L'Institut Agro Rennes-Angers

Site de Rennes

Année universitaire : *2023 - 2024* Spécialité : *Ingénieur agronome* Spécialisation (et option éventuelle) : *Sciences halieutiques et aquacoles (modélisation halieutique)*	**Mémoire de fin d'études** d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (lnstitut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

Etude de l'écosystème marin du golfe du Lion avec la suite Ecosim with Ecopath (et Ecospace) : amélioration du compartiment mégafaune marine et réalisation des premiers scénarios des parcs éoliens flottants.

Par : Alizée Frayssinet

Travail financé par le projet NESTORE (ANR-10-IEED-0006-34)

Soutenu à Rennes le 11/09/24

©Energiesdelamer.eu

Devant le jury composé de :

Président (enseignant référent) : Olivier Le Pape

Maîtres de stage : Vincent Faure (FEM), Emma Araignous (FEM) et Daniela Bănaru (MIO)

Autres membres du jury :

Didier Gascuel *(Enseignant chercheur Institut Agro Rennes-Angers)*

Hubert du Pontavice *(Chercheur Ifremer)*

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

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] : 04/11/2024
(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] **Alizée Frayssinet**
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** : 04/11/24

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** : 04/11/24

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 ?
Traduction de l'anglais vers le français

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

Date et Signature de l'**auteur** : 04/11/24

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

Table des matières

1. Contexte 1
2. Matériel et méthodes 4
2.1. Ecopath with Ecosim 4
2.2. Description du modèle EwE initial : GOLEM 5
2.3. Développement du modèle GOLEM modifié 7
2.4. Description des scénarios dans un contexte EMR 14
3. Résultats 17
3.1. Comparaison de GOLEM et du modèle modifié 17
3.2. Comparaison des scénarios d'impacts cumulés 23
4. Discussion 30
4.1. Analyse GOLEM_SMM 30
4.2. Analyse des scénarios 30
4.3. Limites 32
4.4. Perspectives 33
Conclusion 34
Bibliographie 35
Annexe 40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des campagnes réalisant un état des lieux des espèces de la mégafaune marine présentes en Méditerranée 7
Tableau 2 : Estimations d'abondance de la mégafaune marine dans le golfe du Lion 8
Tableau 3 : Séries temporelles par type de compartiment 12
Tableau 4 : Comparaisons des différents modèles testés. 14
Tableau 5 : Modèles correspondants aux différents scénarios 17

Liste des figures

Figure 1 : Bathymétrie du golfe du Lion 1
Figure 2 : Evolution du poids moyen et des débarquements de *Sardina pilchardus* (A) en bleu et *Engraulis encrasicolus* (B) en vert (Queiros 2019) 2
Figure 3 : Taux de capture/biomasse de chaque compartiment en fonction de la biomasse (A) et contribution de chaque compartiment à la biomasse totale du modèle (B) 6
Figure 4 : Critères de choix des compartiments d'oiseaux marins 9
Figure 5 : Compartiments de GOLEM_MM 9
Figure 6 : Cartes de distribution de la mégafaune marine en hiver (dans l'ordre de gauche à droite dolphins, pelagic piscivorous birds, coastal piscivorous birds et coastal omnivorous birds), interpolées sur la grille ECOSPACE à partir des cartes initiales de COHABYS 13
Figure 7 : Carte des scénarios du SER avec Environnement (en violet), Loin côtes (en vert), Réduction coûts (en orange) et Equilibre (en rose). Le fond de carte est la bathymétrie EMODNET. 15
Figure 8 : Comportement des oiseaux marins par rapport aux parcs (AV : évitement, I : indifférent, ATT : attraction) (Krijgsveld 2014) 16
Figure 9 : Diagramme trophique de GOLEM_MM 18
Figure 10 : Diagramme de Lindeman de GOLEM_MM 19
Figure 11 : Matrice de différence relative de MTI (GOLEM_MM – GOLEM / GOLEM). Les espèces clef-de-voûte sont encadrées en violet. 20
Figure 12 : Diagramme de keystoneness index (Power et al. 1996). En orange les espèces clefs-de-voûte dans GOLEM et en bleu les espèces clef-de-voûte dans GOLEM_MM. 20
Figure 13 : : Comparaison des variations temporelles de biomasses issues de deux modèles Ecosim et quatre modèles issus d'Ecospace pour les compartiments ayant des données de référence tirées des campagnes MEDITS (2010-2019). 21
Figure 14 : Différence de biomasse relative (GOLEM - GOLEM_SMM / GOLEM) pour le compartiment Planctonophagous pelagic en moyenne sur 2019 22
Figure 15 : Différence de biomasse relative entre GOLEM ET GOLEM_SMM pour le compartiment *Scomber scombrus* (A) et *Trachurus mediterraneus* (B) en moyenne sur 2019 23
Figure 16 : Différence de biomasse relative entre GOLEM et GOLEM_SMM pour le compartiment Dolphin en moyenne sur 2019 23
Figure 17 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour 12 compartiments en moyenne sur 2019 24
Figure 18 : Différence relative de captures totales en moyenne sur 2019 entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 25
Figure 19 : Différence de biomasse relative des espèces commerciales entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 25
Figure 20 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment *Engraulis encrasicolus* en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 26
Figure 21 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Octopuses en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 26
Figure 22 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment *Scomber scombrus* en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 27

Figure 23 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Coastal omnivorous birds en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 28
Figure 24 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Coastal piscivorous birds en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 28
Figure 25 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Pelagic piscivorous birds en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 29
Figure 26 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Dolphins en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre). 29
Figure 27 : Proportion de l'effort de pêche total des principales flottes de pêche présentant un chevauchement avec les futures zones de parcs éoliens flottants (Breuer et Pepescu 2024). 31

1. Contexte

La demande croissante d'énergie en France rend impératif l'atteinte des objectifs de neutralité carbone à l'échelle mondiale. Pour inverser cette tendance, il est essentiel d'accroître la production d'énergie décarbonée issue de sources inépuisables telle que l'énergie éolienne. Cependant, l'expansion des parcs éoliens terrestres est limitée par des contraintes comme l'espace disponible. C'est dans ce contexte que les parcs éoliens offshore commencent à se développer. Ces parcs éoliens en mer présentent des avantages considérables, notamment un vaste espace au large des côtes et des vents forts et réguliers.

À l'horizon 2030, la France prévoit d'exploiter 20 parcs éoliens offshore, dont 3 parcs pilotes. Plus de 700 éoliennes seront réparties dans la Manche, le long de la façade Atlantique et en Méditerranée, afin de capter les vents marins et de produire de l'électricité à faible émission de carbone (Eoliennes en mer 2024).

La façade méditerranée est une zone pionnière de l'éolien flottant en France avec la Bretagne Sud (Eoliennes en mer 2024). Plus précisément, le golfe du Lion a un intérêt majeur pour l'implantation des parcs éoliens offshore (Figure 1) en raison notamment d'une profondeur faible (environ 70 m dans les zones où les fermes seront installées) ainsi que des vents réguliers et soutenus. La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie prévoit l'attribution de deux parcs éoliens en mer flottants de 250 MW chacun en 2028 pour une mise en service en 2031 au large de la Méditerranée (Eoliennes en mer 2024). Quatre scénarios sont mentionnés par le Syndicat des Energies Renouvelables (SER) répondant à différents enjeux, tels que la visibilité depuis les côtes, l'impact environnemental, la diminution des coûts liée à la production d'énergie et la cohabitation des usages notamment avec la filière pêche.

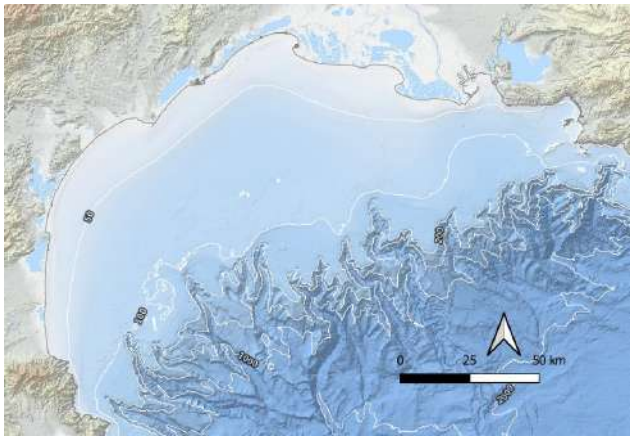


Figure 1 : Bathymétrie du golfe du Lion

Ces parcs éoliens seront implantés dans un écosystème complexe et riche qui au cours des années 2000 a déjà subi des changements significatifs dans sa structure. Parmi eux, un régime shift dans le spectre de taille des petits pélagiques (Figure 2, Queiros 2019; Feuilloley et al. 2020) lié à la réduction des apports en nutriments et à des modifications des communautés pélagiques à la base des réseaux trophiques (Garcia et al. 2023; 2024) entrainant des conséquences notables sur les activités de pêche. Les principaux phénomènes environnementaux dans cette zone sont les forts vents continentaux du nord-ouest (Tramontane) et du nord (Mistral) produisant des upwellings côtiers (Agostini et Bakun 2002), la circulation méso-échelle de l'ouest de la Méditerranée et l'apport d'eau douce du Rhône. Ces phénomènes conduisent à une production primaire et secondaire élevée qui soutient une grande partie des flux du réseau trophique (Bănaru et al. 2013). Le fond marin présente des substrats sablonneux et boueux et quelques prairies de *Posidonia oceanica* (Seyer et al. 2023).

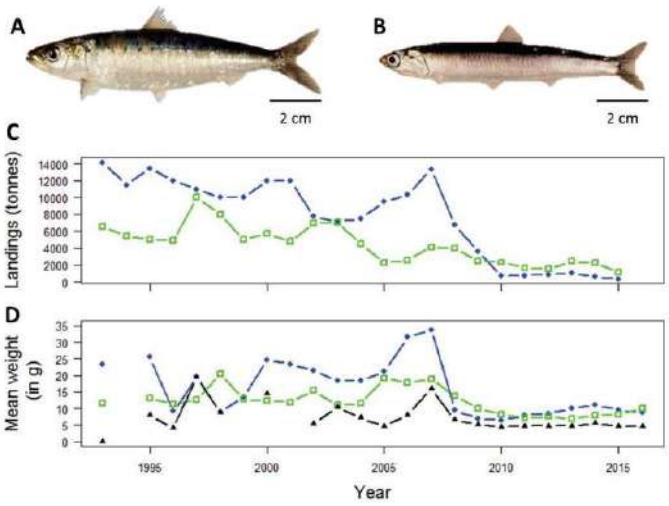


Figure 2 : Evolution du poids moyen et des débarquements de Sardina pilchardus (A) en bleu et Engraulis encrasicolus (B) en vert (Queiros 2019)

Sur le littoral, un vaste réseau de lagunes et de marais salés recouvre le golfe d'Ouest en Est, assurant des lieux de nidification, de nourrissage et de repos pour les oiseaux. La Méditerranée présente une biodiversité exceptionnelle pour les espèces terrestres mais également pour les espèces marines. En mer, on distingue sur la zone d'étude des communautés d'oiseaux ayant des préférences écologiques différentes : les espèces marines pélagiques, vivant au large essentiellement, sauf pendant la période de reproduction : puffins, océanites, alcidés, fou de Bassan, mouette pygmée, mouette tridactyle, pingouin torda, et les espèces du littoral et des zones humides: mouettes, goélands, sternes, cormorans, limicoles, échassiers, canards, grèbes (Migralion 2021). Ces espèces sont pour plupart longévives avec un faible taux de fécondité ce qui les rend d'autant plus vulnérables face aux modifications environnementales (Migralion 2021). Parmi elles, on retrouve le goéland d'Audouin classée comme "quasi menacé", le puffin yelkouan comme "vulnérable", et le puffin des Baléares comme "en danger critique d'extinction" sur la liste rouge de l'IUCN (IUCN 2024). Les 16 pays méditerranéens se sont engagés à protéger ces espèces au niveau national. La majorité des espèces méditerranéennes d'oiseaux marins sont toutefois classées en tant que « préoccupation mineure ». Les fermes éoliennes affectent les populations d'oiseaux résidentes et migratrices, à travers la modification des comportements, le déplacement des habitats et les collisions mortelles (Maxwell et al. 2022).

La mer Méditerranée abrite aussi des mammifères marins résidents et visiteurs. Certaines régions ont été identifiées comme des habitats importants pour les mammifères marins. En ce qui concerne le développement des OWF, plusieurs mammifères marins résidents utilisent fréquemment l'environnement marin côtier prévu pour les développements potentiels, y compris le rorqual classé « en danger » sur la liste rouge de l'IUCN et le grand dauphin classé « vulnérable » (IUCN 2024). Le bruit marin, et en particulier le battage lors de la construction, a été identifié comme le plus grand impact sur les mammifères marins. Il existe aussi un risque d'enchevêtrement pendant la phase d'exploitation des éoliennes flottantes qui constitue l'une des principales différences de risque potentielles entre les éoliennes à fondation fixe et les éoliennes flottantes (Henry et al. 2023).

Les études sur les éoliennes posées ont mis en évidence des changements dans le fonctionnement des communautés benthiques et pélagiques se développant sur ces structures (Couturier et al. 2022). Parmi ces modifications, on observe une augmentation de la capacité du milieu à accueillir des organismes vivants liés aux substrats durs, notamment sur les structures artificielles en béton des éoliennes. Les effets résultant de la création de ces récifs artificiels incluent une agrégation temporaire et localisée d'espèces mobiles attirées par les espèces benthiques qui se développent sur ces nouvelles surfaces. Cette augmentation de la biomasse constitue potentiellement une source de nourriture pour les oiseaux et mammifères marins qui représentent la mégafaune marine (Couturier et al. 2022).

L’installation de ces parcs peut également avoir des répercussions sur les pratiques de pêche, avec notamment l’interdiction des chaluts et autres engins actifs (Débat public 2024), ce qui influence les abondances et les spectres de taille individuelles des espèces exploitées. Les résultats de l’étude de (Halouani et al. 2020) suggèrent que les effets de spillover (ou effets de bord) autour des parcs pourraient atténuer l’impact négatif sur les activités de pêche. Deux explications sont présentées. La première est une augmentation des prises autour des parcs due à l’effet réserve (jusqu’à 7% près de la ferme éolienne). La seconde est une légère modification de la composition des prises due à l’effet de dispositif d’agrégation de poissons induit par les parcs, qui entraîne une augmentation de la proportion d’espèces de haut niveau trophique. Cependant, l’influence des effets de spillovers est limitée dans l’espace et les effets positifs attendus sont fortement localisés dans les zones autour du site de la ferme éolienne en mer.

Tous ces effets peuvent affecter l’écosystème du Golfe du Lion, et notamment la mégafaune marine au sommet du réseau trophique au travers des relations proies-prédateurs. L’approche écosystémique considère ces liens en prenant en compte les différentes espèces de l’écosystème et leur liens trophiques. Cette approche holistique permet de considérer les conséquences indirectes de ces effets ainsi que leur synergie potentielle mais nécessite encore du développement pour être opérationnelle dans le cadre réglementaire de l’évaluation du cumul d’impact environnemental lié à l’intégration des parcs éoliens en mer.

C’est justement l’objectif global du projet NESTORE (NESTed modeling approach for ORE development and cumulative impact assessment considering local to regional environmental and socio-economic stakes, ANR-10-IEED-0006-34), dans lequel ce stage s’intègre. Ce projet ambitionne d’améliorer l’évaluation du cumul d’impact pour la gestion des écosystèmes marins à l’échelle locale en conformité avec le cadre réglementaire fourni par les directives européennes. Dans le cadre de la production de scénarios intégrant les enjeux locaux sur les différentes façades françaises, l’objectif de ce travail est d’évaluer les potentiels impacts cumulés du développement des EMR sur l’écosystème du golfe du Lion.

Différents travaux ont déjà modélisé l’écosystème du Golfe du Lion. On peut notamment évoquer le modèle de Daniela Banaru, réalisé en 2013 ainsi que le modèle GOLEM de Thomas Seyer en 2023. Les objectifs initiaux de GOLEM qui n’étaient pas focalisés sur les oiseaux et les mammifères marins, ainsi que les difficultés à acquérir des données sur ces compartiments ont entrainés un développement réduit des compartiments de la mégafaune marine. Dans le modèle GOLEM, tous les oiseaux marins ont été regroupés dans le même compartiment, indépendamment de leur abondance, leur régime alimentaire ou leur taille, et le compartiment cétacés se limite aux grands dauphins.

Un premier objectif de notre étude était donc le recensement et la collecte des données les plus récentes sur la mégafaune marine pour détailler les compartiments oiseaux et mammifères marins dans un nouveau GOLEM modifié. La précision de ces compartiments dans le modèle a permis de réaliser un nouvel équilibrage et une comparaison au modèle initial.

Dans un deuxième temps, les effets potentiels des parcs éoliens sur l’écosystème du golfe du Lion ont été étudiés au regard des différents scénarios du SER. L’évaluation s’est concentrée sur les effets directs et indirects impactant la mégafaune marine ainsi que sur les pêcheries opérant dans le golfe du Lion.

2. Matériel et méthodes

2.1. Ecopath with Ecosim

L'outil Ecopath with Ecosim est un logiciel de modélisation d'écosystème qui permet de comprendre l'organisation et le fonctionnement d'un écosystème en construisant une représentation statique à l'équilibre (Ecopath), à laquelle viennent s'attacher les autres modules qui apportent une dimension temporelle (Ecosim) et spatiale (Ecospace) (Christensen et Walters 2004; Christensen et al. 2008).

Le module Ecopath est basé sur la connaissance de paramètres physiologiques déterminant les interactions trophiques entre plusieurs compartiments. Pour construire ce modèle il est donc nécessaire de connaitre trois paramètres minimum parmi ces indices : la biomasse, la production par unité de biomasse, la consommation par unité de biomasse et l'efficacité trophique de chaque compartiment. Il est aussi nécessaire d'inclure une matrice alimentaire pour détailler les liens trophiques entre les compartiments. C'est un modèle statique représentant une image instantanée de l'écosystème.

L'outil Ecosim permet d'intégrer des variations temporelles (interannuelles et éventuellement saisonnières) au modèle initial. Pour cela, des données de séries temporelles reproduisant les tendances historiques d'évolution de biomasses et de captures des compartiments doivent être fournies. Ecosim permet aussi d'ajuster les vulnérabilités des espèces, soit exprimer à quel point un groupe est éloigné de sa capacité de charge. Cette vulnérabilité dépend de l'accès aux ressources alimentaires des proies et des réponses comportementales des proies vis-à-vis de la prédation. On peut ainsi citer la Théorie de la « *foraging arena* » (Christensen et Walters 2004; Walters et al. 1997). « Le postulat de base de cette théorie est que les restrictions spatiales et temporelles de l'activité des proies et des prédateurs (migration verticale journalière, terriers, refuges…) entrainent une division de la population de proies en une partie vulnérable et une partie invulnérable (due au non-recouvrement de l'activité spatio-temporelle des prédateurs et des proies). Les taux de prédation sont donc dépendants des, et limités par, les taux d'échanges entre ces deux sous-populations de proies. Les interactions trophiques ont lieu dans la zone limitée de cette « *foraging arena* », dans laquelle se trouvent les proies vulnérables. ». L'ajustement d'un modèle aux données implique généralement une approche itérative, utilisant des données à long terme sur les pêcheries, la biologie et l'environnement, ainsi que les paramètres de vulnérabilité, pour évaluer quelle combinaison de données et de vulnérabilités améliore la qualité d'ajustement du modèle. Une mesure statistique de la qualité d'ajustement est calculée par la somme pondérée des carrés des écarts (SS) des biomasses logarithmiques observées par rapport aux biomasses logarithmiques prédites. Deux types de séries temporelles sont nécessaires dans Ecosim : des séries de forçages pour introduire de la variabilité dans l'équilibre statique d'Ecopath et des séries de références, permettant, par comparaison avec les prédictions du modèle, la calibration et l'évaluation de ce dernier.

L'intégration du module Ecospace permet de prendre en compte la spatialisation de la distribution des espèces. Ecospace reprend la paramétrisation d'Ecopath et les entrées de la série temporelle de forçage de la biomasse d'Ecosim pour forcer la biomasse d'Ecospace (Walters et al. 1999). Cela maintient les distributions spatiales prédites par Ecospace mais remplace la biomasse dans une cellule donnée. Des cartes de distribution peuvent être insérées avec la fonctionnalité External data qui permet d'intégrer des cartes à différents pas de temps (saisonniers ou annuels). Le module utilise ensuite une approche basée sur la préférence d'habitat pour distribuer les biomasses initiales puis pour moduler les taux de croissance, de survie et de dispersion de chacun des groupes dans les cellules de la grille (Christensen et al. 2014). Pour ce faire, Ecospace calcule une capacité d'interaction trophique (« foraging capacity ») pour chacune des cellules et chacun des groupes. Cette valeur est composée de la capacité d'habitat et la capacité environnementale. La capacité environnementale représente la

proportion de surface d'une cellule utilisable/favorable à une espèce ou un groupe fonctionnel. Son calcul dépend de paramètres environnementaux et de fonctions de réponse à ces paramètres. L'effort de pêche est hérité d'Ecosim et est distribué spatialement grâce au modèle de gravité dédié d'Ecospace. L'idée est d'allouer un effort total connu (ou planifié) sur les cellules de manière à ce que chaque cellule reçoive une fraction de l'effort total proportionnelle à un poids d'attraction pour la cellule. Ce poids est fixé à zéro pour les cellules protégées de la pêche. Les distributions d'effort sont donc une sortie d'Ecospace, tout comme les estimations de mortalité par pêche (Christensen et al. 2024). Ecospace utilise les paramètres de vulnérabilité d'Ecosim. Une faible vulnérabilité pour un prédateur donné implique qu'il est proche de sa capacité de charge, limitant ainsi la quantité de consommation du prédateur si sa population devient plus abondante. Dans Ecospace, une espèce peut être confinée dans de petites zones centrales en fonction de ses préférences d'habitat (par exemple, des plages de profondeur définies), et l'occupation de la zone peut changer dynamiquement en réponse à la dynamique des prédateurs et des proies. Lorsqu'il y a concordance entre les distributions de leurs prédateurs ou des pêcheries, l'espèce peut avoir un taux de rencontre et une mortalité plus élevés (Christensen et al. 2024).

2.2. Description du modèle EwE initial : GOLEM

Le modèle d'étude de ce travail est le modèle GOLEM (Seyer in prep. 2024, soutenance prévue le 12/09/2024). Il contient les modules Ecopath, Ecosim, Ecospace et Ecotracer.

Le modèle est construit pour le golfe du Lion, centré sur le plateau continental entre 0 et 200 m de profondeur, pour une superficie totale de 12172 km². L'isobathe de 200 m se situe à la limite entre le plateau continental et les canyons de la pente continentale. Il propose une représentation améliorée des invertébrés benthiques et une évaluation réaliste des captures. Le modèle est composé de 68 groupes fonctionnels, dont 6 producteurs primaires, des rejets et des détritus, 27 groupes d'invertébrés, 31 groupes de poissons, un groupe pour les grands dauphins et un pour les oiseaux marins. Ce modèle représente une moyenne de la situation de l'écosystème entre 2010 et 2019 afin de prendre en compte les changements importants constatés dans la structure trophique de l'écosystème après 2008-2009, tant en termes de composition d'espèces que de taille d'individus (Seyer et al. 2023).

GOLEM est défini par plusieurs compartiments représentant des taxons monospécifiques ou rassemblant des espèces de même guilde trophique. Les espèces ont été sélectionnées de façon à représenter la majorité de la biomasse de la zone étudiée. Ce modèle représente un réseau trophique défini sur cinq niveaux, plaçant les requins pélagiques (*Prionace glauca* et *Squalus acanthias*) et les dauphins (*Tursiops truncatus*) en prédateurs apicaux. Les engins de pêche sont répartis en sept groupes d'engins : les chaluts de fonds, les chaluts pélagiques, les filets, les palangres, les sennes, la pêche récréative et les autres (Annexe 1). Les captures ont un niveau trophique moyen de 3.47, plus élevé que dans les études précédentes, reflétant les changements survenus dans l'activité des pêcheries.

Dans le modèle initial, 84 séries temporelles de références ont été utilisées dans la calibration Ecosim:

- 46 séries temporelles de captures annuelles ont été utilisées en forçage. Elles sont basées sur les registres des pêcheries, fournies par le Système d'Information Halieutique (IFREMER SIH 2024). Le jeu de données sur les captures espagnoles (https://www.fao.org/faostat) dans la zone n'ayant pas d'entrées pour 2019, les captures (espagnoles) de 2018 ont été réutilisées pour l'année 2019 (2018 ES + 2019 FR = 2019 totale).
- 33 séries de biomasses ont été utilisées en référence. Elles sont extraites des campagnes d'échantillonnage scientifiques MEDITS (chalut de fond) (Jadaud et Certain 1994). Un poids a

été attribué à chacune des séries de référence, basé sur l'estimation de la qualité de la donnée (ici, la capacité des campagnes MEDITS à capturer une espèce/groupe).

- 5 séries de biomasses des groupes planctoniques ont été utilisées en forçage. Ce sont des estimations mensuelles calculées à partir du modèle NEMO-Eco3M-Med (Baklouti et al. 2021). Un pas de temps d'un mois a été choisi pour le modèle.

La composition des captures des différents engins de pêches est présentée dans la Figure 3 (A) qui représente le taux de capture/biomasse des compartiments en fonction de la biomasse. Les espèces les plus importantes en termes de biomasse ont un taux de capture/biomasse très faible (*Sardina pilchardus*, depositivorous molluscs, detritivorous worms) contrairement aux espèces de biomasse faible (octopuses, *Dicentrachus labrax*, anglerfish) qui ont un taux de capture/biomasse élevé. Les espèces de faible taux capture/biomasse représentent donc plus des trois quarts de la biomasse totale (Figure 3 (B)).

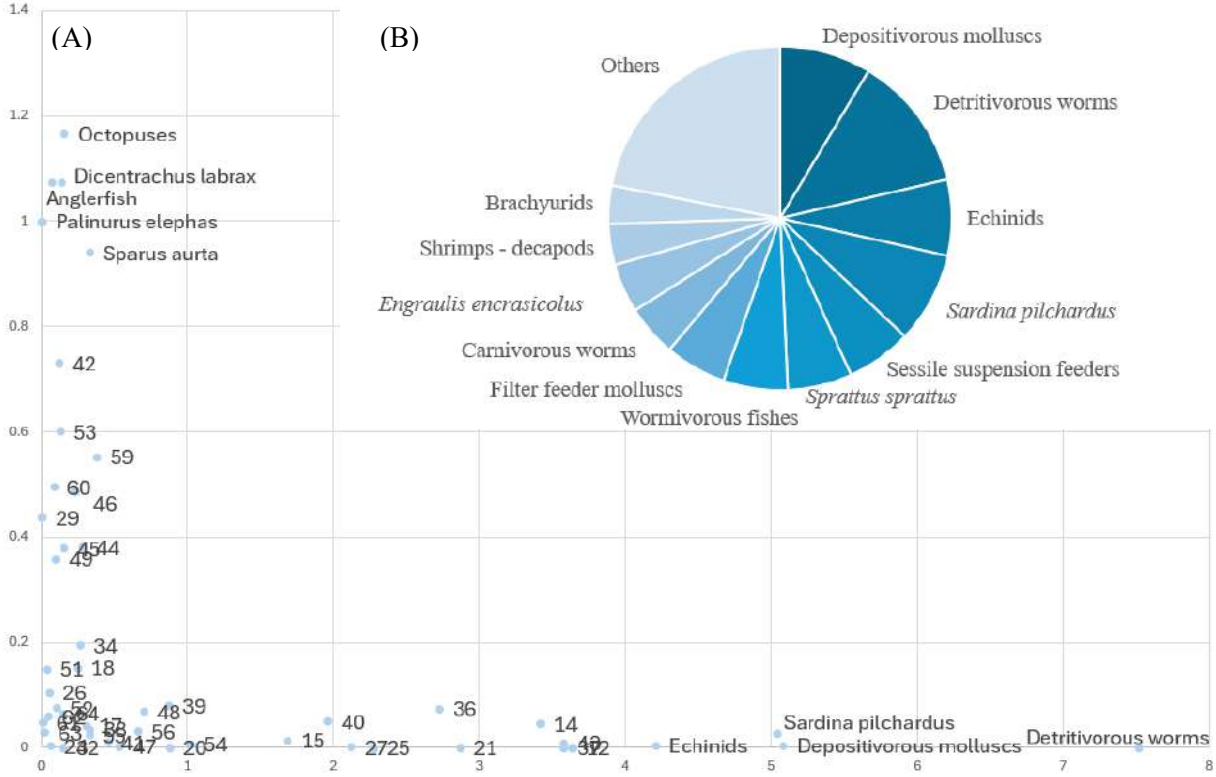


Figure 3 : Taux de capture/biomasse de chaque compartiment en fonction de la biomasse (A) et contribution de chaque compartiment à la biomasse totale du modèle (B)

Afin de conduire à la fois une démarche de calibration et de validation, le jeu de données a été séparé en deux, de 2010 à 2014 pour la calibration et de 2015 à 2019 pour la validation. Pour ce faire deux fichiers de séries temporelles ont été créés, l'un de 01/2010 à 12/2014 et l'autre de 01/2010 à 12/2019. Dans GOLEM, le processus de calibration d'Ecosim consistait à essayer de minimiser la SS lors de l'estimation des paramètres tout en testant différentes conditions. C'est la SS du fichier de validation qui a été utilisée comme critère pour retenir la meilleure calibration.

Des cartes de distribution mensuelles des bas niveaux trophiques ont été utilisées pour avoir un effet sur la distribution de l'ensemble du réseau par effet bottom-up. Ces cartes ont été calculées à partir des résultats du modèle physique/biogéochimique NEMO-Eco3M-MED (Baklouti et al. 2021). Des cartes d'habitat, de bathymétrie et de distance à la côte sont utilisées en tant que driver environnementaux. Des courbes de réponses des espèces sont utilisées en fonction de ces paramètres

afin de moduler leur distribution sur le plateau (Annexe 2). Les courbes ont été réalisées à partir des données de captures de la base MEDITS.

2.3. Développement du modèle GOLEM modifié

2.3.1. Modification des compartiments Mégafaune Marine

Ce travail a permis de produire un livrable de NESTORE du WP5 (Frayssinet et al. 2024).

2.3.1.1. Etat des lieux des connaissances

Afin de collecter des données pertinentes concernant la mégafaune marine du golfe du Lion, diverses campagnes de surveillance ont été identifiées dans la région (Tableau 1 et Annexe 3). Ces campagnes visent à inventorier les espèces présentes et, pour certaines d'entre elles, à prendre en compte leur variation inter-annuelle (PELMED) et leur variation temporelle saisonnière (SAMM 1, 2), ainsi qu'à estimer l'abondance des espèces. Pour collecter ces données, plusieurs entretiens et réunions ont été réalisés avec des chefs de projets et des auteurs de publications scientifiques afin d'affiner les informations récupérées.

Tableau 1 : Résumé des campagnes réalisant un état des lieux des espèces de la mégafaune marine présentes en Méditerranée

Survey	*SAMM 1*	*ASI / SAMM 2*	*PELMED*	*GDEGeM*	*TURSMED 2*	*Migralion*	*PNM*	*EFGL EOLMED PGL*
Year	2011-2012	2018-2019	1993-2022	2013-2015	2020-2023	2021-2025	2018-2021	2019 - 2024
Platform	Airplane	Airplane	Boat	Boat	Boat	Boat	Boat	Boat
Species	Seabirds Cetaceans	Seabirds Cetaceans	Seabirds Cetaceans	Bottlenose dolphins	Bottlenose dolphins	Seabirds	Seabirds	Seabirds Cetaceans
Season	Winter Summer	Winter Summer	Summer			Spring Autumn	Spring Autumn	
Area	Lion continental shelf	EEZ	Lion shelf French riviera	Lion continental shelf	Lion continental shelf	Lion continental shelf	Gulf of lion MNP	EFGL EOLMED PGL
Data	Abundance	Abundance	Observation	Abundance	Observation	Observation	Observation	Observation

Des cartes de distribution d'abondance ont été fournies par Cohabys pour 13 groupes d'espèces en été et en hiver (5 d'entre elles sont disponibles en Annexe 4). Elles ont été créées en combinant les données d'observation des campagnes SAMM1, SAMM2, ASI, PELMED 17-22, PELMED 11, Migralion, PGL, EOLMED, EFGL et PNM. La méthode utilisée pour estimer les abondances s'appelle le « distance sampling ». Elle repose sur l'hypothèse que la probabilité de détecter des individus dépend de leur distance par rapport à l'observateur. Un modèle de détection est sélectionné en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC). Ensuite, des covariables liées aux conditions d'observation, telles que l'agitation de la mer, la couverture nuageuse ou la turbidité de l'eau, sont ajoutées pour améliorer la précision. L'abondance est ensuite estimée à l'aide d'un modèle DSM (échantillonnage par distance et analyse spatiale). Enfin, des covariables environnementales telles que la bathymétrie, les courants de surface et la température sont intégrées dans le modèle. Pour tenir compte de la variabilité saisonnière, deux grilles ont été produites : une pour les mois d'octobre à février et une autre pour mars à septembre. La covariable de chaque cellule de la grille correspond à la moyenne des 6 mois sur 12 ans d'échantillonnage. Le modèle extrapole les estimations à chaque cellule de la grille, ce qui permet d'estimer et de cartographier l'abondance pour l'ensemble de la zone d'étude. La résolution de la grille est de 10 km. Bien que ces cartes ne fournissent pas de valeurs d'abondance absolues, elles permettent d'identifier les distributions relatives d'abondance des espèces.

Les données d'abondance récupérées pour les oiseaux marins sont listées dans le tableau ci-dessous (Tableau 2). Elles sont issues des campagnes aériennes SAMM I de 2011-2012 car les données

de la campagne SAMM II n'ont pas pu être calculées sur la zone du golfe dans le temps imparti. Les données d'abondance du grand dauphin sont issues de la campagne GDEGeM (2013-2015). Les abondances estimées pour le grand dauphin par GDEGeM sont supérieures à celles obtenues par SAMM I puisque celle-ci récolte des données sur l'ensemble de la ZEE englobant le plateau continental, le talus et les canyons pour réaliser le calcul par km² donc ne prend pas en compte la différence de distribution des dauphins entre le plateau et les canyons. De plus, les campagnes aériennes ont systématiquement des taux de rencontre plus faibles que les campagnes par bateau à cause de la différence de vitesse du support et de la distance aux animaux comptés.

Tableau 2 : Estimations d'abondance de la mégafaune marine dans le golfe du Lion

Espèces	*Hiver*	*Été*	*Campagne*	*Source*
Morus bassanus	1090	234	SAMM I 2011-2012	Pettex et al. 2014
Calonectris diomedea	0	2484		
Puffinus yelkouan	4634	4930		
Fratercula arctica	1976	0		
Hydrocoloeus minutus	4292	141		
Larus michahellis	10985	6998		
Ichthyaetus melanocephalus *Larus ridibundus*	6515	594		
Sterna sandvicensis *Sternula albifrons* *Sterna hirundo*	0	2530		
Tursiops truncatus	1590	3175	GDEGeM 2013-2015	Labach et al. 2022

L'isobathe à 200m écarte la possibilité d'intégration d'autres cétacés à notre modèle, le grand dauphin étant le seul mammifère marin venant se nourrir à des profondeurs inférieures à 200m, donc participant aux interactions trophiques avec les autres compartiments. Les cétacés vivant les plus proches du plateau comme le dauphin bleu et blanc et le rorqual commun vivent dans les canyons, à des profondeurs avoisinant les 1000 m.

Le choix des espèces d'oiseaux à conserver est basé sur la disponibilité des données. Certaines espèces rares sur le plateau telles que le grand labbe, le labbe parasite, le labbe pomarin et la mouette tridactyle ont été retirées du modèle car aucune donnée d'abondance n'était disponible. Finalement, les espèces conservées ont été celles retenues par le projet MIGRALION. Elles ont été sélectionnées en fonction de leur abondance. Celle-ci a été estimée à partir du ratio des cellules occupées sur celles non occupées lors de la création de carte de probabilité de présence. Ainsi, le grand cormoran, le cormoran huppé, l'océanite tempête, la sterne naine et le pingouin torda ont également été retirés du modèle.

Dix espèces ont donc été sélectionnées. Pour les classer dans différents compartiments, plusieurs critères ont été pris en compte : l'utilisation de l'habitat, le régime alimentaire et le comportement par rapport aux parcs éoliens (Figure 4). Les espèces sont classées en fonction de leur distance par rapport à la côte pour la recherche de nourriture. D'une part, il y a les oiseaux marins côtiers, et d'autre part, les oiseaux pélagiques qui se nourrissent plus au large. Dans cette région, le type de proie varie plus significativement horizontalement que verticalement en raison de la faible profondeur du plateau continental. Le régime alimentaire nous permet de distinguer deux catégories d'oiseaux marins : les espèces piscivores et les omnivores. Ces préférences alimentaires dépendent principalement de la proximité à la côte. Enfin, le comportement par rapport aux parcs éoliens de type attraction ou évitement nous permettra dans un second temps d'évaluer les réactions des oiseaux lors des scénarios avec les parcs. Des données d'oiseaux marins étudiés en Manche, mer du Nord et mer Baltique ont été collectées pour avoir des informations sur ce critère. Cependant, il est difficile de tenir compte de ce comportement,

car la réaction de chaque espèce aux installations en mer n'est pas bien comprise et varie en fonction des individus, de la saison et de l'emplacement des parcs.

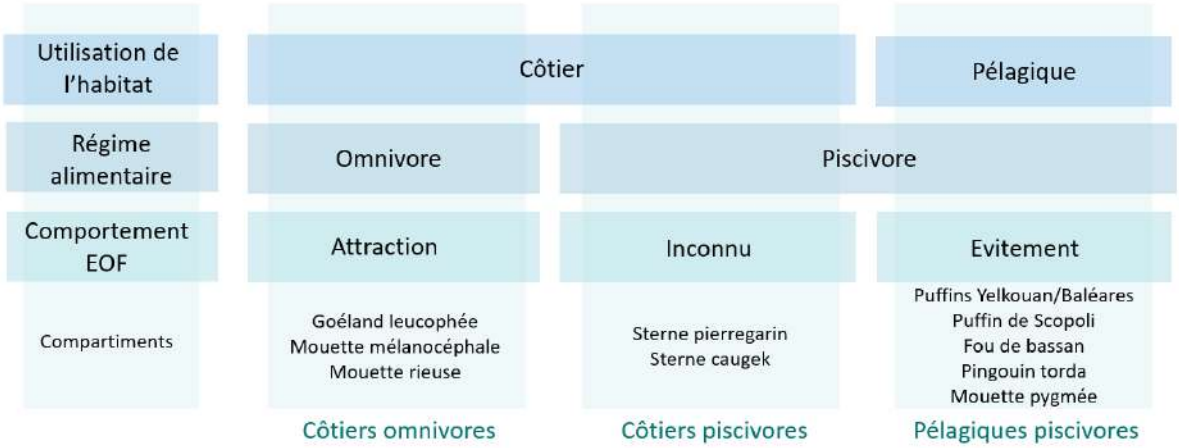


Figure 4 : Critères de choix des compartiments d'oiseaux marins

Trois compartiments ont été définis : les oiseaux côtiers omnivores avec le goéland leucophée, la mouette mélanocéphale et la mouette rieuse, les oiseaux côtiers piscivores avec la sterne caugek et pierregarin et les oiseaux pélagiques piscivores avec les puffins, le macareux moine, le fou de bassan et la mouette pygmée.

2.3.1.2. Intégration des nouveaux compartiments dans le modèle

Une fois les espèces sélectionnées et la structure du modèle complétée par les nouveaux compartiments trophiques d'oiseaux (Figure 5), il est nécessaire de caractériser les paramètres de biomasse, de productivité et de consommation dans le modèle.

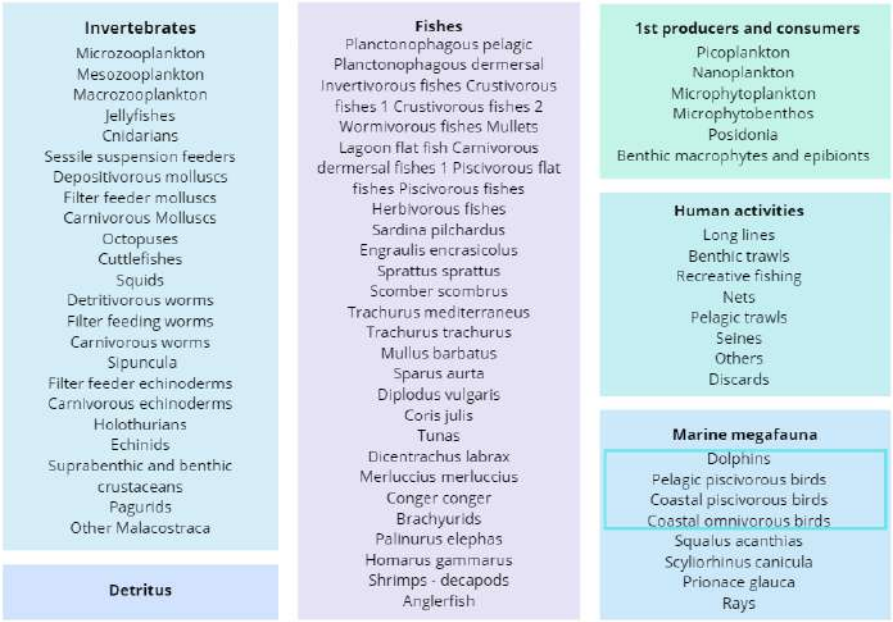


Figure 5 : Compartiments de GOLEM_MM

La biomasse des oiseaux et dauphins a été estimée à partir des données d'abondance du Tableau 2.

La production par biomasse est un indicateur du turn-over de l'espèce. Une espèce longévive a un P/B plus faible qu'une espèce très productive à cycle de vie court. Les grands dauphins et les oiseaux marins ont une production faible par unité de biomasse.

$$\frac{P}{B} = \frac{\text{offspring abundance per pair} * \text{number of pair} * \text{offspring weight}}{\text{adult abundance} * \text{adult weight}}$$

Cette formule a été proposée par Pierre-Christian Beaubrun dans Bănaru et al (2013) et nécessite la connaissance des succès de reproduction des espèces, de leur poids adulte et juvénile et de leur abondance absolue. Les poids adultes, nombre d'œufs par couple et poids des juvéniles sont issus de la base de données Avibase. Les poids adultes et juvéniles des compartiments d'oiseaux ont été calculés en pondérant les masses par l'abondance des espèces les constituant. Les données de poids adulte et juvénile du grand dauphin ont été fournies par Daniela Bănaru, issues d'un échange avec Pierre-Christian Beaubrun. Les données de poids adultes obtenues étaient confirmées par les chiffres estimés par MNHN (> 300kg), GIS3M (135-650kg) et GECC (250-500kg).

La consommation de nourriture par une population par unité de biomasse permet d'estimer l'impact d'une population sur ses proies. On l'estime à partir de relations empiriques. Le calcul de la consommation au niveau populationnel dépend de la ration journalière par individu (DR). La méthode de calcul est disponible dans la littérature (Coll Montón 2006) avec W le poids moyen des individus:

- Mammifères marins (Innes et al. 1987 ; Trites et al.1997) avec DR en g/jour:

$$DR = 0{,}1 * W^{0{,}8}$$

- Oiseaux marins (Nilsson et Nilsson 1976) avec DR en kg/jour :

$$log_{10}(DR) = -0{,}293 + 0{,}85 * log_{10}(W)$$

DR est ensuite multiplié par 365 jours et divisé par le poids moyen du taxon pour fournir un Q/B annuel moyen :

$$\frac{Q}{B} = 365 * \frac{DR}{W}$$

Les paramètres calculés ont été comparés avec des données de B, P/B et Q/B issues de la littérature et utilisées dans des modèles trophiques sur Ecopath en méditerranée (Annexe 5 et Annexe 6).

L'estimation des matrices alimentaires se fait à partir de la littérature. Elles sont déterminées à partir des contenus stomachaux ou des ratios isotopiques. Pour une meilleure stabilité du modèle, la répartition des proies dans de nombreux compartiments était conseillée.

Les données alimentaires des oiseaux marins proviennent d'articles de Thezenas 1993; Beaubrun 1995; Conéjéro 1998; Cramm et al. 1998; Morat et al. 2014 (Annexe 7). Parmi les espèces présentes toute l'année, certaines ne se nourrissent pas uniquement dans le réseau alimentaire marin, mais principalement dans les zones urbaines, comme le goéland leucophée (Moulaï et al. 2008). Pour ces espèces, la part de l'alimentation provenant d'autres zones a été considérée comme importée dans la matrice alimentaire. Pour les côtiers piscivores, l'import est fixé à 0 étant donné que les sternes se nourrissent uniquement de poissons. Chez les pélagiques piscivores, une espèce se nourrit en partie sur des proies d'origines non marine (insectes). Il s'agit de la mouette pygmée, qui représente 22% en abondance du compartiment. Une faible partie de son régime est d'origine marine donc l'import du compartiment est fixé à 15%. Pour les côtiers omnivores, dominé par le goéland leucophée, la principale source de nourriture est terrestre, notamment les oiseaux, petits mammifères et décharges. L'import est fixé à 63%. Le reste du régime alimentaire est réparti entre les compartiments de poissons, mollusques

et crustacés afin de maintenir des efficacités trophiques des proies inférieures à 1. Les informations sur le régime sont qualitatives.

Pour le grand dauphin, les données de la matrice alimentaire issues du modèle initial sont conservées et ajustées avec des données plus récentes provenant de contenus stomacaux (Queiros et al. 2018). La biomasse ayant quadruplé par rapport au modèle initial, les proies ont une efficacité trophique supérieure à 1. Pour équilibrer le modèle, le prélèvement de proies a été réparti dans d'autres compartiments de même niveau trophique afin de conserver le niveau trophique initial du dauphin et la pression sur les compartiments initiaux a été diminuée de manière équitable. Le niveau d'import est fixé à 0 puisqu'on considère que tous les dauphins se nourrissent uniquement sur le plateau. La part de la population non-résidente sera abordée dans la partie variation temporelle d'Ecosim.

Le nouveau modèle équilibré est testé avec une routine R (PREBAL en Annexe 8 (Link 2010)), qui vient en complément des informations fournies par le logiciel EwE (partie 2.3.1.3.). Cette vérification permet d'identifier les valeurs aberrantes afin de les corriger pour retrouver un modèle réaliste.

2.3.1.3. Indicateurs de comparaison des modèles

La comparaison des modèles s'appuie sur plusieurs indicateurs :

- Le **diagramme de flux trophiques** permet de représenter les compartiments selon leur niveau trophique et l'intensité des flux les reliant. La taille des cercles représentant les compartiments est proportionnelle à leur biomasse.
- Les flux et les biomasses de chaque niveau trophique sont résumés dans le **diagramme de Lindeman** présentant la chaîne alimentaire sous forme linéaire, composé de boîtes de niveaux trophiques et de flux entrants ou sortants de chacune d'entre elles. Ce diagramme comprend également l'efficacité du transfert, le débit total et le flux vers les détritus pour chaque niveau trophique.
- Le **MTI (Mixed Trophic Impact)** est la représentation de l'impact théorique, positif ou négatif d'une petite variation de biomasse d'un groupe sur tous les autres groupes de l'écosystème modélisé (Ulanowicz et Puccia 1990). Il tient à la fois compte de l'interaction direct (prédation) et indirecte (compétition).
- Le **niveau trophique moyen** des captures est la moyenne pondérée du niveau trophique de ses proies, avec le niveau trophique des producteurs primaires et des détritus fixé à 1.

$$TL_i = 1 + \sum_{j=1} DC_{ij}\, TL_j$$

Avec DC_{ij} la fraction de la proie j dans le régime de i et TL_j le niveau trophique de la proie j.

- Le **pedigree** est un indicateur permettant d'évaluer la fiabilité des données d'entrée et la qualité globale du modèle (Heymans et al. 2016).
- Une **espèce clef-de-voûte** est une espèce prédatrice qui influence de manière disproportionnée la structure du réseau trophique de sa communauté (Valls et al. 2015).

$$KS_i = \varepsilon_i \times drank(B_i)\ \varepsilon_i = \sqrt{\sum_{j=1} m_{ij}^2}$$

Avec drank (B_i) le rang dans un ordre décroissant de la biomasse du groupe i, ε_i l'impact trophique global de i et m_{ij} le MTI net.

D'après Power et al. (1996), ce sont des espèces jouant un rôle structurant au sein des écosystèmes et des réseaux alimentaires qui les relient, malgré une biomasse et donc une consommation alimentaire relativement faibles.

2.3.2. Dynamique temporelle dans Ecosim

L'amélioration des compartiments de la mégafaune marine passe par l'ajout de la variation saisonnière pour les grands dauphins et les oiseaux marins. Quatre séries temporelles de biomasse ont été ajoutées en forçage, avec un pas de temps biannuel (été/hiver). La valeur d'hiver est fixée en novembre, les campagnes SAMM I dont sont issues les valeurs ayant réalisés les transects hivernaux entre novembre et février, et la valeur été en mai pour des transects ayant lieu entre mai et août. La contribution des différentes espèces étant pondérée selon la qualité des données de départ, le poids de ces nouvelles séries a été fixé à 1.

Les vulnérabilités ont été recalculées à partir d'un fichier de calibration sur 2010-2014 identique à celui du modèle initial avec l'ajout des séries temporelles biannuelles des dauphins et oiseaux marins. La vulnérabilité de *Mullus barbatus* a été divisée par deux auprès de l'ensemble de ses prédateurs (Carnivorous molluscs, Carnivorous demersal fishes, *Merluccius merluccius*, Rays) afin d'améliorer l'ajustement des données prédites aux données de référence.

L'ensemble des données de séries temporelles est résumé dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Séries temporelles par type de compartiment

	Biomasse valeur absolue	*Captures*	*Timestep*	*Source*
Bas niveaux trophiques	Forçage	/	Mensuel	Modèle biogéochimique (ECO3M)
Mégafaune marine	Forçage	/	Biannuel	SAMM I et GDEGeM
Espèces d'intérêt halieutique	Référence	Forçage	Annuel	MEDITS et SIH

2.3.3. Dynamique spatiale dans Ecospace

La grille de GOLEM a été construite avec une maille de 2.4 km² (Annexe 9). Les limites géographiques de la grille sont :

- Coin supérieur gauche : 43.569265 ° N ; 3.0254432° E
- Coin inférieur droit : 42.42208 ° N ; 5.5562732° E 102

Des cartes de distribution ont été inclues pour forcer les distributions des oiseaux marins et grands dauphins, ainsi que les secteurs de pêche privilégiés par engin. Les cartes de distribution des espèces d'oiseaux marins et de grands dauphins fournies par Cohabys ont été fusionnées et moyennées en pondérant par l'abondance des espèces qui composent les compartiments. Les cartes ont été normalisées entre 0 et 1 et interpolées selon la résolution de cette grille grâce à la fonction d'Inverse Distance Weighting sur R (Figure 6 et Annexe 10, Stachelek 2022). Les cartes ont ensuite été importées au format ASCII dans Ecospace. Les cartes d'oiseaux et dauphins (été/hiver) sont importées dans la partie « Environmental driver » d'Ecospace. Une courbe de réponse linéaire est ensuite associée entre

les cartes et les compartiments correspondants (Annexe 2). La variation de distribution saisonnière (été/hiver) est incluse dans la partie External data en valeurs relatives de biomasse.

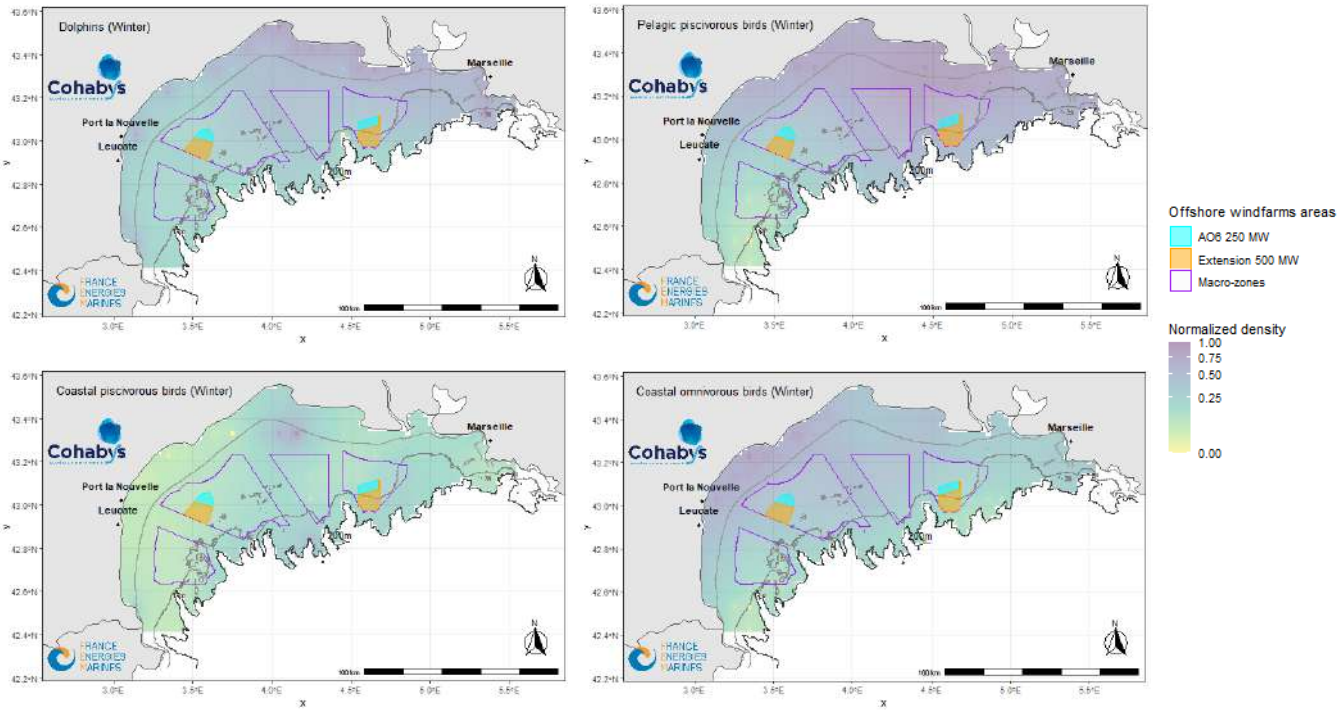


Figure 6 : Cartes de distribution de la mégafaune marine en hiver (dans l'ordre de gauche à droite Dolphins, pelagic piscivorous birds, coastal piscivorous birds et coastal omnivorous birds), interpolées sur la grille ECOSPACE à partir des cartes initiales de COHABYS

La spatialisation des engins de pêche a été effectuée par l'ajout des données du SIH (IFREMER SIH 2024). Une carte des secteurs de pêche découpant le plateau en huit zones et un jeu de données de captures recouvrant notre période de validation (2010-2019) ont été utilisés. Les données de captures ont été filtrées pour ne garder que les captures associées aux ports immatriculés dans les zones du golfe du Lion. Les captures étant stables par engin de pêche sur les cinq dernières années collectées (2010-2019) et sur l'ensemble des trimestres, les données de captures ont été moyennées sur cette période pour le calcul de nos cartes. Nous avons donc obtenu une carte de capture par engin de pêche, constante dans le temps. Les cartes ont été interpolées grâce à la même méthode (IDW) que les cartes de mégafaune. Elles sont ajoutées dans la partie habitat car elles sont constantes pendant toute la période étudiée (Annexe 11).

Certaines courbes des compartiments initiaux présentaient des discontinuités dans la réponse aux drivers environnementaux. Parmi elles, plusieurs ont été modifiées en concordance avec les données issues de la bibliographie (Fishbase, Sealifebase, FAO) pour équilibrer le modèle. On peut citer les courbes de *Diplodus vulga*, *Dicentrarchus labrax*, *Mullus barbatus*, Rays et *Homarus gammarus.* Dans son manuscrit, T. Seyer (in prep. 2024) explique cependant que le manque de données de chalutage et la rupture de pente ne sont probablement pas à l'origine des discontinuités dans les courbes de réponse. D'autres facteurs environnementaux, pas encore suffisamment étudiés, pourraient expliquer la forme de ces courbes.

Les valeurs de taux de dispersion sont exprimées en km et montrent la migration des espèces. Les dauphins sont des grands migrateurs donc cette valeur est fixée à 1000km et les compartiments oiseaux parcourent de longues distances entre la côte et le large donc les valeurs sont fixées à 300km.

Pour déterminer le modèle le plus réaliste par rapport aux données de référence nous avons réalisé trois scénarios de simulations pour la période 2010-2019 pour les comparer avec le modèle

GOLEM initial : un premier avec ajout de la spatialisation de la mégafaune marine et de la pêche (GOLEM_SMM_SF) ; un second avec ajout de la spatialisation de la mégafaune marine sans la spatialisation de la pêche (GOLEM_SMM) et un troisième sans aucun ajout de cartes de distribution (GOLEM_MM). Dans chacune de ces simulations la biomasse est forcée par Ecosim et l'effort de pêche est prédit par le modèle et non pas imposé par Ecopath (Tableau 4). A la suite de l'analyse des résultats, le modèle le plus pertinent sera choisi pour la réalisation des scénarios dans un contexte EMR (voir chapitre suivant).

Tableau 4 : Comparaisons des différents modèles testés.

	Période	*Compartiments oiseaux*	*Spatialisation pêche*	*Spatialisation MM*
GOLEM	2010-2019	1	Sans	Sans
GOLEM_SMM_SF	2010-2019	3	Avec	Avec
GOLEM_SMM	2010-2019	3	Sans	Avec
GOLEM_MM	2010-2019	3	Sans	Sans

2.4. Description des scénarios dans un contexte EMR

2.4.1. Base des scénarios : scénarios du SER

Le SER a cartographié différents scénarios illustrant les enjeux par façade maritime (SER 2024). La conduite des débats publics à la suite de la construction des premiers parcs a permis de mener à la production quatre scénario : le scénario « Hors zones de protection réglementaire de l'environnement », le scénario « Minimisation des coûts », le scénario « Loin des côtes » et le scénario « Equilibre ».

L'état initial est le golfe sans parcs. La pêche est maintenue, aucun changement dans le comportement de la mégafaune marine n'a lieu (GOLEM_SMM).

Le scénario hors zones de protection réglementaire de l'**environnement** est un scénario où seul l'AO6 est construit car l'ensemble de la zone est classée zone Natura 2000 ou Parc Naturel Marin. La modification des métiers de pêche et la perturbation de la mégafaune est donc réduite. Ce scénario sert de base pour les suivants, qui contiennent tous l'AO6 et extensions.

Le scénario **minimisation des coûts** pour la collectivité représente 6 parcs supplémentaires en Méditerranée, de grande superficie et proche des côtes. Il vise à limiter le coût final de l'électricité pour la collectivité en minimisant les coûts de construction et d'exploitation des parcs et de leur raccordement. 5 parcs sur 6 se trouvent au-delà des 12 milles nautiques. La majorité des captures des arts trainants ont lieu dans la zone supérieure aux 12 milles qui seront perturbés dans les zones de parcs flottants.

Le scénario très **loin des côtes** représente la construction de 3 parcs. Il exclut toute implantation de parc éolien en mer à moins de 20 milles nautiques. Cette hypothèse vise à minimiser la visibilité des parcs et à éviter les usages côtiers. Le raccordement des câbles électriques est très coûteux et induit beaucoup de pertes. Au-delà des 20 milles nautiques, la filière pêche bénéficie a priori d'une meilleure capacité de report. Néanmoins, les arts traînants dans les zones de raccordement pourraient être interdits.

Le scénario **équilibre** privilégie l'implantation au-delà des 12 milles nautiques afin de limiter la visibilité à la côte et les enjeux de cohabitation des usages. 5 nouveaux parcs éoliens flottants sont implantés en Méditerranée afin de valoriser les zones présentant le meilleur potentiel éolien sur la façade.

Le SER a fourni le shapefile du scénario équilibre. Les autres shapefiles ont été créés à partir des cartes disponibles dans le rapport du SER par géoréférencement sur QGIS (Figure 7 et Annexe 12). Les zones des parcs AO6 et extensions viennent du site (Eoliennes en mer 2024). Ces shapefiles ont ensuite été exportés au format ASCII pour importation sur Ecospace. Les fichiers ont été importés dans la partie drivers environnementaux pour permettre un lien entre la distribution des compartiments et l'emplacement des parcs. Ils ont aussi été importés dans la partie MPAs du modèle pour permettre la fermeture de la pêche dans ces zones.

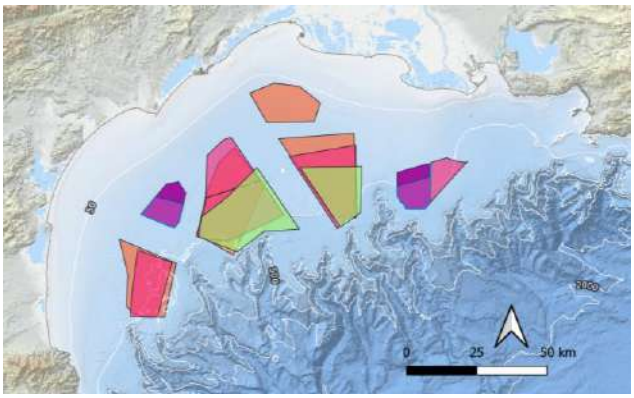


Figure 7 : Carte des scénarios du SER avec Environnement (en violet), Loin côtes (en vert), Réduction coûts (en orange) et Equilibre (en rose). Le fond de carte est la bathymétrie EMODNET.

2.4.2. Intégration des impacts des EMR dans les scénarios

2.4.2.1. Impact sur la pêche

Le Parlement Européen affirme que les parcs éoliens en mer peuvent avoir une incidence sur les pêcheries car ils modifient la répartition spatiale et l'abondance des espèces marines pêchées à des fins commerciales (Parlement européen 2021). Du fait de la présence des dispositifs d'ancrage et des câbles de liaison électrique, l'exercice de la pêche aux arts dormants et traînants dans ce champ revêt un risque pour la sécurité des navires de pêche et l'intégrité des structures (Breuer et Pepescu 2024). Cependant, la diversité des caractéristiques techniques et l'absence de retour d'expérience ne permettent pas d'édicter des règles définitives et uniformes sur les pratiques de pêche. La pêche aux arts dormants pourrait dans certains cas et pour certains métiers se poursuivre. Cependant, les arts traînants présentent un risque de croche avec les lignes d'ancrage et les câbles électriques. Les pratiques au sein des parcs seront donc réglementées pendant la phase de construction ainsi qu'en phase d'exploitation par les autorités. Si la navigation et la pêche sont restreintes au sein du parc éolien, cela peut entraîner une perte de la superficie de pêche ou encore une modification des trajets pour accéder à d'autres zones de pêche susceptibles d'occasionner une augmentation des coûts en carburant (Parlement européen 2021).

Dans le modèle, nous faisons l'hypothèse que les parcs seront entièrement fermés à la pêche pour tous les engins. L'effort ne sera pas défini par Ecopath mais prédit par Ecospace selon la répartition des captures.

2.4.2.2. Impact de la biocolonisation

L'implantation de structures solides en pleine mer implique la création d'uneffet récif. Cet effet est lié à la biocolonisation des structures immergées, aussi appelée biofouling, qui induit une modification de l'environnement marin dans lequel celles-ci sont déployées. La biocolonisation concerne potentiellement les liaisons mobiles, telles que les lignes d'ancrages et les câbles dynamiques, qui font le lien entre le fond et la surface. Afin de modéliser cet effet, nous avons récupéré des données

issues de l'analyse taxonomique des échantillons prélevés au large de Leucate et de Sausset-les-Pins sur des bouées (BOB : ferme pilote EFGL et CAP : bouée des phares) et balises (qui marquent l'un des sommets du PNM de la côte bleue). Les échantillons ont été prélevés à -2m après deux ans d'immersion. Ils ne sont malheureusement pas représentatifs de la diversité des organismes qui coloniseront les flotteurs puisque ceux-ci vont jusqu'à -14m.

Les espèces retrouvées en majorité dans les échantillons (99%) sont *Mytilus edulis* et *M. galloprovincialis*. Dans le modèle, le compartiment représentant ces espèces est le groupe « Filter feeder molluscs ». Pour représenter la création de biomasse sur les structures nous avons créé une seconde courbe de réponse des bivalves en plus de la dépendance à la profondeur. Nous avons utilisé la même valeur que celle calculée dans Nogues et al. (2022) pour définir un taux d'augmentation à l'intérieur du parc. La courbe de tendance est donc de 1 autour des parcs et de 2,2 à l'intérieur.

2.4.2.3. Impact comportemental sur la mégafaune marine

Le troisième effet auquel nous nous sommes intéressés est le comportement des oiseaux marins et dauphins par rapport aux parcs. Nous avons basé notre recherche bibliographique sur le comportement des oiseaux par rapport aux éoliennes en mer du Nord, Manche et mer baltique sur de l'éolien posé.

L'évitement peut être de trois types : macro (évitement total des parcs éoliens et zone tampon jusqu'à 3 km), méso (évitement des éoliennes à l'intérieur du parc, zone tampon autour du rotor) et micro (évitement de dernier moment pour éviter la collision) (Zoutenbier et al. 2020). Selon (Fox et Petersen 2019), l'effet barrière a un impact particulier sur les oiseaux nicheurs en déplacement, car ils se déplacent entre les zones de recherche de nourriture en mer et une colonie de reproduction plusieurs fois par jour, ce qui entraîne des coûts énergétiques. Enfin, les risques de collision sont la principale préoccupation environnementale. Cependant, nous n'avons pas modélisé ce risque dans notre étude.

Plusieurs études ont pu fournir des informations sur l'évitement des parcs par les fou de bassan. D'après (Leemans et Collier 2022), cette espèce avait diminué de 98% à l'intérieur des parcs. Les informations sur la mouette pygmée et autres puffins sont assez limitées mais suggèrent un évitement global de toutes les espèces d'oiseaux pélagiques (Figure 8, Krijgsveld 2014).

	number of studies					
	AV	AV/I	I	ATT/AV	ATT	total
other seabirds	27	3	0	1	2	33
cormorants	0	0	1	0	3	4
gulls	5	0	21	1	11	38
terns	1	4	0	0	2	7
migrating landbirds	4	0	8	0	0	12

Figure 8 : Comportement des oiseaux marins par rapport aux parcs (AV : évitement, I : indifférent, ATT : attraction) (Krijgsveld 2014)

Les sternes semblent être attirées autour des parcs mais sont présentes en plus faible densité à l'intérieur (Dierschke, Furness, et Garthe 2016).

Les espèces de goéland retrouvés en mer du Nord et Atlantique semblent être attirées par les parcs. Ce sont les espèces aux hauteurs de vol les plus élevées, les rendant potentiellement plus sensibles aux risques de collision (> 30% des individus volent à hauteur des pâles (Migralion 2021)). Ainsi, les goélands marins et argentés voient leur densité multipliée par 3.9-4.9 et 5.3-6.6 respectivement à l'intérieur des parcs (Leemans et Collier 2022). D'autres études suggèrent une attraction des goélands en périphérie des parcs avec un évitement à l'intérieur. Cela suggère un conflit entre les forces opposées du macro-évitement du parc éolien dans son ensemble et de l'attraction vers les éoliennes individuelles, où les oiseaux sont soupçonnés de profiter des possibilités de repos ou de point de vue (Vanermen et al. 2020). L'évitement de l'intérieur des parcs éoliens contredit l'hypothèse selon laquelle les parcs éoliens

offshore attirent les goélands en raison d'une disponibilité accrue de nourriture résultant des effets de récif artificiel sur et autour des fondations des turbines (De Mesel et al. 2015), ou alternativement, en raison d'une augmentation de la productivité benthique ou de l'abondance de poissons pélagiques due à l'absence de pêche à l'intérieur des parcs éoliens (Coates et al. 2016). Étant donné que les navires de pêche ne sont pas autorisés à chaluter à l'intérieur des parcs éoliens, la faible présence de goélands à l'intérieur du parc éolien pourrait également être due à un évitement passif résultant de l'absence de pêche (Leopold et al., 2013).

Les interactions des dauphins avec une activité humaine de pêche (bateau ou engin de pêche) sont relativement fréquentes dans le golfe du Lion. Lorsque les grands dauphins ont le choix de se nourrir derrière les chalutiers, on constate que 74,2 % des individus choisissent de se nourrir à l'arrière des chalutiers et 0,8 % autour de filets (Di-Méglio et al. 2015). Si ce type d'association est présent tout au long de l'année dans le Golfe du Lion, c'est en été, au printemps et à l'automne que l'association avec les chalutiers semble être la plus importante (entre 79 et 84 % des individus), tandis qu'en hiver les dauphins s'alimentent aussi indépendamment de ces activités humaines (47,2 %) (Di-Méglio et al. 2015). On peut donc s'attendre à une diminution de la biomasse des dauphins à l'intérieur des parcs en réponse à l'interdiction des engins de pêche dans ces zones. L'évitement des parcs serait donc une conséquence indirecte de l'installation des parcs.

Les différents scénarios étudiés en association avec les hypothèses d'impacts sont listés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Modèles correspondants aux différents scénarios

	Superficie (km²)	*Distance côte*	*Fermeture pêche*	*Biofouling*	*Impact MM*
Loin cotes	1200	> 20 milles	oui	oui	oui
Equilibre	1675	> 12 milles	oui	oui	oui
Environnement	300	> 12 milles	oui	oui	oui
Reduction couts	1895	> 3 milles	oui	oui	oui
GOLEM_SMM	/	/	non	non	non

3. Résultats

3.1. Comparaison de GOLEM et du modèle modifié

Dans ce chapitre, les résultats du nouveau modèle développé dans ce travail, GOLEM_SMM, seront présentés et analysés par comparaison avec le modèle initial GOLEM.

3.1.1. Comparaison Ecopath

Le diagramme du réseau trophique GOLEM_SMM est illustré à la Figure 9.

Les invertébrés représentent 68,2 % de la biomasse totale (groupes de détritus exclus), contre 23,4 % pour les vertébrés. Le groupe le plus important en termes de biomasse est le mésozooplancton avec 8,7 %, tandis que les trois petits pélagiques représentent ensemble 10,9 % (*S. pilchardus, S. sprattus* et *E. encrasicolus*), alors que les dauphins et les oiseaux marins représentent qu'une infime partie de la biomasse (0,032%), qui est déjà trois fois supérieure au modèle initial (< 0,01 %) (Annexe 13).

La proportion de mortalité par pêche par rapport à la mortalité par prédation n'a pas été modifiée. Dix-huit groupes présentent toujours une mortalité par pêche supérieure à la mortalité par prédation (comme octopuses, crustivorous fishes 2 et *Scomber scombrus*). Les trois groupes les plus pêchés sont

Sparus aurata, Merluccius merluccius et *Engraulis encrasicolus*. *E. encrasicolus* présente une mortalité par pêche inférieure à sa mortalité par prédation. Les groupes les plus consommés sont le nanoplancton, les détritus, le picoplancton, le microphytoplancton et le mésozooplancton, représentant respectivement 32,8 %, 19,8 %, 16 %, 7,3 % et 5,7 % de la consommation totale. La consommation de vertébrés ne représente que 0,63 % de la consommation totale. Du côté des consommateurs, les groupes de zooplancton sont responsables de 54,5 % de la consommation totale, les autres invertébrés de 38,4 % et les vertébrés de 7 %.

Le modèle a un pedigree global de 0,62 contre 0,63 pour le modèle initial, il est donc très satisfaisant (Colléter et al. 2015).

Prionace glauca, Squalus acanthias et les dauphins présentent les niveaux trophiques les plus élevés, soit respectivement 5,2, 5,0 et 4,8 (au lieu de 4,94 dans GOLEM pour le dauphin) (Annexe 13). Seize autres groupes ont un niveau trophique supérieur à 4, dont rays et *Conger conger*, ainsi que les compartiments d'oiseaux qui sont passés de 3,8 à 4,2 (coastal omnivorous), 4,47 (coastal piscivorous) et 4,5 (pelagic piscivorous) dans GOLEM_SMM.

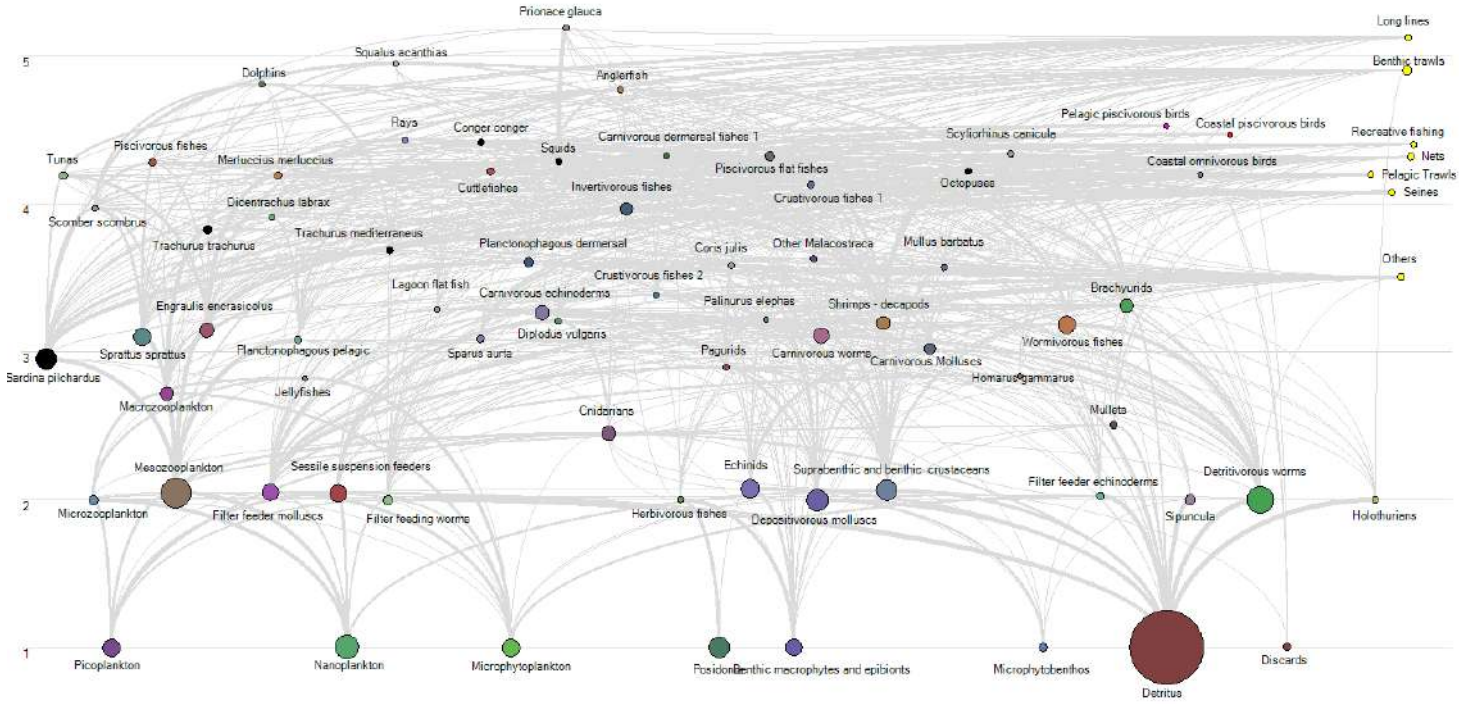
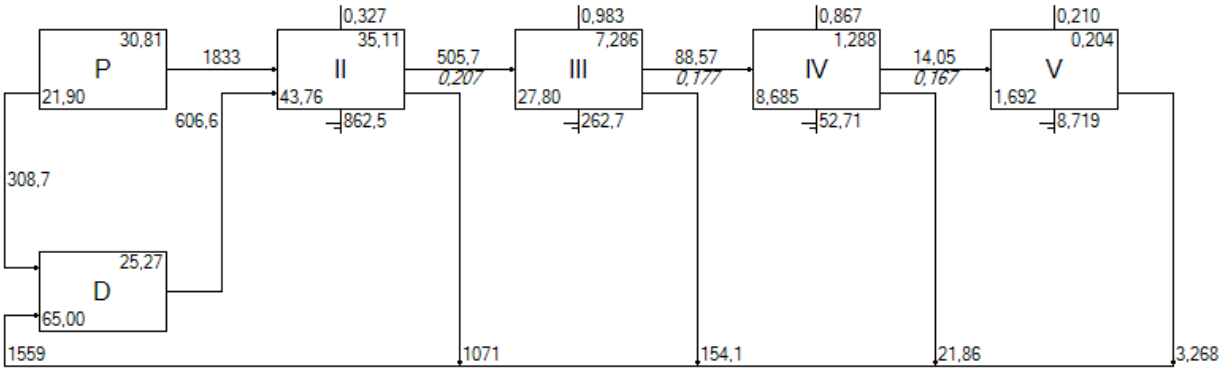


Figure 9 : Diagramme trophique de GOLEM_MM

Le graphique Lindeman (Figure 10) montre que la majorité des flux vers les détritus à partir des niveaux trophiques inférieurs et de la respiration, se produit au niveau trophique II. Ce niveau contient 35,1 % du flux total du système et 43,8 % de la biomasse totale (détritus exclus).



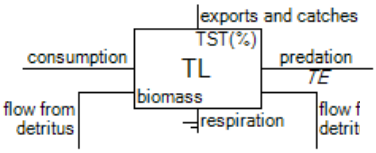


Figure 10 : Diagramme de Lindeman de GOLEM_MM

Les flux d'exportation et de captures, dominés par les pêcheries, sont plus importants pour les niveaux trophiques III et IV. Le niveau trophique moyen des captures de 3,47, il n'a pas été modifié par rapport à GOLEM.

Le MTI (Annexe 14) montre que le groupe de mésozooplancton joue un rôle important dans le réseau alimentaire, avec un impact négatif direct relativement élevé sur ses proies (pico, nano et microzooplancton) et sur lui-même (par la compétition) et un impact positif sur ses prédateurs (4 groupes de petits poissons pélagiques planctonophages). Les invertébrés suprabenthiques/benthiques et les groupes de décapodes ont un impact généralisé, étant la proie de nombreux groupes de niveaux trophiques supérieurs. Les crustivorous fishes 2 ont un fort impact négatif direct sur les méduses, dont ils sont les seuls prédateurs dans ce modèle. Enfin, les pêcheries ont un fort impact négatif sur de nombreux poissons de niveaux trophiques élevés et intermédiaires. L'impact négatif le plus élevé est exercé par les chaluts benthiques sur *Squalus acanthias et Scyliorhinus canicula*, par les filets sur *Palinurus elephas* et par les palangres sur *Prionace glauca*. Dans l'ensemble, les groupes avec l'impact négatif le plus élevé (MTI cumulés) sont, par ordre décroissant, les chaluts benthiques (−4,1), les filets (−2,8) et les échinodermes carnivores (−1,6). En revanche, les trois groupes ayant les impacts positifs cumulés les plus élevés sont, par ordre décroissant, les détritus (4,7), le microphytoplancton (2,3) et le nanoplancton (2,1). La différence relative du MTI de GOLEM_SMM moins GOLEM montre quels compartiments ont un effet modifié par rapport au modèle initial (Figure 11). Les compartiments les plus touchés sont ceux de la mégafaune marine et de *Scomber scombrus*. L'impact de *Scomber scombrus* sur l'ensemble des compartiments est globalement moins fort.

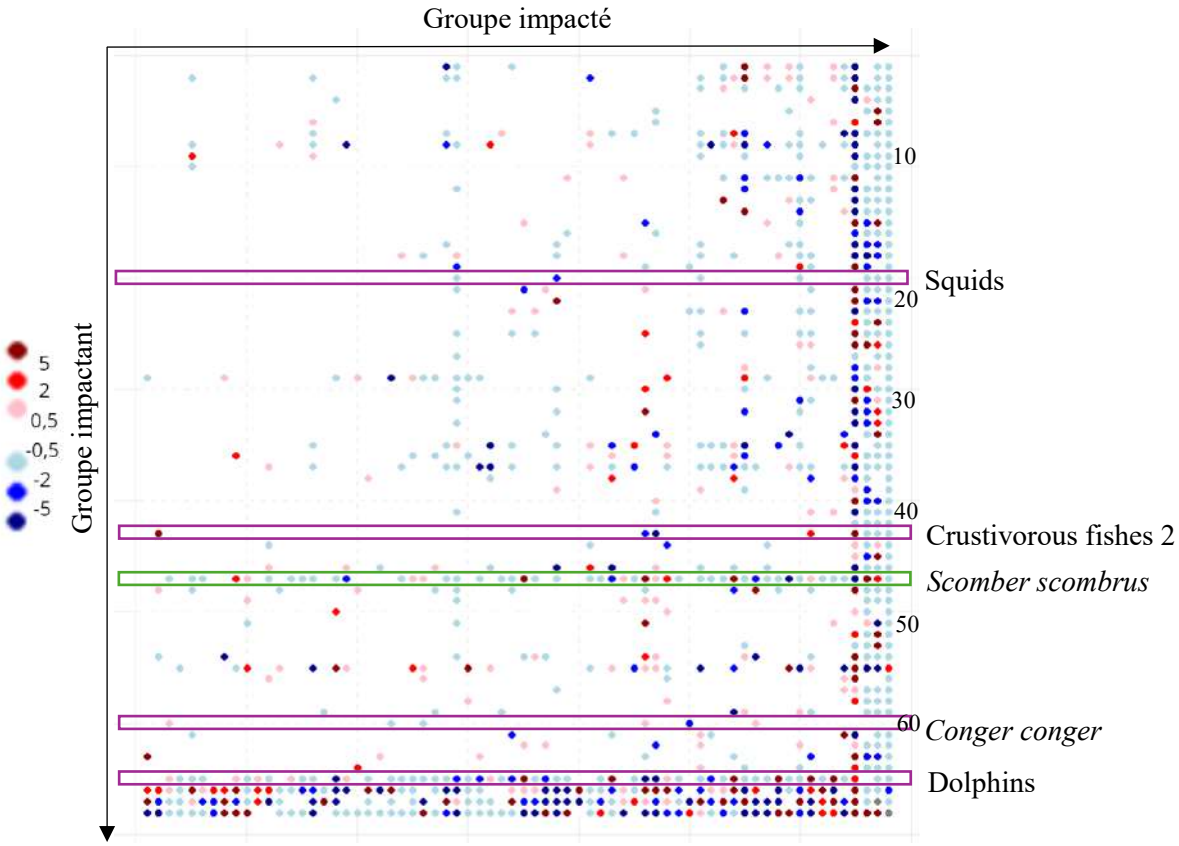


Figure 11 : Matrice de différence relative de MTI (GOLEM_MM – GOLEM / GOLEM). Les espèces clef-de-voûte sont encadrées en violet.

Concernant l'indice de keystoneness (Valls et al. 2015) les quatre espèces clef-de-voûte du système sont crustivorous fishes 2, squids, *Conger conger* et dolphins (en orange). Dolphins est devenu une espèces clef-de-voûte dans le nouveau modèle GOLEM_SMM. Le graphique de keystoneness selon Power et al. (1996) donne une valeur plus élevée aux espèces ayant une faible biomasse (Figure 12). Dans ce cas, les espèces clef-de-voûte sont les trois compartiments d'oiseaux marins (en bleu). Dans le modèle initial, on y trouvait aussi les dauphins et le congre.

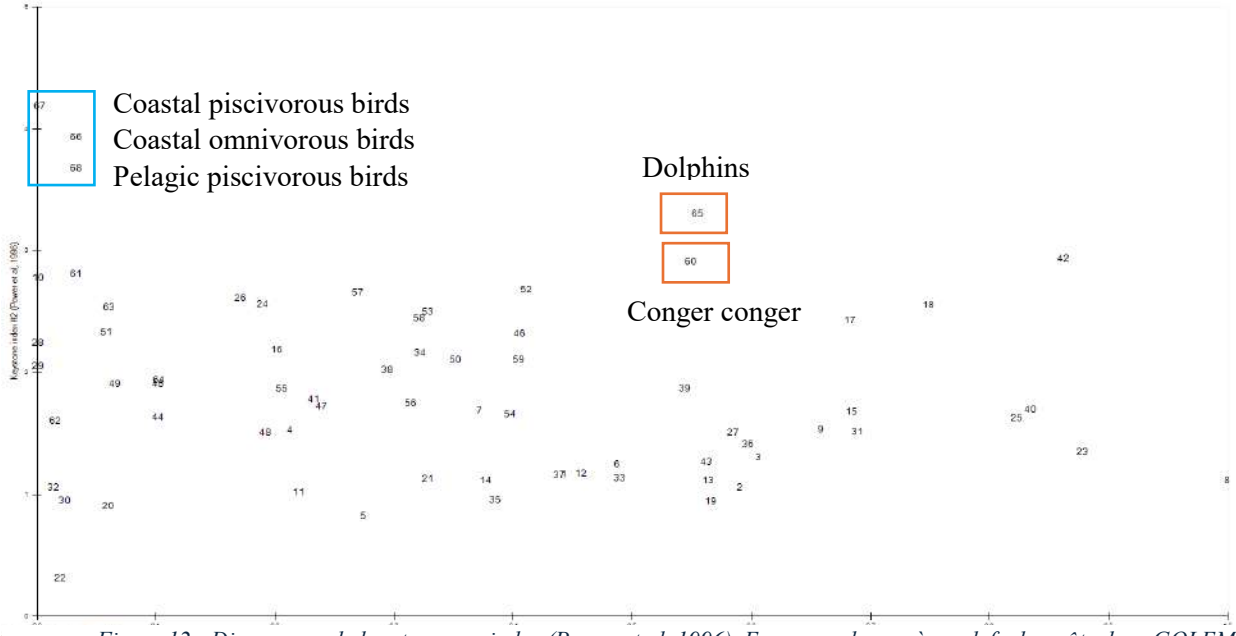


Figure 12 : Diagramme de keystoneness index (Power et al. 1996). En orange les espèces clefs-de-voûte dans GOLEM et en bleu les espèces clef-de-voûte dans GOLEM_MM.

3.1.2. Comparaison Ecosim

Afin d'évaluer l'influence des différentes modifications apportées au modèle GOLEM de base sur la capacité du modèle à reproduire les variations temporelles observées lors des campagnes MEDITS, les courbes de variations de biomasse des 33 groupes disposant de données observées ont été comparées pour les deux modèles (Figure 13). Les courbes étudiées dans cette partie sont les séries temporelles d'Ecosim, représentées en pointillés.

Figure 13 : : Comparaison des variations temporelles de biomasses issues de deux modèles Ecosim et quatre modèles issus d'Ecospace pour les compartiments ayant des données de référence tirées des campagnes MEDITS (2010-2019).

GOLEM_MM : GOLEM Marine Megafauna
GOLEM_SMM : GOLEM Spatialized Marine Megafauna
GOLEM_SMM_SF : GOLEM Spatialized Marine Megafauna and Spatialized Fishing

Les sorties d'Ecosim de GOLEM et GOLEM_MM varient à la suite de l'ajout de quatre séries temporelles et de la nouvelle calibration.

10 séries temporelles sont plus proches des données de référence dont *Conger conger*, *Trachurus trachurus* et octopus ($SS_{GOLEM_MM} < SS_{GOLEM}$-0,5), 3 séries s'éloignent comme echinids et *Engraulis encrasicolus* ($SS_{GOLEM_MM} > SS_{GOLEM}$+0,5), et 20 sont équivalentes comme squids et *Sardina pilchardus* ($SS_{GOLEM_MM} = SS_{GOLEM}$±0,5) (Annexe 15). Malgré le nombre plus important de séries améliorées, la différence de biomasse totale de ces compartiments entraîne un SS total plus élevé dans le modèle modifié que dans GOLEM (SS_{GOLEM} = 352,8 ; SS_{GOLEM_MM} = 390,4). Une conclusion importante est que la modification des compartiments de la mégafaune marine et la nouvelle calibration n'ont pas déséquilibré le modèle.

3.1.3. Comparaison Ecospace

Sur la Figure 13 sont présentées les courbes temporelles de quatre modèles issues d'Ecospace, GOLEM, GOLEM_MM, GOLEM_SMM et GOLEM_SMM_SF (ces courbes sont l'intégration de toutes les cellules du domaine). Les trois modèles issus de GOLEM semblent plus proches des points de référence pour la plupart des compartiments comme planctonophagous pelagic. Ce compartiment reste cependant à améliorer étant donnée la tendance croissante sans ralentissement des courbes. Sur la Figure 14, la réduction de biomasse totale est bien visible avec une baisse de 50% sur l'ensemble du golfe excepté une augmentation de 100% au centre près des canyons.

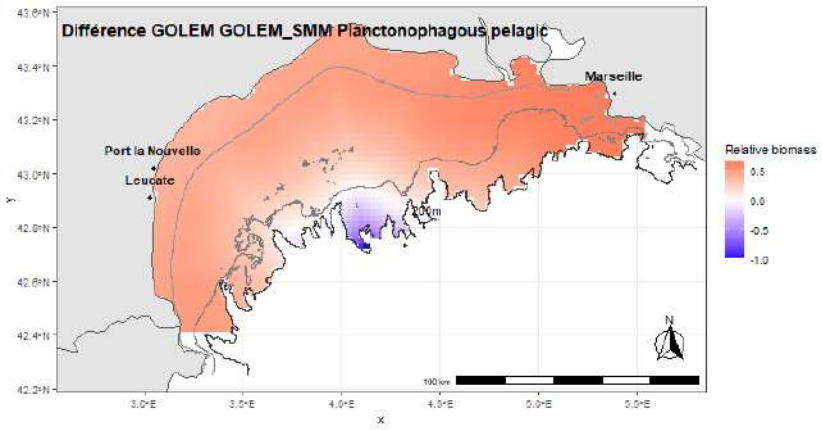


Figure 14 : Différence de biomasse relative (GOLEM - GOLEM_SMM / GOLEM) pour le compartiment Planctonophagous pelagic en moyenne sur 2019

Entre GOLEM_SMM et GOLEM_MM les distributions des dauphins et oiseaux marins ont été rajoutées (Figure 6). Peu de différences sont visibles entre ces deux modèles (Figure 13), excepté pour les proies principales du dauphin (*Sardina pilchardus, Engraulis encrasicolus* et *Scomber scombrus*). La biomasse de *Scomber scombrus* diminue de 35% (Figure 15 - A). En revanche, certains compartiments ne sont pas stables à la fin de la simulation. La biomasse de *Trachurus mediterraneus* augmente de 110% (Figure 15 – B) mais cette croissance reste mieux calibrée que dans le modèle initial.

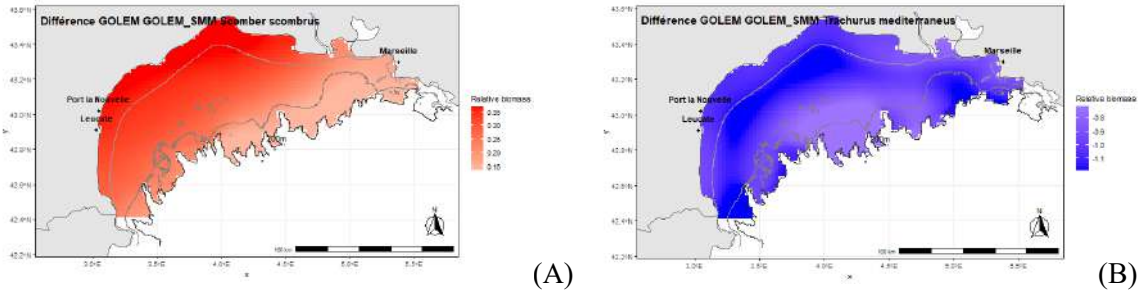


Figure 15 : Différence de biomasse relative entre GOLEM ET GOLEM_SMM pour le compartiment Scomber scombrus (A) et Trachurus mediterraneus (B) en moyenne sur 2019

Les distributions spatiales de biomasses des dauphins et oiseaux marins ne sont pas forcées dans le modèle initial, donc la différence obtenue est finalement la distribution imposée (Figure 16).

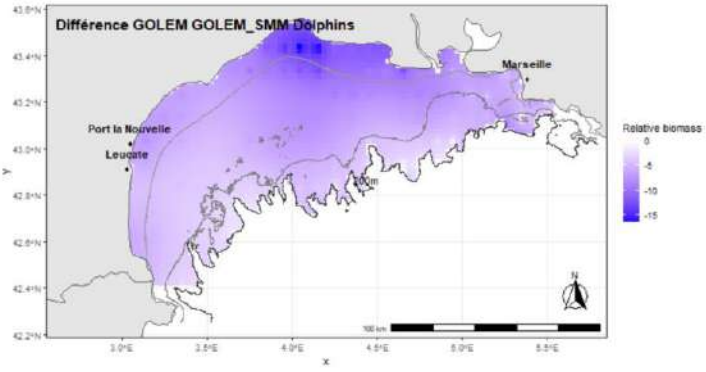


Figure 16 : Différence de biomasse relative entre GOLEM et GOLEM_SMM pour le compartiment Dolphin en moyenne sur 2019

Le modèle GOLEM_SMM_SF utilise les cartes de répartition des captures pour chaque engin (Annexe 11). Parmi les trois modèles modifiés, il suit moins bien les données, spécialement pour les compartiments correspondant aux espèces les plus pêchées (octopus, *Conger conger* et anglerfish).

L'analyse des différentes courbes montre donc que le modèle GOLEM_SMM est le plus proche des données de référence et le plus équilibré. **On décide donc de conserver GOLEM_SMM qui semble le plus pertinent pour la réalisation des premiers scénarios de parcs éoliens flottants.**

3.2. Comparaison des scénarios d'impacts cumulés

Ce chapitre présente les résultats des différents scénarios ECOSPACE dans un contexte EMR. Pour différents indicateurs (biomasses, catchs…), des comparaisons sont effectués en calculant une différence relative : elle est calculée en effectuant une soustraction entre le scénario de référence (GOLEM_SMM) et les scénarios, divisée par la valeur du scénario de référence.

3.2.1. Effets des parcs sur la distribution spatiale des biomasses

La Figure 17 (figure inspirée de Serpetti et al. (2021)) synthétise les différences de biomasses relatives entre les scénarios sous forme de boxplot. Elle montre un changement de la distribution spatiale ou temporelle des compartiments très important pour certaines espèces comme octopuses (Figure 21) et coastal omnivorous birds (Figure 23). Les médianes sont toutes très proches, montrant que les biomasses n'ont pas été modifiées dans les scénarios. Le scénario créant le plus de variabilité est le scénario « Réduction des coûts » et à l'inverse celui qui en crée le moins est le scénario « Environnement ».

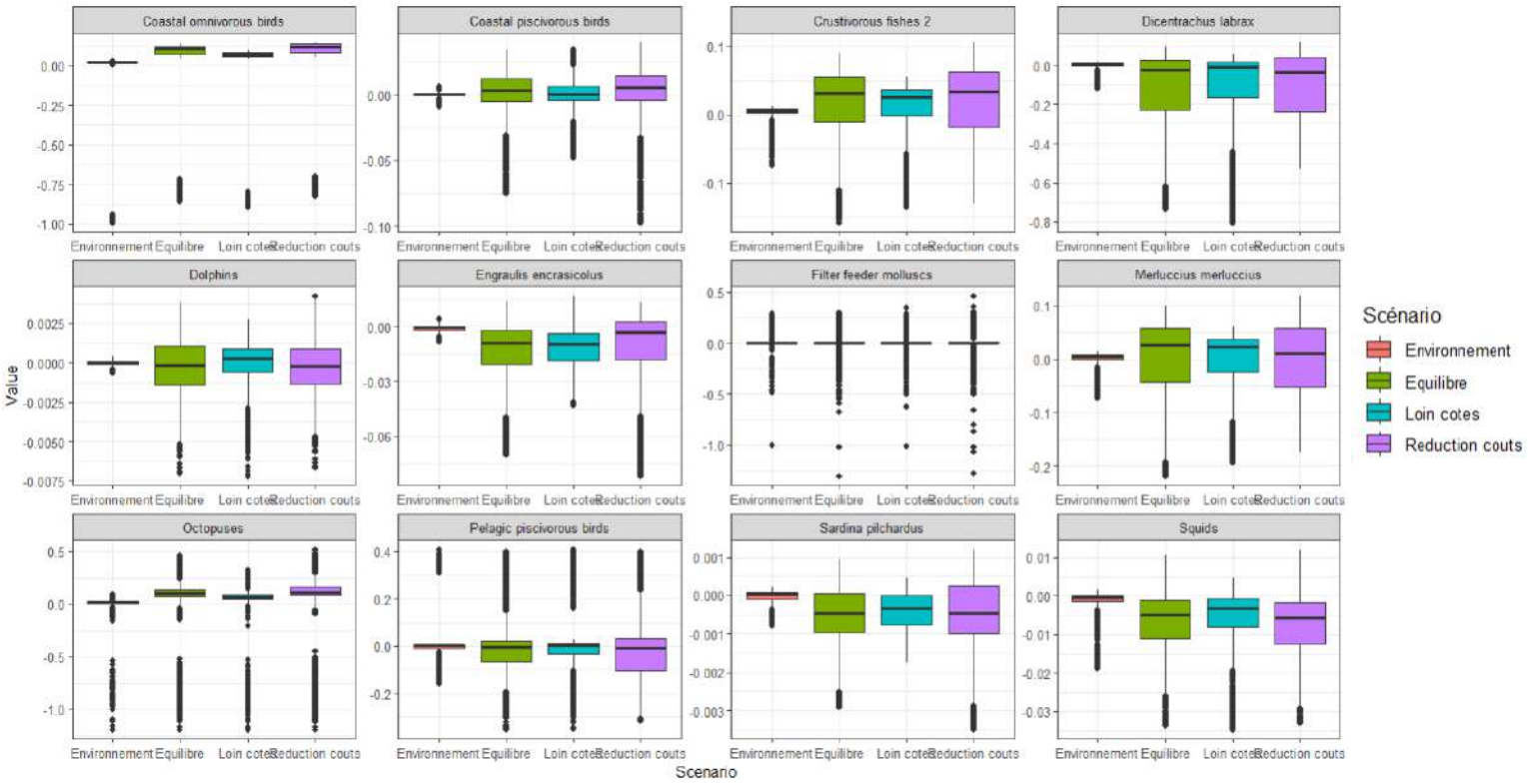
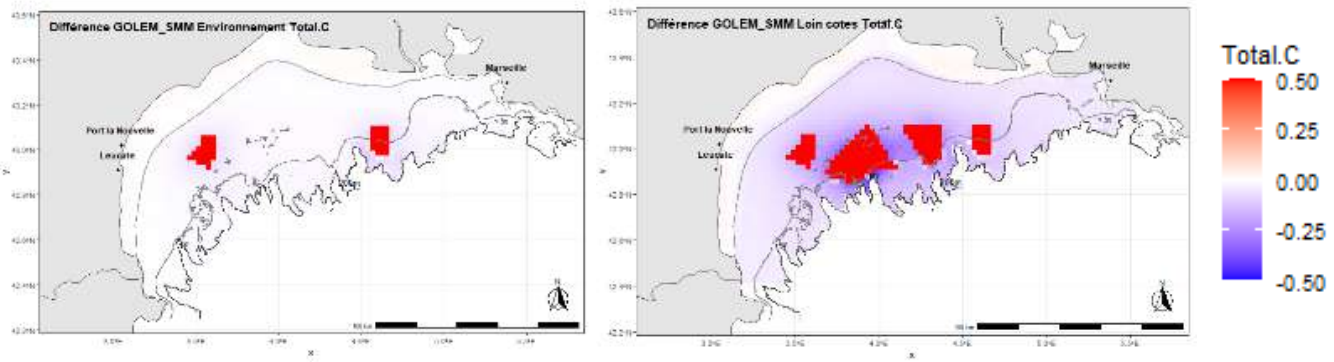


Figure 17 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour 12 compartiments en moyenne sur 2019

3.2.2. Impact de la fermeture des pêches

L'étude de l'impact de la pêche passe par l'observation des captures totales, des biomasses commerciales totales et des biomasses de certaines espèces d'intérêt halieutique.

Les engins étant interdits dans les zones des parcs, les captures à l'intérieur de ceux-ci sont nulles (Figure 18). Les zones autour subissent une augmentation de la pression de pêche en raison du déplacement de l'effort de pêche et profitent potentiellement de l'effet réserve en périphérie des parcs (les captures augmentent jusqu'à 50%).



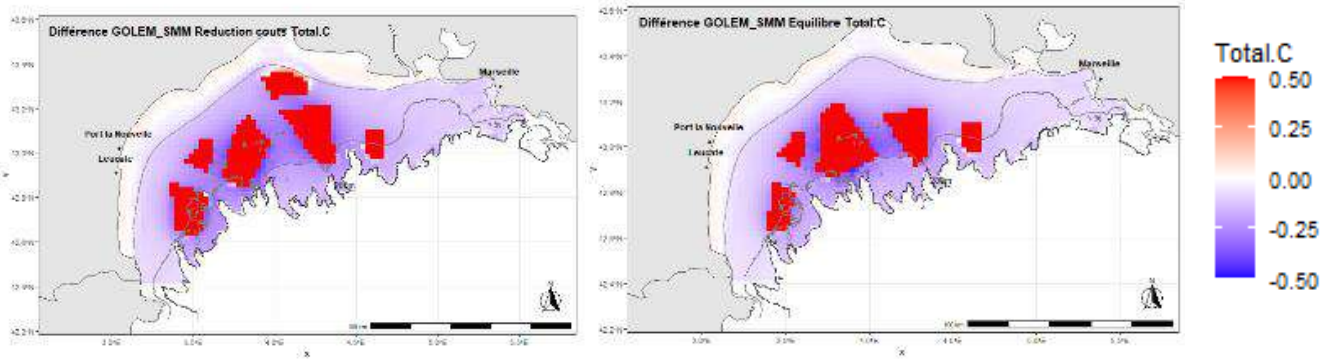


Figure 18 : Différence relative de captures totales en moyenne sur 2019 entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

L'augmentation de biomasse des espèces commerciales à l'intérieur des parcs n'est pas aussi importante que ce à quoi on pouvait s'attendre (Figure 19). Une diminution de la biomasse commerciale de 1% près des côtes et autour des parcs est visible en raison du déplacement de l'effort de pêche suite à la fermeture de grandes zones aux engins de pêche. De plus, le spillover apparaît autour des parcs comme décrit par Halouani *et al.* (2020), montrant l'attraction d'individus, donc une meilleure capturabilité en périphérie des parcs.

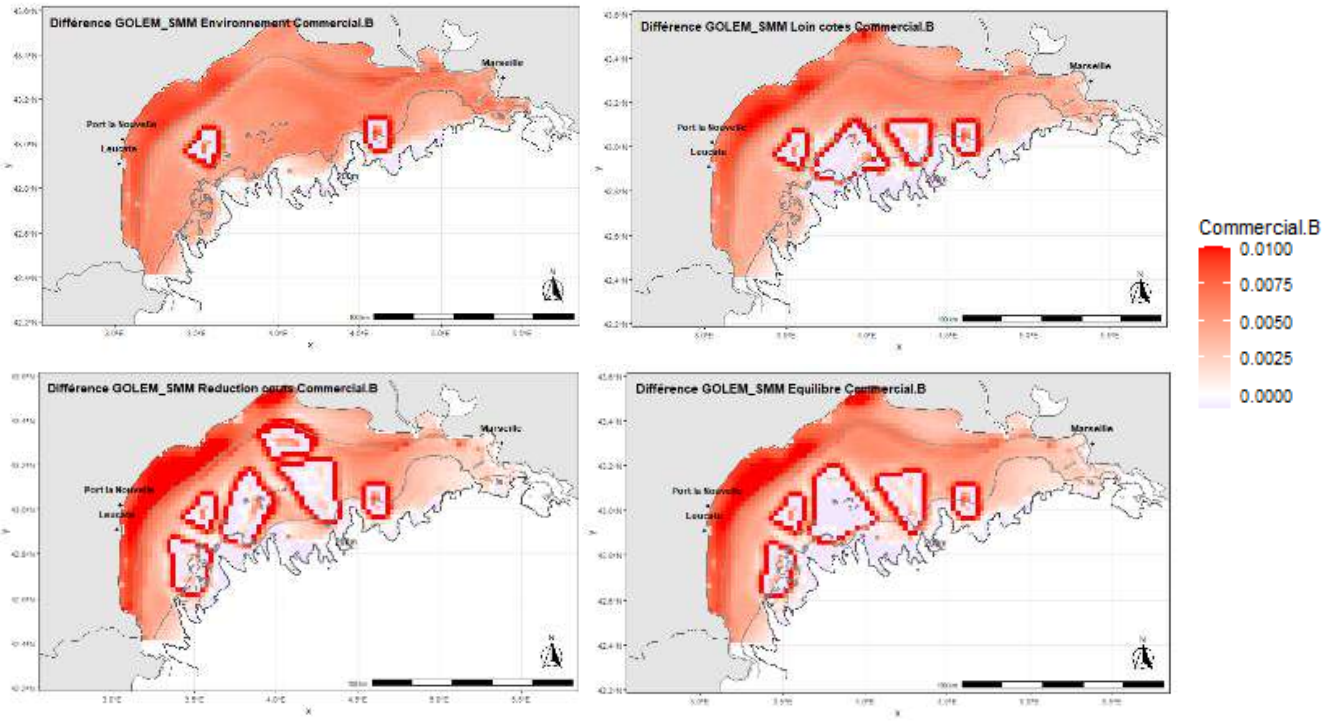


Figure 19 : Différence de biomasse relative des espèces commerciales entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

On s'intéresse aux effets de l'installation des parcs sur deux espèces : *Engraulis encrasicolus* (Figure 20) et octopuses (Figure 21). Leur réponse par rapport à l'exploitation des parcs est très différente. La zone des parcs est très peu marquée pour les anchois, à l'inverse des octopuses.

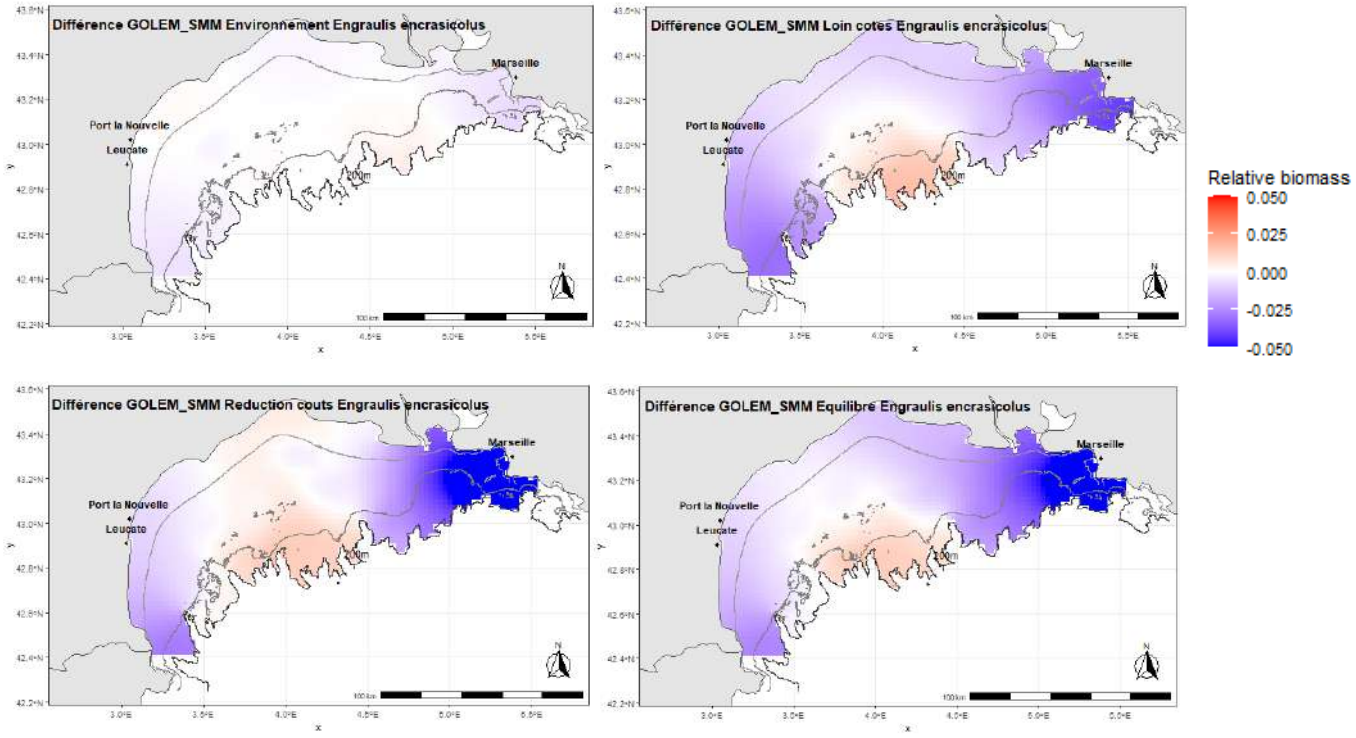


Figure 20 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Engraulis encrasicolus en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

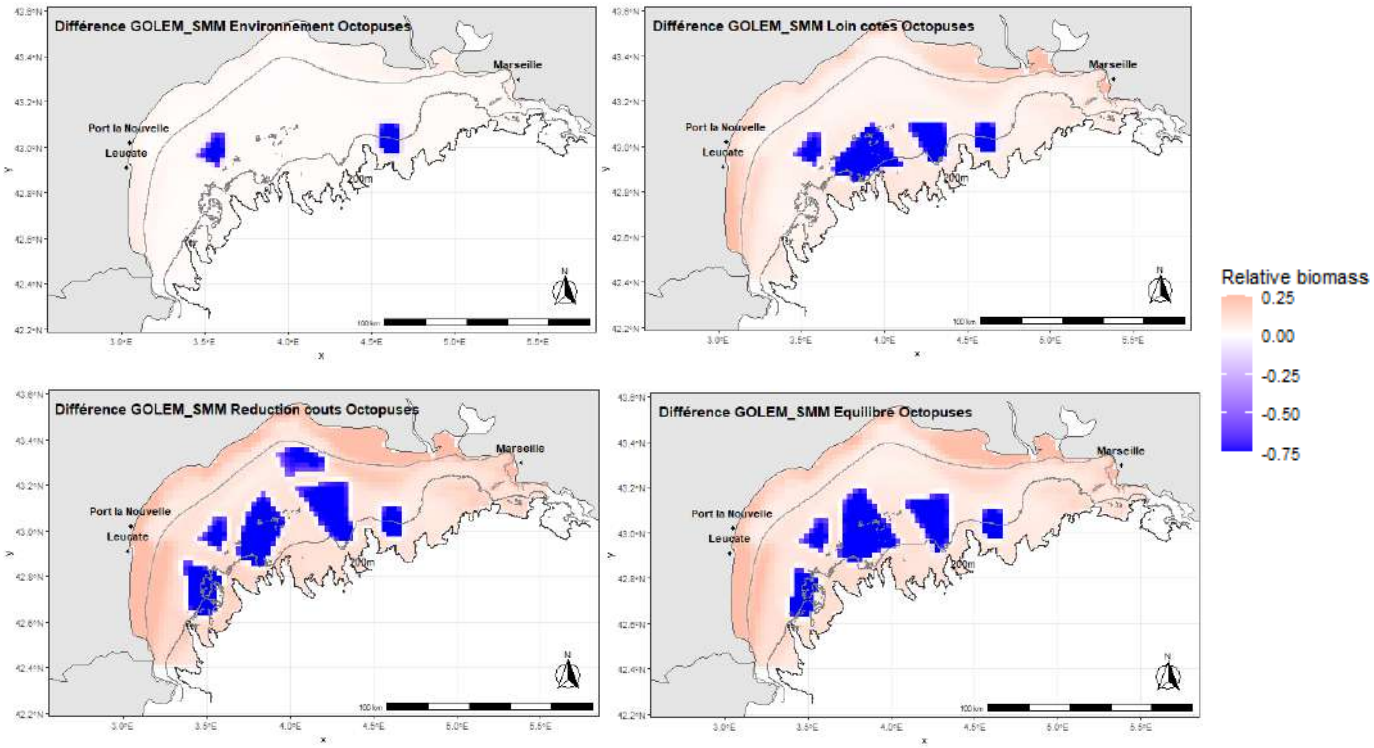


Figure 21 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Octopuses en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

L'augmentation des espèces cibles de la pêche dans les parcs permet le développement d'espèces en compétition avec les engins de pêche comme *Scomber scombrus*, ce qui permet son augmentation dans les parcs (Figure 22).

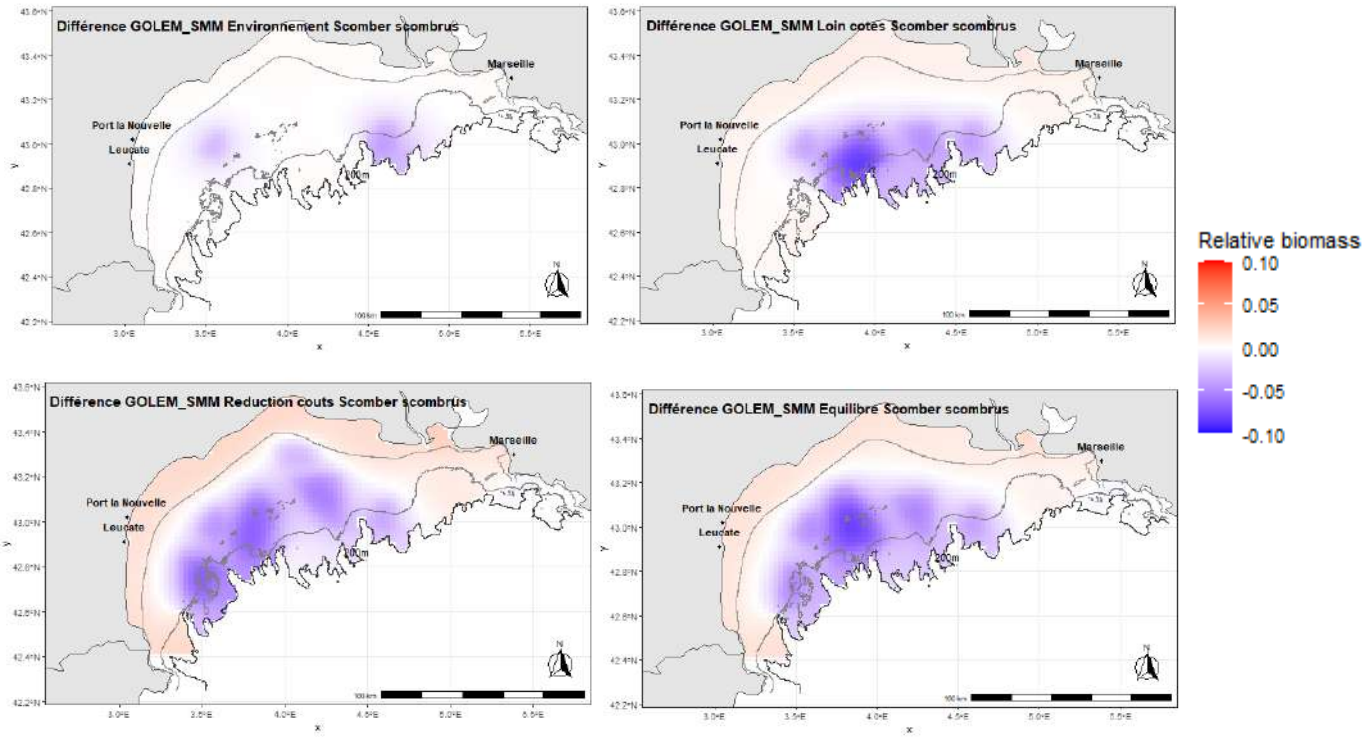
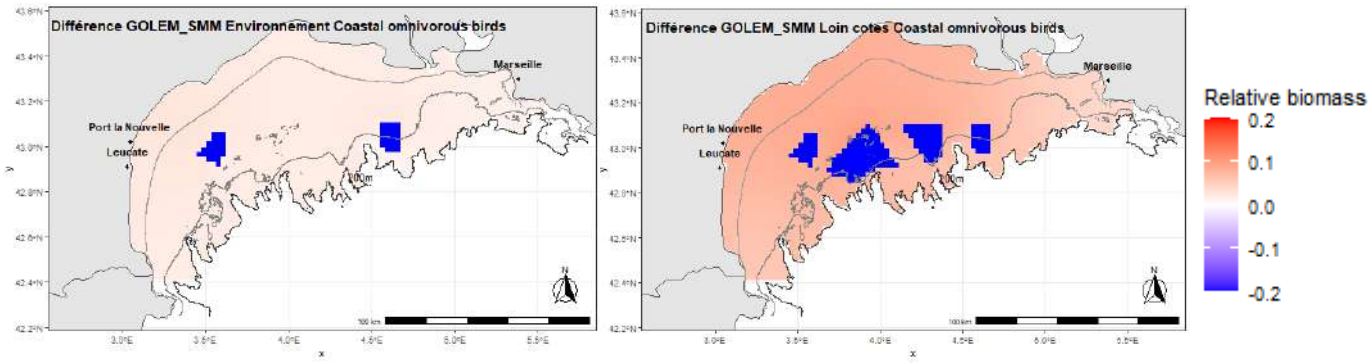


Figure 22 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Scomber scombrus en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

3.2.3. Effets des parcs sur la mégafaune marine

Le compartiment coastal omnivorous birds augmente de 50% dans les parcs, ce qui avait été défini dans la courbe de réponse. Aucune dynamique particulière ne ressort à l'extérieur des parcs (Figure 23).



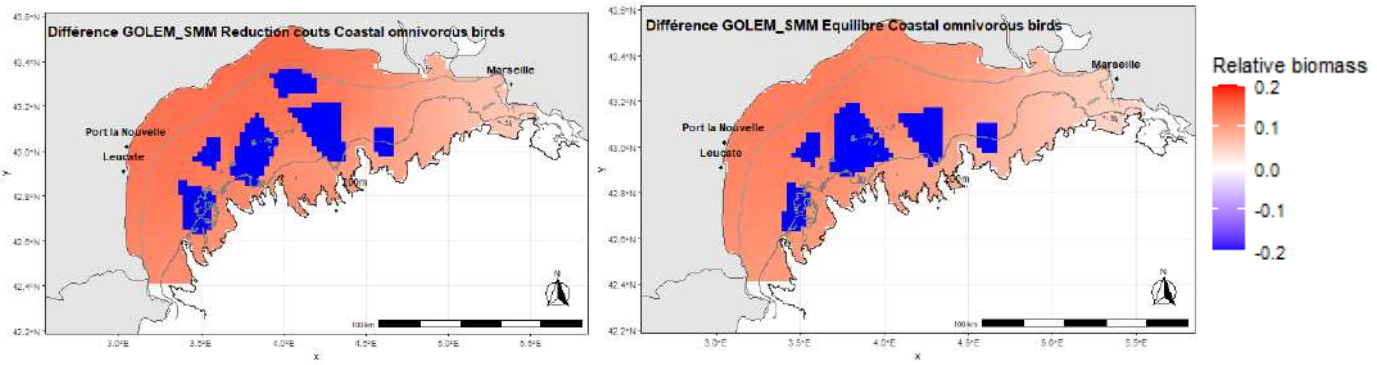


Figure 23 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Coastal omnivorous birds en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

Les oiseaux côtiers piscivores sont repoussés par les parcs sachant qu'aucune courbe de réponse n'a été appliquée (Figure 24). Une augmentation de 2% près des côtes et une diminution de 2% a lieu dans les zones des parcs.

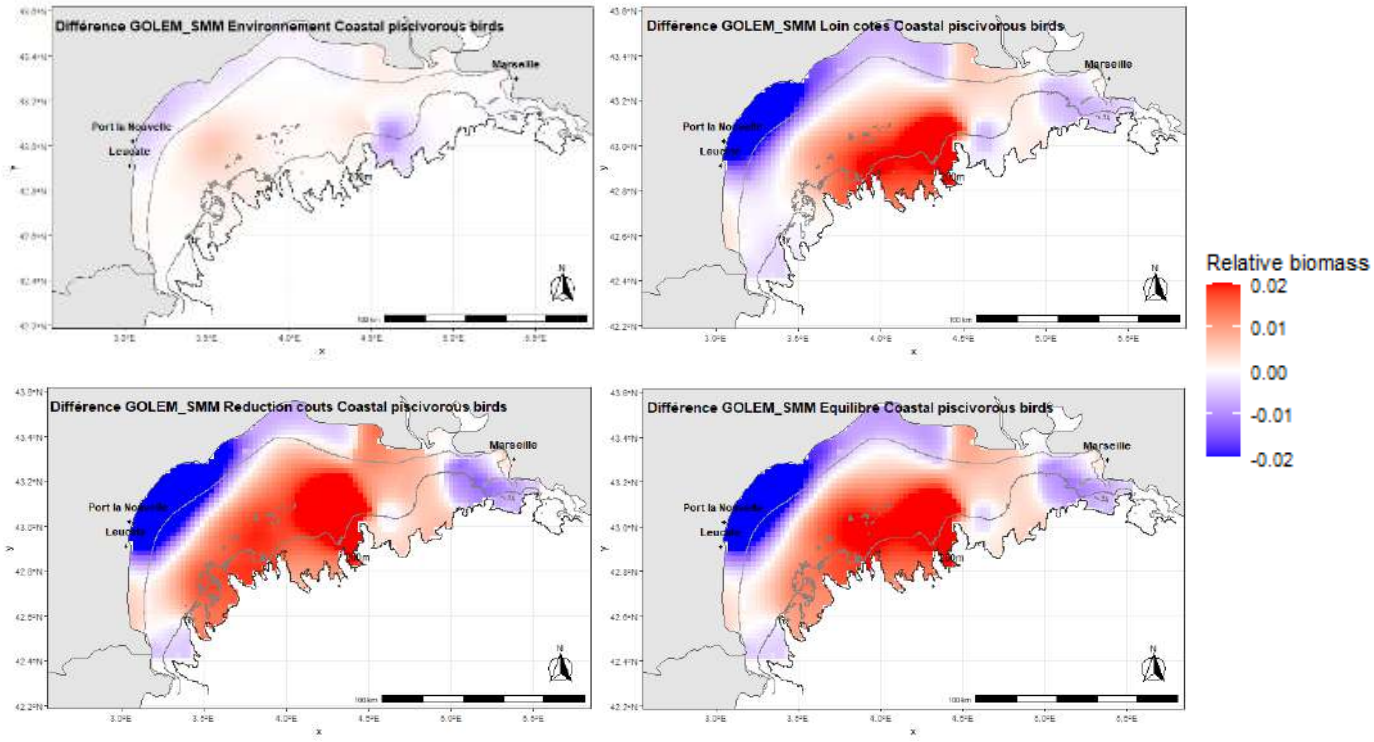


Figure 24 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Coastal piscivorous birds en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

Les oiseaux pélagiques sont repoussés par les parcs d'après les courbes de réponse. Une augmentation de 10% autour des parcs montre un lien avec les proies qui s'y développent (Figure 25).

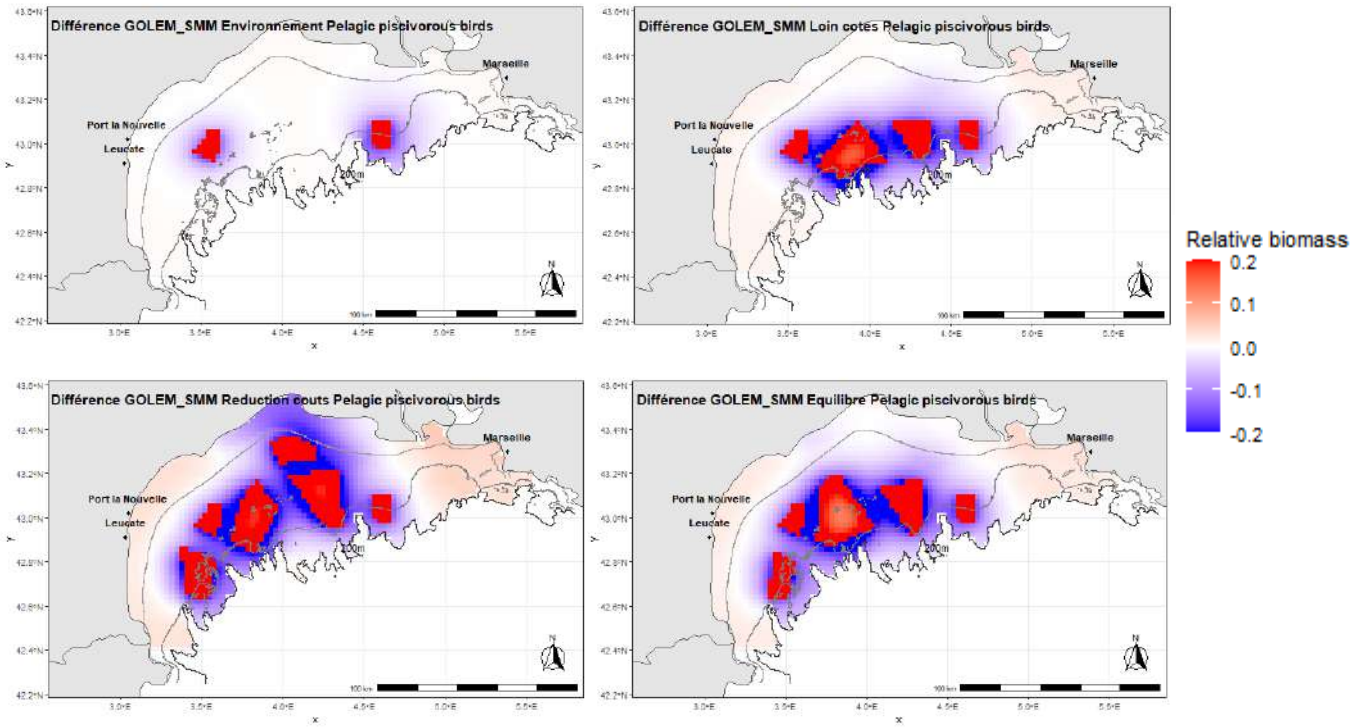


Figure 25 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Pelagic piscivorous birds en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

Pour finir, les dauphins semblent être attirés par les zones de parcs. L'effet est très léger (0,5%) mais la tendance est assez claire (Figure 26). Lorsque le scénario implique une grande superficie (Réduction des coûts), la zone d'attraction du dauphin est plus large que pour le scénario ayant les plus petits parcs (Environnement).

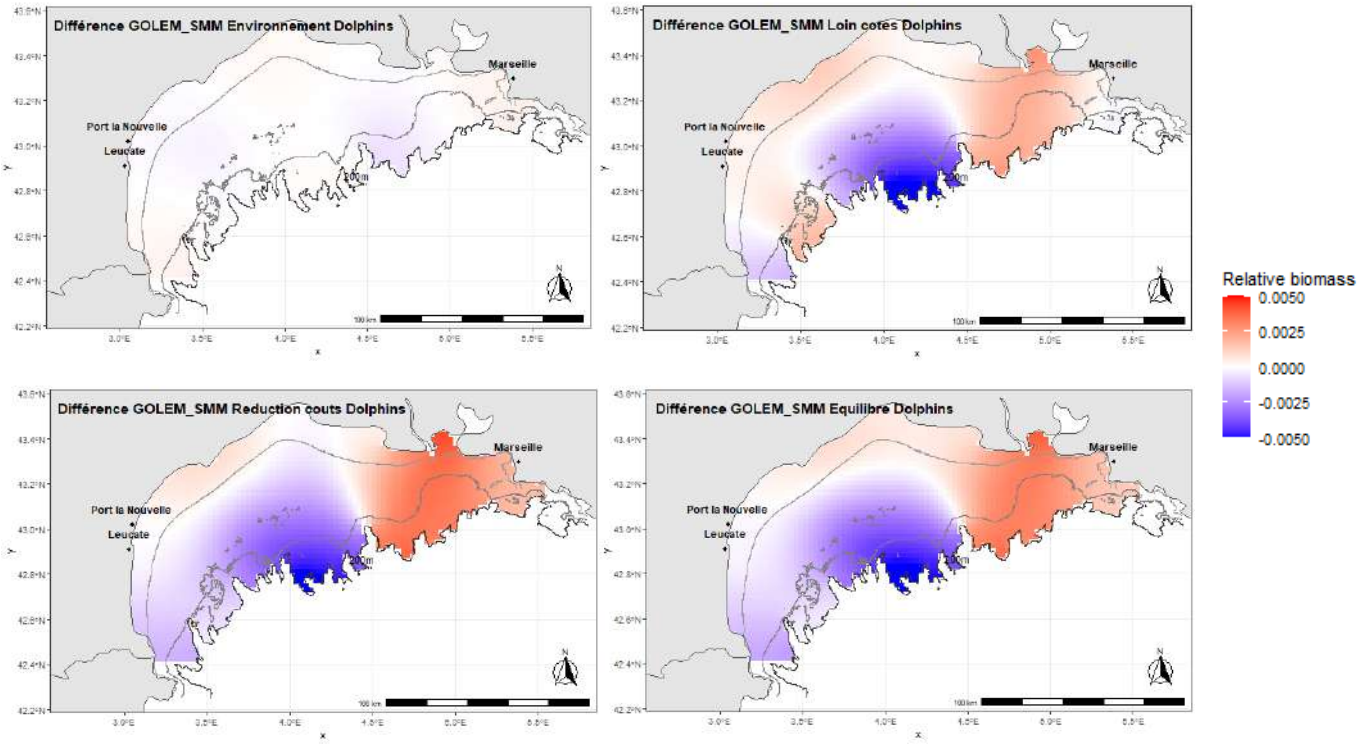


Figure 26 : Différence de biomasse relative entre GOLEM_SMM et les quatre scénarios du SER pour le compartiment Dolphins en moyenne sur 2019 (dans l'ordre de gauche à droite : Environnement, Loin côtes, Réduction coûts et Equilibre).

4. Discussion

4.1. Analyse GOLEM_SMM

4.1.1. Données d'entrée de la mégafaune marine

L'analyse de la différence relative du MTI (Figure 11) montre que les compartiments de la mégafaune marine ont des effets très différents sur l'ensemble du réseau par rapport au modèle initial. Ceci s'explique par la division du compartiment oiseau marins en trois compartiments, l'augmentation de biomasse du dauphin et la modification de leur matrice alimentaire. Tout cela se répercute sur l'ensemble du réseau notamment sur le compartiment *Scomber scombrus*. Etant la proie principale du dauphin d'après la nouvelle matrice alimentaire (Annexe 7), son effet sur ses proies et ses autres prédateurs est diminué. Cet effet est aussi visible sur la Figure 15 – A qui montre la baisse de biomasse de *S. scombrus* sur l'ensemble du golfe.

La comparaison des courbes temporelles Ecospace entre les modèles avec et sans ajout de la distribution de la mégafaune marine montre que la distribution de la mégafaune a un effet visible sur certains compartiments seulement (Figure 13). La biomasse du dauphin ayant quadruplé entre le modèle initial et le modèle étudié, la biomasse de ses proies et des prédateurs avec qui il entre en compétition sont influencées par la distribution du dauphin. Les compartiments impactés sont donc logiquement *Scomber scombrus, Trachurus mediterraneus, Sprattus sprattus, Sardina pilchardus* et *Engraulis encrasicolus*, qui sont les proies principales du dauphin.

4.1.2. Spatialisation des pêches

Les multiplicateurs de vulnérabilité sont calculés en fonction des biomasses moyennes sur l'ensemble du domaine spatial, ils sont donc identiques pour toutes les cellules d'Ecospace. Lorsqu'un modèle Ecosim ajusté est migré vers Ecospace, les multiplicateurs de vulnérabilité calibrés de certaines espèces peuvent être trop élevés pour les espèces confinées à des domaines limités (plages de profondeur restreintes, substrats spécifiques, etc.) dans Ecospace en raison de leur chevauchement spatial avec celui de leurs prédateurs et de la pêcherie cible principale.

Ainsi, imposer des zones de pêche plus restreintes (par une spatialisation des pêches dans ECOSPACE) conditionne le modèle en forçant un effort important sur des zones où les proies sont potentiellement en faible quantité. A l'inverse, il laisse se développer (voire exploser) des espèces présentes dans des zones que la pêche n'atteint pas (planctonophagous pelagic par exemple). Ceci explique l'augmentation de l'écart des données simulées aux données de référence dans l'analyse temporelle des données de GOLEM_SMM_SF. Cela peut être dû à un biais dans l'estimation des distributions des espèces cibles de la pêche. La détermination des courbes de réponses est peut-être trop approximative, ou bien d'autres drivers en plus de la profondeur et de la distance à la côte devraient être ajoutées pour moduler la distribution des espèces concernées. Cela pourrait aussi s'expliquer par la faible résolution des données de spatialisation du SIH. Les cartes n'étant basées que sur huit zones, ces cartes sont certainement perfectibles afin de mieux représenter les zones de pêche.

4.2. Analyse des scénarios

4.2.1. Effets sur la mégafaune marine

L'effet de répulsion est 10 fois moins fort pour les côtiers piscivores que pour les pélagiques piscivores en raison de l'effet appliqué aux pélagiques et non aux côtiers piscivores. Le déplacement de

proies entraîne néanmoins un changement dans la distribution des oiseaux côtiers qui peut être dû à une attraction de prédateurs en compétition pour les mêmes proies. *Scomber scombrus* est en compétition avec les sternes pour la prédation de *Sprattus sprattus, Engraulis encrasicolus* et *Sardina pilchardus*. Les cartes de différence montrent bien un rapprochement de *Scomber scombrus* dans les parcs et une diminution de ses proies. L'effet d'attraction du dauphin dans les parcs est aussi assez faible mais semble liée à l'attraction de *Scomber scombrus,* proie principale des grands dauphins.

4.2.2. Effets sur les pratiques de pêche

La courte durée des simulations ne permet pas au modèle d'atteindre l'équilibre, ce qui empêche l'observation des effets du biofouling. Comme cité précédemment, l'impact de la distribution de la mégafaune sur les biomasses des autres compartiments est assez faible. On peut donc supposer que l'effet responsable des changements de distributions des espèces impactées est dû essentiellement à la fermeture des pêches.

La différence d'effets due aux parcs entre chaque scénario s'explique par la différence de superficie des parcs ($S_{Réduction\ coûts}$ = 6 x $S_{Envronnement}$). La distance à la côte a aussi un effet étant donné la différence de distribution et d'effort de pêche dans les zones interdites aux engins. Selon les pratiques réalisées, une interdiction de pêcher à 3 milles ou à 20 milles des côtes aura un effet très variable sur les captures.

Les engins présentant le plus de risque de chevauchement avec les zones de parcs en Méditerranée sont les chaluts (Figure 27, Breuer et Pepescu (2024)).

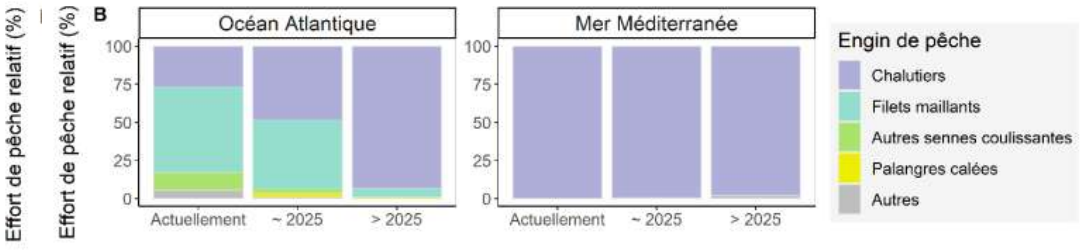


Figure 27 : Proportion de l'effort de pêche total des principales flottes de pêche présentant un chevauchement avec les futures zones de parcs éoliens flottants (Breuer et Pepescu 2024).

4.2.3. Effets sur les espèces commerciales

Les distributions de *Engraulis* et octopuses sont très différentes. Avec la fermeture des pêches on aurait pu s'attendre à une augmentation de toutes les espèces d'intérêt halieutique dans les parcs. Or, ce n'est pas le cas des anchois. On peut expliquer cette différence de réponse grâce à l'analyse de la Figure 3. Octopus est un compartiment avec un taux élevé de capture/biomasse pour une biomasse très faible et inversement pour *Engraulis encrasicolus*. De plus, la proie principale *d'E. encrasicolus* étant le plancton, qui n'est pas impacté par les scénarios, aucune attraction n'a lieu à l'intérieur des parcs. Une interdiction de captures dans les parcs a donc un très faible impact sur les anchois et toutes les espèces de faible taux de captures/biomasse. Cet effet explique aussi l'absence d'augmentation de biomasse commerciale à l'intérieur des parcs. Une espèce de forte biomasse qui présente un taux de capture/biomasse faible comme *Engraulis encrasicolus* cache l'effet des parcs sur les espèces au taux élevé de capture/biomasse présentant une faible biomasse (augmentation de 4% dans les parcs pour *Engraulis encrasicolus* (Figure 20) contre 75% pour octopuses (Figure 21)).

Les variations importantes de la biomasse, de la taille et de la condition corporelle des poissons planctonophages qui impactent fortement les pêcheries aux petits pélagiques du golfe du Lion depuis 2010 (Saraux et al. (2019)) sont dues à la réduction des nutriments et aux modifications quantitatives, qualitatives et de composition de leur nourriture (Garcia et al., 2023, 2024 ; Garcia 2024 PhD). En tant

que source de nourriture pour les mega-prédateurs marins, les poissons planctonophages sont susceptibles de modifier le fonctionnement de l'ensemble du réseau trophique. Les modifications attendues sur les populations planctoniques liées à l'installation des éoliennes flottantes dans le golfe du Lion seraient probablement minimes par rapport à celles citées précédemment.

Le recouvrement entre les régimes alimentaires des sardines, anchois et sprats a augmenté, entraînant une pression sur les mêmes espèces planctoniques plus importante (Saraux et al. 2019). La composition du plancton consommé est d'ailleurs différente de celle avant 2008 ce qui a conduit au shift de taille évoqué précédemment. Il semble donc que les populations de sardines et d'anchois soient affectées par un changement de la qualité, de la quantité et de la composition du plancton (Garcia et al. 2023, 2024 ; Garcia 2024 PhD).

4.3. Limites

4.3.1. Paramètres physiologiques

Les données d'entrée utilisées dans le modèle sont les données disponibles les plus récentes. Malgré des données d'abondance datant de 2011 pour les oiseaux et 2013 pour les dauphins, ce sont des données plus récentes que celles utilisées dans GOLEM. Les données d'abondance du grand dauphin sont assez différentes des données utilisées dans le modèle initial (biomasse x4) mais restent cohérentes avec les résultats des autres publications. Les calculs de biomasse et de P/B dépendant de cette donnée, les changements récents comme le réchauffement du climat et le déplacement des proies ne sont néanmoins pas pris en compte. La méthode de calcul du ratio P/B n'est pas celle utilisée dans les autres études car peu d'études séparaient les oiseaux en différents compartiments précédemment et se veut donc plus précise (P/B dans cette étude 3,2 fois inférieur à Vilas et al. (2021)). Les sources d'informations sur les régimes alimentaires ont conduit à un changement des matrices pour les adapter aux études les plus récentes. Cependant ces informations étaient assez partielles pour le compartiment Coastal piscivorous birds.

4.3.2. Cartes de distribution

La spatialisation des distributions était dépendante de la qualité des données Cohabys. Il aurait été intéressant d'y associer des cartes d'incertitude pour réaliser plusieurs scénarios. La méthode de réalisation des cartes Cohabys a conduit à des patchs qui n'ont pas pu être totalement lissés lors de l'interpolation. Elles ne sont donc pas complètement réalistes. D'autres cartes seront bientôt disponibles et utilisables afin d'améliorer le modèle. Le CEFE devrait fournir des cartes de probabilité de présence pour les oiseaux marins issues du programme MIGRALION. Les cartes sont construites à partir d'un modèle d'occupation intégrant trois ensembles de données différents (SAMM, données MIGRALION et méga-observations du PNM du golfe du Lion). Des cartes d'erreur standard associées aux cartes de probabilité de présence ont aussi été réalisées, permettant de prendre en compte l'incertitude sur les distributions et tester différents scénarios pour augmenter la qualité de la modélisation.

4.3.3. Comportement des oiseaux

Le comportement des oiseaux par rapport aux éoliennes est très compliqué à prendre en compte. Il est difficile d'anticiper les réactions des espèces face à un changement de ce type étant donné qu'aucune étude sur le long terme n'a été réalisé sur les éoliennes flottantes. Il a été montré dans d'autres parcs que les oiseaux appartenant à la même espèce n'ont pas le même comportement d'un parc à l'autre et d'une saison à l'autre. En partant du postulat qu'une réaction n'est pas constante pour une espèce donnée, il n'a donc pas été possible de modéliser avec certitude le déplacement des populations dans les scénarios d'implantation des parcs. Les estimations sont donc issues de moyennes entre plusieurs études

et ne représentent pas avec précision les réactions réelles. De plus, l'ensemble des études a été réalisée en Manche, mer du Nord et mer Baltique (Dierschke et al. 2016). Les conditions environnementales et les proies des oiseaux sont très différentes de celles du golfe du Lion. Le choix d'augmenter de 50% la présence des côtiers omnivores dans les parcs et de diminuer de 50% la présence des pélagiques piscivores est assez arbitraire puisque les données n'existent pas encore mais a été réalisé avec le maximum de précision par rapport aux études disponibles.

4.4. Perspectives

4.4.1. Choix des scénarios

Dans une perspective de futurs travaux, il sera intéressant de tester séparément les effets biofouling, changement de distribution de la mégafaune et fermeture de la pêche. Pour cela, les quatre scénarios du SER pourront être multipliés par six afin de tester les effets individuels et les effets combinés par deux. Cela permettra de quantifier la contribution de chaque effet sur le changement de distribution et de biomasse des espèces.

De plus, la fermeture totale de la pêche sur l'ensemble des zones de parcs pourra être affinée. Il sera dans ce cas intéressant de modéliser des fermetures partielles dans le temps et dans l'espace, correspondant aux zones réellement susceptibles d'être fermées. Des scénarios considérant le type d'engin comme critère de fermeture pourront être envisagés, puisque pour les parcs posés seuls les arts trainants sont interdits. L'engin et les espèces cibles correspondent à des zones et des fenêtres temporelles précises qu'il sera possible de modéliser sur Ecospace.

4.4.2. Changement climatique

Il serait intéressant de poursuivre le travail en incluant les effets du changement climatique dans les scénarios. Des projections de cartes de forçage des bas niveaux trophiques devront donc être nécessaire pour simuler ces scénarios. De plus, l'impact sur la mégafaune marine pourrait être intéressant étant donné le rapprochement à la côte des grands dauphins pour se nourrir (Di Méglio N. et Banaru D. comm. pers.). Di Méglio N. (pers. comm.) a observé ces dernières années dans les contenus stomacaux des dauphins des proies plus diverses ce qui traduit leur comportement opportuniste et ces données mériterait d'être intégrées dans la matrice alimentaire du modèle.

De nouveaux compartiments d'espèces non indigènes pourraient être ajoutés pour modéliser le déplacement des isothermes et le changement de distribution des proies. Ainsi, le dauphin bleu et blanc aurait été une espèce intéressante à ajouter en raison des récentes observations de l'animal se rapprochant des côtes (Banaru D. comm. pers.). L'ajout de nouveaux prédateurs pourrait avoir un impact assez fort sur les compartiments actuels.

4.4.3. Risque de collision pour les oiseaux marins et bruits sous-marins pour les dauphins

Dans ce modèle, le risque de collision pour les oiseaux marins n'a pas été pris en compte. Les données actuelles ne sont pas encore assez nombreuses et fiables étant donné la récence des projets d'éoliennes flottantes et donc le manque de résultats de travaux de recherche sur ce sujet. Pour le moment, les premières données suggèrent une faible mortalité en raison de la faible hauteur de vol pour la majorité des espèces, donc un chiffre négligeable par rapport aux autres sources de mortalité. Ce sujet central dans les débats publics est important à prendre en compte et nécessite un projet dédié à cette recherche. L'échelle de l'approche écosystémique n'est pas adaptée à cet impact qui devrait être étudié au niveau populationnel.

Peu d'informations sur le bruit des EOF sont actuellement disponibles pour étudier l'impact sur les grands dauphins. L'étude portant sur la phase d'exploitation, les recherches sont encore trop récentes donc l'impact sonore n'est pas modélisé. Cependant beaucoup d'études sont en cours et en phase de financement et pourraient bientôt répondre à cette problématique (MERMMAID, FLOATFARM…).

4.4.4. Introduction des coûts dans l'effort de pêche

Les captures ont été prédites par le modèle sur la base des proies disponibles. Plusieurs critères pourraient être ajoutés afin de mieux estimer ces captures et la rentabilité des engins. Le prix du carburant et la distance des bateaux à leur port de rattachement pourraient être des pistes d'améliorations du modèle, qui permettraient de mieux spatialiser l'effort de pêche. Le projet Fish-ore-man vise ainsi à améliorer la prise en compte des pêcheurs et de leur relation avec les EMR dans les modèles écosystémiques.

Conclusion

Les connaissances sur la mégafaune marine ont été mises à jour avec les données disponibles les plus récentes pour être intégrées au modèle. Ceci a permis de modéliser un écosystème plus détaillé pour les compartiments de haut niveau trophique, comportant deux compartiments supplémentaires. Le nouvel équilibrage du modèle est tout aussi satisfaisant que le modèle initial, avec des données simulées proches des données de référence. Les interactions proie-prédateur sont stabilisées avec des distributions mises à jour pour la mégafaune marine. Les nouveaux paramètres physiologiques du dauphin ont une grande influence sur les espèces proies, notamment à travers une baisse de biomasse importante et un changement de distribution influencé par celle des dauphins.

Les scénarios en contexte EMR impactent très différemment l'écosystème. Selon les décisions de fermeture de pêche dans les zones de parcs, la réponse des compartiments allant des espèces commerciales à la mégafaune marine est très différente. Le scénario impliquant la plus grande superficie et le plus proche des côtes a un impact considérable sur les espèces d'oiseaux marins. De plus, les modifications de distribution des espèces cibles de la pêche se répercute sur leurs prédateurs. La taille des parcs et les règles imposées en leur intérieure seront déterminantes pour l'équilibre de l'écosystème.

L'effet cumulé de la baisse de croissance des proies après 2008 et la potentielle augmentation de l'abondance des prédateurs (rapprochement des dauphins à la côte) pourrait bouleverser le fonctionnement de l'écosystème, auquel s'ajoutent la modification de l'effort de pêche et le déplacement des habitats marins. Ces effets pourraient être une future piste de recherche afin de modéliser les effets du réchauffement climatique sur l'écosystème.

Bibliographie

Agostini, Vers N., et Andrew Bakun. 2002. « `Ocean Triads' in the Mediterranean Sea: Physical Mechanisms Potentially Structuring Reproductive Habitat Suitability (with Example Application to European Anchovy, *Engraulis Encrasicolus*) ». *Fisheries Oceanography* 11 (3): 129-42. https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2002.00201.x.

Baklouti, Melika, Rémi Pagès, Elena Alekseenko, Arnaud Guyennon, et Gérald Grégori. 2021. « On the Benefits of Using Cell Quotas in Addition to Intracellular Elemental Ratios in Flexible-Stoichiometry Plankton Functional Type Models. Application to the Mediterranean Sea ». *Progress in Oceanography* 197 (septembre):102634. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102634.

Bănaru, D., C. Mellon-Duval, D. Roos, J.-L. Bigot, A. Souplet, A. Jadaud, P. Beaubrun, et J.-M. Fromentin. 2013. « Trophic Structure in the Gulf of Lions Marine Ecosystem (North-Western Mediterranean Sea) and Fishing Impacts ». *Journal of Marine Systems* 111-112 (février):45-68. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.09.010.

Beaubrun, P.C. 1995. « Atlas préliminaire de distribution de cétacés en Méditerranée. » *CIESM, Musée Océanographique de Monaco*, 87 pp.

Breuer, Marcus, et Irina Pepescu. 2024. « Étude réalisée pour la commission PECH – Impact de l'exploitation de l'énergie éolienne en mer et des autres énergies marines renouvelables sur les pêcheries européenne », 2024.

Christensen, V, J Steenbeek, et C.J. Walters. 2024. « User Guide for Ecopath with Ecosim (EwE) ». *The university of British Columbia*, 2024. file:///X:/NESTORE/03_DOC_INTERNES/05_WORK/2024_stageM2_Frayssinet/bibliographie/Modele/User-Guide-for-Ecopath-with-Ecosim-EwE-1717104080.pdf.

Christensen, V., et C. Walters. 2004. « Trade-offs in Ecosystem-scale Optimization of Fisheries Management Policies ». *Bulletin of Marine Science* 74 (mai):549-62.

Christensen, V., C.J. Walters, D. Pauly, et R. Forrest. 2008. « Ecopath with Ecosim: A User's Guide ».

Christensen, Villy, Marta Coll, Jeroen Steenbeek, Joe Buszowski, Dave Chagaris, et Carl J. Walters. 2014. « Representing Variable Habitat Quality in a Spatial Food Web Model ». *Ecosystems* 17 (8): 1397-1412. https://doi.org/10.1007/s10021-014-9803-3.

Coates, Delphine A., Danae-Athena Kapasakali, Magda Vincx, et Jan Vanaverbeke. 2016. « Short-Term Effects of Fishery Exclusion in Offshore Wind Farms on Macrofaunal Communities in the Belgian Part of the North Sea ». *Fisheries Research* 179 (juillet):131-38. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.02.019.

Coll Montón, Marta. 2006. « PhD Thesis - Modelización de flujos tróficos y uso de indicadores ecológicos como aproximación al estudio de las pesquerías mediterráneas. 550 pp. » file:///X:/NESTORE/03_DOC_INTERNES/05_WORK/2024_stageM2_Frayssinet/bibliographie/MColl%20PhD%20thesis.pdf.

Colléter, Mathieu, Audrey Valls, Jérôme Guitton, Didier Gascuel, Daniel Pauly, et Villy Christensen. 2015. « Global Overview of the Applications of the Ecopath with Ecosim Modeling Approach Using the EcoBase Models Repository ». *Ecological Modelling* 302 (avril):42-53. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.025.

Conéjéro, S. 1998. « Application de deux méthodologies à bord d'un chalutier pour étudier la distribution des oiseaux marins. Distorsions révélées dans le golfe du Lion en période estivale. » *Mémoire de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, Montpellier*, 131.

Corrales, Xavier, Marta Coll, Samuele Tecchio, José María Bellido, Ángel Mario Fernández, et Isabel Palomera. 2015. « Ecosystem structure and fishing impacts in the northwestern Mediterranean Sea using a food web model within a comparative approach ». *Journal of Marine Systems* 148 (août):183-99. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.03.006.

Couturier, L, G Lecaillon, P Lenfant, et P Thiriet. 2022. « L'effet récif induit par les parcs éoliens et leur raccordement », 2022. https://www.france-energies-marines.org/wp-content/uploads/2022/04/COME3T-bulletin-3-effet-recif-BD.pdf.

Cramm, P, A Ravayrol, et L Devaud. 1998. « Sites de nidification et d'alimentation des populations de sternes nicheuses des étangs sud montpelliérains. » *Conservatoire du Littoral, Rapport Life*, 140.

De Mesel, Ilse, Francis Kerckhof, Alain Norro, Bob Rumes, et Steven Degraer. 2015. « Succession and Seasonal Dynamics of the Epifauna Community on Offshore Wind Farm Foundations and Their Role as Stepping Stones for Non-Indigenous Species ». *Hydrobiologia* 756 (1): 37-50. https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1.

Débat public. 2024. « Le débat en Méditerranée ». CNDP. 2024. https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2023-11/MED_Fiche_41_Impacts_eolien_en_mer.pdf.

Dierschke, Volker, Robert W. Furness, et Stefan Garthe. 2016. « Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction ». *Biological Conservation* 202 (octobre):59-68. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.016.

Di-Méglio, N, M Roul, L David, O Gimenez, C Azzinari, J Jourdan, M Barbier, et H Labach. 2015. « Abondance et répartition spatio-temporelle et fonctionnelle du Grand dauphin dans le Golfe du Lion. », 2015.

Eoliennes en mer. 2024. « Deux projets en Méditerranée ». 2024. https://www.eoliennesenmer.fr/facades-maritimes-en-france/facade-mediterranee/deux-projets-en-mediterranee.

Feuilloley, Guillaume, Jean-Marc Fromentin, Lars Stemmann, Hervé Demarcq, Claude Estournel, et Claire Saraux. 2020. « Concomitant Changes in the Environment and Small Pelagic Fish Community of the Gulf of Lions ». *Progress in Oceanography* 186 (juillet):102375. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102375.

Fox, A., et Ib Petersen. 2019. « Offshore wind farms and their effects on birds », septembre.

Frayssinet, Faure, Araignous, et Banaru. 2024. « Review of the ecological knowledge and existing data inventory and the adjustments made towards an accurate representation of the marine birds and mammals in the food web model of the Gulf of Lion, D5.1.a ». *NESTORE (ANR-10-IEED-0006-34)*, 2024.

Garcia, Théo, Daniela Bănaru, Loïc Guilloux, Véronique Cornet, Gérald Gregori, et François Carlotti. 2023. « Temporal Changes in Zooplankton Indicators Highlight a Bottom-up Process in the Bay of Marseille (NW Mediterranean Sea) ». Édité par Hans G. Dam. *PLOS ONE* 18 (10): e0292536. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292536.

Garcia, Théo, François Carlotti, Gilles Lepoint, Loïc Guilloux, Javier Angel Tesán-Onrubia, Baptiste Grassi, Victor Russias, et Daniela Bănaru. 2024. « The Decadal Variability of Elemental, Isotopic, and Biochemical Compositions of Coastal Mediterranean Zooplankton Responds to Environmental Changes ». *Marine Biology* 171 (5): 119. https://doi.org/10.1007/s00227-024-04430-5.

Halouani, Ghassen, Ching-Maria Villanueva, Aurore Raoux, Jean Claude Dauvin, Frida Ben Rais Lasram, Eric Foucher, François Le Loc'h, et al. 2020. « A Spatial Food Web Model to Investigate Potential Spillover Effects of a Fishery Closure in an Offshore Wind Farm ». *Journal of Marine Systems* 212 (décembre):103434. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103434.

Henry, S, K Heerah, J-L Jung, L Martinez, et S Miaud. 2023. « Can floating offshore wind farms pose a risk of entanglement and injury to marine megafauna? », 2023. https://www.france-energies-marines.org/wp-content/uploads/2024/01/COME3T-bulletin-09-Enchevetrement-EN-BD.pdf.

Heymans, Johanna Jacomina, Marta Coll, Jason S. Link, Steven Mackinson, Jeroen Steenbeek, Carl Walters, et Villy Christensen. 2016. « Best Practice in Ecopath with Ecosim Food-Web Models for Ecosystem-Based Management ». *Ecological Modelling* 331 (juillet):173-84. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.12.007.

IFREMER SIH. 2024. « Secteurs méditerranée (version SIH) », 2024. https://doi.org/10.12770/bc2102b5-0ef5-45a8-b06a-a29e580d6ed6.

Innes, S., D. M. Lavigne, W. M. Earle, et K. M. Kovacs. 1987. « Feeding Rates of Seals and Whales ». *The Journal of Animal Ecology* 56 (1): 115. https://doi.org/10.2307/4803.

IUCN. 2024. « The IUCN Res List of Threatened Species. », 2024, Version 2024-1 édition. https://www.iucnredlist.org.

Jadaud, Angélique, et Grégoire Certain. 1994. « MEDITS ». Sismer. https://doi.org/10.18142/7.

Krijgsveld, K.L. 2014. « Avoidance behaviour of birds around offshore wind farms ». *Bureau WAArdenburg bv*, 2014. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Krijgsveld-2014.pdf.

Leemans, J.J., et M.P. Collier. 2022. « Update on the current state of knowledge on the impacts of offshore wind farms on birds in the OSPAR Region: 2019-2022 ». *WAARDEN BURG Ecology*, 2022. https://www.ospar.org/site/assets/files/1389/bird_litt_review_2029_2022_final.pdf.

Link, Jason S. 2010. « Adding Rigor to Ecological Network Models by Evaluating a Set of Pre-Balance Diagnostics: A Plea for PREBAL ». *Ecological Modelling* 221 (12): 1580-91. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.03.012.

Maxwell, Sara M., Francine Kershaw, Cameron C. Locke, Melinda G. Conners, Cyndi Dawson, Sandy Aylesworth, Rebecca Loomis, et Andrew F. Johnson. 2022. « Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats ». *Journal of Environmental Management* 307 (avril):114577. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114577.

Migralion. 2021. « 202112_Migralion_LOT1_Liv1_EtatConnaissances_VF.pdf ».

Morat, F, A Mante, E Drunat, J Dabat, P Bonhomme, M Harmelin-Vivien, et Y Letourneur. 2014. « Diet of Mediterranean European shag, Phalacrocorax aristotelis desmarestii, in a northwestern Mediterranean area: a competitor for local fisheries? » *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park, 28*, 113-32.

Moulaï, Riadh, Salaheddine Doumandji, et Nicolas Sadoul. 2008. « Impact des décharges d'ordures ménagères sur le régime alimentaire du Goéland leucophée Larus michaellis dans la région de Béjaia (Algérie) ». *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)* 63 (3): 239-50. https://doi.org/10.3406/revec.2008.1415.

Nilsson, Sven G., et Ingvar N. Nilsson. 1976. « Numbers, Food Consumption, and Fish Predation by Birds in Lake Mockeln, Southern Sweden ». *Ornis Scandinavica* 7 (1): 61. https://doi.org/10.2307/3676175.

Nogues, Quentin, Emma Araignous, Pierre Bourdaud, Ghassen Halouani, Aurore Raoux, Éric Foucher, François Le Loc'h, et al. 2022. « Spatialized Ecological Network Analysis for Ecosystem-Based Management: Effects of Climate Change, Marine Renewable Energy, and Fishing on Ecosystem Functioning in the Bay of Seine ». Édité par Silvana Birchenough et Lucia Lopez. *ICES Journal of Marine Science* 79 (4): 1098-1112. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac026.

Parlement européen. 2021. « RAPPORT sur les effets des parcs éoliens en mer et des autres systèmes d'énergie renouvelable sur le secteur de la pêche », 2021. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0184_FR.html.

Pettex, E, C Lambert, Sophie Laran, A Ricart, A. Virgili, Hélène Falchetto, M Authier, et al. 2014. « Suivi aérien de la mégafaune marine en France métropolitaine - Rapport final ». Observatoire Pelagis. file:///X:/NESTORE/03_DOC_INTERNES/05_WORK/2024_stageM2_Frayssinet/bibliographie/Pelagis/SAMM_rapport%20final_13112014.pdf.

Power, et et al. 1996. « Challenges in the quest fo keystones », 1996, BioScience 46 (8) édition.

Queiros. 2019. « PhD thesis - Mechanisms underlying the bottom -up control of sardine populations in the Gulf of Lions: insights from experiments and modeling », 2019.

Queiros, Q, Jm Fromentin, G Astruc, Rk Bauer, et C Saraux. 2018. « Dolphin Predation Pressure on Pelagic and Demersal Fish in the Northwestern Mediterranean Sea ». *Marine Ecology Progress Series* 603 (septembre):13-27. https://doi.org/10.3354/meps12672.

Saraux, Claire, Elisabeth Van Beveren, Pablo Brosset, Quentin Queiros, Jean-Hervé Bourdeix, Gilbert Dutto, Eric Gasset, Cyrielle Jac, Sylvain Bonhommeau, et Jean-Marc Fromentin. 2019. « Small pelagic fish dynamics: A review of mechanisms in the Gulf of Lions ». *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Drivers of dynamics of small pelagic fish resources: environmental control of long-term changes, 159 (janvier):52-61. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.02.010.

SER. 2024. « Eolien en mer 2050, 4 scénarios cartographiés pour mieux comprendre les enjeux de la planification », 2024. https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/02/SER-FR-Eolien-en-mer-2050-4-scenarios-cartographies.pdf.

Serpetti, Benjamins, Brain, Collu, Harvey, Heymans, Hughes, et al. 2021. « Modeling Small Scale Impacts of Multi-Purpose Platforms : An Ecosystem Approach. » *Frontiers in Marine Science, 8, 694013*, 2021. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.694013.

Seyer, Thomas, Daniela Bănaru, Sandrine Vaz, Tarek Hattab, Céline Labrune, Shawn Booth, et Sabine Charmasson. 2023. « Ecosystem Modelling in the Northwestern Mediterranean Sea: Structure and Functioning of a Complex System ». *Journal of Marine Systems* 240 (mai):103877. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103877.

Stachelek, J. 2022. « Spatial Interpolation via Inverse Path Distance Weighting ». 2022. https://cran.r-project.org/web/packages/ipdw/vignettes/ipdw2.html.

Thezenas, S. 1993. « Régime alimentaire du goéland leucophée Larus cachinnans michahellis, dans le bassin Méditerranéen. » *Mémoire de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes*, 1993.

Trites, A W, V Christensen, et D Pauly. 1997. « Competition Between Fisheries and Marine Mammals for Prey and Primary Production in the Pacific Ocean ». *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science* 22 (décembre):173-87. https://doi.org/10.2960/J.v22.a14.

Tsagarakis, K., M. Coll, M. Giannoulaki, S. Somarakis, C. Papaconstantinou, et A. Machias. 2010. « Food-web traits of the North Aegean Sea ecosystem (Eastern Mediterranean) and comparison with other Mediterranean ecosystems ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 88 (2): 233-48. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.04.007.

Ulanowicz, R.E., et C.J. Puccia. 1990. « Mixed trophic impacts in ecosystems ». *Coenoses 5 (1)*, 1990.

Valls, Audrey, Marta Coll, et Villy Christensen. 2015. « Keystone Species: Toward an Operational Concept for Marine Biodiversity Conservation ». *Ecological Monographs* 85 (1): 29-47. https://doi.org/10.1890/14-0306.1.

Vanalderweireldt, L., C. Albouy, F. Le Loc'h, R. Millot, C. Blestel, M. Patrissi, M. Marengo, et al. 2022. « Ecosystem modelling of the Eastern Corsican Coast (ECC): Case study of one of the least trawled shelves of the Mediterranean Sea ». *Journal of Marine Systems* 235 (novembre):103798. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103798.

Vanermen, Nicolas, Wouter Courtens, Robin Daelemans, Luc Lens, Wendt Müller, Marc Van De Walle, Hilbran Verstraete, et Eric W M Stienen. 2020. « Attracted to the Outside: A Meso-Scale Response Pattern of Lesser Black-Backed Gulls at an Offshore Wind Farm Revealed by GPS Telemetry ». Édité par Stephen Votier. *ICES Journal of Marine Science* 77 (2): 701-10. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz199.

Vilas, Daniel, Marta Coll, Xavier Corrales, Jeroen Steenbeek, Chiara Piroddi, Diego Macias, Alessandro Ligas, Paolo Sartor, et Joachim Claudet. 2021. « Current and potential contributions of the Gulf of Lion Fisheries Restricted Area to fisheries sustainability in the NW Mediterranean Sea ». *Marine Policy* 123 (janvier):104296. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104296.

Walters, CARL, VILLY Christensen, et DANIEL Pauly. 1997. « Structuring Dynamic Models of Exploited Ecosystems from Trophic Mass-Balance Assessments ». *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 7 (2): 139-72. https://doi.org/10.1023/A:1018479526149.

Walters, Carl, Daniel Pauly, et Villy Christensen. 1999. « Ecospace: Prediction of Mesoscale Spatial Patterns in Trophic Relationships of Exploited Ecosystems, with Emphasis on the Impacts of Marine Protected Areas ». *Ecosystems* 2 (6): 539-54. https://doi.org/10.1007/s100219900101.

Zoutenbier, Reinier, Audrey van Mastrigt, et Melissa Roe-Ely. 2020. « 2019 Update on the Current State of Knowledge on the Environmental Impacts of Offshore Wind Farms ». *Royal HaskoningDHV*. file:///D:/7%20-%20Stage%20M2/bibliographie/M%C3%A9gafaune/Zoutenbier%20-%202020%20-%20Author(s)%20Reinier%20Zoutenbier,%20Audrey%20van%20Mastrigt-d%C3%A9verrouill%C3%A9.pdf.

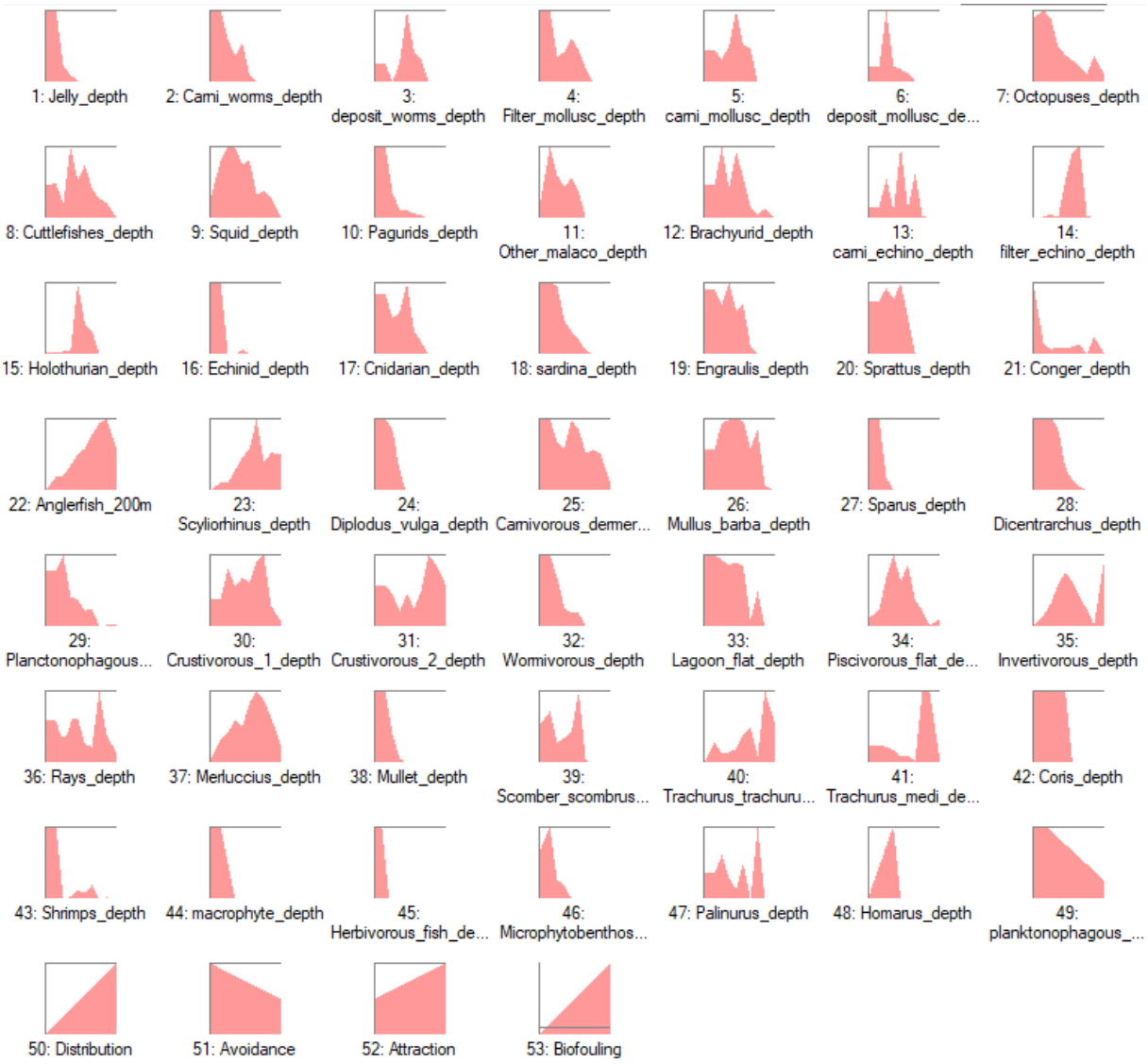
Liste des annexes

Annexe 1 : Composition des groupes d'engin de pêche dans GOLEM 40
Annexe 2 : Courbes de réponse dans GOLEM_SMM 41
Annexe 3 : Présentation des campagnes aériennes et par bateau fournissant les données d'abondance et de distribution de la mégafaune marine dans le golfe du Lion 41
Annexe 4 : Cartes de distribution de biomasse absolue de cinq espèces de la mégafaune marine en hiver à gauche et en été à droite (Cohabys) 43
Annexe 5 : Calcul des paramètres physiologiques des compartiments de la mégafaune marine 44
Annexe 6 : Comparaison des paramètres physiologiques des compartiments de la mégafaune marine avec la littérature 45
Annexe 7 : Matrices alimentaires de la mégafaune marine dans Ecopath 46
Annexe 8 : PREBAL du modèle GOLEM_MM 47
Annexe 9 : Résolution de la grille Ecospace 48
Annexe 10 : Cartes de distribution de la mégafaune marine en été (dans l'ordre de gauche à droite Dolphins, pelagic piscivorous birds, coastal piscivorous birds et coastal omnivorous birds),, interpolées sur la grille ECOSPACE à partir des cartes initiales de COHABYS 48
Annexe 11 : Carte de répartition des captures de pêche par engin avant (à gauche) et après (à droite) interpolation 50
Annexe 12 : Shapefiles des parcs géoréférencés sur QGIS 50
Annexe 13 : Niveau trophique et biomasse des compartiments de GOLEM et GOLEM_SMM 51
Annexe 14 : MTI du modèle GOLEM_MM 52
Annexe 15 : Evolution des biomasses simulées en fonction des biomasses de référence pour GOLEM_MM sur la période 2010-2019 et calcul des SS. En vert, les courbes plus proches des données de référence par rapport à GOLEM et en rouge, les courbes moins proches des données de référence. 52

Annexe

Annexe 1 : Composition des groupes d'engin de pêche dans GOLEM

Métiers GOLEM	*Métiers SIH*
Chaluts benthiques	Chaluts de fond à panneaux Chaluts à perche Chaluts de fond jumeaux à panneaux
Chaluts pélagiques	Chaluts-bœufs pélagiques Chaluts pélagiques à panneaux
Filets	Filets maillants dérivants Filets maillants calés Trémails Trémails et filets maillants combinés Filet maillant encerclant Filets soulevés
Sennes	Sennes coulissantes Sennes de plage et sennes de bateaux
Palangres	Palangres calées Palangres dérivantes
Pêche loisir	
Autres	Dragues remorquées par bateau Nasses et pièges Verveux Plongée Lignes à main et lignes à cannes Divers Hameçons et lignes Lignes de traîne Pêche à pied Pêche de civelles Engin non déclaré



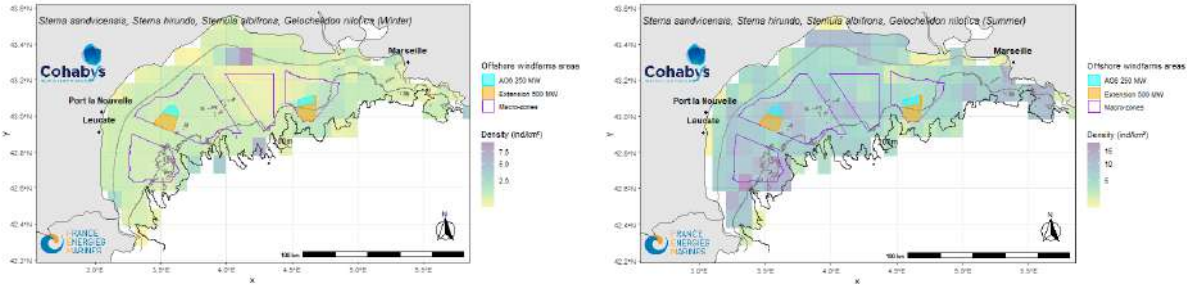
Annexe 2 : Courbes de réponse dans GOLEM_SMM

Annexe 3 : Présentation des campagnes aériennes et par bateau fournissant les données d'abondance et de distribution de la mégafaune marine dans le golfe du Lion

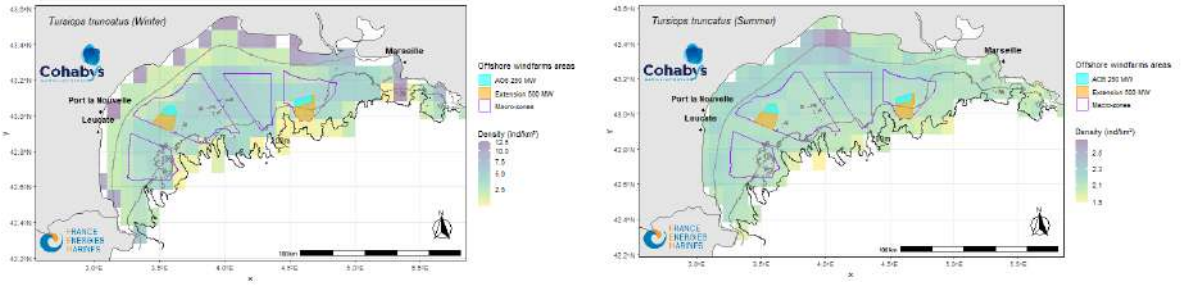
SAMM	Les campagnes SAMM visent à établir un aperçu de la répartition spatiale des espèces de mégafaune marine dans les eaux métropolitaines, à estimer leur abondance et à identifier les habitats préférés des cétacés et des oiseaux marins (et plus largement, de la mégafaune pélagique) en fonction des saisons (Laran et al. 2021). Des transects aériens sont réalisés sur l'ensemble de la zone économique exclusive française en 2011-2012, puis à nouveau en 2018-2019 pour la Méditerranée. Sur ces transects, des données écologiques (cétacés, oiseaux marins, thons) ainsi que des activités humaines sont systématiquement enregistrées. Le protocole d'observation utilise le distance sampling : deux observateurs enregistrent les espèces détectées ainsi que la distance perpendiculaire à l'avion. Les données d'abondance sont disponibles dans le Tableau 2.

ACCOBAMS	Pendant les étés 2018 et 2019, le Secrétariat ACCOBAMS a coordonné la toute première étude de grande envergure sur les cétacés en Méditerranée et en mer Noire. Cette étude a combiné des méthodes de surveillance visuelle (à partir d'avions et de bateaux) avec des méthodes de détection acoustique ciblant spécifiquement les espèces des grands fonds. L'Initiative d'campagne ACCOBAMS (ASI) a recueilli des informations non seulement sur la distribution et l'abondance des cétacés, mais aussi sur d'autres espèces de mégafaune marine telles que les tortues et les élasmobranches (Panigada et al. 2021). Les méthodes d'échantillonnage par transect linéaire peuvent fournir des estimations robustes de l'abondance et de la densité d'une espèce dans un espace donné et à un moment donné. De plus, elle a évalué les activités humaines et leurs impacts respectifs, notamment les débris marins flottants et le bruit sous-marin.
PELMED	Les campagnes annuelles PELMED, menées par l'IFREMER à Sète, ont lieu chaque été depuis 1985 (BOURDEIX Jean-Hervé 1985). Des transects en bateau couvrant un total de 1438 km ont été réalisés sur l'ensemble du plateau continental du golfe du Lion et de la Côte d'Azur. Les objectifs de ces campagnes sont d'évaluer la biomasse des poissons pélagiques ciblés, de mieux comprendre l'écosystème pélagique et d'acquérir des données sur les prédateurs supérieurs tels que les oiseaux et les mammifères marins. Tout au long de la campagne PELMED, les observateurs à bord enregistrent les oiseaux et les mammifères marins selon le protocole MEGASCOPE développé par l'UMS-PELAGIS. Les campagnes aériennes SAMM, ASI et les campagnes en bateau PELMED présentent des biais dans les estimations d'abondance en raison des techniques d'échantillonnage (avion / bateau). Le protocole choisi, la distance d'observation et la vitesse de déplacement sont des paramètres qui influencent la qualité de l'échantillonnage.
GDEGeM	Le projet GDEGeM (Étude et gestion des grands dauphins en Méditerranée), mis en œuvre par le GIS3M (Groupement d'Intérêt Scientifique des Mammifères Marins de Méditerranée) entre 2013 et 2015, vise à améliorer les efforts de conservation du grand dauphin (Tursiops truncatus) en Méditerranée nord-occidentale. Soutenu par la Fondation MAVA, le Fonds de dotation pour la biodiversité et l'Agence des aires marines protégées, ce projet a permis d'améliorer la compréhension de la population grâce à des activités telles que le dénombrement des grands dauphins en mer Méditerranée par bateau. L'abondance a été estimée à l'aide de modèles bayésiens de population fermée (Di-Méglio et al. 2015) (voir Tableau 2).
TURSMED	Le projet TURSMED, dirigé par Miraceti et l'Office français de la biodiversité (OFB), implique trente semaines de surveillance en mer. Ce projet permet d'obtenir le nombre d'individus à travers la photo d'identification et des informations comportementales liées aux habitudes alimentaires et aux schémas migratoires du grand dauphin en mer Méditerranée. L'analyse des données a suivi la méthode du distance sampling avec plusieurs covariables.
MIGRALION	Le programme MIGRALION, dirigé par l'OFB, réuni sur le suivi par télémétrie, les enquêtes marines, la surveillance radar et les enregistrements acoustiques des espèces d'oiseaux marins traversant le golfe. Chaque année, deux enquêtes marines suivent les migrations de printemps et d'automne. Le bateau navigue 2x4 jours par an, couvrant 1150 km de transects, permettant l'observation de 20 % de la surface du golfe et une couverture radar de 80 % de la surface (Assali et al. 2023).
PGL, EFGL, EOLMED	La surveillance de l'impact environnemental est réalisée sur les sites de fermes pilotes dans le golfe du Lion. Provence Grand Large (PGL) surveille la mégafaune marine depuis 2019. De plus, les projets Éoliennes Flottantes dans le golfe du Lion (EFGL) et EOLMED ont un programme de surveillance de deux ans et six ans, respectivement, axé sur l'avifaune et les mammifères marins.
PNM	Depuis 2019, les agents du Parc Naturel Marin (PNM) du Golfe du Lion ont réalisé des enquêtes marines (transects en bateau) pour collecter des données sur les activités humaines et la mégafaune marine. Ces enquêtes ont lieu principalement en novembre et au printemps tardif (mai, juin, juillet). Le PNM est particulièrement étendu pour une aire marine protégée (AMP), et la couverture complète celle des études des fermes pilotes.

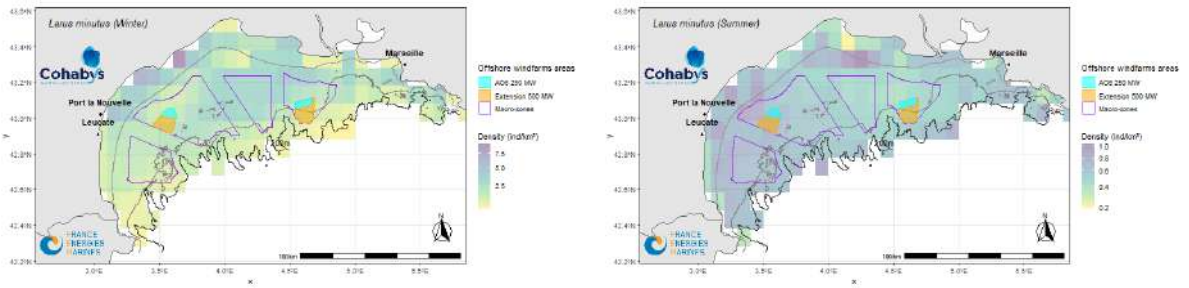
Sterna sandvicensis, sterna hirundo, sternula albifrons, gelocheidon nilotica



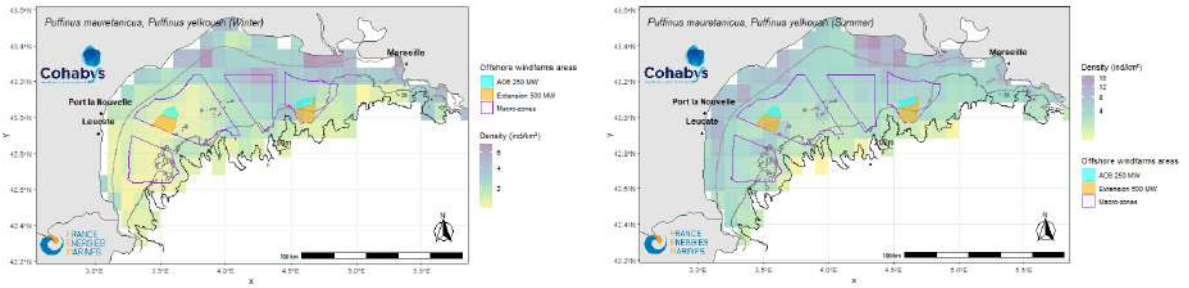
Tursiops truncatus



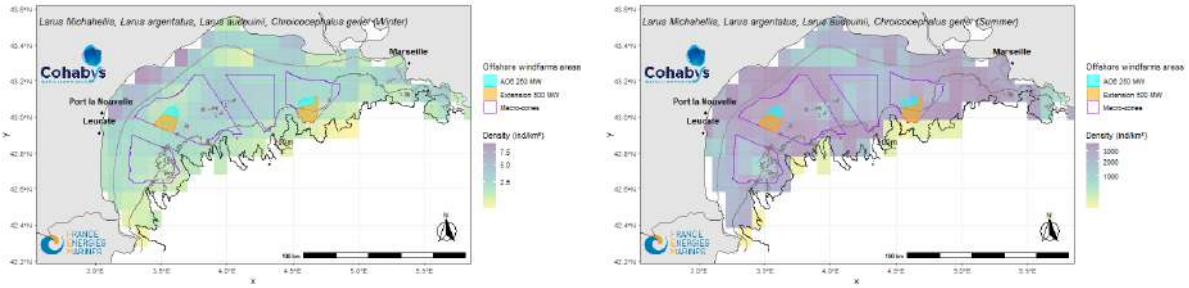
Hydrocoloeus minutus



Puffinus mauretanicus, puffinus yelkouan



Larus michaellis, larus argentatus, larus audouinii, chroicocephalus genei



Annexe 4 : Cartes de distribution de biomasse absolue de cinq groupes de la mégafaune marine en hiver à gauche et en été à droite (Cohabys)

Annexe 5 : Calcul des paramètres physiologiques des compartiments de la mégafaune marine

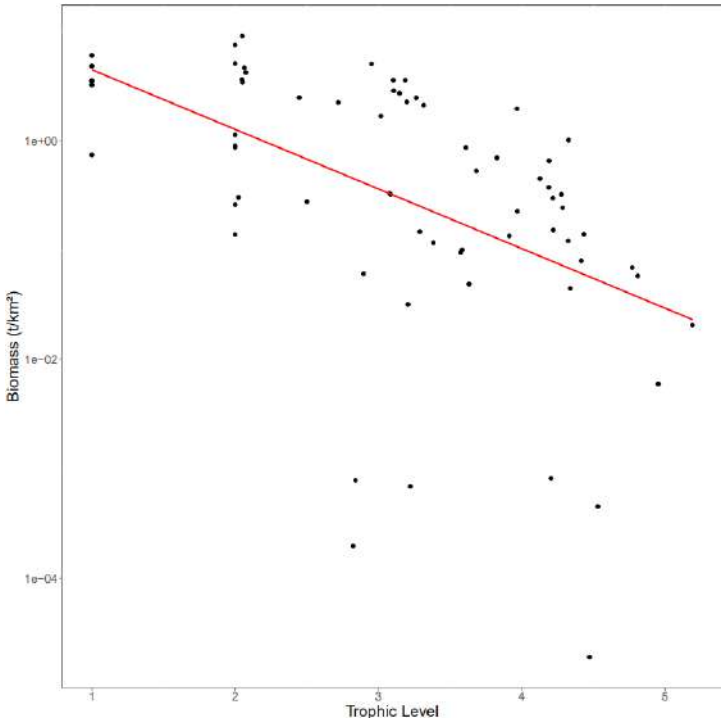
	Species	*Number of offsprings (/pair)*	*Offspring weight*	*Offspring mean weight*	*Adult weight*	*Adult abundance*	*Adult mean weight*
Pelagic piscivorous	*Puffinus (yelkouan + mauretanicus)*	1	45g	43.1g	405g	4780	561.2g
	Hydrocoloeus minutus		14.5g		120g	2216	
	Morus bassanus		85g		3000g	662	
	Calonectris diomedea		67.5g		750g	1242	
	Fratercula artica		39.7g		435g	988	
Coastal piscivorous	*Sterna hirundo*	2	7.775g	17.6g	120g	1265	181g
	Sterna sandvicensis		27.5g		242g		
Coastal omnivorous	*Larus michahellis*	2,5	62.25g	52.3g	1000g	8991.5	801.7g
	Ichthyaetus melanocephalus		27.5g		300g	3554.5	
	Larus ridibundus		26g				
Dolphins	*Tursiops truncates*	1 / 4 years	30kg	30kg	300kg	2382	300kg

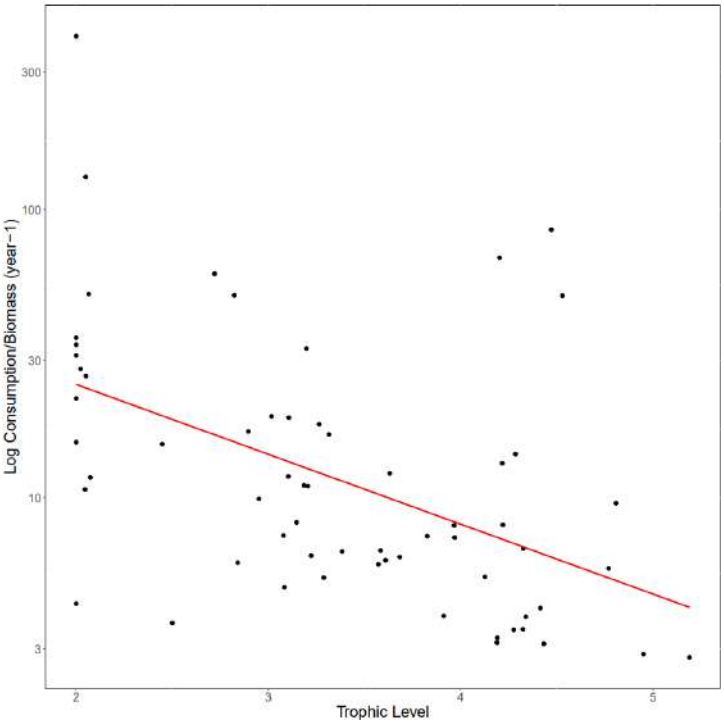
Annexe 6 : Comparaison des paramètres physiologiques des compartiments de la mégafaune marine avec la littérature

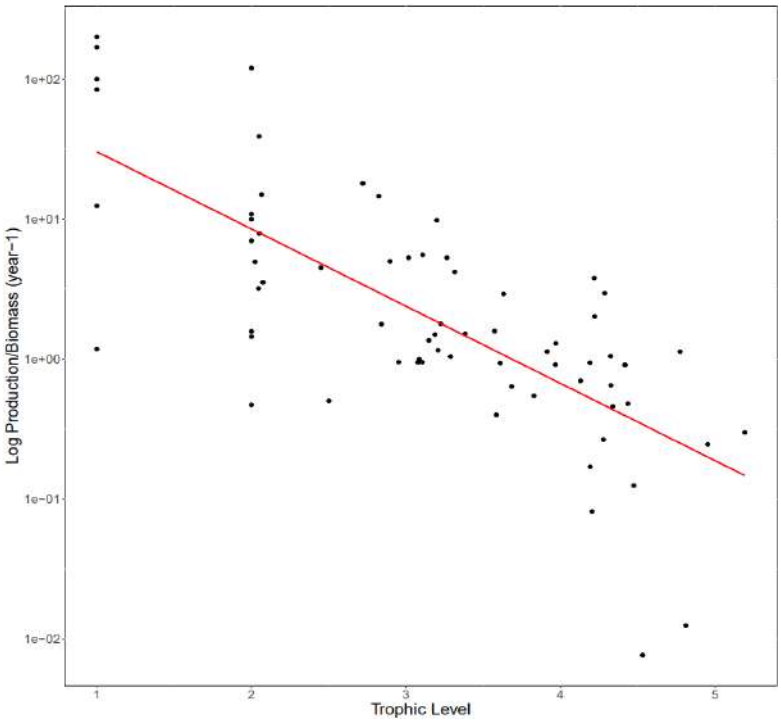
	B t/km^2	**P/B** /year	**Q/B** /year	**Source**	**Area**
Coastal omnivorous	8,21.10^{-4}	0,0874	68,186	This study	Gulf of Lion
Coastal piscivorous	1,87.10^{-5}	0,1251	85,239		
Pelagic piscivorous	4,53.10^{-4}	0,007687	50,355		
Dolphins	0.04765	0,0125	11,67		
Seabirds	0,00004672	0,4745382	82,25924	Vilas *et al*. 2021	Fisheries Restricted Area (FRA) of the Gulf of Lion ecosystem
Dolphins	0,0026	0,12	14,46		
Larus audouinii	0,0011	4,64	70	Coll Montón 2006	Catalan Sea
Other seabirds	0,0011	4,56	73,2		
Dolphins	0,03	0,07	13,49		
Seabirds	0,002	0,6	66	Bănaru *et al.* 2013; Seyer *et al.* 2023	N-E Mediterranean Sea
Dolphins	0,022	0,02	6,12		
Phalacrocorax aristotelis	>0,01	0,68	55,86	Vanalderweireldt *et al.* 2022	Eastern Corsican Coast
Dolphins	<0,01	0,09	13,52		
Seabirds	0	4,78	111,61	Tsagarakis *et al.* 2010	North Aegean Sea
Dolphins	0,01	0,08	13,81		
Seabirds	0,001	4,47	70,89	Corrales *et al.* 2015	N-W Mediterranean Sea
Dolphins	0,05	0,03	12,32		

Annexe 7 : Matrices alimentaires de la mégafaune marine dans Ecopath

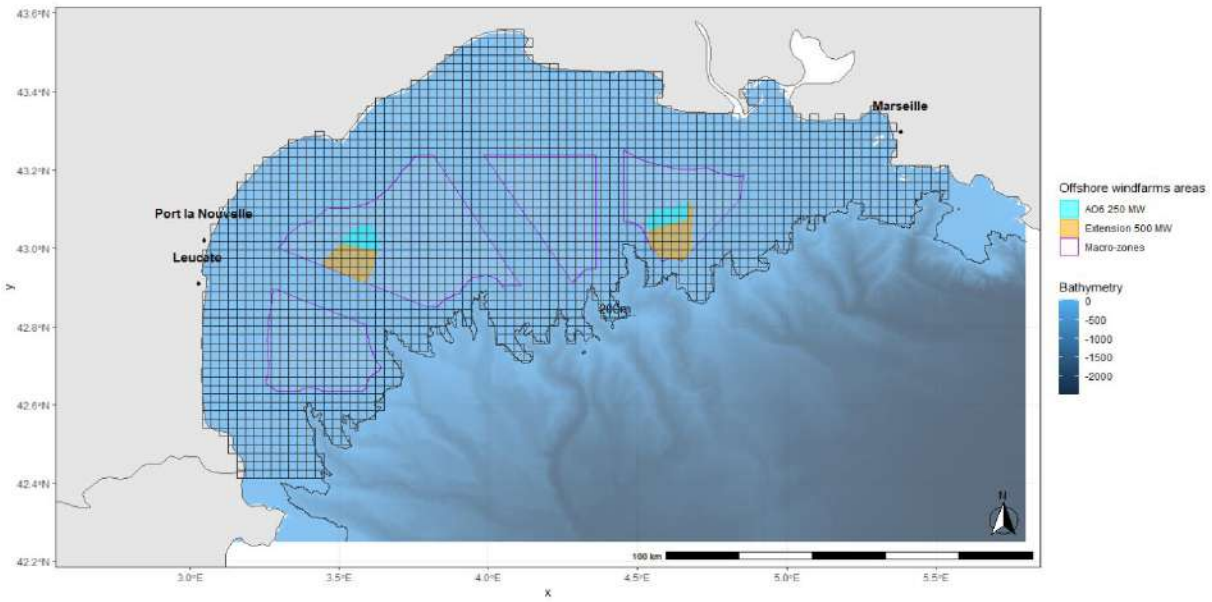
	Dolphins	**Pelagic piscivorous**	**Coastal piscivorous**	**Coastal omnivorous**
Macrozooplancton	0	0,02	0	0
Octopuses	0,005	0,015	0,02	0,01
Cuttlefishes	0	0,02	0,02	0,01
Squids	0,005	0,005	0,02	0,02
Carnivorous worms	0	0	0,02	0
Suprabenthic and benthic crustaceans	0	0.01	0.02	0.01
Sardina pilchardus	0.1	0.09	0.1	0.16
Engraulis encrasicolus	0.018	0.1	0.1	0.1
Sprattus sprattus	0.02	0.1	0.1	0
Planctonophagous pelagic	0.02	0.04	0.1	0
Planctonophagous dermersal	0	0.04	0.1	0
Invertivorous fishes	0.002	0.09	0.1	0
Crustivorous fishes 1	0.005	0	0	0
Crustivorous fishes 2	0.005	0	0	0
Wormivorous fishes	0.02	0	0	0
Scomber scombrus	0.24	0.2	0	0
Trachurus mediterraneus	0.2	0	0	0
Trachurus trachurus	0.1	0	0	0
Carnivorous dermersal fishes 1	0	0	0.2	0
Piscivorous flat fishes	0.1	0	0	0
Piscivorous fishes	0.05	0.1	0.05	0.045
Merluccius merluccius	0.1	0	0	0
Conger conger	0.01	0	0	0
Discards	0	0.02	0.05	0.015
Imports	0	0,15	0	0,63



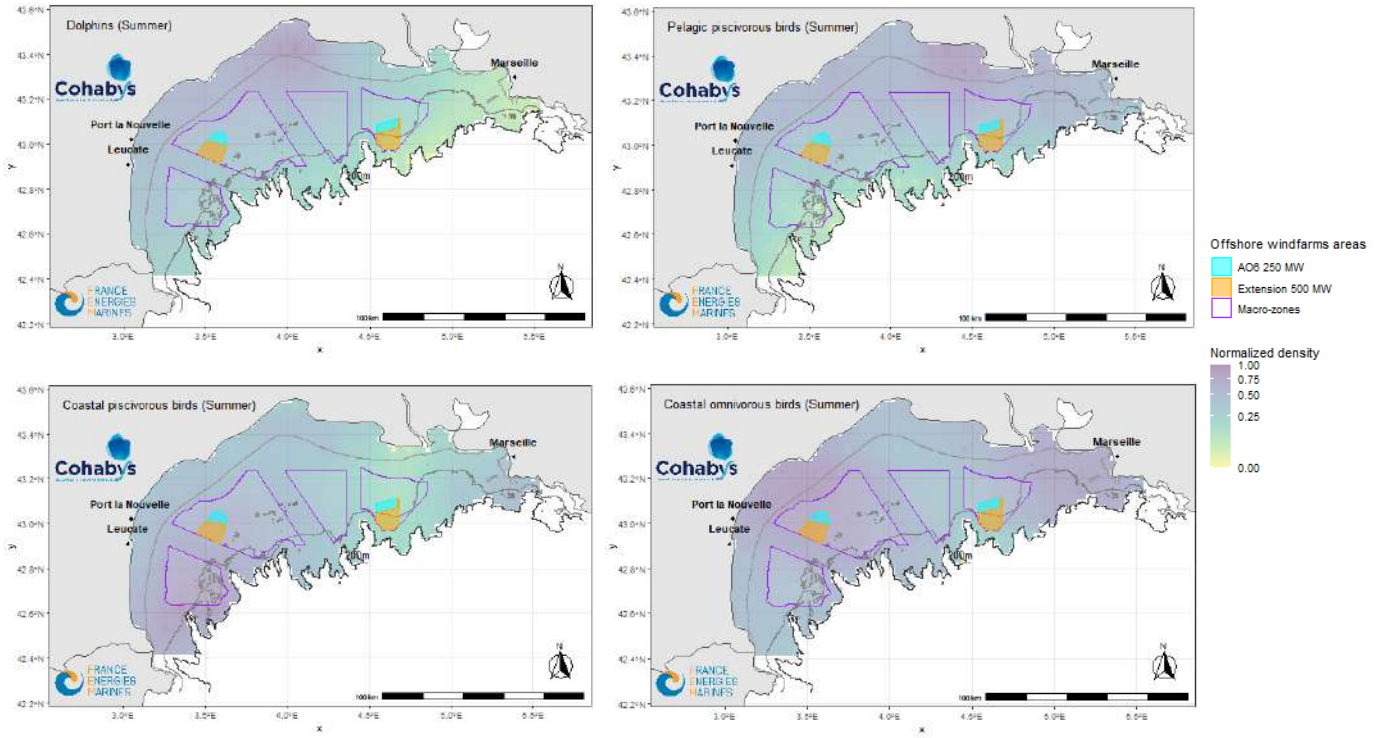




Annexe 8 : PREBAL du modèle GOLEM_MM

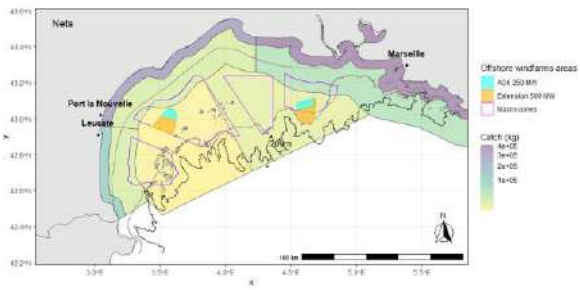


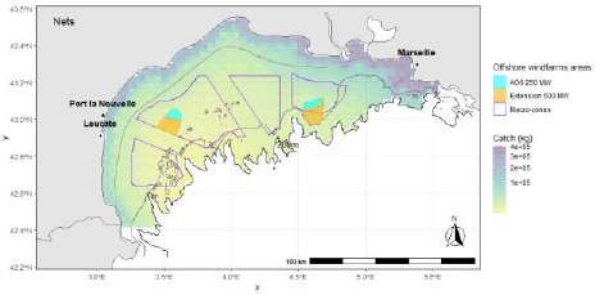
Annexe 9 : Résolution de la grille Ecospace



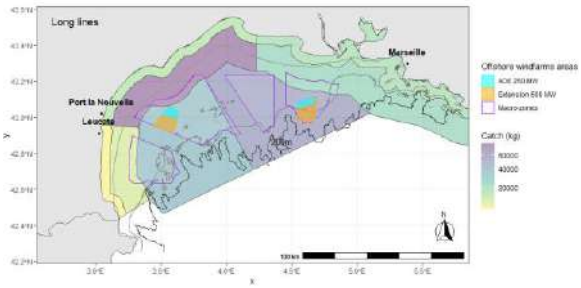
Annexe 10 : Cartes de distribution de la mégafaune marine en été (dans l'ordre de gauche à droite Dolphins, pelagic piscivorous birds, coastal piscivorous birds et coastal omnivorous birds),, interpolées sur la grille ECOSPACE à partir des cartes initiales de COHABYS

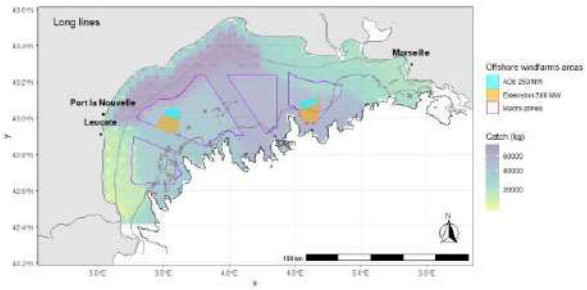
Nets



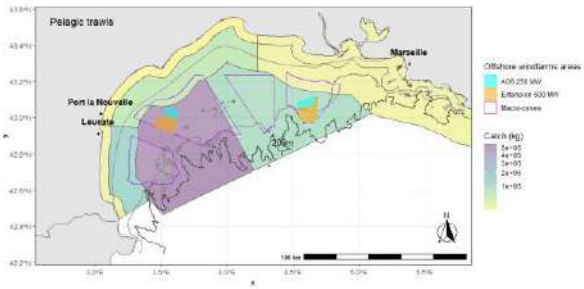


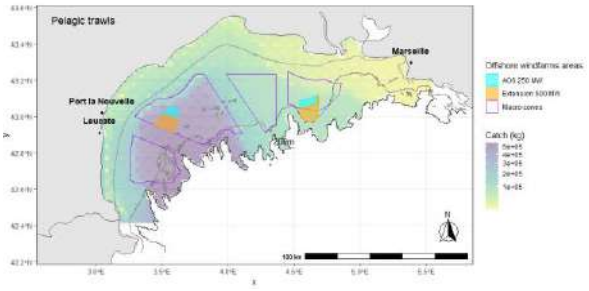
Long lines



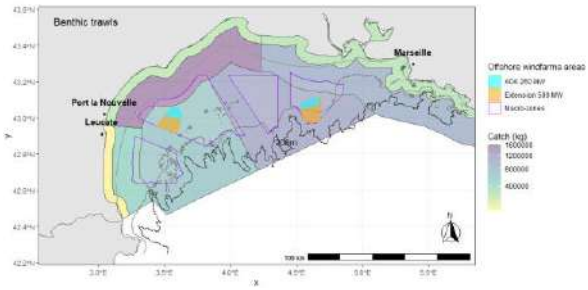


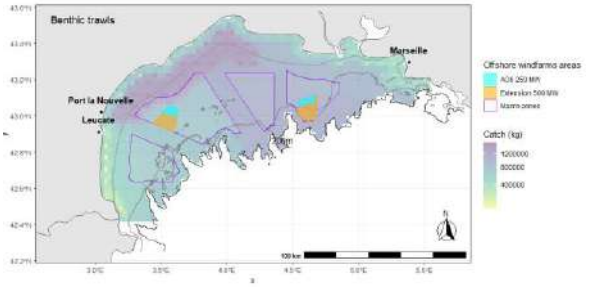
Pelagic trawls



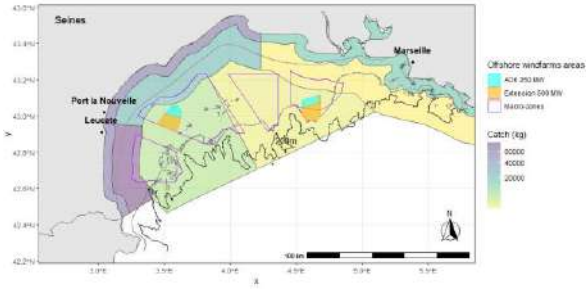


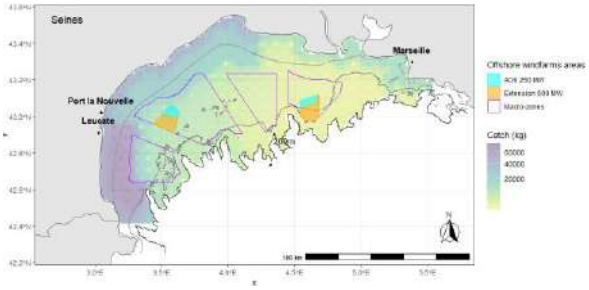
Benthic trawls



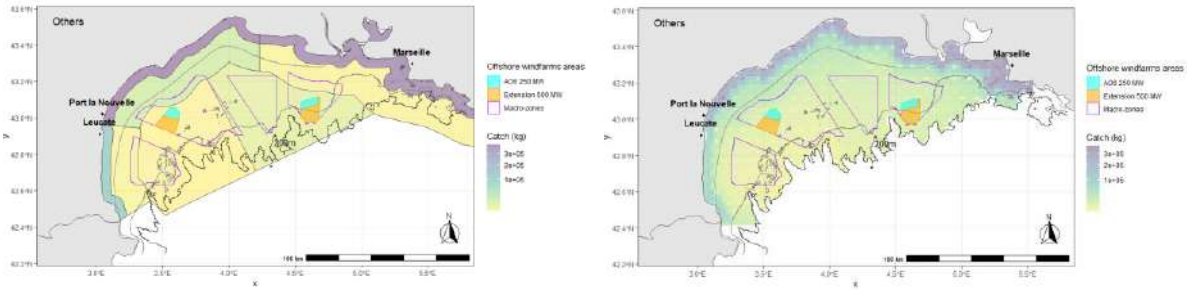


Sennes

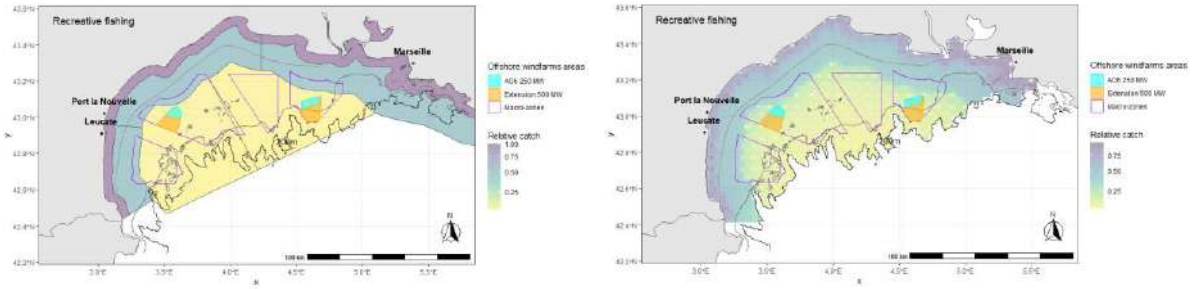




Others

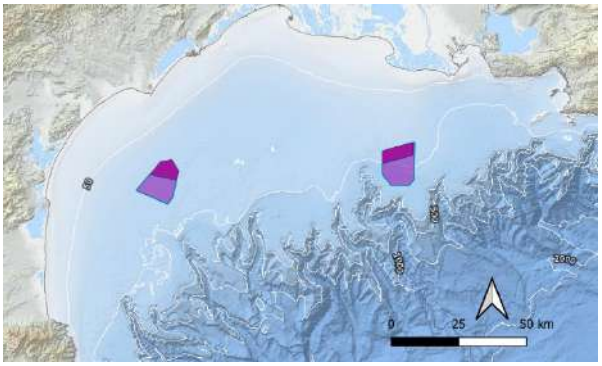


Recreative fishing

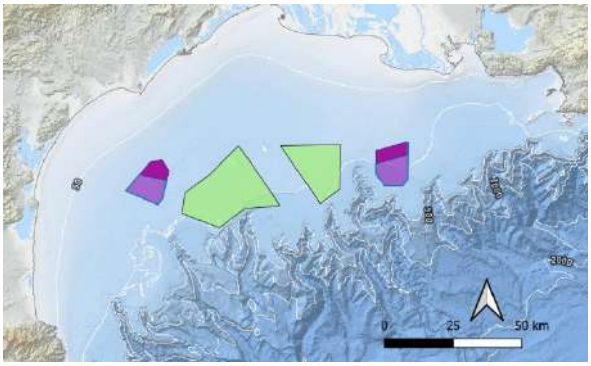


Annexe 11 : Carte de répartition des captures de pêche par engin avant (à gauche) et après (à droite) interpolation

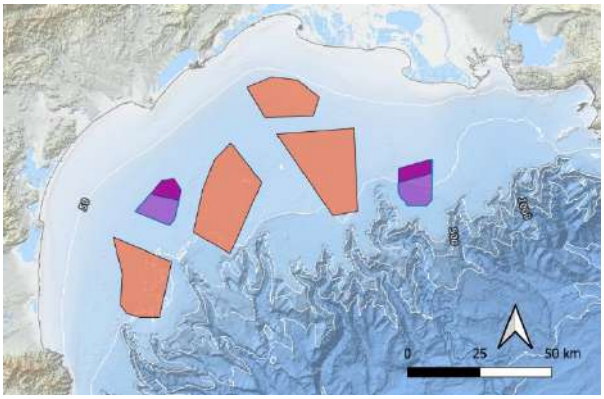
Environnement



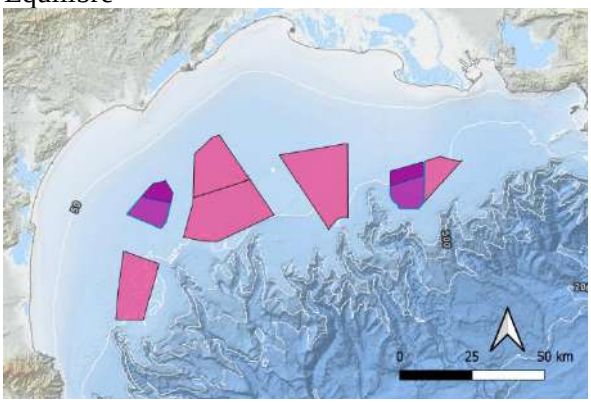
Loin côtes



Réduction coûts



Equilibre

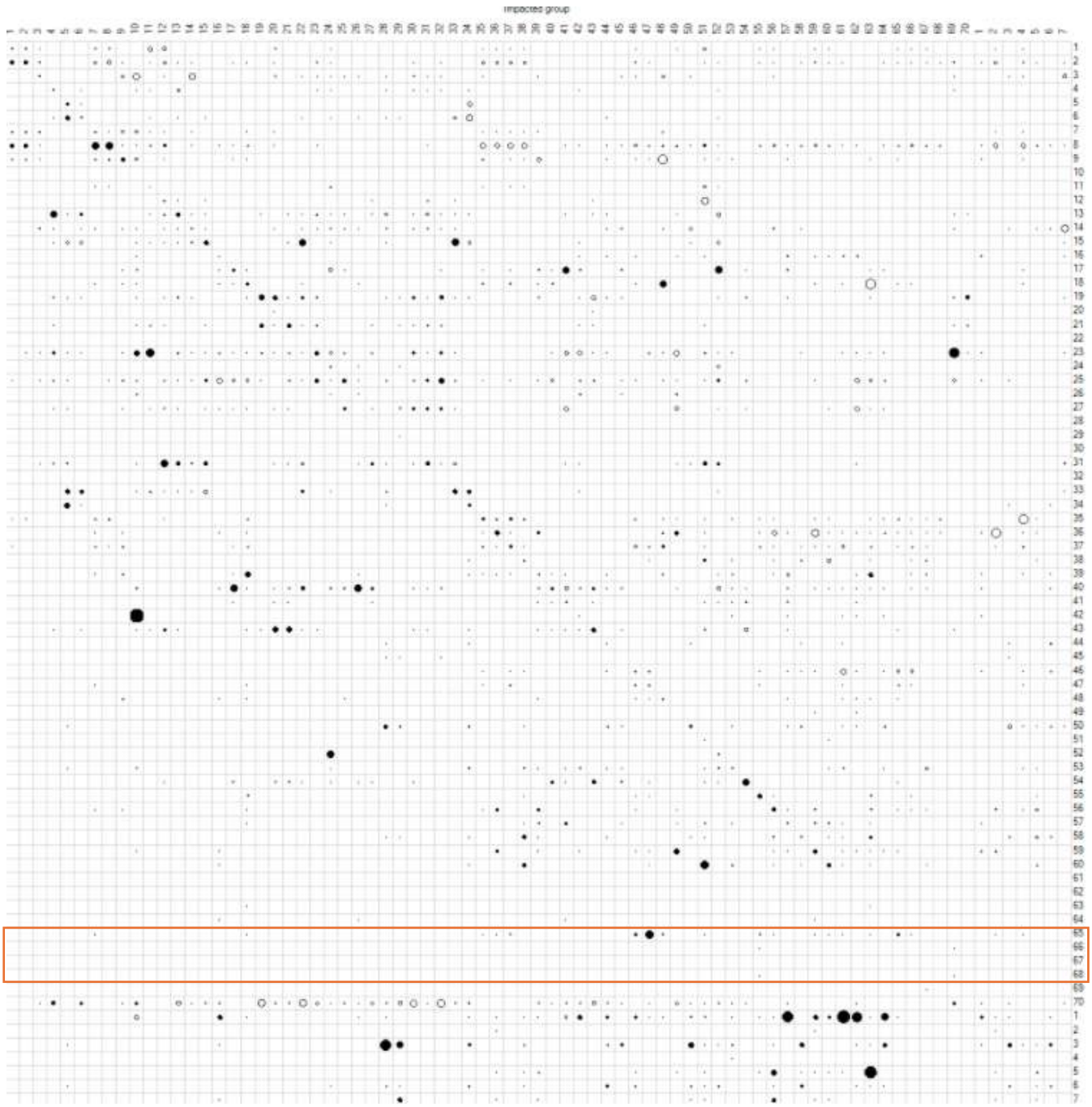


Annexe 12 : Shapefiles des parcs géoréférencés sur QGIS

Annexe 13 : Niveau trophique et biomasse des compartiments de GOLEM et GOLEM_SMM

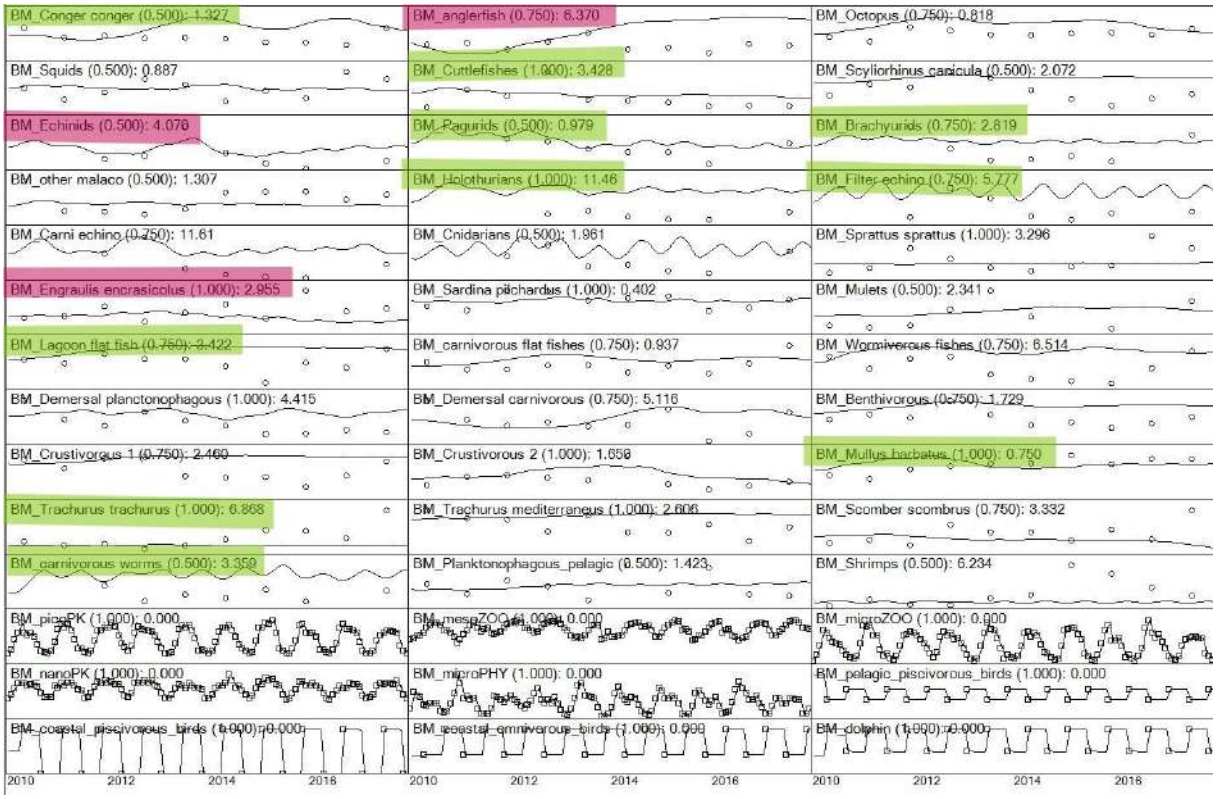
		Trophic level		*Biomass in habitat area (t/km²)*	
	Group name	GOLEM	GOLEM_SMM	GOLEM	GOLEM_SMM
1	Picoplankton	1	1	3,537	3,537
2	Nanoplankton	1	1	6,026	6,026
3	Microphytoplankton	1	1	3,537	3,537
4	Microphytobenthos	1	1	0,742	0,742
5	Posidonia	1	1	4,819	4,819
6	Benthic macrophytes and epibionts	1	1	3,24	3,24
7	Microzooplankton	2	2	0,899	0,899
8	Mesozooplankton	2,05	2,05	9,07	9,07
9	Macrozooplankton	2,72	2,72	2,25	2,25
10	Jellyfishes	2,822592	2,822592	0,00019761	0,00019761
11	Cnidarians	2,447885	2,447885	2,485	2,485
12	Sessile suspension feeders	2,046662	2,046662	3,637	3,637
13	Depositivorous molluscs	2	2	5,081	5,081
14	Filter feeder molluscs	2,051167	2,051167	3,415	3,415
15	Carnivorous Molluscs	3,017179	3,017179	1,685	1,685
16	Octopuses	4,22021	4,22021	0,153	0,153
17	Cuttlefishes	4,216871	4,216871	0,299	0,299
18	Squids	4,285783	4,285784	0,244	0,244
19	Detritivorous worms	2	2	7,519	7,519
20	Filter feeding worms	2	2	0,873	0,873
21	Carnivorous worms	3,106345	3,106345	2,865	2,865
22	Sipuncula	2	2	1,136	1,136
23	Suprabenthic and benthic crustaceans	2,06467	2,06467	4,633	4,633
24	Pagurids	2,896209	2,896209	0,061	0,061
25	Shrimps - decapods	3,198198	3,198198	2,271	2,271
26	Other Malacostraca	3,631026	3,631026	0,049	0,049
27	Brachyurids	3,315295	3,315295	2,119	2,119
28	Palinurus elephas	3,223086	3,223085	0,00069454	0,00069454
29	Homarus gammarus	3,125668	2,839973	0,0007862	0,0007862
30	Filter feeder echinoderms	2,024137	2,024137	0,3036612	0,3036612
31	Carnivorous echinoderms	3,26447	3,26447	2,473	2,473
32	Holothurians	2	2	0,138994	0,138994
33	Echinids	2,073892	2,073892	4,205	4,205
34	Herbivorous fishes	2,000504	2,000503	0,2616	0,2616
35	Sardina pilchardus	2,9517	2,9517	5,03889	5,03889
36	Engraulis encrasicolus	3,14648	3,14648	2,723636	2,723636
37	Sprattus sprattus	3,1036	3,1036	3,5777	3,5777
38	Planctonophagous pelagic	3,078298	3,078298	0,33	0,33
39	Planctonophagous dermersal	3,60961	3,60961	0,869	0,869
40	Invertivorous fishes	3,966679	3,966679	1,96	1,96
41	Crustivorous fishes 1	4,127295	4,127295	0,452	0,452
42	Crustivorous fishes 2	3,383352	3,383352	0,1169955	0,1169955
43	Wormivorous fishes	3,186266	3,186266	3,577	3,577
44	Mullets	2,500172	2,500172	0,278223	0,278223

45	Lagoon flat fish	3,288233	3,288234	0,148	0,148
46	Scomber scombrus	3,969269	3,969269	0,2267	0,2267
47	Trachurus mediterraneus	3,683534	3,683534	0,531	0,531
48	Trachurus trachurus	3,82668	3,82668	0,6978	0,6978
49	Mullus barbatus	3,572621	3,572621	0,0951	0,0951
50	Sparus aurta	3,084346	3,084346	0,325	0,325
51	Diplodus vulgaris	3,206115	3,206115	0,032	0,032
52	Coris julis	3,583804	3,583804	0,101	0,101
53	Carnivorous dermersal fishes 1	4,32405	4,32405	0,122	0,122
54	Piscivorous flat fishes	4,325868	4,325868	1,016	1,016
55	Piscivorous fishes	4,276478	4,276478	0,3237241	0,3237241
56	Tunas	4,191019	4,191019	0,657	0,657
57	Anglerfish	4,771247	4,771247	0,06958	0,06958
58	Dicentrachus labrax	3,912813	3,912813	0,135	0,135
59	Merluccius merluccius	4,189437	4,189436	0,376	0,376
60	Conger conger	4,416122	4,416123	0,08	0,08
61	Squalus acanthias	4,95165	4,951651	0,00598	0,00598
62	Scyliorhinus canicula	4,338685	4,338685	0,04473	0,04473
63	Prionace glauca	5,191288	5,191289	0,02066756	0,02066756
64	Rays	4,4333	4,433712	0,1395467	0,1395467
65	Dolphins	4,948474	4,808701	0,008	0,0324
66	Pelagic piscivorous birds	3,841943	4,530349	0,003	0,00045299
67	Coastal piscivorous birds		4,472148		1,91E-05
68	Coastal omnivorous birds		4,202959		0,000821
69	Discards	1	1	0,298	0,298
70	Detritus	1	1	64,7	64,7



1	Picoplankton	11	Cnidarians	21	Carnivorous worms	31	Carnivorous echinoderms	41	Crustivorous fishes 1	51	Diplodus vulgaris	61	Squalus acanthias
2	Nanoplankton	12	Sessile suspension feeders	22	Sipuncula	32	Holothurians	42	Crustivorous fishes 2	52	Coris julis	62	Scyliorhinus canicula
3	Microphytoplankton	13	Depositivorous molluscs	23	Suprabenthic and benthic crustaceans	33	Echinids	43	Wormivorous fishes	53	Carnivorous dermersal fishes 1	63	Prionace glauca
4	Microphytobenthos	14	Filter feeder molluscs	24	Pagurids	34	Herbivorous fishes	44	Mullets	54	Piscivorous flat fishes	64	Rays
5	Posidonia	15	Carnivorous Molluscs	25	Shrimps - decapods	35	Sardina pilchardus	45	Lagoon flat fish	55	Piscivorous fishes	65	Dolphins
6	Benthic macrophytes and epibionts	16	Octopuses	26	Other Malacostraca	36	Engraulis encrasicolus	46	Scomber scombrus	56	Tunas	66	Pelagic piscivorous birds
7	Microzooplankton	17	Cuttlefishes	27	Brachyurids	37	Sprattus sprattus	47	Trachurus mediterraneus	57	Anglerfish	67	Coastal piscivorous birds
8	Mesozooplankton	18	Squids	28	Palinurus elephas	38	Planctonophagous pelagic	48	Trachurus trachurus	58	Dicentrachus labrax	68	Coastal omnivorous birds
9	Macrozooplankton	19	Detritivorous worms	29	Homarus gammarus	39	Planctonophagous dermersal	49	Mullus barbatus	59	Merluccius merluccius	69	Discards
10	Jellyfishes	20	Filter feeding worms	30	Filter feeder echinoderms	40	Invertivorous fishes	50	Sparus aurta	60	Conger conger	70	Detritus

Annexe 14 : MTI du modèle GOLEM_MM



Annexe 15 : Evolution des biomasses simulées en fonction des biomasses de référence pour GOLEM_MM sur la période 2010-2019 et calcul des SS. En vert, les courbes plus proches des données de référence par rapport à GOLEM et en rouge, les courbes moins proches des données de référence.

L'INSTITUT agro Rennes Angers	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronome Spécialisation / option : Sciences halieutiques et aquacoles / Modélisation halieutique Enseignant référent : Olivier Le Pape

Auteur(s) : Alizée Frayssinet Date de naissance : 24/11/2000	Organisme d'accueil : France Energies Marines Adresse : Technopole de Château-Gombert 38, rue Frédéric Jolliot-Curie 13451 Marseille Maître de stage : Vincent Faure, Emma Araignous et Daniela Bănaru

Nb pages : 35 Annexe(s) : 15	
Année de soutenance : 2024	

Titre français : **Etude de l'écosystème marin du golfe du Lion avec la suite Ecosim with Ecopath (et Ecospace) : amélioration du compartiment mégafaune marine et réalisation des premiers scénarios des parcs éoliens flottants.**

Titre anglais : **Study of the marine ecosystem in the Gulf of Lion using the Ecosim with Ecopath (and Ecospace) suite: improvement of the marine megafauna compartment and production of the first scenarios for floating wind farms.**

Résumé : Le développement de l'éolien flottant en méditerranée devient un sujet central en réponse à la demande croissante en énergie. En phase d'exploitation, ces structures sont à l'origine d'effets directs sur la mégafaune marine (attraction, évitement) et d'effets indirects (déplacement des aires d'alimentation). Le premier objectif de cette étude a été de recenser les données les plus récentes sur les compartiments oiseaux marins et dauphins dans le golfe du Lion. Ce travail a permis de faire évoluer un modèle trophique spatio-temporel existant, GOLEM, développée par Seyer (2024), en y ajoutant de nouveaux compartiments pour la mégafaune marine. Ce modèle a été développé grâce à l'outil Ecopath with Ecosim (et Ecospace) et modélise l'écosystème marin du golfe du Lion avec 68 compartiments (bas niveaux trophiques jusqu'aux prédateurs supérieurs). La comparaison de modèle modifié avec GOLEM a montré que les oiseaux marins et les dauphins, en tant qu'espèces clef-de-voûte avaient un rôle essentiel dans le fonctionnement du réseau trophique. Le second objectif a été d'étudier les impacts cumulés des parcs éoliens flottants sur la mégafaune marine et les espèces commerciales. Différents scénarios de superficie des parcs et proximité aux côtes ont été réalisés, avec l'introduction d'hypothèses sur leurs effets au niveau réglementation et environnement. Les règles imposées sur la pêche dans les parcs ont une influence considérable sur la distribution des espèces. Ce travail ouvre la voie à de prochaines études incluant d'autres effets (risques de collision, réchauffement climatique).

Abstract : The development of floating wind farms in the Mediterranean sea is becoming a key issue in response to the growing demand for energy. During the operational phase, these structures have direct effects on marine megafauna (attraction, avoidance) and indirect effects (displacement of feeding areas). The first objective of this study was to compile the most recent data on the marine bird and dolphin compartments in the Gulf of Lion. This work made it possible to develop an existing spatio-temporal trophic model, GOLEM, developed by Seyer (2024), by adding new compartments for marine megafauna. This model was developed using the Ecopath with Ecosim (and Ecospace) tool and models the Gulf of Lion marine ecosystem with 68 compartments (from low trophic levels to top predators). Comparison of the modified model with GOLEM showed that seabirds and dolphins, as keystone species, played an essential role in the functioning of the food web. The second objective was to study the cumulative impacts of floating wind farms on marine megafauna and commercial species. Different scenarios were developed for the size of the farms and their proximity to the coast, and assumptions were made about their regulatory and environmental effects. The rules imposed on fishing in the parks have a considerable influence on the distribution of species. This work paves the way for future studies including other effects (collision risks, global warming).

Mots-clés : Mégafaune marine, éolien offshore flottant, Ecopath with ecosim, GOLEM, golfe du Lion

Key Words: Marine megafauna, offshore wind farm, Ecopath with Ecosim, GOLEM, Gulf of Lion