



Evolution de l'abondance du thiof *Epinephelus aeneus* au Sénégal

Modou Thiaw ¹, Kamarel Bâ ¹, Beyah Meissa Habib ², Florian Quemper ³, Didier Gascuel ³ et Jérôme Guitton ³

¹ Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT), Dakar, Sénégal.

² Institut Mauritanien de Recherches Océanographiques et de Pêches (IMROP), Nouakchott, Mauritanie.

³ UMR DECOD (Dynamique et Durabilité des Ecosystèmes), INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, IFREMER, Rennes, France

Rapport réalisé dans le cadre du projet Européen DEMERSTEM



Table des matières

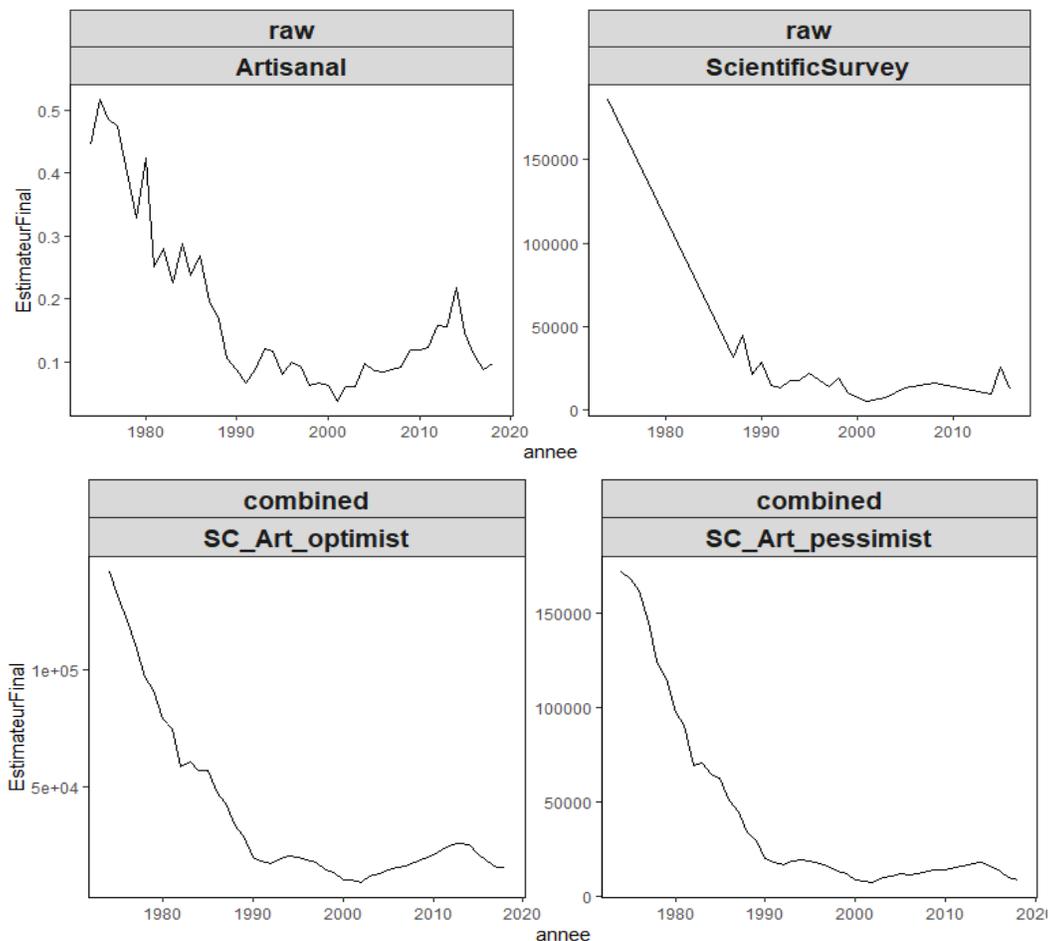
Résumé exécutif.....	3
1. Introduction	4
1.1. Méthode delta-GLM	4
1.2. Biologie de l'espèce	5
2. Analyse des données des campagnes scientifiques	7
2.1 Description de la donnée scientifique.....	7
2.2. Construction du modèle d'abondance	9
2.2.1. Modèle de présence/absence.....	9
2.2.2. Modèle des densités positives (IA+)	11
2.2.3. Couplage des modèles de présence/absence et des densités positives	14
3. Analyse des données de pêche artisanale	16
3.1. Description de la donnée commerciale (P.A)	16
3.2. Construction du modèle d'abondance	17
3.2.1. Modèle de présence/absence.....	17
3.2.2. Modèle des densités positives (IA+)	20
3.2.3. Couplage des modèles de présence/absence et des densités positives	23
4. Agrégation des indices d'abondance	25
4.1. Standardisation et dérivées de puissances des pêches	25
4.2. Indices d'abondances finaux	28
Références bibliographiques	29
ANNEXES	30

Résumé exécutif

Le présent document décrit l'utilisation des modèles linéaires généralisés (GLM) pour la création d'indices d'abondance du stock de Thiof (*Epinephelus aeneus* / White Grouper) Senegalo-Mauritanien. Les modèles GLM permettent de prendre en compte les variations de protocole d'échantillonnage dans l'observation des captures des flottilles de pêche concernées. Les données utilisées proviennent, d'une part des campagnes scientifique démersales réalisées au Sénégal depuis les années 1970, et d'autre part des données de captures et d'effort des pêcheries artisanales maritimes collectées depuis 1974 au Sénégal.

Le document décrit la démarche utilisée pour identifier les strates d'échantillonnage les plus pertinentes à intégrer aux modèles selon :

- Des critères statistiques de pourcentage de variance expliqué par la strate
- Une expertise des scientifiques locaux pour identifier les populations statistiques (engin par exemple pour les flottilles artisanales) qui sont les plus à même de refléter l'abondance réelle du stock. Une fois le modèle définit, nous avons pu produire 4 indices d'abondance : 2 indices bruts issus des données scientifiques et artisanales et 2 séries combinant ces indices 'bruts' selon des scénarios de dérive des puissances de pêches (optimiste et pessimiste)



1. Introduction

1.1. Méthode delta-GLM

Les indices d'abondances sont estimés à partir des données d'observations issues des campagnes scientifiques, ou à partir des statistiques de pêche issues des flottilles commerciales. Dans un cas comme dans l'autre, l'estimation d'indices d'abondance reste cependant une tâche relativement complexe, compte tenu notamment des plans d'échantillonnage souvent fortement déséquilibrés. Dès lors, force est de constater que bien souvent les méthodes utilisées ne sont pas statistiquement optimales, ce qui peut conduire à des estimations biaisées et/ou à des incertitudes très fortes (Meissa *et al*, 2008).

Dans le présent travail une méthode statistique basée sur les Modèles Linéaires Généralisés (GLM) est présentée. Elle est mise en œuvre pour estimer une série annuelle d'indices d'abondance standardisés, à partir des captures par unités d'effort (CPUE) des flottilles commerciales, ou à partir des indices d'abondances issus des campagnes scientifiques.

Les GLM sont une extension du Modèle Linéaire (LM) dont l'utilisation est limitée à certaines conditions, notamment la normalité des résidus, condition rarement respectée dans l'analyse des données halieutiques. Cependant, le principe reste le même que celui de l'analyse par modèles linéaires et consiste à faire le lien entre des variables à expliquer (réponses) et des variables explicatives (Meissa *et al*, 2008).

La modélisation des CPUE permet de prendre en compte les variations spatio-temporelles de la disponibilité de la ressource. Pour les CPUE commerciales, cela permet aussi de considérer les différences de puissance de pêche des catégories d'unités de pêche (navires, pirogues) qui peuvent avoir des effets significatifs sur la CPUE (e.g. puissance motrice, type de conservation, licence de pêche).

Le nombre important d'observations nulles dans les CPUE (e.g. « zero-inflated data ») empêche souvent l'utilisation d'un modèle de type LM pour modéliser les effets des différents facteurs (année, engin, zone, saison, type de navire...). Pour y remédier, une solution est de réaliser un modèle de type Delta (Stefansson, 1996; Le Pape *et al*, 2003). Ce modèle est obtenu en combinant deux sous-modèles : i) un premier modèle pour modéliser l'absence et la présence de l'espèce dans les traits de chalut ; ii) l'autre pour modéliser les valeurs positives des CPUE (Bâ, 2018).

Sous modèle 1 : Distribution binomiale de présence-absence

Un sous-modèle de présence/absence permet l'estimation de la probabilité de présence de l'espèce dans chaque trait de chalut. Le GLM sous hypothèse d'une distribution binomiale s'écrit :

$$Z_{t,j,k,l} = \text{logit}(p_{t,j,k,l}^{>0}) \quad (1.a)$$

avec

$$Z_{t,j,k,l} = \mu_0 + \phi_t + \beta_j + \gamma_k + \delta_l \quad (1.b)$$

où $p_{t,j,k,l}$ est l'espérance de la probabilité de présence de l'espèce considérée, t, j, k, l étant utilisés pour indiquer les niveaux de chaque variable (année t , région j , strate bathymétrique k , saison l). Ce modèle peut être élargi à d'autres variables explicatives. La prédiction de la probabilité de présence est obtenue par transformation inverse logit :

$$p_{t,j,k,l}^{>0} = \frac{e^{Z_{t,j,k,l}}}{1 + e^{Z_{t,j,k,l}}} \quad (2)$$

Sous modèle 2 : Distribution gaussienne du log des CPUE pour les observations non nulles

Ce sous-modèle permet l'analyse des observations non-nulles (correspondant à une CPUE positive, noté IA^+). Dans un premier temps, une transformation logarithmique est appliquée sur les données afin d'homogénéiser les variances et de tenir compte de la nature multiplicative des effets étudiés. On suppose que la réponse $\log(IA)$ suit un modèle linéaire du type :

$$U_{t,j,k,l} = \log(IA_{t,j,k,l}^+) = \mu_0 + \phi_t + \beta_j + \gamma_k + \delta_l \quad (3)$$

où $p_{t,j,k,l}$ est la capture par unité d'effort. Afin de revenir à l'échelle initiale des CPUE, une transformation logarithmique inverse est effectuée en tenant compte de la correction de Laurent (1963) qui permet d'obtenir des valeurs non biaisées de l'espérance de l'indice d'abondance (IA) :

$$IA_{t,j,k,l}^+ = \exp\left(\hat{U}_{t,j,k,l} + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (4)$$

Combinaison des deux sous-modèles

Les indices d'abondances annuels prédits par le modèle delta (IA) sont obtenus en moyennant le produit des probabilités de présence et des CPUE prédites pour les observations non nulles :

$$IA_t = \overline{\sum_{j,k,l} (p_{t,j,k,l}^{>0} \cdot IA_{t,j,k,l}^+)} \quad (5)$$

1.2. Biologie de l'espèce

Le thiof ou mérour blanc *Epinephelus aeneus* (Figure 1) est une espèce démersale côtière appartenant à la famille des Serranidés. Sa distribution s'étale sur des profondeurs comprises entre 20 et 200 m, mais son exploitation est principalement réalisée dans des profondeurs allant de 30 à 60 m. L'espèce se rencontre sur les fonds rocheux du plateau continental. Les jeunes individus (moins de 30 cm LT) se concentrent sur le littoral, notamment dans les estuaires. On les observe également entre 30 et 100 m de profondeur, surtout dans les zones principalement sableuses, mais également dans les zones rocheuses.



Figure 1 - Photo de *Epinephelus aeneus* collectée durant le projet DEMERSTEM à Dakar (Sénégal)

Les deux principales zones de reproduction sont la Côte du Sénégal et le sud de la Baie du Lévrier en Mauritanie. La principale zone de concentration des juvéniles se situe dans l'estuaire à mangrove du delta central du Sine Saloum au Sénégal. Le thiof est un prédateur vorace qui se nourrit de poissons, de céphalopodes et de crustacés.

Pour *E. aeneus*, une seule unité de gestion a été retenue pour les trois pays (Mauritanie, Sénégal et Gambie).

Les débarquements de thiof dans la sous-région (Mauritanie, Sénégal et Gambie) montrent une tendance à la baisse jusqu'en 2007, avant d'augmenter progressivement à partir de 2008. Cette augmentation des prises est surtout le fait de l'exploitation par la pêche artisanale mauritanienne et sénégalaise. La capture totale du thiof dans les trois pays a connu une augmentation sur la période 2013-2018, avec une capture moyenne annuelle de 5 805 tonnes. Cette augmentation est due essentiellement à l'augmentation des captures de la pêche artisanale du Sénégal, de la Mauritanie et de la Gambie. La Mauritanie présente la plus grande proportion des captures avec une moyenne sur la période 2013-2018 de 3 500 tonnes, suivi par le Sénégal avec une moyenne de 1 650 tonnes et de la Gambie avec une moyenne de 668 tonnes (COPACE, 2020).

Cette étude porte sur la dynamique du stock de thiof *Epinephelus aeneus* exploité au Sénégal. Ainsi, la dynamique spatio-temporelle de l'abondance du stock est analysée en utilisant la modélisation linéaire de type delta-glm. Le modèle delta-GLM conduit à déterminer un schéma de répartition spatio-saisonnier du thiof et à utiliser ce schéma moyen dans le calcul des indices d'abondance annuels. Les données utilisées proviennent du CRODT et comprennent des données de campagnes scientifiques (1970-2016) et des données de la pêche artisanale (1980-2018). Elles ont été analysées sous l'hypothèse de stock de thiof considéré spatialement et biologiquement isolé par rapport à ceux de la Mauritanie au nord et de la Guinée Bissau au sud.

Pour chaque type de données (campagnes scientifiques et pêche artisanale) une première phase de l'étude consiste à sélectionner les variables parmi toutes celles disponibles afin d'appliquer une procédure d'optimisation statistique (procédure stepAIC) sur les variables les plus pertinentes. Plusieurs modèles ont en amont été testés, notamment pour différentes stratifications et, à termes, nous présentons uniquement la démarche avec le modèle conservé.

2. Analyse des données des campagnes scientifiques

2.1 Description de la donnée scientifique

Depuis 1968, des campagnes de prospection des ressources démersales du plateau continental sénégalais sont conduites par le CRODT par chalutage sur la base d'un échantillonnage aléatoire stratifié (EAS). Ces campagnes (Tableau 1) ont été successivement réalisées par les navires océanographiques (N/O) Laurent Amaro (1968-1985), Louis Sauger (1986-1999) et Itaf Dème (depuis 2001). Les caractéristiques techniques des navires et des engins de pêche utilisés sont précisées aux Tableau 1 et en Annexe 1.

Tableau 1 - Caractéristiques des navires scientifiques

Navire	Annee	Longueur	Puissance	TJB	Nombre de campagne	Nombre de traits
L. AMARO	1970 - 1974	24 m	- CV	119	-	-
L. SAUGER	1986 - 1999	37 m	236 CV	318	16	1718
I. DEME	2001 - 2016	37 m	268 CV	318	8	957

Les 3 zones (Nord, Centre et Sud) de la ZEE sénégalaise ont été couvertes à chaque campagne sauf en 1989 pour la zone Sud. Les campagnes ont davantage eu lieu en saison froide (15) qu'en saison chaude (9). Les années non couvertes le sont pour cause d'indisponibilité du bateau en 2000, de campagne démersale profonde en 2002 et de difficultés technico-financières en 1996, 2006-2007 et 2017-2021.

Les campagnes réalisées à bord des navires océanographiques Louis Sauger et Itaf Dème présentent des caractéristiques très voisines en termes de longueur totale (37,5 m) et de technique opératoire (pêche-arrière). Les caractéristiques de l'engin de pêche – chalut standard à poissons de fonds type Le Drezen® – sont quasiment restées les mêmes tout au long de la série étudiée. Toutefois, dans le cadre du programme sénégalais-japonais de recherche (Anonyme, 2006), une poche de 25 mm de maille étirée a été exceptionnellement utilisée en 2004 afin de capturer davantage de juvéniles.

Entre ces différents navires de recherche, l'intercalibration n'a pas été faite. Mais pour cette étude, il a été supposé que le coefficient d'intercalibration est de 1 vu que le plan d'échantillonnage et les caractéristiques des navires et chaluts étant approximativement les mêmes.

Dans le cadre de cette étude nous étudions l'influence de 3 facteurs en plus de l'**année** sur l'abondance de *E. aeneus*. Les différentes modalités de ces facteurs sont présentées dans le Tableau 3. En particulier, les profondeurs inférieures à 5 m et supérieures à 200 m sont retirées de l'analyse.

Tableau 2 - Stratifications utilisées et testées pour la donnée scientifique

Variable	Bathymetrie	Saison	Zone
Classes	5 - 10 m	Chaude	12 < latitude < 13 ~ Sud
	10 - 20 m		
	20 - 40 m		13.6 < latitude < 14.70 ~ Petite Côte
	40 - 60 m	Froide	
	60 - 100 m		14.7 < latitude < 16.1 ~ Nord
	100 - 200 m		

Une première analyse a porté sur la stratification des variables en différentes modalités. Ces modalités sont sélectionnées et filtrées selon leur pertinence et en s'assurant qu'elles sont constituées d'un nombre suffisant d'observations. La Figure 2 permet de représenter le nombre d'observations pour chaque modalité - en distinguant les présences et les absences -.



Figure 2 - Nombre d'observations par modalités - Campagnes Scientifiques

2.2. Construction du modèle d'abondance

2.2.1. Modèle de présence/absence.

Une procédure statistique stepAIC est réalisée à partir des variables (**annee**, **saison**, **bathymetrie** et **zone**) et le modèle sélectionné par optimisation statistique est :

$$\text{presence} \sim \text{annee} + \text{bathymetrie} + \text{zone} + \text{saison} + \\ \text{annee:zone} + \text{annee:saison} + \\ \text{bathymetrie:zone} + \text{bathymetrie:saison}$$

Nous sélectionnons les variables expliquant une part significative de la variabilité en se basant sur les sorties de l'ANOVA.

Tableau 3 - Analyse de la variance (ANOVA) du modèle de présence/absence issu de la procédure stepAIC

Effect	Df	% variance	% of explained (17.5%)	P-value	signif.
annee	27	6.0	35	< 0.001	***
zone	2	2.5	15	< 0.001	***
bathymetrie	5	4.4	25	< 0.001	***
saison	1	0.7	4	< 0.001	***
annee:zone	48	3.7	21	< 0.001	***
Residuals	3,084	82.5			

Ainsi, nous conservons les effets **bathymetrie**, **annee**, **zone** et **saison** qui sont significatifs et expliquent respectivement 6%, 2.5%, 4.4% et 0.7% de la variance.

Les interactions expliquant une part importante de la variance sont ensuite étudiées : **annee:zone** est la seule qui présente un intérêt à être prise en compte dans le modèle (Figure 3). Néanmoins, le plan d'échantillonnage étant incomplet il est nécessaire de retirer 4 années de l'analyse. En complétant cette analyse avec une étude par décennie (Annexe 2), nous choisissons de conserver cette interaction et de distinguer deux analyses avec un modèle prenant en compte une interaction et un modèle 'simple' (i.e sans interaction **annee:zone**)

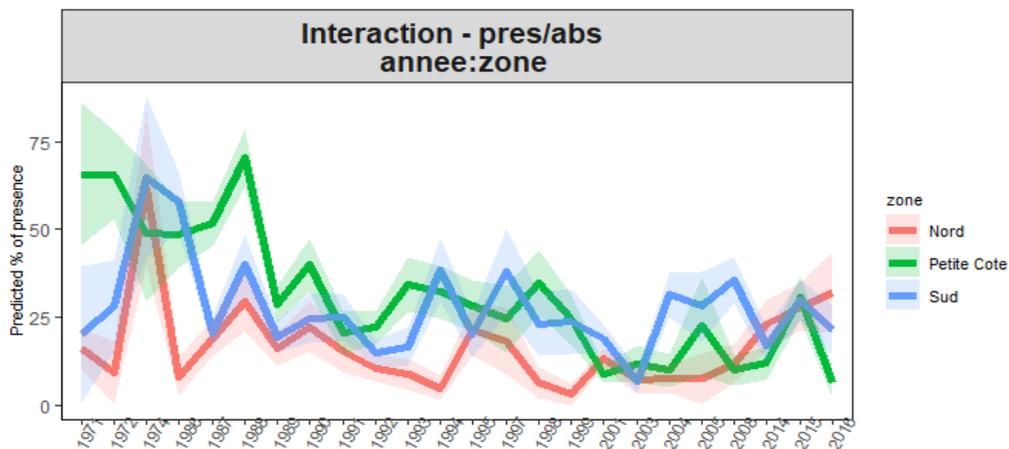


Figure 3 - Interaction annee:zone du modèle de présence-absence

Le modèle final s'écrit donc :

$$\text{presence} \sim \text{bathymetrie} + \text{annee} + \text{zone} + \text{saison} (+ \text{annee:zone})$$

Le tableau suivant fournit les sorties statistiques du modèle prenant en compte l'interaction **annee:zone**. Les prédictions annuelles des 2 modèles sont présentées en Figure 4. On discerne sur ces graphiques 2 phases de réduction des probabilités de présence (1970-1990 et 1995-2000) qui sont suivies de ré-augmentation (1990-1995 et 2003-2006). Les années récentes semblent se stabiliser, néanmoins les probabilités de présence ont été divisées par 2. Le graphique est scindé par période pour faire apparaître les changements de navires et d'engins scientifiques. Il est important de signaler qu'ici et pour la suite, les périodes mises en évidence ne correspondent pas exactement au période d'activité du navire pour des raisons pratiques. En particulier, le navire L. Amaro n'était actif qu'entre 1970 et 1974.

Tableau 4 - ANOVA du modèle pres/abs final

Effect	Df	% variance	% of explained (17.3%)	P-value	signif.
annee	23	5.9	34	< 0.001	***
zone	2	2.8	16	< 0.001	***
bathymetrie	5	3.8	22	< 0.001	***
saison	1	0.7	4	< 0.001	***
annee:zone	46	4.0	23	< 0.001	***
Residuals	2,873	82.7			

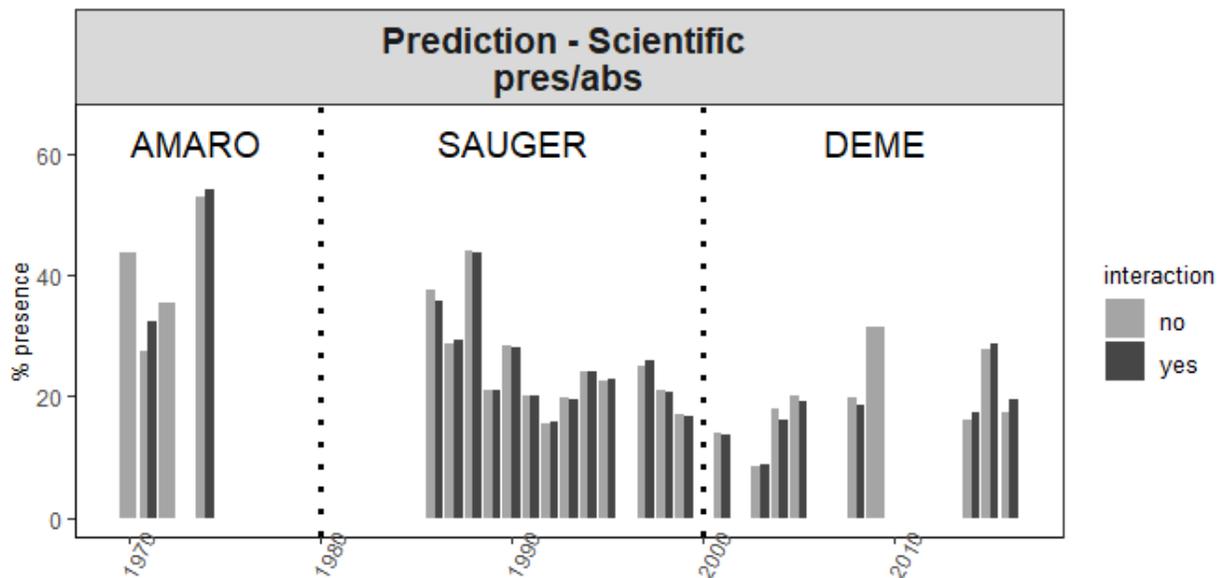


Figure 4 - Prédications de la probabilité de présence par année. Les traits verticaux scindent la série temporelle par période d'activités des navires d'échantillonnage scientifiques.

2.2.2. Modèle des densités positives (IA+)

En sélectionnant les facteurs (**annee**, **zone**, **saison**, **bathymetrie**), le modèle retenu par optimisation statistique (procédure stepAIC) puis sélection des variables significatives (Tableau 6) est le suivant :

$$\log(\text{densite}) \sim \text{annee} + \text{bathymetrie} + \text{zone} + \text{bathymetrie}:\text{zone}$$

Tableau 5 - ANOVA du modèle des densités positives (IA+) issu de la procédure stepAIC

Effect	Df	% variance	% of explained (36.6%)	P-value	signif.
bathymetrie	5	14.4	39	< 0.001	***
zone	2	7.8	21	< 0.001	***
annee	25	7.9	22	< 0.001	***
saison	1	0.3	1	< 0.1	.
bathymetrie:zone	10	5.2	14	< 0.001	***
bathymetrie:saison	5	1.1	3	< 0.05	*
Residuals	742	63.4			

Le modèle explique un peu plus de 36% de la variance. Ainsi, on conserve les facteurs **bathymetrie**, **zone** et **annee**. On étudie l'interaction **bathymetrie:zone** (Figure 5)

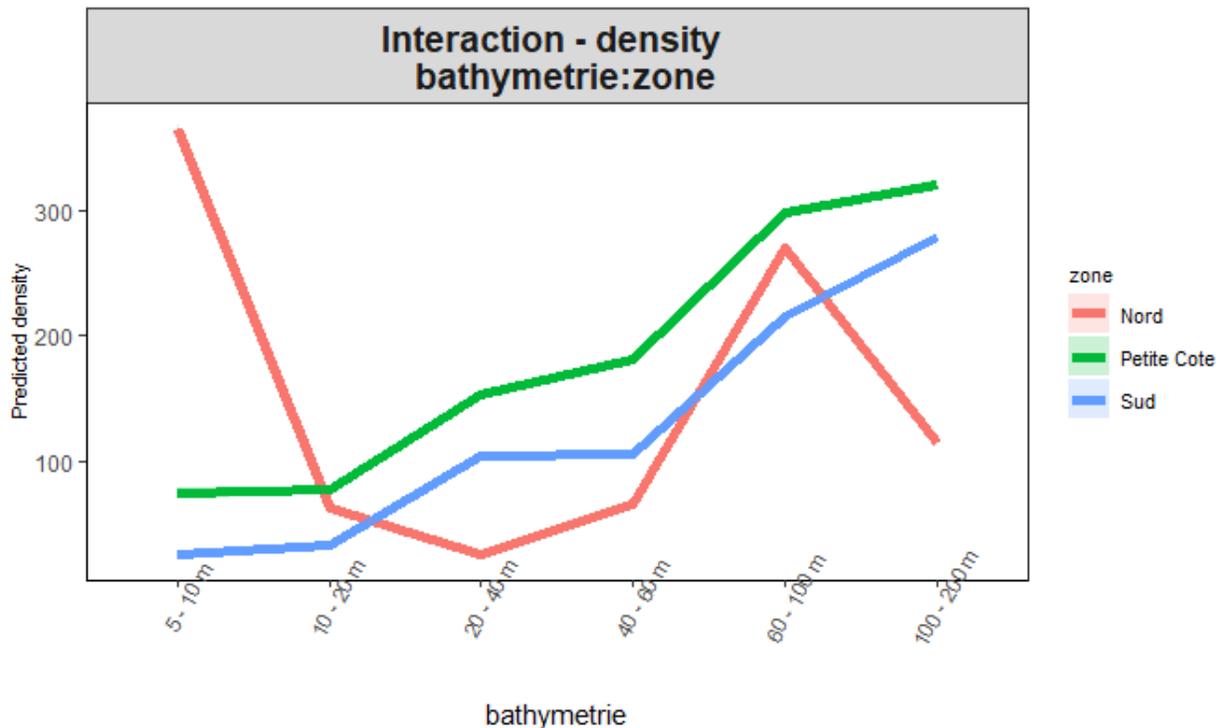


Figure 5 - Interaction bathymetrie:zone du modèle des densités positives (AI+)

On identifie un pattern de distribution bathymétrique qui varie selon la zone d'étude. Ainsi, au Nord les densités sont plus élevées pour les faibles profondeurs (5 - 10 m) mais faibles pour des

profondeurs moyennes (10 - 60m) puis augmentent pour des profondeurs élevées (60 - 100 m). Cette interaction est conservée dans le modèle final :

$$\log(\text{densite}) \sim \text{annee} + \text{bathymetrie} + \text{zone} + \text{bathymetrie: zone}$$

Tableau 6 - ANOVA du modèle des densités positives (IA+) final - modèle sans interaction annee: zone

Effect	Df	% variance	% of explained (35.1%)	P-value	signif.
annee	25	13.0	37	< 0.001	***
zone	2	5.5	16	< 0.001	***
bathymetrie	5	11.5	33	< 0.001	***
zone:bathymetrie	10	5.1	15	< 0.001	***
Residuals	748	64.9			

Par ailleurs, ayant conservé l'interaction **annee:zone** dans le modèle de présence absence, nous l'étudions dans le modèle IA+. Sa prise en compte réduit de seulement 5 points l'AIC donc nous conservons cette interaction dans un modèle pour comparer les indices d'abondances finaux. Cependant, pour conserver cette interaction il est nécessaire de retirer 4 années du jeu de donnée (1970, 1971, 1972 et 2009). Cela indiquerait une diminution des densités dans les zones Nord et Sud et une augmentation à la Petite Côte (Figure 6). Cette figure permet également d'identifier un pic de densités au tout début de la série temporelle.

Tableau 7 - ANOVA du modèle des densités positives (IA+) final - modèle avec une interaction annee:zone

Effect	Df	% variance	% of explained (40.8%)	P-value	signif.
annee	22	10.5	26	< 0.001	***
zone	2	5.8	14	< 0.001	***
bathymetrie	5	12.4	30	< 0.001	***
zone:bathymetrie	10	4.8	12	< 0.001	***
annee:zone	44	7.2	18	< 0.01	**
Residuals	634	59.2			

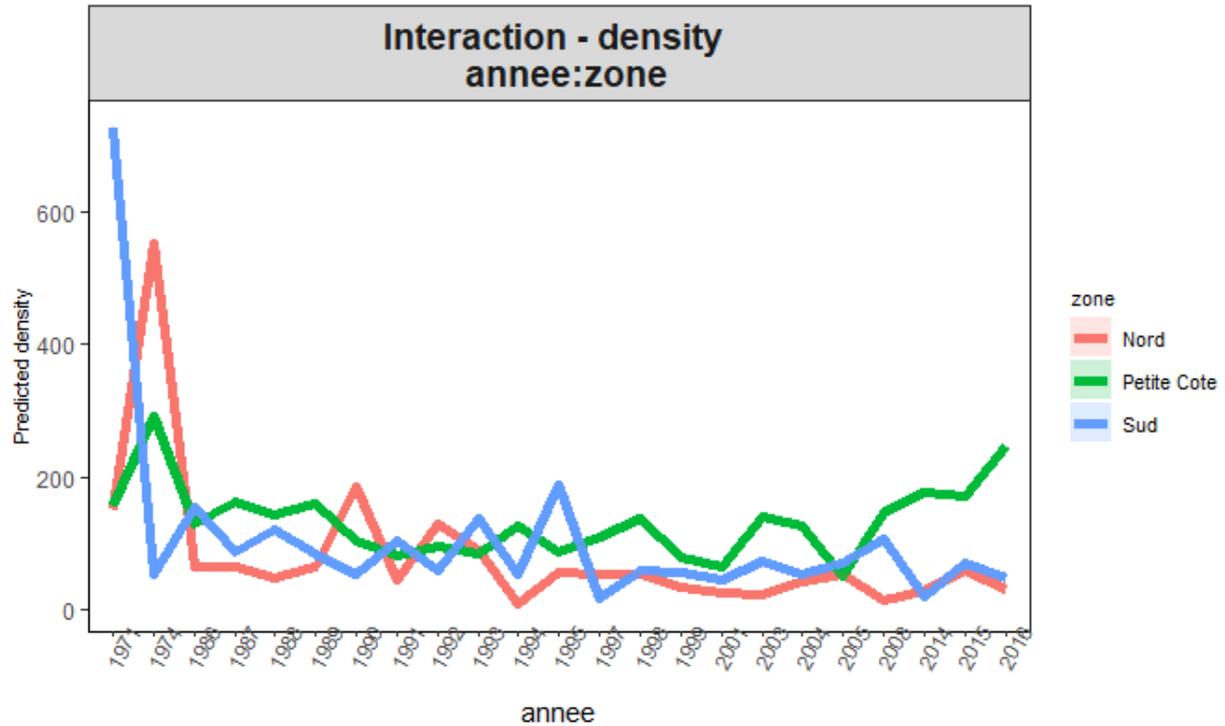


Figure 6 - Interaction annee:zone du modèle des densités positives (AI+)

Ainsi le modèle est final est :

$$\log(\text{densite}) \sim \text{annee} + \text{bathymetrie} + \text{zone} + \text{zone:bathymetrie} (+\text{annee:zone})$$

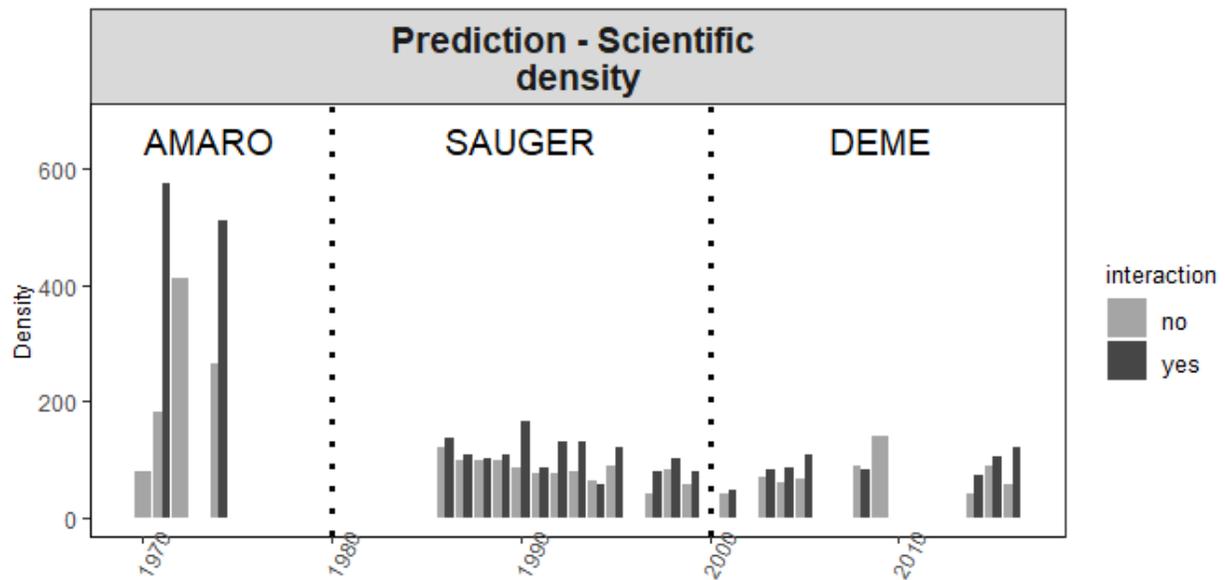


Figure 7 - Prédictions des densités par année.

Ces résultats indiquent une forte diminution des densités dans les années 90 jusqu'à atteindre un minimum au début des années 2000. S'en suit une augmentation des densités qui se stabilise au cours des années 2010 (Figure 7).

2.2.3. Couplage des modèles de présence/absence et des densités positives

Le modèle delta-GLM d'abondance est obtenu en combinant les deux sous-modèles précédemment construits (présence-absence et densités positives) et permet d'obtenir une série temporelle d'IA (par année). Le Tableau 7 récapitule les différents modèles construits et la Figure 8 présente les tendances décrites pas les 2 sous modèles avant couplage.

Tableau 8 - Récapitulatif des sous-modèles sélectionnés

Modele	Expression
Presence/absence	presence ~ bathymetrie + annee + zone + saison (+ annee:zone)
Densités positives	log(densite) ~ bathymetrie + annee + zone + bathymetrie:zone (+ annee:zone)

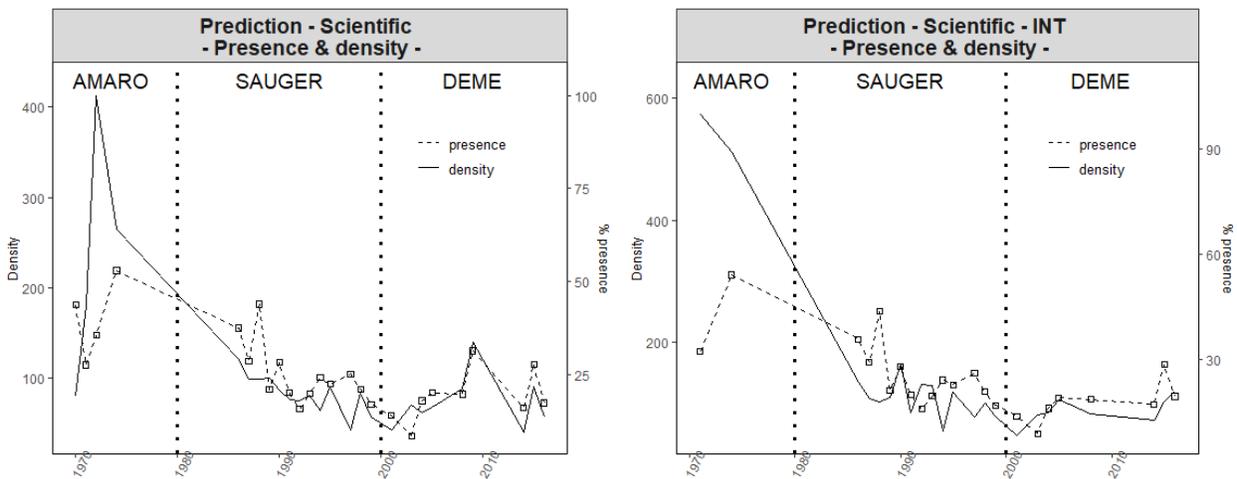


Figure 8 - Tendances des deux sous-modèles basés sur les données de campagnes scientifiques (% de présence et densités).

Les probabilités de présence et les densités sont prédites pour chaque combinaison de modalités puis pondérées par les surfaces de chaque classe bathymétrique dans les différentes zones (Tableau 8). Les indices d'abondances sont ensuite calculés pour chaque combinaison de modalités - multiplication de la probabilité de présence et de la densité -, puis moyennés par année (Figure 9).

Tableau 9 - Surfaces par classe de bathymétrie dans les différentes zones

Zone	Bathymetrie	Surface (km ²)
Sud	5 - 10 m	911.2
	10 - 20 m	2,827.5
	20 - 40 m	1,896.2
	40 - 60 m	1,488.5
	60 - 100 m	714.8
	100 - 200 m	531.3
Petite Cote	5 - 10 m	660.6
	10 - 20 m	1,304.8
	20 - 40 m	1,848.8
	40 - 60 m	1,500.0
	60 - 100 m	1,549.5
	100 - 200 m	587.3
Nord	5 - 10 m	201.2
	10 - 20 m	501.1
	20 - 40 m	742.1
	40 - 60 m	1,263.1
	60 - 100 m	1,715.4
	100 - 200 m	1,425.5

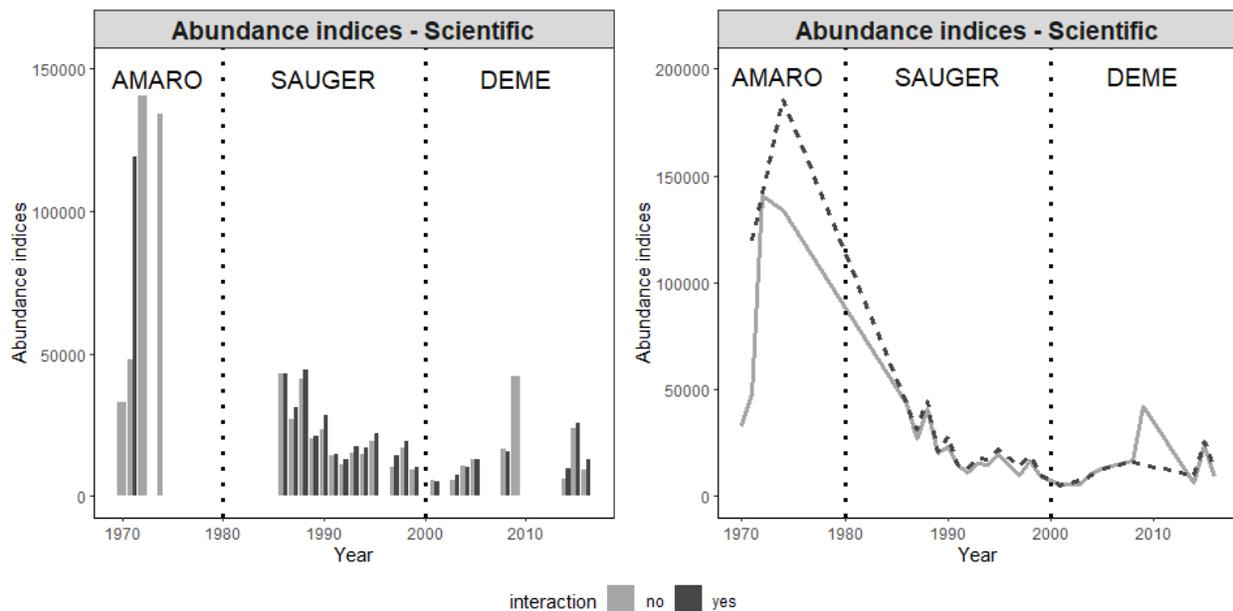


Figure 9 - Indices d'abondance issus du modèle delta-GLM avec et sans l'interaction annee:zone - Données scientifiques

La série temporelle semble cohérente avec les estimations de présences absence et de densités qui suivaient toutes les deux la même tendance : Forte diminution avec minimum dans les années 2000 suivie d'une augmentation. Il serait intéressant d'actualiser les données pour pouvoir prolonger cette série jusqu'en 2021. De plus, on observe une augmentation des abondances à une période où la pêche n'est que très peu développée (1970-1974).

3. Analyse des données de pêche artisanale

3.1. Description de la donnée commerciale (P.A)

Les données de la pêche artisanale sénégalaise sont issues de la base de données du CRODT qui possède un système d'information complet et diversifié sur le secteur des pêches. Les informations collectées sont stockées dans un format scientifique adapté aux besoins de l'évaluation des stocks (Laloë, 1985).

Disponibles depuis 1974, les données de la pêche artisanale permettent d'estimer des indices d'abondance standardisés à partir des captures par unité d'effort (exprimées en kilogramme par sortie en mer des pirogues). Les données de CPUE de la pêche artisanale, elles sont agrégées par année, par mois, par site de débarquement, et par engin de pêche sur la période 1974-2018 (Ba, 2018). Ainsi, ces variables sont retenues dans la modélisation des indices d'abondance. Les poissons démersaux représentent environ 20 % des débarquements de la pêche artisanale (Fall, 2009). Les principaux groupes, capturés essentiellement par des lignes, palangres et filets dormants de fonds, sont des Sparidés (24%), Serranidés (19%), céphalopodes (12%) et Ariidés (8%) (Barry et al, 2005).

La pêche artisanale est plus sélective que la pêche industrielle ; elle n'utilise pas le chalut. Elle met en œuvre plusieurs engins de pêche ciblant les démersaux : filets maillants dormants, filets trémails, lignes de fonds, turlottes, casiers et palangres équipant les grandes pirogues glacières. La pratique de la mixité des engins peut être permanente ou irrégulière ; elle permet l'accès alterné ou simultané à différentes ressources.

Compte tenu de la multitude et de la diversité des engins de pêche de la pêche artisanale, seuls ceux ciblant le thiof (débarquements élevés de thiof) ont été retenus et regroupés en deux grands groupes :

- Les lignes (ligne pirogue glacière LPG, la ligne-poulpe LPO, la ligne simple des pirogues motorisées LSM, la ligne simple des pirogues non motorisées LSNM et la palangre PAL) ;
- Les filets (le filet dormant de fond FDF, le filet maillant dérivant de fond FMDF et le trémail TM).

Quant aux sites de débarquements, ils sont au nombre de onze dans les données traitées (Saint-Louis, Kayar, Yoff, Ouakam, Soumbédioune, Hann, Mbour, Joal, Betenti, Djifere et Foundiougne), et ont été regroupés en trois principales régions :

- Grande Cote (Saint-Louis et Kayar), correspondant à la partie nord du pays,
- Dakar (Yoff, Ouakam, Soumbédioune et Hann), correspondant à la partie centrale
- Petite Côte (Mbour, Joal, Betenti, Djifere et Foundiougne), correspondant au sud.

3.2. Construction du modèle d'abondance

3.2.1. Modèle de présence/absence

De même que pour la donnée issue des campagnes d'échantillonnage scientifique, une première analyse a porté sur la stratification des variables en différentes modalités. La Figure 10 permet de représenter le nombre d'observations pour chaque modalité - en distinguant les présences et les absences -.

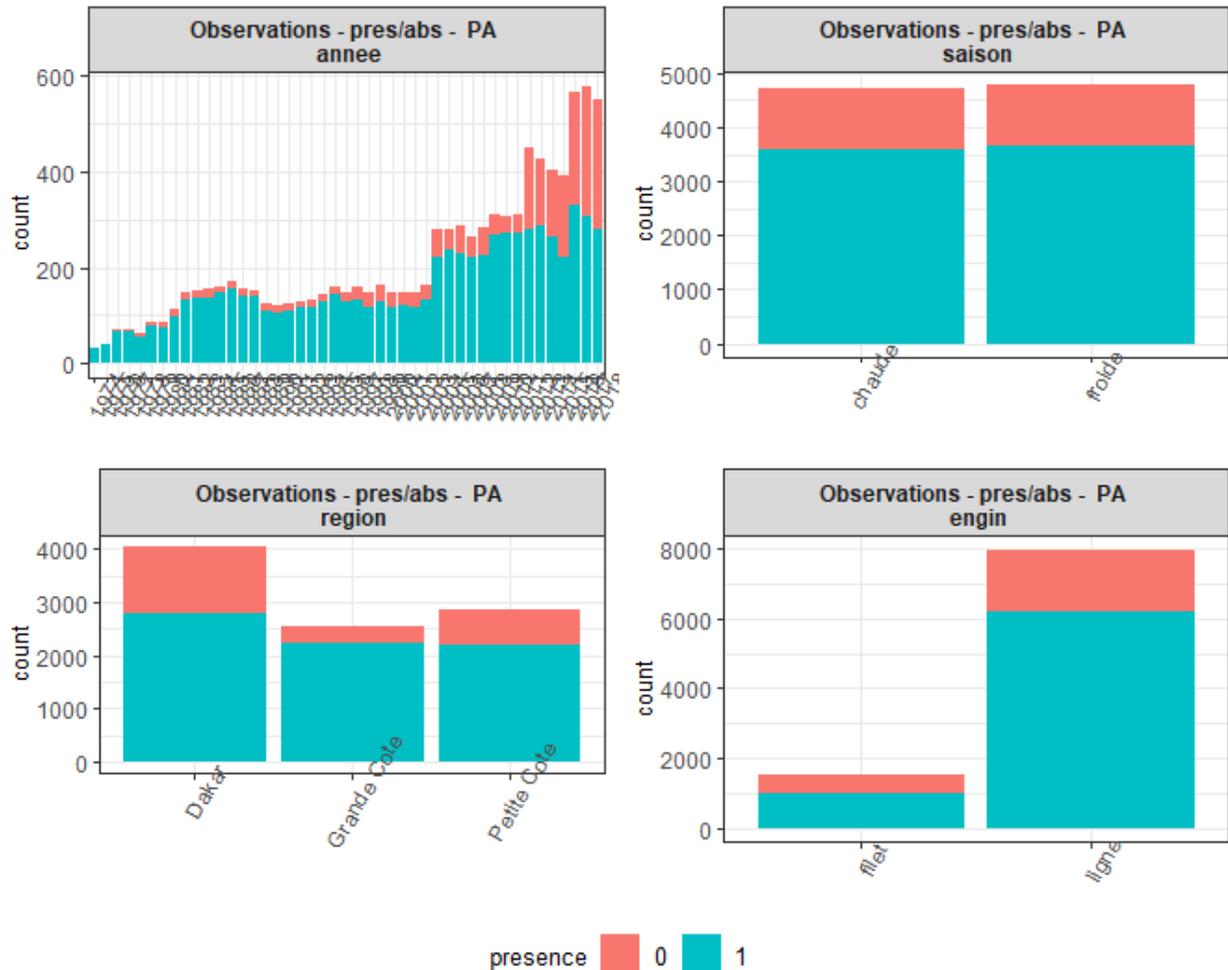


Figure 10 - Nombre d'observations par modalités - Pêche Artisanale

Une procédure statistique stepAIC est réalisée à partir des variables (**année**, **saison**, **engin** et **region**) et le modèle sélectionné par optimisation statistique et analyse des sorties ANOVA (Tableau 9) est :

$$\text{presence} \sim \text{année} + \text{engin} + \text{année: region} + \text{engin: region}$$

Tableau 10 - ANOVA du modèle de présence/absence issu de la procédure stepAIC

Effect	Df	% variance	% of explained (18.3%)	P-value	signif.
annee	44	10.9	59	< 0.001	***
saison	1	0.0	0	< 1	
region	2	2.5	13	< 0.001	***
engin	1	0.1	0	< 0.01	**
annee:saison	44	0.6	3	< 0.01	**
annee:region	79	3.0	16	< 0.001	***
saison:region	2	0.3	2	< 0.001	***
saison:engin	1	0.1	0	< 0.01	**
region:engin	2	1.0	5	< 0.001	***
Residuals	9,320	81.7			

On étudie les interactions **annee:region** et **engin:region**.

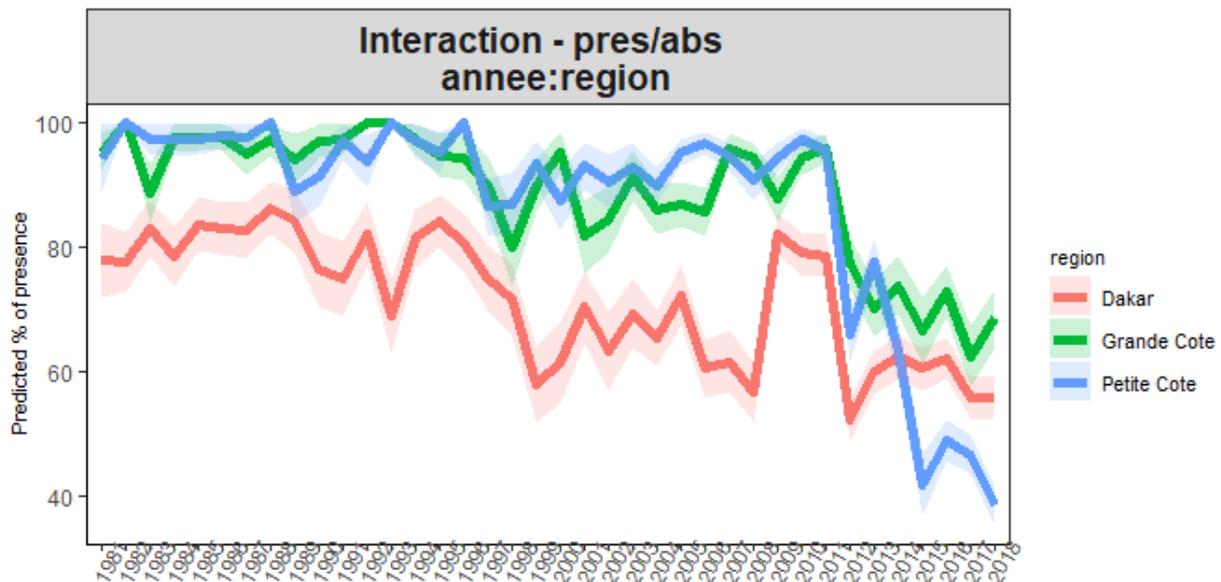


Figure 11 - Interaction annee:region du modèle de présence-absence

On identifie que sur la fin de la série temporelle, la présence est bien plus réduite à la Petite Côte que dans les autres zones. Cependant il faut retirer un nombre important d'années : de 1974 à 1980 et donc le début de l'histoire de la pêche. Or cette interaction avait également été retenue dans le cas de la donnée scientifique. Nous réitérons donc l'analyse précédente en distinguant 2 modèles, dont l'un avec l'interaction **annee:region**

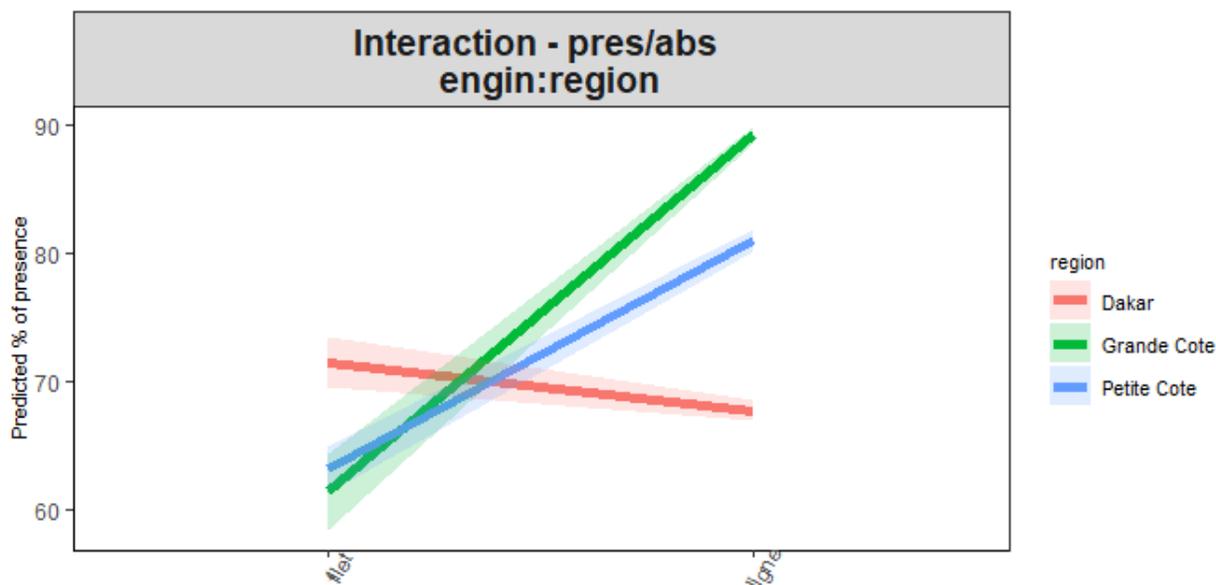


Figure 12 - Interaction engin:region du modèle de présence-absence

On observe nettement que la probabilité de présence prédite est différente selon la région en fonction de l'engin d'exploitation, avec une diminution de présence chez les ligneurs à Dakar. Cette interaction ne nécessite que très peu de degrés de liberté et explique une part non négligeable de la déviance. Nous la conservons donc dans le modèle final dont l'expression est :

$$\text{presence} \sim \text{annee} + \text{region} + \text{engin: region} (+ \text{annee: region})$$

Les tableaux suivants fournissent les sorties statistiques des modèles conservés et les prédictions annuelles sont présentées en Figure 13.

Tableau 11 - ANOVA du modèle pres/abs final

Effect	Df	% variance	% of explained (14.5%)	P-value	signif.
annee	44	10.9	75	< 0.001	***
region	2	2.5	17	< 0.001	***
region:engin	3	1.2	8	< 0.001	***
Residuals	9,447	85.5			

Tableau 12 - ANOVA du modèle pres/abs final

Effect	Df	% variance	% of explained (16.9%)	P-value	signif.
annee	37	10.4	62	< 0.001	***
region	2	2.4	14	< 0.001	***
region:engin	3	1.2	7	< 0.001	***
annee:region	74	2.8	17	< 0.001	***
Residuals	8,935	83.1			

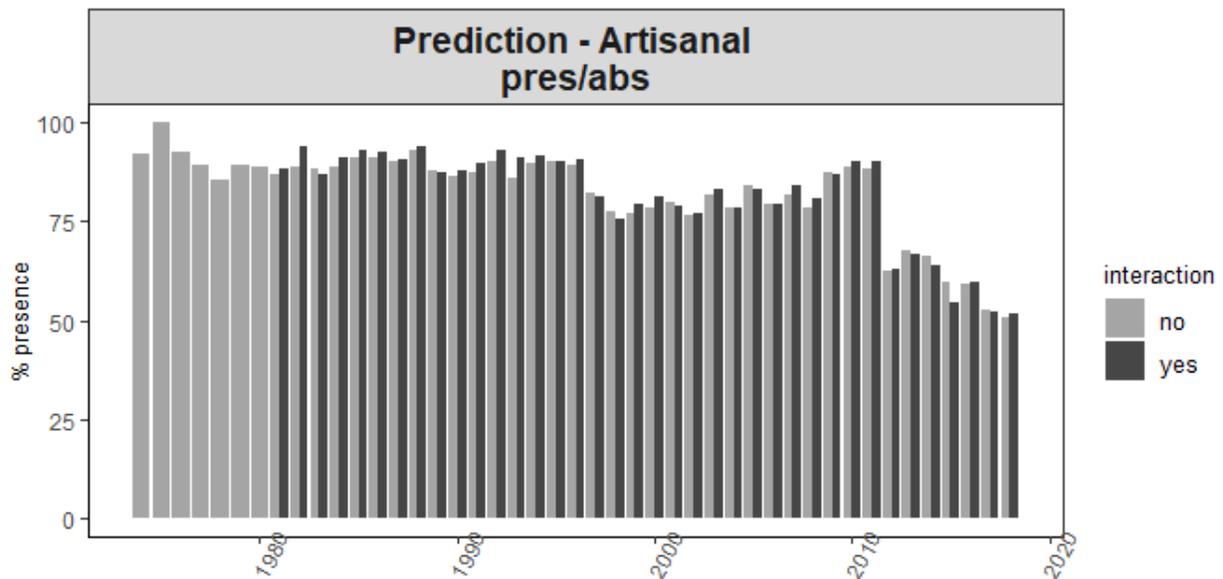


Figure 13 - Prédications de la probabilité de présence par année - PA

3.2.2. Modèle des densités positives (IA+)

L'analyse des CPUE permet d'identifier des valeurs aberrantes en 2018 chez les palangres. Cet engin est retiré de l'analyse pour cette année

En sélectionnant les facteurs (**annee**, **saison**, **engin**, **mois**), le modèle retenu par optimisation statistique (procédure stepAIC) puis sélection des variables significatives (Tableau 12) est le suivant :

$$\log(\text{densite}) \sim \text{annee} + \text{engin} + \text{region} + \text{saison} + \text{annee: region} + \text{annee: saison} + \text{region: saison}$$

Tableau 13 - ANOVA du modèle des densités positives (IA+) issu de la procédure stepAIC

Effect	Df	% variance	% of explained (24.6%)	P-value	signif.
annee	44	6.5	26	< 0.001	***
region	2	4.3	17	< 0.001	***
engin	1	3.2	13	< 0.001	***
saison	1	1.2	5	< 0.001	***
annee:region	79	4.7	19	< 0.001	***
annee:saison	44	2.5	10	< 0.001	***
region:saison	2	1.3	5	< 0.001	***
region:engin	2	0.7	3	< 0.001	***
engin:saison	1	0.2	1	< 0.001	***
Residuals	6,962	75.4			

On conserve **annee**, **region**, **engin**, et **saison** et on étudie **annee:region**, **annee:saison**.

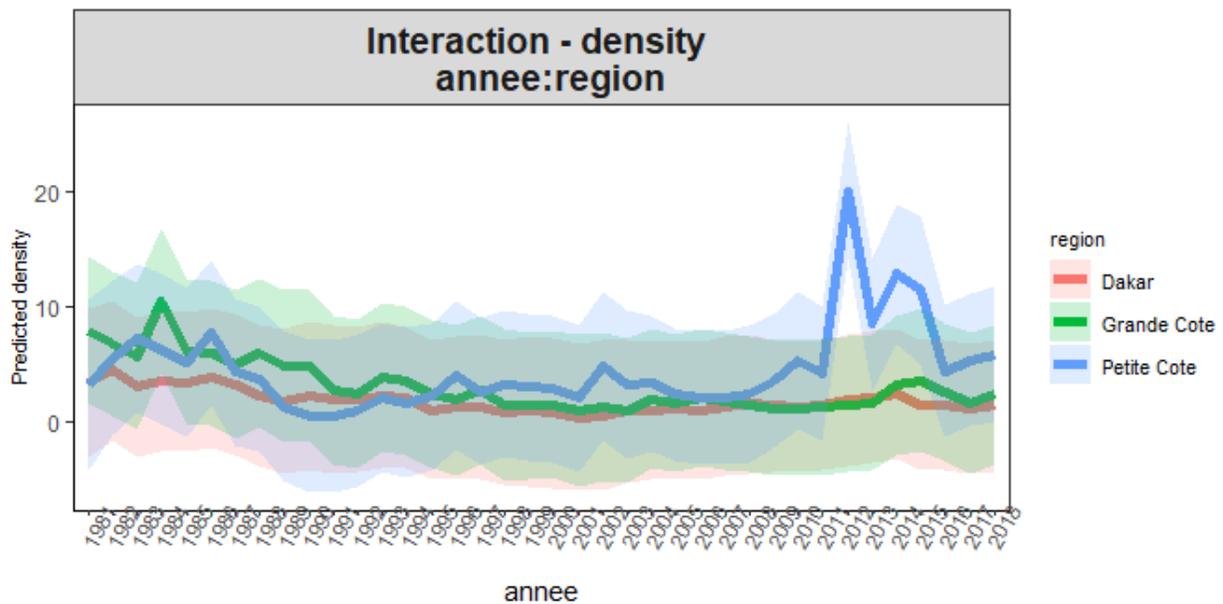


Figure 14 - Interaction annee:region du modèle des densités positives (AI+)

On observe une diminution sensible jusqu'en 2000 suivie d'une augmentation et de pics récents dont de fortes densités à la Petite Côte (Figure 14).

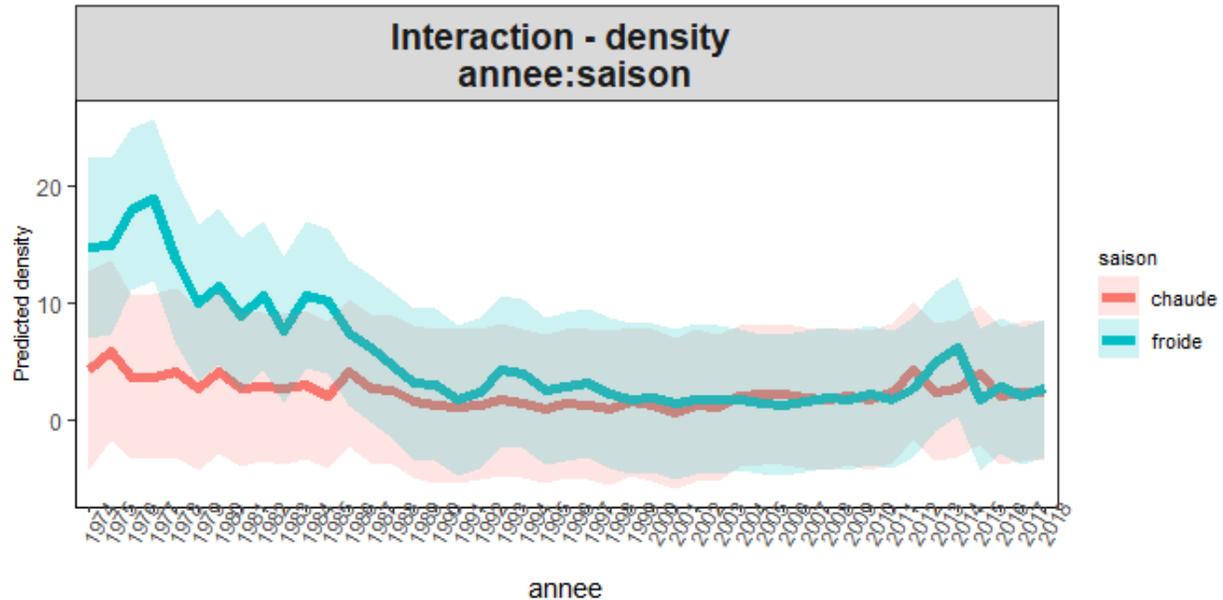


Figure 15 - Interaction annee:saison du modèle des densités positives (AI+)

Concernant l'interaction **annee:saison**, on observe une Forte diminution des densités en saison froide suivie d'une augmentation en même temps pour les 2 saisons. Nous laissons cette interaction de côté pour la suite de l'analyse et choisissons de privilégier l'interaction **annee:region** (qui ne peuvent pas être étudiées ensemble, la seconde nécessitant de retirer les 7 premières années de l'exploitation, faisant disparaître le signal de saisonnier)

$$\log(\text{densite}) \sim \text{annee} + \text{region} + \text{saison} + \text{engin} (+\text{annee: region})$$

Tableau 14 - ANOVA du modèle des densités positives (IA+) final - sans interaction annee:region

Effect	Df	% variance	% of explained (15.2%)	P-value	signif.
annee	44	6.5	43	< 0.001	***
region	2	4.3	28	< 0.001	***
engin	1	3.2	21	< 0.001	***
saison	1	1.2	8	< 0.001	***
Residuals	7,090	84.8			

Tableau 15 - ANOVA du modèle des densités positives (IA+) final- avec interaction annee:region

Effect	Df	% variance	% of explained (18.1%)	P-value	signif.
annee	37	4.6	26	< 0.001	***
region	2	4.3	24	< 0.001	***
engin	1	3.4	19	< 0.001	***
saison	1	0.9	5	< 0.001	***
annee:region	74	4.9	27	< 0.001	***
Residuals	6,614	81.9			

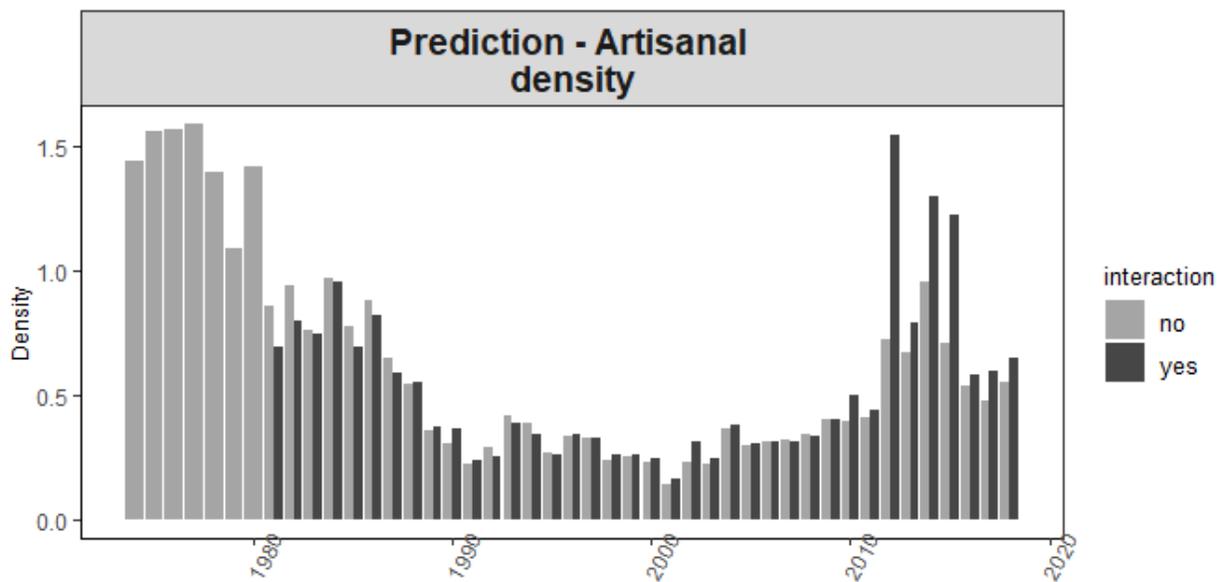


Figure 16 - Predictions des densités par année

Ces résultats indiquent une augmentation des densités de Thiof au Sénégal entre 2006 et 2018. (Figure 16)

3.2.3. Couplage des modèles de présence/absence et des densités positives

Les deux sous-modèles sont couplés selon la méthode précédemment décrite (cf 1.2.3) et fournissent les indices d'abondances à partir de la donnée artisanale. Le Tableau 15 récapitule les différents sous-modèles construits et la Figure 17 présente les tendances prédites par chaque sous-modèle avant couplage.

Tableau 16 - Récapitulatif des sous-modèles sélectionnés

Modele	Expression
Presence/absence	presence ~ annee + region + engin:region (+ annee:region)
Densités positives	log(densite) ~ annee + region + engin + saison (+ annee:region)

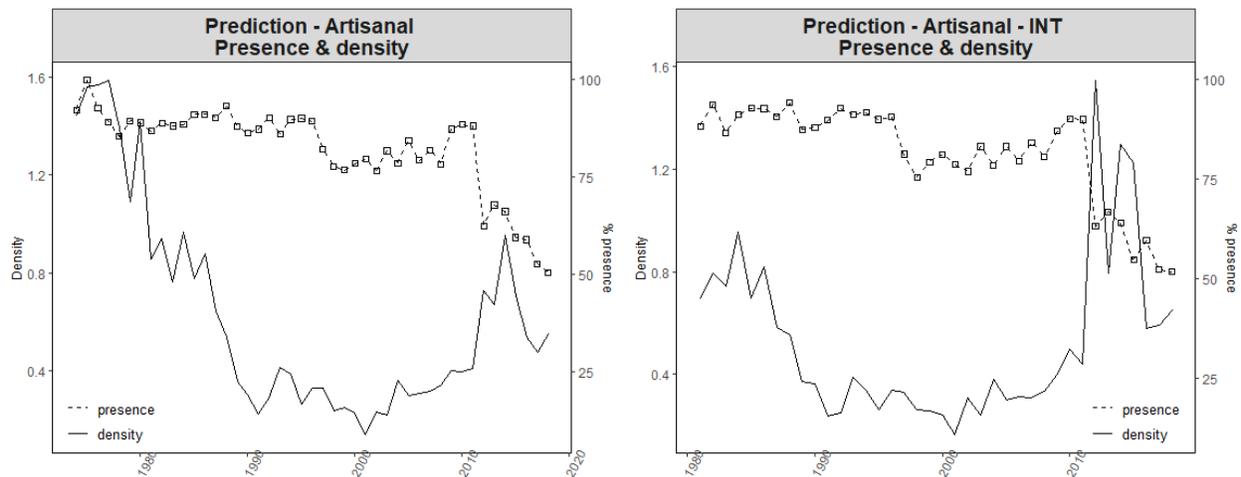


Figure 17 - Tendence des deux sous-modèles basé sur les données commerciales (PA) (% de presence et densités).

Les probabilités de présence et les densités sont prédites pour chaque combinaison de modalités puis pondérées par les surfaces de chaque classe bathymétrique dans les différentes zones (Tableau 17).

Tableau 17 - Proportion des zones

Region	Proportion)
Dakar	0.40
Grande Cote	0.25
Petite Cote	0.35

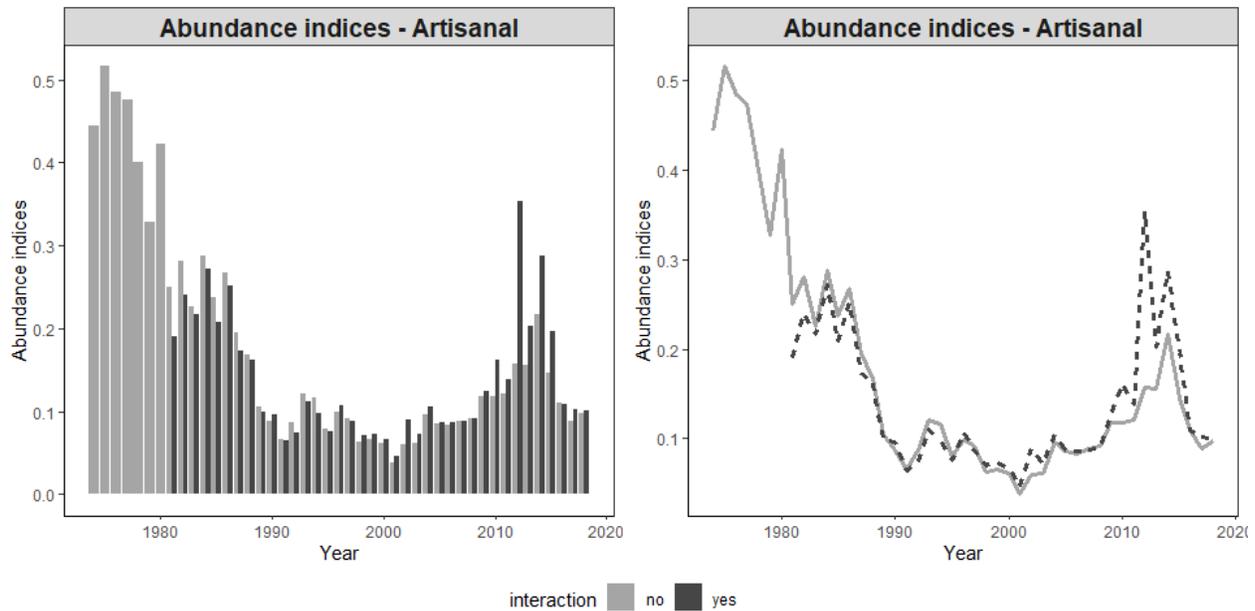


Figure 18 - Indices d'abondance issus du modèle delta-GLM avec et sans l'interaction annee:zone - Données artisanales

La Figure 18 présente les Indices d'Abondances (IA) estimés à partir des données de PA. Ils indiquent une augmentation régulière des abondances depuis 2006. A noter que les proportions utilisées pour réaliser la pondération des estimations devrait être recalculée à partir des surfaces correspondantes (au lieu de proportion estimées par expertises).

4. Agrégation des indices d'abondance

4.1. Standardisation et dérives de puissances des pêches

Les indices d'abondance estimés sont agrégés pour construire une seule série d'indices d'abondance. Ils sont dans un premier temps standardisé par rapport à une référence - IA des campagnes scientifiques - et sur les années communes selon la formule :

$$IA_{com}^{st} = \frac{\text{mean}(IA_{survey})^{common\ years}}{\text{mean}(IA_{com})^{common\ years}} \cdot IA_{com} \quad (6)$$

Les IA standardisés issus de chaque type de données sont présentés par la Figure 19. Aucune dérive des puissances de pêche n'a encore été appliquée.

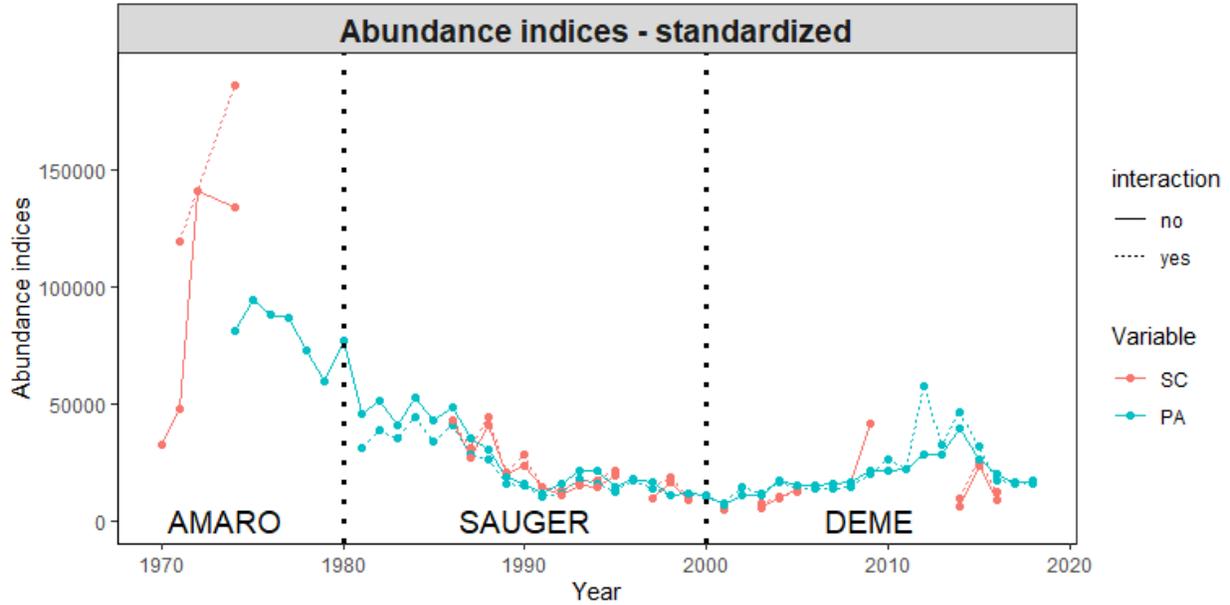


Figure 19 - Indices d'abondances standardisés

On observe sur la Figure 19 que les variations d'abondance mesurées par la donnée scientifique et commerciale semblent cohérentes quand elles sont disponibles sur la même période. Elles indiquent une réduction de l'abondance du Thiof au Sénégal jusque dans les années 2000, suivie d'une réaugmentation et d'une nouvelle diminution très récente (initiée en 2015 selon les données de PA). Par ailleurs, il est important de relever l'augmentation identifiée par la 1ère campagne d'échantillonnage scientifique AMARO (1970-1974, représentée comme "avant 1980" pour des raisons pratiques). Ce point est discuté dans la partie 4.2.

Après standardisation, une dérive de puissance des pêches est appliquée - i.e. uniquement aux IA issues des données commerciales -. Cette prise en compte de la dérive des puissances de pêche permet d'inclure une intensification de l'effort de pêche par amélioration des techniques (e.g. expérience des pêcheurs, organisation du travail...) et/ou des technologies (e.g. evolution des engins, amélioration de l'équipement, motorisation...) menant à une augmentation de l'efficacité de l'unité d'effort nominal (Millischer et Gascuel, 1997). Nous posons ainsi l'hypothèse que l'IA de l'année t peut s'exprimer comme suit :

$$IA_t^{corr} = IA_t \cdot (1 + \alpha)^{t-t_0} \quad (7)$$

Trois scénarios sont décrits au cours de cette étude :

- Scénario optimiste : Dérive des puissances de pêche fixée à 1%
- Scénario moyen : Dérive des puissances de pêche calculée à partir de l'équation décrite par Palomares et Pauly (2019) :

$$\alpha_{com} = 13.8 \cdot (Y_N - Y_{t_0})^{-0.511} \quad (8)$$

$Y_N - Y_{t_0}$: le nombre d'années

Soit $\alpha_{PA} = 2\%$ et $\alpha_{PA_{int}} = 2.18\%$

• Scénario pessimiste : Dérive des puissances de pêche fixée à partir du scénario moyen selon $\alpha_{pessimiste} = 2 * \alpha_{Moyen} - 1$, arrondi à l'entier. D'où $\alpha_{pessimiste} = 3\%$. Un récapitulatif est présenté au Tableau 18.

Tableau 18 - Valeur de alpha (coefficient empirique d'accroissement annuel des puissances de pêche), selon 3 hypothèses (optimiste, pessimiste et moyenne)

Hypothese	Coefficient de derive de puissance des peches	
	PA	PA_int
Optimiste	1 %	1 %
Moyen	2 %	2.18 %
Pessimiste	3 %	3 %

Enfin, les indices d'abondances sont lissés en calculant une moyenne mobile sur 3 ans, de façon à souligner les tendances à plus long terme (Figure 20).

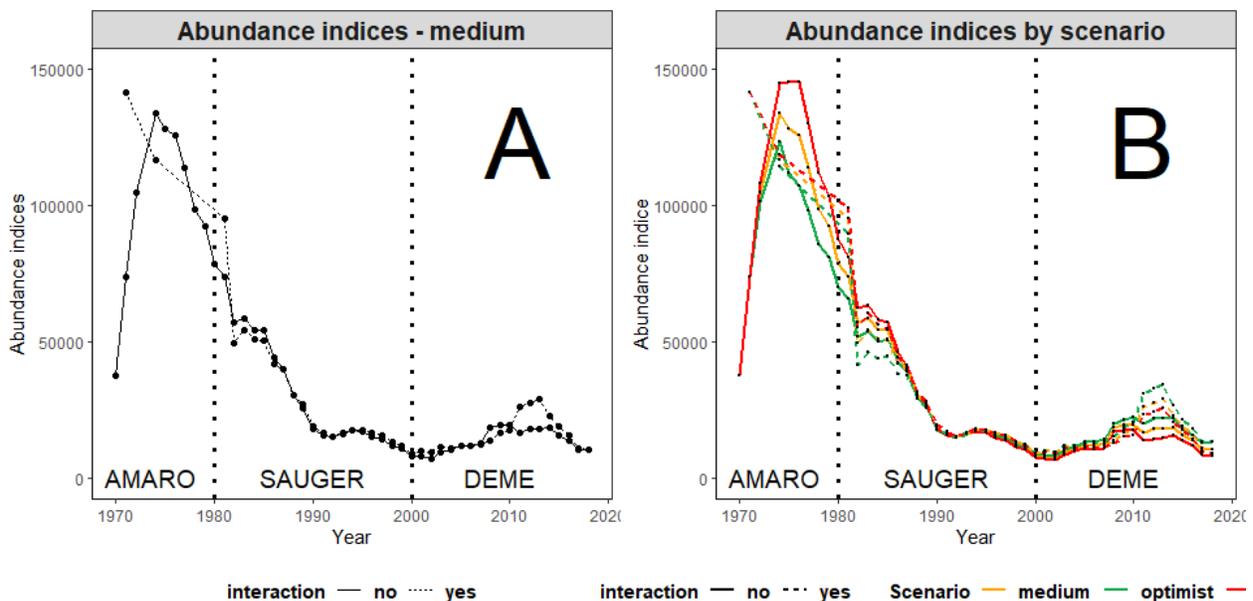


Figure 20 - A. Evolution des indices d'abondances standardisés, corrigés (dérive de pêche) et lissés (moyenne sur 3 ans) - Scénario moyen. B. Evolution des indices d'abondance par scénario

Les deux modèles renvoient de des tendances identiques. La différence majeure se situe dans les années les plus récentes, avec un pic d'abondance plus important avec le modèle prenant en compte une interaction. Cela s'explique par de fortes abondances à la Petite Côte. Il est important de rappeler que les traits en pointillés distinguant les campagnes d'échantillonnages ne correspondent pas aux vraies périodes, et que la forte croissance identifiée sur en début de série est uniquement issue de la campagne AMARO (aucune donnée sur la PA pour cette période).

4.2. Indices d'abondances finaux

Au terme de ce travail nous disposons de 2 séries d'indices d'abondances pour 3 scénarii différents. Après analyse de ces séries temporelles, nous remarquons que l'indice d'abondance issue de la PA construit avec une interaction **annee:region** nous conduit à perdre de l'information pour environ 10 années. Pour autant, sa prise en compte fournit des tendances similaires au modèle sans interaction à l'exception d'une légère remontée en fin de série temporelle. Pour cette raison nous choisissons de concentrer notre étude avec un indice PA sans cette interaction. En revanche cette interaction est conservée dans le cas de la donnée scientifique. Enfin, nous considérerons pour la suite de ce travail uniquement les scénarios "optimiste" et "pessimiste"

Par ailleurs, nous avons notés en Figure 19 et 20 une phase d'augmentation en début de série, qui trouve son origine dans les abondances prédites par la campagne AMARO (1970-1974). Ce pic, que l'on retrouve dans les 2 modèles (avec et sans l'interaction **annee:zone**) pourrait avoir des conséquences dans l'utilisation de cette IA dans un modèle de production, en particulier dans le cas des modèles dynamiques qui estiment une capacité biotique à partir de l'IA de la 1ère année.

Néanmoins cela est atténué du fait de la prise en compte d'une dérive des puissances de pêche (pas encore appliquée sur la Figure 19) ainsi que d'une moyenne lissée. En effet, d'une part, la prise en compte d'une dérive des puissances de pêches (même faible, de 1%) va réhausser les premiers indices d'abondances prédits par la PA, jusqu'alors inférieur à ceux prédites par la donnée scientifique. Ensuite, l'application d'une moyenne glissante va atténuer les valeurs extrêmes identifiées entre 1970-1974. Cependant, les abondances prédites en 1970 et 1971 indiquent une augmentation de l'abondance sur une période de fort développement de la pêcherie (179 T en 1971; 1000 T en 1974). Dans notre cas, cette problématique est évacuée en conservant la série scientifique avec une interaction **annee:zone** qui entraîne la suppression de l'année 1970 (plan d'échantillonnage incomplet) et, sachant que de nombreuses sont manquantes pour cette campagne scientifique, nous choisissons également de retirer l'année 1971 (Tableau 2 et Annexe 1).

La Figure 21 présente les indices d'abondance finaux pour les scénarios précédemment décrits qui s'étend entre 1974 et 2018.

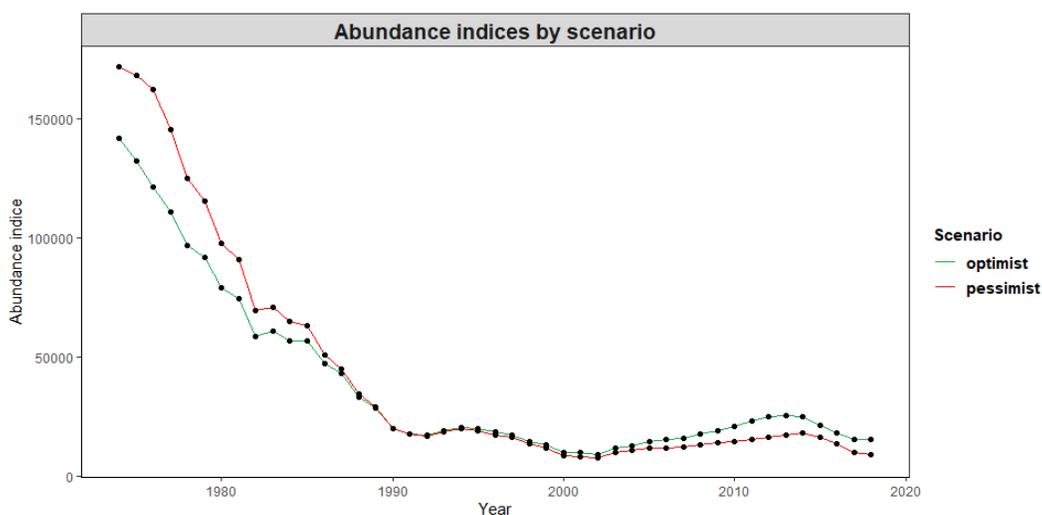


Figure 21 - Evolution des indices d'abondance standardisés, corrigés (dérive de pêche) et lissés (moyenne sur 3 ans) par scénario

Références bibliographiques

Ba K, (2018) Dynamique des ressources démersales côtières et aménagement de la pêche de la poulpe au Sénégal. These de Doctorat, Spécialité : Sciences Halieutiques et Aquacoles, École Doctorale : Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 142p.

FAO. 2020. Report of the Twenty-Second Session of the Fishery Committee for the Eastern Central Atlantic, Libreville, Gabon, 17–19 September 2019 / Rapport de la vingt-deuxième Session du Comité des pêches pour l'Atlantique centre-est, Libreville, Gabon, 17-19 septembre 2019. FAO Fisheries and Aquaculture Report/FAO Rapport sur les pêches et l'aquaculture No. 1303. Rome.

Meissa B, Gascuel D, Rivot E (2013) Assessing stocks in data-poor African fisheries: a case study on the white grouper (*Epinephelus aeneus*) of Mauritania. *Afr J Mar Sci* 35: 253–267.

Meissa B, Rivot E, Gascuel D, 2008, Analysis of CPUE data series through Generalized Linear Models and Delta method to derive annual series of abundance indices. Scientific report, ISTAM project. P 18.

Millischer L, Gascuel D (1997) - Estimation des puissances de pêche : Etude des flottilles industrielles de Bretagne sud, Troisième Forum Halieumétrique.

Laloë F, (1985) Étude de la précision des estimations des captures et prises par unité d'effort obtenues à l'aide du système d'enquêtes sur la pêche artisanale au Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye. Documentation Scientifique du CRODT, 36 p.

Le Pape O, Chauvet F, Mahévas S, Lazure P, Guérault D, Désaunay Y (2003) Quantitative description of habitat suitability for the juvenile common sole (*Solea solea*, L.) in the Bay of Biscay (France) and the contribution of different habitats to the adult population. *Journal of Sea Research* 50: 139–149.

Palomares MLD, Pauly D (2019) - On the creeping increase of vessels' fishing power. *Ecology and Society* 24(3):31.

Report of the FAO/CECAF Working Group on the Assessment of Demersal, Nouakchott 2019.

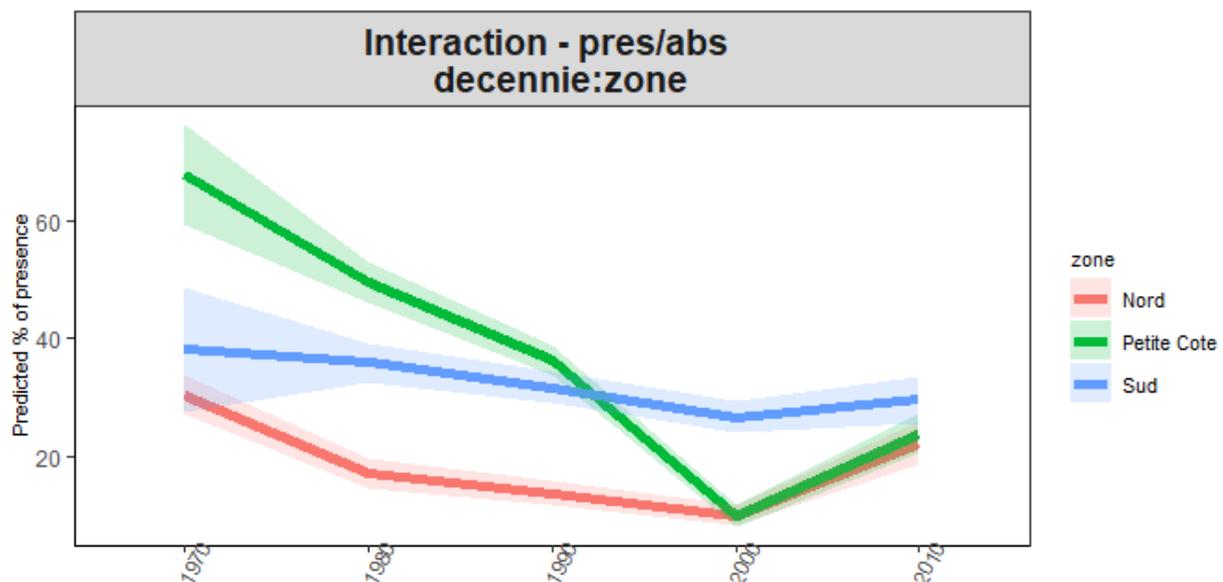
Stefansson G, (1996). Analysis of groundfish survey abundance data: combining the GLM and delta approaches. *ICES Journal of Marine Science* 53: 577–588.

ANNEXES

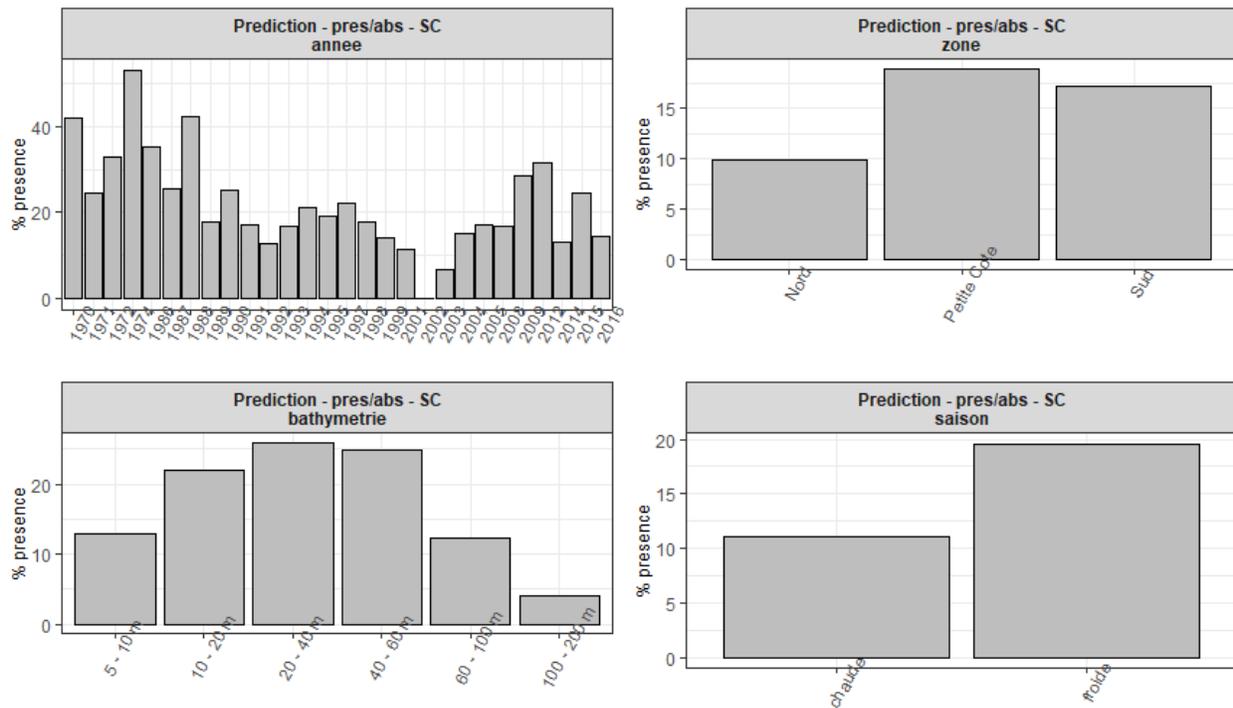
Annexe 1 : Caractéristiques techniques des navires et engins de pêche.

Navire	Caracteristique du navire	Caracteristiques du chalut	References
L. AMARO	<ul style="list-style-type: none"> - Chalutier de type pêche arriere - Puissance : - CV - Longueur : - m - Vitesse de chalutage : - nœuds - Duree du chalutage : - minutes - Methode : - 	<ul style="list-style-type: none"> - Chalut de fond de type Le DREZEN - Maillage du cul : 45 mm - Ouverture moyenne : 13,1 m 	-
L. SAUGER	<ul style="list-style-type: none"> - Chalutier de type pêche arriere - Puissance : 800 CV - Longueur : 36.6 m - Tirant d'eau : - m - Vitesse de chalutage : 3.5 nœuds - Durée du chalutage : 30 minutes - Méthode : Aire Balayée 	<ul style="list-style-type: none"> - Chalut de fond : De corde de dos plan - Mailles : 25 mm de côté - Maillage du cul : 45.4 mm - Ouverture moyenne : 36 m - Ouverture verticale : 27 m 	Thiaw, 2010
I. DEME	<ul style="list-style-type: none"> - Chalutier de type pêche arriere - Longueur : - m - Tirant d'eau : - m - Puissance : - CV - Tonnage brut : - TJB - Vitesse de chalutage : 3,5 nœuds - Durée du chalutage : 30 minutes - Méthode : Aire Balayee 	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur totale : 31.82 m - Corde de dos : 24.5 m - Bourrelet : 33.9 m maille étirée : 45 mm 	Fall, 2009

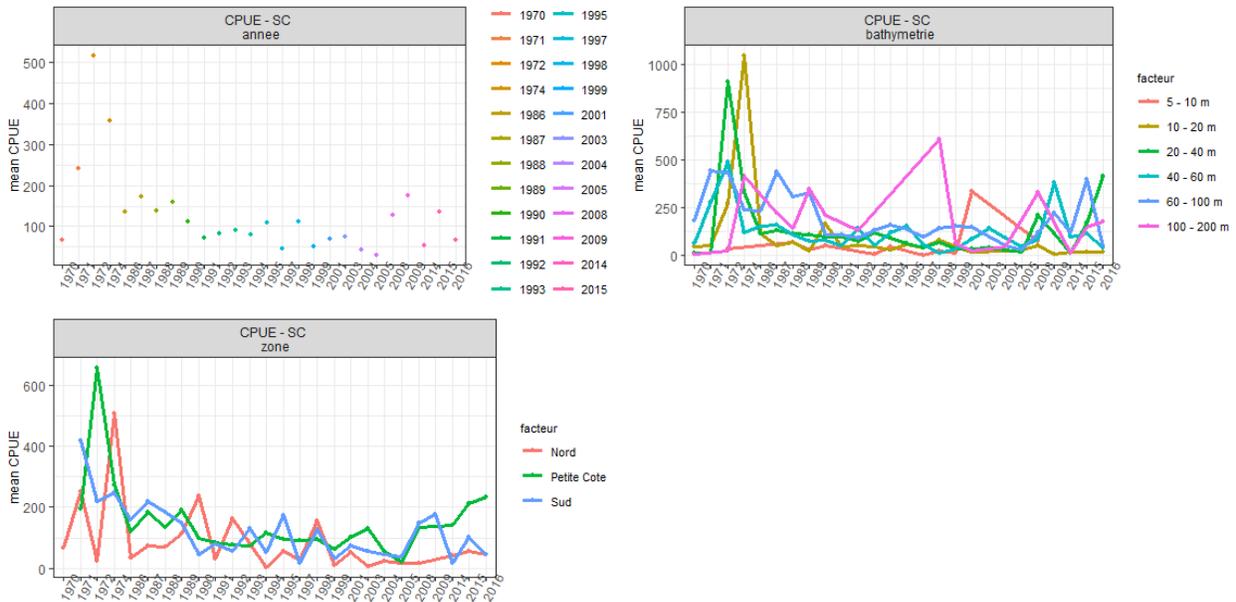
Annexe 2 : Analyse de l'interaction decennie:zone



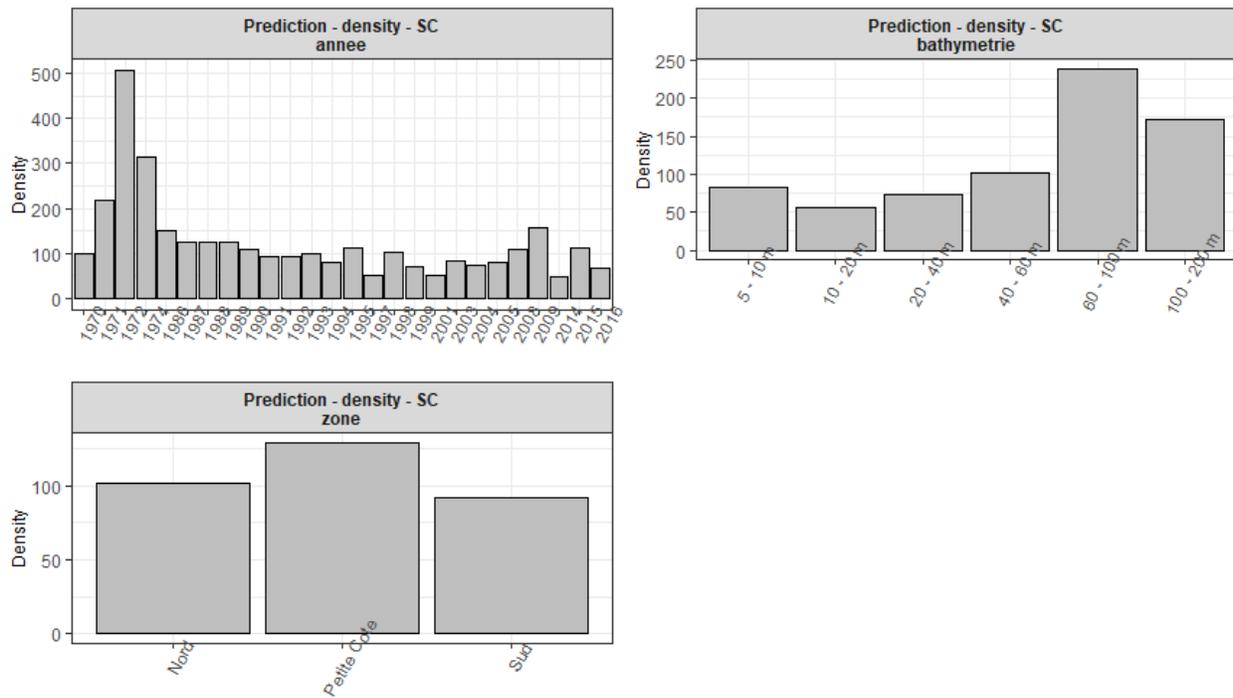
Annexe 3 : Prédictions de la probabilité de présence pour chaque modalité - Stf



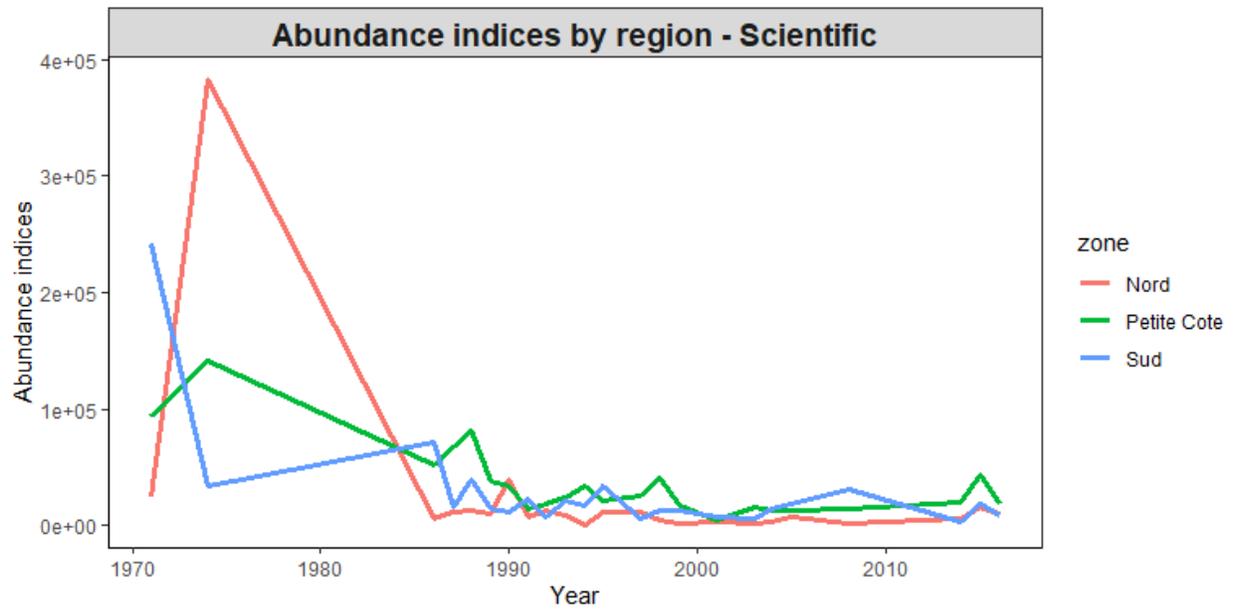
Annexe 4 : CPUE par modalité - stf



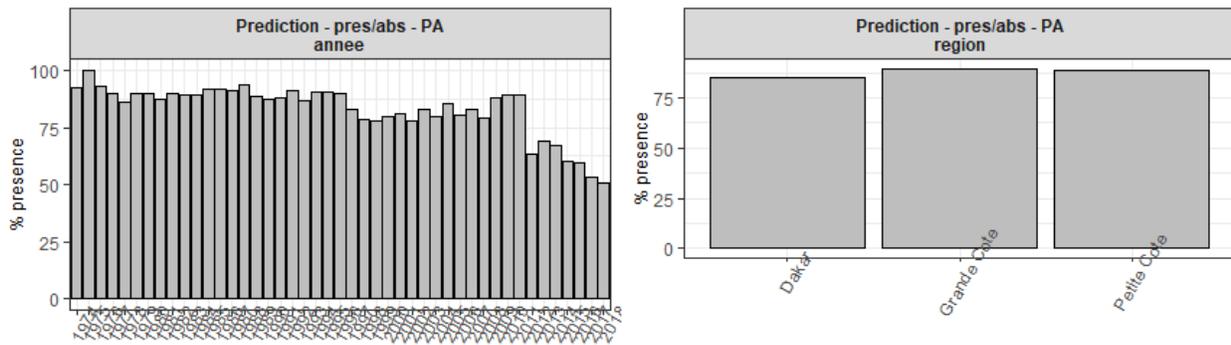
Annexe 5 : Estimations des densités pour chaque modalité - stf



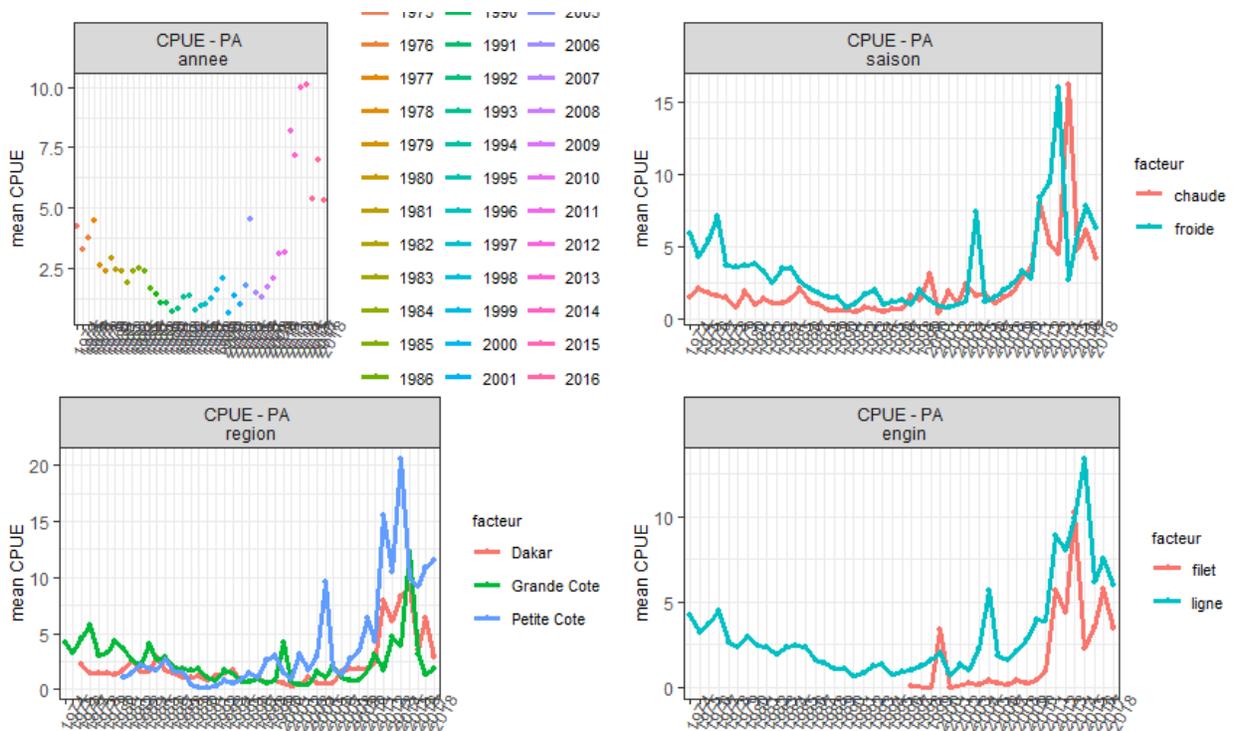
Annexe 6 : Indices d'abondance par zone (modèle avec interaction)



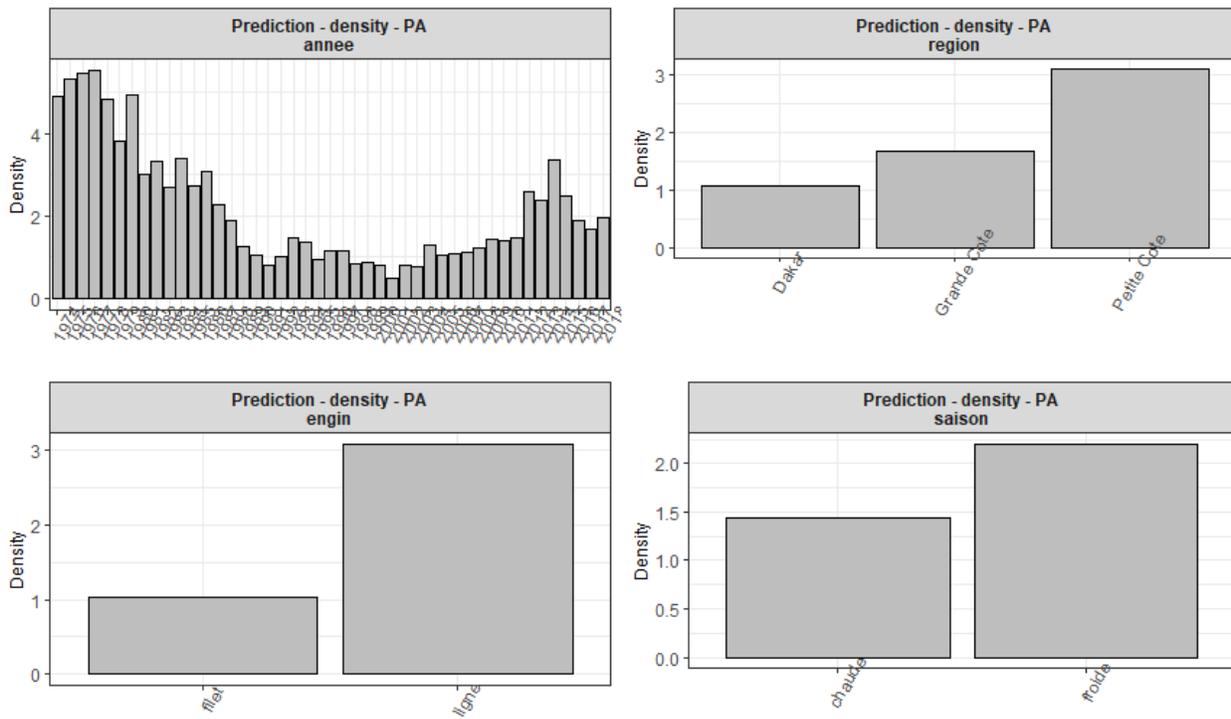
Annexe 7 : Estimations de la probabilité de présence pour chaque modalité - PA



Annexe 8 : CPUE par modalité - PA



Annexe 9 : Estimations des densités pour chaque modalité - PA



Annexe 10 : Indices d'abondance par zone - PA

