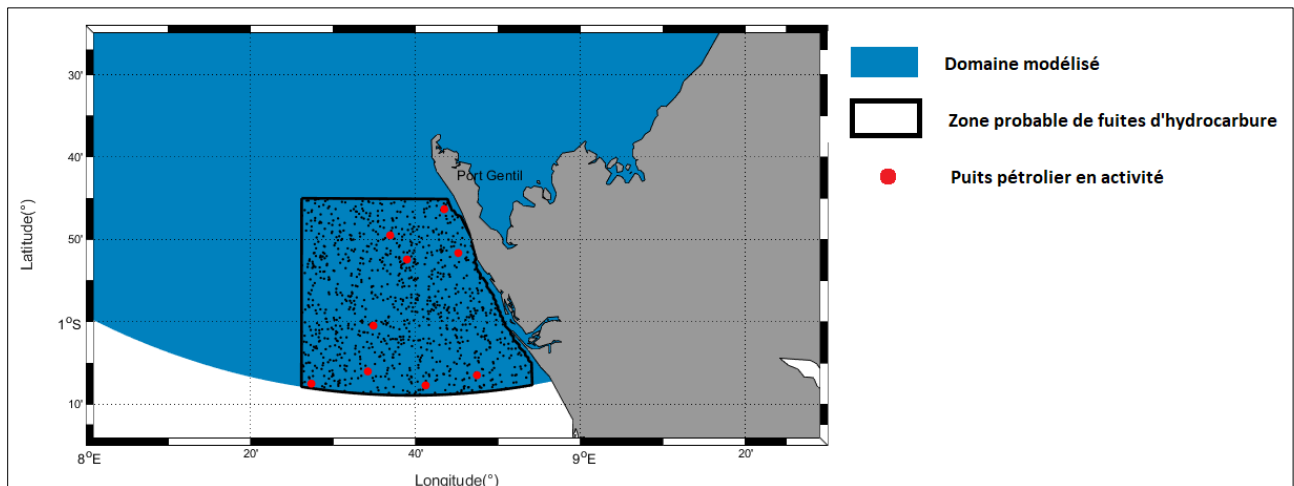


Figure 4: Sites possibles d'accidents pétroliers (points noirs).

1.2.2. Méthodologie de détermination du devenir des rejets urbains de Libreville

L'approche suivie est relativement similaire à celle décrite pour la dérive des nappes d'hydrocarbures. L'importance est accordée ici à la zone du littoral Librevillois et de la baie de la Mondah. Afin de déterminer la dispersion des contaminants urbains (principalement de type macro-déchets) et la vulnérabilité des zones littorales à ces pollutions, nous avons retenu 11 sources possibles, entre le Cap Santa Clara et le sud d'Owendo, et 2 sources majeures dans la baie de la Mondah, à l'exutoire de la Nzémé et Tsini (Figure 5).

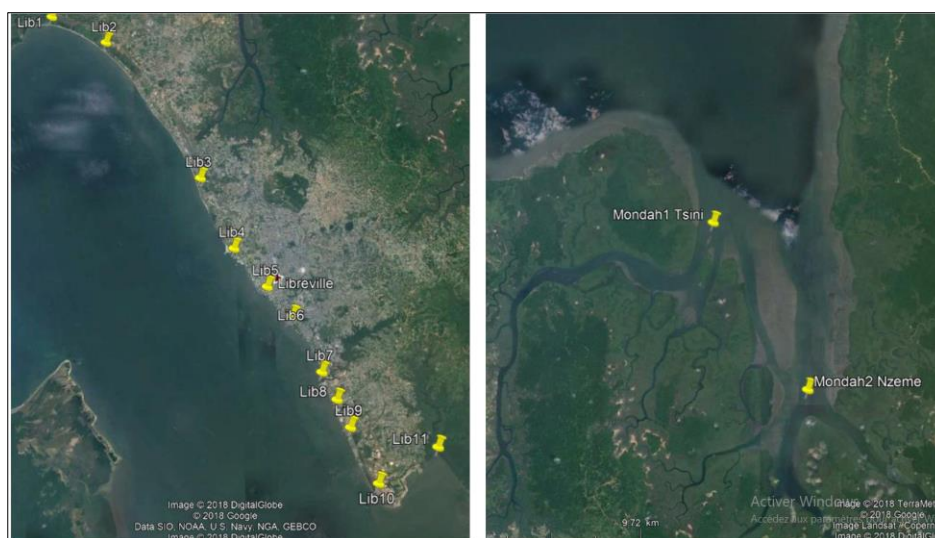


Figure 5: Les émissaires urbains de Libreville et de la baie de la Mondah dans le cadre de l'évaluation de la pollution tellurique.

Des particules fictives, principalement associées à des macros-déchets, sont libérées au niveau de ces 13 sources chaque jour pendant 5 ans (1er janvier 2010 au 31 décembre 2014). Ces 13 sources, correspondent à des émissaires ou exutoires de chenaux et bras de rivières qui se déversent directement dans l'Estuaire du Komo ou dans la baie de la Mondah.

1.2.3. Dispersion et rétention larvaire

Cette partie consiste à estimer la dispersion et de la rétention larvaire d'espèces est cible sur le littoral gabonais, et notamment dans la baie de la Mondah. L'objectif a été de déterminer les zones probables de rétentions, ainsi que la connectivité larvaire des différentes zones littorales. L'étude s'est focalisée sur trois principales espèces exploitées

in situ : le bar (*Dicentrarchus labrax*), le mullet (*Mugil spp.*, *Liza spp.*), et le petit-capitaine (*Galeoides decadactylus*).

Bien que peu documentée, la période privilégiée de ponte du bar et du petit capitaine se situe entre décembre et janvier, tandis que la période de ponte de mullet est plutôt en août-septembre. Les lieux de ponte de ces poissons sont considérés comme étant les zones côtières où la bathymétrie est inférieure à 25 m. Cette bande côtière est divisée en 8 zones le long du littoral gabonais (figure 6), afin notamment d'établir des cartes de connectivité entre les zones.

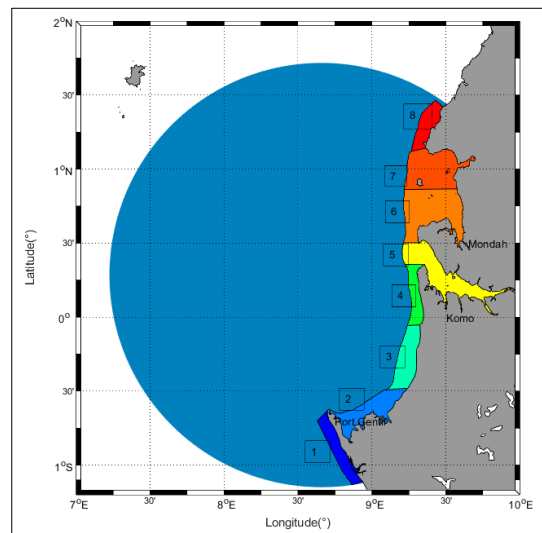


Figure 6: Le littoral en 8 zones de ponte de l'île Mandji (sud) à Cap Jean (Cabo San Juan ; nord)

Ainsi, 10 000 particules fictives (ou larves) sont relâchées dans la bande côtière, chaque jour, pendant 1 mois (janvier pour le bar et petit capitaine, septembre pour le mullet), pour l'ensemble des années simulées. Ces particules sont positionnées de manière aléatoire dans l'ensemble des 8 zones. La durée du stade larvaire de ces espèces est relativement méconnue ; mais elle ne dépasse pas 45 jours. Les larves fictives, libérées en surface dans les champs de courant simulés, sont suivies pendant 45 jours.

2. Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation prennent en compte la dérive des nappes d'hydrocarbures, des rejets urbains et la dispersion et rétention larvaire.

2.1. La dérive de nappes d'hydrocarbures

L'état initial de la circulation étant primordial pour le suivi lagrangien, le transport des nappes d'hydrocarbure et la vulnérabilité des zones côtières à un accident pétrolier sont étudiés ici à l'échelle mensuelle. Des particules fictives sont libérées chaque jour de l'année pendant 5 ans (années 2010 à 2014) au niveau des 1000 sites et sont advectées dans les champs de courant simulés du modèle Symphonie pendant 90 jours. Le modèle fournit la cartographie de la probabilité de présence des nappes d'hydrocarbures et celle du temps d'arrivée de la nappe sur les différents secteurs de la côte (figure 7)

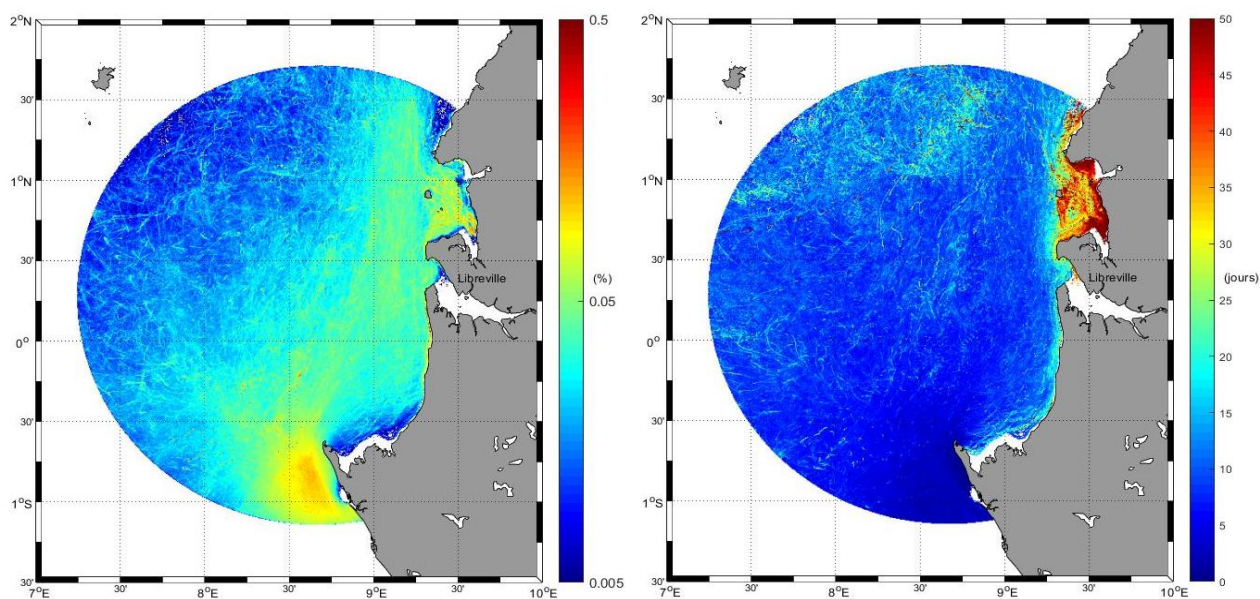


Figure 7: Probabilité de présence des nappes d'hydrocarbures (à gauche) et temps d'arrivée de la nappe sur chaque secteur du littoral (à droite, en rouge)

La probabilité de présence en pourcentage et le temps d'arrivée en jour des nappes d'hydrocarbures à la côte ont été analysés en fonction des douze mois de l'année (figure 8).

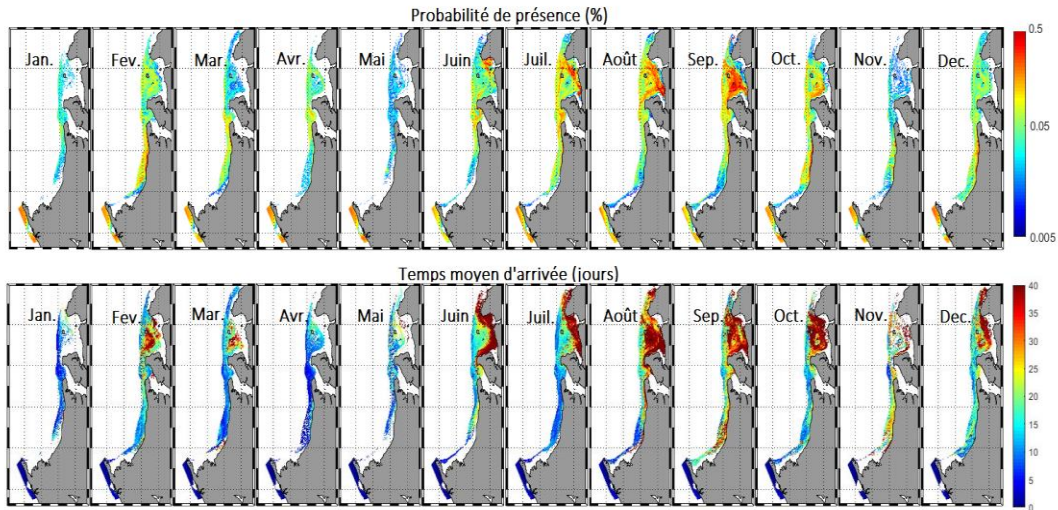


Figure 8: probabilité de présence en pourcentage et le temps d'arrivée en jour en fonction des mois de l'année

Les cartes moyennes de probabilité de passage des nappes d'hydrocarbures, en chaque point du domaine simulé, et selon le mois durant lequel l'accident pétrolier a lieu révèle une différence spatio-temporelle de la vulnérabilité. Une attention particulière est portée sur la vulnérabilité des zones situées autour de l'Arc d'Emeraude. En effet, dans le contexte de l'Arc d'Emeraude, les Estuaires du Komo et la Baie de la Mondah constituent les principaux enjeux. Ainsi, en cas de déversement, la probabilité de présence de la nappe dans ces environnements sensibles sera plus importante durant les mois de juin, juillet, septembre et octobre avec une probabilité maximum de 0.5%. De plus, le temps moyen qu'une nappe d'hydrocarbures atteigne l'Estuaire du Komo et la Baie de la Mondah varie autour de 30 jours après le déversement.

2.2. La dispersion des rejets urbains de Libreville

Dans le cadre de la compréhension de la dispersion des rejets urbains et des polluants par les cours d'eau dans le Komo et la Baie de la Mondah, les zones probables d'accumulation de déchets ont été dressées. Il s'agit de la cartographie des moyennes de probabilité de passage des macro-déchets et du temps d'arrivée sur chaque secteur de la côte été réalisée (figure 9).

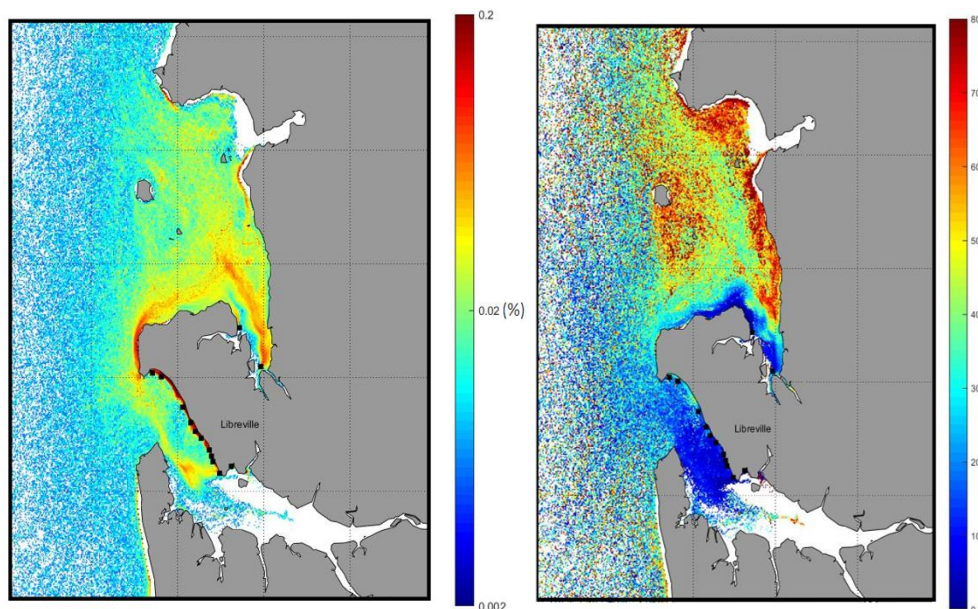


Figure 9: Probabilité de présence des *rejets urbains* (à gauche) et leur temps d'arrivée sur chaque secteur du littoral (à droite)

Les cartes de vulnérabilité des zones littorales indiquant la probabilité et donc les risques que des macro-déchets pénètrent dans des zones côtières varient autour de 0.2%. Le temps moyen pour que les macro-déchets atteignent les différentes zones littorales varie autour de deux mois. Une comparaison entre saison sèche et saison des pluies a permis de voir l'influence du débit du fleuve Komo et la Baie de la Mondah sur le transport des déchets hors de l'Estuaire.

2.3. La dispersion et rétention larvaire

Ces simulations sont répétées sur 5 années (2010, 2011, 2012, 2013 et 2014). Les résultats sont moyennés, afin de donner les premières estimations de la dispersion ou de la rétention larvaire moyenne (figure 10).

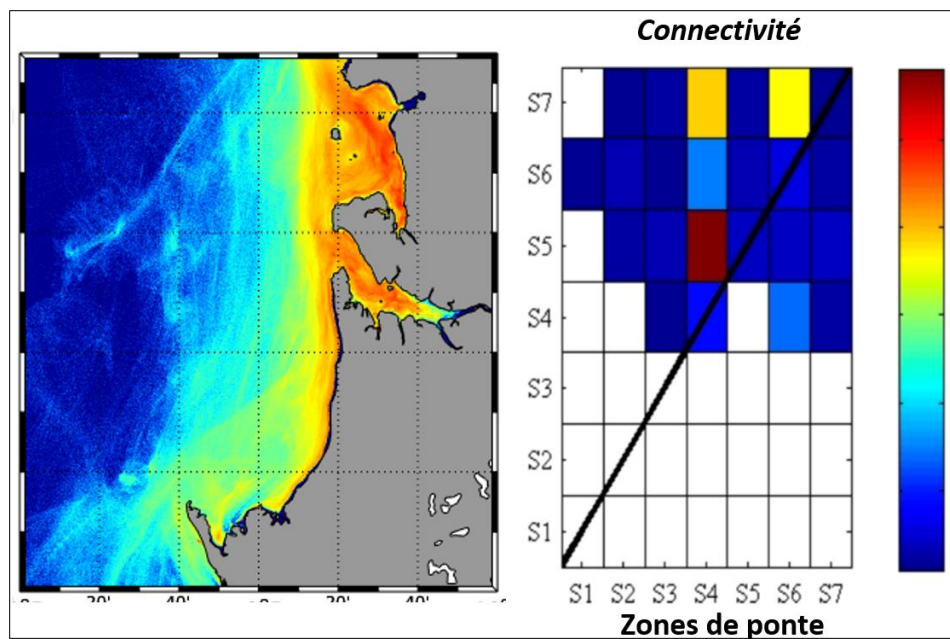


Figure 10: dispersion larvaire et connectivité par rapport aux zones de pontes

L'étude de la dispersion larvaire a permis, dans un premier temps, d'élaborer des cartes de probabilité de passage des larves dans la zone modélisée. Après 45 jours les zones les plus impactées sont l'Estuaire du Komo et la baie de la Mondah. De plus le niveau de connectivité entre chaque site côtier a été établi à l'aide des matrices de connectivité. Ces matrices représentent la probabilité que des larves issues d'une zone côtière donnée se retrouvent dans une autre zone. Cette connectivité permet aussi d'élaborer une cartographie de la distance à la côte des larves à la fin du stade larvaire, en fonction des zones de pontes. Cette cartographie met également en évidence les zones propices à la rétention larvaire sur la bande côtière, et montre les zones pour lesquelles les larves sont transportées au large, où leur chance de survie est plus faible.

3. Discussion

De prime abord, les études lagrangiennes connaissent certaines limites. En effet, pour chacun des scénarios pris en compte, de nombreuses approximations ont été considérées, ce qui biaise nécessairement les résultats obtenus.

Concernant l'estimation des dérives de nappes d'hydrocarbures, il existe différents modèles complexes de dérive de pollutions marines. Comme exemples, il y a MOTHY, développé par Météo-France (P. Daniel, 1996) ; GNOME, développé par la NOAA

(C. J. Beegle-Krause, 2001) ; ou OILTRANS (A. Berry et *al.*, 2015). Ces modèles prennent en compte les différents processus de transformation et de transport, qui agissent directement sur les propriétés du produit et peuvent modifier le comportement hydrodynamique du polluant (A. K. Mishra et G. S. Kumar, 2015). N'ayant pas été pris en compte ici, certains processus concernent l'évaporation des hydrocarbures (Stiver et D. Mackay, 1984 ; M. Fingas, 1995), l'étalement et le fractionnement de la nappe (J. A. Fay, 1969 ; D. P. Hoult, 1972 ; W. J. Lehr et *al.*, 1984), l'émulsification créée par les vagues (D. Mackay et *al.*, 1980 ; P. Sebastiao et C. G. Soares, 1995) ou la dissolution (H. T. Shen et *al.*, 1993 ; M. R. Riazi et Y. A. Roomi, 2008), la biodégradation, la sédimentation, etc. De même, la houle, qui peut impacter la nature des nappes ainsi que les courants par dérive de Stokes, n'a pas été incluse comme forçage au modèle hydrodynamique. Egalement, notons que les puits de pétrole en activité situés au sud de la zone modélisée, ne sont logiquement pas représentés dans nos diagnostics. Mais les particules libérées vers la frontière sud du modèle simulent le transport de polluants qui se propageraient au sein de la zone d'étude depuis le sud.

De manière similaire, il existe des modèles complexes de dérive larvaire, comme par exemple ICHTHYOP (C. Lett et *al.*, 2008). ICHTHYOP a été utilisé pour simuler le transport larvaire dans une multitude d'écosystèmes distincts. Car il permet de prendre en compte plusieurs facteurs biologiques tels que la flottabilité des œufs, la croissance des larves, la mortalité en fonction des paramètres physiques (température, salinité, etc.), les déplacements nyctéméraux, etc. Notre simulation rend compte, quant à elle, d'une advection passive des larves en négligeant ces différents processus ; car ils sont méconnus pour les espèces ciblées.

Pour l'ensemble des scénarios et simulations, les particules ne peuvent pas s'échouer sur la côte. En effet, celle-ci constitue une barrière infranchissable que les particules contournent en glissant sur les faces des premières cellules "terrestres". Par contre, sortant du territoire modélisé par les frontières ouvertes (Sud, Nord et Ouest), les particules ne peuvent pas pénétrer de nouveau dans la région étudiée. Finalement, les déchets urbains sont libérés de façon continue et similaire suivant l'ensemble des sources ; ce qui n'est évidemment pas forcément le cas dans la réalité (variation des pollutions selon les sources et la saison). Les pollutions considérées sont de type macro-déchets flottants. Les pollutions miscibles/liquides ne sont pas considérées, car elles nécessiteraient une approche eulérienne et non lagrangienne.

Conclusion

L'étude méthodologique a porté sur l'estimation des dérives de nappes d'hydrocarbures, les pollutions et les transports larvaires autour de l'Arc d'Emeraude, entre l'Estuaire du Komo et la Baie de la Mondah, avec Port-Gentil comme source de pollution des nappes d'hydrocarbures et l'agglomération de Libreville pour la production de déchets. Les simulations numériques lagrangiennes ont donc permis de déterminer la vulnérabilité des côtes gabonaises, par rapport aux fuites d'hydrocarbures issues des plateformes pétrolières en activité dans la région de Port-Gentil et aux rejets urbains de contaminants plastiques issus de l'agglomération de Libreville. Ces simulations ont également permis d'estimer les zones côtières favorables à la rétention ou à la dispersion larvaire, et d'évaluer la connectivité entre les différentes zones côtières le long du littoral gabonais.

Références bibliographiques

- BEEGLE-KRAUSE Cynthia Juyné, 2001, "General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME). A New Spill Trajectory Model", *OSC 2001 Proceedings*, Tampa, FL, March 26-29, St. Louis, MO: Mira Digital Publishing, Inc., vol. 2, pp. 865-871.
- BERRY Alan, DABROWSKI Tomasz et LYONS Kieran, 2012, "The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea", *Marine Pollution Bulletin*, n°64 (11), pp. 2489-2501.
- DANIEL Pierre, 1996, "Operational forecasting of oil spill drift at Météo-France", *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 3, n° 1/2, pp. 53-64.
- FAY James A., 1969, *The Spread of oil on a water surface. Oil on the sea*, D. Hoult (Ed.), Plenum Press.
- FINGAS Merv, 1995, "Water-in-Oil Emulsion Formation: A review of Physics and Mathematical Modelling", *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 2, n°1, pp. 55-59.
- HOULT David P., 1972, "Oil spreading on the sea", *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, pp. 341-367.
- LEHR W. Jackson., FRAGA R. J., BELEN M. S., CEKIRGE Huseyin Murat, 1984, "A New Technique to Estimate Initial Spill Size Using a Modified Fay-type Spreading Formula", *Marine Pollution Bulletin*, vol. 15, n°9, pp. 326-329.
- LETT Christophe, VERLEY Philippe, MULLON Christian, PARADA Carolina and al., 2008, "A lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics", *Environmental Modelling and Software*, n° 23, pp. 1210-1214.

- MACKAY Donald, PATERSON Samuel, TRUDEL K., 1980, *A mathematical model of oil spill behavior*, Environment Canada Report EE-7.
- MARSALEIX Patrick, AUCLAIR Francis, FLOOR Jochem Willem, HERRMANN Marine Julie and *al.*, 2008, "Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models", *Ocean Modelling*, 20, 61-89, [on line], URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2007.07.005>.
- MARSALEIX Patrick, AUCLAIR Francis, ESTOURNEL Claude, 2009, "Low-order pressure gradient schemes in sigma coordinate models: The seamount test revisited", *Ocean Modelling*, 30, Issues 2-3, pp. 169-177, [on line], URL: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.06.011>.
- MARSALEIX Patrick, DUHAUT Thomas, NGUYEN Cyril, ULSES Caroline, 2012, "Alternatives to the Robert-Asselin filter", *Ocean Modelling*, n° 41, pp. 53-66, [on line], URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.11.002>.
- MISHRA Aditya Kumar, KUMAR G. Suresh, 2015, "Weathering of oil spill: modeling and analysis", *Aquatic Procedia*, n°4, pp. 435-442.
- RIAZI Masoud R., ROOMI Y. A., 2008, "A model to predict rate of dissolution of toxic compounds into seawater from an oil spill", *International journal of toxicology*, n°27(5), pp. 379-386.
- SEBASTIAO P., SOARES C. Guedes, 1995, "Modeling the fate of oil spills at sea", *Spill Science & Technology Bulletin* n° 2(2), pp. 121-131.
- SHEN Hung T., YAPA Poojitha D., WANG De S., YANG Xiao. Q., 1993, "A mathematical model for oil slick transport and mixing in rivers", *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*, no. CRREL-SR, pp. 93-21.
- STIVER Warren et MACKAY Donald, 1984, "Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures", *Environ. Sci. Technol*, vol. 18, pp. 834-840.