

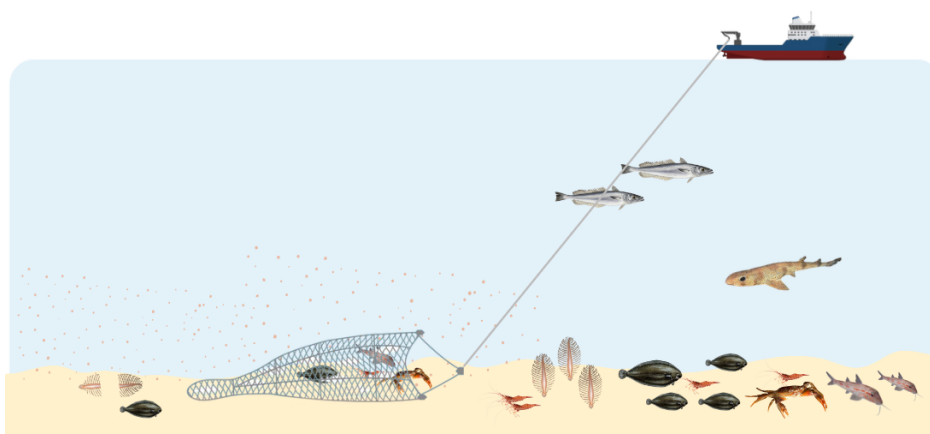
L'Institut Agro Rennes-Angers

☐ Site d'Angers ☒ Site de Rennes

Année universitaire : 2023 - 2024 Spécialité : Ingénieure agronome Spécialisation (et option éventuelle) : Sciences halieutiques et aquacoles (REA)	Mémoire de fin d'études ☒ d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2) ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
--	--

Dynamique spatio-temporelle de l'abrasion liée au chalutage dans le golfe du Lion, et réponse de la communauté benthodémersale.

(source :
Laurine Murzereau)



par : Laurine Murzereau

Soutenu à Rennes le 13 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Olivier LEPAPE

Maître de stage : Sandrine VAZ

Enseignant référent : Didier GASCUEL

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Pascal LAFFARGUE

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : 30/10/2024
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ **Murzereau Laurine** autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☐ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 30/10/2024

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Date et signature de l'enseignant : 04/11/2024

Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) pour la rédaction du mémoire

L'intelligence artificielle a été utilisée pour améliorer le texte ☐ Oui ☒ Non

Si oui, préciser pour quelle partie de texte et à quelles fins ?

Toute absence de déclaration précise sera considérée comme un manquement aux règles de l'éthique scientifique.

Date et Signature de l'auteur : 30/10/2024

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3). Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) 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

Remerciements :

Je tenais tout d'abord à remercier très chaleureusement Sandrine Vaz et Grégoire Certain de m'avoir sélectionné pour réaliser ce projet à leurs côtés. Ils m'ont permis de développer ma rigueur, mon sens de l'observation, mon autonomie et mon organisation. Grâce à eux j'ai pu découvrir les enjeux des pratiques de pêche intensives, et notamment cette conséquence moins connue du chalutage de fond, l'abrasion. Il a été très enrichissant pour moi d'échanger à leurs côtés sur des thématiques de pêche, de biologie marine, de statistiques mais également sur la construction de mon parcours professionnel. Je tiens à les remercier pour l'énergie qu'ils ont mis dans ce projet et l'accompagnement qu'ils m'ont offert malgré une fin de stage durant les vacances d'été.

Je voulais remercier tout particulièrement Jade Millot qui a consacré beaucoup de son temps à mon encadrement. Elle a été pour moi un réel soutien scientifique, rédactionnel, logistique et émotionnel, malgré la gestion de sa thèse en parallèle. Il était dur de croire que j'étais la première stagiaire qu'elle encadrait tant elle a fait preuve de pédagogie et de patience. Je suis ravie d'avoir eu l'opportunité de travailler avec elle et lui suis redevable pour tout ce qu'elle m'a apporté. Elle m'a notamment enseigné à être plus rigoureuse et à développer une méthodologie de travail bien structurée. J'espère que nos chemins se recroiseront.

Je remercie également Norbert Billet qui a pris part à ce projet. Il m'a notamment été d'une grande aide pour la prise en main des données spatialisées sur R et leur manipulation.

Un grand merci à l'AFH qui m'a offert l'opportunité de présenter mes travaux, aussi avancés qu'ils l'étaient, fin juin. Ce moment d'échange était très enrichissant tant humainement que professionnellement. J'ai eu la chance de pouvoir discuter avec certains membres de l'association sur la méthodologie utilisée pour ce projet. Un merci particulier à Baptiste Alglave que j'ai rencontré là bas et avec qui j'ai eu la chance d'échanger par la suite sur les analyses EOF que j'ai réalisées.

Ce mémoire ne résulte pas seulement d'un stage de 6 mois réalisé à l'Ifremer de Sète, mais il est le fruit de 19 ans d'études qui m'ont amené jusqu'ici.

J'ai découvert les sciences halieutiques en intégrant l'Institut Agro Rennes-Angers et je tenais à remercier l'ensemble de l'équipe enseignante halieutique pour leur accompagnement. Je souhaite particulièrement remercier Etienne Rivot, responsable de la spécialisation REA, pour sa pédagogie, son dévouement et son engagement auprès de ses étudiant.e.s.

Avant propos :

Ce projet s'inscrit dans une problématique qui me tient à cœur, comprendre et quantifier les impacts des activités anthropiques sur les écosystèmes marins afin de les atténuer. Dans un monde où les pratiques de l'homme entrent en conflit avec la survie des autres êtres-vivants, il devient urgent de repenser nos pratiques. Nous devons agir rapidement afin que les générations futures puissent elles aussi contempler la spectaculaire diversité biologique que cachent encore nos océans.

En espérant apporter ma pierre à l'édifice dans de futurs projets...

Table des matières :

I - Introduction :	1
II - Données et méthodes :	4
II.1) Définition de l'aire d'étude.....	4
II.2) Données d'abrasion.....	4
II.3) Données de la communauté benthodémersale.....	5
II.4) Méthode d'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion.....	6
II.4.a) Calcul de l'abrasion totale exercée sur le golfe du Lion.....	6
II.4.b) Calcul des différences relatives.....	6
II.4.c) Méthode d'analyse EOF.....	6
II.5) Méthode d'analyse du lien entre l'abrasion et les métriques biotiques issues des campagnes en mer.....	8
II.5.a) Construction des co-variables abrasion.....	8
II.5.b) Sélection des co-variables environnementales.....	8
II.5.c) Calcul des corrélations entre les variables.....	9
II.5.d) Méthode d'étude préliminaire de la réponse des métriques aux différentes abrasions.....	9
II.5.e) Construction des GAMs et sélection des modèles.....	9
II.5.f) Graphiques des tendances et variables présentées.....	10
II.6) Méthode de sélection des taxons indicateurs d'impact.....	10
III - Résultats :	10
III.1) Dynamique spatio-temporelle de l'abrasion exercée dans le golfe du Lion.....	10
III.1.a) Etude préliminaire des patrons généraux de l'abrasion dans le golfe du Lion.....	10
III.1.b) Analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion par EOF.....	12
III.2) Analyse de la réponse de la communauté benthodémersale à l'abrasion.....	15
III.2.a) Tests des corrélations des données.....	15
III.2.b) Etude préliminaire de la réponse des communautés benthodémersales à l'abrasion.....	16
III.2.c) Modélisation des réponses.....	17
III.3) Sélection des taxons indicateurs d'impacts.....	24
IV - Discussion :	25
IV.1) Dynamique spatio-temporelle de l'abrasion.....	25
IV.1.a) Limites de la méthode EOF.....	25
IV.1.b) Déplacement de la pression de pêche.....	25
IV.1.c) Zones de même vécu de pêche.....	26
IV.2) Tendances des réponses des communautés benthodémersales à l'abrasion.....	27
IV.2.a) Choix des variables.....	27
IV.2.b) Réponses aux abrasions exercées à plus ou moins long terme.....	28
IV.2.c) Tendances des réponses en fonction des groupes taxonomiques.....	28
IV.2.d) Distinction entre la profondeur et l'abrasion.....	30
IV.3) Taxons indicateurs d'impacts.....	30
V - Conclusion :	31

Liste des abréviations :

BIC : Critère d'Information Bayésien
CGPM : Commission Générale des Pêches pour la Méditerranée
CIEM : Conseil International pour l'exploration de la Mer
Convention OSPAR : Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est
EOF : Empirical Orthogonal Function
FRA : Fishery Restricted Area
GAM : Modèles Additifs Généralisés
GOLDYS : Gulf of Lion Seasonal Dynamics
GSA : Geographical SubArea
MEDITS : MEDiterranean Trawl Survey
RMD : Rendement Maximum Durable
SAR : Swept Area Ratio
SIH : Système d'Information Halieutique
VMS : Vessel Monitoring System
ZEE : Zone Economique Exclusive

Table des tableaux :

Tableau I : Coefficients des corrélations entre les différentes variables quantitatives (tests de Spearman) pour les données depuis 2013.

Tableau II : Nombre total d'espèces étudiées (Total), Nombre d'espèces pour lesquelles au moins une variable abrasion est significative (Retenu) et proportion des groupes taxonomiques qui répondent à l'abrasion (%).

Table des figures :

Fig. 1 : Carte du golfe du Lion (zone bleue) avec l'isobathe des 50 m et 100 m (gris), la ligne des 3 milles nautiques (rouge), les zones de fermeture (zone bathymétrique en violet et zone PACA en vert) et sa localisation au sein de la Méditerranée (cadre en bas à droite).

Fig. 2 : Méthode mathématiques pour l'analyse EOF.

Fig. 3 : Exemple du calcul des variables d'abrasion dans le cas d'une capture des espèces en Juin 2014

Fig. 4 : Graphique de l'évolution de l'abrasion totale exercée sur le golfe du Lion.

Fig. 5 : Cartes de l'abrasion annuelle moyenne sur la période 2016-2019 et 2020-2023.

Fig. 6 : Carte de la différence relative d'abrasion annuelle moyenne entre la période 2016-2019 et 2020-2023.

Fig. 7 : Cartes mensuelles de différence relatives d'abrasion moyenne entre la période 2016-2019 et 2020-2023 (cartes 1 à 12). Cartes de l'abrasion moyenne sur la période 2016-2019 (cartes A à L).

Fig. 8 : Résultats de l'analyse EOF sur les données d'anomalies annuelles. Carte des corrélations spatiales (A) et graphique de la tendance de la composante principale (B) associées à la première valeur propre ($\lambda_1 / \sum \lambda = 34.6\%$). Carte des corrélations spatiales (C) et graphique de la tendance de la composante principale (D) associés à la deuxième valeur propre ($\lambda_2 / \sum \lambda = 22.5\%$).

Fig. 9 : Résultats de l'analyse EOF sur les données d'anomalies mensuelles. Carte des corrélations spatiales (A) et graphique de la tendance de la composante principale (B) associées à la première valeur propre ($\lambda_1 / \sum \lambda = 15.3\%$).

Fig. 10 : Réponse de la biomasse aux variables Abrasion 1_3 mois (A), Abrasion 4_6 mois (B) et Abrasion 7_12 mois (C) de *Astropecten irregularis pentacanthus*.

Fig. 11 : Réponse de la biomasse aux variables Abrasion 1_3 mois (A), Abrasion 4_6 mois (B) et Abrasion 7_12 mois (C) de *Merluccius merluccius*.

Fig. 12 : Réponse de la biomasse aux variables Abrasion 1_3 mois (A), Abrasion 4_6 mois (B) et Abrasion 7_12 mois (C) de *Lepidotrigla cavillone*.

Fig. 13 : Graphiques des tendances des variables abrasion sélectionnées dans le modèle final de l'espèce *Capros aper* pour les métriques biomasse (bleu) et densité (rouge).

Fig. 14 : Graphiques des tendances des variables abrasion sélectionnées dans le modèle final de l'espèce *Dardanus arrosor* pour les métriques biomasse (bleu) et densité (rouge).

Fig. 15 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour les trois espèces de céphalopodes, dans l'ordre, *Eledone moschata*, *Rhombosipion orbignyana* et *Todaropsis eblanae*.

Fig. 16 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour trois espèces d'invertébrés benthiques, dans l'ordre, *Dardanus arrosor*, *Nephrops norvegicus* et *Parapenaeus longirostris*.

Fig. 17 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour les deux espèces de poissons cartilagineux, dans l'ordre, *Raja clavata* et *Scyliorhinus canicula*.

Fig. 18 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour deux espèces de poissons osseux de l'ordre taxonomique des perciformes, *Chelidonichthys cuculus* et *Lepidotrigla dieuzeidei*.

Fig. 19 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour deux espèces de poissons osseux de l'ordre taxonomique des Eupercaria incertae sedis, *Spicara flexuosa* et *Pagellus bogaraveo*.

Fig. 20 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour une espèce de poisson osseux de l'ordre taxonomique des Pleuronectiformes, *Lepidorhombus boscii*.

Fig. 21 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour une espèce de poisson osseux de l'ordre taxonomique des Gadiformes, *Micromesistius poutassou* et *Phycis blennoid*.

Fig. 22 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la densité des espèces de poisson osseux *Argentina sphyraena* et *Lepidotrigla dieuzeidei*.

Fig. 23 : Représentation de 4 zones du golfe du Lion ayant des dynamiques et évolutions de l'abrasion par pêche différentes.

N.B. : Aucune intelligence artificielle n'a été utilisée pour la rédaction de ce rapport.

*Je dédie ce mémoire à mes parents.
Eux qui m'ont donné la chance de réaliser de longues études,
et qui m'ont toujours soutenu pour que je trouve ma voie.*

En vous souhaitant bonne lecture.

I - Introduction :

Le chalutage de fond est responsable d'environ 26% des captures halieutiques mondiales, ce qui représente 19 millions de tonnes de poissons et d'invertébrés débarquées par an. Parmi les arts traînants de fonds (senne, drague, chalut), le chalut de fond (simple, jumeaux ou en boeufs, à panneaux ou à perche), est à l'origine des plus importantes captures en biomasse en Méditerranée (~60%) (**Lucchetti et al. 2021**). Il est un pilier dans l'économie de certaines régions du monde, notamment pour l'Europe (**Steadman et al. 2021; Amoroso et al. 2018**).

Cet art traînant fait pour autant l'objet de nombreuses critiques et controverses de par ses conséquences socio-économiques et environnementales. En effet, de par son efficacité, le chalutage de fond oblige le déplacement des "petites pêches" non compétitives, vers des zones non chalutées (**Steadman et al. 2021; McConnaughey et al. 2020**). En ce qui concerne les impacts environnementaux, nous pouvons recenser deux impacts centraux. Tout d'abord, son manque de sélectivité engendre des captures accessoires (captures d'espèces non-ciblées) et accidentelles (captures d'espèces protégées) importantes, ce qui a des conséquences néfastes sur l'état des stocks des espèces. Le deuxième impact majeur a lieu sur les écosystèmes marins en général. Il est engendré par le contact de l'engin de pêche traînant sur le fond marin (**Steadman et al. 2021**). En effet, le frottement entre le sol et les parties en contact des engins de pêche (ex : le bourrelet et les panneaux des chaluts de fond à panneaux) use ou érode le milieu, c'est ce que l'on appelle l'abrasion (**Lorance et Léonardi 2011**). Si les plus fortes pressions d'abrasion sont exercées par le chalutage de fond en Méditerranée (**Lucchetti et al. 2021**), les autres arts traînant de fond ont des conséquences similaires sur les fonds marins dans d'autres régions du monde (**Lorance et Léonardi 2011**).

L'abrasion impacte les milieux marins en modifiant la structure physique des fonds ainsi que la structure et le fonctionnement des communautés benthodémersales (**Hiddink et al. 2017**). Ces impacts peuvent avoir des conséquences directes et indirectes sur les organismes, mais également à l'échelle des habitats (**Jennings et al. 2001**). L'action mécanique exercée par les chaluts de fond remodèle les fonds marins en homogénéisant les sédiments, en creusant des sillons et en remettant en suspension les sédiments. L'abrasion altère les communautés marines directement via la mortalité induite par le passage de l'engin de pêche, de par la capture des organismes, mais également par l'arrachement des individus fixés, l'écrasement, l'enfouissement ou l'exposition en dehors de l'eau des organismes remorqués. Elle a également un impact indirect à travers la mortalité par étouffement induite par la remise en suspension des sédiments (**Durrieu de Madron et al. 2005; Laffargue et Vaz 2021**). L'impact est particulièrement négatif sur des espèces érigées, non-ciblées par le chalut, mais facilement détruites par son passage (coraux, pennatules, crinoïdes) (**Georges et al. 2024; Carbonara et al. 2022; Downie et al. 2021**). Les impacts cumulés de l'abrasion peuvent réduire la qualité de la nourriture et perturber l'organisation globale des réseaux trophiques (**Lorance et Léonardi 2011; Rijnsdorp et al. 2016; Rumohr 2000**). Tous ces dommages peuvent induire une recolonisation différente du milieu, en augmentant la composition des organismes non vulnérables à l'abrasion (**Juan, Thrush, et Demestre 2007**). En effet, les espèces sont plus ou moins sensibles de par leur cycle et mode de vie mais également suivant leur capacité d'enfouissement. Ce que l'on appelle sensibilité est la combinaison de la capacité à tolérer une pression externe, autrement appelée résistance, et du temps nécessaire à sa récupération suite à une dégradation, que l'on appelle résilience (**Liefmann et al. 2022**).

Ainsi, l'étude de l'impact du chalutage de fond sur les fonds marins, et plus généralement les écosystèmes, est devenue une importante préoccupation pour le maintien de leur intégrité. En Europe, des objectifs clairs ont été inscrits depuis 2008 par la Directive Cadre "Stratégie pour le Milieu marin" visant à maintenir et restaurer le bon état écologique des écosystèmes marins face

aux activités anthropiques. Parmi les descripteurs, nous retrouvons le descripteur 6 qui vise à évaluer les pertes et perturbations physiques des fonds marins et agir en conséquence (UE 2017; Liefmann et al. 2022). La limitation de l'abrasion et de ses impacts sur les écosystèmes marins est un enjeu majeur de conservation. Cet objectif est d'ailleurs inclus dans le règlement européen sur la restauration de la nature qui est paru le 29 juillet 2024 (UE 2024).

En Méditerranée, les fonds marins sont caractérisés par une hétérogénéité géomorphologique, incluant des canyons, des plateaux continentaux, des monts sous marins ou des plaines abyssales, qui abritent une importante diversité en poissons, céphalopodes et espèces benthiques. Pour autant, les fonds méditerranéens font face depuis plusieurs décennies aux deuxièmes plus fortes pressions d'abrasion par unité de débarquement dans les eaux européennes, derrière les eaux du Portugal (Eigaard et al. 2017).

Dans les eaux françaises, le golfe du Lion, qui s'étend du Cap de Creus (Catalogne) au Cap Sicié (dans le Var), est soumis à un effort de pêche important des chaluts de fond battant pavillon français et également espagnol. Favorisé par la présence d'un large plateau continental, la pêche au chalut de fond a entraîné une surexploitation des stocks de rougets de vase (*Mullus Barbatius*) et de merlu (*Merluccius merluccius*), du fait d'une mortalité par pêche appliquée sur ces stocks nettement supérieure à celle recommandée pour une gestion durable au Rendement Maximum Durable (RMD) (Biseau et al. 2016). Le plan de gestion européen WestMed a été instauré en janvier 2020 dans le golfe du Lion afin de réduire les captures de juvéniles de ces deux stocks de 20% par rapport à la période 2015-2017, en fermant à la pêche les zones de nourriceries et de frayères (Ministre de l'agriculture et de l'alimentation 2019). Ce plan de gestion pluriannuel s'inscrit dans un contexte plus large visant à restaurer les stocks méditerranéens surexploités, dont l'initiative MedFish4ever (Direction Interrégionale de la Mer Méditerranée 2019) conduit par la Commission Générale des Pêches pour la Méditerranée (CGPM) (FAO 2023). Dans le cadre du plan WestMed, en plus d'une réduction progressive de l'effort (quotas de jours de pêche) sur l'ensemble de la période 2020-2024, deux zones de fermeture à la pêche ont été instaurées. Une zone comprise entre les isobathes 90m et 100m au large de l'Occitanie est fermée durant 8 mois de l'année (de début Septembre à fin Avril) aux chalutiers exploitant les espèces démersales. De plus, une FRA ("Fishery restricted area") instaurée par la France sur recommandation de la CGPM depuis 2009 au large de la région PACA, a été élargie vers le nord et est fermée durant 6 mois de l'année (de début Novembre à fin Avril) aux chalutiers démersaux (Certain et al. 2023). Ces deux zones de fermeture sont appelées respectivement "zone bathymétrique" et "zone box PACA" dans cette étude.

L'étude de l'abrasion exercée par les engins traînants est possible depuis l'obligation en 2012, d'utiliser des VMS (Vessels Monitoring System), un système de surveillance par satellite, pour les navires de plus de 12m battant pavillon européen (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire 2017). Depuis cette obligation de l'union européenne, il est possible de suivre les linéaires d'actions de pêche et estimer spatialement et temporellement l'abrasion engendrée de manière précise (ICES 2021). En effet, ce dispositif renseigne la position, le cap et la vitesse des navires à des intervalles de temps réguliers, au minimum toutes les deux heures (toutes les heures pour les navires français). En combinant ces informations aux largeurs des engins de pêche, nous avons ainsi accès à la surface abrasée qu'ils génèrent (Georges et al. 2021). Pour qualifier l'abrasion exercée par les arts traînants de fond, l'utilisation du Swept Area Ratio (SAR) est répandue. Cette technique découpe la zone d'étude en une grille de cellules de même dimension et calcul le taux abrasé de chacune des cellules au cours d'un intervalle de temps prédéfini. Cet indice est utilisé par le Conseil International pour l'exploration de la Mer (CIEM) et la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (Convention OSPAR) pour mesurer la pression de pêche exercée par les engins traînants (chaluts, drague, senne) sur les fonds marins

avec une maille spatiale de 3'x3' et une période d'intégration temporelle annuelle (ICES 2021). Ces données sont souvent traitées en utilisant le SAR mensuel ou annuel (Georges et al. 2021). Une cellule pouvant être balayée plusieurs fois au cours du temps, le taux peut être supérieur à 1.

Depuis la mise en place de zones de fermetures à la pêche dans le golfe du Lion, nous nous attendons à ce que la dynamique spatio-temporelle de l'activité de pêche, et par conséquent de l'abrasion, ait été modifiée. Il est donc intéressant de comparer les patrons spatiaux et temporels de l'abrasion dans le golfe du Lion pour observer les modifications de la répartition de l'effort de pêche depuis l'introduction du plan de gestion WestMed. L'abrasion exercée dans ce périmètre étant essentiellement causée par les chaluts, nous pouvons confondre les termes "engins traînants" et "chaluts" dans le cadre de notre étude. L'abrasion des fonds marins influence la structure et le fonctionnement des communautés benthiques et démersales. Pour autant, nous pensons que les conséquences de l'abrasion peuvent varier selon l'espèce du fait de différents degrés de résistance à la pression. Cette étude a donc pour objectif : 1) de quantifier et de cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion exercée dans le golfe du Lion, 2) d'étudier la forme de la réponse d'un cortège d'espèces démersales et benthiques le long d'un gradient d'abrasion, 3) de déterminer une liste de taxons sensibles à l'abrasion qui pourraient être utilisés comme indicateurs de la pression d'abrasion.

Pour répondre à nos objectifs, différentes analyses statistiques ont été réalisées. Tout d'abord, afin de caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion dans le golfe du Lion, une analyse Empirical Orthogonal Functions (EOF) a été exécutée à l'aide des données de SAR annuels et mensuels. Ensuite, les données biologiques issues des campagnes halieutiques MEDITS (MEDiterranean Trawl Survey) et GOLDYS (Gulf of Lion Seasonal Dynamics), ont été utilisées afin d'obtenir des informations de dénombrement et de masse des espèces benthiques et démersales. Les réponses des métriques de biomasse et densité des espèces à un gradient d'abrasion ont ensuite été analysées à l'aide de Modèles Additifs Généralisés (GAMs). Une attention particulière a été portée aux espèces présentant une réponse significative à la pression d'abrasion.

II - Données et méthodes :

II.1) Définition de l'aire d'étude

Le golfe du Lion (Fig. 1) est inclus dans la Zone Économique Exclusive Française (ZEE) et s'étend du Cap de Creus (frontière franco-espagnole) jusqu'à Marseille sur une surface de 150 000 km². Il correspond à la sous zone géographique, en anglais "Geographical subarea" (GSA), numéro 7, définie par la CGPM (**Pierucci et al. 2021**). Ce large plateau continental a une profondeur moyenne de 250 m et maximale de 1 200 m, il est donc relativement peu profond. Dans cette étude, nous considérons deux zones de fermeture des pêches définies dans le cadre du plan de gestion WestMed, la zone bathymétrique à l'Ouest et la zone box PACA à l'Est (Fig. 1, respectivement en violet et en vert). De par la pression de pêche importante exercée par les chaluts de fond et la taille des zones de fermetures saisonnières, cette zone est intéressante pour l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion exercée par ces arts traînants. De plus, des campagnes scientifiques au chalut démersal ayant lieu à fine échelle spatiale dans ce périmètre, il permet de croiser des données d'abrasion avec des données sur les communautés benthodémersales.

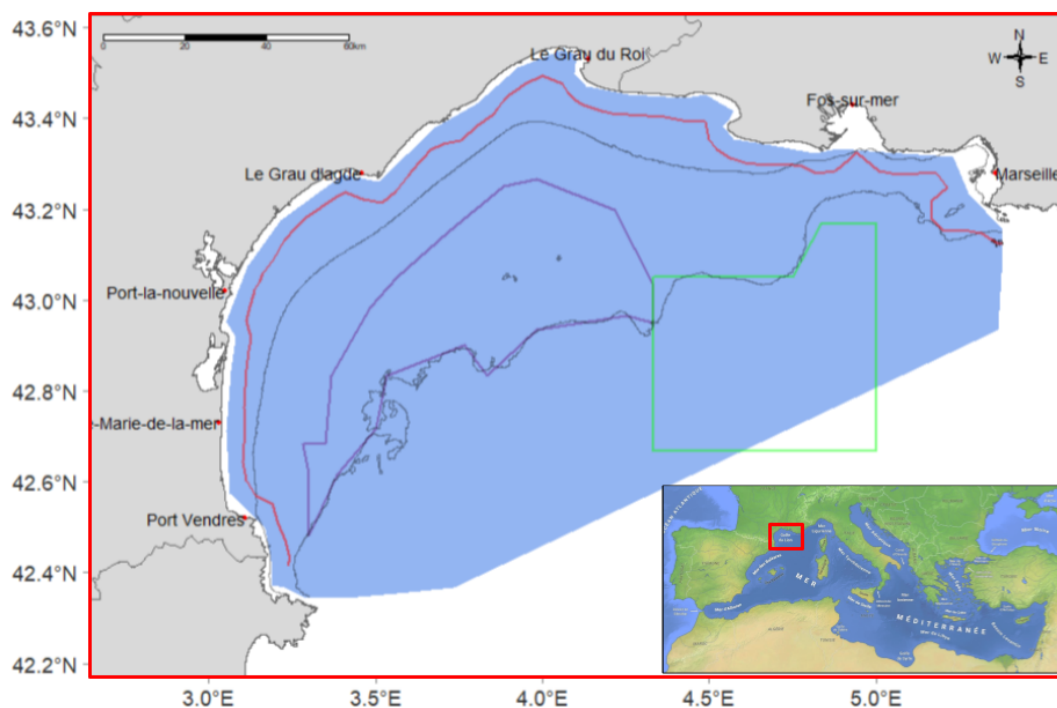


Fig. 1 : Carte du golfe du Lion (zone bleue) avec l'isobathe des 50 m et 100 m (gris), la ligne des 3 milles nautiques (rouge), les zones de fermeture (zone bathymétrique en violet et zone PACA en vert) et sa localisation au sein de la Méditerranée (cadre en bas à droite).

II.2) Données d'abrasion

Les données d'abrasion utilisées dans cette étude sont exprimées en unité SAR (Swept Area Ratio) (**ICES 2015**) et ont été obtenues auprès du Système d'Information Halieutique (SIH) de l'Ifremer suite aux travaux de Georges et al., 2021 (**Ifremer 2022**). Afin d'avoir des informations à plus fine échelle, le golfe du Lion a été découpé sous la forme d'une grille de cellules d'une minute d'arc de côté. Ainsi, le SAR permet de visualiser le pourcentage de chaque cellule qui a été abrasée durant une période donnée. Plus une cellule a été chalutée et plus le taux d'abrasion est élevé. Ce taux peut être supérieur à 1 dans les zones chalutées plusieurs fois.

La surface abrasée s’obtient en multipliant 1) la trajectoire linéaire d’une action de pêche et 2) la largeur de l’engin de pêche avec lequel cette action a été réalisée.

La trajectoire de pêche est extraite des données du VMS, obligatoire pour les navires de plus de 12m depuis 2012, qui fournissent une émission de leur position, vitesse et cap au maximum toutes les heures. Seuls les déplacements correspondant à une vitesse non-nulle inférieure à 4.5 nœuds, sont considérés comme des actions de pêche. Les distances parcourues en action de pêche sont estimées par l’algorithme ALGOPESCA qui relie linéairement les coordonnées VMS successives (**Ifremer 2022**). Cette approximation des trajectoires présente quelques limites, notamment en zone côtière. En effet, toutes les zones aux alentours des ports sont automatiquement considérées sans action de pêche par l’algorithme, faisant l’hypothèse qu’une vitesse inférieure à 4.5 km/h correspond à une sortie ou entrée de port. Enfin, comme seuls les bateaux de plus de 12m sont équipés, l’action des bateaux plus petits, généralement côtiers, n’est pas comptabilisée. L’abrasion exercée sur les zones portuaires et côtières est donc sous-estimée.

L’information sur la largeur des engins de pêche n’est pas directement renseignée dans les logbook des navires français. En méditerranée, pour chaque couple métier-engin, la « fauchée » horizontale est déduite d’une relation linéaire la reliant à la taille du navire.

Enfin, le SAR correspond à la somme par unité de temps et unité de surface de l’aire abrasée par les engins traînants [Eq. A] divisée par la surface de l’unité de gestion spatiale considérée (**Georges et al. 2021**).

$$\text{SAR} = \frac{\sum_i (\text{Empreinte sur le fond} \cdot \text{Distance parcourue})}{\text{Surface de la cellule}} \quad [\text{Eq. A}] \quad (\text{Georges et al. 2021})$$

Avec $i = 1$ à n , les actions de pêche journalières dans la cellule
 $j = 1$ à 30 le SAR mensuel, ou $j = 1$ à 365 le SAR annuel

Pour cette étude, les SAR calculés dans le golfe du Lion entre 2012 et 2023 sur un maillage de $1^\circ \times 1^\circ$ à une fréquence annuelle et mensuelle, sont utilisés. Extraites sous forme de fichiers NETCDF, les données sont converties en rasters avec le package {terra} et cartographiées avec le package {tmap} sous le logiciel R.4.3.2

Nous différencions, dans l’analyse des résultats, “la côte à l’Ouest” correspondant à la côte de la région Occitanie, et “la côte à l’Est” correspondant à la côte de la région P·A·C·A.

II.3) Données de la communauté benthodémersale

Les données biologiques d’espèces benthiques et démersales utilisées dans cette étude proviennent des campagnes halieutiques MEDITS et GOLDYS conduites dans le golfe du Lion. Les données MEDITS sont prélevées depuis 1994 aux mêmes localisations chaque année entre mi-Mai et fin Juin selon un plan d’échantillonnage aléatoire. La campagne GOLDYS a quant à elle eu lieu entre 2022 et 2023 sur les saisons printemps, automne et hiver (**Certain et al. 2024; Vaz et al. 2023**) suivant le même protocole que les campagnes MEDITS. Les données MEDITS antérieures à 2012 ne sont pas considérées ici puisque les données d’abrasion ne sont pas disponibles pour cette période et que le recensement des espèces benthiques n’était alors pas obligatoire.

Parmi les 749 espèces capturées lors des différentes campagnes, une sélection sur la fréquence d’apparition a été réalisée afin de s’affranchir des espèces rares. Le nombre d’échantillons par espèce doit être assez élevé pour assurer un nombre de degrés de liberté suffisant lors de l’utilisation de modèles statistiques. Ainsi, seules les espèces présentes chaque année sur au moins 15 traits de chalut ont été conservées.

Pour caractériser la réponse des espèces à l'abrasion, deux métriques ont été calculées. Tout d'abord, la densité (en nombre d'individus par km²) a été obtenue en divisant le nombre d'individus de chaque espèce pêchée par la surface balayée par le trait de chalut. Ensuite, la biomasse (en grammes par km²) a été calculée en divisant la masse de chaque espèce capturée par la surface balayée par le trait de chalut. La tendance des métriques attendue pour les espèces non résistantes à l'abrasion est une diminution significative avec l'augmentation du SAR. Si cette tendance n'est pas observée, les espèces peuvent être considérées comme résistantes à l'abrasion et adaptées. Une augmentation de ces métriques en fonction de l'abrasion est également possible et concernerait plutôt les espèces opportunistes.

Enfin, les valeurs de SAR mensuelles et annuelles associées à chaque stations MEDITS et GOLDYS, ont été extraites. Les localisations de début et de fin du trait de chalut ont été utilisées pour reconstruire les trajectoires de pêche. La valeur d'abrasion associée à l'ensemble de la traine a été déduite grâce à une moyenne pondérée des valeurs de SAR au prorata de la distance parcourue dans chacune des cellules traversées. Les premières lignes du tableau ainsi créé sont présentées en annexe (Annexe 1).

II.4) Méthode d'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion

II.4.a) Calcul de l'abrasion totale exercée sur le golfe du Lion

Les données de SAR mensuelles ou annuelles sont renseignées pour chacune des cellules composant le golfe du Lion. Ainsi, en sommant toutes ces données nous pouvons obtenir l'abrasion totale exercée sur cette zone. L'étude de l'évolution de cette abrasion totale nous permettra d'expliquer les résultats de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion.

II.4.b) Calcul des différences relatives

Pour comparer le SAR exercée sur le golfe du Lion par les engins de pêche traînants avant et après la mise en place du plan WestMed, nous étudions la différence d'abrasion relative entre la période 2016-2019 et la période 2020-2023. Les données d'abrasion commencent en 2012 mais il est plus judicieux de comparer des périodes de mêmes durées entre elles. Nous cartographions alors les données de différence relative :

$$\text{Différence relative} = \frac{(\text{abrasion moyenne 2020-2023}) - (\text{abrasion moyenne 2016-2019})}{\text{abrasion moyenne 2016-2019}} \quad [\text{Eq. B}]$$

Ainsi, les données négatives (resp. positives) représentent les zones qui ont subi moins (resp. plus) de pression de pêche depuis la mise en place du plan WestMed. Les données représentant une différence relative, nous pouvons interpréter les résultats en pourcentage de diminution ou d'augmentation de l'abrasion par rapport à la période 2016-2019. Les valeurs comprises entre -0.1 et 0.1 sont considérées comme proches de 0 et sont interprétées comme une pression de pêche qui est restée inchangée depuis l'instauration des zones de fermeture.

II.4.c) Méthode d'analyse EOF

Pour mieux visualiser la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion dans le golfe du Lion, une analyse EOF (Empirical Orthogonal Function) est réalisée. Cette analyse est parfois appelée

« ACP spatialisée » et consiste à représenter les motifs spatiaux ayant une même variabilité temporelle. Pour la réaliser, les données sont arrangées sous forme d'une matrice, avec en lignes les périodes temporelles (ici années ou mois) et en colonne les localisations (ici les cellules de la grille) (**Hippert-Ferrer, Yan, et Bolon 2019**). La matrice de covariance est alors calculée à partir de cette matrice de données brutes, ou à partir des données d'anomalies (on soustrait la carte moyenne temporelle annuelle ou mensuelle sur la période 2012-2023 à chaque carte). La diagonalisation de la matrice de covariance permet d'avoir accès aux valeurs propres, aux vecteurs propres et ainsi aux composantes principales (Fig. 2). Une analyse sur les données brutes nous permet d'analyser l'évolution du taux d'abrasion sur la zone, tandis qu'une analyse sur les anomalies nous indique l'évolution du taux d'abrasion par rapport au patron moyen (**Lyons 1982**).

En ce qui concerne les informations fournies par ces différents résultats, tout d'abord, les valeurs propres indiquent le pourcentage de variance expliquée par chaque mode EOF. Elles sont classées par ordre décroissant, ainsi les premiers modes EOF sont ceux qui expliquent le plus de variance. Le nombre de modes EOF qui ne sont pas considérés comme du bruit sont sélectionnés à partir des graphiques des valeurs propres (Annexe 2), seuls les modes avant la cassure de la variance expliquée sont interprétés, d'après la règle empirique du coude (**Alglave et al. 2024**).

Ensuite, les vecteurs propres sont chacun associés à une valeur propre et montrent comment les motifs spatiaux oscillent dans le temps.

Enfin, le produit des composantes principales avec la matrice initiale utilisée indique les motifs spatiaux qui sont corrélés à la tendance décrite par le vecteur propre associé.

Lorsqu'on utilise les données brutes, les zones spatiales positivement corrélées (bleu) (resp. négativement corrélées (rouge)) suivent la tendance (resp. la tendance inverse) décrite par le vecteur propre associé.

Si ce sont les données d'anomalies qui sont utilisées pour l'analyse, la tendance temporelle (resp. l'inverse de la tendance) explique l'évolution des zones corrélées positivement (resp. négativement) par rapport au patron moyen (**Alglave et al. 2024**). Ainsi, lorsque la courbe est positive (resp. négative), les zones en bleu sont supérieures au patron moyen et celles en rouge sont inférieures (resp. les zones en bleu sont inférieures au patron moyen et celles en rouge sont supérieures). Lorsque la courbe change de signe et devient négative (resp. positive), cela signifie que l'effort devient plus intensément appliqué sur la zone rouge (resp. zone bleue). La valeur absolue de leur coefficient de corrélation indique l'importance de la corrélation avec le schéma temporel (**Hippert-Ferrer, Yan, et Bolon 2019**).

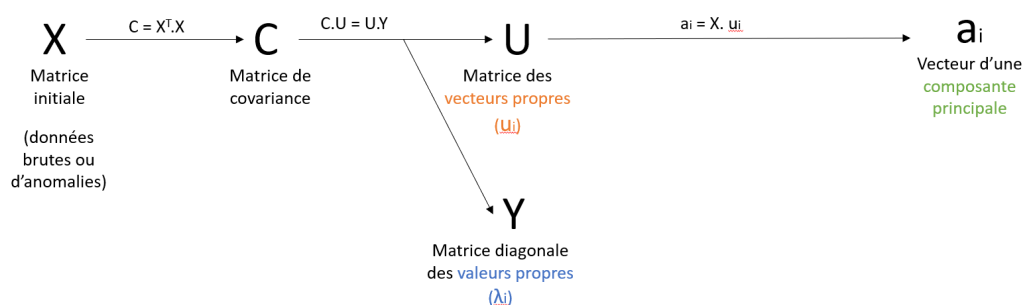


Fig. 2 : Méthode mathématiques pour l'analyse EOF.

Une analyse sur les données annuelles nous permet d'observer une tendance globale de l'évolution de l'abrasion depuis 2012. Ensuite nous avons réalisé l'analyse EOF sur les données mensuelles afin de visualiser les variations inter-annuelles de l'abrasion. L'analyse des données brutes ne nous renseigne qu'un seul mode EOF (carte des corrélations spatiales et composante principale associées à la première valeur propre) pour les données annuelles et mensuelles, et il

représente globalement le patron moyen. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux analyses sur les données d'anomalies.

II.5) Méthode d'analyse du lien entre l'abrasion et les métriques biotiques issues des campagnes en mer

II.5.a) Construction des co-variables abrasion

La variable abrasion représente l'abrasion qui a été exercée durant le mois à l'endroit du trait de chalut. Cependant, les espèces peuvent répondre à une abrasion appliquée depuis peu, mais également à une abrasion plus ancienne. Afin de représenter l'abrasion exercée sur les espèces dans un temps proche, moyen et lointain, nous calculons des nouvelles variables d'abrasion (Fig. 3). L'abrasion est alors représentée par 3 variables. La première variable représente l'abrasion exercée depuis peu de temps sur le territoire (Abrasion 1-3 mois), elle est la somme de l'abrasion appliquée à l'endroit du trait de chalut depuis 3 mois. La deuxième variable d'abrasion correspond à l'abrasion exercée 3 mois auparavant. Elle est calculée en sommant l'abrasion des mois présentés dans la Figure 3. Enfin, la dernière variable d'abrasion représente une abrasion exercée il y a plus longtemps, d'un an à 6 mois avant la capture des espèces. Elle est calculée en sommant les mois décrits par la Figure 3. L'intégration de cette période d'abrasion lointaine ne nous permet plus d'utiliser les données de campagnes de 2012 car les données d'abrasion de l'année précédente ne sont pas disponibles. Ainsi, notre jeu de données démarre en 2013. Nous intégrons alors ces variables au modèle et nous pouvons conclure, en plus de l'effet de l'abrasion, de la sensibilité à l'abrasion à plus ou moins long terme de chaque espèce.

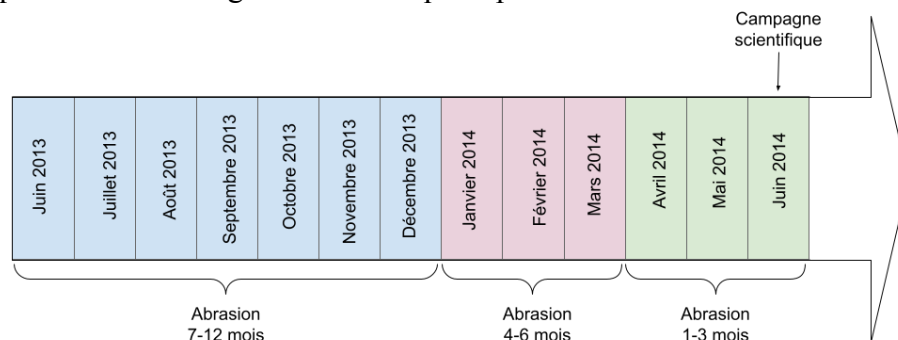


Fig. 3 : Exemple du calcul des variables d'abrasion dans le cas d'une capture des espèces en Juin 2014

II.5.b) Sélection des co-variables environnementales

Les réponses des métriques choisies peuvent être la conséquence d'autres variables, notamment l'habitat préférentiel de chaque espèce et les variations inter-annuelles reflétant potentiellement les bons recrutements. Il a donc été choisi d'utiliser les variables continues de profondeur et de longitude et la variable catégorique de l'année pour prendre en compte ces variations naturelles.

II.5.c) Calcul des corrélations entre les variables

Les corrélations entre les différentes variables sont calculées à l'aide de tests de Spearman réalisés avec le logiciel R 4.3.2. Ce test a été sélectionné et non pas Pearson, car il est plus adapté avec des données ayant une distribution des lois de probabilité non normale.

II.5.d) Méthode d'étude préliminaire de la réponse des métriques aux différentes abrasions

Afin de déterminer les différentes réponses possibles des métriques aux différentes variables d'abrasion, une étude préliminaire est réalisée. Cette analyse descriptive consiste à représenter graphiquement l'évolution des métriques en fonction du gradient d'abrasion. Les valeurs d'abrasion ont été arrondies à un chiffre après la virgule afin de regrouper les valeurs proches d'abrasion entre elles et ainsi créer des classes d'abrasion. Les valeurs des métriques de réponse sont représentées au moyen de boîtes à moustaches pour chaque classe rendant compte également de leur variabilité.

II.5.e) Construction des GAMs et sélection des modèles

Les relations entre les variables explicatives (abrasions, longueur, profondeur et année) et à expliquer (biomasse et densité) n'étant pas obligatoirement linéaires, c'est le modèle additif généralisé (GAM) qui a été sélectionné pour modéliser leurs liens. Ainsi, pour chacune des métriques et des espèces, le modèle GAM complet est composé des trois variables abrasion (Abrasion 1_3 mois, Abrasion 4_6 mois et Abrasion 7_12 mois), ce qui nous permettra d'observer si les espèces répondent à une abrasion appliquée depuis peu ou à celle appliquée il y a plus longtemps. Cependant, il faut confronter ces variables d'abrasion à des variables qui ont un impact potentiel fort sur les métriques, afin de voir si l'abrasion a réellement un effet ou si elle a peu d'effet par rapport aux autres variables environnementales (profondeur, longueur et année). Afin que les régressions ne soient pas trop influencées par les valeurs extrêmes, seules les données inférieures au 95^{ème} quartile ont été utilisées.

Les métriques contenant beaucoup de valeurs nulles, c'est la loi de distribution Tweedie qui a été utilisée (**Arcuti et al. 2013**) dans les modèles. Pour le calibrage des modèles GAMs, nous avons fait le choix d'utiliser un nombre de 3 nœuds afin d'avoir un modèle assez simple mais qui s'adapte bien aux données, les nœuds représentant la complexité du modèle.

Pour chacune des espèces, et chacune des métriques, des modèles GAMs sont créés avec toutes les combinaisons possibles de variables, soit 63 modèles. Pour chacun de ces modèles, le modèle correspondant à la plus petite valeur du critère d'information bayésien (BIC) est sélectionné. Comme nous nous intéressons à la réponse des espèces à l'abrasion, seules les espèces pour lesquelles au moins une variable abrasion est gardée dans le modèle final sont sélectionnées pour la suite. De plus, nous ne gardons que les modèles finaux qui expliquent plus de 10% de la variance totale, sinon nous considérons que nos variables n'expliquent pas nos métriques.

La sélection des modèles par leur valeur BIC présente une limite, les variables sélectionnées n'ont pas assurément un effet significatif sur la métrique. Ainsi, pour chaque espèce et chaque métrique, les variables non significatives sont supprimées de façon itérative afin de ne conserver que des variables significatives dans le modèle final. Les variables finales sélectionnées pour chaque espèce, ainsi que leur significativité et leur valeur F sont renseignées dans un tableau pour chacune des métriques. Ces dernières sont utilisées comme un proxy de l'influence relative des variables dans le modèle.

Dans le cadre de ce mémoire, la non-résistance des espèces est caractérisée par un effet significatif de l'abrasion sur la tendance négative des métriques. L'effet significatif des variables abrasion sur les métriques ne suffit donc pas, il faut regarder la tendance des métriques également.

Ainsi, pour chacune des espèces dont au moins une variable abrasion aurait un effet significatif, les tendances de ces variables sont visualisées.

II.5.f) Graphiques des tendances et variables présentées

Pour l'ensemble des espèces qui présentent un effet significatif d'une des variables abrasion sur la biomasse et/ou la densité, tous les graphiques des tendances des variables abrasion ne peuvent pas être présentés. Ainsi, seuls les graphiques ayant une réelle tendance de diminution ou augmentation seront montrés et analysés. Si les espèces présentent une réponse de plusieurs variables abrasion, seule la plus significative est présentée. Nous considérons la variable la plus significative celle ayant la valeur de F la plus élevée.

Nous serons amenés à comparer la contribution de chacune des variables (abrasions, profondeur, longitude et année) à l'aide de la valeur de F afin de déterminer si les variables abrasions sont celles qui expliquent le plus de variabilité de la métrique. Cependant, la variable année étant qualitative, aucune valeur de F ne lui est associée. La comparaison entre variables ne pourra donc pas prendre en compte la contribution de cette dernière variable. Nous comparerons tout de même la contribution des variables abrasion à celles de la profondeur et de la longitude.

II.6) Méthode de sélection des taxons indicateurs d'impact

Pour qu'une espèce soit un bon indicateur d'effet, il faut que sa biomasse ou sa densité soit fortement modifiée à partir d'une certaine valeur d'abrasion. Sa pente de réponse à l'abrasion doit être la plus élevée possible. Afin de pouvoir détecter différents niveaux d'impacts, nous choisirons des espèces qui sont sensibles à différents niveaux d'abrasion.

III – Résultats :

III.1) Dynamique spatio-temporelle de l'abrasion exercée dans le golfe du Lion

III.1.a) Etude préliminaire des patrons généraux de l'abrasion dans le golfe du Lion

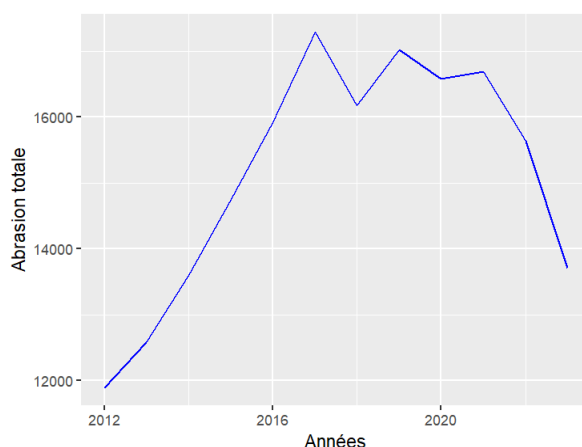


Fig. 4 : Graphique de l'évolution de l'abrasion totale exercée sur le golfe du Lion.

Grâce au calcul du SAR dans chaque cellule du golfe du Lion, nous pouvons retracer l'abrasion totale exercée dans cette zone depuis 2012. L'effort de pêche des engins de fond traînants était en constante augmentation de 2012 à 2017. De 2017 à 2020 nous observons une stagnation de l'abrasion totale exercée. Enfin, depuis la mise en place du plan WestMed en Janvier 2020, nous

observons une diminution de l'abrasion totale appliquée sur cette zone (Fig. 4). En 2023, une pression de pêche équivalente à celle de 2014 est retrouvée et devrait continuer de diminuer.

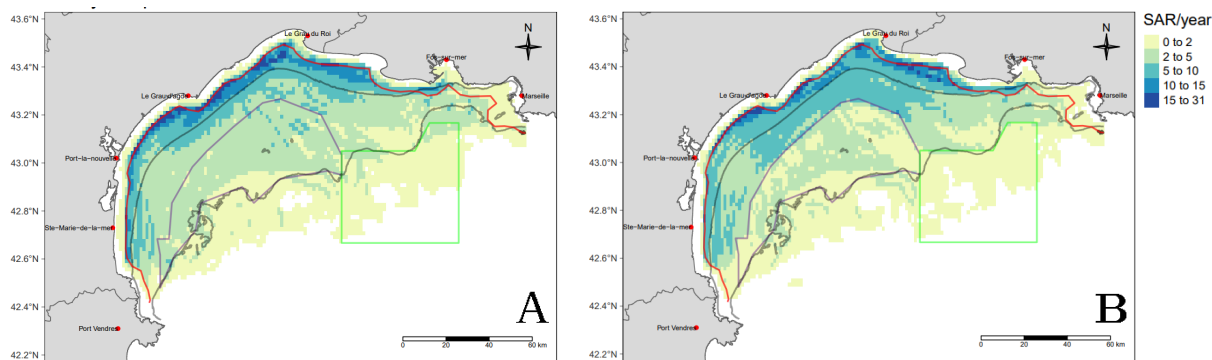


Fig. 5 : Cartes de l'abrasion annuelle moyenne sur la période (A) 2016-2019 et (B) 2020-2023. La ligne des 3 milles nautiques est colorée en rouge, l'isobathe des 50 m et 100 m en gris et les deux zones de fermeture, zone bathymétrique à gauche et zone box-PACA à droite, respectivement en violet et vert.

La comparaison de l'abrasion annuelle moyenne exercée avant le plan WestMed (Fig. 5A) et après (Fig. 5B) nous informe qu'il y a eu une modification de la répartition de l'effort de pêche suite à l'introduction des zones de fermetures à la pêche, en plus de la réduction globale de cet effort. Nous observons notamment que l'effort est réparti de façon plus homogène depuis 2020. L'abrasion intense appliquée le long de la ligne des 3 milles nautiques avant 2020 s'est atténuée et semble s'être déplacée sur la zone intermédiaire, entre la côte et la zone bathymétrique.

L'analyse des différences relatives (Fig. 6) nous permet de visualiser plus finement les modifications de la répartition spatiale de l'abrasion avant et après la mise en place du plan WestMed, mais également de la quantifier. Nous observons tout d'abord une diminution de l'abrasion, suite à la mise en place de la zone de fermeture, dans les zones en rouge. Les zones ayant subies les plus fortes diminutions sont la côte à l'Ouest, la côte aux alentours de Marseille, ainsi qu'à l'intérieur des zones de fermeture. Pour ces trois dernières zones, l'effort avant 2020 étant relativement faible, nous avons toujours un effort sur ces zones qui reste faible. En revanche, la baisse de l'effort de pêche le long de la côte à l'Ouest s'applique sur une zone qui subissait une abrasion très importante. Les zones en bleu témoignent du report (augmentation) de l'abrasion sur le territoire. Nous observons notamment un comportement d'intensification de l'effort de pêche aux limites de la zone bathymétrique, mais également le long de la côte à l'Est, entre le Grau du Roi et Fos-sur-mer. L'augmentation de l'abrasion le long de cette côte est d'autant plus importante, que l'abrasion était déjà élevée avant 2020.

Cette modification de la répartition spatiale de l'abrasion annuelle depuis la mise en place des zones de fermeture résume la conséquence des modifications des pratiques de pêche durant les différents mois de l'année. Ces modifications pouvant dépendre des mois, une analyse de chacun des mois est réalisée par la suite.

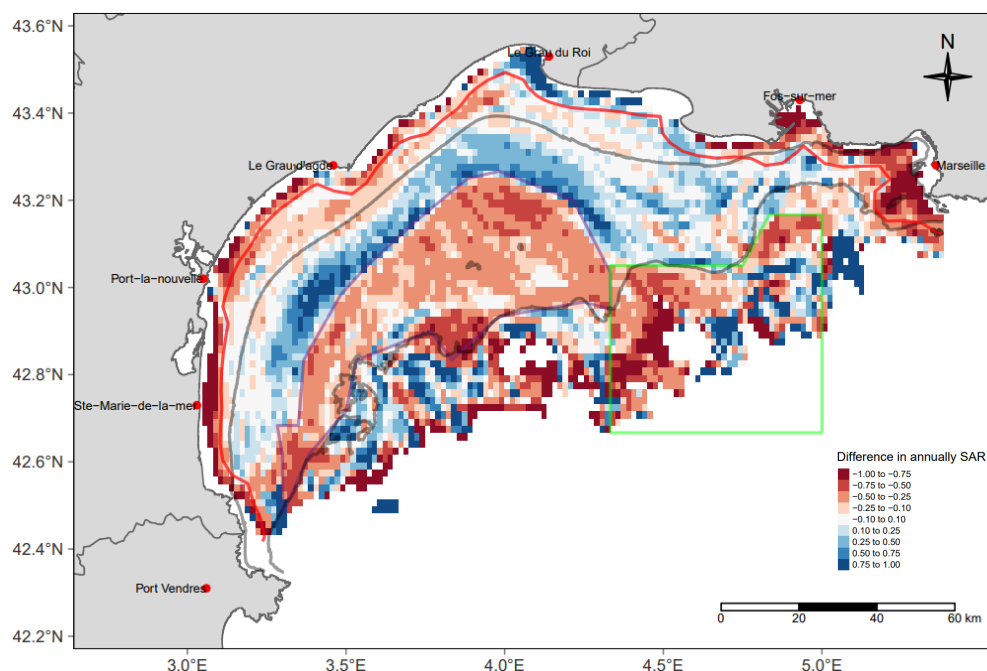


Fig. 6 : Carte de la différence relative d'abrasion annuelle moyenne entre la période 2016-2019 et 2020-2023. La ligne des 3 milles nautiques est colorée en rouge, l'isobathe des 50 m et 100 m en gris et les deux zones de fermeture, zone bathymétrique à gauche et zone box-PACA à droite, respectivement en violet et vert.

L'analyse mensuelle (Fig. 7) nous permet de nous rendre compte de l'utilisation intra-annuelle du golfe du Lion par les pêcheurs. Nous observons très nettement les périodes de fermeture de la zone bathymétrique (de Janvier à Avril et de Septembre à Décembre) avec une zone rouge foncée qui révèle une forte diminution de l'abrasion sur cette période. Cette diminution est également observée pour la zone box PACA, dont l'abrasion exercée a fortement diminué depuis 2020 sur les mois de fermeture (de Janvier à Avril et de Novembre à Décembre). Lors des périodes de fermeture des zones, nous observons que l'effort est également diminué à la côte. L'abrasion est reportée autour de la zone bathymétrique, et plus globalement dans la zone intermédiaire, entre la côte et les zones de fermeture.

III.1.b) Analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion par EOF

Afin d'observer plus finement la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion dans le golfe du Lion, une analyse EOF sur les données annuelles est réalisée afin d'identifier les zones ayant subies les mêmes évolutions de l'abrasion à l'échelle inter-annuelle. Par la suite, une analyse sur les données mensuelles a été réalisée pour rendre compte des variations intra-annuelles de l'abrasion.

Une analyse EOF a tout d'abord été réalisée sur les données annuelles brutes et les résultats sont disponibles en annexe (Annexe 3). L'analyse sur les données brutes permet de distinguer le patron d'abrasion moyen de la zone. Ainsi, une seule composante principale de l'EOF explique la quasi-totalité de la variance. Pour obtenir plus d'informations sur les données, nous nous affranchissons du patron moyen en le soustrayant de nos données et nous réalisons les analyses EOF sur les données annuelles d'anomalies. Cette manipulation des données modifie l'interprétation des résultats. En effet, ils rendent compte de l'évolution des zones par rapport au patron moyen.

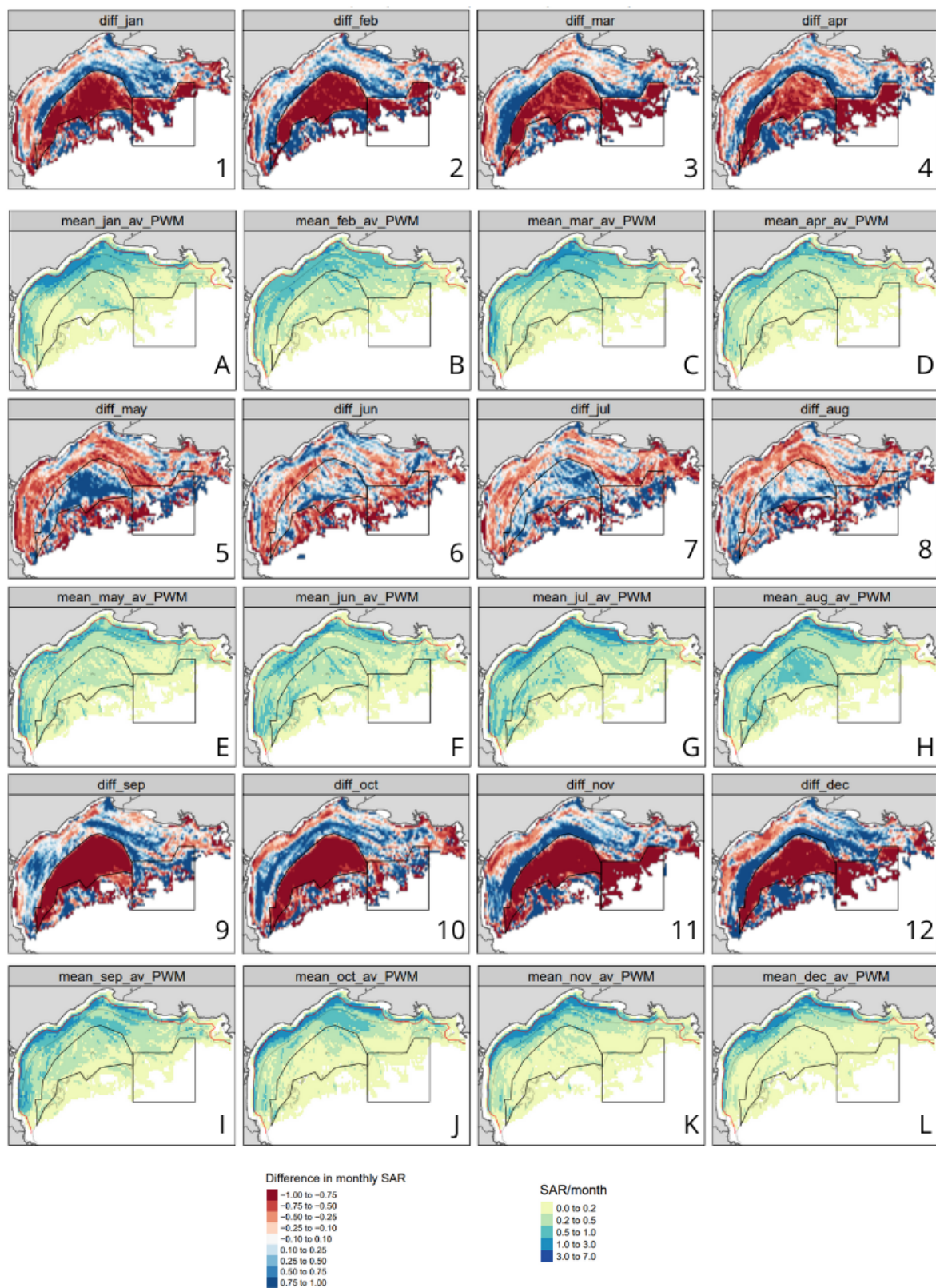


Fig. 7 : Cartes mensuelles de différence relative d'abrasion moyenne entre la période 2016-2019 et 2020-2023 (cartes 1 à 12). Cartes de l'abrasion moyenne sur la période 2016-2019 (cartes A à L).

Le premier mode EOF, qui rassemble les corrélations spatiales et la composante principale associés à la première valeur propre, est celui qui explique le plus de variabilité des données (34.6%). Ce premier mode nous indique qu'avant 2017 l'abrasion exercée sur les zones en rouge, donc plutôt côtières, était supérieure au patron moyen (carte de l'abrasion annuelle exercée sur cette zone sur la période 2012-2023) (Fig. 8A et 8B). Alors que depuis 2017, c'est sur la zone en bleu que l'abrasion est devenue supérieure au patron moyen. Cependant, cette différence au patron moyen semble stagner depuis 2020, voir tend à diminuer. Ainsi, l'abrasion qui était très côtière, s'est déplacée plus au large depuis 2017 mais semble stagner en intensité depuis la mise en place du plan WestMed.

Le second mode EOF explique 22.5% de la variance des données et différencie 3 zones : la zone côtière, la zone intermédiaire et la zone bathymétrique (Fig. 8C et 8D). Il nous informe qu'avant 2015, l'abrasion était supérieure au patron moyen dans les zones en rouge. De 2015 à 2017 l'abrasion n'a cessé d'augmenter dans les zones en bleu par rapport au patron moyen, jusqu'à atteindre un pic en 2017. Depuis 2017 cette différence avec le patron moyen a diminué jusqu'à être devenue inférieure depuis 2020, tandis que l'abrasion est devenue supérieure au patron moyen dans les zones en rouge depuis 2020.

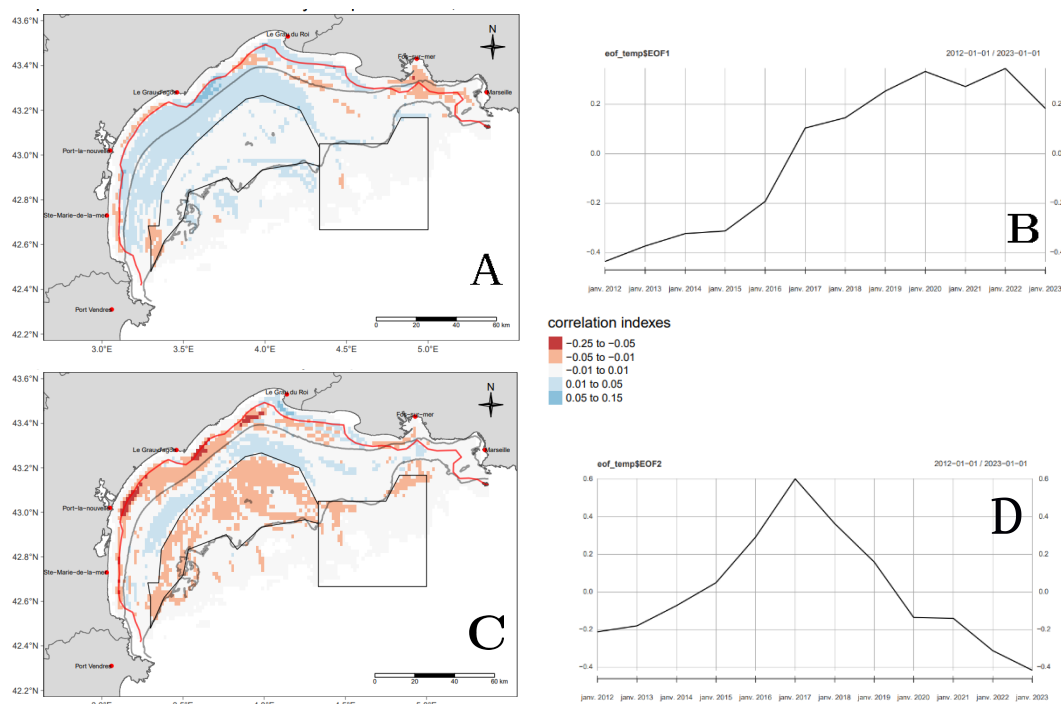


Fig. 8 : Résultats de l'analyse EOF sur les données d'anomalies annuelles. Carte des corrélations spatiales (A) et graphique de la tendance de la composante principale (B) associées à la première valeur propre ($\lambda_1 / \sum \lambda = 34.6\%$). Carte des corrélations spatiales (C) et graphique de la tendance de la composante principale (D) associés à la deuxième valeur propre ($\lambda_2 / \sum \lambda = 22.5\%$).

Ainsi, nous avons une abrasion annuelle qui s'est décalée plus au large et qui tend à stagner dans cette zone depuis la mise en place du plan de gestion WestMed.

Une analyse EOF est ensuite réalisée sur les données mensuelles d'anomalies. Les résultats sur les données brutes sont disponibles en annexe (Annexe 4).

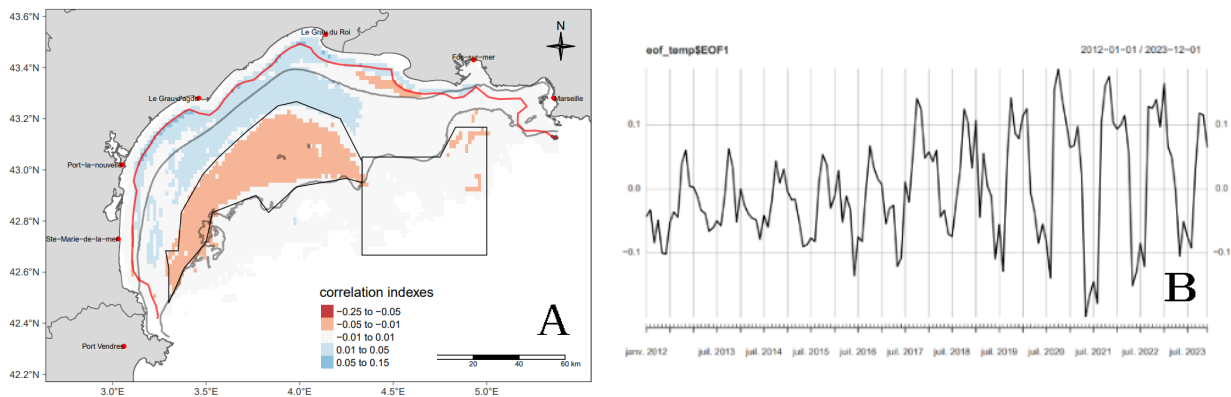


Fig. 9 : Résultats de l’analyse EOF sur les données d’anomalies mensuelles. Carte des corrélations spatiales (A) et graphique de la tendance de la composante principale (B) associées à la première valeur propre ($\lambda_1 / \sum \lambda = 15.3\%$).

L’analyse EOF sur les données d’anomalies mensuelles nous permet d’observer l’évolution de l’abrasion mensuelle par rapport au patron mensuel moyen. Le premier mode EOF nous informe sur l’évolution de l’amplitude de l’abrasion (Fig. 9A et 9B) avec la zone bleue qui est positivement corrélée à la tendance temporelle et la zone rouge qui est inversement corrélée à elle. Nous observons que l’amplitude des variations temporelles était constante jusqu’en 2016, puis n’a cessé d’augmenter jusqu’en 2020 et commence à diminuer depuis 2022 (Fig. 9B). L’inversion dans la saisonnalité de la pêche entre la zone bleue et la zone rouge nous indique le comportement pendulaire des chaluts de fond dans le golfe de Gascogne entre la zone bathymétrique et la zone côtière et intermédiaire. Cette tendance était déjà visible avant la mise en place des zones de fermeture.

III.2) Analyse de la réponse de la communauté benthodémersale à l’abrasion

III.2.a) Tests des corrélations des données

Bien qu’elles ne portent pas sur les mêmes périodes d’intégration temporelle, une forte corrélation existe entre les 3 variables d’abrasion ($> |0.7|$) (Tableau I)

On observe également une corrélation très importante entre les variables d’abrasion et la profondeur ($> |0.72|$).

Tableau I : Coefficients des corrélations entre les différentes variables quantitatives (tests de Spearman) pour les données depuis 2013.

	<i>Abrasion 4_6 mois</i>	<i>p-value</i>	<i>Abrasion 7_12_mois</i>	<i>p-value</i>	<i>Profondeur</i>	<i>p-value</i>
<i>Abrasion 1_3 mois</i>	0.71	$<10^{-6}$	0.79	$<10^{-6}$	0.72	$<10^{-6}$
<i>Abrasion 4_6 mois</i>	/	/	0.75	$<10^{-6}$	0.75	$<10^{-6}$
<i>Abrasion 7_12_mois</i>	/	/	/	/	0.79	$<10^{-6}$

III.2.b) Etude préliminaire de la réponse des communautés benthodémersales à l'abrasion

Suite à l'application des filtres décrits précédemment, 74 espèces (2 espèces de poissons cartilagineux, 52 poissons osseux, 9 invertébrés benthiques et 11 céphalopodes) ont été retenues. Une étude préliminaire à l'aide de statistiques descriptives (moyenne, écart type) a été menée afin d'étudier la forme de la réponse des espèces le long d'un gradient d'abrasion. Ces résultats nous indiquent que plusieurs réponses à l'abrasion sont possibles en fonction des espèces.

Certaines espèces comme *Astropecten irregularis pentacanthus* (Fig. 10) semblent bénéficier d'une abrasion élevée. En effet, il semblerait que la biomasse augmente avec l'augmentation de l'abrasion. D'autres espèces comme le merlu (*Merluccius merluccius*) (Fig. 11) ne semblent pas répondre au gradient d'abrasion et ont leurs métriques qui restent constantes. Enfin, des espèces comme *Lepidotrigla cavillone* (Gondin cavillone, Fig. 12) semblent être affectées par l'augmentation de l'abrasion puisque la biomasse diminue fortement avec l'augmentation de l'abrasion.

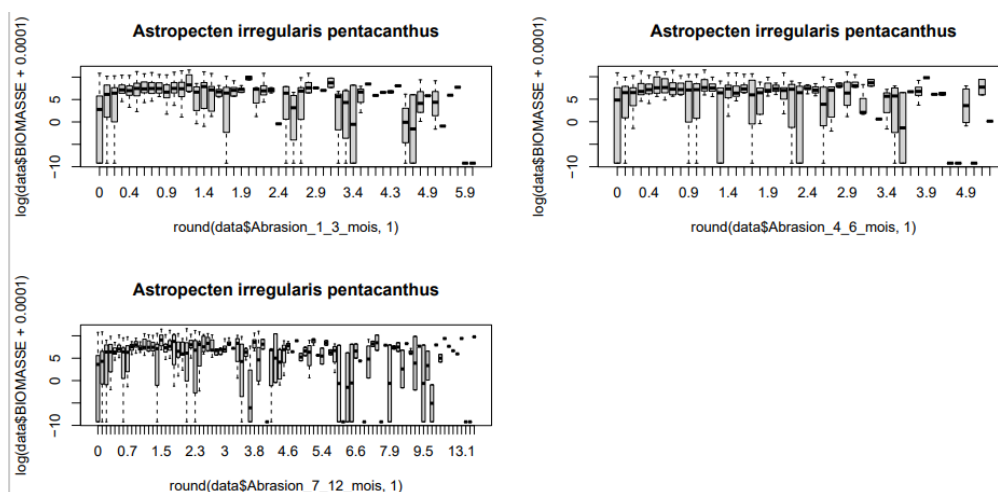


Fig. 10 : Réponse de la biomasse aux variables Abrasion 1_3 mois (A), Abrasion 4_6 mois (B) et Abrasion 7_12 mois (C) de *Astropecten irregularis pentacanthus*.

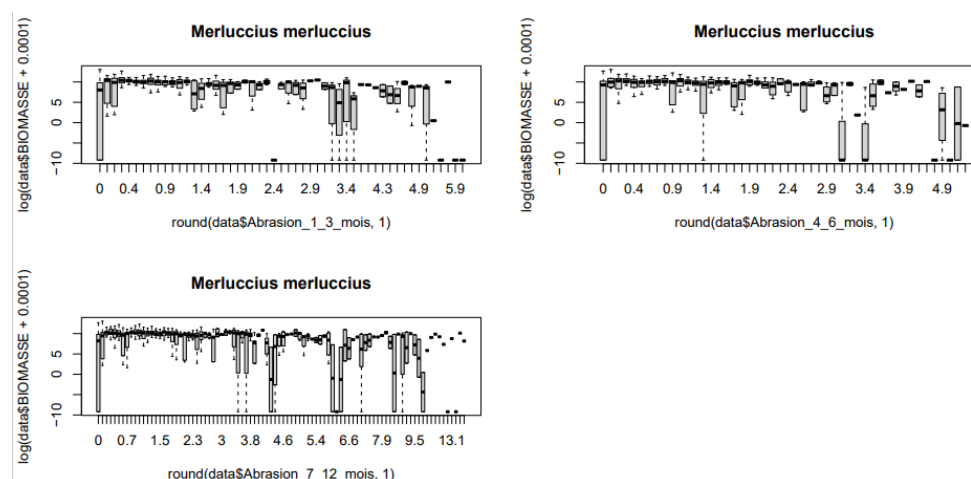


Fig. 11 : Réponse de la biomasse aux variables Abrasion 1_3 mois (A), Abrasion 4_6 mois (B) et Abrasion 7_12 mois (C) de *Merluccius merluccius*.

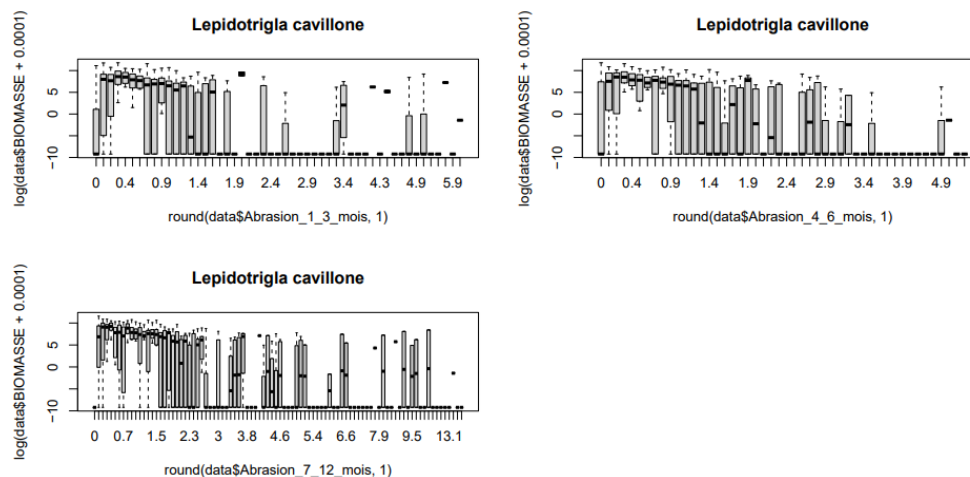


Fig. 12 : Réponse de la biomasse aux variables Abrasion 1_3 mois (A), Abrasion 4_6 mois (B) et Abrasion 7_12 mois (C) de *Lepidotrigla cavillone*.

III.2.c) Modélisation des réponses

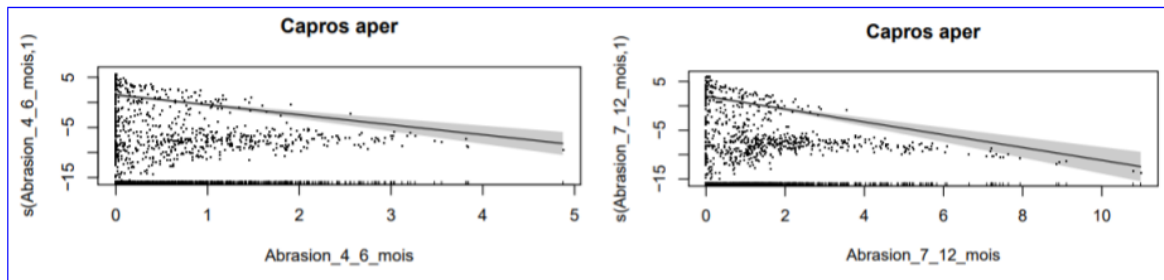
Parmi les 74 espèces testées, 37 espèces ont au moins une variable abrasion qui explique significativement la tendance de la biomasse et 34 pour la densité. L'ensemble des espèces répondant à au moins l'une des métriques sont présentées en annexe 5.

Selon la métrique réponse considérée (biomasse, densité), les variables sélectionnées dans les GAM finaux, sont pour certaines espèces différentes et pour d'autres, similaires.

L'espèce *Capros aper* (sanglier) illustre un exemple où les variables abrasion sélectionnées pour expliquer la variabilité de la biomasse et de la densité sont les mêmes (Fig. 13). Ce poisson sanglier, par ailleurs fortement structuré par la profondeur et la longueur, présente de fortes diminutions des métriques avec l'augmentation de l'abrasion. La sélection des variables Abrasion 4_6 mois et 7_12 mois nous indique que l'abrasion subie à moyen et long terme explique l'évolution des métriques, alors que l'abrasion subie à court terme n'a pas été retenue. Nous retrouvons pour l'ensemble des espèces, une sélection dans 19 cas sur 38 (50%) de la variable Abrasion 7_12 et 18 (47%) de l'Abrasion 4_6 mois, contre 11 (29%) pour Abrasion 1_3 mois avec l'étude de la biomasse (Tableau 2). En ce qui concerne la proportion des variables abrasion sélectionnées pour l'étude de la densité, 18 cas sur 34 (52%) sélectionnent l'Abrasion 7_12 mois, 13 (38%) l'Abrasion 4_6 mois et 10 (29%) l'Abrasion 1_3 mois (Tableau 3).

L'espèce *Dardanus arrosor* (grand bernard l'ermite) montre un exemple où des variables d'abrasion différentes expliquent l'évolution de sa biomasse (Abrasion 7_12 mois) et l'évolution de sa densité (Abrasion 1_3 mois). Ce décapode voit sa biomasse augmenter lorsque l'abrasion 7_12 mois augmente. La tendance de sa densité n'est quant à elle pas très claire car le gradient d'abrasion observé sur cette période est plus faible. Dans tous les cas, les variables environnementales explicatives contribuent fortement au modèle retenu.

BIOMASSE



DENSITE

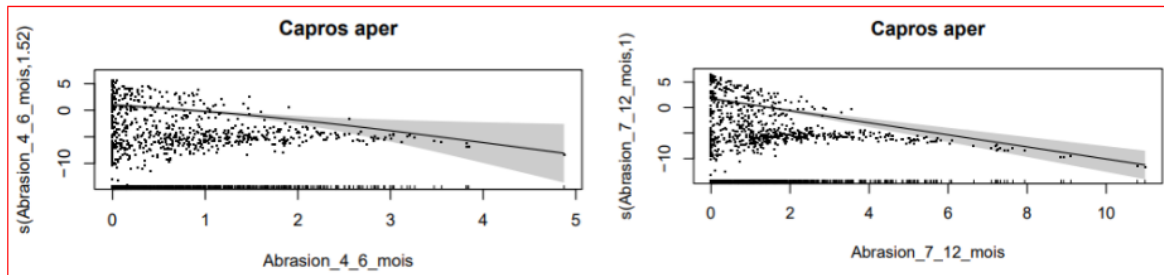
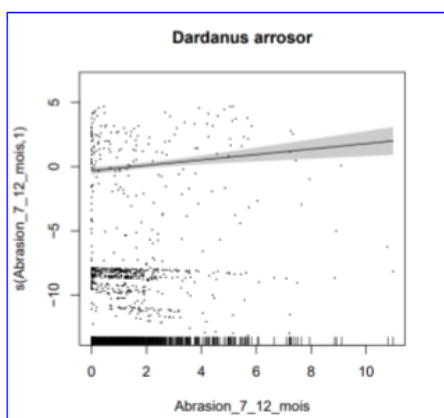


Fig. 13: Graphiques des tendances des variables abrasion sélectionnées dans le modèle final de l'espèce *Capros aper* pour les métriques biomasse (bleu) et densité (rouge).

BIOMASSE



DENSITE

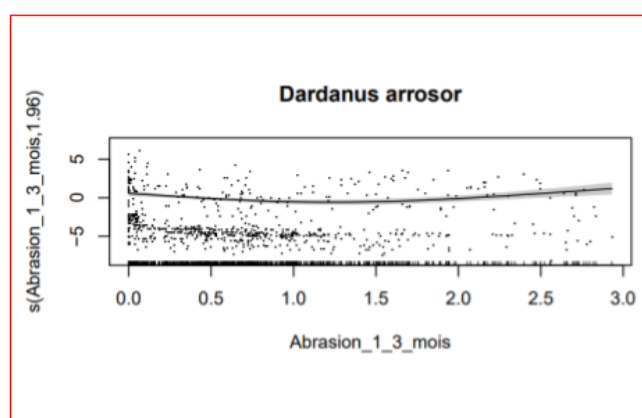


Fig. 14: Graphiques des tendances des variables abrasion sélectionnées dans le modèle final de l'espèce *Dardanus arrosor* pour les métriques biomasse (bleu) et densité (rouge).

La relation entre les métriques et les variables abrasion n'étant pas forcément linéaires, certaines tendances ne sont pas interprétables en tant que diminution de la métrique ou augmentation. Dans le cas de la biomasse, cela représente 45% des relations testées contre 46% pour la densité. Parmi les résultats interprétables, une réponse par une diminution de la biomasse représente 85% des cas et une augmentation 15% des cas. En ce qui concerne la densité, une tendance de diminution de la métrique est observable dans 86% des cas interprétables, et une augmentation dans 14%.

La réponse des espèces à l'abrasion dépend de leur cycle et mode de vie (**Juan, Thrush, et Demestre 2007**), il est donc judicieux de regarder les réponses des espèces en les regroupant par groupe taxonomique (poissons osseux, poissons cartilagineux, invertébrés benthiques et céphalopodes) et ordre. Les groupes taxonomiques et ordres de toutes les espèces sont présentés

dans l'annexe 5. Parmi les différents groupes taxonomiques, nous remarquons qu'un quart des céphalopodes seulement semble répondre à l'abrasion, contre la moitié des invertébrés et des poissons osseux et la totalité des poissons cartilagineux (Tableau II).

Tableau II : Nombre total d'espèces étudiées (Total), Nombre d'espèces pour lesquelles au moins une variable abrasion est significative (Retenu) et proportion des groupes taxonomiques qui répondent à l'abrasion (%).

Groupe	Total	Retenu	%
Céphalopodes	11	3	27%
Invertébrés benthiques	8	4	50%
Poissons osseux	53	29	54%
Poissons cartilagineux	2	2	100%

Pour la représentation des tendances des quelques espèces qui suivent, en cas de sélection de plusieurs variables d'abrasion par une même espèce, seule la variable la plus significative est représentée et analysée.

1) Céphalopodes

Toutes les espèces de céphalopodes qui répondent à l'abrasion sont représentées dans la figure 15. Pour une même espèce, nous pouvons observer que l'effet de la variable abrasion sur les métriques est le même (augmentation ou diminution) pour les deux métriques de densité et biomasse. Les métriques de l'espèce *Eledone moschata* (élédone mouchetée) sont influencées de façon positive par l'abrasion. La biomasse et la densité augmentent avec l'augmentation de l'abrasion. Au contraire, les espèces *Rhombosipion orbignyana* (seiche rose) et *Todaropsis eblanae* (toutenon souffleur) sont impactées de façon négative par l'abrasion. Alors que pour l'élédone mouchetée, la profondeur explique une plus grande part de la variabilité, pour la seiche rose et le toutenon souffleur c'est l'abrasion qui explique la plus grande part de variabilité du jeu de données pour expliquer la tendance de la biomasse (Annexe 6). En ce qui concerne la tendance des densités, elle n'est pas expliquée principalement par l'abrasion (Annexe 7).

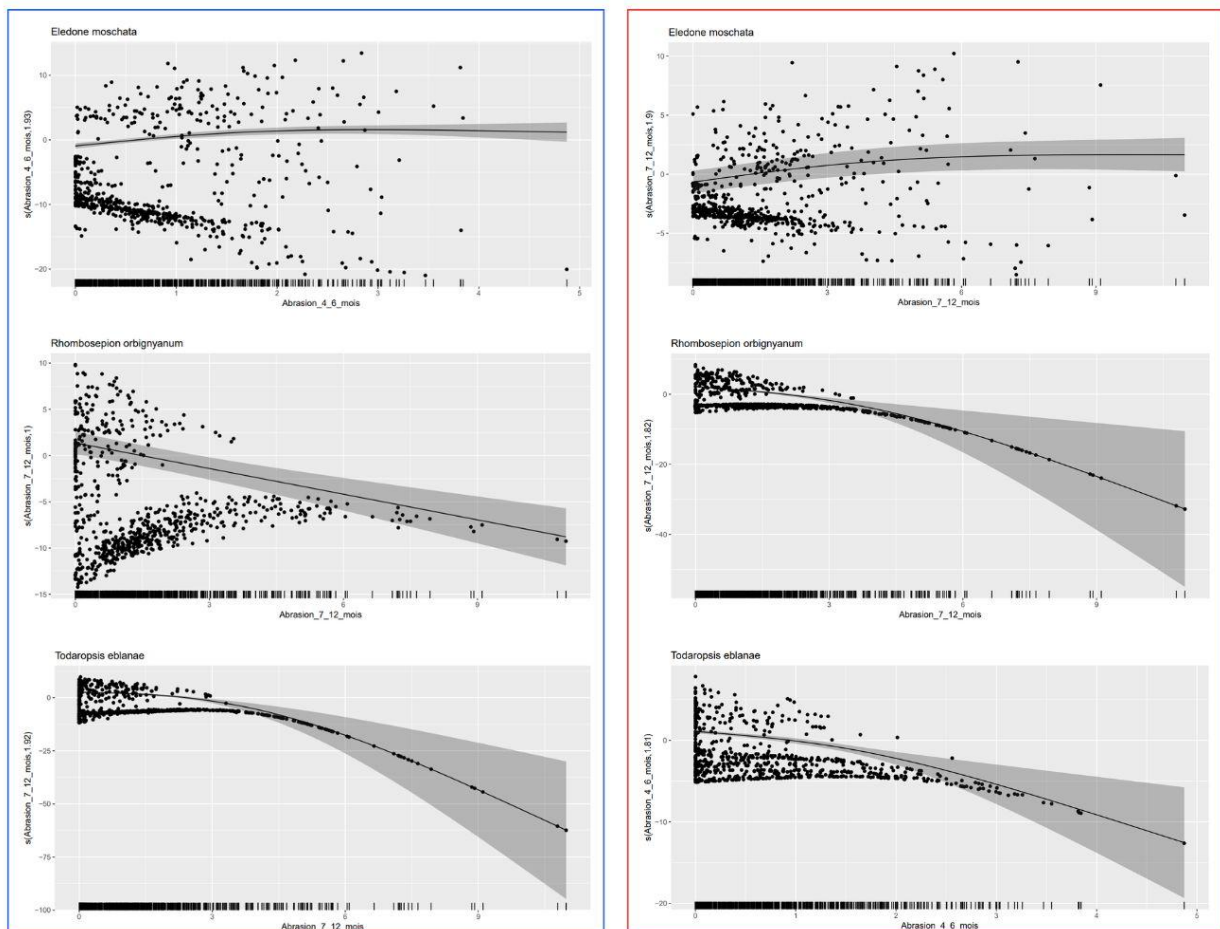


Fig. 15 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour les trois espèces de céphalopodes, dans l'ordre, *Eledone moschata*, *Rhombosepion orbignyianum* et *Todaropsis eblanae*.

2) Invertébrés benthiques

Les graphiques de l'effet des variables abrasion sur les métriques de biomasse et de densité pour trois espèces benthiques sur les quatre, sont présentés dans la figure 16. La réponse du grand bernard l'ermite à l'abrasion a déjà été présentée plus haut. Pour l'espèce *Nephrops norvegicus* (langoustine) les deux métriques répondent de la même façon, par un maintien jusqu'à des valeurs d'abrasion intermédiaires puis d'une diminution. Pour la dernière espèce, *Parapenaeus longirostris* (crevette rose du large) la réponse est négative à partir d'un certain seuil d'abrasion. Pour cette dernière espèce, c'est la variable abrasion qui explique la plus importante part de variabilité, alors que pour les autres ce sont d'autres variables (Annexes 6 et 7).

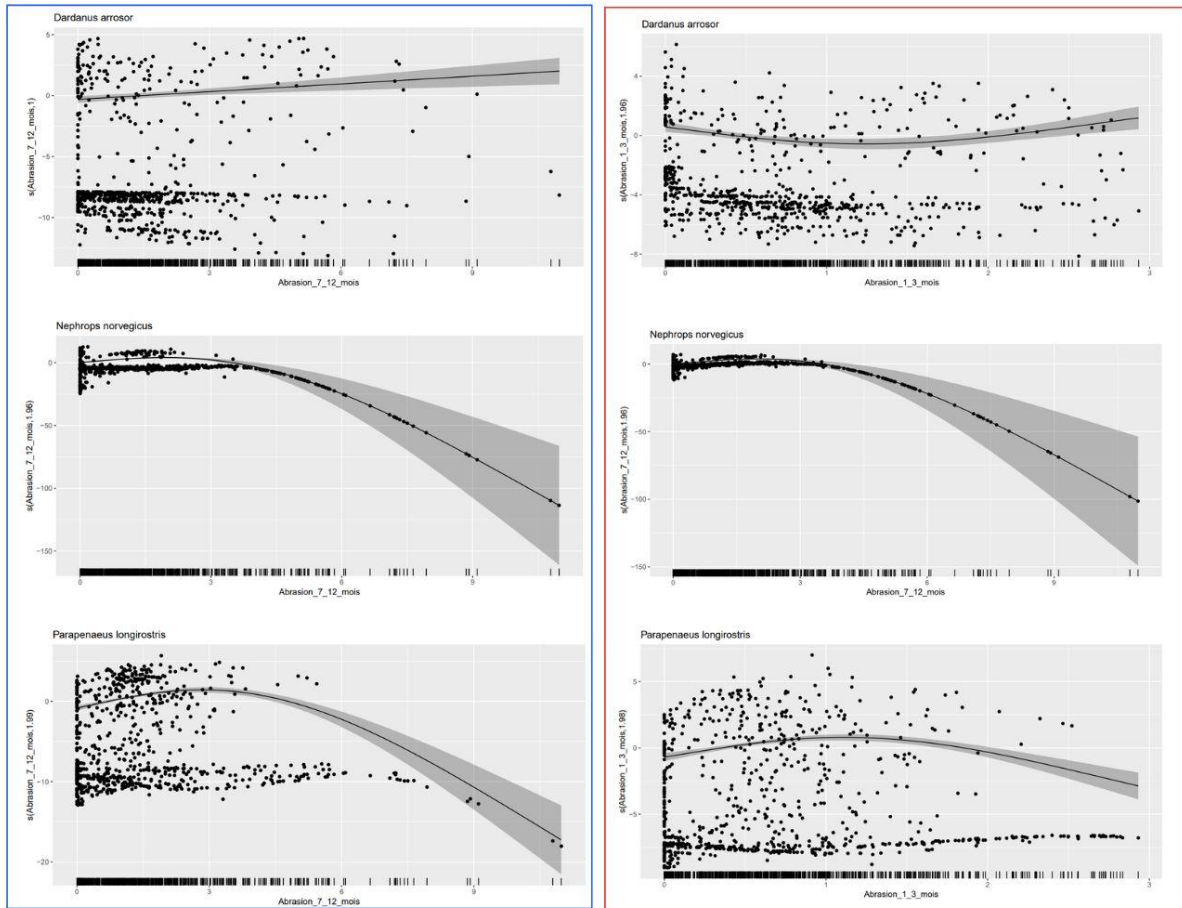


Fig. 16 : Graphiques des tendances des variables d’abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour trois espèces d’invertébrés benthiques, dans l’ordre, *Dardanus arrosor*, *Nephrops norvegicus* et *Parapenaeus longirostris*.

3) Poissons cartilagineux

Les graphiques de réponse des métriques aux variables d’abrasion pour l’ensemble des espèces de poissons cartilagineux sont présentés par la figure 17. Contrairement à l’espèce *Raja clavata* (raie bouclée), les réponses des métriques de *Scyliorhinus canicula* (petite roussette) sont claires : l’augmentation de l’abrasion fait chuter sa biomasse et sa densité. Alors que pour la raie, la biomasse semble être impactée négativement par l’augmentation de l’abrasion mais la réponse de la densité est indéterminée. Pour ces deux espèces, ce sont les variables abrasion qui expliquent la plus grande part de variabilité de la biomasse (Annexe 6). En revanche, pour la densité seule la petite roussette possède une variable abrasion qui explique la plus importante part de variabilité (Annexe 7).

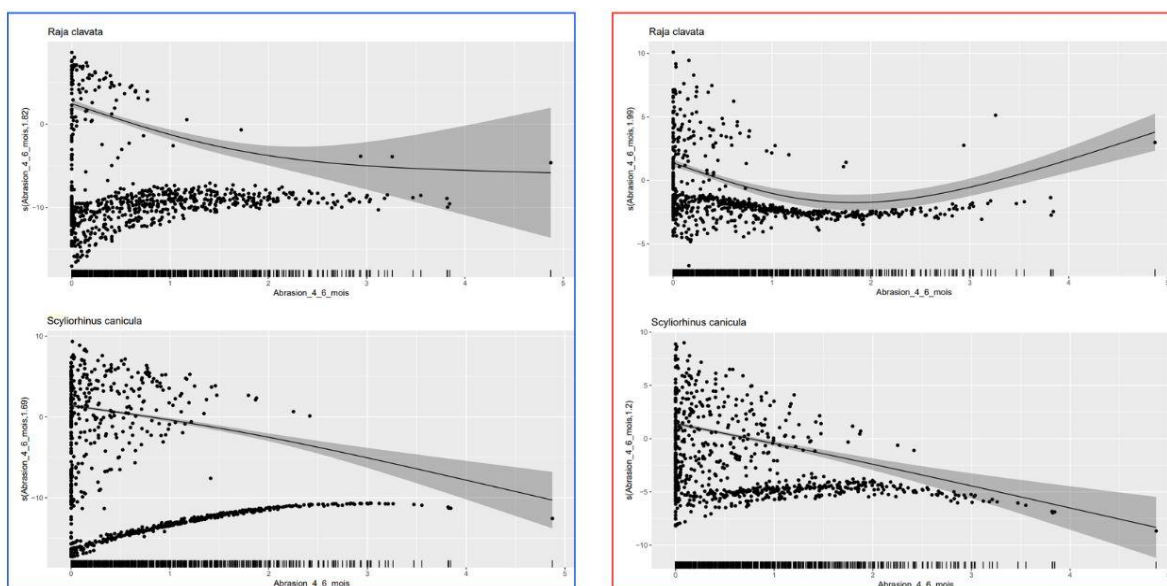


Fig. 17 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour les deux espèces de poissons cartilagineux, dans l'ordre, *Raja clavata* et *Scyliorhinus canicula*.

4) Poissons osseux

Le nombre d'espèces de poissons osseux qui répondent à l'abrasion est très important (29 espèces). L'ensemble des réponses n'est pas présenté mais les graphiques de quelques espèces pour chacun des ordres taxonomiques les plus représentés (Perciformes, Eupercaria incertae sedis, Pleuronectiformes et Gadiformes) sont montrés.

a) Perciformes (dont grondins...)

L'ordre taxonomique Perciformes est celui qui contient le plus d'espèces qui répondent à l'abrasion. Parmi les réponses des espèces, seules deux ont une réponse négative évidente. Leurs réponses sont présentées par la figure 18. Pour ces deux espèces de grondins, *Chelidonichthys cuculus* (grondin rouge) et *Lepidotrigla dieuzeidei* (grondin de Dieuzeide), l'augmentation de l'abrasion a des effets négatifs sur l'évolution des métriques de biomasse et de densité. Pour ces deux espèces, les variables d'abrasion sont les variables qui contribuent le plus pour expliquer les tendances des biomasses et densités (Annexes 6 et 7).

b) Eupercaria incertae sedis (dont labres et dorades,...)

En ce qui concerne l'ordre taxonomique Eupercaria incertae sedis, les réponses des métriques à l'abrasion sont présentées par la figure 19. Les réponses de l'espèce *Spicara flexuosa* (mendole commune) sont plutôt négatives. La réponse de la densité est plus nette que celle de la biomasse. Tandis que pour l'espèce *Pagellus bogaraveo* (dorade rose) nous observons une réponse différente des métriques biomasse et densité. Alors que la densité diminue lorsque l'abrasion augmente, la biomasse semble quant à elle augmenter. Dans les modèles de ces deux espèces, les variables abrasion ne sont pas celles qui contribuent le plus pour expliquer la tendance des métriques de biomasse et densité (Annexes 6 et 7).

c) Pleuronectiformes (poissons plats)

Pour les espèces Pleuronectiformes, seuls les graphiques d'une espèce sont présentés car toutes les autres espèces ne présentaient pas des réponses assez nettes pour être interprétées. Pour l'espèce *Lepidorhombus boscii* (cardine à quatre taches) la réponse des métriques biomasse et

densité sont négatives à l'abrasion. Cependant, les variables abrasion n'expliquent pas le plus de variabilité dans les modèles pour la biomasse ou la densité (Annexes 6 et 7).

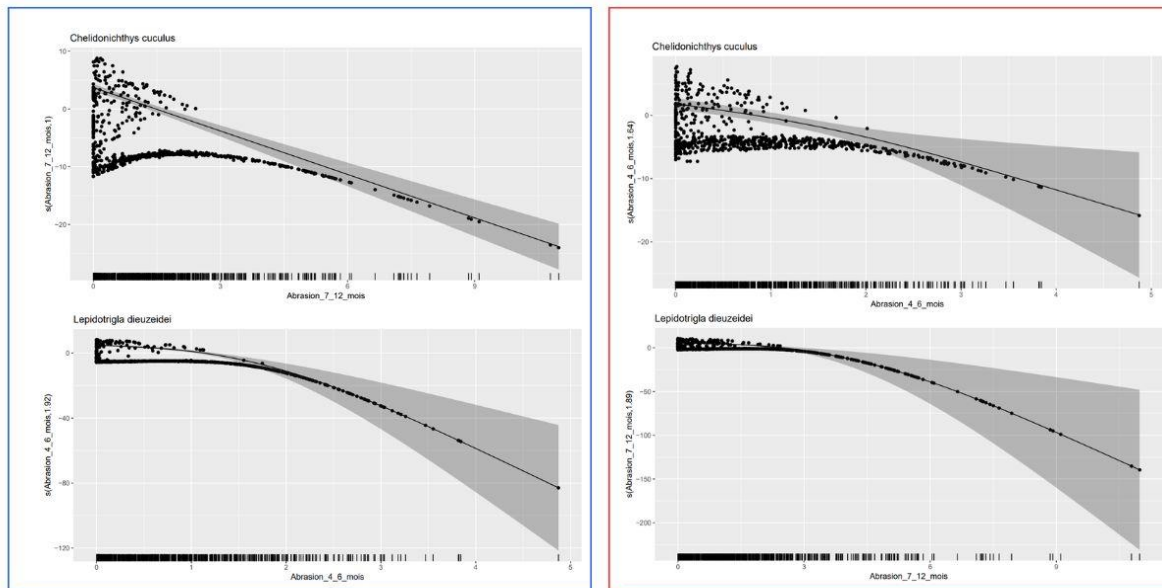


Fig. 18 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour deux espèces de poissons osseux de l'ordre taxonomique des perciformes, *Chelidonichthys cuculus* et *Lepidotrigla dieuzeidei*.

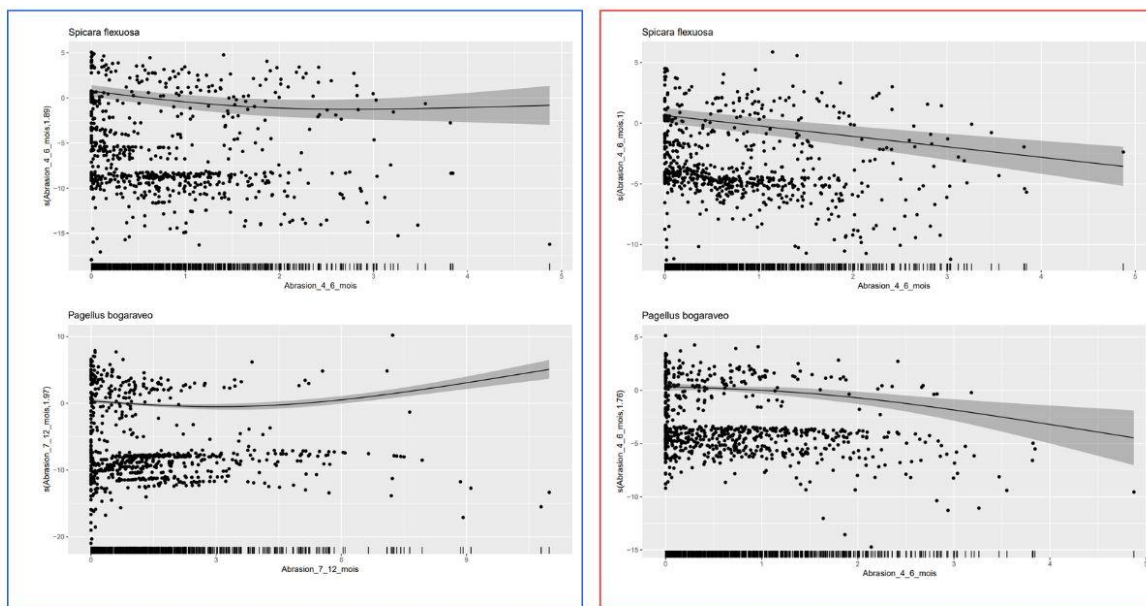


Fig. 19 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour deux espèces de poissons osseux de l'ordre taxonomique des Eupercaria incertae sedis, *Spicara flexuosa* et *Pagellus bogaraveo*.

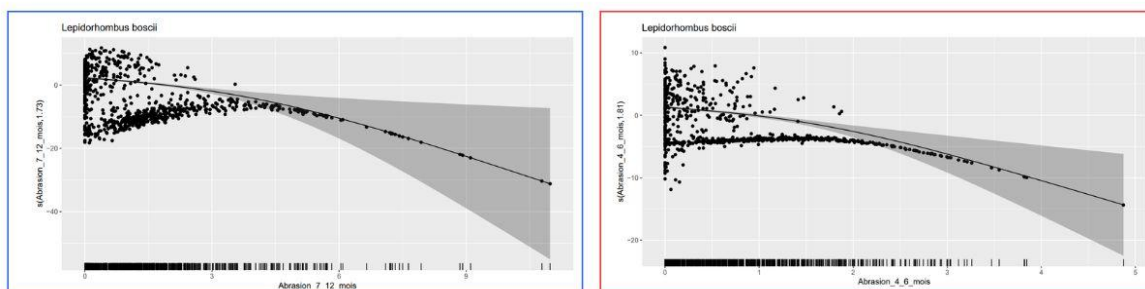


Fig. 20 : Graphiques des tendances des variables d’abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour une espèce de poisson osseux de l’ordre taxonomique des Pleuronectiformes, *Lepidorhombus boscii*.

d) Gadiformes (merlu, merlan bleu, ...)

Pour finir, les graphiques des réponses des métriques de biomasse et de densité de deux espèces de l’ordre taxonomique des Gadiformes sont présentés par la figure 21. Les espèces *Micromesistius poutassou* (merlan bleu) et *Phycis blennoides* (Mostelle de fond) présentent toutes les deux une réponse négative de leurs métriques à l’abrasion. Alors que pour l’espèce de mostelle de fond, les variables qui contribuent le plus à expliquer l’évolution de sa biomasse et de sa densité sont des variables environnementales, pour le merlan bleu, l’abrasion est la variable qui explique le plus l’évolution de sa densité (Annexes 6 et 7).

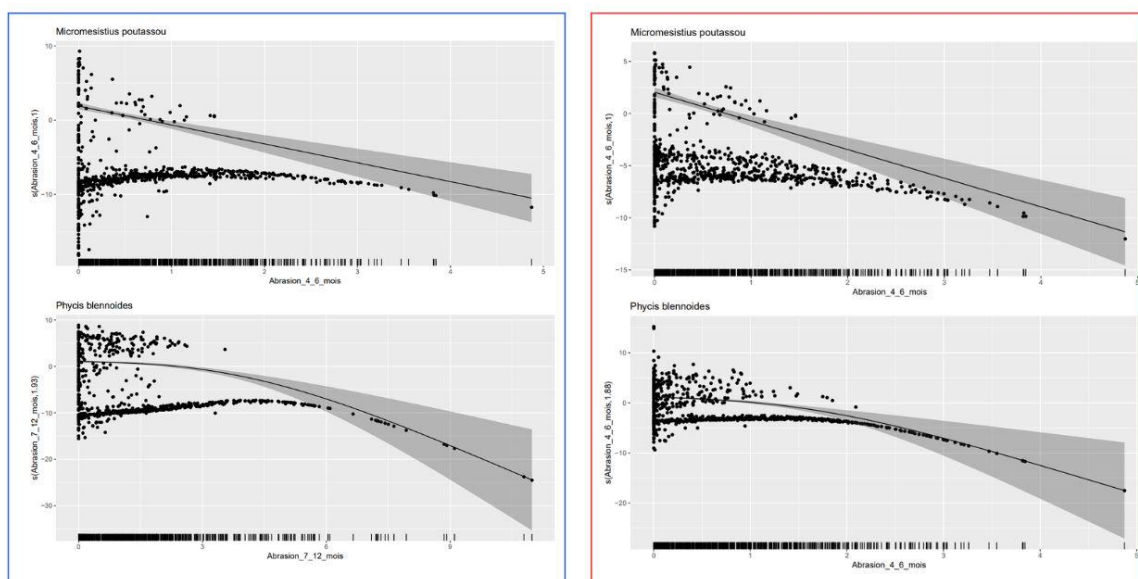


Fig. 21 : Graphiques des tendances des variables d’abrasion sur la biomasse (bleu) et sur la densité (rouge) pour une espèce de poisson osseux de l’ordre taxonomique des Gadiformes, *Micromesistius poutassou* et *Phycis blennoid*.

III.3) Sélection des taxons indicateurs d’impacts

Les espèces qui peuvent indiquer des pressions d’abrasion sont *Argentina sphyraena* (capelan de large) et *Lepidotrigla dieuzeidei* (grondin dieuzeide). La présence du capelan de large à des densités normales, nous indique que la pression exercée n’excède pas les 1 SAR/an (Fig. 22). Tandis qu’une densité normale de grondin dieuzeide nous indique que la pression n’excède pas les 3 SAR/an (Fig. 22).

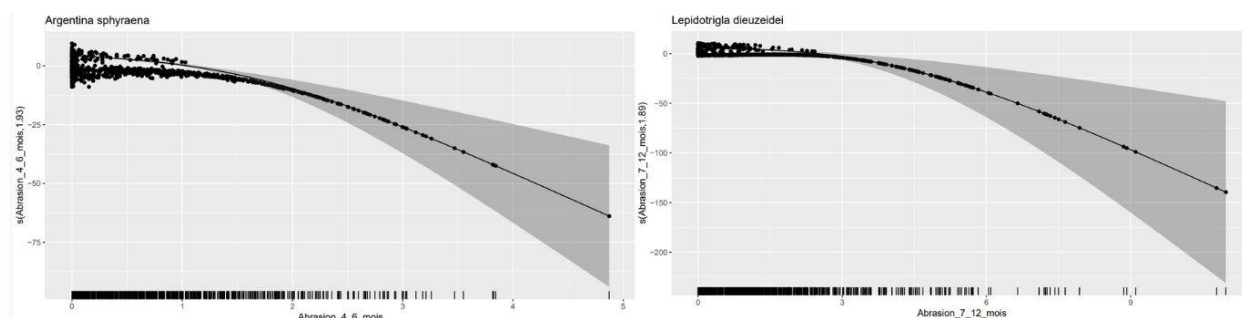


Fig. 22 : Graphiques des tendances des variables d'abrasion sur la densité des espèces de poisson osseux *Argentina sphyraena* et *Lepidotrigla dieuzeidei*.

IV - Discussion :

IV.1) Dynamique spatio-temporelle de l'abrasion

IV.1.a) Limites de la méthode EOF

La méthode EOF utilisée sur les données annuelles pour caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion dans le golfe du Lion (Fig.8) présente des incohérences par rapport aux cartes des différences relatives annuelles (Fig. 6). En effet, le second mode EOF (Fig. 8C et 8D) nous indique que depuis 2017 l'abrasion se concentre dans la zone bathymétrique et le long de la côte. Cependant, les cartes des différences relatives d'abrasion entre la période 2016-2019 et 2020-2023 nous indiquent que dans la zone bathymétrique et à la côte, il y a eu une réduction de l'abrasion depuis la mise en place du plan de gestion WestMed. Ces incohérences peuvent s'expliquer de différentes façons mais l'hypothèse de contraintes de l'analyse EOF (orthogonalité entre les plans spatiaux notamment) trop fortes est la plus probable. Malgré l'importante représentation de la variabilité des données par ce mode EOF, nous ne le considérerons pas et supposons qu'il reflète une part trop importante de bruit.

Pour déterminer la source de cette incohérence dans les résultats de ce mode EOF, deux techniques auraient pu être mises en place. Tout d'abord, le second mode EOF explique une part importante de la variabilité des données, cependant, certains motifs pourraient ne contribuer que très peu à la dimension de l'EOF. En déterminant la variance expliquée par chacune des cellules, les cellules contribuant peu auraient pu être retirées et un nouveau motif aurait pu être observé. Si les motifs observés étaient alors toujours incohérents, des critères de rotation de l'EOF différents de ceux utilisés au départ auraient pu être utilisés. En levant la contrainte d'orthogonalité entre les plans, si les motifs sont modifiés et plus cohérents, c'est alors que la contrainte d'orthogonalité de l'EOF était trop forte pour notre jeu de données (**Hannachi, Jolliffe, et Stephenson 2007**).

IV.1.b) Déplacement de la pression de pêche

1) Pression de pêche totale

La pression de pêche totale exercée par les chaluts dans le golfe du Lion se caractérise par périodes, une augmentation de l'effort total de 2012 à 2017, un maintien de cet effort maximum jusqu'en 2020 et une diminution depuis. Cette première phase de constante augmentation peut être expliquée par une augmentation de l'effort suite à la crise de la sardine, il y a eu un report d'effort des chalutiers pélagiques vers les chaluts de fond (**Bensebaini et al. 2022**), mais également par un changement du type d'engin de pêche remorqué. En effet, le chalut jumeau, qui remplace

progressivement le chalut simple depuis 2010, génère une abrasion plus importante de par la surface en contact avec le sol qui est supérieure à celle d'un chalut simple (**Vaz et Certain, com. pers.**). Cependant, cet effort a atteint un plafond en 2017 et s'y maintient jusqu'en 2021. Cette stagnation de l'effort peut s'expliquer par l'augmentation du prix du gasoil, qui représente un coût très important pour les engins traînants (**Guillen et al. 2023**). De plus, la surexploitation chronique des stocks démersaux diminue leurs rendements (**Bahamon et al. 2024**). Cette diminution des bénéfices, mais également l'instauration de réglementations sur l'effort de pêche avec le plan WestMed (**Billet et al. 2021**), explique très certainement cette baisse drastique de l'effort de pêche appliquée sur le golfe du Lion.

2) Tendance globale de l'abrasion

Depuis l'instauration des zones de fermeture à la pêche, la répartition de l'abrasion au sein du golfe du Lion a été modifiée. La zone PACA étant accessible la moitié de l'année aux chaluts, sa mise en place ne semble pas avoir perturbée les habitudes des pêcheurs qui semblent continuer d'utiliser cet espace comme auparavant (Fig. 8 et 9). Cependant, la zone bathymétrique semble quant à elle avoir modifié les pratiques de pêche. En effet, elle a donné lieu au phénomène "fishing the line" (Fig. 6) qui consiste à venir pêcher à la limite des réserves naturelles qui concentrent un grand nombre d'espèces (**Kellner et al. 2007**). Cette zone a été implémentée sur des zones de nourriceries et frayères du merlu et est perçue comme un espace à forte importance halieutique (**Ministre de l'agriculture et de l'alimentation, 2019**). La mise en place de la fermeture durant 8 mois de l'année a diminué l'abrasion annuelle exercée dans cette zone, mais également l'abrasion à la côte qui y était plus intense précédemment (Fig. 6). Si l'abrasion totale appliquée dans le golfe du Lion a diminué depuis 2020 (Fig. 4) cette baisse n'explique pas la totalité de la diminution de l'effort dans ces deux zones. Une partie de cette diminution est liée au déplacement de l'effort de pêche, le long de la bordure au Nord-Ouest de la zone bathymétrique comme expliqué précédemment, mais plus globalement dans la zone intermédiaire entre la bande côtière et la zone bathymétrique (Fig. 6).

3) Tendance saisonnière de l'abrasion

Les pratiques de pêche sont orchestrées par des variations périodiques de la biomasse marine (**Ni et Sandal 2019**), mais également par les conditions météorologiques (**Bentin et al. 2016**). Avant la mise en place du plan de gestion WestMed, des habitudes saisonnières étaient déjà visibles (Fig. 9) et sont liées aux processus biologiques saisonniers mais surtout à l'état de la mer. En effet, en hiver, la pêche à la côte est privilégiée car au large, le vent ou la hauteur des vagues engendrent une consommation trop élevée de carburant, facteur de coûts très important pour les chalutiers, notamment en Méditerranée où ils sont particulièrement inefficaces énergétiquement (**Sala et al. 2022**). De plus, les sorties de pêche sont limitées à 15h par jour en Méditerranée, ce qui réduit fortement le rayon d'action des navires, en particulier par mauvais temps. Cette tendance d'abrasion pendulaire entre la côte et le large s'est intensifiée une première fois entre 2017 et 2020 (Fig. 9) et est liée à l'augmentation de l'utilisation des chaluts jumeaux. Lors de la mise en place des zones de fermeture, nous avons pu observer une augmentation de l'abrasion en été dans la zone bathymétrique, et en hiver à la côte. Cependant, l'amplitude des variations temporelles s'est amoindrie ensuite.

IV.1.c) Zones de même vécu de pêche

Grâce aux résultats des analyses EOF cohérentes et des différences relatives, nous pouvons résumer l'histoire de l'abrasion exercée dans le golfe du Lion par la caractérisation de 4 zones (Fig. 23). Tout d'abord, la tendance globale des différentes zones nous est renseignée par les analyses sur les données annuelles. L'analyse EOF (Fig. 8) nous renseigne simplement sur une tendance de stagnation de l'abrasion appliquée sur les zones jaune et verte. Ce sont les différences relatives (Fig. 6) qui nous indique plus clairement la répartition de l'effort de pêche actuelle dans cette zone. La zone côtière (jaune) où l'abrasion exercée était intense, est toujours supérieure au patron moyen qui tend à diminuer depuis 2020. La zone bathymétrique (bleu) où l'abrasion était modérée, a une abrasion toujours supérieure au patron moyen mais avec une abrasion totale qui tend à diminuer depuis la mise en place du plan. Par ailleurs, la zone intermédiaire (en vert) a vu son abrasion mensuelle augmenter ces dernières années alors qu'elle connaissait une abrasion modérée avant. Enfin, ces trois zones se distinguent de la zone plus au large (violet) dans laquelle aucune évolution n'est observée et où l'abrasion est faible ou nulle.

La tendance saisonnière est déduite des analyses sur les données mensuelles. Les analyses EOFs (Fig. 7) illustrent un patron saisonnier très clair : la zone côtière (en jaune) et la zone bathymétrique (en bleu) sont fortement abrasées l'été et faiblement l'hiver, alors que la zone intermédiaire (en vert) connaît le phénomène inverse. Une fois de plus, la zone plus au large (en violet) ne présente pas de motif spatio-temporel de pêche particulier.

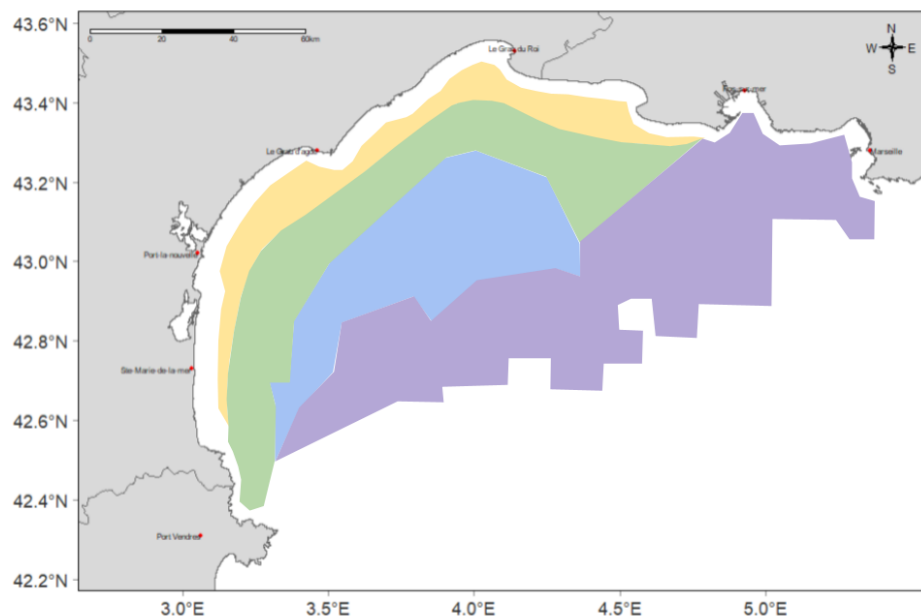


Fig. 23 : Représentation de 4 zones du golfe du Lion ayant des dynamiques et évolutions de l'abrasion par pêche différentes.

IV.2) Tendances des réponses des communautés benthodémersales à l'abrasion

IV.2.a) Choix des variables

1) Variables abrasion

L'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion exercée dans le golfe du Lion nous indique que la pression d'abrasion n'est pas constante dans l'espace et dans le temps. Ainsi, l'abrasion exercée dans une zone les trois derniers mois peut être différente de l'abrasion exercée

antérieurement. Il est donc intéressant de prendre en compte l'abrasion appliquée à différentes périodes afin d'observer si les espèces répondent directement à l'abrasion exercée à court terme, ou si elles répondent à une abrasion plus ancienne. L'abrasion la plus ancienne prise en compte est celle exercée 7 à 12 mois auparavant. Il ne semble pas pertinent de s'intéresser à l'abrasion au-delà car les abrasions subies de façon annuelle sont cycliques. Par ailleurs, plus nous nous intéressons à une abrasion lointaine et plus nous devons supprimer les premières années de notre jeu de données. Ainsi nous avons décidé de calculer trois variables d'abrasion. L'abrasion 1_3 mois représente l'abrasion à court terme, l'abrasion 4_6 mois l'abrasion à moyen terme et l'abrasion 7_12 mois à long terme.

2) Variables environnementales

Les variables environnementales intégrées dans les modèles sont l'année, la profondeur et la longitude. Les variables profondeur et longitude sont des approximations des contraintes environnementales locales. En effet, la profondeur est corrélée à la distance à la côte et négativement corrélée à la productivité. De plus, les conditions en zones profondes sont plus stables sur l'ensemble de l'année, à l'inverse des zones peu profondes. La longitude est quant à elle un proxy de la distance à l'estuaire du Rhône, qui rend compte des différences de conditions entre les parties Est et Ouest du golfe. La variable année va nous donner des renseignements sur l'état du stock, du recrutement, etc, sur les processus biologiques qui affectent la biomasse et la densité.

IV.2.b) Réponses aux abrasions exercées à plus ou moins long terme

L'ensemble des espèces répondent en majorité à une abrasion ancienne, appliquée il y a au moins 4 mois, et non pas à l'abrasion appliquée depuis les 3 derniers mois. Nous pouvons alors supposer que l'impact de l'abrasion sur les biomasses et densités n'est pas direct mais se propage par effet cascade. La zone de fermeture aux chaluts démersaux ouverte durant 4 mois de l'année pourrait avoir des effets positifs sur la biomasse et la densité de certaines espèces qu'elle héberge. En effet, empêcher l'accumulation de l'abrasion plus de 4 mois mettrait fin à certains effets de cascade et empêcherait que la propagation des effets néfastes dans l'écosystème n'atteigne les communautés benthodémersales sensibles à des abrasions anciennes.

IV.2.c) Tendances des réponses en fonction des groupes taxonomiques

1) Poissons cartilagineux

L'ensemble des poissons cartilagineux testés dans cette étude présentaient une réponse significative à l'abrasion (2/2). L'espèce *Raja clavata* présente pour autant une réponse difficilement qualifiable de positive ou négative à l'abrasion. La réponse des deux espèces à l'abrasion peut s'expliquer par leur mode de reproduction (**Juan, Thrush, et Demestre 2007**). En effet, à chaque reproduction les femelles émettent environ une centaine d'œufs (**Papadopoulos et al. 2023**), ce qui est faible pour un organisme marin. Cependant, ce qui peut expliquer la diminution des métriques de la petite roussette est qu'elle vit au-dessus du fond, ce qui peut augmenter sa capturabilité, contrairement à la raie qui est plutôt enfouie.

2) Céphalopodes

Parmi les espèces de céphalopodes testées, seules 27% présentent une réponse à l'abrasion. *Eledone moschata* est l'une des rares espèces de cette étude qui répond positivement à l'abrasion appliquée sur son territoire. Cela pourrait s'expliquer par un cycle de vie court qui lui permettrait de rapidement recoloniser le milieu (**CIEM 2015**). Sa survie après le passage de l'engin lui fournirait

un avantage de compétition pour la nourriture ensuite face à des organismes qui auraient subi des dégâts.

Les deux autres espèces de céphalopodes, *Rhombosepion orbigyanum* et *Todaropsis eblanae* sont quant à elles des espèces mobiles, petites de taille et avec un cycle de vie court. Nous aurions donc pu nous attendre à ce qu'elles ne soient pas sensibles à l'abrasion, voire qu'elles soient favorisées par l'opportunisme (Juan, Thrush, et Demestre 2007).

3) Invertébrés benthiques

Les invertébrés benthiques qui répondent à l'abrasion représentent 50% des invertébrés benthiques testés. Parmi les invertébrés benthiques, aucun des trois Echinodermes (*Antedon*, *Astropecten irregularis pentacanthus* et *Ocnus planci*) n'a présenté de réponse à l'abrasion, ni le *Squilla mantis* (squille ocellée) ou le *Bolinus brandaris* (murex épineux).

L'absence de réponse à l'abrasion peut s'expliquer de différentes façons pour chacune des espèces. Certains ont un comportement d'enfouissement (*Squilla mantis* et *Astropecten irregularis pentacanthus*) (Atkinson et al. 1997; Freeman 1999), d'autres possèdent une coquille (*Bolinus brandaris*) et d'autres encore sont détritivores (*Ocnus planci*). Toutes ces caractéristiques limitent l'effet de l'abrasion, l'enfouissement et la présence d'une coquille permettent de limiter la mortalité directe liée au passage de l'engin, tandis qu'un régime détritivore est favorisé par la remise en suspension des sédiments (Juan, Thrush, et Demestre 2007). En ce qui concerne le dernier échinoderme, *Antedon*, c'est un animal sédentaire et qui possède des bras fragiles, nous aurions donc plutôt supposé qu'il soit sensible à l'abrasion. Cependant sa résistance à l'abrasion peut s'expliquer par son comportement atypique, en cas de perturbation il se détache et nage passivement avec le courant (Fishelson 1974). En revanche, toutes les espèces Décapodes ont montré une réponse à l'abrasion (4/4). L'augmentation de la biomasse du grand bernard l'ermite serait liée à son comportement opportuniste charognard, le passage du chalut lui conférerait alors un large éventail de nourriture (Müller et al. 2021). Tandis que la diminution des métriques de la langoustine et de la crevette rose du large serait liée à leur pêche intensive (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2022).

4) Poissons osseux

Le groupe des poissons osseux est le groupe le plus représenté dans notre jeu de données. Parmi les espèces de ce groupe qui ont été testées, 54% d'entre elles répondent à l'abrasion.

a) Perciformes

Au total, 46% des espèces de l'ordre des Perciformes ont présenté un effet significatif à l'abrasion. Cependant lorsque l'on observe les graphiques des réponses, seules les espèces de grondin présentent un pattern de réponse clair à l'abrasion. Leur réponse négative pourrait s'expliquer par l'utilisation d'organes sensoriels tactiles pour se nourrir (Maran et Ziemski 2020). Nous pouvons supposer que la remise en suspension des sédiments pourrait perturber l'utilisation de cet organe et ainsi limiter leur accès à la nourriture, mais cette diminution s'explique probablement surtout par la mortalité directement liée à l'activité de pêche.

b) Eupercaria incertae sedis

Pour le groupe des Eupercaria, 55% des espèces testées répondent de façon significative à l'abrasion. Parmi ces réponses, seules celles de deux espèces présentent une réelle tendance, la mendole commune (*Spicara flexuosa*) et la dorade rose (*Pagellus bogaraveo*). Le fait que la densité de la mendole commune diminue pourrait s'expliquer par la détérioration de ses habitats privilégiés, les roches et les herbiers de posidonie, qui sont fortement modifiés après le passage des chaluts de fond, laissant place à des sédiments homogénéisés. La réponse surprenante de la dorade rose pourrait indiquer que l'abrasion fait diminuer la population de cette espèce, mais augmente la

biomasse, laisse à penser que les individus qui survivent plus longtemps, deviennent plus gros. Ce poisson semi-pélagique tirerait donc des bénéfices de la diminution de la densité de sa population, en diminuant la compétition pour la nourriture par exemple.

c) Pleuronectiformes

Dans notre étude, 43% des espèces pleuronectiformes répondent à l'abrasion, mais seulement la cardine à quatre tâches présente une réelle réponse claire. La diminution de sa biomasse et de sa densité pourrait s'expliquer par son comportement sédentaire qui augmenterait sa capturabilité (**Campo et Garcia-Vazquez 2010**).

d) Gadiformes

En proportion, les gadiformes sont ceux qui ont le plus répondu à l'abrasion avec 80% de réponses, mais ils ne représentent que 4 espèces retenues. Le merlan bleu (*Micromesistius poutassou*) et la mostelle de fond (*Phycis blennoides*) présentent de très nettes diminutions de leurs biomasses et densités. La réponse forte du merlan bleu à l'abrasion pourrait s'expliquer par le très mauvais état de son stock en Méditerranée (**Mir-Arguimbau et al. 2020**). La mostelle de fond est quant à elle non ciblée par la pêche mais beaucoup capturée, ce qui augmente sa mortalité.

IV.2.d) Distinction entre la profondeur et l'abrasion

Si les réponses des espèces à l'abrasion ne sont pas toujours clairement définies, il est également difficile de distinguer les réels effets de chacune des variables car elles présentent des corrélations importantes. Tout d'abord, nos trois variables d'abrasion sont fortement corrélées, bien qu'elles ne contiennent pas la même information. Ce sont les abrasions exercées à des mois différents qui sont contenues dans chacune des variables. Toutefois, comme le schéma moyen de l'abrasion reste relativement stable (plus intense à la côte et moins au large), cela engendre une part conséquente de corrélations entre les données. Malgré cela, nous avons fait le choix d'intégrer ces trois variables dans nos modèles malgré leur corrélation.

Une autre corrélation importante à souligner est celle entre la profondeur et l'abrasion, qui ne permet pas de bien distinguer l'effet de ces deux variables sur nos métriques de biomasse et de densité. Ainsi, l'effet entre ces deux variables est souvent confondu et difficile à distinguer (**Jac et al. 2022**). Pour pallier ce problème, nous pourrions mettre en place un regroupement des traits de chalut pour des profondeurs similaires, et observer l'évolution des métriques au sein de chacune d'entre elles. Comme la profondeur serait une variable fixe et seule l'abrasion varierait, les tendances des métriques pourraient être interprétées comme des réponses à l'abrasion seule. Cependant, le nombre d'observations pour chaque classe serait très réduit, ce qui limiterait la puissance statistique des tests. Une autre stratégie plus robuste mais plus difficile à mettre en place, serait d'utiliser la méthode Before After Control Impact (BACI). La difficulté de cette méthode qui compare un écosystème avant et après la mise en place d'une perturbation, est l'accès à l'information avant la perturbation. En effet, il est difficile d'identifier des zones de références non impactées dans le golfe du Lion (**Jac et al. 2020**) et d'y contrôler le niveau d'abrasion. Cependant, si cette acquisition de données était possible, cette méthode permettrait totalement de s'affranchir de l'influence de la profondeur, et plus généralement de l'habitat, en comparant des points avec des abrasions différentes mais un environnement inchangé dans le temps.

IV.3) Taxons indicateurs d'impacts

Nous avons déterminé des espèces qui répondent à des valeurs d'abrasion différentes et donc qui indiquent différents niveaux de pression. Ces particularités de ces espèces permettent de suivre les impacts de l'abrasion. En effet, si l'espèce *Argentina sphyraena* (capelan de large) n'est

plus présente en quantités normales dans le milieu, cela veut dire que des pressions d'abrasion importantes ont été atteintes (> 1 SAR/an) et si l'espèce *Lepidotrigla dieuzeidei* (grondin dieuzeide) n'est plus présente normalement, cela signifie que des niveaux d'abrasion extrêmement importants ont été atteints (> 3 SAR/an). Ainsi, leur présence nous renseigne sur la pression vécue par les milieux et sur leur effet. L'utilisation de taxons indicateurs d'abrasion nous permettrait de suivre la récupération des écosystèmes halieutiques suite à la mise en place d'une mesure de gestion visant à limiter l'abrasion.

Les résultats globaux des réponses des espèces à l'abrasion présentent des communautés plutôt peu sensibles à l'abrasion, alors que les conséquences du chalut sont importantes. Il faut garder à l'esprit que nous observons la réponse des espèces aux abrasions exercées depuis 2013, mais que l'abrasion était déjà exercée sur le golfe du Lion depuis de nombreuses années. Il est considéré qu'environ 50% des communautés du golfe du Lion auraient été remplacées par des espèces résistantes aux pressions appliquées (Jac et al. 2020).

A l'aide de la méthode, déjà expliquée auparavant, de regroupement des traits de chalut ayant lieu à des profondeurs similaires et de regarder l'évolution des espèces en s'affranchissant de la corrélation entre les données d'abrasion et de profondeur, nous pourrions également avoir accès à la résilience des différentes espèces. En effet, nous pourrions suivre l'évolution des métriques des espèces suite à une diminution de l'abrasion.

V - Conclusion :

Cette étude avait pour objectif : 1) de quantifier et de cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion exercée dans le golfe du Lion, 2) d'étudier la forme de la réponse d'un cortège d'espèces démersales et benthiques le long d'un gradient d'abrasion et 3) de déterminer une liste de taxons sensibles à l'abrasion qui pourraient être utilisés comme indicateurs de l'état de l'écosystème.

La dynamique spatio-temporelle de l'abrasion a bien été modifiée par la mise en place de zones de fermeture à la pêche dans le cadre du plan de gestion WestMed. Cette modification des pratiques de pêche est essentiellement due à la fermeture de la zone bathymétrique durant 8 mois de l'année aux chaluts démersaux. Cette étude nous a permis de nous rendre compte de la variabilité spatiale et temporelle de cette abrasion, et ainsi de prendre en compte différentes périodes d'intégration de l'abrasion dans l'étude des réponses des communautés benthodémersales. Nous avons alors pu nous rendre compte que les espèces répondaient majoritairement à une abrasion ancienne. Parmi les différentes réponses à l'abrasion, la plupart ont des formes indéterminées. Cependant, au sein des réponses claires, environ 85% représentent une diminution des métriques de biomasse ou densité et 15% une augmentation. Pour qu'une espèce soit qualifiée de peu résistante, il ne suffit donc pas qu'elle réponde de façon significative à l'abrasion mais que sa tendance diminue lorsque l'abrasion augmente. En nous penchant sur les espèces qui répondaient le plus à l'abrasion, nous avons pu déterminer des taxons indicateurs d'abrasion. La présence en densité faible de l'espèce *Argentina sphyraena* (capelan de large) peut indiquer que des pressions d'abrasion importantes ont été atteintes (> 1 SAR/an) et l'espèce *Lepidotrigla dieuzeidei* (grondin dieuzeide) que des niveaux d'abrasion extrêmement importants ont été atteints (> 3 SAR/an).

Ces résultats sont limités par la corrélation importante entre les données d'abrasion et la profondeur, ce qui nous empêche de bien distinguer les effets de ces différentes variables.

Dans un contexte d'augmentation de l'importance de la restauration de la nature européenne (UE 2024), nous pourrions nous intéresser à la mise en place de plans de gestion pour protéger ces espèces qui répondent à l'abrasion. Nous pourrions déterminer les espèces qui bénéficieraient d'une réduction globale ou locale de l'abrasion, mais aussi les espèces indicatrices qui pourraient nous permettre de suivre la récupération des écosystèmes.

Bibliographie :

- Alglave, Baptiste, Maxime Olmos, Juliette Casemajor, Marie-Pierre Etienne, Etienne Rivot, Mathieu Woillez, et Youen Vermard. 2024. « Investigating fish phenology and essential habitats through Empirical Orthogonal Functions ». <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.171016952.25920379/v1?commit=b3a448d37fb6fde5433d257aa3328e7d14a920a5>.
- Amoroso, Ricardo O., C. Roland Pitcher, Adriaan D. Rijnsdorp, Robert A. McConnaughey, Ana M. Parma, Petri Suuronen, Ole R. Eigaard, et al. 2018. « Bottom trawl fishing footprints on the world's continental shelves ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (43): E10275-82. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802379115>.
- Arcuti, Simona, Crescenza Calculli, Alessio Pollice, Gianfranco D'Onghia, Porzia Maiorano, et Angelo Tursi. 2013. « Spatio-temporal modelling of zero-inflated deep-sea shrimp data by tweedie generalized additive models ».
- Atkinson, R. J. A., C. Frogia, E. Arneri, et B. Antolini. 1997. « Observations on the Burrows and Burrowing Behaviour of: *Squilla Mantis* L. Crustacea: Stomatopoda ». *Marine Ecology* 18 (4): 337-59. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1997.tb00446.x>.
- Bahamon, N., L. Recasens, J. Sala-Coromina, B. Calero, J. A. Garcia, G. Rotllant, A. Maurer, et al. 2024. « Selectivity-based management for reversing overexploitation of demersal fisheries in North-western Mediterranean Sea ». *Marine Policy* 165 (juillet):106185. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106185>.
- Bensebaini, C M, G Certain, N Billet, A Jadaud, S Gourguet, T Hattab, et J M Fromentin. 2022. « Interactions between demersal fish body condition and density during the regime shift of the Gulf of Lions ». *ICES Journal of Marine Science* 79 (6): 1765-76. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac106>.
- Bentin, Marcus, David Zastrau, Michael Schlaak, Diethardt Freye, Reinhard Elsner, et Stephan Kotzur. 2016. « A New Routing Optimization Tool-influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems ». *Transportation Research Procedia*, Transport Research Arena TRA2016, 14 (janvier):153-62. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.051>.
- Billet, Norbert, Gregoire Certain, Jerome Bourjea, et Sandrine Vaz. 2021. « Evaluation des fermetures spatio-temporelles mises en oeuvre à partir du 1er janvier 2020 pour la pêche au chalut en mer Méditerranée ». https://side.developpement-durable.gouv.fr/ACCIDR/doc/OAI_6/_b64_b2FpLWFyY2hpbWVYLmlmcmVtZXIuZnItODUxODk=/evaluation-des-fermetures-spatio-temporelles-mises-en-oeuvre-a-partir-du-1er-janvier-2020-pour-la-pe.
- Biseau, Alain, Angelique Jadaud, Patrick Berthou, et Eric Begot. 2016. « Saisine 16-9847 : “Evaluation de l’impact de mesures de gestion transitoires dans le golfe du Lion (GSA 7)” ». https://knowledge-ps.archimed.fr/STD/doc/OAI_4/_b64_b2FpLWFyY2hpbWVYLmlmcmVtZXIuZnItNDY2NjM=/saisine-16-9847-evaluation-de-l-impact-de-mesures-de-gestion-transitoires-dans-le-golfe-du-lion-gsa-.
- Campo, Daniel, et Eva Garcia-Vazquez. 2010. « Evolutionary history of the four-spotted megrim (*Lepidorhombus boscii*) and speciation time within the genus based on mitochondrial genes

analysis ». *Journal of Sea Research* 64 (3): 360-68.
<https://doi.org/10.1016/j.seares.2010.05.004>.

Carbonara, Pierluigi, Walter Zupa, Maria Cristina Follesa, Alessandro Cau, Marilena Donnalioia, Sébastien Alfonso, Loredana Casciaro, Maria Teresa Spedicato, et Porzia Maiorano. 2022. « Spatio-Temporal Distribution of *Isidella Elongata*, a Vulnerable Marine Ecosystem Indicator Species, in the Southern Adriatic Sea ». *Hydrobiologia* 849 (21): 4837-55.
<https://doi.org/10.1007/s10750-022-05022-4>.

Certain, Gregoire, Norbert Billet, Sigrid Lehuta, Stephanie Mahevas, Sophie Gourguet, et Mathieu Merzereaud. 2023. « Mise à jour de l'évaluation des fermetures spatio-temporelles dans le Golfe du Lion au niveau des stocks et des paramètres socio-économiques », octobre.
<https://archimer.ifremer.fr/doc/00868/97996/>.

Certain, Gregoire, Angelique Jadaud, Sandrine Vaz, Luisa Metral, Isabelle Cheret, Norbert Billet, Quentin Schull, Emmanuel Tessier, et Arnaud Souplet. 2024. « MEDITS catch data: Benthic-demersal assemblages of the Gulf of Lion and eastern Corsica (North-western Mediterranean) from 2016 to present ». SEANO. <https://doi.org/10.17882/99052>.

CIEM. 2015. « Cephalopod Biology and Fisheries in Europe: II. Species Accounts ». 2015, CIEM, , n° 325.

Direction Interrégionale de la Mer Méditerranée. 2019. « Plan de gestion pluriannuel pour les pêcheries démersales en Méditerranée occidentale (WEST MED) ». Direction Interrégionale de la Mer Méditerranée. 5 avril 2019.
<https://www.dirm.mediterranee.developpement-durable.gouv.fr/plan-de-gestion-pluriannuel-pour-les-pecheries-a2871.html>.

Downie, Anna-Leena, Tamsyn Noble-James, Ana Chaverra, et Kerry L. Howell. 2021. « Predicting Sea Pen (Pennatulacea) Distribution on the UK Continental Shelf: Evidence of Range Modification by Benthic Trawling ». *Marine Ecology Progress Series* 670 (juillet):75-91.
<https://doi.org/10.3354/meps13744>.

Durrieu de Madron, X., B. Ferré, G. Le Corre, C. Grenz, P. Conan, M. Pujo-Pay, R. Buscail, et O. Bodiot. 2005. « Trawling-induced resuspension and dispersal of muddy sediments and dissolved elements in the Gulf of Lion (NW Mediterranean) ». *Continental Shelf Research, Impact of Natural and Trawling Events on Resuspension, dispersion and fate of POLLutants (INTERPOL)*, 25 (19): 2387-2409. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.08.002>.

Eigaard, Ole R., Francois Bastardie, Niels T. Hintzen, Lene Buhl-Mortensen, Pål Buhl-Mortensen, Rui Catarino, Grete E. Dinesen, et al. 2017. « The footprint of bottom trawling in European waters: distribution, intensity, and seabed integrity ». *ICES Journal of Marine Science* 74 (3): 847-65. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw194>.

FAO. 2023. « MedFish4Ever | General Fisheries Commission for the Mediterranean - GFCM | Food and Agriculture Organization of the United Nations ». 2023.
<https://www.fao.org/gfcm/meetings/medfish4ever/en/>.

Fishelson, L. 1974. « Ecology of the Northern Red Sea Crinoids and Their Epi- and Endozoic Fauna ». *Marine Biology* 26 (2): 183-92. <https://doi.org/10.1007/BF00388888>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2022. « FRA Golfe du Lion ». 22 juin 2022. <https://www.fao.org/gfcm/news/2022/golfedulion/en/>.

- Freeman, Steven Mark. 1999. « The Ecology of *Astropecten irregularis* and Its Potential Role as a Benthic Predator in a Soft-sediment Community ». 1999.
<https://www.proquest.com/openview/8fa125ccb38a893c3eaf462a2fc8b11c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>.
- Georges, Vincent, Eric Begot, Julie Duchene, Marie-Claire Fabri, Pascal Laffargue, Emilie Leblond, Julien Rodriguez, Sandrine Vaz, Mathieu Woillez, et Lenaick Menot. 2021.
 « Développement d'un indicateur d'abrasion des fonds marins par les arts de pêche trainants pour l'évaluation du bon état écologique des habitats benthiques », décembre.
<https://archimer.ifremer.fr/doc/00743/85532/>.
- Georges, Vincent, Sandrine Vaz, Pierluigi Carbonara, Marie-Claire Fabri, Emanuela Fanelli, Maria Cristina Follesa, Germana Garofalo, et al. 2024. « Mapping the Habitat Refugia of *Isidella Elongata* under Climate Change and Trawling Impacts to Preserve Vulnerable Marine Ecosystems in the Mediterranean ». *Scientific Reports* 14 (1): 6246.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-56338-1>.
- Guillen, Jordi, Natacha Carvalho, Griffin Carpenter, Antonio Borriello, et Angel Calvo Santos. 2023. « Economic Impact of High Fuel Prices on the EU Fishing Fleet ». *Sustainability* 15 (18): 13660. <https://doi.org/10.3390/su151813660>.
- Hannachi, A., I. T. Jolliffe, et D. B. Stephenson. 2007. « Empirical Orthogonal Functions and Related Techniques in Atmospheric Science: A Review ». *International Journal of Climatology* 27 (9): 1119-52. <https://doi.org/10.1002/joc.1499>.
- Hiddink, Jan Geert, Simon Jennings, Marija Sciberras, Claire L. Szostek, Kathryn M. Hughes, Nick Ellis, Adriaan D. Rijnsdorp, et al. 2017. « Global analysis of depletion and recovery of seabed biota after bottom trawling disturbance ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (31): 8301-6. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618858114>.
- Hippert-Ferrer, Alexandre, Yajing Yan, et Philippe Bolon. 2019. « Reconstruction de données manquantes par analyse en EOF : application aux séries temporelles de mesures de déplacement InSAR ». In *GRETSI 2019 - XXVIIème Colloque francophone de traitement du signal et des images*. Lille, France. <https://hal.science/hal-02276527>.
- ICES. 2015. « Report of the Working Group on Spatial Fisheries Data (WGSFD) ». Report. ICES Expert Group reports (until 2018). <https://doi.org/10.17895/ices.pub.8487>.
- . 2021. « Workshop on EU Regulatory Area Options for VME Protection ». Report. ICES Scientific Reports. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.7618>.
- Ifremer. 2022. « Abrasion superficielle des fonds marins par les arts de pêche trainants ». Sextant. 2022.
<https://sextant.ifremer.fr/geonetwork/srv/api/records/ec189ce9-05bd-4580-b5f3-4851e9f31df0>.
- Jac, Cyrielle, Nicolas Desroy, Gregoire Certain, Aurélie Foveau, Céline Labrune, et Sandrine Vaz. 2020. « Detecting adverse effect on seabed integrity. Part 2: How much of seabed habitats are left in good environmental status by fisheries? » *Ecological Indicators* 117 (octobre): 106617. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106617>.
- Jac, Cyrielle, Nicolas Desroy, Aurélie Foveau, et Sandrine Vaz. 2022. « Disentangling trawling impact from natural variability on benthic communities ». *Continental Shelf Research* 247

(septembre):104828. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104828>.

- Jennings, Simon, John Pinnegar, Nicholas Polunin, et Karema Randall. 2001. « Impacts of Trawling Disturbance on the Trophic Structure of Benthic Invertebrate Communities ». *Marine Ecology Progress Series* 213 (avril):127-42. <https://doi.org/10.3354/meps213127>.
- Juan, Silvia, Simon Thrush, et M. Demestre. 2007. « Functional changes as indicators of trawling disturbance on a benthic community located in a fishing ground (NW Mediterranean Sea) ». *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER* 334 (mars):117-29. <https://doi.org/10.3354/meps334117>.
- Kellner, Julie B., Irene Tetreault, Steven D. Gaines, et Roger M. Nisbet. 2007. « Fishing the Line Near Marine Reserves in Single and Multispecies Fisheries ». *Ecological Applications* 17 (4): 1039-54. <https://doi.org/10.1890/05-1845>.
- Laffargue, Pascal, et Sandrine Vaz. 2021. « Pêche : ce que la science nous dit de l'impact du chalutage sur les fonds marins ». The Conversation. 15 décembre 2021. <http://theconversation.com/peche-ce-que-la-science-nous-dit-de-limpact-du-chalutage-sur-les-fonds-marins-172325>.
- Liefmann, Stephanie, Jean-Claude Dauvin, Marc Delahaye, Camille Domingo, Manuel Evrard, Valérie Guyet-Grenet, Arnauld Manner, et al. 2022. *Effets des engins de pêche sur les fonds marins de Manche-Est et du golfe normand-breton*. Pdf. Organisation des Pêcheurs Normands (OPN). <https://doi.org/10.13155/89603>.
- Lorance, Pascal, et Sophie Léonardi. 2011. « Contribution thématique DCSMM évaluation de l'état initial pression et impact - pression Abrasion dans la sous-région marine Méditerranée occidentale DCSMM/EI/MO ». In . <https://www.semanticscholar.org/paper/Contribution-th%C3%A9matique-DCSMM-%C3%A9valuation-de-l%27%C3%A9tat-Lorance-L%C3%A9onardi/2922845950ed7fa928e55a6f432b3be112849b4b>.
- Lucchetti, Alessandro, Massimo Virgili, Claudio Vasapollo, Andrea Petetta, Giada Bargione, Daniel Li Veli, Jure Brcic, et Antonello Sala. 2021. « An overview of bottom trawling selectivity in the Mediterranean Sea ». *Mediterranean Marine Science* 22 (3). <https://doi.org/10.12681/mms.26969>.
- Lyons, Steven W. 1982. « Empirical Orthogonal Function Analysis of Hawaiian Rainfall », novembre. https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/21/11/1520-0450_1982_021_1713_eofaoh_2_0_co_2.xml.
- Maran, Vincent, et Frédéric Ziemski. 2020. « Chelidonichthys cuculus ». DORIS. 9 novembre 2020. <https://doris.ffessm.fr/Especies/Chelidonichthys-cuculus-Grondin-rouge-917>.
- McConnaughey, Robert A., Jan G. Hiddink, Simon Jennings, C. Roland Pitcher, Michel J. Kaiser, Petri Suuronen, Marija Sciberras, et al. 2020. « Choosing Best Practices for Managing Impacts of Trawl Fishing on Seabed Habitats and Biota ». *Fish and Fisheries* 21 (2): 319-37. <https://doi.org/10.1111/faf.12431>.
- Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. 2017. « Système de surveillance des navires par satellite (VMS) ». Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2017. <https://agriculture.gouv.fr/systeme-de-surveillance-des-navires-par-satellite-vms>.

- Ministre de l'agriculture et de l'alimentation. 2019. « Arrêté du 20 décembre 2019 portant modification de l'arrêté du 28 février 2013 portant adoption d'un plan de gestion pour la pêche professionnelle au chalut en mer Méditerranée par les navires battant pavillon français - Légifrance ». 2019. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039668169>.
- Mir-Arguimbau, Joan, Marc Balcells, Nuria Raventós, Paloma Martín, et Ana Sabatés. 2020. « Growth, reproduction and their interplay in blue whiting (*Micromesistius poutassou*, Risso, 1827) from the NW Mediterranean ». *Fisheries Research* 227 (juillet):105540. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105540>.
- Müller, Hélène, Yves Müller, Frédéric Ziemski, et Frédéric André. 2021. « Dardanus arrosor ». DORIS. 21 janvier 2021. <https://doris.ffessm.fr/Especies/Dardanus-arrosor-Grand-bernard-l-ermite-148>.
- Ni, Yuanming, et Leif Kristoffer Sandal. 2019. « Seasonality matters: A multi-season, multi-state dynamic optimization in fisheries ». *European Journal of Operational Research* 275 (2): 648-58. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.041>.
- Papadopoulou, Kenn, David Villegas-Ríos, Gonzalo Mucientes, Alina Hillinger, et Alexandre Alonso-Fernández. 2023. « Drivers of Behaviour and Spatial Ecology of the Small Spotted Catshark () ». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 33 (5): 443-57. <https://doi.org/10.1002/aqc.3943>.
- Pierucci, Andrea, Alessandra Nguyen Xuan, Casper Kraan, et Clare Bradshaw. 2021. « Working Group on Fisheries Benthic Impact and Trade-offs (WGFBIT; outputs from 2021 meeting) ». 2021. https://ices-library.figshare.com/articles/report/Working_Group_on_Fisheries_Benthic_Impact_and_Trade-offs_WGFBIT_outputs_from_2021_meeting_/21629711.
- Rijnsdorp, A. D., F. Bastardie, S. G. Bolam, L. Buhl-Mortensen, O. R. Eigaard, K. G. Hamon, J. G. Hiddink, et al. 2016. « Towards a framework for the quantitative assessment of trawling impact on the seabed and benthic ecosystem ». *ICES Journal of Marine Science* 73 (suppl_1): i127-38. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv207>.
- Rumohr, H. 2000. « The Impact of Trawl Fishery on the Epifauna of the Southern North Sea ». *ICES Journal of Marine Science* 57 (5): 1389-94. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0930>.
- Sala, Antonello, Dimitrios Damalas, Lucio Labanchi, Jann Martinsohn, Fabrizio Moro, Rosaria Sabatella, et Emilio Notti. 2022. « Energy Audit and Carbon Footprint in Trawl Fisheries ». *Scientific Data* 9 (1): 428. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01478-0>.
- Steadman, Daniel, John B. Thomas, Vanessa Rivas Villanueva, Forest Lewis, Daniel Pauly, M.L. Deng Palomares, Nicolas Bailly, et al. 2021. « New perspectives on an old fishing practice : Scale, context and impacts of bottom trawling ». https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Steadman/publication/359281130_New_perspectives_on_an_old_fishing_practice_Scale_context_and_impacts_of_bottom_trawling/links/62332c384ce552783cc3b862/New-perspectives-on-an-old-fishing-practice-Scale-context-and-impacts-of-bottom-trawling.pdf.
- UE. 2017. « DÉCISION (UE) 2017/ 848 DE LA COMMISSION - du 17 mai 2017 - établissant des critères et des normes méthodologiques applicables au bon état écologique des eaux marines ainsi que des spécifications et des méthodes normalisées de surveillance et d'évaluation, et abrogeant la directive 2010/ 477/

UE ». <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017D0848>).

———. 2024. *Règlement (UE) 2024/1991 du Parlement européen et du Conseil du 24 juin 2024 relatif à la restauration de la nature et modifiant le règlement (UE) 2022/869 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj/fra>.

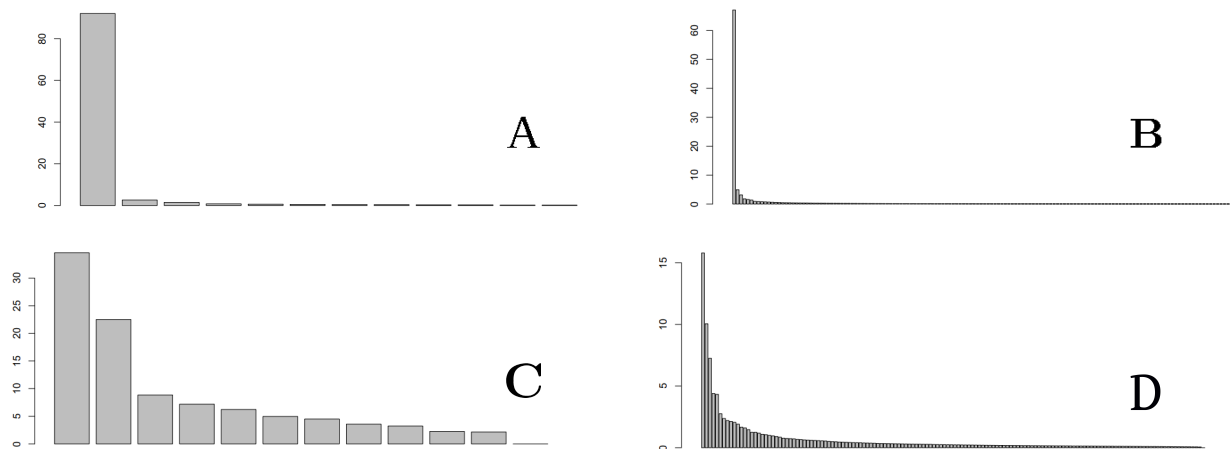
Vaz, Sandrine, Gregoire Certain, Tarek Hattab, Angelique Jadaud, Remi Villeneuve, Elio Raphalen, Luisa Metral, et al. 2023. « GOLDYS bottom trawl surveys catch data : Benthic-demersal assemblages of the Gulf of Lion (North-western Mediterranean) in 2022-2023 ». SEANOE. <https://doi.org/10.17882/96958>.

Annexes

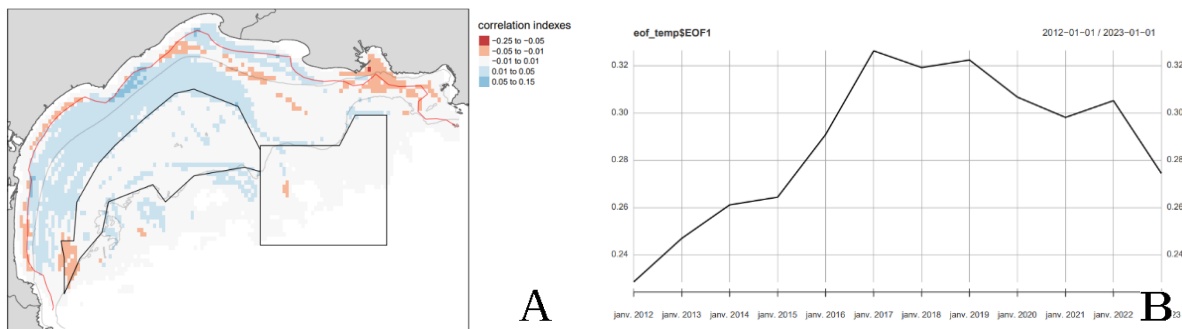
Annexe 1 : Tableau (découpé en deux portions) regroupant pour chaque trait de chalut, les valeurs de différentes variables (seules les 15 premières lignes sont présentées).

	Species	YEAR	Profondeur	Coord_x	BIOMASSE	DENSITE	Abrasion_1_3_mois	Abrasion_4_6_mois	Abrasion_7_12_mois
1	Doris	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
2	Inachus dorsettensis	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
3	Aplysia	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
4	Dalophis imberbis	2013	-99.92698	3.517667	708.5505	14.17101	0.2207067	0.02630891	0.2765679
5	Pagurus	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
6	Callionymus lyra	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
7	Sepiola intermedia	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
8	Antalis	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
9	Abra prismatica	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679
10	Raja polystigma	2013	-99.92698	3.517667	0.0000	0.00000	0.2207067	0.02630891	0.2765679

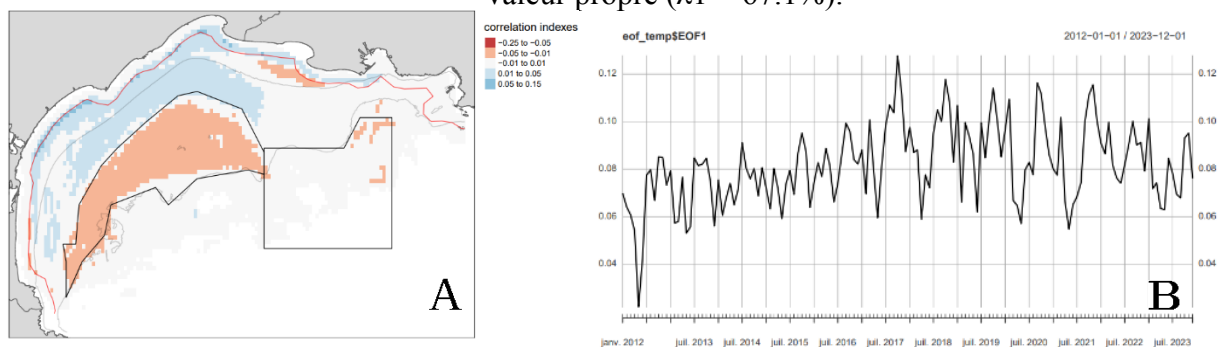
Annexe 2 : Valeurs propres des résultats EOF sur les données annuelles brutes (A), sur les données mensuelles brutes (B), sur les données annuelles d'anomalies (C) et sur les données mensuelles d'anomalies (D).



Annexe 3 : Résultats de l'analyse EOF sur les données annuelles brutes. Carte des corrélations spatiales (A) et graphique de la tendance de la composante principale (B) associées à la première valeur propre ($\lambda_1 = 92.1\%$).



Annexe 4 : Résultats de l'analyse EOF sur les données mensuelles brutes. Carte des corrélations spatiales (A) et graphique de la tendance de la composante principale (B) associés à la première valeur propre ($\lambda_1 = 67.1\%$).



Annexe 5 : Liste des espèces 74 espèces testées, leur catégorie faunistique (C:Céphalopodes, B:Invertébrés benthiques, Ao: Poissons osseux, Ae: Poissons cartilagineux) et leur ordre. Les espèces qui présentent une réponse à l'abrasion pour leur biomasse et/ou leur densité sont en gras.

<i>Espèce</i>	<i>Faunistic categ</i>	<i>Ordre</i>
Alloteuthis	C	Myopsida
Antedon	B	Echinoderme
Argentina sphyraena	Ao	Argentiniformes
Arnoglossus laterna	Ao	Pleuronectiformes
Arnoglossus rueppelii	Ao	Pleuronectiformes
Astropecten irregularis pentacanthus	B	Echinoderme
Blennius ocellaris	Ao	Blenniiformes
Bolinus brandaris	B	Neogastropoda
Boops boops	Ao	Eupercaria incertae sedis
Buglossidium luteum	Ao	Pleuronectiformes
Callionymus maculatus	Ao	Callionymiformes
Capros aper	Ao	Acanthuriformes
Cepola macrophthalma	Ao	Eupercaria incertae sedis
Chelidonichthys cuculus	Ao	Perciiformes
Citharus linguatula	Ao	Pleuronectiformes
Conger conger	Ao	Anguilliformes
Dardanus arrosor	B	Décapodes
Deltentosteus quadrimaculatus	Ao	Gobiiformes
Diplodus annularis	Ao	Eupercaria incertae sedis
Eledone cirrhosa	C	Octopoda
Eledone moschata	C	Octopoda
Engraulis encrasicolus	Ao	Clupeiformes
Eutrigla gurnardus	Ao	Perciiformes
Gaidropsarus biscayensis	Ao	Gadiformes

Gobius niger	Ao	Gobiiformes
Helicolenus dactylopterus	Ao	Perciformes
Illex coindetii	C	Oegopsida
Lepidorhombus boscii	Ao	Pleuronectiformes
Lepidotrigla cavillone	Ao	Perciformes
Lepidotrigla dieuzeidei	Ao	Perciformes
Lesueurigobius friesii	Ao	Gobiiformes
Liocarcinus depurator	B	Décapodes
Loligo vulgaris	C	Myopsida
Lophius budegassa	Ao	Lophiiformes
Lophius piscatorius	Ao	Lophiiformes
Macroramphosus scolopax	Ao	Syngnathiformes
Merluccius merluccius	Ao	Gadiformes
Microchirus variegatus	Ao	Pleuronectiformes
Micromesistius poutassou	Ao	Gadiformes
Mullus barbatus	Ao	Mulliformes
Mullus surmuletus	Ao	Mulliformes
Nephrops norvegicus	B	Décapodes
Ocnus planci	B	Echinoderme
Octopus salutii	C	Octopoda
Octopus vulgaris	C	Octopoda
Pagellus acarne	Ao	Eupercaria incertae sedis
Pagellus bogaraveo	Ao	Eupercaria incertae sedis
Pagellus erythrinus	Ao	Eupercaria incertae sedis
Parapenaeus longirostris	B	Décapodes
Phycis blennoides	Ao	Gadiformes
Raja clavata	Ae	Rajiformes
Rhomboscion orbignyanum	C	Sepiida
Sardina pilchardus	Ao	Clupeiformes
Scomber scombrus	Ao	Scombriformes

Scorpaena loppei	Ao	Perciformes
Scorpaena notata	Ao	Perciformes
Scyliorhinus canicula	Ae	Carcharhiniformes
Sepia elegans	C	Sepiida
Sepiola	C	Sepiida
Serranus cabrilla	Ao	Perciformes
Serranus hepatus	Ao	Perciformes
Solea solea	Ao	Pleuronectiformes
Spicara flexuosa	Ao	Eupercaria incertae sedis
Spicara smaris	Ao	Eupercaria incertae sedis
Sprattus sprattus	Ao	Eupercaria incertae sedis
Squilla mantis	B	Stomatopode
Todaropsis eblanae	C	Oegopsida
Trachinus draco	Ao	Perciformes
Trachurus mediterraneus	Ao	Perciformes
Trachurus trachurus	Ao	Carangiformes
Trigla lyra	Ao	Perciformes
Trisopterus minutus	Ao	Gadiformes
Uranoscopus scaber	Ao	Perciformes
Zeus faber	Ao	Zeiformes

Annexe 6 : Résultats des variables qui décrivent la tendance de la biomasse. Présentation des p-value des variables et des F des variables quantitatives pour chaque espèce (/ : variable pas sélectionnée dans le modèle final).

	<i>Abrasion 1_3 mois</i>		<i>Abrasion 4_6 mois</i>		<i>Abrasion 7_12_mois</i>		<i>Profondeur</i>		<i>Longitude</i>		<i>Année</i>	<i>Dévi- ance</i>
<i>Espèce</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	
Argentina sphyraena	/	/	< 10 ⁻⁶	62.12	/	/	< 10 ⁻⁶	26.32	< 10 ⁻⁶	29.13	/	0.51
Arnoglossus rueppelii	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	15.85	/		/	/	/	0.13
Callionymus maculatus	< 10 ⁻⁶	34.2	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	37.09	/	/	/	0.14
Capros aper	/	/	< 10 ⁻⁶	54.86	< 10 ⁻⁶	76.89	/		< 10 ⁻⁶	218.94	/	0.59
Cepola macrophthalma	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	14.82	< 10 ⁻⁶	136.2 8	/	/	< 10 ⁻⁶	0.44
Chelidonichthys cuculus	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	65.9	< 10 ⁻⁶	25.49	/	/	/	0.39
Conger conger	< 10 ⁻⁶	43.7	/	/	/	/	/		0.02	3.88	< 10 ⁻⁶	0.11
Deltentosteus quadrifasciatus	/	/	/	/	0.001	6.94	< 10 ⁻⁶	15.6	< 10 ⁻⁶	38.7	/	0.29
Helicolenus dactylopterus	/	/	0.0000 7	10.04	/	/	< 10 ⁻⁶	191.3 2	< 10 ⁻⁶	46.8	/	0.83
Lepidorhombus boscii	0.001	6.34	0.0000 1	19.26	< 10 ⁻⁶	38.00	< 10 ⁻⁶	30.18	/	/	/	0.47
Lepidotrigla cavillone	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	27.96	< 10 ⁻⁶	48.77	/	/	< 10 ⁻⁶	0.50
Lepidotrigla dieuzeidei	/	/	< 10 ⁻⁶	45.23	/	/	< 10 ⁻⁶	14.99	/	/	/	0.38

Lesueurigobius friesii	< 10 ⁻⁶	20.21	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	104.6 5	/	/	/	0.21
Lophius budegassa	0.04	4.16	< 10 ⁻⁶	35.65	/	/	< 10 ⁻⁶	103.3 6	/	/	/	0.14
Macroramphosus scolopax	/	/	0.0000 9	10.34	< 10 ⁻⁶	45.75	< 10 ⁻⁶	41.07	/	/	/	0.48
Merluccius merluccius	/	/	< 10 ⁻⁶	18.95	/	/	< 10 ⁻⁶	55.57	/	/	< 10 ⁻⁶	0.17
Microchirus variegatus	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	21.60	< 10 ⁻⁶	17.86	< 10 ⁻⁶	24.79	/	0.41
Micromesistius poutassou	/	/	< 10 ⁻⁶	55.8	/	/	< 10 ⁻⁶	72.64	/	/	/	0.59
Mullus barbatus	/	/	< 10 ⁻⁶	45.81	/	/	< 10 ⁻⁶	216.4 5	/	/	/	0.29
Pagellus acarne	/	/	0.0001	9.07	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	61.21	/	0.27
Pagellus bogaraveo	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	21.09	< 10 ⁻⁶	36.45	< 10 ⁻⁶	99.85	/	0.39
Pagellus erythrinus	< 10 ⁻⁶	16.06	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	97.41	< 10 ⁻⁶	78.61	/	0.45
Phycis blennoides	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	28.09	< 10 ⁻⁶	64.41	/	/	/	0.46
Scorpaena loppei	0.00001	11.47	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	12.77	/	/	/	0.28
Spicara flexuosa	/	/	< 10 ⁻⁶	15.81	/	/	< 10 ⁻⁶	166.8 5	< 10 ⁻⁶	26.24	/	0.41
Trachurus trachurus	/	/	< 10 ⁻⁶	15.08	< 10 ⁻⁶	25.72	< 10 ⁻⁶	100.3	< 10 ⁻⁶	28.24	/	0.14
Trigla lyra	< 10 ⁻⁶	32.34	/	/	< 10 ⁻⁶	20.79	< 10 ⁻⁶	43.3	< 10 ⁻⁶	32.72	/	0.65

Trisopterus minutus	0.00001	16.47	< 10 ⁻⁶	22.84	/	/	< 10 ⁻⁶	183.8 1	/	/	< 10 ⁻⁶	0.45
Zeus faber	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	37.33	< 10 ⁻⁶	17.51	< 10 ⁻⁶	30.72	< 10 ⁻⁶	0.49
Dardanus arrosor	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	23.94	/		< 10 ⁻⁶	44.1	/	0.16
Liocarcinus depurator	< 10 ⁻⁶	20.64	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	142.5 2	/	/	/	0.32
Nephrops norvegicus	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	19.39	< 10 ⁻⁶	126.4 8	/	/	/	0.71
Parapenaeus longirostris	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	48.33	< 10 ⁻⁶	15.60	< 10 ⁻⁶	23.74	/	0.17
Eledone moschata	/	/	< 10 ⁻⁶	26.43	/	/	< 10 ⁻⁶	40.64	/	/	/	0.50
Rhombosepion orbignyanum	/	/	0.0001	10.99	< 10 ⁻⁶	37.37	< 10 ⁻⁶	21.16	/	/	/	0.44
Todaropsis eblanae	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	28.53	< 10 ⁻⁶	22.56	/	/	/	0.38
Raja clavata	0.02	4.97	< 10 ⁻⁶	41.47	/	/	< 10 ⁻⁶	11.56	< 10 ⁻⁶	32.23	/	0.41
Scyliorhinus canicula	/	/	< 10 ⁻⁶	108.2 6	/	/	< 10 ⁻⁶	36.04	/	/	/	0.32

Poissons osseux		Poissons cartilagineux		Invertébrés benthiques		Céphalopodes	
-----------------	--	------------------------	--	------------------------	--	--------------	--

Annexe 7 : Résultats des variables qui décrivent la tendance de la densité. Présentation des p-value des variables et des F des variables quantitatives pour chaque espèce (/ : variable pas sélectionnée dans le modèle final).

	<i>Abrasion 1_3 mois</i>		<i>Abrasion 4_6 mois</i>		<i>Abrasion 7_12_mois</i>		<i>Profondeur</i>		<i>Longitude</i>		<i>Année</i>	<i>Dévi - ance</i>
<i>Espèce</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	
Argentina sphyraena	/	/	< 10 ⁻⁶	70.02	/	/	< 10 ⁻⁶	74.74	< 10 ⁻⁶	107.41	/	0.68
Arnoglossus rueppelii	0.06	3.43	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	15.21	/	/	< 10 ⁻⁶	0.19
Callionymus maculatus	0.00002	10.92	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	35.66	/	/	/	0.14
Capros aper	/	/	< 10 ⁻⁶	19.91	< 10 ⁻⁶	69.95	< 10 ⁻⁶	28.95	< 10 ⁻⁶	74.48	/	0.52
Cepola macrophthalma	/	/	0.001	9.69	< 10 ⁻⁶	20.91	< 10 ⁻⁶	63.76	/	/	/	0.42
Chelidonichthys cuculus	/	/	< 10 ⁻⁶	49.99	/	/	< 10 ⁻⁶	21.60	< 10 ⁻⁶	14.30	/	0.40
Deltentosteus quadrifasciatus	< 10 ⁻⁶	22.67	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	14.84	/	/	/	0.24
Helicolenus dactylopterus	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	56.01	/	/	/	/	/	0.31
Lepidorhombus boscii	/	/	< 10 ⁻⁶	45.2	/	/	< 10 ⁻⁶	98.15	< 10 ⁻⁶	13.28	/	0.52
Lepidotrigla cavillone	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	54.39	< 10 ⁻⁶	47.30	/	/	0.0001	0.52
Lepidotrigla dieuzeidei	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	26.50	< 10 ⁻⁶	11.21	/	/	/	0.35
Lesueurigobius friesii	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	10.90	< 10 ⁻⁶	46.83	/	/	< 10 ⁻⁶	0.28
Lophius budegassa	< 10 ⁻⁶	32.54	< 10 ⁻⁶	11.89	/	/	< 10 ⁻⁶	76.76	/	/	/	0.25

Macroramphosus scolopax	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	72.01	$< 10^{-6}$	82.79	/	/	/	0.50
Merluccius merluccius	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	18.43	$< 10^{-6}$	143.5 4	0.06	3.34	/	0.30
Microchirus variegatus	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	36.50	$< 10^{-6}$	4.45	/	/	/	0.33
Micromesistius poutassou	/	/	$< 10^{-6}$	57.16	/	/	$< 10^{-6}$	30.10	/	/	$< 10^{-6}$	0.46
Mullus barbatus	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	55.07	$< 10^{-6}$	198.0 0	/	/	/	0.33
Pagellus acarne	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	26.01	$< 10^{-6}$	17.33	/	/	/	0.20
Pagellus bogaraveo	$< 10^{-6}$	58.5	0.001	6.08	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	87.27	/	0.35
Pagellus erythrinus	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	48.99	$< 10^{-6}$	112.27	/	/	/	0.47
Phycis blennoides	/	/	$< 10^{-6}$	30.49	/	/	$< 10^{-6}$	172.5 8	/	/	/	0.65
Scorpaena loppei	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	12.23	$< 10^{-6}$	5.93	0.0003	12.83	/	0.50
Spicara flexuosa	$< 10^{-6}$	17.96	$< 10^{-6}$	28.67	/	/	$< 10^{-6}$	250.9 1	/	/	/	0.48
Trachurus trachurus	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	36.48	$< 10^{-6}$	177.3 2	$< 10^{-6}$	31.70	/	0.25
Dardanus arrosor	$< 10^{-6}$	12.39	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	19.50	$< 10^{-6}$	35.49	/	0.29
Liocarcinus depurator	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	35.72	$< 10^{-6}$	71.18	/	/	/	0.38
Nephrops norvegicus	/	/	/	/	$< 10^{-6}$	16.88	$< 10^{-6}$	133.4 6	0.001	14.82	/	0.77

Parapenaeus longirostris	< 10 ⁻⁶	31.8	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	15.14	/	/	/	0.11
Eledone moschata	0.1	2.26	/	/	< 10 ⁻⁶	15.95	< 10 ⁻⁶	46.68	/	/	/	0.56
Rhomboscion orbignyianum	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	56.28	/	/	0.0001	10.32	/	0.24
Todaropsis eblanae	/	/	< 10 ⁻⁶	40.17	/	/	/	/	< 10 ⁻⁶	41.44	/	0.29
Raja clavata	/	/	< 10 ⁻⁶	42.00	/	/	< 10 ⁻⁶	19.97	< 10 ⁻⁶	64.42	< 10 ⁻⁶	0.49
Scyliorhinus canicula	0.01	3.82	< 10 ⁻⁶	103.7 1	/	/	< 10 ⁻⁶	32.46	< 10 ⁻⁶	16.52	/	0.42

Poissons osseux		Poissons cartilagineux		Benthos		Céphalopodes	
-----------------	--	------------------------	--	---------	--	--------------	--

Résumé

Le chalutage de fond est un art traînant qui consiste à tirer un filet de pêche lesté sur le fond et capturer les espèces benthiques et démersales. Cette technique de pêche est responsable de près de 60% des captures en biomasse en Méditerranée mais fait l'objet de nombreuses controverses, notamment pour l'usure des fonds marins qu'elle cause. Cette abrasion a pour conséquence de nombreuses modifications, tant au niveau de l'habitat que de la structure et du fonctionnement des communautés benthodémersales. Dans ce contexte, nous avons observé la dynamique spatio-temporelle de l'abrasion dans le golfe du Lion, puis nous avons testé la réponse des espèces à différentes périodes d'intégration d'abrasion. Nous avons alors observé que les espèces répondent majoritairement à une abrasion ancienne, exercée plus de 4 mois auparavant. Après avoir intégré d'autres variables environnementales (profondeur, longitude et année), nous nous sommes alors intéressés aux espèces dont la biomasse ou la densité avaient une réponse significative à l'abrasion et nous avons déterminé celles qui n'étaient pas résistantes. Nous avons essayé d'expliquer ces tendances en tenant compte des procédés biologiques et de l'état des stocks des espèces. A partir des espèces qui présentaient une forte diminution de l'une des deux métriques, nous avons estimé des taxons indicateurs d'abrasion, le grondin dieuzeide et le capelan de large.

Mots clés : Chalutage, Abrasion, Communautés benthodémersales, Résistance.

Abstract

Bottom trawling is the art of dragging a weighted fishing net along the seabed to capture benthic and demersal species. This fishing technique is responsible for almost 60% of biomass catches in the Mediterranean sea, but is the target of much controversy, particularly for the damage it causes on the seabed. This sweeping results in numerous modifications, both to the habitat and to the structure and functioning of the benthodemersal communities. In this context, we observed the spatio-temporal dynamics of sweeping in the Gulf of Lion, and then tested the response of species to different periods of integrated sweeping. We then observed that most species responded to sweeping that had taken place more than 4 months before. After integrating other environmental variables (depth, longitude and year), we then looked at the species whose biomass or density had a significant response to sweeping and determined those that were not resistant. We tried to explain these trends by taking into account the biological processes and stock status of the species. Based on the species that showed a strong decrease in one of the two metrics, we estimated sweeping indicator taxa, the gurnard and the capelin.

Key words : Bottom trawling, Sweeping, Benthodemersal communities, Resistance.