



**AGROCAMPUS OUEST**  
**CFR de RENNES**  
65 rue de Saint Briec  
CS 84215  
35042 Rennes Cedex

**IRD**  
Avenue Jean Monnet  
BP 171  
34203 Sète Cedex France

Mémoire de Fin d'Etudes

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences  
Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2013-2014

Spécialisation : **Halieutique** option **Ressources et Ecosystèmes Aquatiques.**

**Dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP des thoniers  
senneurs français dans l'océan indien.**

Par : **Erwan SAULNIER**



Bon pour dépôt (version définitive)   
Ou son représentant  
Date : 03/10/2014 Signature :  
Autorisation de diffusion : Oui  Non

Soutenu à RENNES le 11/09/2014

**Devant le jury :**

*Sous la présidence de : Etienne Rivot, Agrocampus-ouest.*

Maître de stage : Nicolas Bez, IRD.

Enseignant référent : Etienne Rivot, Agrocampus-ouest.

Autres membres du jury : Youen Vermard, Ifremer

Didier Gascuel, Agrocampus-ouest.

*"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent  
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".*

## Fiche de diffusion du mémoire

A remplir par l'auteur<sup>(1)</sup> avec le maître de stage.

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

### Préciser les limites de la confidentialité<sup>(2)</sup> :

➤ Confidentialité absolue :  oui  non  
(ni consultation, ni prêt)

↳ Si oui  1 an  5 ans  10 ans

➤ A l'issue de la période de confidentialité **ou** si le mémoire n'est pas confidentiel, merci de renseigner les éléments suivants :

Référence bibliographique diffusable<sup>(3)</sup> :  oui  non

Résumé diffusable :  oui  non

Mémoire consultable sur place :  oui  non

Reproduction autorisée du mémoire :  oui  non

Prêt autorisé du mémoire :  oui  non

.....  
Diffusion de la version numérique :  oui  non

↳ Si oui, l'auteur<sup>(1)</sup> complète l'autorisation suivante :

*Je soussigné, Erwan Saulnier, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.*

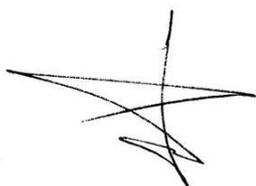
Date : 03/10/2014

Signature :

Rennes, le 03/10/2014

Le maître de stage<sup>(4)</sup>,

Nicolas Bez, IRD



L'auteur<sup>(1)</sup>,

Erwan Saulnier



L'enseignant référent, Etienne Rivot

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme.

## Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Nicolas Bez pour m'avoir encadré durant ces 6 mois de stage, et m'avoir fait découvrir à la fois la pêcherie thonière et la géostatistique. Ce stage n'a pas été « un long fleuve tranquille », mais les difficultés rencontrées m'ont permis d'en apprendre d'autant plus. Merci Nicolas pour ta gentillesse, ton optimisme, et pour les connaissances que tu m'as transmises.

Merci également à Etienne Rivot et Didier Gascuel pour le suivi de ce stage à distance et leurs précieux conseils.

Un grand merci à tous les membres de l'UMR Eme pour leur accueil, et tout particulièrement à Daniel Gaertner, Laurent Dagorn, Sylvain Bonhommeau, et Emmanuel Chassot pour leur disponibilité et pour m'avoir fait bénéficier de leur grande connaissance de la pêcherie thonière. Merci à toi Emmanuel pour avoir pris le temps à plusieurs reprises de discuter avec moi par skype depuis les Seychelles !

Merci à Daniel Gaertner et à Nicolas Bez de m'avoir permis de participer à la première réunion du projet de recherche européen CECOFAD du 1<sup>er</sup> au 3 avril 2014 à Montpellier.

Merci à Christophe Lett et à Nicolas Bez de m'avoir permis d'aller présenter mes travaux de stage de Master 1 à la réunion annuelle du GDR MarCO (Marine French Connection) du 2 au 3 juin à Sète.

Merci à Laurent Floch pour son aide en gestion de base de données, et à Monique Simier pour ses conseils en statistique.

Merci également à l'équipe des doctorants, stagiaires et jeunes chercheurs de l'UMR Eme pour les bons moments passés ensemble.

Merci aux copains de Nouméa d'être venus jusque dans le pays de Georges Brassens pour me voir, ce fut un chouette week-end !

Enfin, un grand merci à ma famille pour son soutien durant l'ensemble de ce stage, et plus particulièrement durant la phase de rédaction du mémoire.

## AVANT-PROPOS

Ce stage a été réalisé dans le cadre du projet de recherche européen CECOFAD (Catch, Effort, and ECOsystem impacts of FAD<sup>1</sup> fishing), dont l'objet d'étude est la pêche à la senne des thons tropicaux sur les DCPs dérivants. Les principaux objectifs de ce projet sont (i) de définir une unité d'effort de pêche pertinente pour la pêche à la senne sur DCP, (ii) développer une méthode de standardisation des CPUEs pour les trois principales espèces de thons tropicaux ciblées par les senneurs, et (iii) évaluer l'impact de la pêche sur DCP sur la faune épipélagique associée (raies, requins par exemple).

La problématique initiale de ce stage s'inscrivait dans l'item (ii) du projet CECOFAD. L'objet de recherche était de réutiliser une ancienne méthode de standardisation de CPUEs reposant sur l'analyse de données fines (coup de pêche après coup de pêche) à l'aide d'une approche géostatistique (variogrammes). Il s'agissait plus précisément de déterminer la structure spatiale des CPUEs à l'aide de l'outil variographique, et de calculer deux à deux les puissances de pêche relatives des navires comme une moyenne du ratio de leur CPUEs pondérée par le variogramme (Laurec,1977). Cependant, l'étude réalisée pendant la première partie du stage a montré que les CPUEs locales des thoniers senneurs ne présentaient aucune structure spatiale (annexe 6), mettant un terme au projet initial d'utiliser cette méthode pour standardiser les CPUEs des senneurs.

Mise à part l'annexe 6, ce travail et les raisons de son échec ne seront pas développer dans ce rapport. Notons cependant que le travail de Laurec (1977) avait été réalisé à partir de CPUEs de canneurs et de palangriers et n'avait jamais été testé sur des CPUEs de senneurs, qui semblent présenter une hétérogénéité locale bien supérieure. Il a donc été nécessaire de réorienter cette étude autour d'une nouvelle problématique plus d'un mois après le début du stage. En l'absence d'une CPUE pertinente pour la pêche à la senne sur DCP, la problématique finalement retenue a eu une visée plus modeste : l'étude de la dynamique spatio-temporelle d'une métrique caractérisant l'activité de pêche des senneurs dans l'océan indien : la densité locale de calées sur DCP.

*« Ce n'est pas toujours dans les vieux pots qu'on fait les meilleures soupes (de thons) »<sup>2</sup> ... mais on ne pouvait pas le savoir avant d'essayer.*

---

<sup>1</sup> FAD : Fishing Artificial Device ; terme anglais, équivalent de DCP : Dispositif de concentration de Poissons.

<sup>2</sup> Cette dernière phrase fait référence au titre initial du stage : « C'est dans les vieux pots qu'on fait les meilleures soupes ... de thons », qui faisait référence à l'idée de réutiliser cette ancienne méthode de standardisation de CPUEs développée par Laurec (1977).

<b>1. INTRODUCTION</b> .....	1
<b>1.1. Thoniers senneurs et DCP : contexte général et historique de la pêche</b> .....	1
<b>1.2. Pêche à la senne et évaluation de stocks</b> .....	3
<b>2. MATERIEL ET METHODES</b> .....	5
<b>2.1. Présentation des données</b> .....	5
2.1.1. Données de captures .....	5
2.1.2. Données VMS .....	5
<b>2.2. Evolution temporelle des données de captures et saisonnalité de l'activité de pêche</b> .	6
<b>2.3. Strates spatio-temporelles</b> .....	8
2.3.1. Echelle spatio-temporelle .....	8
2.3.2. Limites géographiques des zones d'étude .....	9
<b>2.4. Intensité locale de l'effort de pêche sur DCP</b> .....	10
<b>2.5. Structuration spatiale de la densité des calées réalisées sur DCP</b> .....	11
2.5.1. Estimation des variogrammes empiriques .....	11
2.5.2. Estimation et modélisation des variogrammes moyens .....	12
2.5.3. Simulation par bande tournantes et choix des modèles utilisés .....	14
2.5.4. Comparaison des variogrammes trimestriels théoriques .....	15
<b>2.6. Distribution spatio-temporelle des calées sur DCP dans l'océan indien</b> .....	16
<b>3. RESULTATS</b> .....	17
<b>3.1. Echelle spatio-temporelle</b> .....	17
<b>3.2. Intensité locale de l'effort de pêche sur DCP</b> .....	18
<b>3.3. Structuration spatiale de la densité des calées sur DCP</b> .....	22
3.3.1. Estimation et pondération des variogrammes empiriques .....	22
3.3.2. Ajustement des modèles aux variogrammes empiriques moyens .....	22
3.3.3. Variations interannuelles des variogrammes empiriques .....	23
3.3.4. Comparaison des variogrammes trimestriels théoriques .....	24
<b>3.4. Distribution spatio-temporelle des calées sur DCP</b> .....	25
<b>4. DISCUSSION</b> .....	28
<b>4.1. Echelle spatio-temporelle</b> .....	28
<b>4.2. Intensité locale de l'effort de pêche</b> .....	29
<b>4.3. Structuration spatiale de la densité des calées sur DCP</b> .....	31
4.3.1. Pondération des variogrammes empiriques .....	31
4.3.2. Variogrammes modélisés : ajustement et structures caractéristiques .....	31
4.3.3. Utiliser 4 variogrammes moyens modélisés : un choix pertinent ? .....	32
<b>4.4. Distribution spatio-temporelle des calées sur DCP et distribution de la ressource</b> .....	33
<b>5. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b> .....	34
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	36

Annexe 1 : Résultats des classifications réalisées avec la méthode des « k-means » pour définir l'échelle temporelle .....	40
Annexe 2 : Résultat de la classification hiérarchique utilisée pour définir l'échelle temporelle (dendogramme) .....	41
Annexe 3 : Relations entre les espérances, les variances et les variogrammes d'une variable aléatoire Z suivant une loi log-normale, et sa transformation logarithmique $Y=\log(Z)$ .....	42
Annexe 4 : Cartes de l'effort de pêche sur DCP entre 2000 et 2011 au cours du trimestre 4 (septembre-octobre-novembre).....	43
Annexe 5 : Atlas des cartes de la distribution spatiale potentielle des thons tropicaux capturables sous DCP .....	45
Annexe 6 : Variogrammes empiriques annuels des captures/calée réalisées sur DCP dans l'océan indien entre 1991 et 2012 .....	53
Annexe 7 : Algorithme utilisé pour calculer les heures de lever et de coucher du soleil .....	55

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Thoniers senneurs et DCP : contexte général et historique de la pêche

De nombreuses espèces de poissons pélagiques présentent une forte attraction pour les objets flottants à la surface de l'océan (Castro *et al.* 2002). Si les causes de ce comportement sont encore aujourd'hui mal connues, cette observation a été utilisée dès l'Antiquité par les pêcheurs du bassin méditerranéen pour capturer certaines espèces pélagiques (Dempster & Taquet 2004). Deux siècles plus tard, cette technique de pêche est toujours utilisée : les objets flottants sont même devenus des engins de pêche déterminants pour les thoniers senneurs qui les utilisent pour accroître leurs captures de thons albacore (*Thunnus albacares*), patudo (*Thunnus obesus*) et listao (*Katsuwonus pelamis*), les trois principales espèces commerciales de thons tropicaux (Fonteneau *et al.* 2013).

La pêche industrielle des thoniers senneurs européens a débuté dans les années 1960 dans l'océan atlantique, avant de progressivement s'étendre à l'océan indien au début des années 1980. A l'origine, les senneurs ciblaient principalement les bancs de thons qui évoluaient librement à proximité de la surface, appelés « bancs libres », et repérables grâce à la présence de bouillonnements, de sauts, et de groupes d'oiseaux marins. Ils pêchaient également à proximité d'objets flottants naturels d'origine terrestre, tels que les troncs d'arbre, les branches de palmiers, mais également autour des mammifères marins (baleines, requins baleine, dauphins), qui sont souvent associés aux bancs de thons (Dagorn *et al.* 2013). De nombreuses hypothèses ont été émises pour expliquer l'attraction exercée par les objets flottants sur les espèces pélagiques, et notamment les thonidés. Le regroupement des thons autour des objets flottants pourrait leur permettre de stimuler leur comportement grégaire, qui présente des avantages en terme de « fitness » : diminution de la prédation pour les juvéniles, augmentation des chances de reproduction et de leur capacité à trouver de la nourriture (« the meeting-point hypothesis », Dagorn & Fréon 1999). Ils pourraient également constituer des indicateurs de zones productives. Comme les objets flottants d'origine terrestre sont apportés par les rivières et les fleuves, ils évoluent généralement dans une masse d'eau riche en nutriments. Ces nutriments favoriseraient la production primaire, qui à son tour augmenterait la quantité de proies disponibles pour les thons (« the log-hypothesis », Hall, 1992).

Pour les pêcheurs, ce comportement d'agrégation est très utile. Visibles depuis la surface, les objets flottants permettent aux senneurs de réduire le temps de recherche nécessaire à repérer la ressource, et d'augmenter considérablement sa capturabilité (Dagorn *et al.* 2013). Le taux de réussite des calées<sup>3</sup> réalisées autour des objets flottants est en effet stable et nettement plus élevé (90%) que celui des calées réalisées sur banc libre (50-70%), qui est aussi plus variable (Miyake *et al.* 2010 ; Pianet *et al.* 2011 ; Fonteneau *et al.* 2013). Etant moins mobiles lorsqu'ils sont agrégés sous des objets flottants, les thons deviennent beaucoup plus vulnérables à la pêche.

---

<sup>3</sup> Une calée désigne un coup de pêche, durant lequel les pêcheurs tentent de capturer un banc de thons en l'encerclant avec la senne.

Les avantages considérables de l'utilisation des objets flottants naturels ont poussé les thoniers de l'océan atlantique à construire dès les années 1980 leurs propres objets flottants, cette fois-ci artificiels. Ces objets flottants dérivants<sup>4</sup>, appelés communément Dispositif de Concentration de Poissons (DCP), sont fabriqués à l'aide de matériaux peu coûteux. Ils sont constitués généralement d'un radeau en bambou de 4 à 6 m<sup>2</sup> couvert par un vieux filet de pêche à la senne, qui s'étend sous la surface à une profondeur de 10 à 15m dans le cas des thoniers européens de l'océan indien (Dagorn *et al.* 2013).

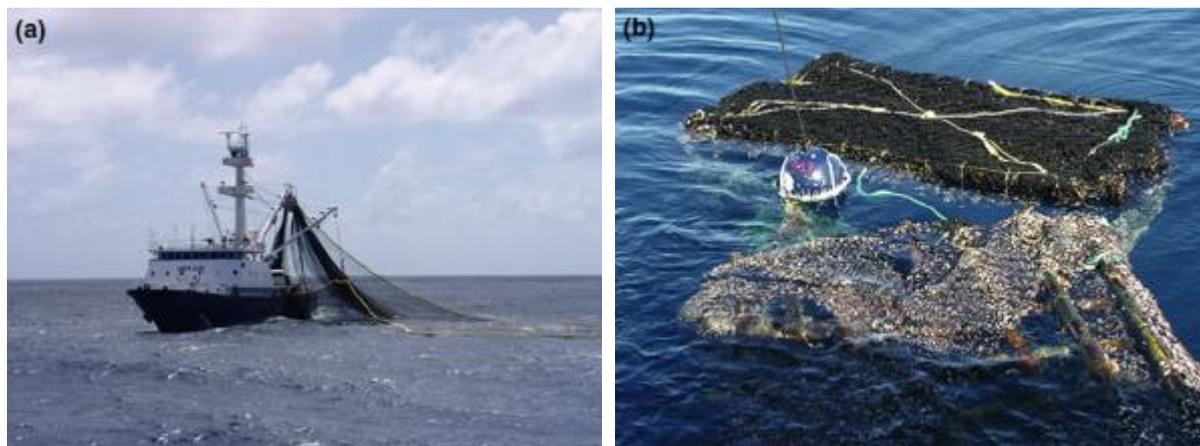


Figure 1 : Thonier senneur en train de relever la senne (a) (source : FADIO/IRD-Ifremer/D.Itano) et DCP équipé d'une bouée avec balise GPS (b) (source : FADIO/IRD-Ifremer/G.Moreno). Photographies publiées dans Dagorn *et al.* 2013).

Dans les années 1980, une bouée avec un émetteur radio était attachée aux DCPs et permettait de les suivre à des distances de 500 à 1000 milles nautiques. A partir des années 1990, le nombre de DCPs artificiels a augmenté de manière considérable et leur utilisation au sein de la pêcherie européenne s'est étendue à l'océan indien. Cette augmentation s'est encore accrue à partir des années 2000. Les émetteurs radio ont été remplacés à cette période par des balises GPS (fin des années 1990), et de plus en plus de DCPs sont aujourd'hui équipés d'échosondeurs, permettant aux pêcheurs d'estimer en temps réel la biomasse agrégée sous le radeau (Dagorn *et al.* 2013).

L'utilisation massive des objets flottants artificiels a contribué fortement à l'augmentation globale des captures de thons à l'échelle mondiale depuis les années 1980. Aujourd'hui, les captures réalisées sur DCP par les thoniers senneurs représentent pratiquement la moitié des captures mondiales totales des principales espèces commerciales de thons (Fonteneau *et al.* 2013). Le thon listao (*Katsuwonus pelamis*) représente 60-70 % de ces captures, mais ces dernières sont toujours accompagnées d'une proportion non-négligeable de thons albacore (*Thunnus albacares*) et de thons patudo (*Thunnus obesus*).

L'utilisation massive des DCPs artificiels n'a pas été la seule cause de l'augmentation des captures mondiales des senneurs. Des modifications majeures des équipements de détection de la ressource ont également eu lieu au cours des deux dernières décennies, affectant aussi bien la pêche sur banc libre que sur DCP. Notons par exemple l'augmentation de la taille de la senne, l'utilisation de radars à oiseaux et de sonars de plus

<sup>4</sup> Dans le cas de la pêche à la senne, les DCPs utilisés sont des objets flottants dérivants au gré des courants puisqu'ils sont utilisés en domaine pélagique, à une distance souvent importante des côtes. Il existe cependant des DCPs fixes dits « ancrés », utilisés en zone côtière avec le même objectif depuis plus d'un siècle dans certaines zones du pacifique et en Méditerranée (Dempster & Taquet 2004).

en plus performants, l'acquisition de cartes satellite de la température océanique de surface et de la production primaire, ou encore l'utilisation de navires auxiliaires (« supply vessels »), qui secondent les thoniers senniers et dont l'objectif est de déployer, entretenir et surveiller les DCPs mis à l'eau (Torres-Irineo *et al.* 2014).

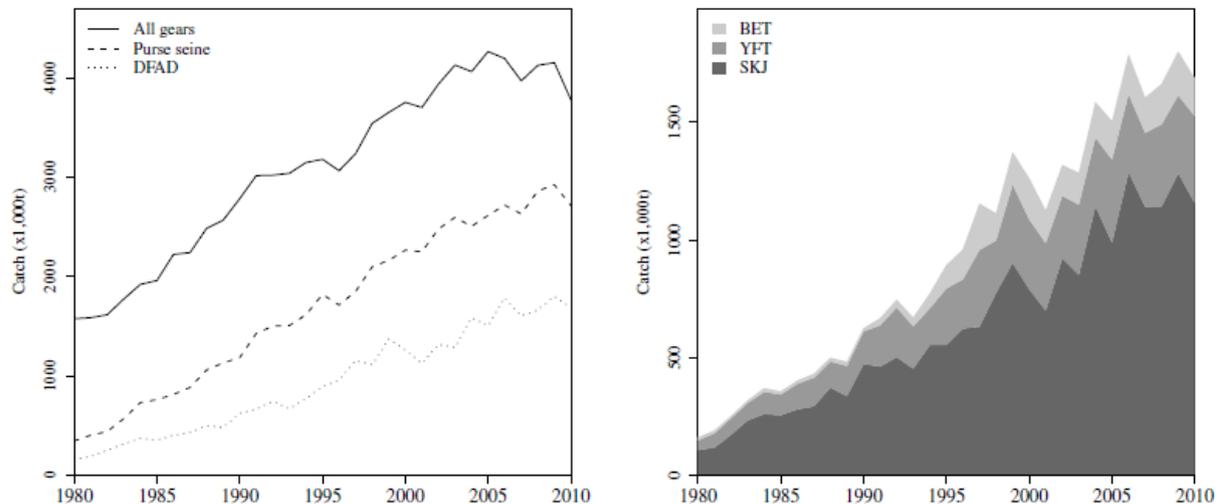


Figure 2 : Evolution des captures mondiales des principales espèces commerciales de thon tropical entre 1980 et 2010 tous engins de pêche confondus (ligne continue), à la senne (tiret), à la senne sur DCP (pointillé), à droite ; évolution des captures mondiales de thon albacore (YFT : Yellowfin Tuna), patudo (BET : Bigeye Tuna) et listao (SKJ : Skipjack tuna) réalisées sur DCP entre 1980 et 2010, à gauche (source : Fonteneau *et al.* 2013).

L'ensemble de ces avancées technologiques a provoqué une diminution notable du temps de recherche nécessaire à la localisation des bancs de thons. Cette modification profonde de l'effort de pêche rend les tentatives d'évaluations de stocks des thons tropicaux à partir des données de pêche à la senne particulièrement complexes. Pour cette raison, elles sont réalisées quasi-exclusivement à partir des données palangrières.

## 1.2. Pêche à la senne et évaluation de stocks

L'évaluation des stocks halieutiques peut s'effectuer à partir de deux sources de données différentes : des données de campagnes scientifiques, qui fournissent un indice d'abondance reflétant directement la biomasse de l'espèce étudiée ; et des données de captures commerciales, qu'il est nécessaire de standardiser par l'effort de pêche pour obtenir une CPUE<sup>5</sup> proportionnelle à l'abondance. Dans le cas des grands pélagiques migrateurs comme le thon, la superficie très importante de leur habitat rend impossible la mise en œuvre de campagnes scientifiques. Les seules données disponibles pour l'évaluation des stocks sont donc des données commerciales récoltées dans les livres de bord des pêcheurs.

L'utilisation des CPUEs comme indice d'abondance repose sur l'hypothèse de proportionnalité de la relation CPUE~Abondance. Si cette hypothèse a été remise en cause de manière générale par de nombreux auteurs (Beverton & Holt 1957; Hilborn & Walters 1992) ; Harley *et al.* 2001; Walters, 2003 ; Carruthers *et al.* 2011), elle est particulièrement critiquable dans le cas des CPUEs des thoniers senniers (Fonteneau *et al.* 1999 ; Gaertner & Dreyfus-Leon 2004 ; Fonteneau *et al.* 2013 ; Torres-Irineo *et al.* 2014). L'effort de pêche

<sup>5</sup> CPUE : Capture Par Unité d'Effort

couramment utilisé dans cette pêcherie est le temps de recherche de la ressource ; la CPUE correspondante est donc le ratio des captures divisées par le temps de recherche. Cette CPUE s'avère cependant inadaptée pour de nombreuses raisons. Les évolutions technologiques majeures des outils de détection, la très grande mobilité des senneurs, et l'espionnage et/ou la coopération entre navires permettent aujourd'hui aux pêcheurs de réallouer très rapidement leur effort de pêche vers des zones productives. La concentration de nombreux bateaux dans des zones riches produit ainsi des captures élevées associées à un effort de pêche élevé, ce qui génère des CPUEs relativement faibles qui reflètent peu l'abondance locale (Chassot *et al.* 2012).

Le fait que les fortes captures soient associées à un effort de pêche élevé suggèrent l'idée que l'effort de pêche des senneurs est fortement corrélé à l'abondance locale (Fonteneau *et al.*, 1999 ; Kaplan *et al.* 2014). Le niveau technologique très élevé des moyens de détection de la ressource permettrait ainsi aux senneurs de concentrer leur effort dans les zones productives, et de quitter rapidement une zone qui ne l'est plus.

Par ailleurs, les navires ciblent indifféremment les bancs libres et les DCPs au cours d'une même marée. Or, le diagramme d'exploitation est très différent pour ces deux types de bancs. Les thons albacore et patudo adultes sont principalement capturés sur banc libre ; les bancs sont alors très souvent monospécifiques (Fonteneau *et al.* 2013). A l'inverse, les thons listao sont capturés principalement sur DCP. Les bancs capturés sont dans ce cas systématiquement plurispécifiques, composés principalement de thons listao adultes (67%), et de juvéniles de thons albacore (25%) et patudo (8%)<sup>6</sup> (Dagorn *et al.* 2013). Bien qu'aucun des ces 3 stocks ne soit aujourd'hui surexploité (IOTC, 2013), l'augmentation des prises de juvéniles de thons albacore et patudo pourrait impacter à plus ou moins long terme leur renouvellement (Dagorn *et al.* 2013). Enfin, si la mesure traditionnelle de l'effort de pêche des senneurs était déjà fortement critiquée pour la pêche sur banc libre, elle s'avère totalement inadaptée pour la pêche sur DCP depuis l'utilisation massive d'objets flottants artificiels équipés de balise GPS et d'échosondeurs (Fonteneau *et al.* 2013).

De nombreuses études halieutiques soulignent l'importance de suivre les variations de l'allocation spatiale de l'effort de pêche, et d'en tenir compte dans les procédures de standardisation des CPUEs (Walters, 2003 ; Carruthers *et al.* 2011). Pourtant, aucune nouvelle mesure de l'effort de pêche sur DCP n'a été développée jusqu'à aujourd'hui. Actuellement, l'effort de pêche sur DCP correspond principalement au nombre de DCPs mis à l'eau par chaque bateau, et au temps qu'ils passent dans l'océan (Chassot *et al.* 2012 ; Kaplan *et al.* 2014). Cependant, de telles informations sont souvent confidentielles, et commencent tout juste à devenir accessibles dans le cas de la flottille française. Par ailleurs, les senneurs pêchent également sur des objets flottants naturels (troncs d'arbre, branches de palmier), et sur des DCPs artificiels qui ne sont pas les leurs. Le nombre de calées effectuées sur DCP reste donc probablement la meilleure mesure de l'effort de pêche local associé à ce type d'exploitation dont on dispose aujourd'hui (Kaplan *et al.* 2014).

Dans ce contexte, l'objectif de la présente étude est d'analyser l'évolution de la distribution spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP des senneurs de l'océan indien au cours de la période 2000-2012. L'évolution temporelle de 4 indicateurs caractérisant l'activité de pêche des thoniers a tout d'abord été analysée à partir des données logbook<sup>7</sup>. La structure spatiale

---

<sup>6</sup> Chiffres correspondant à la moyenne 2000-2009 des captures sur DCP dans l'océan indien (Dagorn *et al.* 2013).

<sup>7</sup> Logbook = livre de bord des navires de pêche.

de l'effort de pêche sur DCP a ensuite été étudiée et sa stabilité temporelle testée pour la première fois en croisant les données VMS et les données logbook des navires. Enfin, sous l'hypothèse de l'existence d'une corrélation positive entre effort de pêche et abondance locale, des cartes de krigeage ont été produites afin d'étudier l'évolution de la distribution spatiale de la fraction des stocks de thons tropicaux exploités sur DCP au cours de la dernière décennie.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Présentation des données

#### 2.1.1. Données de captures

Les données commerciales utilisées dans cette étude sont les données de captures de thons albacore (*Thunnus albacares*), patudo (*Thunnus obesus*) et listao (*Katsuwonus pelamis*) réalisées entre 1991 et 2012 par les thoniers senneurs français dans l'océan indien. Elles ont été fournies par l'Observatoire Thonier de l'IRD<sup>8</sup> qui les collecte à partir des livres de bord des navires ou « logbooks ». Lorsqu'une calée est réalisée, le capitaine du navire note systématiquement dans le livre de bord la position géographique du navire (longitude, latitude en degré-minute), la date de la calée, le nom des espèces capturées (albacore, patudo ou listao), la catégorie des captures (-10kg ; 10-30kg ; +30kg), le type de banc sur lequel la calée a été effectuée (banc libre ou DCP), et une estimation par espèce du tonnage réalisé. Souvent imprécises (catégorie/tonnage estimés), ces données sont ensuite corrigées par l'Observatoire Thonier à partir d'un protocole standardisé d'échantillonnage des cuves des navires lors des débarquements aux ports.

Seules la date des calées, leur position géographique et le type de banc ciblé ont été utilisées comme données dans cette étude.

#### 2.1.2. Données VMS

Le système VMS (« Vessel Monitoring System ») est un outil d'acquisition de données par satellite largement utilisé à travers le monde qui permet le suivi et la surveillance des activités halieutiques. Depuis le début des années 2000, tous les thoniers senneurs français sont équipés d'une balise GPS qui enregistre à intervalle de temps régulier (une heure) la position géographique du navire. L'identifiant du navire, ses coordonnées géographiques, et la date et l'heure du relevé sont transmis par satellite aux centres CLS (« Collective Localisation Satellites »), qui s'occupent de la collecte, du traitement et du stockage des données VMS. Ces données sont ensuite transmises aux institutions compétentes.

Les données VMS fournies par l'Observatoire Thonier ont été utilisées dans cette étude afin de délimiter la zone d'échantillonnage de la flottille française. Si les données de captures permettent de connaître la position géographique des coups de pêche, les données VMS apportent quant-à-elles une information supplémentaire. Elles permettent en effet de connaître l'ensemble de la zone prospectée par la flottille pendant une période donnée. La combinaison de ces deux sources de données permet ainsi de distinguer des zones

---

<sup>8</sup> L'Observatoire Thonier de l'IRD est l'organisme qui assure le suivi statistique et scientifique des pêches tropicales thonières françaises de surface dans les océans atlantique et indien.

géographiques prospectées par les thoniers senneurs, mais à l'intérieur desquelles aucun navire n'a pêché, signe d'une abondance faible ou nulle de la ressource pendant la période considérée.

Les activités de pêche et de recherche des thoniers senneurs sont exclusivement diurnes. En effet, un déploiement efficace de la senne exige une localisation très précise du banc de thons, qui ne peut s'effectuer que le jour. Il est donc nécessaire de supprimer les données VMS de nuit afin de définir la zone de prospection effective des navires (recherche + pêche). Un algorithme permettant de calculer les heures de lever et de coucher du soleil en fonction de la position géographique (longitude/latitude) et de la date (jour/mois/année) a été utilisé afin de filtrer les données (annexe 7). Seules les données VMS comprises entre le lever et le coucher du soleil ont été conservées.

## 2.2. Evolution temporelle des données de captures et saisonnalité de l'activité de pêche

Contrairement aux captures mondiales des thoniers senneurs qui ont augmenté de manière continue de 1980 et 2010 (Figure 2), les captures françaises réalisées dans l'océan indien ont varié de manière importante au cours de la période 1991-2012 (min = 65000 t en 2010) / max = 120 000 t en 2003). Elles diminuent de manière quasi-continue depuis 2003, en raison principalement d'une baisse des captures réalisées sur banc libre (BL) (Figure 3, a). Les captures réalisées sur DCP sont plus homogènes, mais diminuent aussi légèrement depuis 2002, malgré l'augmentation du nombre de DCPs utilisés chaque année. Le nombre de thoniers senneurs en activité a varié également de manière importante au cours de cette période, en particulier depuis le début des années 2000 (courbe rouge, Figure 3). Pour cette raison, la plupart des métriques étudiées dans cette étude seront divisées par le nombre de bateaux afin de s'affranchir des fluctuations de la taille de la flottille.

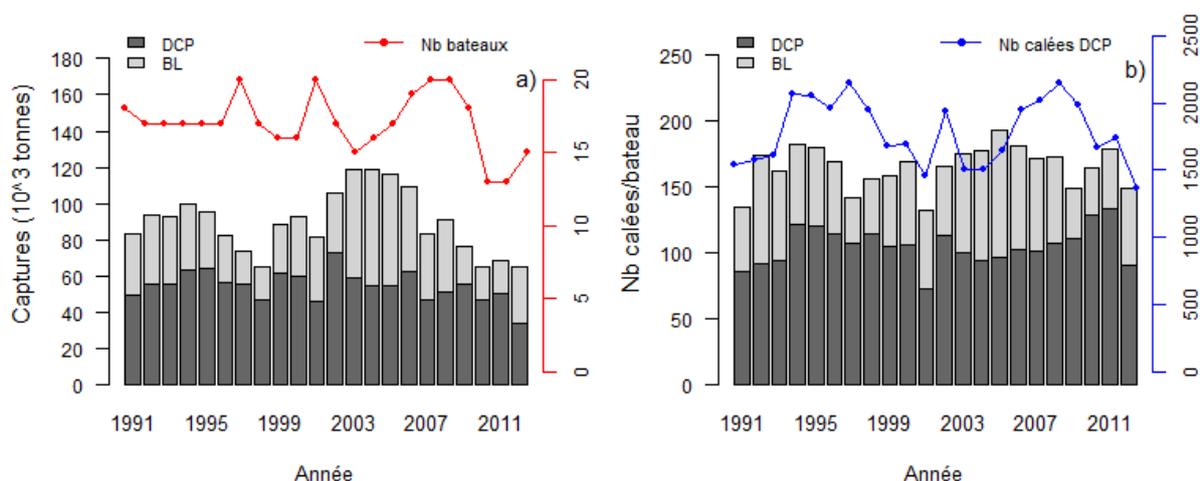


Figure 3 : Evolution des captures de thons tropicaux (albacore, listao, patudo) (a) et évolution du nombre total de calées/bateaux (b) réalisées par les thoniers senneurs français dans l'océan indien entre 1991 et 2012. Les données sont présentées par type de banc (BL/DCP). Les courbes rouge (a) et bleue (b) représentent respectivement l'évolution du nombre de senneurs français en activité et l'évolution du nombre total de calées sur DCP réalisées dans l'océan indien entre 1991 et 2012.

Le nombre annuel total de calées/bateau est resté globalement assez stable au cours de la période 1991-2012 (mean  $\pm$  sd = 165  $\pm$  16 calées/bateau). Le nombre de calées/bateau effectuées sur DCP a légèrement augmenté entre 2001 (132 calées/bateau) et 2011 (193

calées/bateau), avant de rechuter en 2012.

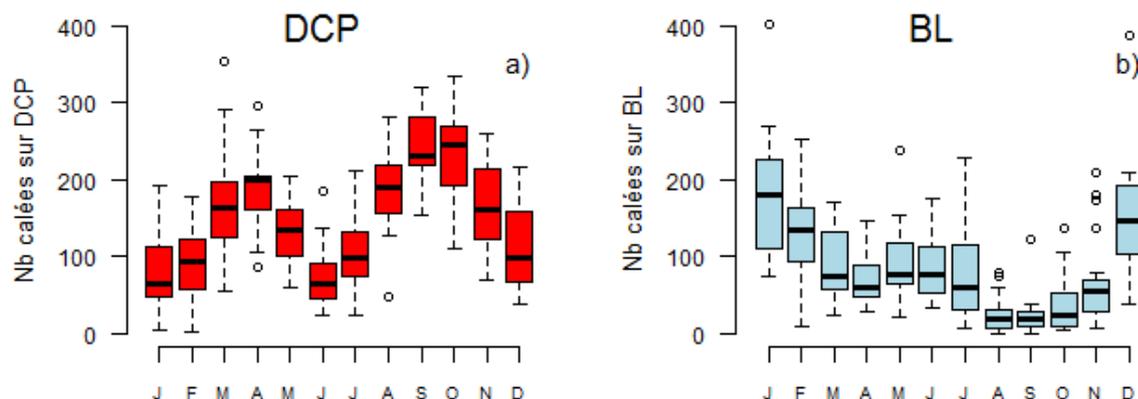


Figure 4 : Evolution du nombre de calées moyennes réalisées sur DCP (a) et sur banc libre (b) au cours de l'année (moyenne 1991-2012). Les mois de l'année (axe des abscisses) sont désignés par leur 1ère lettre.

L'activité de pêche des senneurs est marquée par une forte saisonnalité dans l'océan indien, qui se caractérise à la fois par une modification de la zone de pêche, et par des changements de stratégie de pêche (Kaplan *et al.* 2014). De décembre à février, les senneurs ciblent principalement les bancs libres de gros albacore adultes qui se regroupent pour la reproduction dans le centre de l'océan indien, entre l'archipel des Seychelles et celui des Chagos (Figure 5). Le nombre de calées sur banc libre atteint alors son maximum à cette période de l'année (Figure 4 b). Les navires se déplacent ensuite dans le nord du canal du Mozambique de mars à juin, puis remontent vers les côtes somaliennes de juillet à novembre. Deux saisons de pêche sur DCP se succèdent, avec des pics d'activité de mars à mai et d'août à novembre (Figure 4 a). De mars à mai, le canal du Mozambique est une zone riche en débris flottants d'origine terrestre (troncs d'arbre, branches de cocotier) : un grand nombre de calées est alors réalisé sur des objets flottants naturels. A l'inverse, la majeure partie des calées est réalisée sur des DCPs artificiels dans la zone somalienne (Kaplan *et al.* 2014). Le nombre de calées réalisées sur banc libre est particulièrement faible à cette période (Figure 5).

Les données logbook ne précisent pas la nature des objets flottants sur lesquels les calées sont effectuées (naturelle versus artificielle). Pour cette raison, le terme de DCP sera utilisé dans la suite de ce rapport pour désigner toutes les calées qui ne sont pas réalisées sur des bancs libres.

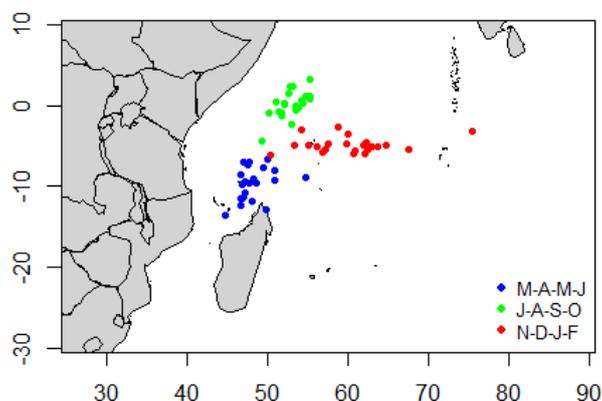


Figure 5 : Position géographique moyenne (centre de gravité) des calées réalisées au cours des 3 saisons décrites par Kaplan *et al.* (2014). Chaque point représente la position moyenne des calées d'une saison une année donnée (période 1991-2012).

## 2.3. Strates spatio-temporelles

### 2.3.1. Echelle spatio-temporelle

Afin d'estimer les densités locales de calées sur DCP dans l'océan indien, il est nécessaire de définir des strates spatio-temporelles au sein desquelles le nombre de calées réalisées est calculé. Pour cela, une grille régulière à maille carré couvrant l'ensemble de la zone d'étude a été utilisée. La densité locale de calées sur DCP est égale au nombre de calées effectuées au sein de chaque pixel  $i$  de la grille pendant un intervalle de temps  $t$ .

L'objectif de cette étude est d'analyser de manière fine les variations spatio-temporelles de la densité de calées sous DCP; l'échelle spatio-temporelle a donc été choisie de façon à être la plus petite possible, tout en contenant suffisamment de données pour que les cartes produites soient informatives. Notons qu'il est nécessaire de choisir une échelle temporelle cohérente avec l'échelle spatiale. Par ailleurs, l'échelle d'observation et d'analyse qui en résulte doit être également cohérente avec l'échelle de réalisation du processus étudié : l'activité de pêche des thoniers senneurs dans l'océan indien. Compte tenu de la durée moyenne d'une marée (30 à 45 jours), et de la très grande mobilité des senneurs au cours d'une même marée (Figure 6), une période d'un mois a été considérée comme une durée minimum pour cartographier la densité locale des calées.

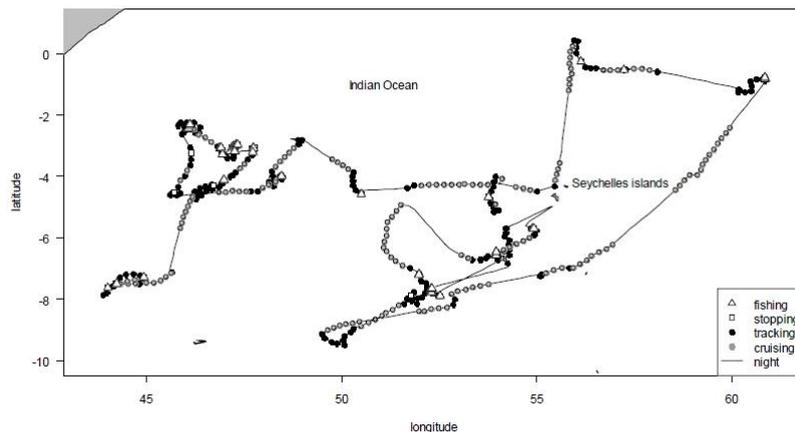


Figure 6 : Trajectoire d'un thonier senneur autour de l'archipel des Seychelles au cours d'une même marée, estimée à partir des données VMS. Les lignes continues représentent les trajets de nuit, et les points les trajets effectués le jour (source : Walker *et al.* 2010).

Trois tailles de pixel ont été testées avec une échelle spatiale d'un mois :  $0.25^\circ$  ;  $0.5^\circ$  ;  $1^\circ$ . Cependant, aucune des trois strates spatio-temporelles correspondantes (1 mois x  $0.25^\circ$  x  $0.25^\circ$ , etc.) ne contenait suffisamment de données pour pouvoir réaliser les analyses (aspect morcelé de la grille, nombre de calées par pixel très faible). Il a donc été nécessaire de définir une échelle temporelle supérieure à un mois, que l'on appellera communément trimestre dans la suite de cette étude.

Rappelons que l'activité de pêche des senneurs français est marquée par une forte saisonnalité dans l'océan indien. Afin de réaliser un découpage temporel annuel cohérent avec cette saisonnalité, le centre de gravité des calées sous DCP a été calculé chaque mois entre 2000 et 2012. Le centre de gravité (CG), égal à la position géographique moyenne des calées, est défini par :

$$CG = \frac{\sum_{i=1}^N x_i s_i}{\sum_{i=1}^N s_i}$$

avec  $x_i$  la position géographique de la calée, et  $s_i$  sa zone d'influence (Woillez *et al.* 2007). La zone d'influence  $s_i$  correspond à l'ensemble des points de l'espace qui sont plus proches du point  $i$  que des autres points échantillonnés. Cette pondération est nécessaire pour calculer un centre de gravité quand les données ne sont pas régulièrement espacées, ce qui est le cas des calées.

Une méthode de classification hiérarchique utilisant l'algorithme de Ward a ensuite été utilisée afin de définir des groupes de mois durant lesquels l'activité de pêche présente une homogénéité spatiale. Le critère de classification utilisé a été la position géographique (longitude/latitude) du centre de gravité mensuel des calées effectuées durant la période 2000-2012. La méthode de classification des « k-means » a également été utilisée dans le même but, avec le même critère de classification. Les résultats des deux méthodes ont été comparés afin de définir l'échelle temporelle finale. Afin d'être retenus, les groupes de mois devaient satisfaire deux conditions : (i) la continuité temporelle (même si ils se ressemblent d'un point de vue spatial, les mois de février et de novembre ne peuvent pas faire partie du même groupe) ; et (ii) être de même longueur (2 mois, 3 mois ou 4 mois).

Une fois l'échelle temporelle fixée, les trois tailles de pixel testées précédemment (0.25° ; 0.5° ; 1°) ont été à nouveau étudiées. Celle qui paraissait la plus appropriée a finalement été retenue.

### 2.3.2. Limites géographiques des zones d'étude

Les données VMS des thoniers senneurs ont été utilisées avec la grille précédemment définie afin de déterminer les zones de présence effective de la flottille française. Le nombre de données VMS par pixel a été calculé pour chaque trimestre entre 2000 et 2012. La zone de présence de la flottille correspond à l'ensemble des pixels de la grille contenant des données VMS.

Cette zone de présence a été utilisée pour définir les limites de la zone géographique au sein de laquelle on s'intéresse à la variable régionalisée (la densité de calées sur DCP). Certains pixels contenant des données VMS correspondent de manière évidente au trajet des navires entre les ports de débarquements (Maurice, La Réunion) et les zones de pêche. Ces pixels ont été systématiquement exclus des zones d'étude (Figure 7). Il en a été de même pour certaines calées très excentrées de la zone de pêche principale. Ces limites ont été définies manuellement pour chaque trimestre entre 2000 et 2012, et relèvent donc d'un choix subjectif.

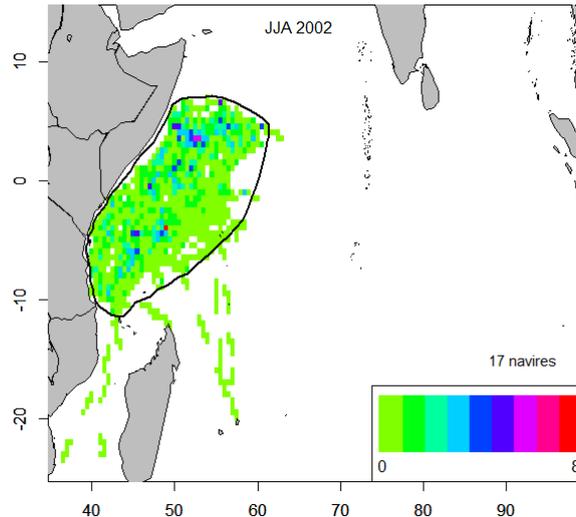


Figure 7 : Polygone (ligne noire) réalisé pour le trimestre 3 en 2002. Les pixels correspondant aux trajets des navires entre la zone de pêche et les ports de débarquements ont été exclus.

Cette approche permet d'attribuer la valeur « 0 calée » à l'ensemble des pixels situés à l'intérieur du polygone d'étude, contenant de la donnée VMS, et à l'intérieur desquels aucune calée n'a été réalisée durant le trimestre considéré. En effet, on fait l'hypothèse qu'un navire qui passe dans un pixel de la grille réalise une calée s'il rencontre un banc de thons sous DCP dans ce pixel.

Cette hypothèse n'est qu'en partie vraie. Le passage d'un seul bateau dans un pixel pendant une période de 3 mois ne permet pas a priori d'affirmer qu'il n'existait aucun DCP dans ce pixel ayant agrégé du thon. Par ailleurs, il arrive dans certains cas que les navires ne calent pas s'ils considèrent que la biomasse de thon agrégée sous le DCP est trop faible, ou si leurs cales sont pleines. On peut supposer également qu'ils ne caleront pas non plus s'ils passent à côté d'un DCP qui a agrégé du poisson, mais que le navire est déjà en train de traquer un banc libre d'albacore, notamment pendant la période de décembre-janvier. On accepte cependant, par contrainte de modélisation, que cette hypothèse reste vraie dans la majorité des cas.

#### 2.4. Intensité locale de l'effort de pêche sur DCP

L'évolution temporelle de la répartition spatiale de l'effort de pêche a été tout d'abord étudiée à l'aide de 4 indicateurs différents : le nombre de calées sur DCP/bateau, l'aire de présence de la flottille, l'aire positive, et l'indice de concentration locale, noté « ICL ». L'aire de présence est égale au nombre de pixels de la grille contenant au moins un signal VMS, indiquant le passage d'au moins un bateau dans cette zone. Elle correspond à la surface de la « zone d'échantillonnage » des navires de pêche. L'aire positive correspond au nombre de pixels de la grille dans lesquels au moins une calée a été réalisée. Cet indicateur est classiquement utilisé dans les approches spatiales (Woillez *et al.* 2007; Woillez *et al.* 2009). L'aire de présence et l'aire positive ont été divisées par le nombre de navires en exercice afin de s'affranchir des variations temporelles de la taille de la flottille. L'indicateur de concentration locale (ICL) est défini par la formule suivante :

$$ICL = \frac{\text{Nb pixels avec } Nbc \geq x}{\text{Nb pixels avec } Nbc \geq 1} = \frac{\text{Nb pixels "riches"}}{\text{Aire positive}} \text{ où } Nbc \text{ est le nombre de calées.}$$

Les variations de ces 4 indicateurs ont été étudiées à une échelle trimestrielle au cours de la période 2000-2012. Trois valeurs du paramètre  $x$  ont été testées (3, 4 et 5 calées), afin de tester la sensibilité de cet indicateur à la valeur  $x$  choisie. Ces 3 valeurs sont des valeurs élevées compte tenu de la distribution du nombre de calées/pixel. En effet, les grilles contiennent un grand nombre de pixels pauvres (0, 1, 2 calées), et quelques pixels riches (Figure 8).

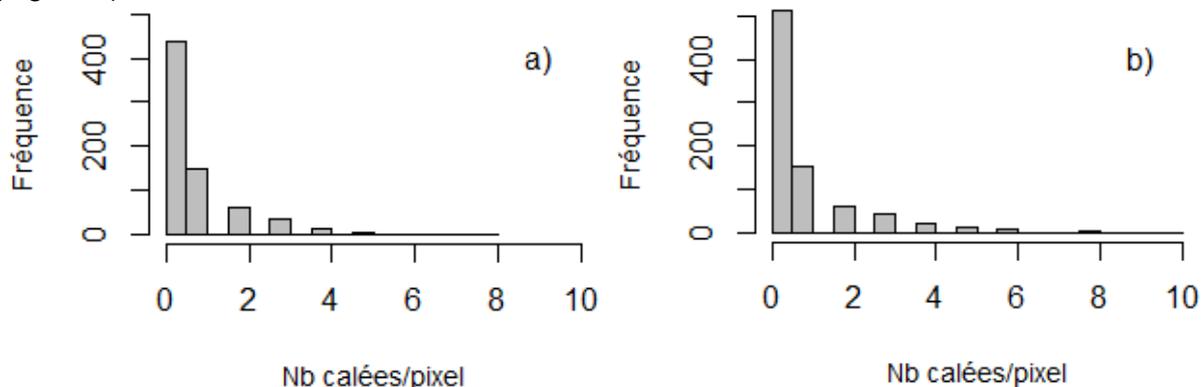


Figure 8 : Distribution de nombre de calées/pixel du 2<sup>e</sup> trimestre (a) et du 4<sup>e</sup> trimestre (b) de l'année 2002.

L'évolution temporelle de l'aire de présence et de l'aire positive renseigne sur des phénomènes éventuels d'extension ou de réduction spatiale de la zone de pêche sur DCP. L'indicateur ICL donne quant-à-lui des indications sur la façon dont les calées sont réparties au sein de la zone de pêche. Une augmentation de l'ICL indique une augmentation de la concentration locale de l'effort de pêche sur DCP relativement à la surface de la zone de pêche : les calées ont de plus en plus tendance à être effectuées dans les mêmes pixels.

Notons qu'il est possible d'observer un phénomène de concentration locale de l'effort de pêche (i.e. à l'échelle du pixel), mais un processus de dispersion régionale, si les pixels « riches » (en calées) ont tendance à être éloignés les uns des autres. Ces 3 indicateurs spatiaux ne donnent en effet aucune indication sur la façon dont les pixels riches sont répartis dans l'espace. Une approche géostatistique a été mise en œuvre afin d'étudier et quantifier le lien spatial qui existe entre ces pixels.

## 2.5. Structuration spatiale de la densité des calées réalisées sur DCP

L'approche géostatistique repose sur l'idée fondamentale que la « nature » n'est pas entièrement imprévisible : deux observations proches dans l'espace devraient en moyenne plus se ressembler (i.e. être d'avantage corrélées) que deux observations éloignées. Cette notion de « continuité » d'un phénomène est centrale en géostatistique : on cherche à caractériser et à quantifier cette continuité pour pouvoir ensuite l'utiliser dans des modèles. Pour cela, le principal outil utilisé est le variogramme.

### 2.5.1. Estimation des variogrammes empiriques

#### Variogrammes sans pondération

En géostatistique, on considère une mesure en un point  $x$  comme la réalisation d'une variable aléatoire en ce point, notée généralement  $Z(x)$ . On mesure ainsi la corrélation qui existe entre 2 échantillons séparés d'une distance  $h$  par la demi-variance de la différence des valeurs prises par ces deux variables aléatoires  $Z(x)$  et  $Z(x+h)$ , notée :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(x) - Z(x+h))$$

$\gamma(h)$  est appelé le variogramme théorique de la variable aléatoire  $Z$ . Le variogramme  $\gamma(h)$  ne dépend pas de la localisation  $x$ , mais seulement de la distance  $h$  séparant deux mesures. Cette fonction, en général croissante avec la distance  $h$ , synthétise beaucoup d'informations sur le degré de continuité du phénomène étudié. Dans cette étude, la variable aléatoire  $Z$  correspond au nombre de calées réalisées sur DCP par voxel (pixel x trimestre), et chaque point de l'espace est un pixel de la grille d'étude.

Le variogramme théorique est modélisé à partir du variogramme expérimental, qui est défini par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

où  $N(h)$  est le nombre de paires de points séparés d'une distance  $h$ . Le variogramme expérimental a été calculé pour chaque trimestre durant la période 2000-2012.

#### Variogrammes pondérés par les données VMS

La quantité de données VMS contenue dans un pixel peut être utilisée comme une mesure du degré d'échantillonnage réalisé dans ce pixel par la flottille. Dès lors, il peut être intéressant dans le calcul du variogramme empirique d'attribuer à chaque observation un poids qui soit proportionnel au degré d'échantillonnage et donc à la fiabilité a priori de cette observation. Les 156 variogrammes empiriques (12 mois x 13 années) ont ainsi été recalculés en pondérant chaque observation par le nombre de données VMS qui lui était associé, en utilisant la formule ci-dessous :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{x_i - x_j = h} w_i w_j [z(x_i) - z(x_j)]^2}{\sum w_i w_j}$$

où  $w_i$  est le nombre de données VMS du pixel  $i$ . Les résultats obtenus avec et sans pondération ont été comparés en vue de leur utilisation dans l'étape de modélisation.

#### 2.5.2. Estimation et modélisation des variogrammes moyens

Afin de savoir si les variogrammes empiriques d'un même trimestre étaient significativement différents d'une année à l'autre, un variogramme trimestriel moyen  $\gamma_t(h)$  a été calculé pour chaque trimestre  $t$ , en réalisant la moyenne des 13 variogrammes annuels (2000-2012). Chaque variogramme annuel a été standardisé par la variance de la variable régionalisée  $Z$  (Ciannelli *et al.* 2008). Pour chaque trimestre  $t$ , le variogramme empirique moyen  $\gamma_t(h)$  a été calculé par (Stanley *et al.* 2000) :

$$\gamma_t(h) = \frac{\sum_{a=1}^{13} N_{t,a}(h) \cdot [\gamma_{t,a}(h) / s_{z_{t,a}}^2]}{\sum_{a=1}^{13} N_{t,a}(h)} \quad \text{avec :}$$

$\gamma_t(h)$  le variogramme empirique moyen du trimestre  $t$  ;

$\gamma_{t,a}(h)$  le variogramme empirique du trimestre  $t$ , l'année  $a$  ;

$s_{z_{t,a}}^2$  la variance de la variable  $z$  le trimestre  $t$ , l'année  $a$  ;

$N_{t,a}(h)$  le nombre de paires de points distants de  $h$ , le trimestre  $t$ , l'année  $a$ .

Ce variogramme empirique moyen correspond à la variance moyenne des 13 variogrammes individuels, pondérée par le nombre de paires de points à chaque pas de calcul.

Le variogramme empirique moyen de chaque trimestre a ensuite été ajusté à un modèle isotrope associant un effet de pépite et un modèle sphérique, avec un pas de calcul de  $0.5^\circ$ . Ce modèle combiné est défini par la formule ci-dessous (Petitgas 2001) :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \cdot \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \text{pour } 0 < h \leq a \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases} \quad \text{avec :}$$

- $C_0$  l'effet de pépite. Il correspond à la différence observable entre deux mesures très proches. Il peut être dû à des erreurs de mesure, ou à l'hétérogénéité naturelle locale du phénomène (Figure 9).
- $C_0 + C$  le palier du variogramme. Il est égal à la variance de la variable aléatoire  $Z(x)$  et correspond aux demi-écarts quadratiques les plus grands que l'on peut observer en moyenne entre deux valeurs.
- $a$  la portée. Elle correspond à la distance au-delà de laquelle les mesures ne sont plus corrélées, et quantifie l'échelle caractéristique du phénomène.

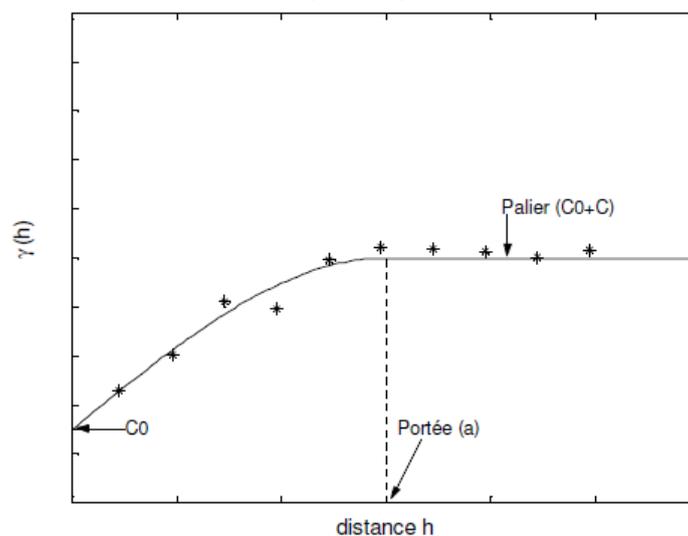


Figure 9 : Variogramme empirique (croix) et modélisé (ligne continue), avec les 3 paramètres du modèle : effet de pépite ( $C_0$ ), portée ( $a$ ) et palier ( $C_0 + C$ ).

L'ajustement a été réalisé par la méthode des moindres carrés avec une pondération proportionnelle au nombre de paires de points et inversement proportionnelle à la distance entre ces points. La notion d'isotropie signifie que la variogramme est estimé sans tenir compte de la direction ; seule la distance  $h$  séparant les paires de points est prise en compte.

Le choix du pas est conditionné par la distance séparant deux points échantillonnés, c'est-à-dire deux pixels, soit  $0.5^\circ$  pour la grille utilisée.

Pour chaque trimestre, les 13 variogrammes empiriques annuels ont ensuite été comparés au variogramme trimestriel modélisé, afin de savoir si ces variogrammes empiriques étaient significativement différents d'une année à l'autre. Cette analyse a été conduite en mettant en œuvre des simulations par bandes tournantes, selon une approche développée par [Morfin et al. \(2012\)](#).

### 2.5.3. Simulation par bande tournantes et choix des modèles utilisés

#### Principe général de la méthode

La méthode des bandes tournantes est une technique de simulation d'un champ aléatoire gaussien de valeurs spatialement corrélées dans un espace 2D ([Chiles & Delfiner, 2009](#)). Cet espace est divisé en de nombreuses droites le long desquelles des valeurs sont simulées selon une certaine covariance, qui provient du variogramme théorique (le modèle) utilisé pour réaliser les simulations. Le champ aléatoire obtenu correspond à une simulation des valeurs prises par une variable aléatoire régionalisée dans un espace 2D, conditionnellement au modèle de variogramme utilisé. La variable aléatoire régionalisée est dans le cas de cette étude le nombre de calées par pixel x trimestre. Il est alors possible de calculer le variogramme empirique simulé de chaque champ aléatoire gaussien ainsi créé.

Notons que cette méthode n'est applicable que dans un cadre gaussien. Dans le cas de cette étude, la distribution du nombre de calées par pixel pour un trimestre et une année donnée n'est pas gaussienne, et se rapproche au contraire d'une distribution de type log-normale (Figure 8). En faisant l'hypothèse de log-normalité de la distribution du nombre de calées par pixel, une transformation du variogramme théorique a dû être effectuée afin d'exécuter les simulations dans un cadre gaussien. Cette transformation a été réalisée en utilisant les relations explicites qui existent entre les espérances, les variances et les variogrammes d'une variable aléatoire  $Z$  suivant une loi log-normale, et sa transformation logarithmique  $Y=\log(Z)$ , qui suit une loi normale (annexe 3).

#### Application au cas d'étude

Pour chaque trimestre, 650 champs de densités de calées<sup>9</sup> ont été simulés à partir du variogramme trimestriel théorique selon la méthode des bandes tournantes. Le variogramme empirique de chaque champ simulé a ensuite été calculé. Les 650 variogrammes ainsi obtenus ont été utilisés pour calculer un intervalle de confiance à 90% autour du modèle (le variogramme théorique). Cet intervalle de confiance a été estimé en calculant, pour chaque pas de calcul  $h$  ( $h=0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ$ , etc.), les quantiles 5% et 95% de la distribution des 650 valeurs de  $\gamma(h)$ .

---

<sup>9</sup> Pour un trimestre donné, la surface de la zone d'étude (polygone) varie d'une année à l'autre au cours de la période 2000-2012. Afin de tenir compte de ces fluctuations, 50 simulations ont été réalisées à partir du variogramme moyen modélisé avec chaque polygone annuel. Les 650 simulations obtenues ont permis de générer un intervalle de confiance autour de chaque variogramme trimestriel qui tient compte de ces fluctuations.

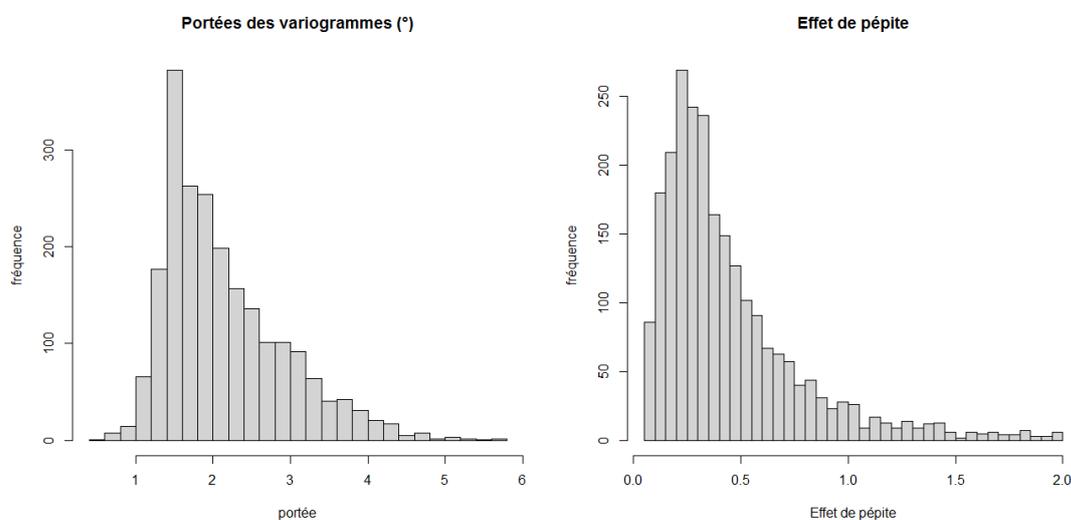
Si les 13 variogrammes empiriques annuels appartiennent à l'intervalle de confiance, alors on considère qu'il n'existe pas de différence significative entre les variogrammes d'une année à l'autre (Morfin *et al.* 2012). Dans ce cas, un seul modèle de variogramme – le variogramme trimestriel théorique – a été utilisé pour décrire la structuration spatiale et cartographier la densité de calées sous DCP du trimestre considéré.

Dans le cas contraire, si certains variogrammes annuels sortent de l'intervalle de confiance, on considère qu'il existe une différence significative entre les variogrammes empiriques d'une année à l'autre, justifiant l'utilisation d'un variogramme annuel pour le travail de cartographie.

#### 2.5.4. Comparaison des variogrammes trimestriels théoriques

Afin de savoir si les variogrammes théoriques étaient significativement différents d'un trimestre à l'autre, leurs paramètres de portée et d'effet de pépité ont été comparés à l'aide de deux tests statistiques.

Pour chaque trimestre, chacun des 650 variogrammes empiriques simulés par la méthode des bandes tournantes a été ajusté à un modèle combinant un effet de pépité et un modèle sphérique. Cette méthode a permis d'obtenir une série de 650 valeurs de portée et d'effet de pépité par trimestre. Un test de Kruskal-Wallis (alternative non-paramétrique à l'ANOVA) a tout d'abord été réalisé afin de savoir si ces deux paramètres variaient de manière significative avec le trimestre.



**Figure 10 : Distributions des paramètres de portée (gauche) et d'effet de pépité (droite) des variogrammes empiriques simulés. Le caractère non-gaussien des distributions justifie l'utilisation de tests non-paramétriques. Test de Shapiro : portée ( $W=0.920$  ;  $pc<2.2 \cdot 10^{-6}$ ) ; pépité : ( $W=0.825$  ;  $pc<2.2 \cdot 10^{-6}$ )**

Lorsque la probabilité critique du test de Kruskal-Wallis était inférieure au seuil de 5%, un test de comparaison multiple de Wilcoxon-Mann-Whitney avec correction de Holm fut appliqué afin de savoir si les paramètres de portée et de pépité étaient significativement différents d'un trimestre à l'autre (comparaison deux à deux). Les variogrammes théoriques des trimestres  $i$  et  $j$  ont été considérés significativement différents l'un de l'autre si au moins un de leurs deux paramètres présentait une différence significative.

L'étude des variogrammes a permis d'analyser et quantifier les caractéristiques de la structure spatiale de la densité de calées sur DCP, et son évolution dans l'océan indien entre 2000 et 2012. Les variogrammes modélisés ont ensuite été utilisés pour étudier la distribution spatio-temporelle des calées.

## 2.6. Distribution spatio-temporelle des calées sur DCP dans l'océan indien

Afin d'étudier l'évolution de la distribution spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP et celle des populations de thons associées, deux types de cartes ont été produits pour chaque trimestre entre 2000 et 2012 : des cartes représentant la distribution effective de l'effort de pêche sur DCP, réalisées à partir des données brutes (nombre de calées/ pixel de 0.5°x0.5°) ; et des cartes représentant la distribution potentielle de la fraction des populations de thons tropicaux qui s'agrègent sous les DCP. Cette deuxième série de carte a été produite à partir des données brutes et des variogrammes modélisés via une technique d'interpolation spatiale : le krigeage. En faisant l'hypothèse d'une corrélation forte entre densité de calées sur DCP et biomasse locale, le nombre de calées/pixel a été divisé par le nombre de navires en activité durant le trimestre considéré afin de produire un indicateur d'abondance locale indépendant des variations de la taille de la flottille. Cet indicateur (Nb de calées/pixel/bateau) a ensuite été krigeé.

Dans le cas de cette étude, l'utilisation d'une technique d'interpolation spatiale se justifie en raison du caractère partiel de l'échantillonnage réalisé par les thoniers senneurs : des zones n'ont pas été explorées en raison de la taille limitée de la flottille française opérant dans l'océan indien (20 navires au maximum entre 2000 et 2012). Il existe donc des pixels non renseignés au sein de la grille d'étude. L'objectif est donc ici de renseigner les pixels vides au sein du polygone d'étude. Par ailleurs, des voxels (pixel x trimestre) avec une donnée VMS sont des voxels largement sous échantillonnés pour lesquels il n'est pas déraisonnable de ré-estimer l'indice d'abondance potentielle à partir des données voisines.

L'idée de base du krigeage est de prévoir la valeur d'une variable régionalisée  $Z$  en un site non échantillonné, à partir d'une combinaison linéaire des données ponctuelles adjacentes. Le krigeage est une méthode d'estimation non biaisée et de variance minimale faisant intervenir le variogramme, et qui peut s'écrire de manière résumée sous la forme :

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i$$

où  $Z_v$  est la valeur réelle de la variable aléatoire dans le pixel  $v$ ,  $Z_v^*$  son estimation, et  $Z_i$  les valeurs des variables aléatoires voisines. Le krigeage a été effectué avec un voisinage glissant comportant au minimum 10 points, une résolution spatiale de 0.05°, et une portée égale à la portée du variogramme modélisé du trimestre considéré. La variance d'estimation a également été analysée et cartographiée. Elle est influencée par le degré d'auto-corrélation spatiale des données, la géométrie du polygone à estimer, et la localisation des pixels connus à l'intérieur de ce polygone.

Dans cette étude, toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R ; les analyses géostatistiques ont été réalisées avec le package *RGeostats* (Renard *et al.* 2014).

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Echelle spatio-temporelle

Trois découpages temporels ont été testés avec la méthode de classification des « k-means » afin de définir l'échelle temporelle utilisée dans cette étude : des groupes de 2 mois ( $k=6$ ), 3 mois ( $k=4$ ), et 4 mois ( $k=3$ ). Dans chacun des cas, les 13 centres de gravité d'un même mois (période 2000-2012) étaient répartis dans plusieurs groupes ou « clusters » différents : cette méthode n'a pas permis de réaliser des groupes de mois parfaitement distincts les uns des autres. Cependant, on peut obtenir une indication du degré de « ressemblance spatiale » des mois entre eux en regardant le nombre d'occurrences de chaque mois dans les différents groupes. Si on observe par exemple un grand nombre d'occurrences des mois i, j et k dans le groupe 1 (et que le nombre d'occurrences des autres mois dans ce groupe est faible), alors les mois i, j et k se ressemblent d'un point de vue spatial.

Pour chaque valeur du paramètre k testées ( $k=3,4$ , et 6), on observe que les centres de gravité des mois de mars, avril, et mai sont regroupés dans le ou les mêmes groupes (tableau 1, annexe 1). Le même constat peut être fait pour les mois d'août, septembre, octobre d'une part, et de décembre-janvier d'autre part. Les mois de février, juin et juillet ont tendance également à se ressembler.

Tableau 1 : Nombre d'occurrences des 13 centres de gravité de chaque mois de l'année dans les 4 groupes obtenus avec la méthode des "k-means" ( $k=4$ ). Les mois de l'année sont désignés par leur 1ère lettre, et classés à partir du mois de décembre afin de mieux distinguer les groupes de mois. (Résultats obtenus avec  $k=3$  et  $k=6$  en annexe 1)

k-cluster	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
1	0	0	1	8	11	10	2	1	1	0	0	0
2	1	3	10	5	2	3	9	9	2	1	1	3
3	0	0	0	0	0	0	1	3	10	12	12	6
4	12	10	2	0	0	0	1	0	0	0	0	4

La technique de classification hiérarchique n'a pas permis non plus de mettre en évidence des groupes de mois parfaitement distincts les uns des autres. Quatre groupes de mois ont été distingués, et on trouve dans chaque groupe différents mois de l'année (tableau 2, annexe 2). En utilisant comme pour la méthode des « k-means » le nombre d'occurrences comme critère de ressemblance spatiale, on observe là-encore que 3 groupes sortent du lot : mars/avril/mai ; août/septembre/octobre ; et décembre/janvier. Les centres de gravité des mois de février, juin, juillet et novembre ont été répartis de manière plus homogène dans les 4 groupes.

Tableau 2 : Nombre d'occurrences des 13 centres de gravité de chaque mois de l'année dans les 4 groupes obtenus avec la méthode de classification hiérarchique. Le dendrogramme est présenté dans l'annexe 2 (156 valeurs).

H-cluster	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
1	0	0	4	10	13	11	5	5	0	0	0	0
2	6	8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3
3	0	0	0	0	0	0	2	3	10	12	12	6
4	7	5	8	3	0	2	5	5	3	1	1	4

Compte tenu des résultats précédents, une échelle temporelle de 3 mois a été retenue, avec le découpage temporel suivant : décembre/janvier/février (trimestre 1) ; mars/avril/mai (trimestre 2) ; juin/juillet/août (trimestre 3), et septembre/octobre/novembre (trimestre 4).

Une fois l'échelle temporelle de 3 mois fixée, l'échelle spatiale a pu être définie. Trois tailles de pixel de la grille d'étude ont été testées pour différents trimestres et différentes années : 0.25°, 0.5°, et 1° de coté. Le nombre de calées par pixel était très faible avec des pixels de 0.25° de coté, et les variogrammes construits avaient une allure pépitique : cette taille ne semblait pas suffisante pour mettre en évidence la structure spatiale de la densité de calées sur DCP. A l'inverse, des pixels de 1° de coté semblaient trop grands pour faire ressortir l'hétérogénéité locale des densités de calées, et avaient tendance à lisser la carte (Figure 11). Une taille de pixel de 0.5° de coté permettait de quantifier la structure spatiale sans masquer l'hétérogénéité locale de la donnée. Elle a donc semblé être la plus adaptée compte tenu de l'échelle temporelle choisie, et a finalement été retenue.

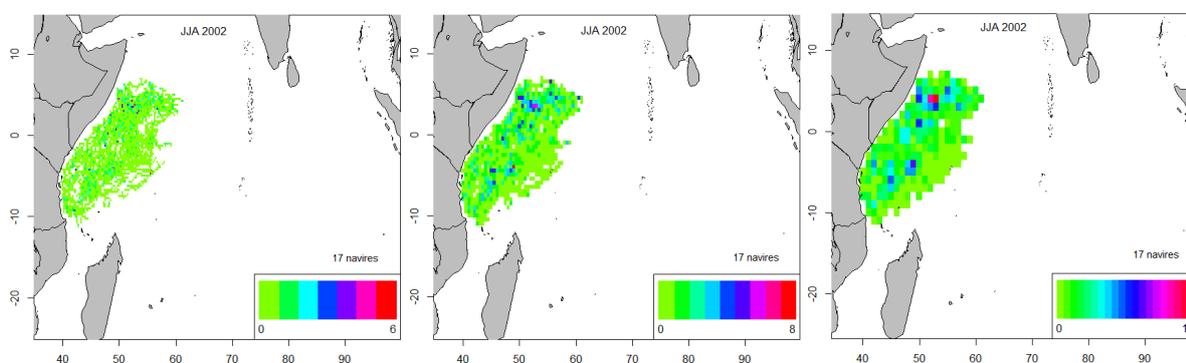


Figure 11 : Cartes de l'effort de pêche sur DCP estimé au cours du trimestre 3 en 2002 avec 3 résolutions spatiales différentes : 0.25°x0.25° (droite) ; 0.5°x0.5° (milieu) et 1°x1° (gauche).

La densité de calées sous DCP sera donc égale dans cette étude au nombre de calées sous DCP réalisées dans un pixel de 0.5° de coté<sup>10</sup> pendant une période de 3 mois.

### 3.2. Intensité locale de l'effort de pêche sur DCP

Au cours du 1<sup>er</sup> trimestre (DJF), le nombre de calées sur DCP/bateau, l'aire de présence de la flottille française et l'aire positive augmentent de manière significative ( $pc < 0.05$ ) durant la période 2000-2012. L'aire de présence est multipliée par 2.2 entre 2001 et 2012, et l'aire positive augmente de 71% durant la même période. Enfin, l'aire de présence de la flottille est 5 fois plus grande en moyenne que la zone de pêche effective sur DCP. En revanche, les 3 valeurs de l'indice de concentration locale (ICL) fluctuent sans tendance autour de leur moyenne respective (Figure 13 et Tableau 3). On peut par ailleurs noter que l'évolution temporelle de l'ICL présente la même allure pour les différentes valeurs de seuil utilisées (3, 4 et 5 calées). Cette observation est vraie pour les 3 autres trimestres étudiés. Cela signifie que les pixels « très riches », c'est-à-dire ceux contenant au moins 5 calées, sont les principaux responsables de l'allure générale de l'évolution temporelle de cet indicateur.

<sup>10</sup> Notons qu'un pixel de 0.5° de coté correspond à une unité spatiale d'environ 3000 km<sup>2</sup>.

Le nombre de calées sur DCP/bateau des 3 autres trimestres fluctue sans tendance apparente durant la période 2000-2012. La valeur de cet indicateur durant le trimestre 4 est en moyenne 2 fois supérieure à celle du trimestre 1 (Figure 12, Tableau 3).

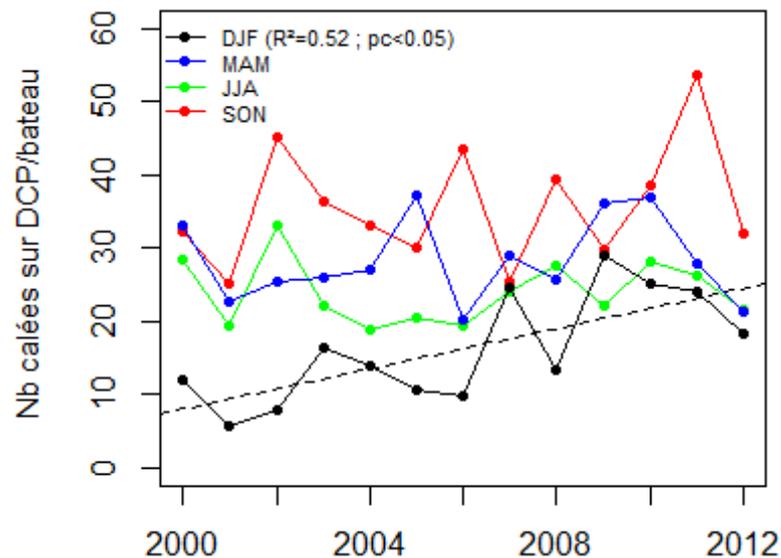


Figure 12 : Evolution du nombre de calées sur DCP/bateau pour chaque trimestre au cours de la période 2000-2012. Les droites de tendance (régression linéaire) sont représentées lorsque la pente est significativement différente de 0 (test de Student,  $pc < 0.05$ )

L'aire de présence et l'aire positive du trimestre 2 (MAM) varie également sans réelle tendance entre 2000 et 2012. Notons tout de même que l'aire de présence est particulièrement faible en 2008 (28.5 pixels/bateau) par rapport à la moyenne de la série chronologique (53.6 pixels/bateau), puis ré-augmente de manière importante jusqu'en 2012. L'ICL suit des oscillations avec des pics en 2001 et 2009. Là encore, les évolutions parallèles des ICL obtenus avec les trois seuils utilisés indiquent que les évolutions correspondent aux pixels riches de la carte, i.e. contenant au moins 5 calées.

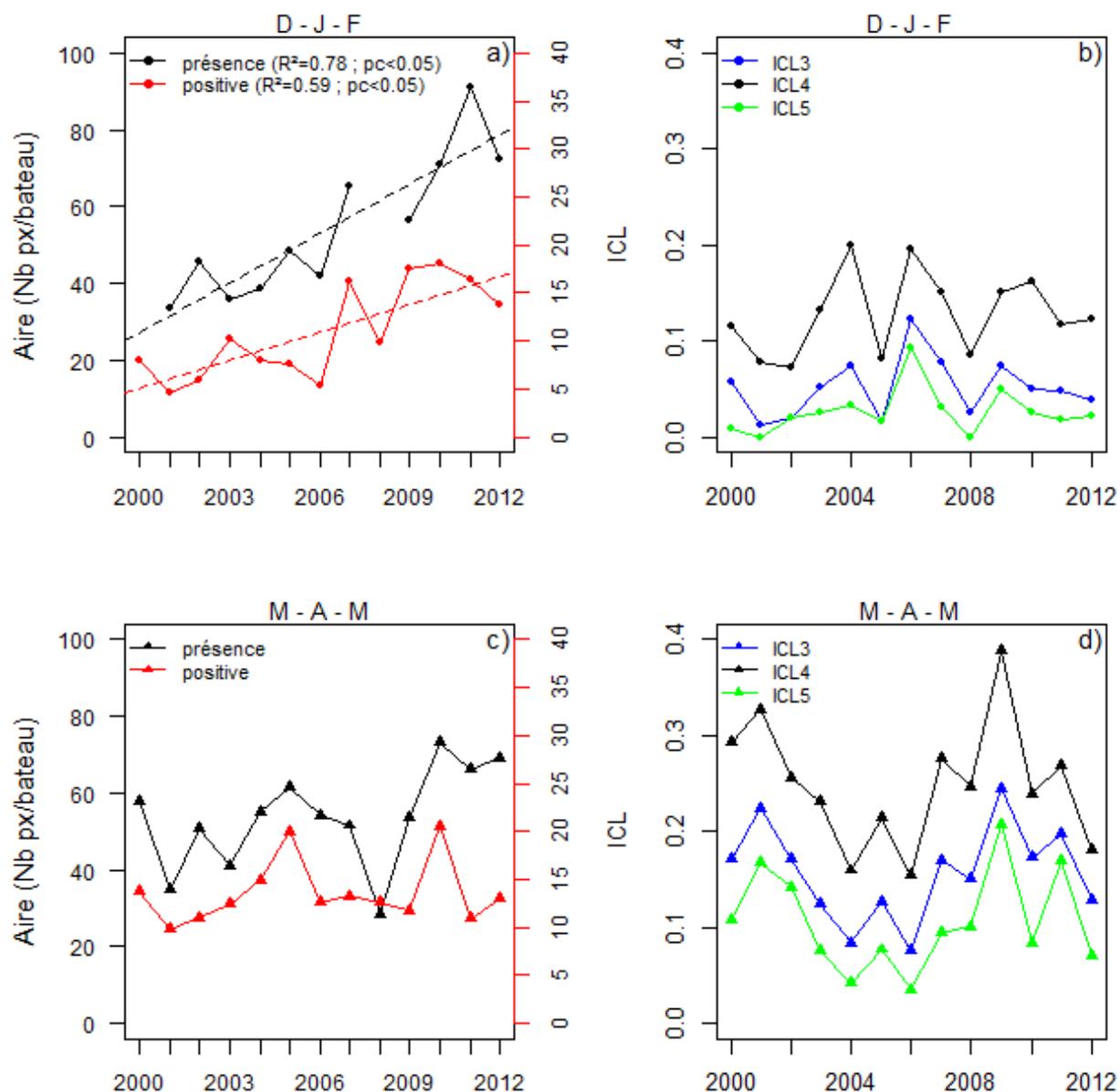


Figure 13 : Evolution temporelle de l'aire de présence et de l'aire positive (a, c), et de l'Indice de Concentration Locale (ICL) (b, d) des trimestres 1 (DJF) et 2 (MAM), respectivement. Les aires sont exprimées en pixels (px)/bateau, l'ICL est sans unité (ratio). Les droites de tendance (régression linéaire) sont représentées lorsque la pente est significativement différente de 0 (test de Student,  $pc < 0.05$ ). L'aire de présence des années 2000 et 2009 n'ont pas pu être calculées pour le trimestre 1, en raison de l'absence de données VMS durant ces 2 périodes.

Durant le 3<sup>e</sup> trimestre (JJA), l'aire de présence de la flottille et l'aire positive présentent globalement une légère augmentation au cours de la période 2000-2012, mais qui n'est pas significative. Notons un pic très important de l'aire de présence en 2009. Les 3 valeurs de l'ICL varient sans tendance autour de leur moyenne respective (Tableau 3).

Enfin, l'aire de présence et l'aire positive du 4<sup>e</sup> trimestre ne présentent aucune tendance générale nette sur l'ensemble de la période 2000-2012. Notons tout de même une tendance à la hausse entre 2007 et 2012 pour ces 2 indicateurs. A l'inverse, l'ICL présente une augmentation globale significative ( $pc < 0.05$ ) sur l'ensemble de la période étudiée. Entre 2001 et 2012, l'ICL<sub>3</sub> augmente de 39%, l'ICL<sub>4</sub> de 44%, et l'ICL<sub>5</sub> est multiplié par 2.3 au cours de cette période (Figure 14).

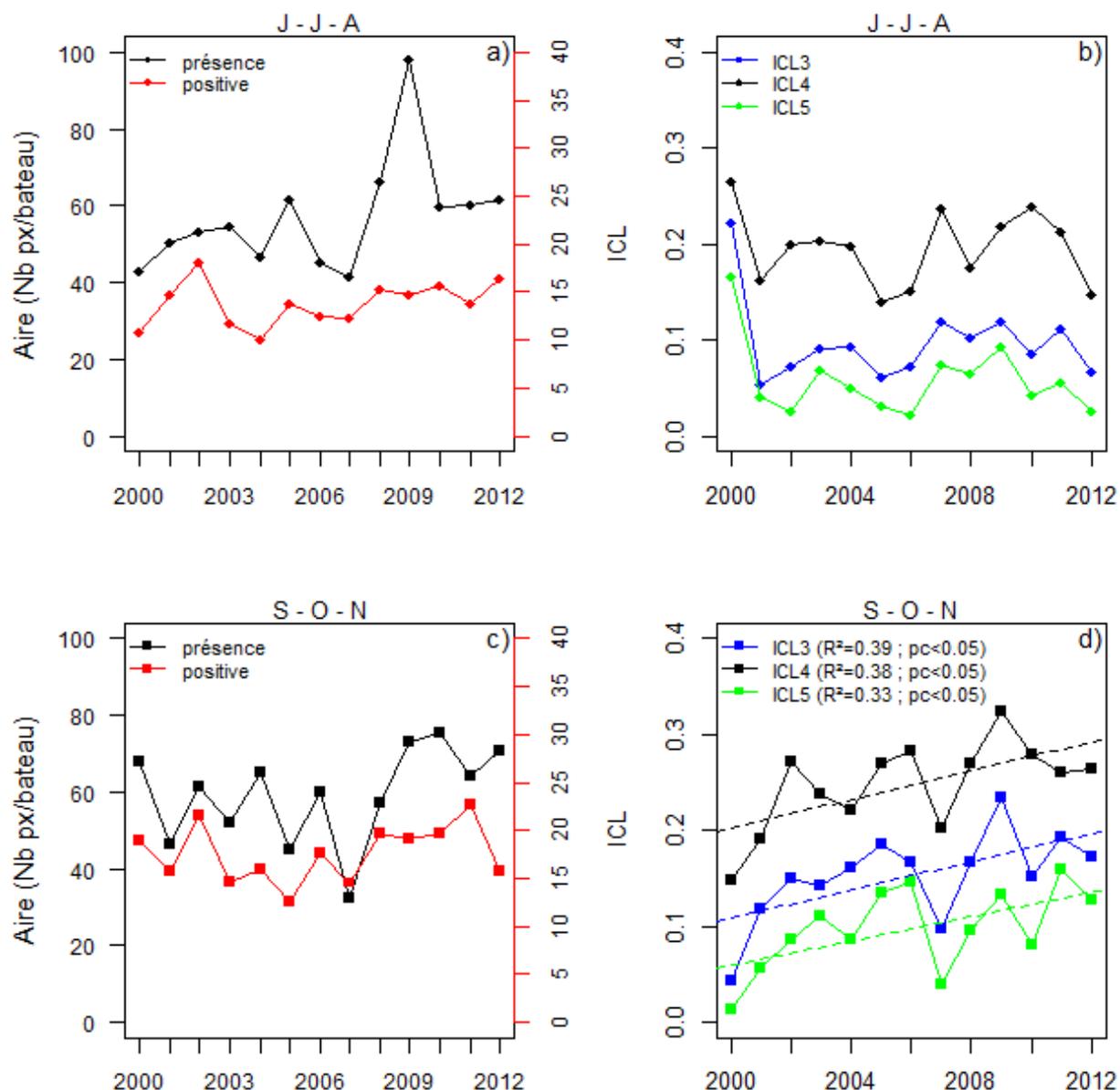


Figure 14 : Evolution temporelle de l'aire de présence et de l'aire positive (a, c), et de l'Indice de Concentration Locale (ICL) (b, d) des trimestres 3 (JJA) et 4 (SON), respectivement. Les aires sont exprimées en pixels (px)/bateau, l'ICL est sans unité (ratio). Les droites de tendance (régression linéaire) sont représentées lorsque la pente est significativement différente de 0 (test de Student,  $pc < 0.05$ ).

Tableau 3: Valeur moyenne et écart-type du nombre de calées sur DCP/bateau, de l'aire de présence, l'aire positive, et des 3 valeurs de l'ICL pour les 4 trimestres étudiés sur la période 2000-2012. Les résultats sont donnés sous la forme « mean  $\pm$  sd ».

Trimestre	Nb calées sur DCP/bateau	Aire de présence (px/bateau)	Aire positive (px/bateau)	ICL3 (%)	ICL4 (%)	ICL5 (%)
1 (DJF)	16.2 $\pm$ 7.4	54.5 $\pm$ 18.2	10.9 $\pm$ 4.9	13 $\pm$ 4	5 $\pm$ 3	3 $\pm$ 2
2 (MAM)	28.3 $\pm$ 5.8	53.6 $\pm$ 13.0	13.6 $\pm$ 3.3	25 $\pm$ 7	16 $\pm$ 5	11 $\pm$ 5
3 (JJA)	24.0 $\pm$ 4.4	57.0 $\pm$ 14.7	13.8 $\pm$ 2.5	20 $\pm$ 4	10 $\pm$ 4	6 $\pm$ 4
4 (SON)	35.8 $\pm$ 8.2	59.3 $\pm$ 12.5	17.6 $\pm$ 3.0	25 $\pm$ 5	15 $\pm$ 5	10 $\pm$ 4

### 3.3. Structuration spatiale de la densité des calées sur DCP

#### 3.3.1. Estimation et pondération des variogrammes empiriques

Les 156 variogrammes empiriques (12 mois x 13 années) ont été estimés avec et sans pondération. Rappelons que le poids attribué à chaque valeur dans la procédure de calcul avec pondération correspond au nombre de données VMS/pixel.

On observe que les 13 variogrammes empiriques d'un trimestre donné calculés sans pondération présentent une même allure générale (exemple du trimestre 1, Figure 15). A l'inverse, la pondération par les données VMS déstructure fortement chaque variogramme empirique, et accroît leurs différences interannuelles. Pris individuellement, les variogrammes empiriques pondérés ne semblent montrer aucune structure spatiale (Figure 15). La pondération par les données VMS utilisée dans le calcul des variogrammes empiriques n'a pas été retenue dans la suite de cette étude.

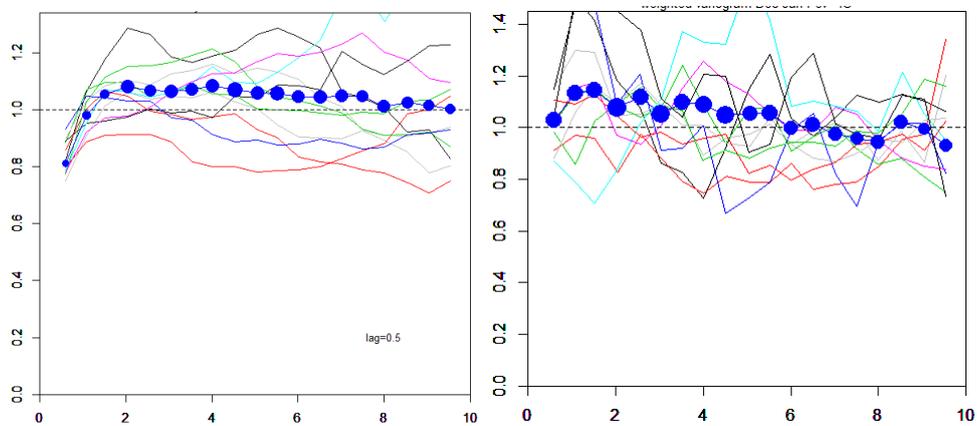


Figure 15 : Variogrammes empiriques du trimestre 1 avec et sans pondération par les données VMS (à droite, respectivement, à gauche). Le variogramme central en bleu est la variogramme empirique moyen (moyenne 2000-2012). La taille des points bleus est proportionnelle au nombre de paires de points pour chaque pas de distance.

#### 3.3.2. Ajustement des modèles aux variogrammes empiriques moyens

Pour chaque trimestre, on observe un très bon ajustement par moindres carrés des modèles « péritique + sphérique » aux variogrammes empiriques moyens. La portée du variogramme théorique du trimestre 1 (mars-avril-mai) semble être légèrement sous-estimée par rapport à celle du variogramme empirique moyen (Figure 16).

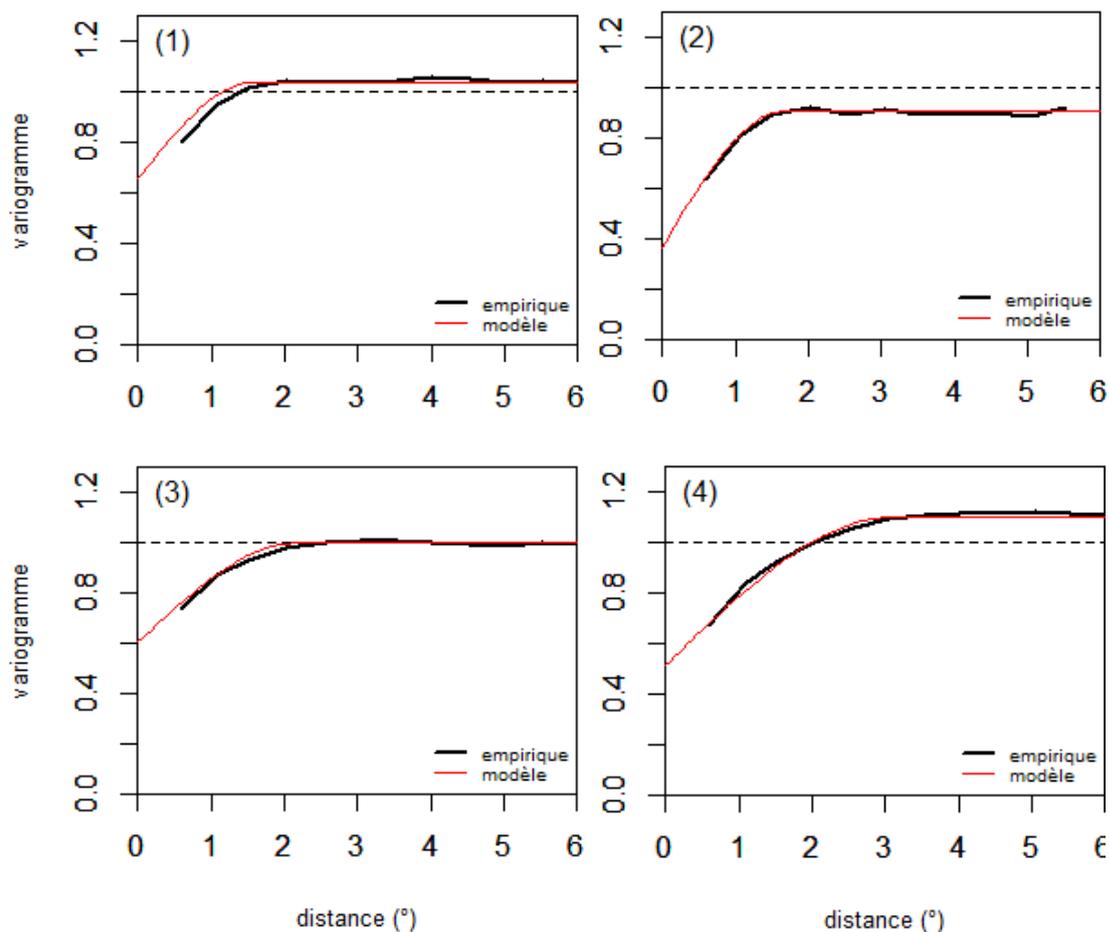


Figure 16 : Variogrammes empiriques moyens (noir) et variogrammes modélisés (rouge) du 1<sup>er</sup> trimestre (1), du 2<sup>e</sup> trimestre (2), du 3<sup>e</sup> trimestre (3) et du 4<sup>e</sup> trimestre. La ligne pointillée correspond à la variance des données.

L'effet de pépite présente une valeur élevée par chacun des quatre trimestres, représentant entre 40% et 63% de la variance totale (Tableau 4). La portée des variogrammes théoriques varie également de manière importante d'un trimestre à l'autre : la portée du trimestre 4 (3.12°) est environ deux fois supérieure à celle du trimestre 1 (1.59°).

Tableau 4 : Paramètres des variogrammes modélisés des 4 trimestres étudiés.

	D-J-F (1)	M-A-M (2)	J-J-A (3)	S-O-N (4)
<b>Modèle pépitique</b> (degré <sup>2</sup> )	0.66 (63%)	0.37 (41%)	0.60 (60 %)	0.51 (46%)
<b>Modèle sphérique</b> (degré <sup>2</sup> )	0.38 (37%)	0.54 (59 %)	0.40 (40%)	0.59 (54%)
<b>Palier</b> (degré <sup>2</sup> )	1.04	0.91	1.00	1.10
<b>Portée</b> (degré)	1.59	1.67	2.18	3.12

### 3.3.3. Variations interannuelles des variogrammes empiriques

Pour chaque trimestre, on observe que les 13 variogrammes annuels appartiennent à l'intervalle de confiance à 90% construit à partir des 650 champs gaussiens simulés par la méthode des bandes tournantes (Figure 17). Ils appartiennent par ailleurs à l'intervalle de confiance à 75% pour les trimestres 1 (D-J-F), 3 (J-J-A) et 4 (S-O-N). Le variogramme du

trimestre 2 (M-A-M) de l'année 2009 possède un palier plus grand que le palier moyen des autres variogrammes du même trimestre. Il sort ainsi de l'intervalle de confiance à 75%, mais reste à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 90%.

L'amplitude des intervalles de confiance à 90% des 4 trimestres paraît très grande comparée à celle des variogrammes empiriques. L'amplitude de l'intervalle de confiance du trimestre 1 est très proche de celle du trimestre 3 ; le trimestre 2 est celui qui possède un intervalle de confiance avec l'amplitude la plus faible, le trimestre 4 celui qui en possède la plus grande.

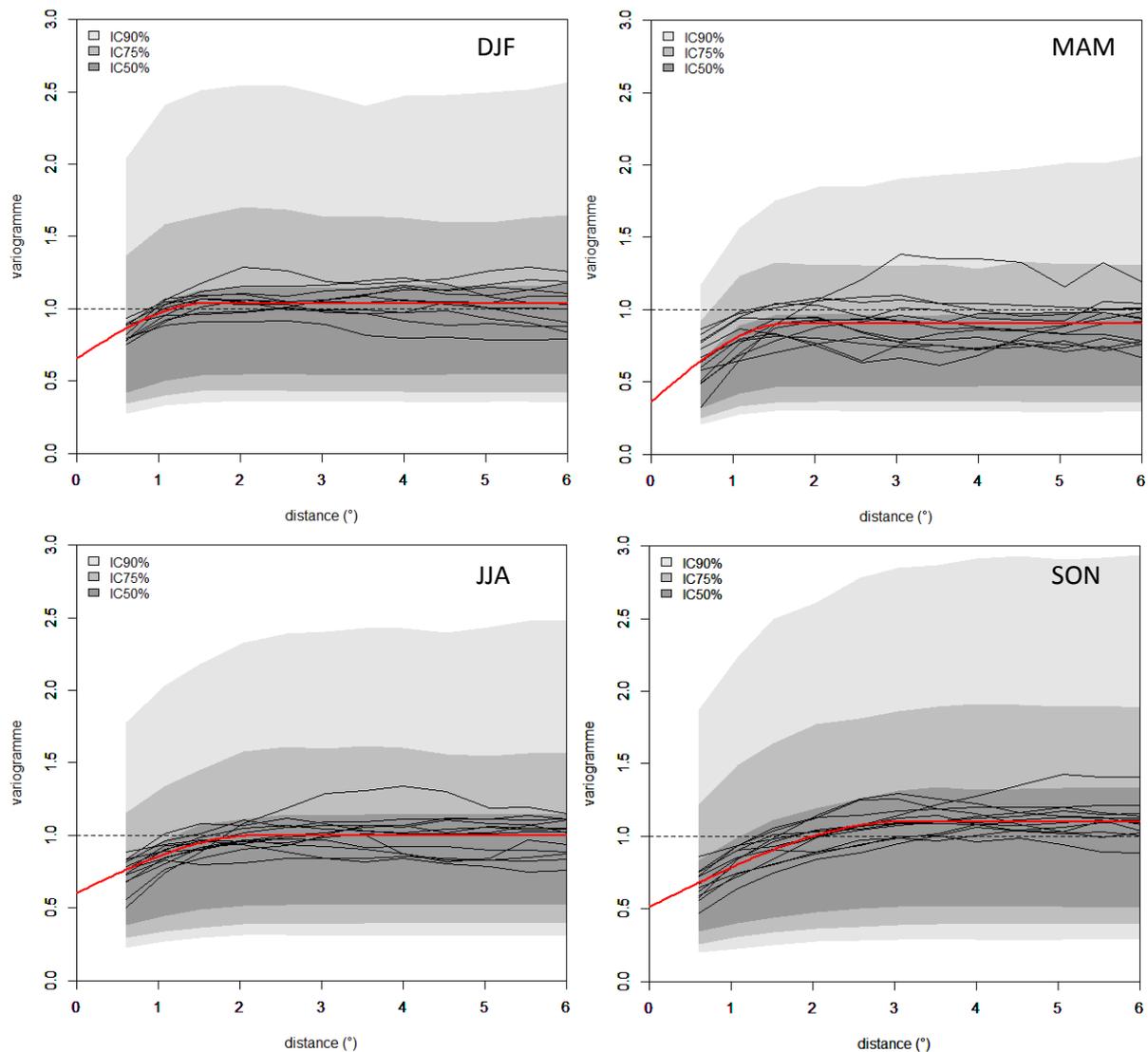


Figure 17 : Variogramme modélisé (rouge), variogrammes empiriques annuels (noirs) et intervalles de confiance à 90% (gris pâle), 75% (gris clair) et 50% (gris foncé) des trimestres 1 (en haut, à gauche), 2 (en haut, à droite), 3 (en bas, à gauche) et 4 (en bas, à droite).

### 3.3.4. Comparaison des variogrammes trimestriels théoriques

Les deux tests de Kruskal-Wallis réalisés pour comparer les variogrammes trimestriels théoriques montrent que les paramètres de portée et d'effet de pépite varient de manière significative avec le trimestre (Chi-sq=721.7, df=3, pc < 2.2 \* 10<sup>-16</sup>, et Chi-sq=287.8, df=3, pc < 2.2 \* 10<sup>-16</sup>, respectivement).

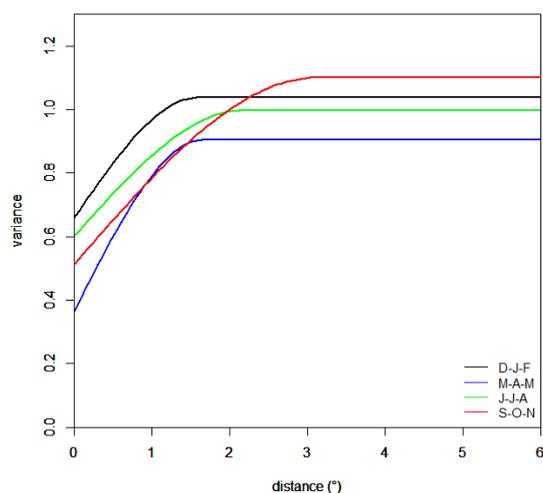


Figure 18 : variogrammes modélisés des trimestres 1 (noir), 2 (bleu), 3 (vert), et 4 (rouge).

Les effets de pépité des variogrammes théoriques moyens sont significativement différents deux à deux au seuil de 5% (Tableau 5), sauf ceux des trimestres 1 et 3 ( $pc=0.560$ ). Les portées des variogrammes théoriques sont toutes significativement différentes deux à deux au seuil de 5% (Tableau 5).

Tableau 5 : Probabilité critique des tests de Wilcoxon-Mann-Whitney (comparaison deux à deux des paramètres de portée et de pépité).

Pépité	1	2	3	Portée	1	2	3
2	$<2 \cdot 10^{-16}$	-	-	2	$1.1 \cdot 10^{-8}$	-	-
3	0.560	$<2 \cdot 10^{-16}$	-	3	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	-
4	0.015	$<2 \cdot 10^{-16}$	0.039	4	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$

### 3.4. Distribution spatio-temporelle des calées sur DCP

De manière générale, la distribution spatiale des calées sur DCP respecte durant la période 2000-2012 le schéma saisonnier décrit par Kaplan *et al.* (2014) : les calées sur DCP sont réalisées principalement dans le centre de l’océan indien durant le trimestre 1 (D-J-F), dans le nord du canal du Mozambique durant le trimestre 2 (M-A-M), et au large de la côte est-africaine durant le trimestre 3 (J-J-A) et 4 (S-O-N), principalement en face de la Somalie (Figure 19, annexes 4 et 5).

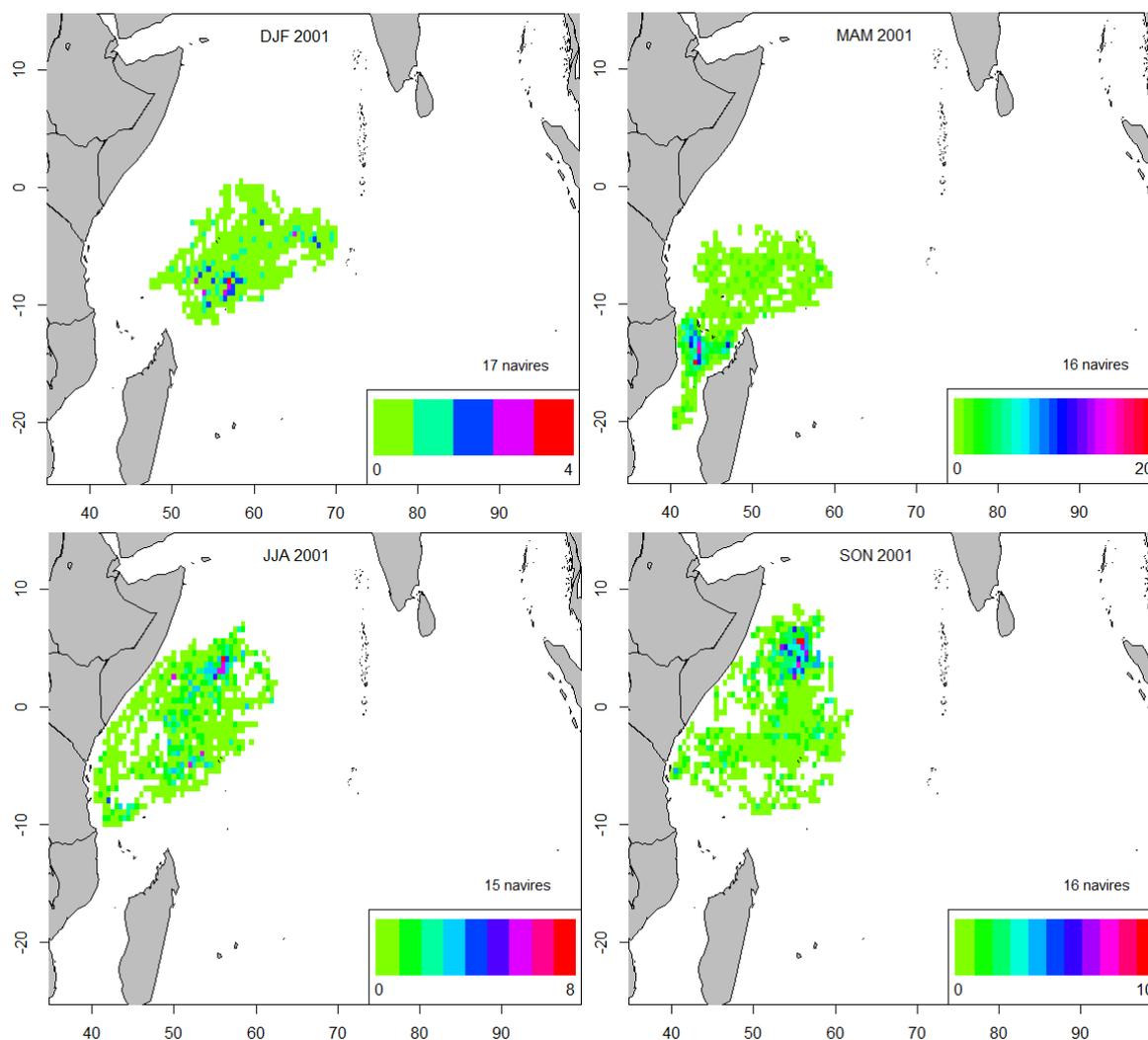


Figure 19 : Distribution spatiale de l'effort de pêche sur DCP (Nb de calées/pixel) au cours des 4 trimestres de l'année 2001.

Si la distribution spatiale des calées suit globalement cette même rotation chaque année, elle présente en revanche une importante variabilité interannuelle au cours d'un même trimestre. Alors qu'elle se concentre généralement dans le nord du canal du Mozambique à cette période, l'activité de pêche du 2<sup>e</sup> trimestre s'est par exemple déplacée plus au nord de 2003 à 2006, et les calées réalisées sur DCP étaient distribuées de manière plus diffuse au sein de la zone de pêche (Figure 21). Cette observation est cohérente avec la diminution de l'ICL enregistrée à cette période.

Ces variations interannuelles de la distribution spatiale des calées sur DCP affectent (i) le nombre de zones avec un fort effort de pêche sur DCP, (ii) la localisation de ces zones denses au sein de la zone de pêche, et (iii) le niveau de densité lui-même (Figure 21, annexe 5).

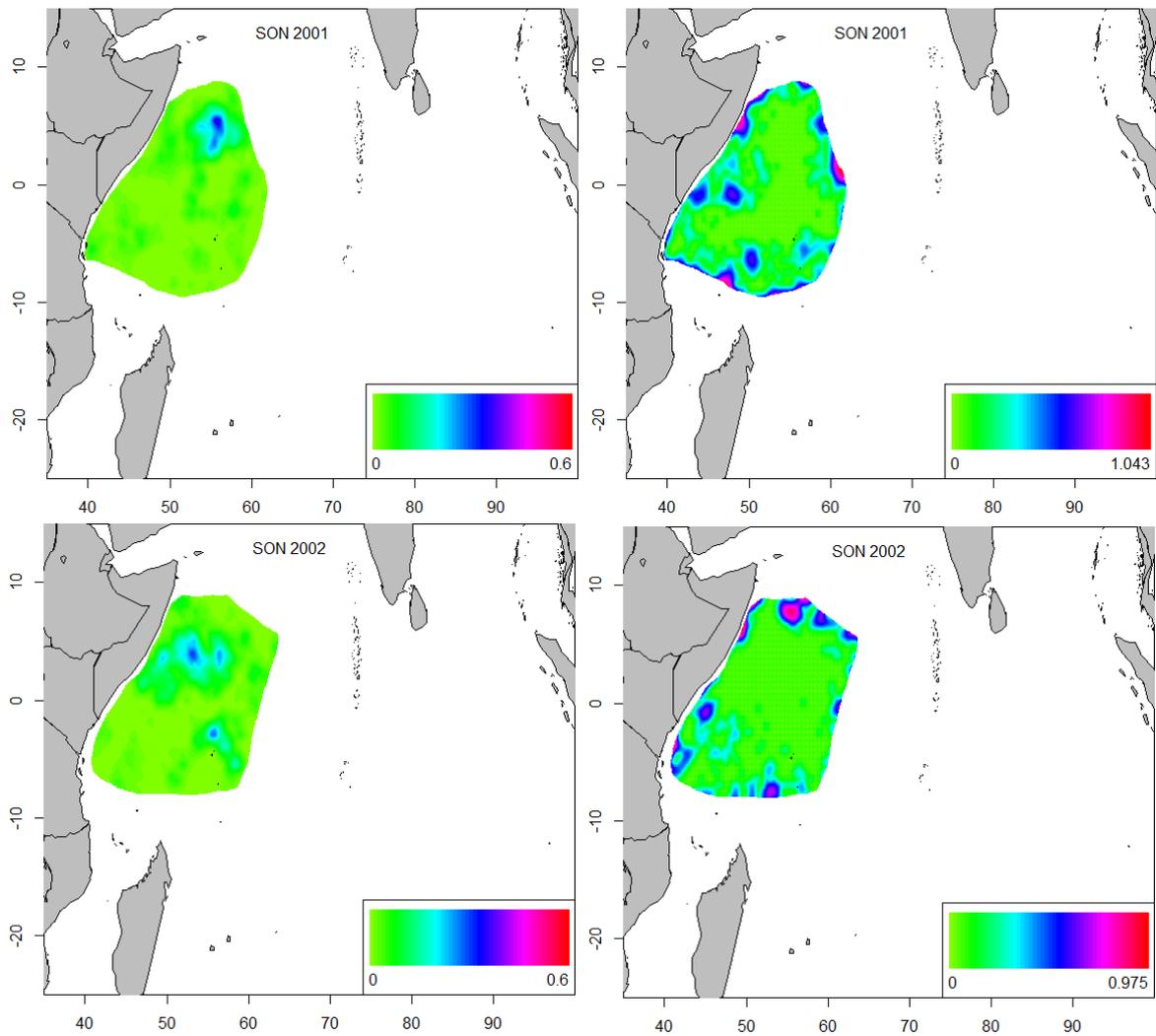


Figure 20 : Cartes de la distribution spatiale potentielle des thons capturables sous DCP au cours du trimestre 4 (SON) en 2001 et 2002 (à gauche), et cartes de la variance d'estimation du krigage associées (à droite).

La variance d'estimation du krigage est globalement faible au centre du polygone, et élevée sur les bords, ce qui est une situation classique en géostatistique. Les zones de forte variance correspondent aux zones contenant un faible nombre de pixels renseignés (Figure 20)

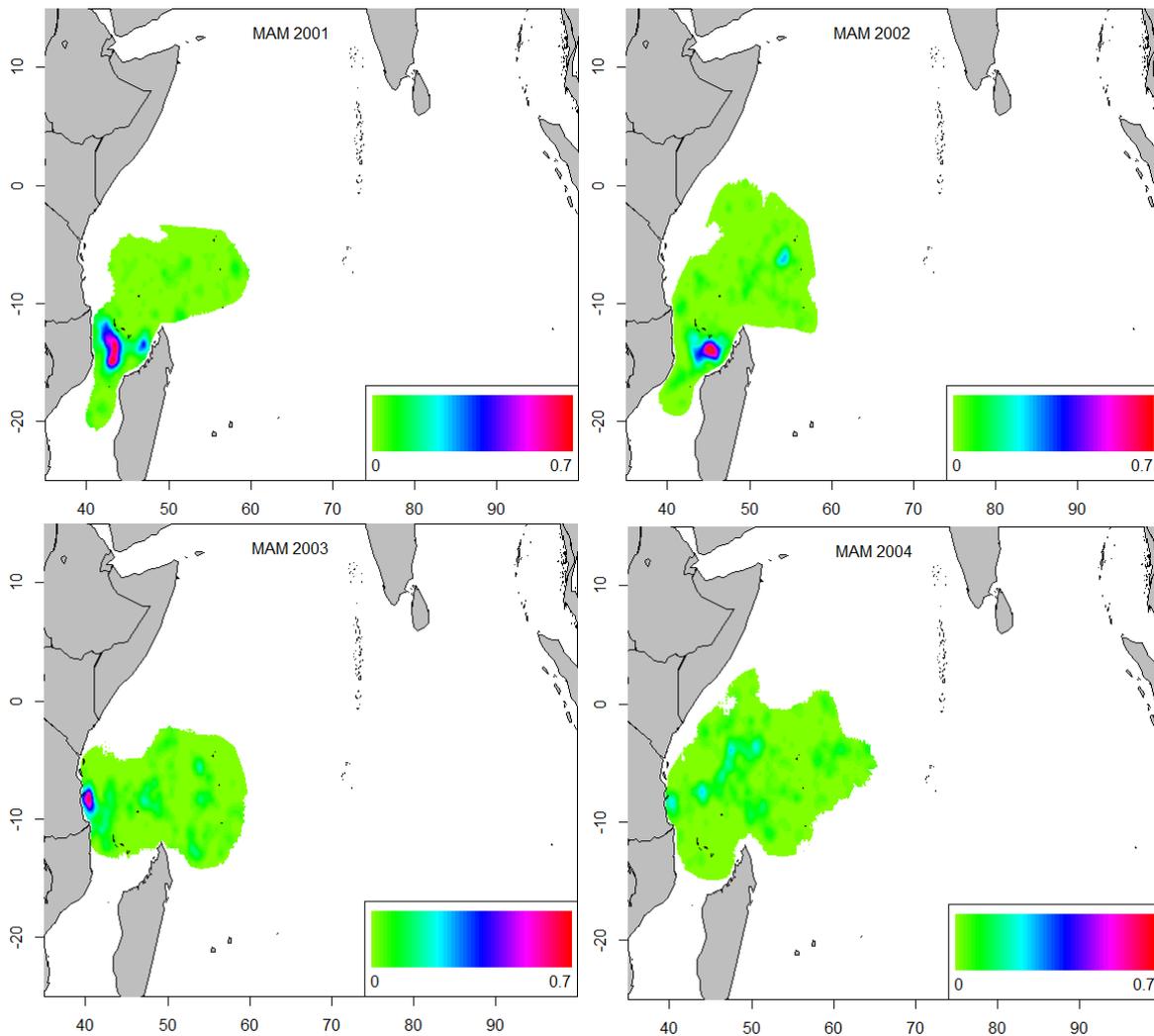


Figure 21 : Cartes de la distribution spatiale potentielle des thons capturables sous DCP au cours du trimestre 2 (MAM) entre 2001 et 2004.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Echelle spatio-temporelle

Les deux techniques de classification utilisées ont montré l'existence de 3 groupes de mois présentant une assez forte homogénéité spatiale, i.e. des mois durant lesquels les calées sont effectuées globalement dans une même zone géographique (D-J ; M-A-M ; A-S-O). Ces résultats qui ne portent que sur les calées réalisées sur DCP sont cohérents avec la description de la saisonnalité de cette pêcherie réalisée par [Kaplan et al. \(2014\)](#). Il semble ainsi exister 3 périodes annuelles majeures dans le calendrier des thoniers senneurs français de l'océan indien, qui correspondent à 3 zones de pêche bien distinctes. L'étude des captures et du nombre de calées par mois et par type de banc montre également que ces 3 périodes correspondent à 3 « stratégies » de pêche différentes. De décembre à janvier, les senneurs ciblent principalement les bancs de gros albacore et de patudo sur banc libre dans le centre de l'océan indien. Ils concentrent ensuite leur activité de pêche dans le nord du canal du Mozambique sur les objets flottants artificiels, et surtout naturels, présents en grand nombre dans cette zone de Mars à Mai. Enfin, ils ciblent les bancs libres et les DCPs au large des côtes somaliennes d'Août à Octobre. Cette boucle semble se répéter chaque

année. A l'inverse, les mois de février et de novembre apparaissent comme des mois « intermédiaires », durant lesquelles la position géographique moyenne des calées (centre de gravité) est assez variable d'une année à l'autre.

On voit ainsi qu'aucun découpage temporel n'est pleinement satisfaisant, compte tenu de la volonté de réaliser des groupes de mois de même longueur (afin d'être en mesure de comparer la densité de l'effort de pêche d'un trimestre à l'autre). Réaliser 6 groupes de 2 mois aurait impliqué de casser deux périodes homogènes (M-A-M et A-S-O). Utiliser 3 groupes de 4 mois (N-D-J-F ; M-A-M-J ; J-A-S-O) aurait permis de conserver les 3 périodes homogènes mises en évidence, mais aurait impliqué d'associer le mois de juin à la période mars-avril-mai, qui est bien distincte des autres mois de l'année. Une échelle temporelle de 4 mois paraissait également très longue compte tenu de la volonté de réaliser une étude « fine ». Le découpage finalement retenu (D-J-F ; M-A-M ; J-J-A ; S-O-N) n'est pas optimal au regard des analyses statistiques réalisées, mais a semblé être le meilleur compromis possible pour la réalisation de cette étude. Notons que ce découpage est par ailleurs similaire à celui utilisé par [Dagorn et al. \(2013\)](#), qui se sont également intéressés aux DCPs dans l'océan indien, mais sous un angle éco-éthologique plus que pour des considérations halieutiques comme c'est le cas ici.

Enfin, rappelons que la définition de l'échelle spatio-temporelle n'est pas une étape anodine, puisqu'elle conditionne l'ensemble des résultats obtenus. En effet, les caractéristiques statistiques d'ordre 2 (variance) et donc les paramètres du variogramme sont par exemple affectées par la résolution choisie. Les résultats de cette étude doivent donc être appréhendés relativement à l'échelle spatio-temporelle utilisée. Par ailleurs, le fait d'observer une structure spatiale avec des pixels de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  et d'obtenir un variogramme quasi-pépitique avec des pixels de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  peut sembler surprenant. Il est donc bon de noter que certaines résolutions spatiales ne permettent pas de voir correctement les structures même quand elles existent ([Rivoirard et al. 2000](#)).

#### 4.2. Intensité locale de l'effort de pêche

L'augmentation significative de l'aire de présence observée au cours du trimestre 1 (DJF) indique une extension progressive de la zone prospectée en moyenne par les senneurs durant ce trimestre, au cours de la période 2000-2012. Le trimestre 1 est le seul trimestre durant lequel ce phénomène a été observé de manière nette. Par ailleurs, le nombre total de calées sur DCP/bateau et l'aire positive suivent tous les deux la même tendance croissante. Cette augmentation indique une intensification de la pêche sur DCP à cette période de l'année, traditionnellement consacrée à la pêche sur banc libre ([Chassot et al. 2012](#)). Bien que cela n'ait pas été vérifié, ce constat laisse penser que l'extension de la zone prospectée par les senneurs est en partie due à l'augmentation de la pêche sur DCP. L'évolution sans tendance de l'ICL indique que la proportion de pixels « riches » est restée globalement la même : aucun phénomène de concentration locale n'a été observé durant ce trimestre. Rappelons que le nombre total de calées sur DCP/bateau ne présente aucune évolution caractéristique durant les 3 autres trimestres étudiés.

Au cours de la période 2000-2012, l'augmentation significative de l'ICL du trimestre 4 (SON) indique un phénomène de concentration locale de l'effort de pêche sur DCP à cette période de l'année. Durant la même période, l'aire de présence et l'aire positive ont fluctué sans tendance. De plus, comme c'est l'ICL5 qui contrôle l'évolution des ICL 4 et 3, cela indique

que le nombre de pixels « riches » a globalement augmenté au cours de cette période pendant que le nombre de pixels avec des valeurs inférieures restait globalement stable. Cette densification à l'échelle du pixel est restée spatialement cohérente puisque les caractéristiques des variogrammes sont restées stables dans le même temps. Les pixels riches sont donc restés en moyenne proches les uns des autres, laissant apparaître des concentrations régionales de l'effort de pêche (i.e. à l'échelle de plusieurs pixels). Ces concentrations apparaissent sous la forme d'un ou plusieurs patches selon les années (Figure 22)

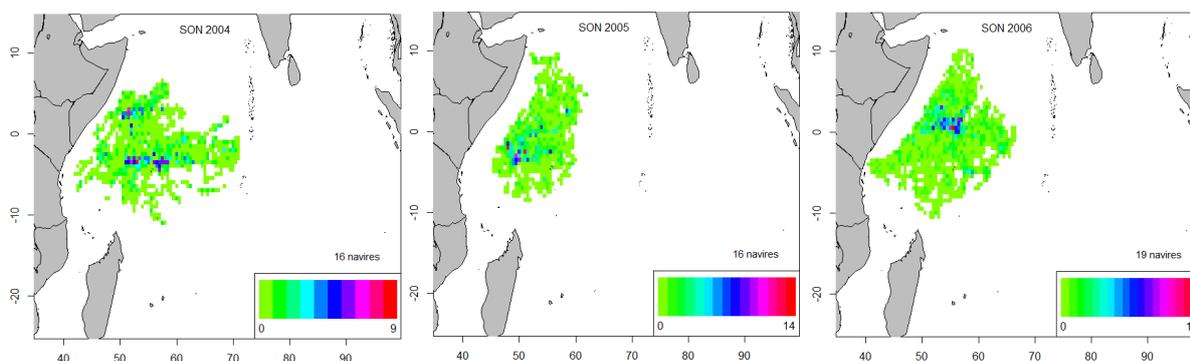


Figure 22 : Distribution spatiale de l'effort de pêche sur DCP au cours du trimestre 4 en 2004 (à gauche), 2005 (au milieu), et 2006 (à droite). On distingue deux patches différents en 2004, et un patch principal en 2005 et 2006.

Cette concentration de l'effort de pêche est très certainement liée à l'augmentation majeure de la densité de DCPs mis à l'eau dans la zone somalienne (densité de DCPs jusqu'à 40 fois supérieure à la densité d'objets flottants naturels<sup>11</sup>, Fauvel *et al.* 2009). Elle pourrait ainsi indiquer une concentration de la ressource, i.e. une modification du comportement des bancs de thons, qui passeraient plus de temps dans la même zone. Cette observation supporterait alors l'hypothèse selon laquelle les DCPs peuvent agir comme « pièges écologiques » (Fréon & Dagorn 2000 ; Ménard *et al.* 2000 ; Hallier & Gaertner 2008). Cependant, cette étude ne permet en aucun cas de vérifier que ce changement du comportement des bancs de thons est effectif, ni qu'il affecte la fitness des 3 espèces concernées (reproduction, alimentation).

Alors que l'aire de présence et l'aire positive ne présentent aucune tendance nette durant le trimestre 2, l'ICL présente une évolution caractéristique difficilement interprétable (diminution entre 2000-2006, augmentation forte entre 2006-2009, nouvelle diminution entre 2009-2012). On peut cependant noter que le canal du Mozambique exploité durant le trimestre 2 est une zone naturellement riche en objets flottants naturels d'origine terrestre. Une part de la variabilité de l'ICL s'explique ainsi probablement par l'évolution de la densité d'objets flottants naturels, qui elle-même varie avec les conditions climatiques régionales. Contrairement à la zone somalienne exploitée durant le trimestre 4, le canal du Mozambique a par ailleurs été beaucoup moins touché par l'accroissement du nombre de DCPs mis à l'eau (+ 10% seulement de la densité d'objets flottants<sup>12</sup> ; Fauvel *et al.* 2009). Aucun phénomène particulier (extension spatiale, concentration) n'a été mis en évidence durant le trimestre 3 (JJA).

<sup>11</sup> Estimation réalisée à partir des données observateurs entre septembre 2007 et novembre 2008 dans la zone somalienne (Fauvel *et al.* 2009)

<sup>12</sup> Estimation réalisée à partir des données observateurs entre mars et mai 2007 (Fauvel *et al.* 2009).

### 4.3. Structuration spatiale de la densité des calées sur DCP

#### 4.3.1. Pondération des variogrammes empiriques

L'absence de structure des variogrammes empiriques pondérés par la donnée VMS peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, il n'existe probablement pas de corrélation ponctuelle entre le nombre de données VMS et le nombre de calées sur DCP par pixel. Une zone de plusieurs pixels riches en calées semble être également une zone riche en données VMS, mais cette corrélation spatiale ne se vérifie pas à l'échelle du pixel. On peut ainsi trouver un pixel riche en données VMS et pauvre en calées juste à côté d'un pixel riche en calées, mais relativement pauvre en données VMS, ce qui in fine déstructure totalement les variogrammes empiriques. Deuxièmement, rappelons que les senneurs pêchent sur banc libre et sur DCP au cours une même marée. « L'effort d'échantillonnage » mesuré par la quantité de données VMS contenue dans un pixel (qui est par ailleurs une mesure possible de l'effort de pêche) n'est pas propre à la pêche sur DCP. Il correspond au contraire à un effort global « DCP + banc libre », et ne permet pas à lui seul de déterminer la part d'effort relative accordée à chacun de ces deux modes de pêche (Bez *et al.* 2011). Il n'est donc pas nécessairement pertinent de l'utiliser comme mode de pondération dans le calcul d'un variogramme qui décrit uniquement la structure spatiale des calées sur DCP.

#### 4.3.2. Variogrammes modélisés : ajustement et structures caractéristiques

##### Structures caractéristiques

Tout d'abord, notons que les quatre variogrammes trimestriels modélisés sont avant tout caractérisés par un fort effet de pépité (40% à 63% de la variance totale), ce qui montre une forte hétérogénéité locale de la densité de calées sur DCP. Cela signifie que deux pixels voisins sont en moyenne assez différents l'un de l'autre. Dans une situation extrême, un effet de pépité pur signifierait que deux valeurs voisines seraient non-corrélées, comme c'est le cas dans cette pêcherie pour les captures par calée (annexe 6). Ce n'est pas le cas ici puisque l'on observe une structure spatiale représentée par le modèle sphérique. Il existe donc bien une corrélation spatiale des données à l'intérieur de la zone de pêche, mais qui s'accompagne d'une forte hétérogénéité locale.

La valeur de la portée est également instructive car elle nous renseigne sur l'échelle caractéristique du phénomène étudié. L'échelle d'agrégation des calées sur DCP est significativement différente d'un trimestre à l'autre (pairwise.wilcox.test,  $pc < 10^{-8}$ ), et elle est pratiquement multipliée par 2 entre le trimestre 1 (1.6°) et le trimestre 4 (3.1°). Ces résultats sont cohérents avec les connaissances dont nous disposons de la pêcherie. En effet, les senneurs ciblent principalement les bancs libres durant le trimestre 1, d'où des calées sur DCP plus ponctuelles, induisant une portée plus faible. A l'inverse, la pêche sur DCP est prédominante durant le trimestre 4 au large des côtes somaliennes, zone très riche en DCPs artificiels. On peut donc s'attendre à ce que le réseau de DCPs au sein duquel les bancs de thons se concentrent soit de plus grande envergure. Ces structures spatiales sont en revanche stables d'une année à l'autre au sein d'un même trimestre. Cela montre que la combinaison des stratégies de pêche et du processus d'agrégation des bancs de thons sur les DCP n'a pas changé de manière notable, à une échelle de 0.5°, au cours de la période 2000-2012. Bien que les informations qu'elle fournit soient limitées, l'étude variographique est donc intéressante en elle-même en dehors de toute démarche cartographique, dans la mesure où elle permet de quantifier les caractéristiques majeures de la structure spatiale du processus étudié.

### Ajustement des variogrammes empiriques

Dans le cadre de cette étude, les modèles sphériques et exponentiels auraient pu être utilisés tous les deux compte tenu de la forme générale des variogrammes empiriques. Cependant, le modèle exponentiel a tendance à être trop « optimiste », c'est-à-dire qu'il minimise l'effet de pépîte. Il est donc déconseillé d'utiliser ce modèle lorsque les variogrammes empiriques possèdent un effet de pépîte élevé, ce qui est le cas dans cette étude. Le modèle sphérique a donc été jugé le plus approprié pour décrire l'auto-corrélation des données. Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle isotrope se justifie de deux façons. Premièrement, l'utilisation d'un modèle anisotrope (un variogramme par direction étudiée) est pertinente uniquement si il y a de bonnes raisons de penser que la continuité du phénomène étudié n'est pas la même dans toutes les directions. Dans un contexte minier, la teneur du sol en hydrocarbure présente souvent une meilleure continuité horizontale que verticale, en raison de la gravité. Dans un contexte halieutique, l'abondance d'une espèce marine côtière benthique va également présenter une meilleure continuité parallèlement à la côte plutôt que perpendiculairement à celle-ci. Dans le cas de cette étude, les captures de thons sont réalisées en général en domaine pélagique à une distance importante des côtes ; la densité de calées sur DCP n'a a priori aucune raison de présenter une continuité variant avec la direction. L'étude visuelle des cartes représentant le nombre de calées par pixel a confirmé cette hypothèse. Deuxièmement, l'utilisation d'un modèle anisotrope nécessite l'estimation de deux paramètres supplémentaires, i.e. les paramètres nécessaires à décrire l'anisotropie, ce qui complexifie le modèle. Cette complexification n'était pas souhaitable dans la mesure où la structure spatiale mise en évidence avec un modèle isotrope était déjà relativement faible. L'utilisation d'un modèle isotrope a donc été retenue.

#### 4.3.3. Utiliser 4 variogrammes moyens modélisés : un choix pertinent ?

La stabilité interannuelle des variogrammes empiriques d'un même trimestre peut poser question compte tenu de la taille très importante des intervalles de confiance à 90% estimés par la méthode des bandes tournantes. Cette taille s'explique cependant par l'allure lognormale de la distribution des données, qui présente un grand nombre d'occurrences de valeurs faibles, et de moins en moins d'occurrences à mesure que le nombre de calées/pixel augmente. On observe ainsi sur la Figure 17 du paragraphe 3.3.3 que le modèle et les variogrammes empiriques sont proches de la borne inférieure de l'intervalle de confiance, et à l'inverse très loin de la borne supérieure.

L'hypothèse de lognormalité de la distribution du nombre de calées/pixel est par ailleurs une hypothèse forte compte tenu de la réalité des données. Notons tout d'abord que l'histogramme est fortement déséquilibré « à gauche » (très grand nombre d'occurrences des valeurs 0 et 1). De plus, la loi de distribution du nombre de calées/pixel est une loi discrète et non continue : de ce point de vue, une loi binomiale négative aurait été plus appropriée. Quelques valeurs fortes sont également absentes de la distribution certaines années (ex : 6 calées/pixel). Ces écarts au modèle rajoutent probablement de la variabilité qui augmente la taille de l'intervalle de confiance. L'hypothèse de lognormalité était cependant la seule qui permettait d'appliquer une méthode statistiquement rigoureuse destinée à juger le caractère significatif ou non de la variabilité interannuelle des variogrammes empiriques. Sous cette hypothèse, la stabilité des variogrammes est vérifiée.

Les variogrammes annuels de certains trimestres étaient difficilement modélisables car trop bruités, en raison notamment de la faible quantité de données disponibles pour déterminer la

structure spatiale du phénomène étudié (ex : 500 calées réparties sur plus de 600 000 km<sup>2</sup> en août-sept-oct. 2003). Le fait d'utiliser un variogramme moyen pour la période 2000-2012 présente ainsi l'avantage d'augmenter la quantité de matériel statistique, et donc la robustesse du modèle (Morfin *et al.* 2012). L'utilisation d'un modèle moyen différent pour chaque trimestre se justifie en raison des différences significatives observées sur les paramètres de portée et de pépite des variogrammes modélisés.

Enfin, notons que paradoxalement, la stabilité interannuelle des variogrammes empiriques n'est pas incompatible avec l'augmentation de la concentration locale et régionale de l'effort de pêche sur DCP détectée au cours du trimestre 4 (A-S-O) grâce à l'ICL. En effet, les variogrammes ont été standardisés par la variance des données, cette stabilité n'indique donc rien concernant la « richesse » des pixels. En croisant les résultats statistiques (aire positive, ICL) et géostatistiques (variogrammes), il est possible de schématiser la dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP de la façon suivante. Les calées sur DCP se font « par paquet » (puisque'il y a corrélation spatiale, les pixels riches sont en moyenne proches les uns des autres), globalement de la même façon depuis 13 ans (puisque la structure spatiale est stable), mais de façon différente d'un trimestre à l'autre (puisque les 4 variogrammes trimestriels sont significativement différents). La façon dont les pixels « riches » se répartissent les uns par rapport aux autres dans l'espace n'a pas changé de manière notable (même échelle caractéristique), mais ces pixels deviennent globalement de plus en plus riches (concentration locale).

#### **4.4. Distribution spatio-temporelle des calées sur DCP et distribution de la ressource**

A l'échelle de l'océan indien, la distribution spatio-temporelle des calées sur DCP résulte d'un double phénomène : d'une part, la distribution réelle des bancs de thons qui s'agrègent sous les DCPs, et d'autre part, le comportement des pêcheurs, dont l'activité reflète plus ou moins bien l'abondance locale. Ainsi, la distribution spatio-temporelle des calées réalisées durant le trimestre 1 est sans doute peu représentative de la distribution réelle des bancs de thons listao et de juvéniles d'albacore et de patudo, dans la mesure où les pêcheurs se rendent dans le centre de l'océan indien pour cibler les bancs d'albacore adultes qui se regroupent pour la reproduction (Stéquert *et al.* 2001). Même si la pêche sur DCP semble s'être intensifiée dans cette zone entre 2000 et 2012, ce mode de pêche reste minoritaire à cette période de l'année (Figure 3).

De manière générale, la forte variabilité temporelle de la distribution spatiale des calées sur DCP observée dans cette étude n'est pas surprenante, puisque la distribution effective des bancs de thons est elle-même susceptible de varier de manière importante. Rappelons en effet que les 3 espèces commerciales de thon tropical sont des espèces pélagiques migratrices, qui peuvent parcourir de grandes distances pour des raisons de reproduction et d'alimentation (Kaplan *et al.* 2014). Leur distribution spatio-temporelle est notamment liée à des phénomènes climatiques variables selon les années (upwelling, front thermique), observés à méso-échelle et qui conditionnent la production primaire et donc la quantité de proies disponibles (Tew Kai *et al.* 2009 ; Weimerskirch *et al.* 2010). A cette variabilité naturelle vient s'ajouter une variabilité induite par le comportement des pêcheurs. Par exemple, le déplacement vers l'est de l'activité de pêche observable à partir de 2006-2007 dans la zone somalienne (annexe 5) n'est pas du à une modification de la distribution

spatiale des thons, mais à une mesure de sécurité prise par les senneurs pour réduire le risque d'attaque par les pirates somaliens (Kaplan *et al.* 2014).

La piraterie somalienne est dans le cas de cette pêcherie un exemple de biais induits par l'utilisation de données de pêche dans les procédures d'estimation d'abondance ou de cartographie des ressources halieutiques. L'échantillonnage réalisé par les pêcheurs est de manière générale imparfait et dicté par des considérations diverses, souvent d'ordre économique. La flotte des senneurs français de l'océan indien étant composée au maximum d'une vingtaine de navires durant la période 2000-2012, les cartes réalisées à partir de ces données de pêche ne permettent d'obtenir qu'une vision partielle de la distribution réelle de la ressource. De plus, les bancs capturés sur DCP étant plurispécifiques, la distribution de la ressource décrite par ces cartes correspond à une distribution conjointe des thons listao, et des juvéniles d'albacore et de patudo.

Par ailleurs, notons l'intérêt finalement assez limité de l'utilisation d'une méthode de krigeage pour la réalisation de ces cartes, puisque le nombre de calées effectuées dans chaque pixel est connu pour la majorité des pixels au sein des polygones d'étude. Le krigeage intervient ici surtout comme un lisseur statistiquement meilleur qu'une simple moyenne glissante, puisqu'il prend en compte la façon dont la variance des données varie avec la distance.

Enfin, rappelons que la méthode utilisée pour étudier la distribution spatiale des thons tropicaux repose sur deux hypothèses majeures. Ces hypothèses sont (i) que le nombre de calées sur DCP est une bonne mesure de l'effort de pêche sur DCP, et (ii) qu'il existe une forte corrélation entre effort de pêche et abondance locale dans le cas de cette pêcherie. Bien qu'elles aient déjà été formulées (Fonteneau *et al.* 1999 ; Kaplan *et al.* 2014), ces deux hypothèses sont fortes, et il est par ailleurs difficile de les valider. Les cartes représentant la distribution spatiale des thons tropicaux sont donc à considérer avec précaution, en ayant à l'esprit les différentes limites précédemment citées.

## 5. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le but de cette étude était d'étudier la dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP des thoniers senneurs français dans l'océan indien. Cette pêcherie a subi de profondes mutations au cours des deux dernières décennies, dont l'une des plus importantes est l'utilisation croissante des DCPs dérivants : il était donc intéressant d'essayer de comprendre l'impact potentiel de ce changement majeur sur l'allocation spatiale de l'effort de pêche.

L'étude de 4 indicateurs simples caractérisant l'activité de pêche – le nombre de calées sur DCP, l'aire de présence, l'aire positive et l'indice de concentration local – a permis de mettre en évidence une augmentation de l'activité de pêche sur DCP au cours du trimestre 1, période traditionnellement consacrée à la pêche sur banc libre. Elle a permis également de détecter un phénomène de concentration de l'effort de pêche sur DCP dans la zone somalienne (trimestre 4) au cours de la période 2000-2012, à l'échelle locale (pixel), et régionale (groupe de pixels), puisque les données de densités de calées sont structurées spatialement. Comme l'a montré l'étude variographique, cette structure spatiale est cependant modérée, caractérisée par un fort effet de pépite (40% à 60% de la variance totale), qui indique une forte hétérogénéité locale de la densité de calées sur DCP (Rivoirard *et al.* 2000). La structure spatiale de l'effort de pêche est par ailleurs stable au cours de la période 2000-2012 pour un trimestre donné, mais significativement différente d'un trimestre

à l'autre. Notons que ce dernier point se comprend assez bien, dans la mesure où chaque trimestre correspond à des stratégies de pêche et une zone géographique différentes.

La portée des variogrammes renseigne également sur l'échelle caractéristique des agrégations de calées, variant de 1.6° pour le trimestre 1 à 3.1° pour le trimestre 4. Jusqu'à aujourd'hui, la procédure de standardisation des CPUEs des thoniers senneurs (glm) ne tenait pas compte de la dynamique spatiale de l'effort de pêche, ou seulement à l'échelle des grandes zones IOTC (facteur « zone », [Soto et al. 2009](#)). Compte tenu de l'échelle spatiale des phénomènes d'agrégation de l'activité de pêche mis en évidence dans cette étude (1°-3°), il semble important d'utiliser à l'avenir une résolution spatiale plus fine dans la méthode de standardisation des CPUEs. Des carrés de 5°x5° pourraient par exemple être utilisés, comme cela est déjà le cas pour standardiser les CPUEs palangrières.

La méthodologie utilisée pour produire les cartes de la distribution spatiale des thons qui s'agrègent sous DCP présentent de nombreuses limites évoquées précédemment dans ce rapport. Parmi celles-ci, rappelons que le trimestre 1 est dans la pêcherie française une période de l'année consacrée à la pêche sur banc libre. Même si l'effort de pêche était fortement corrélé à l'abondance locale, la distribution spatiale de l'effort des senneurs français resterait une mauvaise représentation de la distribution des bancs qui s'agrègent sous DCP à cette période de l'année. A l'inverse, les senneurs espagnols sont réputés pour cibler majoritairement les DCP tout au long de l'année. Il aurait donc été intéressant d'utiliser simultanément les données françaises et espagnoles afin d'obtenir une vision plus exhaustive de la distribution de la ressource.

De manière générale, une partie importante des résultats de cette étude est descriptive : ce travail a permis de réaliser une caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP, mais apporte peu d'informations permettant de l'expliquer. Par exemple, le déplacement de la zone de pêche au nord du canal du Mozambique durant le trimestre 2 entre 2003 et 2006 est très probablement liée à une modification de la distribution spatiale de la ressource (sous l'hypothèse que les pêcheurs suivent les bancs de thons), qui elle-même est probablement corrélée aux conditions climatiques régionales ([Weimerskirch et al. 2010](#)). Cette hypothèse n'a cependant pas été testée, aucune variable environnementale n'ayant été utilisée dans ce travail. Il pourrait donc être intéressant d'étudier des variables environnementales (température de surface, pluviométrie, chlorophylle a, etc.) pour essayer d'expliquer ces observations.

## BIBLIOGRAPHIE

- Beverton, R.J., and Holt, S.J. (1957). On the dynamics of exploited fish populations. *Fish. Invest. Ser. II Mar. Fish. G.B. Minist. Agric. Fish. Food* 19, 533.
- Bez, N., Walker, E., Gaertner, D., Rivoirard, J., Gaspar, P. (2011). Fishing Activity of Tuna Purse Seiners Estimated from Vessel Monitoring System (VMS) Data . *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 68 (11): 1998-2010.
- Carruthers, T.R., Robert, N.M. A., Murdoch, K. M.A., Walters, C.J. (2011). Integrating Imputation and Standardization of Catch Rate Data in the Calculation of Relative Abundance Indices. *Fisheries Research* 109 (1): 157-167.
- Castro, J. J., Santiago, J.A., Santana-Ortega, A. T. (2002). A general theory on fish aggregation to floating objects: an alternative to the meeting point hypothesis. *Reviews in fish biology and fisheries* 11 (3): 255-277.
- Chassot, E., Dubroca, L., Delgado de Molina, A., Assan, C., Soto, M., Floch, L., Fonteneau, A. (2012). Decomposing purse seine CPUEs to estimate an abundance index for yellowfin free-swimming schools in the Indian Ocean during 1981–2011. *IOTC-2012-WPTT*: 14-33.
- Chiles, J.P., Delfiner, P. (2009). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Vol. 497. John Wiley & Sons.
- Ciannelli, L., Fauchald, P., Chan, K.S., Agostini, V.N., Dingsør, G.E.(2008). Spatial Fisheries Ecology : Recent Progress and Future Prospects. *Journal of Marine Systems* 71 (3): 223-236.
- Dagorn, L., Fréon, P. (1999). Tropical tuna associated with floating objects: a simulation study of the meeting point hypothesis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56 (6): 984-993.
- Dagorn, L., Holland, K.N., Restrepo, V., Moreno, G. (2013). Is It Good or Bad to Fish with FADs? What Are the Real Impacts of the Use of Drifting FADs on Pelagic Marine Ecosystems? *Fish and Fisheries* 14 (3): 391-415.
- Dempster, T., Taquet, M. (2004). Fish aggregation device (FAD) research: gaps in current knowledge and future directions for ecological studies. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 14 (1): 21-42.
- Fauvel, T., Bez, N., Walker, E. et al. (2009) Comparative study of the distribution of natural versus artificial drifting Fish Aggregating Devices (FADs) in the Western Indian Ocean. *IOTC-2009-WPTT-19*, 17 pp.

- Fonteneau, A., Chassot, E., Bodin, N. (2013). Global spatio-temporal patterns in tropical tuna purse seine fisheries on drifting fish aggregating devices (DFADs): Taking a historical perspective to inform current challenges. *Aquatic Living Resources* 26 (1): 37-48.
- Fonteneau, A., Gaertner, D., Nordstrom, V. (1999). An overview of problems in the catch per unit of effort and abundance relationship for the tropical purse seine fisheries. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 49 (3): 258-278.
- Fréon, P., Dagorn, L. (2000). Review of fish associative behaviour: toward a generalisation of the meeting point hypothesis. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 10 (2): 183-207.
- Gaertner, D., Dreyfus-Leon, M. (2004). Analysis of Non-Linear Relationships between Catch per Unit Effort and Abundance in a Tuna Purse-Seine Fishery Simulated with Artificial Neural Networks. *ICES Journal of Marine Science* 61 (5): 812-820.
- Hall, M. (1992). The association of tunas with floating objects and dolphins in the Eastern Pacific ocean: VII. Some hypotheses on the mechanisms governing the association of tunas with floating objects and dolphins. Background document for the International Workshop on the Ecology and Fisheries for Tunas Associated with Floating Objects, February 11–13 1992, La Jolla, CA, Available from Inter-American Tropical Tuna Commission, 8604 La Jolla Shores Dr, La Jolla, CA 92037 (mimeo) pp. 6.
- Hallier, J., Gaertner, D. (2008). Drifting Fish Aggregation Devices Could Act as an Ecological Trap for Tropical Tuna Species. *Marine Ecology Progress Series* 353 : 255-264.
- Harley, Shelton, J., Myers, R.A, Dunn, A. (2001). Is catch-per-unit-effort proportional to abundance? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58 (9): 1760-1772.
- Hilborn, R., Walters, C.J. (1992). *Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty*. London, Chapman and Hall.
- Kai, Tew, E., Rossi, V., Sudre, J., Weimerskirch, H., Lopez, C., Hernandez-Garcia, E., Marsac, F., Garçon, V. (2009). Top marine predators track Lagrangian coherent structures. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (20): 8245-8250.
- Kaplan, D. M., Chassot, E., Amande, J. M., Dueri, S., Demarcq, H. , Dagorn, L., Fonteneau, A. (2014). Spatial Management of Indian Ocean Tropical Tuna Fisheries: Potential and Perspectives. *ICES Journal of Marine Science*.
- Laurec, A. (1977). Analyse et estimation des puissances de pêche. *ICES Journal of Marine Science* 37 (2): 173-185.
- Ménard, F., Stéquert, B., Rubin, A., Herrera, M., Marchal, E. (2000). Food consumption of tuna in the Equatorial Atlantic ocean: FAD-associated versus unassociated schools. *Aquatic Living Resources* 13 (4): 233-240.

- Makoto, M., Guillotreau, P., Sun, Ch-H., Ishimura, G. (2010). Recent developments in the tuna industry: stocks, fisheries, management, processing, trade and markets. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Morfin, M., Fromentin, J.M., Jadaud, A., Bez, N. (2012). Spatio-temporal patterns of key exploited marine species in the Northwestern Mediterranean Sea. *PloS one* 7 (5): e37907.
- Petitgas, P. (2001). Geostatistics in fisheries survey design and stock assessment: models, variances and applications. *Fish and Fisheries* 2 (3): 231-249.
- Pianet, R., Delgado de Molina, A., Dewals, P., Lucas, V., Floch, L., Chassot, E., Ariz, J. (2011). Statistics of the main purse seine fleets fishing in the Indian Ocean (1981-2010). IOTC-2011-WPTT: 13-24.
- Renard D., Bez N., Desassis N., Beucher H., Ors F., Laporte F. (2014) RGeostats: The Geostatistical package [10.0.4]. MINES ParisTech. Free download from: <http://cg.ensmp.fr/rgeostats>
- Rivoirard, J., Simmonds, J., Foote, K. G., Fernandes, P., Bez, N. (2000). Geostatistics for estimating fish abundance. Blackwell Science.
- Soto, M., Pallarés, P., Delgado De Molina, A., Gaertner, D., and others. (2009). Standardized CPUE for juvenile yellowfin, skipjack and bigeye tuna from the European purse seine fleet in the Atlantic Ocean from 1991 to 2006. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 64 (4): 1044-1053.
- Stanley, R.D, R., Kieser, K., Cooke, A., Surry, M., Mose, B. (2000). Estimation of a Widow Rockfish (*Sebastes Entomelas*) Shoal off British Columbia, Canada as a Joint Exercise between Stock Assessment Staff and the Fishing Industry. *ICES Journal of Marine Science* 57 (4): 1035-1049.
- Stéquert, B., Nuñez Rodriguez, J., Cuisset, B., Le Menn, F. (2001). Gonadosomatic index and seasonal variations of plasma sex steroids in skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from the western Indian Ocean. *Aquatic Living Resources* 14 (5): 313-318.
- Torres-Iruneo, E., Gaertner, D., Chassot, E., Dreyfus-León, M. (2014). Changes in Fishing Power and Fishing Strategies Driven by New Technologies: The Case of Tropical Tuna Purse Seiners in the Eastern Atlantic Ocean. *Fisheries Research* 155 : 10-19.
- Walters, C. (2003). Folly and Fantasy in the Analysis of Spatial Catch Rate Data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60 (12): 1433-1436.

Weimerskirch, H., Le Corre, M., Tew Kai, E., Marsac, F. (2010). Foraging movements of great frigatebirds from Aldabra Island: relationship with environmental variables and interactions with fisheries. *Progress in Oceanography* 86 (1): 204-213.

Wuillez, M., Poulard, J.C., Rivoirard, J., Petitgas, P., Bez, N. (2007). Indices for capturing spatial patterns and their evolution in time, with application to European hake (*Merluccius merluccius*) in the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science*: 64 (3): 537-550.

Wuillez, M., Rivoirard, J., Petitgas, P. (2009). Notes on survey-based spatial indicators for monitoring fish populations. *Aquatic Living Resources* 22 (2): 155-164.

## Annexe 1 : Résultats des classifications réalisées avec la méthode des « k-means » pour définir l'échelle temporelle

Le critère de classification est le centre de gravité (longitude/latitude) mensuel des calées réalisées sur DCP entre 2000 et 2013.

Trois classifications ont été réalisées : k=6 (6 groupes) ; k=4 (4 groupes) ; k=3 (3 groupes).

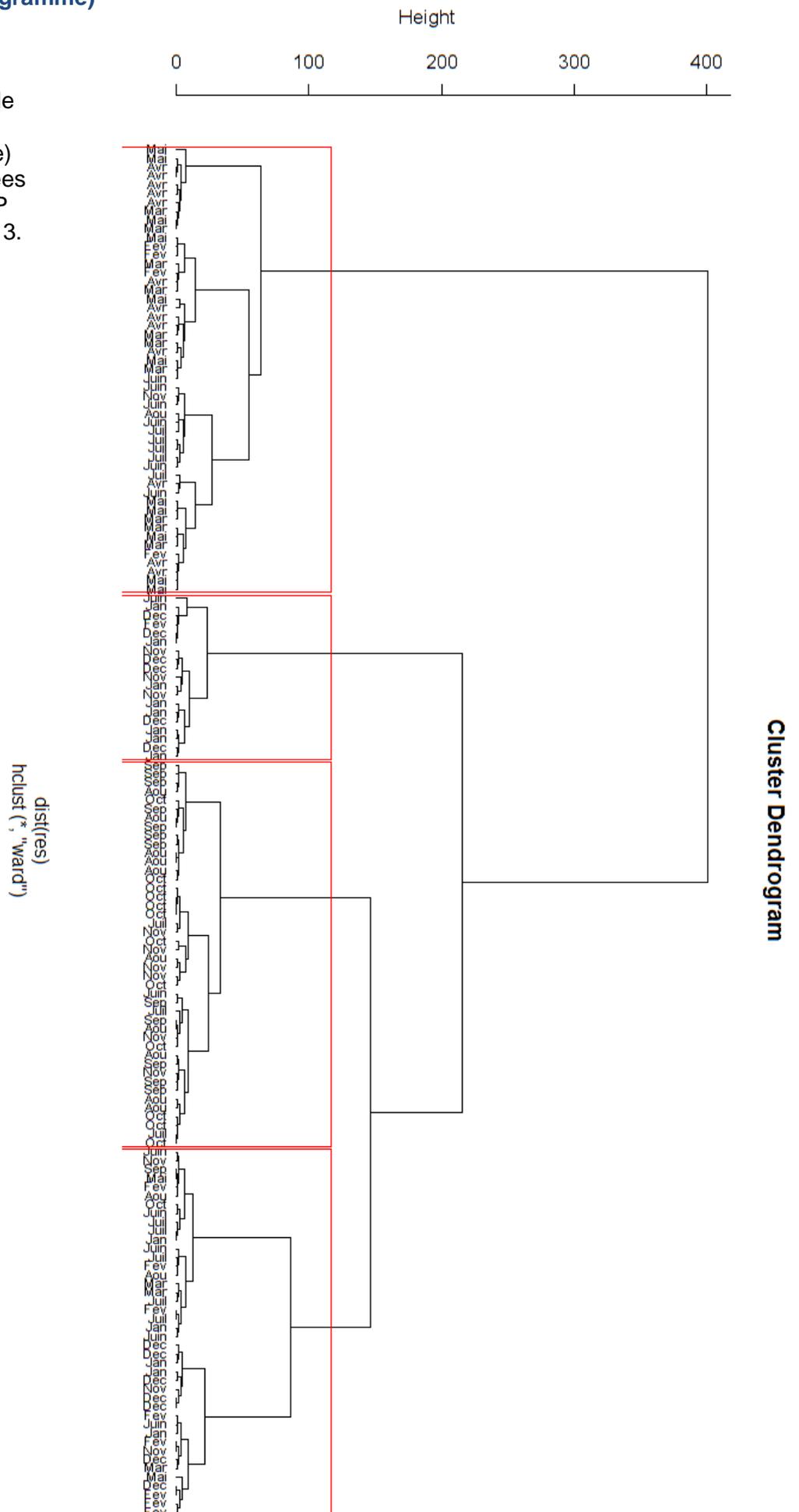
k-cluster (k=6)	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
1	0	2	3	2	0	1	8	10	3	1	0	2
2	0	0	0	0	0	0	1	2	10	12	11	5
3	7	3	5	1	0	1	1	0	0	0	2	4
4	6	8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
5	0	0	4	7	5	4	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	3	8	7	1	1	0	0	0	0

k-cluster (k=4)	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
1	0	0	1	8	11	10	2	1	1	0	0	0
2	1	3	10	5	2	3	9	9	2	1	1	3
3	0	0	0	0	0	0	1	3	10	12	12	6
4	12	10	2	0	0	0	1	0	0	0	0	4

k-cluster(k=3)	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
1	1	3	4	3	0	1	7	8	12	13	13	1
2	0	0	5	10	13	11	5	5	1	0	0	0
3	12	10	4	0	0	1	1	0	0	0	0	12

## Annexe 2 : Résultat de la classification hiérarchique utilisée pour définir l'échelle temporelle (dendrogramme)

Le critère de classification est le centre de gravité (longitude/latitude) mensuel des calées réalisées sur DCP entre 2000 et 2013.



**Annexe 3 : Relations entre les espérances, les variances et les variogrammes d'une variable aléatoire Z suivant une loi log-normale, et sa transformation logarithmique Y=log(Z)**

Soit Z une variable aléatoire suivant une loi log-normale, et Y=log(Z) sa transformation logarithmique, qui suit une loi normale. Alors les espérances, les variances et les variogrammes de Z et Y sont liées par les relations ci-dessous :

- $\mu_Y = \log(\mu_Z) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{\sigma_Z^2}{\mu_Z^2} + 1\right)$  (1)

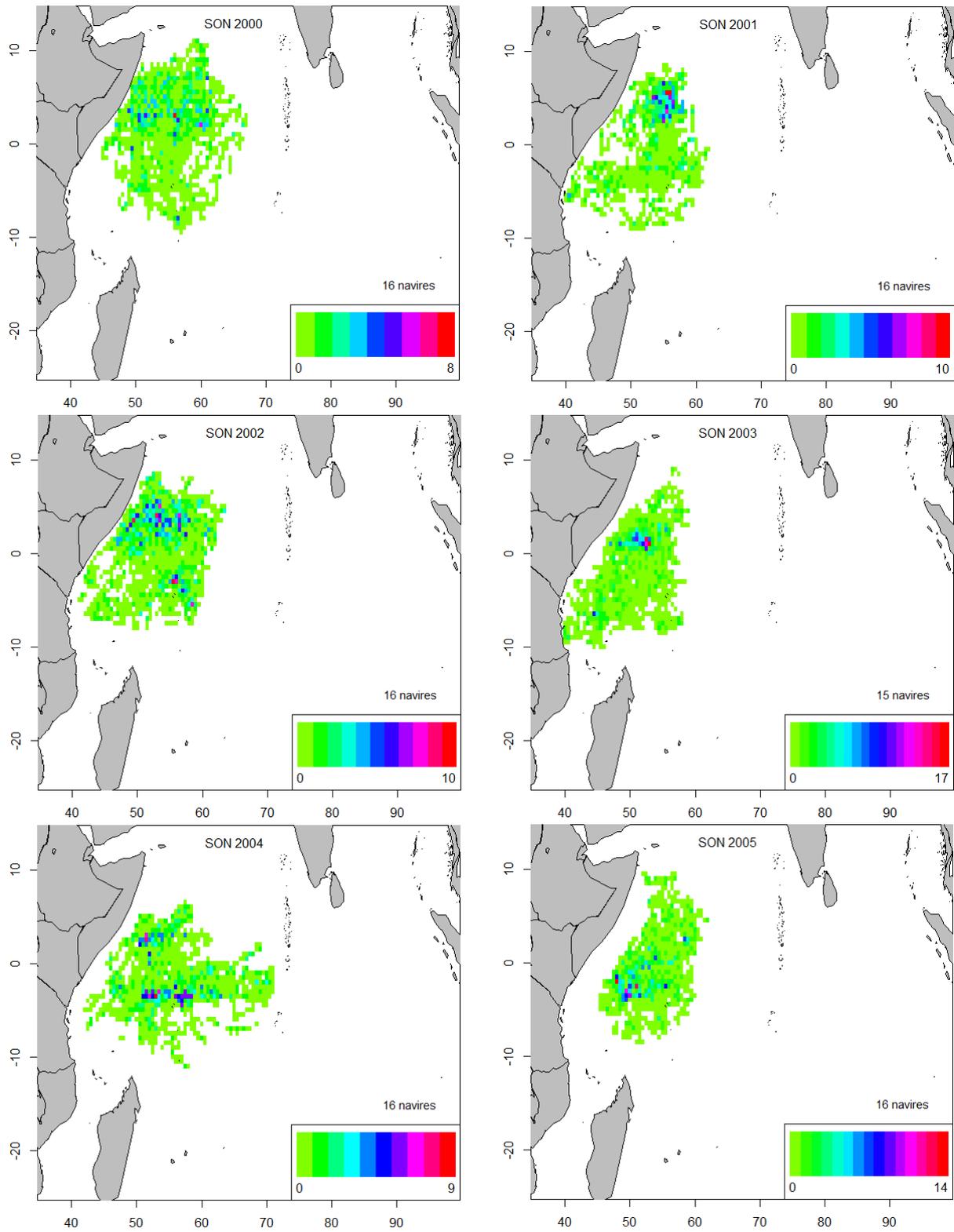
- $\sigma_Y^2 = \log\left(\frac{\sigma_Z^2}{\mu_Z^2} + 1\right)$  (2) avec  $\begin{cases} \mu_Z, \mu_Y \text{ les espérances de Z et Y} \\ \sigma_Z^2, \sigma_Y^2 \text{ les variances de Z et Y} \\ \gamma_Z, \gamma_Y \text{ les variogrammes de Z et Y} \end{cases}$

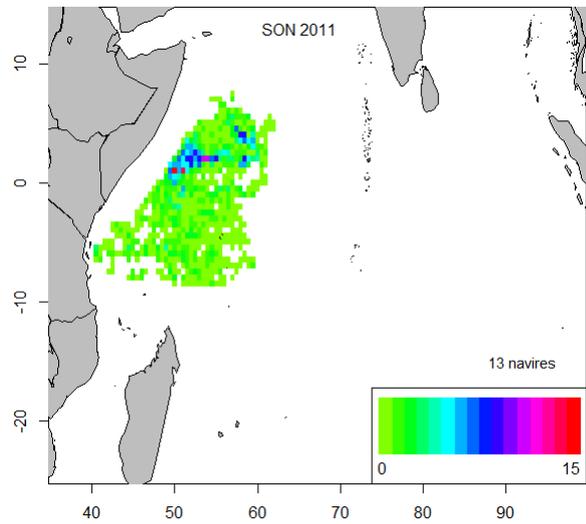
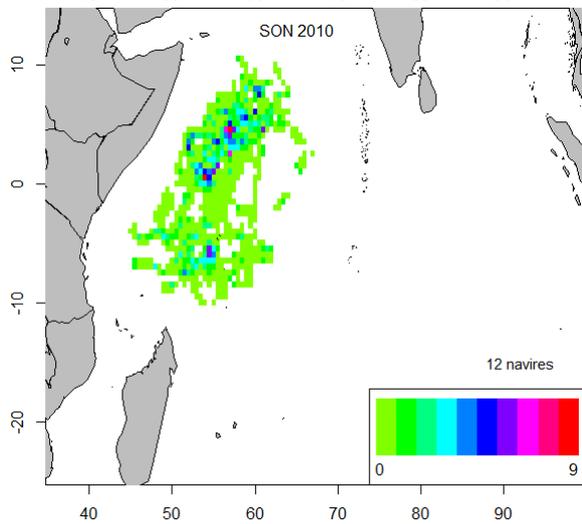
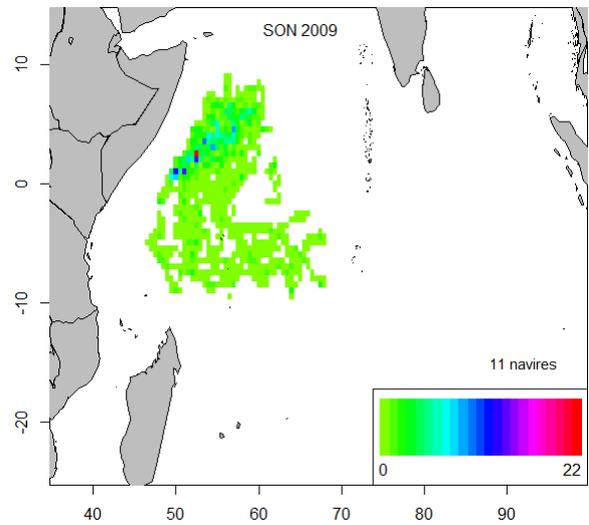
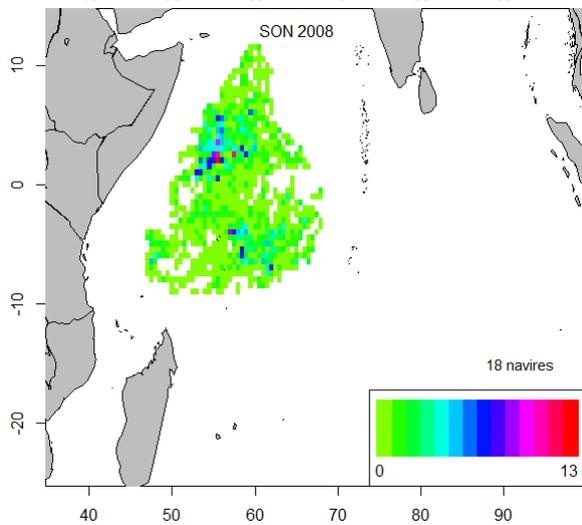
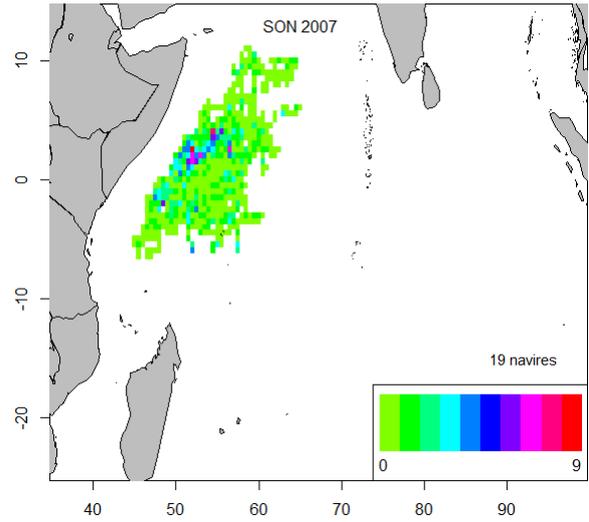
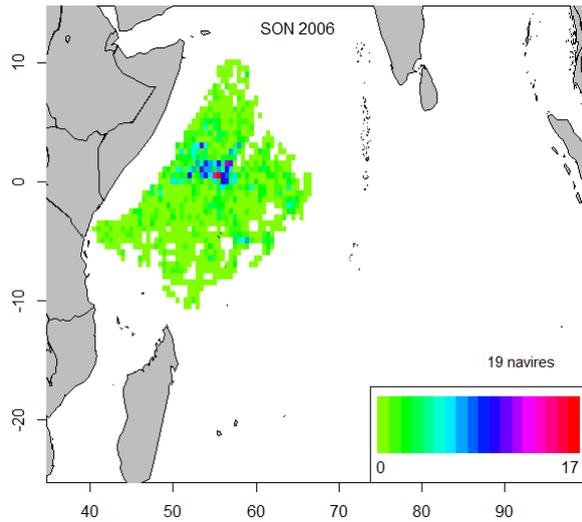
- $\gamma_Y = -\log\left(1 - \frac{\gamma_Z}{\mu_Z^2 \cdot \exp(\sigma_Y^2)}\right)$  (3)

Dans le cas de cette étude, la variable aléatoire Z suivant une loi log-normale correspond à la densité de calées sous DCP (nombre de calées/pixel x trimestre).

Pour chaque trimestre, les relations (1), (2) et (3) ont été utilisées afin de modéliser le variogramme de Y=log(Z), à partir du variogramme moyen modélisé de Z, de sa variance et son espérance.

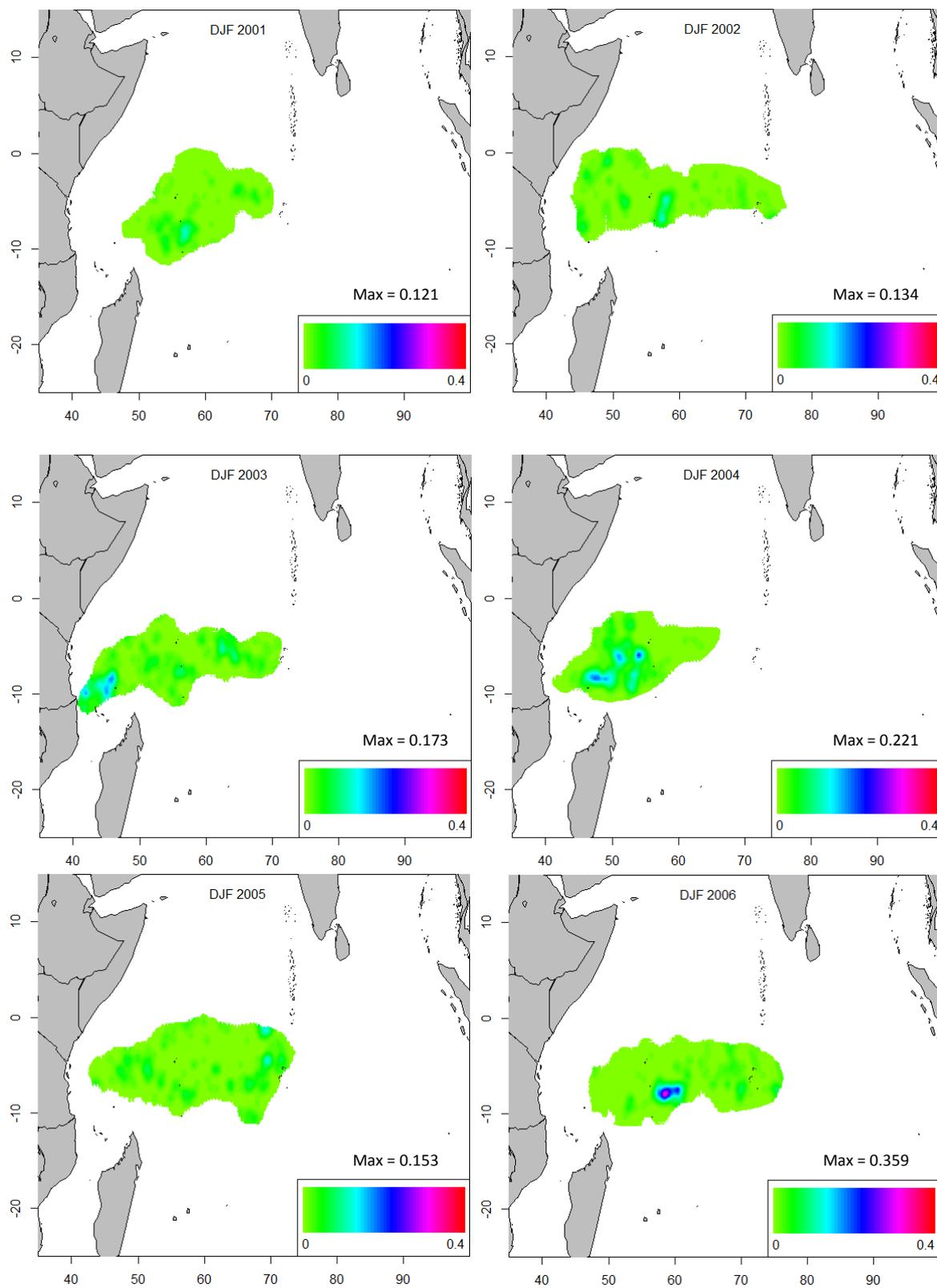
**Annexe 4 : Cartes de l'effort de pêche sur DCP entre 2000 et 2011 au cours du trimestre 4 (septembre-octobre-novembre)**

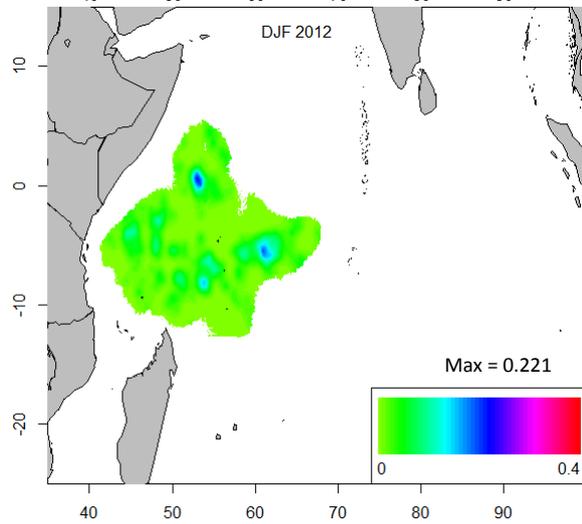
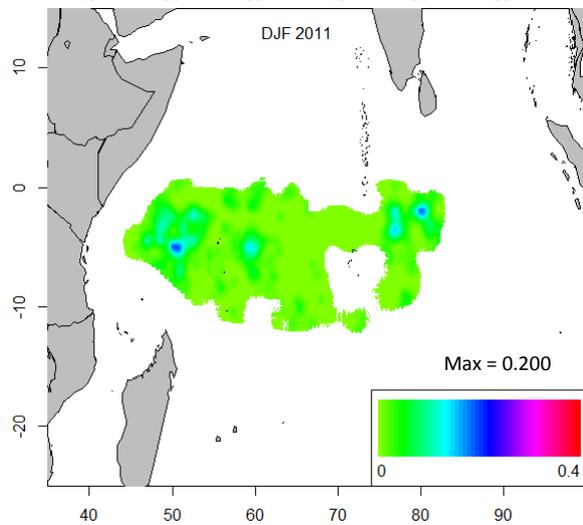
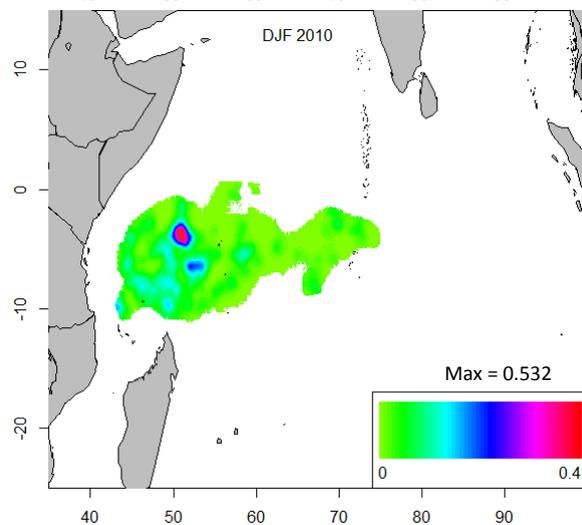
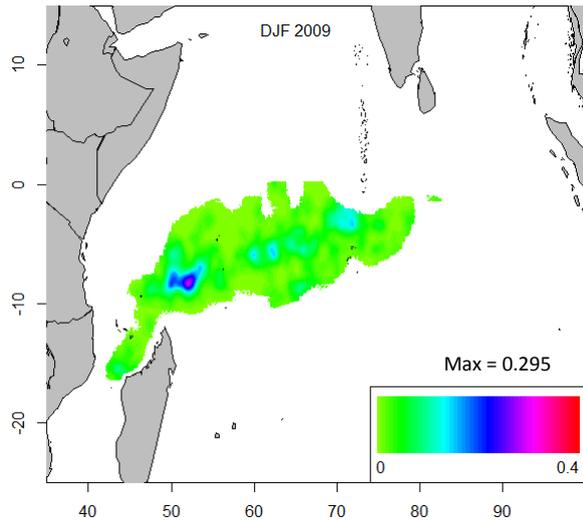
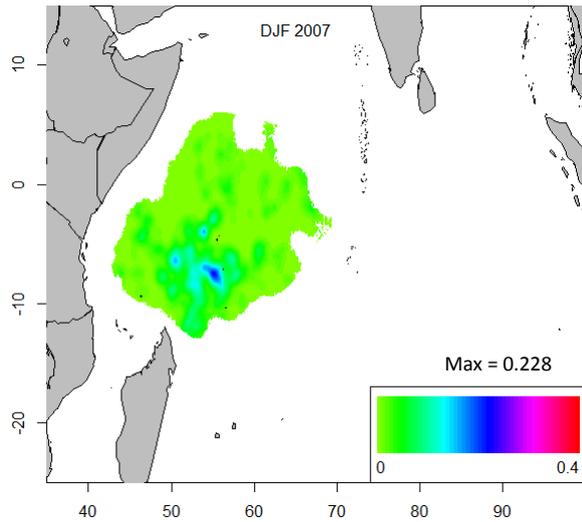




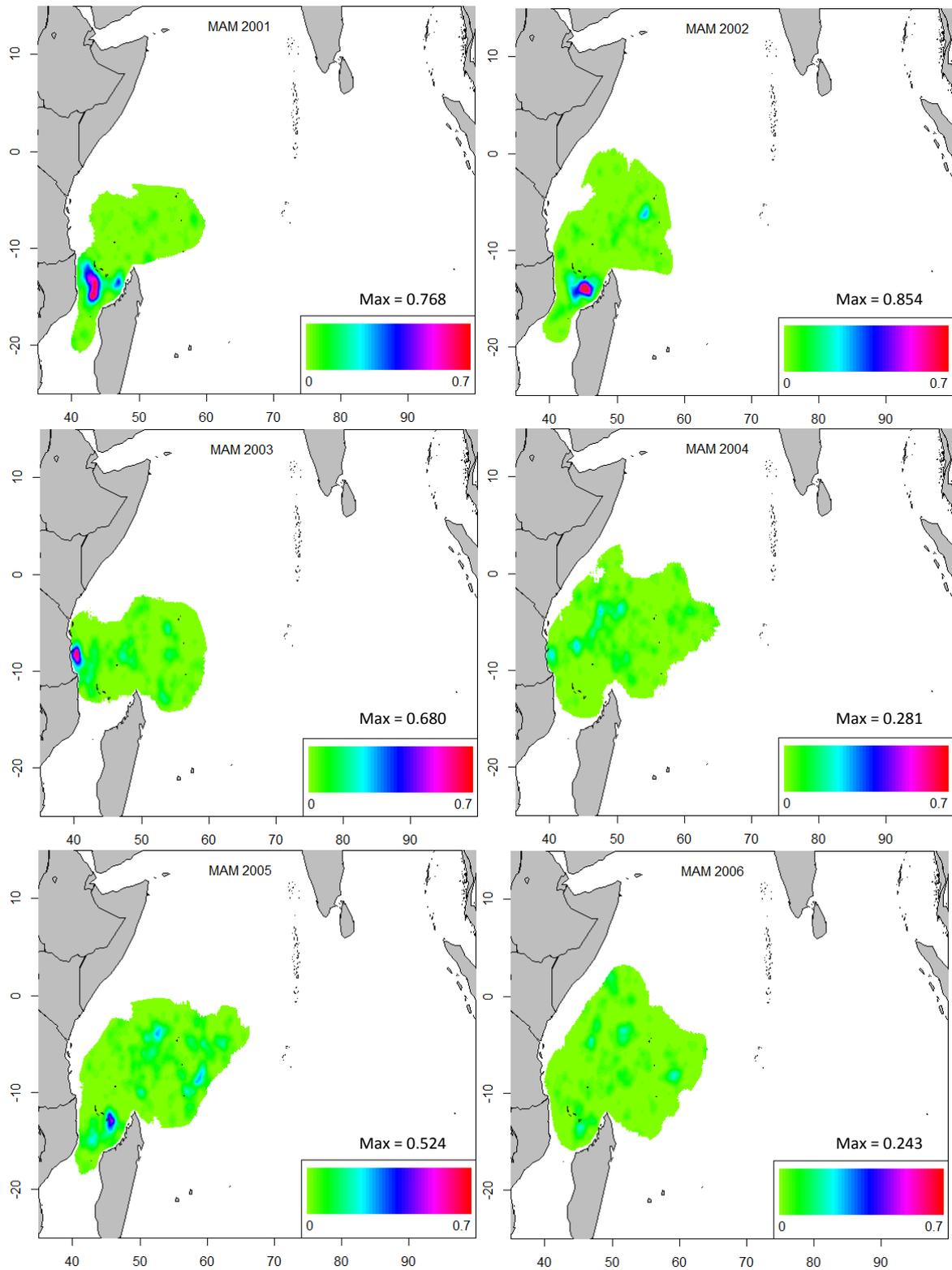
## Annexe 5 : Atlas des cartes de la distribution spatiale potentielle des thons tropicaux capturables sous DCP

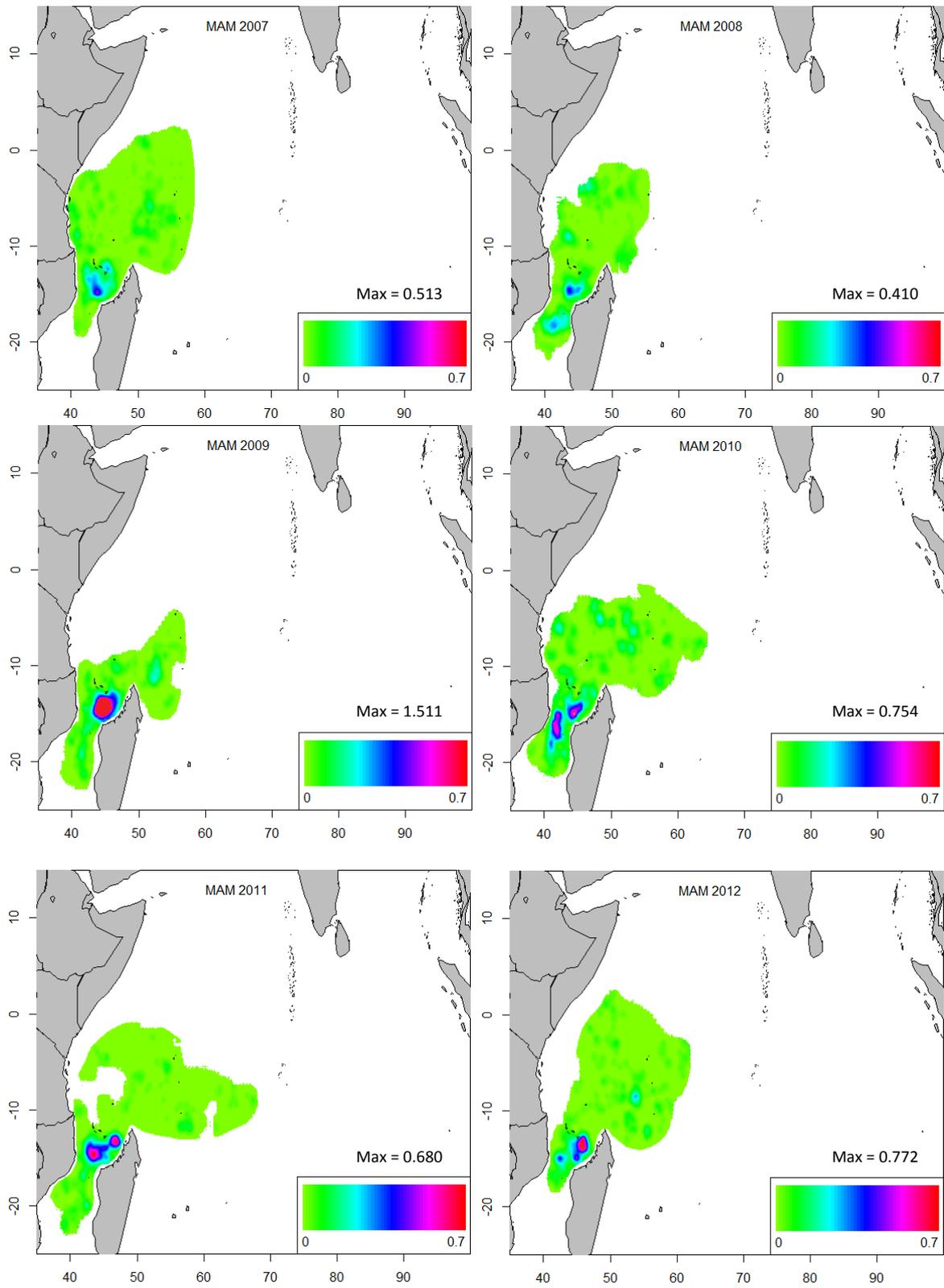
### ▪ 1<sup>er</sup> trimestre : décembre-janvier-février



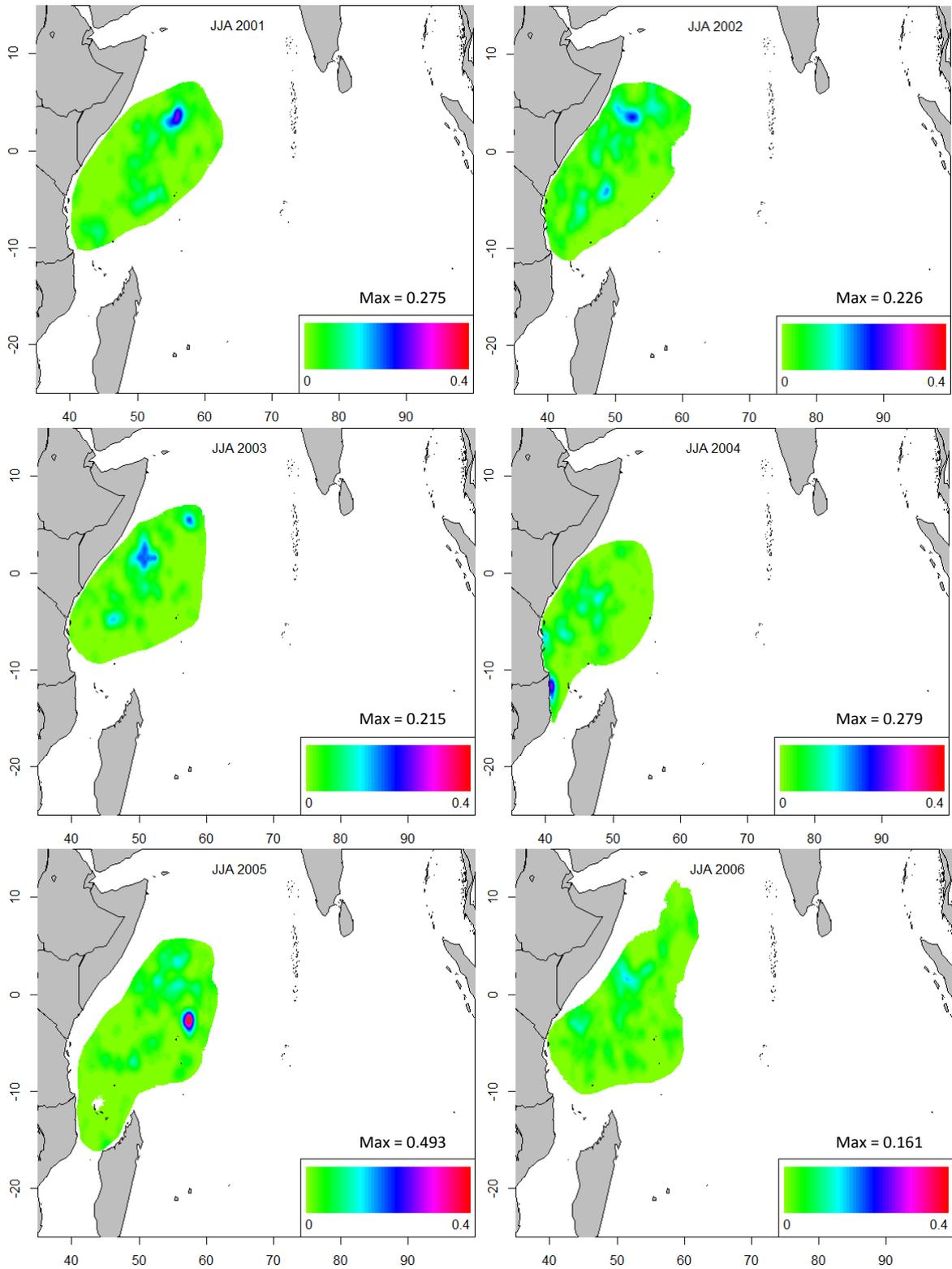


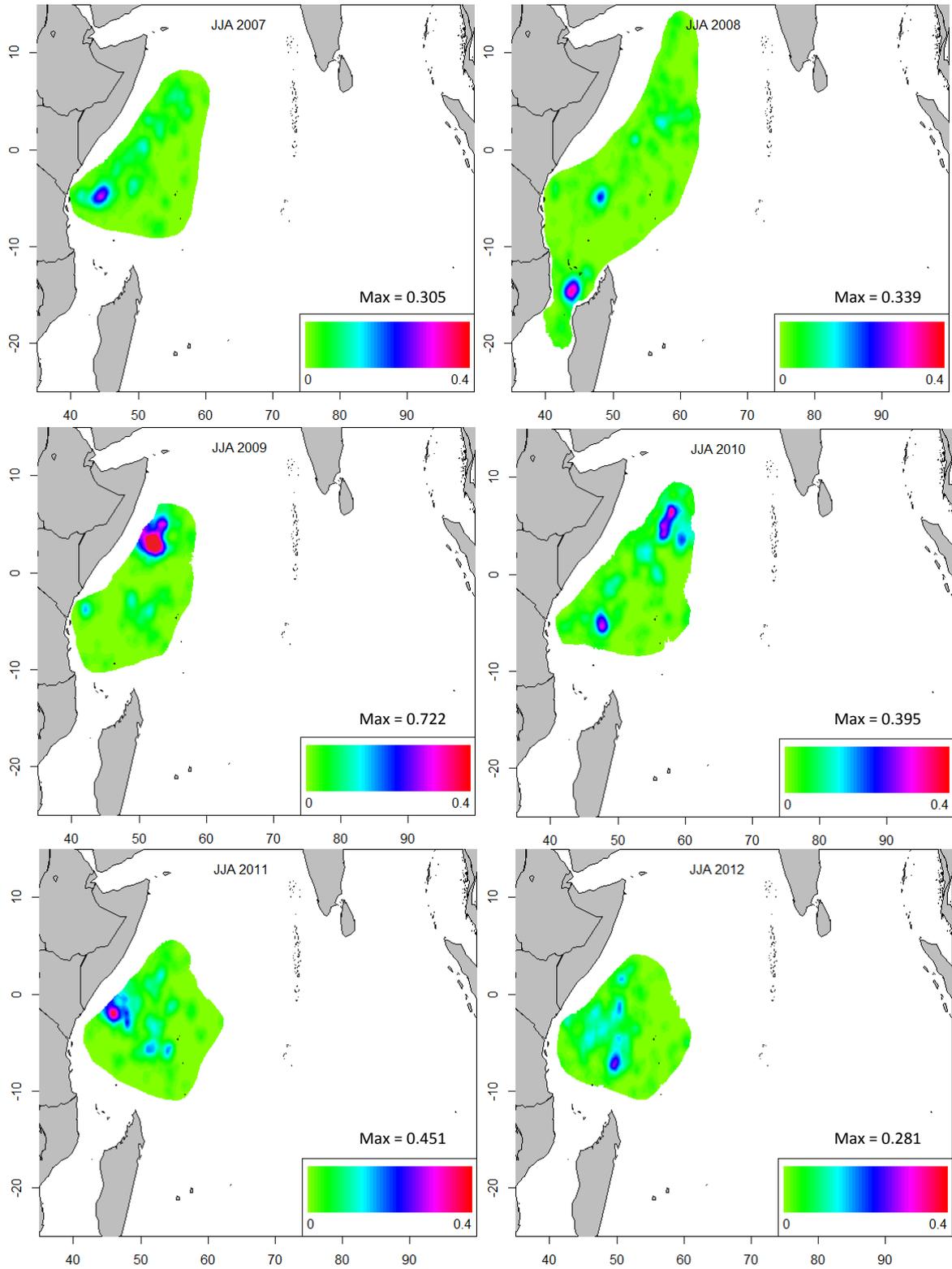
■ 2<sup>e</sup> trimestre : mars-avril-mai



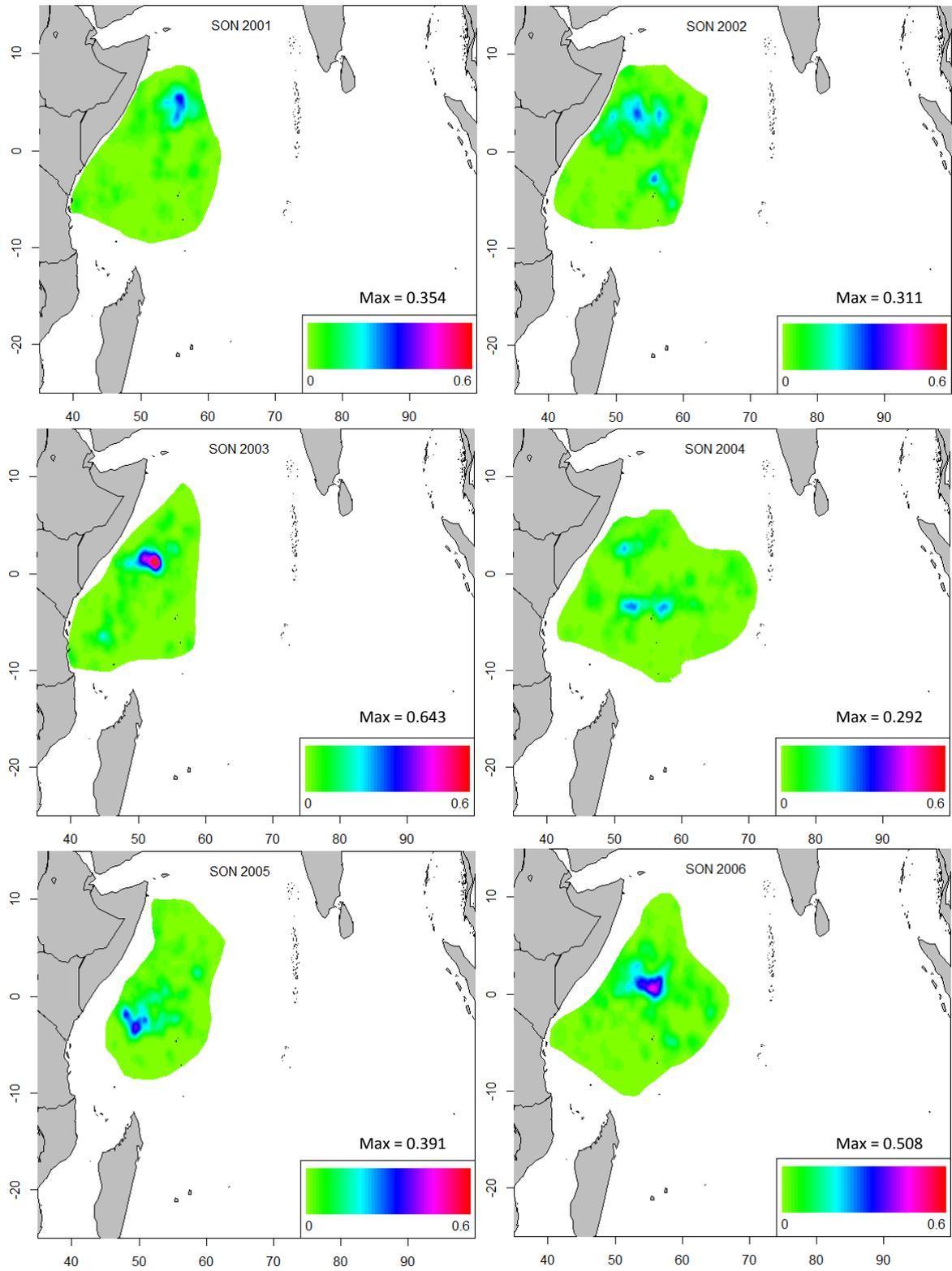


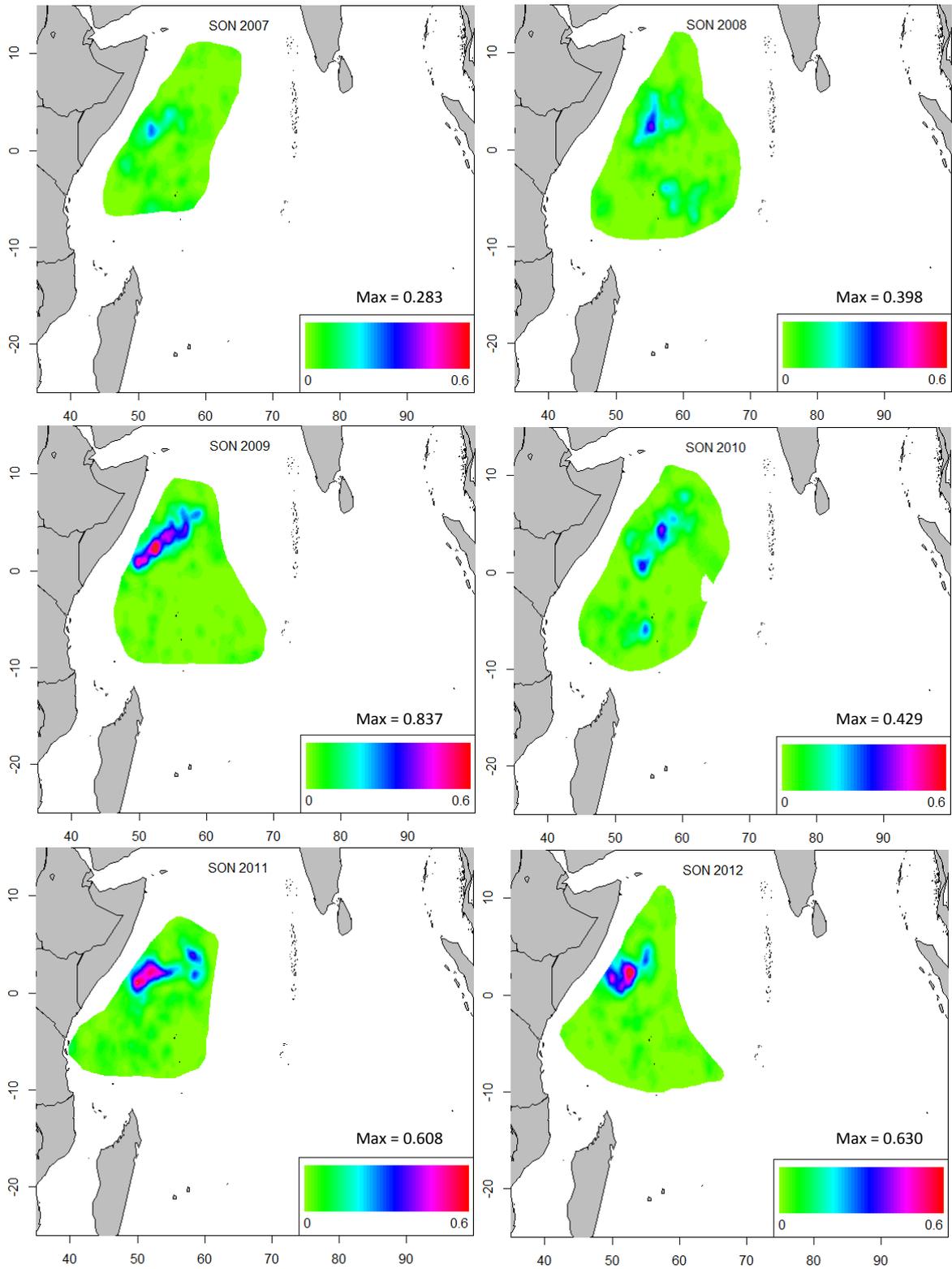
■ 3<sup>e</sup> trimestre : juin-juillet-août





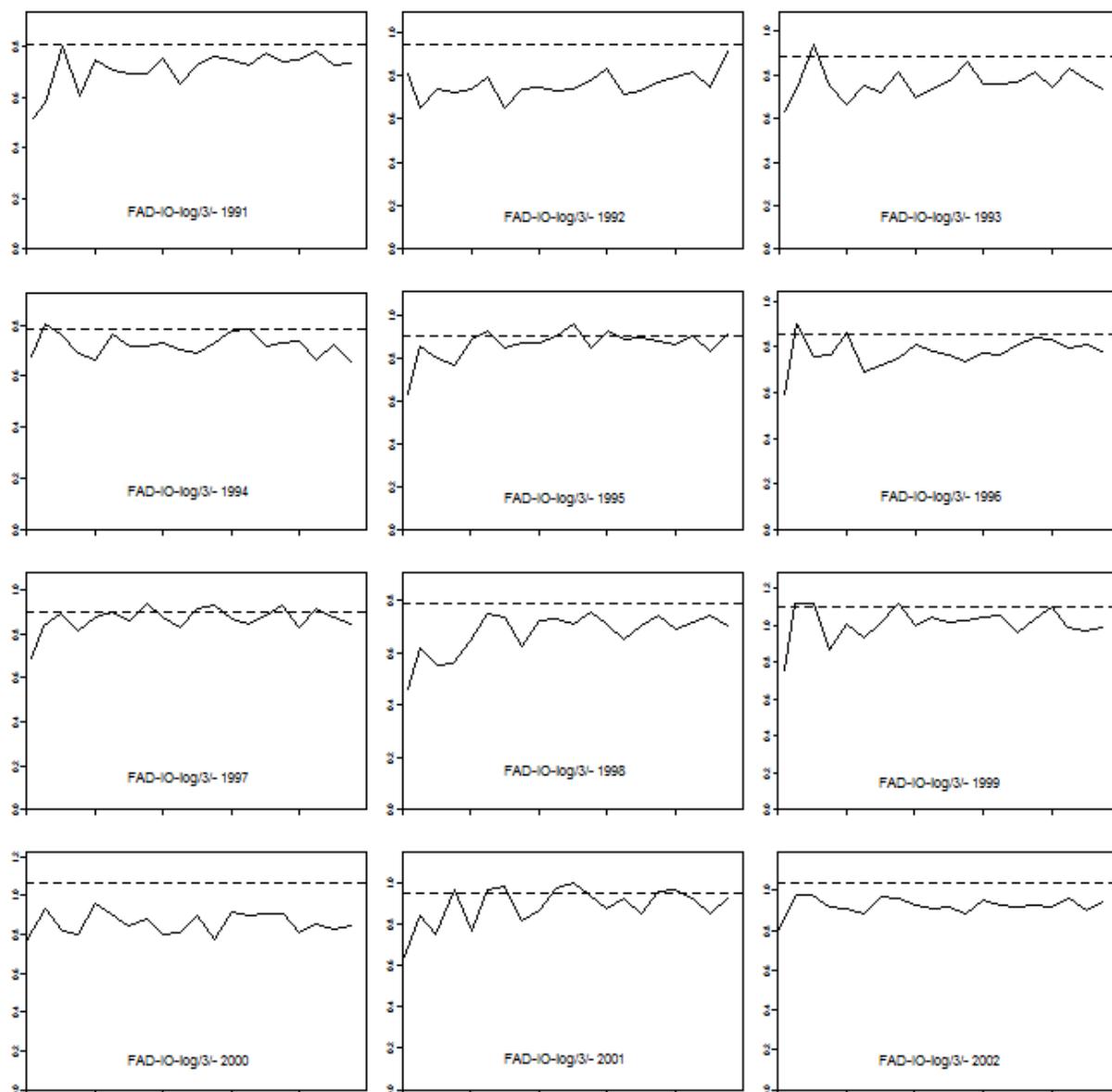
4<sup>e</sup> trimestre : septembre-octobre-novembre

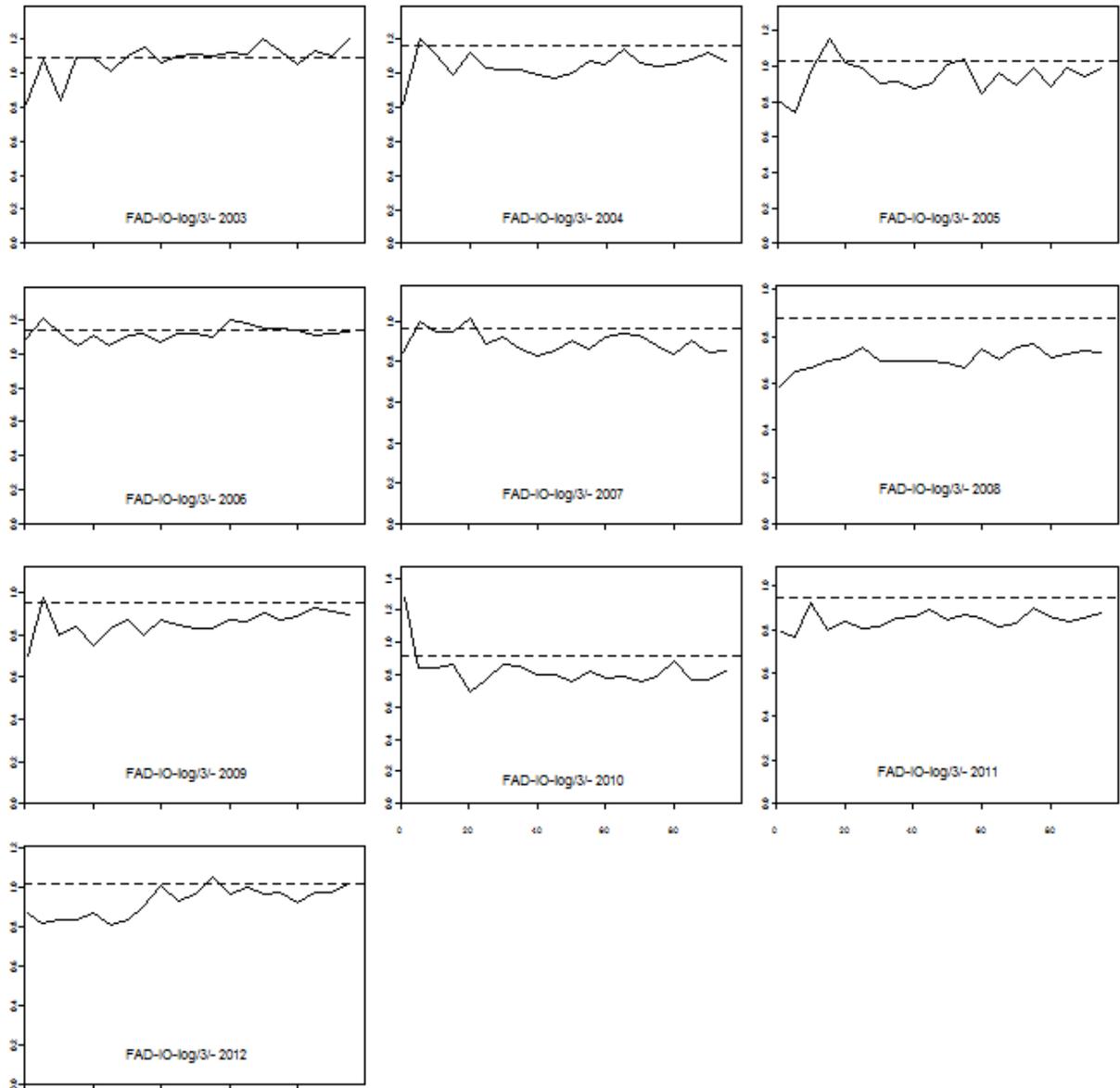




## Annexe 6 : Variogrammes empiriques annuels des captures/calée réalisées sur DCP dans l'océan indien entre 1991 et 2012

L'allure pépitique des variogrammes montre l'absence d'auto-corrélation spatiale des données de captures/calée.





## Annexe 7 : Algorithme utilisé pour calculer les heures de lever et de coucher du soleil.

```
#Auteur : Emily Walker ; 18 janvier 2010.
#Source:Almanac for Computers, 1990, published by Nautical Almanac Office, United States Naval
#Observatory,Washington, DC 20392
# passablement transformé par DGaertner

fsunrise=fonction(jour,mois,an,latitude,longitude,localOffset=4) {
#sunset - sunrise Algorithm

# zenith: Sun's zenith for sunrise/sunset, official = 90° 50',civil= 96 °,nautical = 102 degree, astronomical = 108
degrees
#zenith<-90.5
zenith<-90.833
# zenith officiel #Attention: 90.5 transformé en ENT(90.5)+((90.5-ENT(90.5))*(5/3))=90.83311 et
COS(RADIANS(90.83311)),
#ou COS(90.83311*pi/180)= -0.01454
zenith<-trunc(zenith)+((zenith-trunc(zenith))*(5/3))
#Inputs: jour, mois, an: date of sunrise/sunset
# lat, lon: location for sunrise/sunset (en degré décimal)
# NOTE: longitude is positive for East and negative for West
# localOffset (décalage horaire)
#1. first calculate the day of the year
    N1 <-floor(275 * mois / 9)
    N2 <-floor((mois + 9) / 12)
    N3<- (1 + floor((an - 4 * floor(an / 4) + 2) / 3))
    N<- N1 - (N2 * N3) + jour - 30
#2. convert the longitude to hour value and calculate an approximate time
    lngHour <-longitude / 15
    #if rising time is desired:
    t.r <- N + ((6 - lngHour) / 24)
    #if setting time is desired:
    t.s <-N + ((18 - lngHour) / 24)
#3. calculate the Sun's mean anomal
    M.r <- (0.9856 * t.r) - 3.289
    M.s <- (0.9856 * t.s) - 3.289
#4. calculate the Sun's true longitude
#NOTE: L potentially needs to be adjusted into the range [0,360) by adding/subtracting 360
    L.r <- M.r + (1.916 * sin(M.r*pi/180)) + (0.020 * sin(2 * M.r*pi/180)) + 282.634
    if (L.r<0) L.r<-L.r+360
    if (L.r>360) L.r<-L.r-360
    L.s <- M.s + (1.916 * sin(M.s*pi/180)) + (0.020 * sin(2 * M.s*pi/180)) + 282.634
    if (L.s<0) L.s<-L.s+360
    if (L.s>360) L.s<-L.s-360
#5a. calculate the Sun's right ascension
# NOTE: RA potentially needs to be adjusted into the range [0,360) by adding/subtracting 360
    RA.r <- atan(0.91764 * tan(L.r*pi/180))*180/pi
    if (RA.r<0) RA.r<-RA.r+360
    if (RA.r>360) RA.r<-RA.r-360
    RA.s <- atan(0.91764 * tan(L.s*pi/180))*180/pi
    if (RA.s<0) RA.s<-RA.s+360
    if (RA.s>360) RA.s<-RA.s-360
#5b. right ascension value needs to be in the same quadrant as L
    Lquadrant.r <- (floor( L.r/90)) * 90
    RAquadrant.r <- (floor(RA.r/90)) * 90
    RA.r <- RA.r + (Lquadrant.r - RAquadrant.r)
    Lquadrant.s <- (floor( L.s/90)) * 90
    RAquadrant.s <- (floor(RA.s/90)) * 90
    RA.s <- RA.s + (Lquadrant.s - RAquadrant.s)
#5c. right ascension value needs to be converted into hours
    RA.r<- RA.r / 15
    RA.s<- RA.s / 15
#6. calculate the Sun's declination
    sinDec.r <- 0.39782 * sin(L.r*pi/180)
    cosDec.r <- cos(asin(sinDec.r))
    sinDec.s <- 0.39782 * sin(L.s*pi/180)
```

```

cosDec.s <- cos(asin(sinDec.s))
#7a. calculate the Sun's local hour angle
cosH.r <- (cos(zenith*pi/180) - (sinDec.r * sin(latitude*pi/180))) / (cosDec.r * cos(latitude*pi/180))
if (cosH.r > 1) {cat(" the sun never rises on this location (on the specified date)", "\n")}
cosH.s <- (cos(zenith*pi/180) - (sinDec.s * sin(latitude*pi/180))) / (cosDec.s * cos(latitude*pi/180))
if (cosH.s < -1) {cat(" the sun never sets on this location (on the specified date)", "\n")}
#7b. finish calculating H and convert into hours
  #if rising time is desired:
  H.r <- 360 - (acos(cosH.r)*180/pi)
  #if setting time is desired:
  H.s <- (acos(cosH.s)*180/pi)+360
  H.r <- H.r / 15
  H.s <- H.s / 15
#8. calculate local mean time of rising/setting
  Tt.r <- H.r + RA.r - (0.06571 * t.r) - 6.622
  Tt.s <- H.s + RA.s - (0.06571 * t.s) - 6.622
#9. adjust back to UTC
#NOTE: UT potentially needs to be adjusted into the range [0,24) by adding/subtracting 24
  UT.r <- Tt.r - lngHour
  UT.s <- Tt.s - lngHour
  #if rising time is desired:
  if (UT.r<0) UT.r<-UT.r+24
  if (UT.r>24) UT.r<-UT.r-24
#10. convert UT value to local time zone of latitude/longitude
  localT.r <- UT.r + localOffset
  localT.s <- UT.s + localOffset
LocalT.r<-round(trunc(localT.r)+((localT.r-trunc(localT.r))*(3/5)),2)
LocalT.s<-round(trunc(localT.s)+((localT.s-trunc(localT.s))*(3/5)),2)
return (data.frame(UT.r,UT.s,LocalT.r,LocalT.s) )

```

	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Halieutique Spécialisation / option : Ressources et Ecosystèmes Aquatiques Enseignant référent : Etienne Rivot
Auteur : Erwan Saulnier Date de naissance* : 05/03/1991	Organisme d'accueil : Institut de Recherche pour le Développement (IRD). UMR 212 EME.
Nb pages : 57      Annexe(s) : 22 pages	Adresse : CRH. Avenue Jean Monnet. 34200 SETE.
Année de soutenance : 2014	Maître de stage : Nicolas Bez
Titre français : Dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP des thoniers senneurs français dans l'océan indien.	
Titre anglais : Spatio-temporal dynamics of the FAD fishing effort of French purse seiners in the Indian ocean.	
<p><b>Résumé</b> : Depuis les années 1990, la pêche européenne des thoniers senneurs ciblant les thons tropicaux a été marquée par un accroissement majeur de la puissance de pêche des navires, lié en particulier à une augmentation massive de l'utilisation de Dispositifs de Concentration de Poissons (DCP), qui a fortement modifié les stratégies de pêche employées. Dans ce contexte, la dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche sur DCP des senneurs français a été analysée dans l'océan indien entre 2000 et 2012 à l'aide d'une approche géostatistique. L'effort de pêche sur DCP, défini dans cette étude comme le nombre de calées effectuées sur DCP par pixel de 0.5°x0.5°x trimestre, a été étudié en croisant des données VMS et des données logbook. L'analyse de 3 indicateurs spatiaux a permis de mettre en évidence une augmentation de l'effort de pêche dans la zone somalienne à une échelle locale et régionale. La stabilité temporelle de la structure spatiale de l'effort de pêche a été testée pour chaque trimestre par simulation. Les variogrammes trimestriels se révèlent stables entre 2000 et 2012, mais varient de manière significative d'un trimestre à l'autre. Par ailleurs, la zone de pêche varie globalement de la même façon chaque année d'un trimestre à l'autre. Des variations interannuelles ont été cependant détectées, comme lors de la période de mars-avril-mai entre 2003 et 2006, durant laquelle l'activité de pêche était faible ou nulle dans le canal du Mozambique, avec des calées plus dispersées au sein de la zone de pêche. Enfin, sous l'hypothèse d'une corrélation forte entre effort de pêche et abondance locale, des cartes de la distribution spatiale de la ressource capturable sous DCP ont été réalisées par krigeage. Les limites de cette méthodologie et l'intérêt des cartes produites sont discutés.</p>	
<p><b>Abstract</b> : Since the 1990's, European purse seine fisheries targeting tropical tunas have globally increased their fishing power, mostly because of their increasing use of Fish Aggregative Devices (FAD), which have strongly modified their fishing strategies. In this context, the spatio-temporal patterns of the FAD fishing effort of French purse seiners were analyzed in the Indian ocean during 2000-2012 using a geostatistical approach. FAD fishing effort was defined as the local density of FAD fishing sets, and studied by quarter (3 months period), using logbook and VMS data. The analysis of 3 spatial indicators revealed an increase of the FAD fishing set density in the Somali area both at a local (0.5°x0.5° square) and regional scale (several squares). This increase is likely correlated to the increasing number of FADs deployed by the purse seiners in this area. The temporal variability of the spatial structure (variogram) was investigated using simulation techniques. For each quarter, spatial structures of fishing effort happened to be stable over time, but significantly different between quarters. The fishing area for each quarter was globally the same between 2000 and 2012, but some annual variations were detected, e.g. during the 2<sup>nd</sup> quarter (march-april-may) between 2003 and 2006 : the fishing activity was lower in the Mozambique Channel and the spatial distribution of FAD fishing sets more patchy than usually. Finally, based on the hypothesis that a strong correlation exists between effort and local abundance, kriging maps of the FAD aggregated tuna spatial distribution were generated. The limitations and relevance of the work are discussed.</p>	
Mots-clés : pêche thonière tropicale, DCP, effort de pêche, approche spatiale, variogramme, krigeage. Key Words: Tropical tuna fishery, FAD, fishing effort, spatial approach, variogram, kriging.	