

<p>Année universitaire : 2021-2022</p> <p>Spécialité : Agronomie</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Sciences Halieutiques et Aquicoles (REA)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

Impact de l'implémentation d'une zone de jachère rotationnelle sur la dynamique de la population de coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*) en baie de Seine

Par : Jade MOGEON



France.fr

Soutenu à Rennes, le 14/09/2022

Devant le jury composé de :

Etienne RIVOT, Olivier LE PAPE, Martial LAURANS, Eric FOUCHER

Président : Etienne RIVOT

Maîtres de stage : Eric FOUCHER et Morgane AMELOT

Enseignant référent : Etienne RIVOT

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

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



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

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

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : le 29/07/2022

(ou de l'étudiant-entrepreneur)

Eric Foucher



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⁾ **Nom Prénom** Jade Mogeon

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

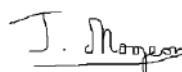
Oui Non

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 : 29/08/2022



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.

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

Date et signature de l'enseignant : Etienne Rivot

27 Sept 2022



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

(2) Signature et cachet de l'organisme

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

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

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord, à remercier mes maîtres de stage Eric Foucher et Morgane Amelot pour leur disponibilité, leur aide, leurs conseils et leur soutien. Un grand merci à vous pour m'avoir guidée tout au long de mon stage ainsi que pour vos relectures de ce mémoire. Je vous remercie, également, de m'avoir fait participer aux événements ayant eu lieu lors de ma période de stage (groupe de travail DLS, embarquement MECANOR, campagne COMOR, Commission coquilles Saint-Jacques) qui ont été très enrichissants et qui seront un plus pour mon avenir.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de l'Ifremer de Port en Bessin pour leur chaleureux accueil au sein de la station et les moments partagés à la cafétéria.

Un grand merci tout particulièrement à Eric, Valentine M., Valentine B., Ismène, Laurent, Anna, Carine, Camille, Angéline et Morgane pour les nombreux covoiturages entre Bayeux et Port en Bessin.

Enfin, un grand merci à toi, Fanchon, pour ton accompagnement sur la campagne COMOR et pour m'avoir appris à disséquer des poissons, prélever des otolithes et à identifier le benthos de la baie de Seine. Merci également à l'équipage de la Thalia pour leur hospitalité et les bons plats cuisinés à bord.

SOMMAIRE

Introduction	1
I. Matériels et Méthodes	5
1.1. Contexte de l'étude : La pêche de la CSJ en France et en baie de Seine	5
1.2. Rappel du cycle de vie de la CSJ	7
1.3. Données	7
1.3.1. Données d'abondance	8
1.3.1.1. Description du déroulement de la campagne COMOR	8
1.3.1.2. Présentation des données COMOR	8
1.3.2. Données d'effort de pêche	8
1.4. Analyses	8

1.4.1. Modélisation des effets de la jachère sur l'abondance de CSJ	9
1.4.1.1 Formulation du modèle	9
1.4.1.2. Hypothèses et sélection du modèle	10
1.4.2. Restructuration de la pêcherie de CSJ en Baie de Seine	10
1.4.2.1. Comparaison spatio-temporelle de la répartition des efforts de pêche	10
1.4.2.2. Répartition spatio temporelle des hotspots d'effort et d'abondance de CSJ matures	11
II. Résultats	14
2.1. Impact de la jachère rotationnelle sur l'abondance de CSJ à court terme	15
2.1.1. Après la fermeture de la zone	15
2.1.2. Après la réouverture de la zone	17
2.2. Impacts secondaires de la jachère rotationnelle sur le stock de CSJ en baie de Seine	19
2.2.1. Impact de la jachère rotationnelle sur l'uniformité de l'effort de pêche en baie de Seine	19
2.2.1.1. Etude de l'effort de pêche absolu, des captures et CPUE	20
2.2.1.2. Étude de l'effort de pêche relatif par zone	22
2.2.1.3 Etude de l'effort relatif de pêche par saison	24
2.2.2 Liens entre effort de pêche et répartition de l'abondance de CSJ en baie de Seine	26
III. Discussion	29
3.1. Les performances d'une mesure de gestion spatialisée: de la définition des objectifs à leur évaluation	29
3.2. Un système de jachère rotationnelle cohérent avec le cycle de la vie de la CSJ	30
3.2.1. Après la fermeture de la zone	31
3.2.2. Après la réouverture de la zone	31
3.3. Jachère rotationnelle, répartitions spatio-temporelles de l'abondance et de l'effort de pêche: des processus connectés	33
3.3.1. Contraintes exercées par la jachère sur la répartition de l'effort de pêche	33
3.3.2. Lien entre effort et abondance	34
3.3.3. Mesures de gestion et abondance une interaction dynamique dans un environnement changeant	34
Bibliographie	36
LISTE DES ABREVIATIONS	

AMP : Aire Marine Protégée

CIEM : Conseil International de l'Exploration de la Mer

COMOR : COquilles Manche ORientale

CPUE : Captures Par Unité d'Effort

CSJ : Coquilles Saint –Jacques

IUCN : (International Union for Conservation of Nature)

NEFMC : New England Fishery Management Council

PPS: Permis de Pêche Spécial

QIT : Quota Individuel Transférable

SIH : Système d'Information Halieutique

TAC : Totaux Admissibles de Captures

VMS : Vessel Monitoring System

LISTES DES ANNEXES

Annexe I : Calendrier des zones sanitaires mises en jachère depuis le 28 novembre 2016

Annexe II : Zones sanitaires de la Baie de Seine jusqu'en 2021

Annexe III : Principaux gisements de CSJ en Manche Est

Annexe IV : Stratification utilisée lors de la campagne COMOR depuis 1982

Annexe V : Evolution des captures en Manche Est (zone CIEM VII d) de 2000 à 2014 (Duncan et al., 2016)

Annexe VI : Evolution de l'effort de pêche de 1992 à 2011 en baie de Seine
(Duncan et al., 2016)

Annexe VII : Cycle de vie de la coquille Saint Jacques (Devauchelle et al., 1991)

Annexe VIII : Description du protocole de la campagne COMOR (Vigneau et al., 2001)

Annexe IX : Plan d'échantillonnage de la campagne COMOR en juillet 2022 (Foucher et Varenne, 2021)

Annexe X : Présentation des données COMOR

Annexe XI : Correction des données COMOR (Vigneau et al., 2001)

Annexe XII : Courbes logistiques d'efficacité des deux dragues utilisées lors de la campagne COMOR (Vigneau et al., 2001)

Annexe XIII : Présentation de la base de données VMS

Annexe XIV : Présentation de l'étude de l'effet de la jachère rotationnelle sur l'abondance de CSJ de baie de Seine

Annexe XV : Calendrier du suivi de l'effort de pêche et de l'abondance de la population de CSJ en Baie de Seine

Annexe XVI : Mise en évidence de l'adéquation entre les temporalités de la jachère rotationnelles, de l'effort de pêche et du cycle de vie de la CSJ. Analyse en points chauds et points froids

Annexe XVII : Courants en baie de Seine (Salomon, 1985) superposés aux zones sanitaires

Annexe XVIII : Impact de la zone rotationnelle de jachère sur le cycle de vie de la CSJ en baie de Seine

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution de l'abondance de CSJ estimées en baie de Seine estimée à la suite des campagnes annuelles COMOR de juillet de 2016 à 2021

Figure 2 : Evolution de l'abondance de CSJ estimées en baie de Seine estimée à la suite des campagnes annuelles COMOR de juillet

Figure 3 : Répartition de l'abondance des CSJ d'âge 1 (a), d'âge 2 (b) et d'âge 3 et plus (c) en baie de Seine après la réouverture d'une zone sanitaire mise en jachère

Figure 4 : Évolution de l'effort de pêche absolu de 2004 à 2021 en baie de Seine et « Proche Extérieur »

Figure 5 : Evolution des captures de CSJ (a) et CPUE (b) sur la période de 2004 à 2021

Figure 6 : Evolution de l'effort de pêche absolu de 2004 à 2021 en baie de Seine et « Proche Extérieur »

Figure 7 : Comparaison des efforts de pêche relatifs par zone sanitaire sur la période 2004-2016, avant l'instauration de la politique de jachère rotationnelle

Figure 8 : Comparaison des efforts de pêche relatifs par zone sanitaire en baie de Seine (a) et en « Proche Extérieur » (b) sur la période 2016-2021, après l'instauration de la politique de jachère

Figure 9 : Comparaison des efforts de pêche relatif par saison de pêche en baie de Seine et en « Proche Extérieur » sur la période des saisons de pêche 2004-2005 à 2015-2016, avant l'instauration de la politique de jachère

Figure 10 : Comparaison des efforts de pêche relatifs par saison de pêche en baie de Seine et en « Proche Extérieur » sur la période des saisons de pêche 2016-2017 à 2020-2021, après l'instauration de la politique de jachère

Figure 11 : Evolution spatio-temporelle de l'effort de pêche absolu en points chauds (a) et points froids (b) de 2004-2005 à 2020-2021

Figure 12 : Evolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ d'âge 1 en points chauds de 2004 à 2020

Figure 13 : Evolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ d'âge 2 en points chauds de 2004 à 2020

Figure 14 : Evolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ d'âge 3+ en points chauds de 2004 à 2020

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Présentation des variables explicatives pour la construction du GLM

Tableau 2 : Présentation des définitions des “anciens”, “sporadiques”, “persistants” et nouveaux points chauds

Introduction

Selon la FAO (2020), le pourcentage de stocks halieutiques surexploités est passé de 10% en 1974 à 34,2% en 2017 au niveau mondial. Cette augmentation de 24,2% en 43 ans, a conduit à la définition d'objectifs de gestion durable des pêcheries. Pour parvenir à ces objectifs, diverses mesures de gestion existent. Il est par exemple possible de limiter les tailles de captures, d'augmenter la sélectivité des maillages, de mettre en place des quotas, ou d'instaurer des aires marines protégées (AMP) (Horwood et al., 1998).

Parmi les mesures de gestion spatialisées, le terme d'AMP regroupe un nombre important de typologies de gestion et de degrés de protection. D'après l'IUCN (International Union for Conservation of Nature), une AMP est "un espace intertidal ou infra tidal ainsi que ses eaux sous-jacentes, sa flore, sa faune et ses ressources historiques et culturelles que la loi ou d'autres moyens efficaces ont mis en réserve pour protéger en tout ou en partie le milieu ainsi délimité" (Lefebvre, 2005). Au sein d'une AMP, la protection des ressources naturelles (faune, flore, habitat) peut être totale ou partielle (Day et al., 2015). Dans le cadre de protection de ressources halieutiques, la mise en place d'AMP cherche, par une interdiction de pêche, à contrôler la mortalité par pêche, à restaurer la biomasse, à augmenter l'âge, la taille et la densité des individus, à favoriser la résilience vis à vis de la surexploitation et ainsi à éviter l'effondrement des ressources (Dugan et al., 1993 ; Sumaila et al., 1999; Gell et Roberts, 2003 ; Hilborn et al., 2004 ; Moland et al., 2021). Par exemple, Francour (1991), a montré qu'après 13 années de protection, la biomasse et la densité de 11 espèces de poissons était 5 fois supérieure à celles des zones de pêches proches, dans l'AMP de Scandola (Corse).

De même, après 5 ans de protection dans l'AMP Long Island-Kokomo Hua (Nouvelle-Zélande), 35% des femelles de morue bleu *Parapercis colias*, mesuraient plus de 33 cm, contre moins de 1% dans les zones de pêche voisines (Davidson et al., 2001). Cependant, l'instauration d'AMP peut être accueillie de manière contrastée par les différents acteurs locaux (Gell et Roberts, 2003 ; Rosendo et al., 2011). De fait, ceux-ci voient l'AMP comme une contrainte, les privant de leurs revenus à court terme, sans se rendre compte de son impact sur le long terme sur la restauration de la ressource en zone protégée mais aussi sur celles non protégées qui lui sont adjacentes (Rosendo et al., 2011). En effet, le phénomène de spillover qui correspond à la dispersion des larves de l'AMP vers les lieux de pêche voisins, peut contribuer à augmenter les revenus de pêcheurs (Purcell et al., 2010 ; Moland et al., 2021), à condition que les captures issues de ce phénomène soient supérieures aux pertes directes dues à l'instauration de l'AMP (Hart et al., 2020). Toutefois, l'efficacité d'une AMP est relative et ses bénéfices peuvent dépendre du schéma de dispersion larvaire, de la migration des adultes et de l'habitat protégé (frayère, nurricerie) (Sumaila et al., 1999 ; Plagányi et al., 2015 ; D'Aloia et al., 2017). Par ailleurs, d'un point de vue économique, les effets de l'AMP sont durables si l'effort de pêche reste régulé (temps de pêche, technologie et sélectivité de l'engin de pêche) après la réouverture de la zone (Hannesson et al., 1998 ; Hilborn et al., 2004 ; Rosendo et al., 2011). Après la réouverture, un accès totalement libre à la zone, sans réglementations de pêche peut effacer les effets bénéfiques de l'AMP et conduire à nouveau à un effondrement du stock, comme cela a été le cas pour le crabe des neiges (*Chionoecetes opilio*) du Japon (Yamasaki et Kuwahara 1990).

Depuis la fin du XXe siècle, des recherches ont été menées sur l'instauration de nouveaux outils de gestion spatialisée des pêcheries qui seraient plus adaptés et moins contraignants pour les pêcheurs. Ce rapport étudie la mise en place d'une jachère rotationnelle, un outil de gestion spatiale de l'effort de pêche similaire à l'AMP mais plus dynamique (Game et al., 2009). En milieu agricole, le système de jachère rotationnelle est un outil de gestion spatiale des ressources agricoles qui est utilisé depuis l'Empire Romain (Plaganyi et al., 2015). Ce système consiste à alterner les cultures, sur plusieurs parcelles, tout en laissant un terrain au repos pendant une période donnée. Ceci a pour but de reconstituer la structure et les ressources (eau, matière organique, minéraux) et d'améliorer la qualité et la résilience du sol (Mohler et Johnson, 2009). Ainsi, un sol de bonne qualité sera favorable à la croissance des cultures. Celles-ci, bénéficiant des apports qui leur sont nécessaires, auront une meilleure santé, une meilleure résistance aux ravageurs et un meilleur rendement. Les revenus des agriculteurs en seront donc augmentés (Mohler et Johnson, 2009). Dans le milieu agricole, ce système de rotation des cultures est devenu populaire, dans un contexte de production de nourriture de bonne qualité et de minimisation des impacts environnementaux (Shah et al., 2021). La réussite de ce modèle en milieu terrestre et la nécessité d'une gestion durable des ressources halieutiques, ont amené à tester ce système de zone rotationnelle de jachère en milieu marin (Plaganyi et al., 2015). Dans ce milieu, les jachères rotationnelles de pêches consistent à diviser les lieux de pêches en zones qui sont par la suite alternativement fermées à la pêche (Purcell et al., 2016) pendant une période donnée. Historiquement, ce système a été mis en place dans l'océan Indo-Pacifique dans le but d'augmenter les captures des poissons des récifs coralliens (Goetze et al., 2018). Il est d'ailleurs mieux accueilli par les pêcheurs qu'une AMP car il concilie les objectifs de conservation avec les attentes des pêcheurs (Williams et al., 2006). Cette mesure de jachère rotationnelle a été mise en place dans de nombreuses pêcheries d'espèces sessiles tels que celles du concombre de mer (*Holothuroidea*) (Purcell et al., 2010 ; Plaganyi et al., 2015 ; Eriksson et Byrne, 2015; Purcell et al., 2016), de l'ormeau nordique (*Haliotis Kamtschatkana*) (Island et Strait, 2017), de la panope du Pacifique (*Panopea abrupta*) (Campbell et al., 1998), de l'oursin rouge géant (*Strongylocentrotus franciscanus*) du Pacifique Nord (Fister et Bradbury, 1996 cités dans Chen et Hastings, 2021) et du pétoncle géant (*Placopecten magellanicus*) en Baie de Saint Georges et en Atlantique du milieu (Hart, 2003; Hart et Rango, 2006; Valderrama et Anderson, 2007; Bethoney et al., 2016).

D'après Valderrama et Anderson (2007), cette pêcherie de la baie de Saint Georges était proche de fermer au début des années 1990, en raison d'un imminent effondrement de stock. Face à cela, le NEFMC (New England Fishery Management Council) a proposé un système de jachère rotationnelle afin de protéger les jeunes pétoncles à croissance rapide : la zone est fermée lorsque le taux de croissance des pétoncles géants est supérieur à 30%, tandis qu'elle est ouverte lorsque celui-ci est inférieur à 15%. Ceci a contribué à la hausse de la biomasse et du recrutement, constatés par Bethoney et al. (2016) et Valderrama et Anderson (2007) à la suite de cette mesure. Par ailleurs, Hart et al. (2003), ont montré que l'implémentation d'une zone rotationnelle de jachère dans la baie de Saint Georges a favorisé une hausse du rendement par recrue. Pour Valderrama et Anderson (2007), le pétoncle géant est un candidat idéal pour ce type de système car c'est une espèce à faible mobilité (quelque miles par année), à croissance rapide pendant les 5 premières années (Hart et Rago, 2006), à faible mortalité naturelle (10%) et à longue espérance de vie. Ainsi, cette stratégie de gestion de la pêcherie du pétoncle géant

de la baie de Saint Georges, a non seulement permis une reconstitution du stock mais aussi une augmentation des revenus des pêcheurs (Valderrama et Anderson, 2007). Ces derniers ont capturé des individus plus âgés et plus gros ayant donc un prix plus élevé au kilogramme. Leurs coûts et leur temps de pêche ont également diminué car les CPUE (Capture par Unité d'Effort) ont augmenté, en raison d'une plus forte accumulation de biomasse sur la zone préalablement fermée (Valderrama et Anderson, 2007). Il semble donc que pour le pétoncle géant, le système de zone rotationnelle de jachère en milieu marin a été un succès, comme attendu vis à vis de celui du milieu terrestre.

Sur le modèle américain, un tel système de gestion a été appliqué en France à la coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*, notée "CSJ" dans la suite de ce rapport) de la baie de Seine, en vue d'une préservation durable de ce stock et de la rentabilité de sa pêcherie. Ce mollusque bivalve a effectivement des caractéristiques biologiques similaires à celles du pétoncle géant qui semblaient lui permettre de bénéficier des effets positifs liés au système rotationnel de jachère. D'après Martineu, 1994, cette espèce a également une faible mobilité (quelques dizaines de mètres au plus), une longue durée de vie (15 à 20 ans), une croissance rapide (maturité sexuelle atteinte au bout de 2 ans), un recrutement régulier (tous les ans) et une faible mortalité naturelle (entre 0.15 et 0.35, d'après le calcul de Fifas, cité dans Martineu, 1994).

Par ailleurs, Dao et al., 1993, ont montré que l'état de la pêcherie de CSJ française dépend principalement du futur recrutement. Ainsi, pour permettre une réelle protection du stock de CSJ de baie de Seine, il est nécessaire de protéger les CSJ juvéniles, âgées de 1 an, qui constitueront ce futur recrutement. C'est pourquoi, une zone rotationnelle de jachère a été instaurée le 28 novembre 2016 en baie de Seine (eaux françaises). Un calendrier de ce système est présenté en annexe I. Dans ce rapport, les termes de "politique", "système de jachère rotationnelle" et "jachère rotationnelle", désigne la mesure de gestion spatiale instaurée depuis 5 ans, tandis que les termes de "jachère" ou "mise en jachère" représentent la fermeture d'une zone sanitaire. Depuis 2005, la baie de Seine est découpée en 5 zones sanitaires (cf.annexe II). Ces zones ont été définies selon un consensus entre pêcheurs et scientifiques à la suite de la contamination des CSJ par l'acide domoïque, une toxine produite par l'algue *Pseudo nitzschia*. Chacune de ces zones correspond également à un type de fond (rocheux pour les zones 1 et 2, débris de coquilles pour les zones 3 et 4 et sableux pour la zone 5) et à un port d'attache des coquillards (Grandcamp - Maisy (zone 1 et 2), Port en Bessin, Courseulles (zone 3 et 4), Ouistreham (zone 5) et Trouville, Honfleur, le Havre, proche de l'estuaire de la Seine. La zone de jachère correspond à la fermeture annuelle d'une zone sanitaire pendant une saison de pêche en baie de Seine, de novembre à mars. Cette jachère change chaque année selon le nombre de CSJ d'âge 1 recensées au cours de la campagne scientifique COMOR (COquilles Manche orientale) menée en juillet par l'Ifremer qui assure le suivi de la ressource de CSJ en baie de Seine. D'après ces données, une augmentation de la biomasse de CSJ en baie de Seine est observée depuis 2016 (Foucher et Varenne, 2021). En effet, celle-ci a été multipliée par plus de trois, au bout de la première année de jachère, entre 2016 et 2017. Cette augmentation de biomasse semble être liée au système de jachère rotationnelle. Toutefois, d'autres facteurs (conditions environnementales), autres que celui-ci pourraient expliquer cette hausse de biomasse. Caddy et Seijo (1998) ont montré que la période optimale de jachère est de 4 ans, et

non une année, pour des espèces à durée de vie longue et à croissance rapide, telles que la CSJ. De plus, la zone de jachère peut avoir des effets non seulement sur la zone mise en jachère mais sur l'ensemble des zones pêches de la baie de Seine et du « Proche Extérieur » .

En effet la mise en place d'une AMP tout comme d'une jachère rotationnelle de pêche peut entraîner une réallocation de l'effort de pêche (Davies et al., 2017). De fait, après la réouverture d'une AMP, les pêcheurs ont tendance à concentrer leur effort sur celles-ci, ce qui limite voire annule les effets de la fermeture de la zone (Hannesson et al., 1998). De plus, en présence d'une AMP, l'effort de pêche est très fort autour de celles-ci, ce qui peut également limiter ces effets bénéfiques (Davies et al., 2017). Dans le cas de la zone de jachère rotationnelle de Baie de Seine, une réallocation de l'effort de pêche pour entraîner (1) une concentration de l'effort de pêche sur la zone préalablement fermée, ce qui en limiterait les effets bénéfiques, (2) pourrait conduire à une baisse de pression de pêche sur les zones adjacentes, ce qui en accroîtrait les effets bénéfiques. Or, ces zones adjacentes contribuent elles aussi au recrutement de la pêcherie en Baie de Seine (Nicolle et al., 2017). Les larves de CSJ nées en zones de jachère, peuvent se disperser vers les zones adjacentes selon les courants (Nicolle et al., 2013 ; Hart et al., 2020). Avec une baisse des mortalités de pêche sur les zones du « Proche Extérieur », le nombre d'adultes reproducteurs disponibles participant aux recrutements de la baie de Seine pourrait augmenter (Dao et al., 1993). C'est pourquoi, analyser et comparer la stratégie de pêche de la CSJ en baie de Seine, en présence et en absence de jachère, permettrait de caractériser l'effet de la jachère rotationnelle de manière plus précise.

Après 5 années d'expérience de jachère rotationnelle et 24 années de suivi de l'abondance en Baie de Seine ce mémoire a pour objectif d'étudier l'impact de la mise en place de ce système sur la population de CSJ en baie de Seine. Ce travail s'articule autour d'une question principale : Y a-t-il un effet de la zone de jachère sur la dynamique de la population de CSJ en baie de Seine ? Qui se divise en deux axes secondaires: (1) L'effet de la jachère rotationnelle se traduit-il par une augmentation de l'abondance disponible lors de la saison de pêche succédant sa fermeture? (2) Cet effet est-il pérenne ou est-il annihilé par une concentration de l'effort de pêche sur cette zone, l'année succédant sa réouverture?

Dans un premier temps, l'effet de la jachère sur l'abondance de CSJ en baie de Seine est testé à travers deux échelles temporelles courtes : l'impact de la mise en jachère sur la l'abondance de CSJ lors de la saison de pêche après la fermeture de la zone et ce même impact sur l'abondance de CSJ lors de la saison de pêche suivant la réouverture de la zone.

Dans un second temps les impacts secondaires de la jachère se divisent en deux axes : la mise en place d'une zone de jachère rotationnelle a-t-elle entraîné une baisse des mortalités relatives des CSJ par pêche liées à un changement des comportements de pêche? Si oui, ces changements de pratiques de pêche, sont-ils liés à un changement de la répartition de l'abondance de CSJ en baie de Seine ?

I. Matériels et Méthodes

1.1. Contexte de l'étude : La pêche de la CSJ en France et en baie de Seine

La CSJ est, aujourd'hui, une espèce très appréciée des Français qui en consomment environ 1,2 kg/hab/an (FranceAgriMer, 2020). En réponse à cette demande, la production de française de CSJ est passée de 15 à 20 000 t par an de 2005 à 2011 (Foucher et al., 2010), avant d'atteindre 33 328 t pour 91 169 euros en 2020 (Ifremer SIH, 2022). A cette date, la CSJ a atteint la première place, en termes de tonnage et valeur, des espèces produites en France métropolitaine (Ifremer SIH, 2022). D'après Foucher et al., 2010, la CSJ est présente sur les fonds sablo-vaseux de la Manche Est. Les principaux gisements de CSJ se situent, dans les eaux communautaires ou côtières, autour de la bouée de Greenwich, sur les ridins de Bassurelles, au niveau du golfe normand-breton, à l'ouest du Pas-de-Calais, au nord de Dieppe, en baie de Seine et en baie de Saint Briec (cf.annexe III). En Manche Est, la CSJ est exploitée par les navires Français, titulaires d'un PPS (Permis de Pêche Spéciaux) « coquilles » et les flottilles Anglaises, Écossaises, Irlandaises, Belges et Hollandaises (Foucher et al., 2010). En 2020, 724 navires Français, d'une puissance moyenne de 148 kW et d'un effectif moyen de 2,6 hommes, ont pêché la CSJ en Manche - Mer du Nord, exclusivement à la drague de type « Anglaise », d'une longueur moyenne de 11,5 m (Ifremer SIH, 2022). Par ailleurs, la pêche à la CSJ en France est saisonnière, du 1^{er} octobre au 15 mai, (Duncan et al., 2016) et varie selon le lieu : elle est côtière en Basse-Normandie avec des navires de moins de 16 m, alors qu'en Haute Normandie et au Nord Pas-de-Calais, les navires peuvent mesurer jusqu'à 18 m ou plus (Foucher et al., 2010). De plus, les navires français sont polyvalents : ils ciblent la CSJ durant l'ouverture de la pêcherie et principalement le poisson (en particulier la sole, *Solea solea*) au chalut ou au filet le reste de l'année. Les autres navires européens exploitant la coquille, sont soit des dragueurs exclusifs (Irlande, Ecosse, Angleterre), soit des chalutiers à perche (Pays-Bas, Belgique) (Foucher et al., 2010).

La baie de Seine (11 500 km²), va de la pointe de Barfleur au cap de la Hève, est la zone la plus productive de CSJ de la Manche, devant la baie de Saint Briec : en 2020, elle représente environ 24% (soit 8128 t) en quantité et 25% (soit 23 millions €) en valeur de la production totale française de CSJ (Ifremer SIH, 2022). En 2020, 250 navires Français, de 13,2 m, d'une puissance de 205 kW, avec 3,5 hommes à bord, en moyenne, ont exploité la CSJ en baie de Seine (Ifremer SIH, 2022). La baie de Seine, découpée en zones sanitaires, se situe sur les rectangles statistiques CIEM (Conseil International d'Exploration de la Mer) 27E8, 27 E9, 27F0, 28E8, 28E9 et 28F0. La pêche à la CSJ s'effectue en baie de Seine (zones sanitaires de 1 à 5, eaux territoriales Françaises) mais aussi dans la zone « Proche Extérieur » (zones 6 à 14, eaux internationales) (cf.annexe II). Ce rapport s'intéresse à l'ensemble des zones de la baie de la Seine et aux zones 6 à 8 et 10 à 11 du « Proche Extérieur ». Il existe une autre stratification de la baie de Seine et du « Proche Extérieur » : un découpage entre 4 strates utilisé lors de la campagne scientifique COMOR (cf.annexe IV). La présence de carrés statistiques de 3x3 miles au sein de ces deux découpages permet de faire le lien entre ces

deux stratifications. Toutefois, bien que peu nombreux, certains carré 3x3 d'une même zone sanitaire appartiennent à deux strates COMOR différentes. En baie de Seine, la pêche à la CSJ est également saisonnière, mais selon des temporalités plus restrictives qu'au niveau national. En baie de Seine, cette pêche a lieu de novembre à mars, durant 3 ou 4 jours par semaine, alors qu'en baie de Saint Brieuc, elle s'y déroule de novembre à avril, pendant 2 jours par semaine (Duncan et al., 2016). En ce qui concerne les réglementations de pêche de la CSJ en baie de Seine, celles-ci diffèrent aussi du reste de la France. Contrairement à la baie de Saint Brieuc, il n'existe pas de TAC (Totaux Admissibles de Captures) global officiel, en baie de Seine, en raison de la difficulté d'y suivre et enregistrer les débarquements journaliers (Duncan et al., 2016). Ce TAC correspondrait à une quantité maximale de CSJ pouvant être pêchées en baie de Seine durant les 5 mois d'ouverture. A la place, un système de «quota par navire» a été instauré (Foucher et al., 2010). Ce dernier a remplacé un système de quota « à l'homme » depuis la saison de pêche de 2010-2011. Ce quota, n'est pas un QIT (Quota Individuel Transférable) classique, il correspond à une quantité maximale de débarquement de CSJ par navire et par marée et non plus par membre d'équipage. Cependant, il est compris par les professionnels comme un minimum à atteindre par marée pour avoir une bonne pêche en début de saison, et non comme un maximum à débarquer (Foucher et al., 2010). Ainsi, la quantité maximale autorisée par navire est de 1800 kg/marée pour les navires inférieurs à 15m, de 2000 kg/marée pour ceux compris entre 15 et 16 m et de 2200 kg/marée pour les plus de 16 m, qui sont dorénavant interdits en baie de Seine (Duncan et al., 2016). De plus, un nombre de débarquements hebdomadaires peut être défini par un arrêté complémentaire du préfet de la région Normandie. Par exemple, cinq débarquements hebdomadaires ont été autorisés en décembre 2020 (arrêté n°123-2021, Direction Manche Est – Mer du Nord). Par ailleurs, en Manche Est (division 7d), la taille minimale de capture autorisée est de 11 cm. 16 dragues au maximum sont autorisées à bord (chaque drague fait 80cm de largeur, montées en série sur des "bâtons"), le diamètre des anneaux des dragues est quant à lui fixé à 97 mm et les captures accessoires interdites (arrêté n°123/2021, Direction Manche Est – Mer du Nord).

La pêche de la CSJ en baie de Seine a débuté dans les années 1960 (Duncan et al., 2016). A l'époque, les captures de CSJ en Manche Est ont atteint les 12 000 t en 1972, avant de chuter autour de 1980 et de varier entre 5000 t et 15 000 t entre 2000 et 2014 (cf.annexe V).

Cette baisse de captures depuis 1980 a mené à une diminution de l'effort de pêche en baie de Seine: de 1700 h/jour en 1992, le temps de pêche a été réduit à 600 h/j en 2011, avec une obligation de ne pêcher que le jour (Duncan et al., 2016) (cf.annexe VI). De plus, la sélectivité des engins de pêche a été progressivement modifiée, d'abord en 2006 avec le passage du diamètre des anneaux des dragues de 85mm à 92 mm, puis à 97 mm en octobre 2020 (arrêté n°173/2020, Direction Manche Est – Mer du Nord).

1.2. Rappel du cycle de vie de la CSJ

Comme Foucher et Fifas, 2012, ce rapport considère la date d'anniversaire de la CSJ en juillet. Une CSJ est considérée comme mature, à partir de la première fois qu'elle s'est reproduite, soit à l'âge de 2 ans \pm 3 mois (Foucher et Fifas, 2012). La période de maturation, soit l'acquisition de la capacité à se reproduire (Williams et Babcock, 2005, se déroule en automne-hiver, au même moment que la période de recouvrement des adultes (Devauchelle et al., 1991 ; Lubet et al., 1995). En baie de Seine, la période de reproduction de la CSJ (émission des gamètes et fécondation) débute en avril-mai et se termine en septembre-octobre (Lubet et al., 1995). Le pic de reproduction, soit la période de plus forte émission de gamètes a lieu en juillet-août (Lubet et al., 1995). Après une fécondation externe, les larves de CSJ se forment et mènent une vie pélagique durant 24 à 34 jours, pour la baie de Seine (Nicolle et al., 2013). Cette vie larvaire prend fin au moment où elle développe un "byssus" qui lui permet de se fixer sur un substrat comme des débris de coquilles, les replis des algues laminaires (eaux peu profondes) et des sédiments grossiers (Minchin, 1992). Elle reste ainsi fixée, pendant 10 semaines. Entre 6 et 10 mm, la larve, devenue un naissain, perd son byssus et s'encastre dans les sédiments. Elle crée un courant d'eau descendant permettant la formation d'un creux peu profond dans lequel elle se loge (Minchin, 1992). A partir de 10 mm, tous les naissains sont enfouis dans les sédiments, mais restent capables de se déplacer en cas de prédation (Minchin, 1992). 8 à 10 mois après sa naissance, la CSJ atteint le stade de juvénile (Devauchelle et al., 1991). La croissance de la CSJ suit une loi de Von Bertalanffy et est saisonnière : un taux de croissance fort en été, en présence des bloom phytoplanctoniques (nourriture de la CSJ) et très faible en hiver (Duncan et al., 2016). L'âge de la CSJ est d'ailleurs calculable grâce aux stries hivernales présentes sur la coquille à la suite de ces variations de croissance (Duncan et al., 2016). Ce cycle de vie est présenté en annexe VII (Devauchelle et al., 1991).

1.3. Données

Deux sources de données ont été utilisées dans le but d'analyser les dynamiques d'abondance de CSJ et d'effort de la flottille dédiée à cette pêcherie en Baie de Seine.

1.3.1. Données d'abondance

1.3.1.1. Description du déroulement de la campagne COMOR

La campagne COMOR, est une campagne d'évaluation de stock de CSJ de baie de Seine menée chaque année en juillet par l'Ifremer depuis 1976 sur l'ensemble de la Manche Est (d'où le nom de la campagne, COquilles Manche ORientale), puis standardisée en 1992 (en termes de zone d'étude, centrée sur la baie de Seine *sensu stricto*, et de protocole scientifique, détaillé dans Vigneau et al., 2001 (cf.annexe VIII ; cf.annexe IX). D'une durée de 3 semaines, elle a lieu à bord de " la Thalia" (24,5 m), un bateau de la flotte océanographique Française.

1.3.1.2. Présentation des données COMOR

La base de données COMOR présente les données issues de la campagne scientifique annuelle de juillet (COMOR) de 1992 à 2021. La base de données COMOR recense le nombre de CSJ pêchées par taille, âge, type de drague et par trait de chalut sur la baie de Seine et le « Proche Extérieur » (21 777 km²) (cf.annexe X). Cette série de données est stable et continue, à l'exception des années 2019 et 2020, respectivement marquées par un biais d'échantillonnage et l'absence de données en « Proche Extérieur », à cause de la crise COVID 19 (cf.annexe XI). Les données en nombre de CSJ par classe d'âge et par trait de la campagne COMOR sont transformées selon l'efficacité de la drague utilisée, afin d'estimer au mieux l'abondance de CSJ présentes dans le milieu marin (cf.annexe XI ; cf.annexe XII).

1.3.2. Données d'effort de pêche

Les données VMS (Vessel Monitoring System) permettent un suivi continu par mois des dragueurs à coquilles en baie de Seine, en termes de position occupée, de temps passé en mer, de captures et de prix de vente (cf.annexe 13). En effet, depuis 2011, les navires coquilliers ont l'obligation d'être équipés de VMS en Manche Est. Ces données sont donc très utiles pour des analyses spatio-temporelles des captures et de l'effort de pêche en baie de Seine car elles donnent accès aux positions et aux temps en mer passés par chaque bateau de pêche.

1.4. Analyses

Pour la partie analyse, le logiciel R (version 4.1.2) a été utilisé (Fox et Weisberg, 2019). L'analyse brute des données COMOR et VMS ont permis la réalisation de cartes montrant la répartition de l'abondance, de l'effort de pêche et des captures de CSJ.

1.4.1. Modélisation des effets de la jachère sur l'abondance de CSJ

1.4.1.1 Formulation du modèle

Dans un premier temps, l'effet de la jachère sur l'abondance du stock de CSJ de la baie de Seine a été analysé. Pour cela, l'effet de la jachère a été étudié à deux moments différents : (1) Après la fermeture d'une zone de pêche afin d'observer l'effet direct de la fermeture d'une zone sur l'abondance de CSJ (effet jachère J). (2) Après la réouverture d'une zone précédemment en jachère afin d'étudier l'effet de la jachère à la suite d'une pression de pêche (effet jachère J_R) (cf.annexe XIV).

Pour analyser l'impact de la jachère rotationnelle sur l'abondance de CSJ, un modèle statistique de type GLM a été utilisé. Ce GLM, basé sur une loi binomiale négative, a été construit par cohorte de CSJ (juvéniles de 1 an, recrues de 2 ans et adultes de 3 ans et plus). Les effets J et J_R ont été étudiés séparément. Pour la construction du GLM, la variable expliquée

était le nombre de CSJ corrigé selon l'efficacité de la drague utilisée lors de la campagne COMOR. Les variables explicatives prises en compte ont été les suivantes (Tableau 1) :

Tableau 1 : Présentation des variables explicatives pour la construction du GLM

Nom de la variable explicative	Modalités de la variable explicative	Signification
Année	1992 à 2021	Année de la campagne COMOR
Zone	Zone 1 à Zone 11	Numéro de la zone sanitaire
Jachère	NJ (non en jachère) et J (en jachère)	Zones en jachère ou non durant la saison de pêche qui s'est clôturée 4 mois avant la campagne COMOR.
Jachère R	NJ_R (non en jachère) et J_R (en jachère)	Zones en jachère ou non durant la saison de pêche qui s'est clôturée 1 an et 4 mois avant la campagne COMOR

Ces variables explicatives comprenaient l'effet de la jachère à tester mais aussi l'effet de l'année et de la zone. En effet, l'abondance de CSJ peut varier d'une année sur l'autre selon des facteurs environnementaux et les CSJ se répartissent différemment selon la zone sanitaire. Les effets "zones", "année" et "jachère" seront considérés comme fixes et indépendants.

1.4.1.2. Hypothèses et sélection du modèle

Pour chaque classe d'âge, le critère AIC a été utilisé pour sélectionner le modèle GLM ayant le meilleur compromis entre sa qualité d'ajustement aux données et sa qualité d'écriture. Le modèle retenu est donc celui ayant le plus petit AIC (Akaike Information Criterion) (Akaike, 1973). Afin de respecter le principe de parcimonie, le modèle sélectionné était celui avec le moins de variables explicatives, dans le cas où la différence de critère AIC, entre plusieurs formulations différentes était inférieure à 2. La validation des hypothèses des GLMs ainsi retenus, se basait sur la normalité, l'indépendance et l'homogénéité des résidus. Ces trois critères sont respectivement vérifiés par un graphique de type Normal-QQ plot avec un test de Kolmogorov-Smirnov, un graphique des résidus standardisés en fonction des valeurs prédites et un test de Levene.

1.4.2. Restructuration de la pêche de CSJ en Baie de Seine

Dans un second temps, l'effort de pêche a été caractérisé afin de savoir si ce système de jachère entraîne un changement des pratiques de pêche à la CSJ en baie de Seine et « Proche Extérieur ».

1.4.2.1. Comparaison spatio-temporelle de la répartition des efforts de pêche

Premièrement, grâce aux données VMS, la répartition de l'effort de pêche de la période précédant la mise en place de la politique de jachère a été comparée avec celle durant l'instauration de ce système. Pour chacune de ces périodes, la cohérence dans la répartition de l'effort de pêche au sein de la baie de Seine et du « Proche Extérieur » a été analysée. Pour cela, en se basant sur le temps passé en mer par les coquillards pour chaque carré statistique de 3x3, un effort relatif (*eff_{rel}*) de pêche, par mois, zone et saison de pêche a été calculé de la manière suivante :

$$eff_{rel,i,j,k} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{i,j,k}}{\sum_{i=1}^n T_{i,j,k}}$$

où $eff_{T_{i,j,k}}$ est l'effort relatif de la zone i , du mois j de la saison de pêche k

est le temps en mer pour la zone i , du mois j de la saison de pêche k

avec $T_{i,j,k} = \sum_{c=1}^n T_{c,i,j,k}$ où $T_{c,i,j,k}$ est le temps en mer passé sur le carré statistique c

de 3x3 miles de la zone i , du mois j de la saison de pêche k

est le temps passé sur l'ensemble des zones lors du mois i de la saison de pêche k

Une saison de pêche, à cheval entre deux années consécutives, correspond à la période d'ouverture de la baie de Seine, entre novembre et mars.

L'effort de pêche relatif est donc le pourcentage de temps en mer passé par les coquillards sur une zone sanitaire donnée, d'une saison de pêche donnée par rapport au temps en mer passé

sur l'ensemble des zones sanitaires (n°1 à 11) de cette même saison de pêche. Le calcul de cet effort relatif a permis de standardiser l'effort de pêche et ainsi d'établir des comparaisons d'effort, entre eux, au sein d'une même saison de pêche (comparaison par saison) ou entre les saisons de pêche pour une même zone (comparaison par zone).

En utilisant un test de Kruskal-Wallis, ces efforts de pêche relatif (variables quantitatives ordinales) ont été comparés pour une zone donnée puis pour une saison donnée. A la suite du résultat significatif de ce test, un test de Wilcoxon a été réalisé, pour une comparaison deux à deux de ces efforts relatifs de pêche, au sein d'une même zone, puis au établi entre les saisons et entre les zones de pêche, calculé pour les deux % *similarité*cas, de la façon sein d'une même saison. Grâce à ce test, un pourcentage de similarité () a été suivante :

$$\% \text{ similarité} = \frac{\text{nb p.value non significatives}}{\text{nb p.value comparaisons deux à deux pour}}$$

l'ensemble des saisons au sein d'une même zone

où est le nombre de p.value non significatives issues du test de Wilcoxon lors des ou l'ensemble

des zones au sein d'une même saison.

est le nombre de comparaisons possibles entre toutes les saisons d'une même *nb appariements* zone ou toutes les zones d'une même saison.

Sur les représentations graphiques, ces pourcentages de similarités ont été regroupés par classe, allant de 0 à 1 et découpées par tranche de 0,25.

1.4.2.2. Répartition spatio temporelle des hotspots d'effort et d'abondance de CSJ matures

Deuxièmement, en croisant les données des bases COMOR et VMS, l'évolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ a été comparée avec celle de l'effort de pêche en baie de Seine et en « Proche Extérieur ». Pour cela, les échelles de l'année et du carré de 3x3 ont été utilisés. Cet effort de pêche a été à nouveau considéré comme un temps en mer par bateau, par saison et par carré statistique. Une analyse spatio-temporelle en point chaud, point froid a été menée pour analyser l'évolution spatio-temporelle de l'effort de pêche d'une part et l'évolution de l'abondance des CSJ d'autre part. Cette analyse s'est appuyée sur celle utilisée par Harris et

al. (2017) pour identifier les hotspots de déforestation au Brésil, en Indonésie et en République Démocratique du Congo.

Pour l'analyse spatiale, deux indices d'autocorrélation spatiale ont été utilisés afin d'étudier la distribution spatiale des données d'effort de pêche et d'abondance de CSJ. A une échelle globale, l'indice de Moran a permis de détecter si ces données sont spatialement autocorrélées (positivement: agrégées ; négativement: dispersées) ou distribuées de manière aléatoire (hypothèse nulle). L'indice de Moran correspond au ratio entre la covariance des observations (efforts de pêche ou abondance de CSJ), définies par la matrice d'interaction spatiale et la variance totale de l'échantillon. Cette matrice est une matrice carré d'ordre k où k est égal au nombre de carrés de 3×3 de la zone d'étude. Chaque élément de cette matrice (hors diagonale) mesure l'interaction entre chaque carré 3×3 présent en ligne et colonne. Cette mesure d'interaction est égale au nombre de frontières communes entre deux carrés 3×3 , définis comme voisins selon la méthode "Queen". Ainsi, plus les carrés sont proches, plus cette valeur est élevée. L'indice de Moran (I) s'exprime donc de la façon suivante:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}$$

où N est le nombre de carré 3×3 miles présents sur l'ensemble des carrés statistiques étudiées

w_{ij} la valeur d'effort de pêche ou d'abondance de CSJ dans le carré statistique i est

l'élément de la matrice d'interaction spatiale de ligne i et colonne j

—

\bar{X}_i la moyenne de l'effort de pêche ou d'abondance de CSJ sur l'ensemble des carrés X

statistiques étudiés

Pour tester sa significativité, l'indice de Moran a été transformé en Z-score (Z_I) qui

s'exprime de la manière suivante :

$$\sqrt{\quad}$$

où Z_I est l'indice de Moran calculé précédemment $I - \sqrt{E(I)E(I)}$

$E(I)$ son espérance, $E(I) = \frac{k-1}{k}$ avec k qui est égale au nombre de carrés statistique

V sa variance

A une échelle locale, la statistique de Getis Ord (G_i) détecte les interactions spatiales n'apparaissant pas dans l'Indice de Moran. Dans le cadre de notre étude, il a donc permis de détecter la présence de clusters d'efforts de pêche ou d'abondance de CSJ. Ceux-ci sont des regroupements significatifs de valeurs élevées (points chauds) ou faibles (points froids) autour d'une localisation spécifique. Cet indice est égal au ratio entre la moyenne pondérée des valeurs voisines d'un carré 3x3 donné et la somme des valeurs de tous les carrés. Pour distance entre les centroïdes de deux carrés 3x3 adjacents. L'indice de Getis Ord s'écrit de la définir les carrés voisins, une distance () de 10 km a été choisie. Elle correspond à la manière suivante :

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^n x_j}$$

où w_{ij} est l'élément de la matrice d'interaction spatiale de ligne i et colonne j . w_{ij} est la valeur d'effort de pêche ou d'abondance du carré statistique d j vaut 0 si le carré statistique j est à une distance supérieure à du carré 3X3 i étudié, 1 sinon. x_j

Afin de tester sa significativité, l'indice de Getis Ord a été également transformé en Z-score.

Pour l'analyse temporelle, un test de Spearman a été effectué entre les statistiques G_i significatives d'un même carré 3x3 et les années de la série temporelle étudiée : de 2004 à 2021. Ce test non paramétrique a donc permis de tester, par carré, la corrélation entre l'évolution de la statistique significative G_i au cours du temps et l'écoulement des années. Ainsi, pour chaque carré, une intensification de l'effort de pêche ou augmentation de l'abondance de CSJ au cours du temps, correspond à un coefficient de Spearman significativement strictement positif, c'est-à-dire inférieur à 1,96 (tendance croissante). A l'inverse, une baisse de l'effort de pêche au cours du temps ou une diminution de l'abondance de CSJ, équivaut à un coefficient de Spearman significativement strictement négatif, c'est à dire inférieur à -1,96 (tendance décroissante).

En ce qui concerne l'analyse de la variation spatio-temporelle de l'effort de pêche ou de l'abondance de CSJ, chaque carré a été considéré comme un "ancien", "sporadique", "persistant" ou "nouveau" points chauds selon le tableau suivant (Tableau 2). Une statistique G_i a été considérée comme significative et strictement positive ou négative si son Z-score est respectivement supérieure à 1,96 et inférieure à -1,96.

Tableau 2 : Présentation des définitions des "anciens", "sporadiques", "persistants" et nouveaux points chauds

Point chaud persistant	Point chaud sporadique	Nouveau point chaud	Ancien point chaud
Le carré 3x3 présente au moins 5 fois une statistique Gi significative et strictement positive au cours de la série temporelle	Le carré 3x3 présente au moins 3 fois une statistique Gi significative et strictement positive au cours de la série temporelle	Le carré 3x3 a une statistique Gi significative et strictement positive après la mise en place de la politique de jachère (2016) mais ce n'était pas le cas avant	Le carré 3x3a une statistique Gi significative et strictement positive avant la politique de jachère (2016) mais ce n'est plus le cas après

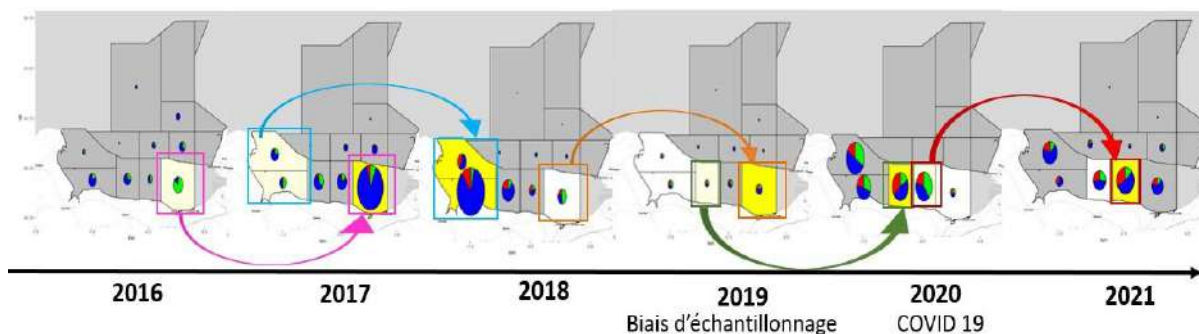
D'une manière analogique aux points chauds, des points froids nouveaux, sporadiques et persistants ont été créés pour l'effort de pêche et l'abondance de CSJ. Toutefois, à la différence des points chauds, les points froids ont été définis par une statistique Gi significativement et strictement négative.

Pour la présentation des résultats, une grille rectangulaire de 17x7 carrés de 3x3 a été créée afin de correspondre au mieux aux carrés statistiques de la baie de Seine tout en simplifiant la présentation des résultats.

Par ailleurs, l'abondance de CSJ et l'effort de pêche en baie de Seine ont été analysés selon deux temporalités différentes. L'abondance de CSJ est analysée selon les années, alors que l'effort de pêche a été étudié selon les saisons de pêche à cheval entre deux années. Ce décalage est dû aux réglementations de pêche en baie de Seine qui est ouverte de novembre d'une année à mars de l'année suivante. La campagne d'évaluation d'abondance de CSJ a lieu une fois par an en juillet. Ainsi, l'abondance de CSJ évalué au cours de la campagne de l'année t , sera disponible pour la pêche de la saison $t;t+1$ (cf.annexe XV).

II. Résultats

En étudiant l'abondance des CSJ estimées en baie de Seine, depuis la mise en place de la politique de jachère, une hausse de l'abondance des CSJ d'âge 2 (recrutement) et d'âge 3 et plus (adultes ayant déjà subi une ou plusieurs saisons de pêche, noté 3+ sur les graphiques) sur la zone précédemment mise en jachère, peut être constatée d'une année sur l'autre. Par ailleurs, après les cinq années de mise en place du système de jachère, il y a une répartition plus équitable de l'abondance de CSJ d'âge 2 et 3 ans et plus. En 2020 et 2021, contrairement en 2017 et 2018, ce n'est plus la zone précédemment mise en jachère qui concentre la plus forte abondance de CSJ d'âge 2 et 3+ (figure 1).



Légende:

Temporalité de la jachère rotationnelle:	% de CSJ aux différents âges:
 Zone en jachère l'année précédente	 âge 1
 Zone en jachère l'année suivante	 âge 2
 Zone en jachère l'année en cours	 âge 3 +

Figure 1 : Evolution de l'abondance de CSJ estimée en baie de Seine à la suite des campagnes annuelles COMOR de juillet de 2016 à 2021

Ces premiers résultats semblent montrer que ce système de jachère rotationnelle joue un rôle sur l'abondance et la répartition des CSJ en baie de Seine. Une étude plus fine de cet impact de la politique de jachère est menée par une analyse statistique de type GLM.

Les GLM retenus, après sélection des modèles sont les mêmes pour toutes les classes d'âge étudiée (1 an, 2 ans et 3ans et plus):

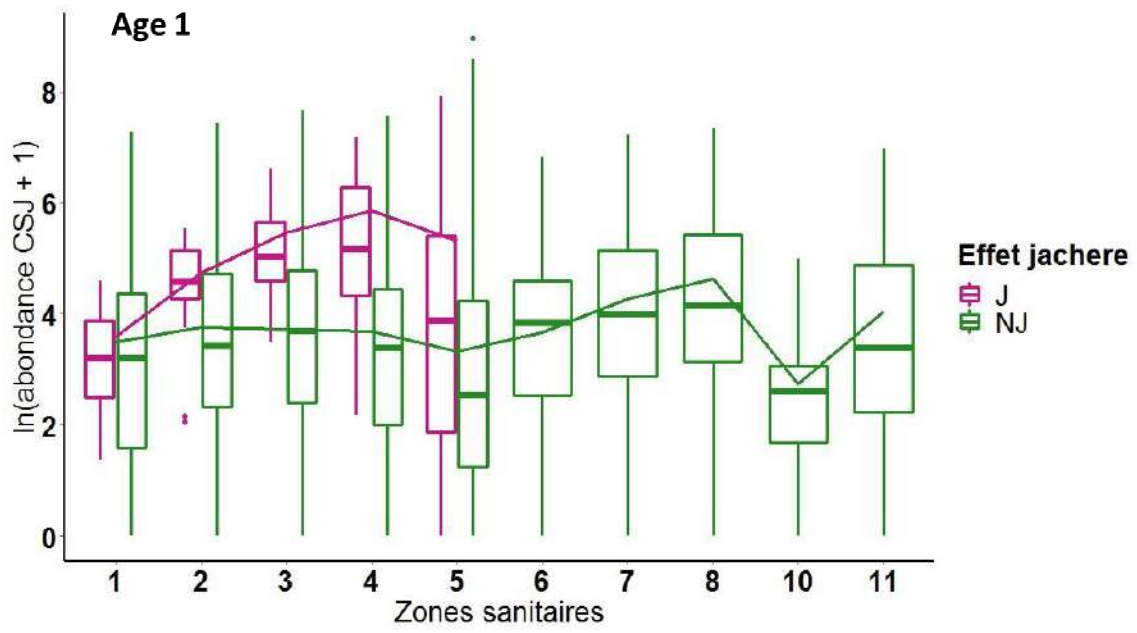
- (1) $\text{round}(\text{nb}) \sim \text{années} + \text{Zone} + \text{jachère} + \text{Zone} * \text{année}$, pour le test de l'effet jachère après la fermeture de la zone de pêche
- (2) $\text{round}(\text{nb}) \sim \text{années} + \text{Zone} + \text{jachère_R} + \text{Zone} * \text{année}$, pour le test de l'effet jachère après la réouverture de la zone de pêche

2.1. Impact de la jachère rotationnelle sur l'abondance de CSJ à court terme

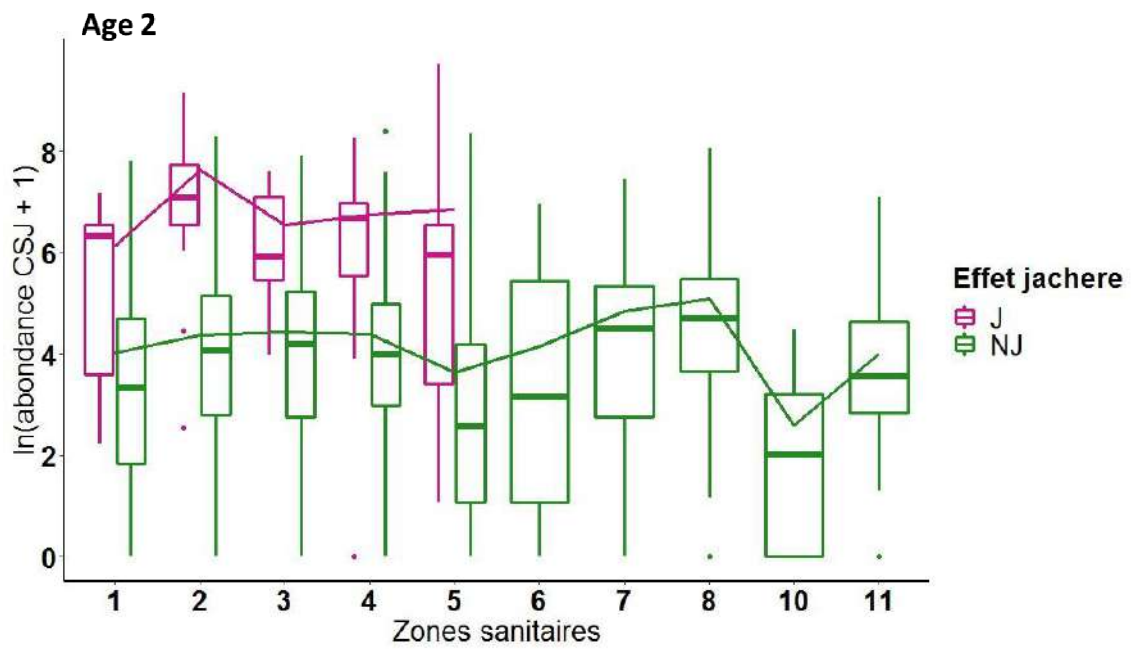
2.1.1. Après la fermeture de la zone

Après la mise en jachère d'une zone sanitaire, ce modèle statistique GLM montre que l'abondance de CSJ en baie de Seine est significativement plus élevée en présence d'un système de jachère rotationnelle qu'en l'absence de celui-ci (figure 2). Cet impact direct de la jachère est visible pour tous les âges mais est beaucoup plus important pour les âges 2 et 3+. En effet, d'après les prédictions du GLM, il y a, en échelle non transformée, 8 à 27 fois plus de CSJ pour l'âge 2 et 8 à 15 fois plus de CSJ pour l'âge 3+ en présence du système de jachère qu'en absence de celui-ci (figure 2 b et c). Pour l'âge 1, il y a jusqu'à 9 fois plus de CSJ en présence de ce système (figure 2 a).

(a)



(b)



(c)

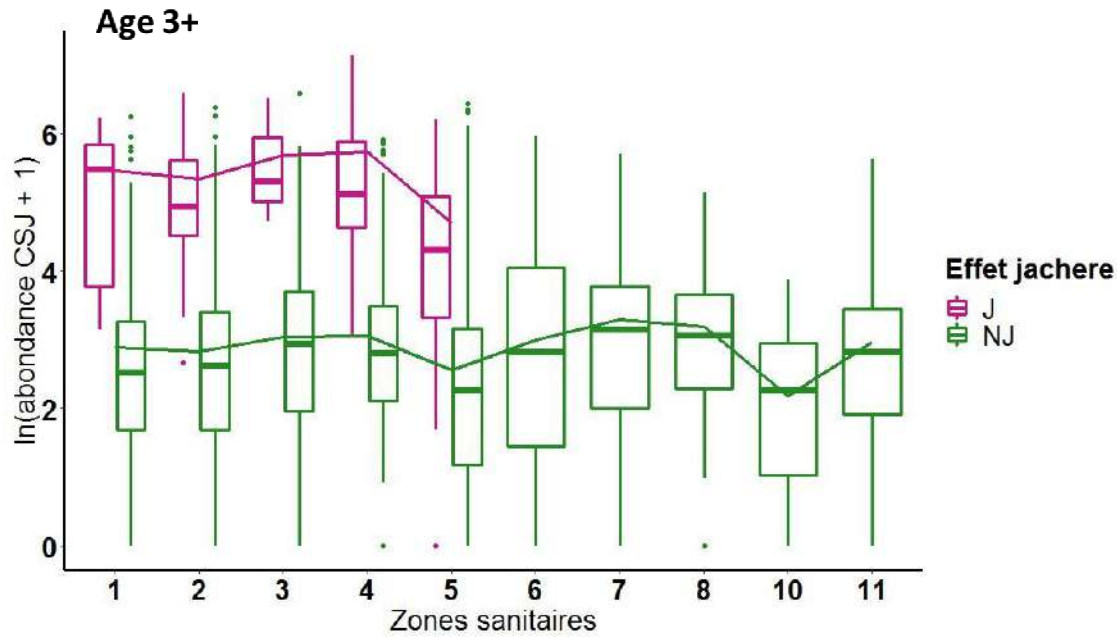


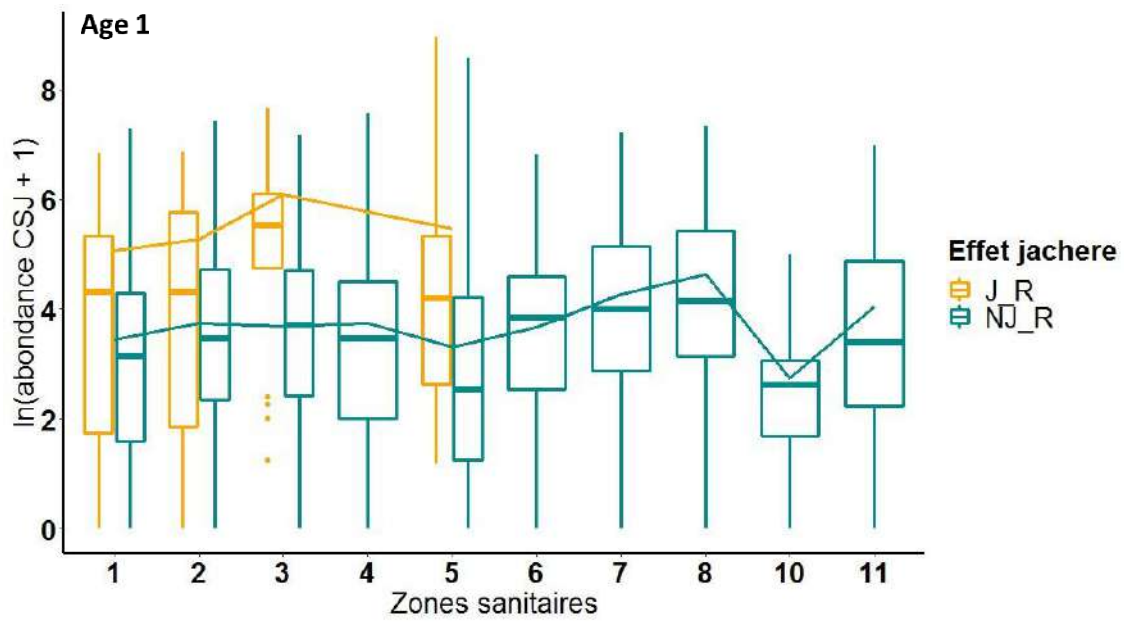
Figure 2 : Répartition de l’abondance des CSJ d’âge 1 (a), d’âge 2 (b) et d’âge 3 + (c) en baie de Seine après la mise en jachère d’une zone sanitaire

J : zone mise en jachère

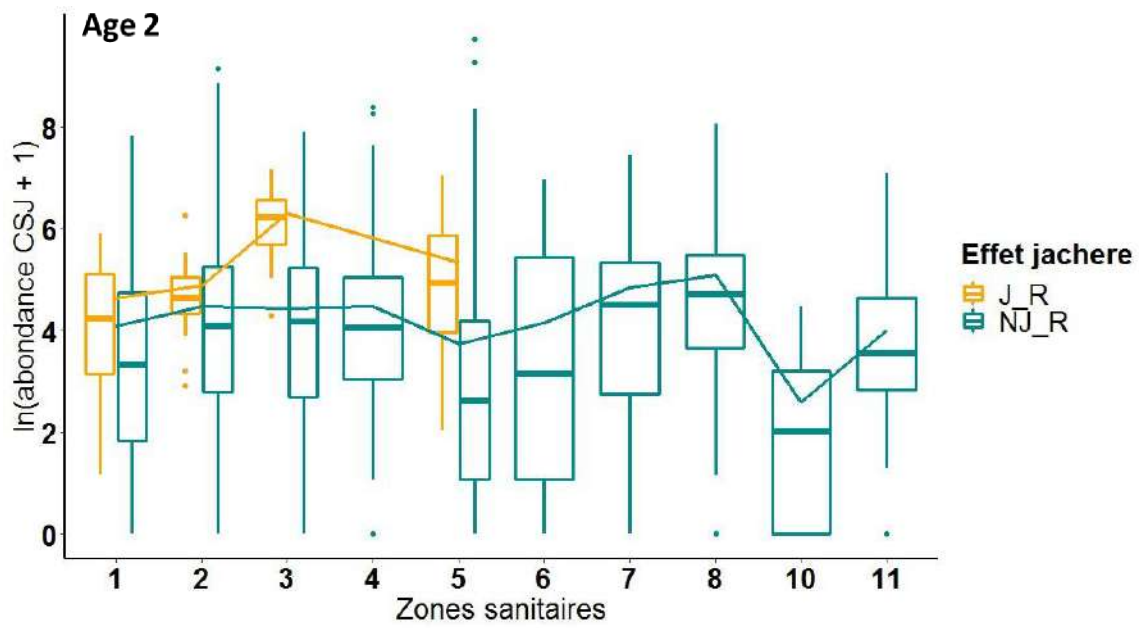
NJ : absence de politique de jachère rotationnelle

2.1.2. Après la réouverture de la zone

Après l’ouverture d’une zone préalablement mise en jachère, l’abondance de CSJ en baie de Seine est significativement plus élevée en présence du système de jachère rotationnelle. Ce constat reste vrai pour tous les âges du CSJ (figure 3). Cependant, pour les âges 2 et 3 et plus, contrairement à l’âge 1, la différence d’abondance de CSJ entre absence et présence de la politique de jachère y est beaucoup plus faible. En effet, après la réouverture de la zone, il n’y a plus que 1 à 6,5 de fois plus de CSJ d’âge 2 et 2 à 8,5 fois plus de CSJ d’âge 3 et plus, en présence du système de jachère (figure 3b et c). A l’inverse pour l’âge 1, il y a 8 à 11 fois plus de CSJ en présence de cette mesure (figure 3a). (a)



(b)



(c)

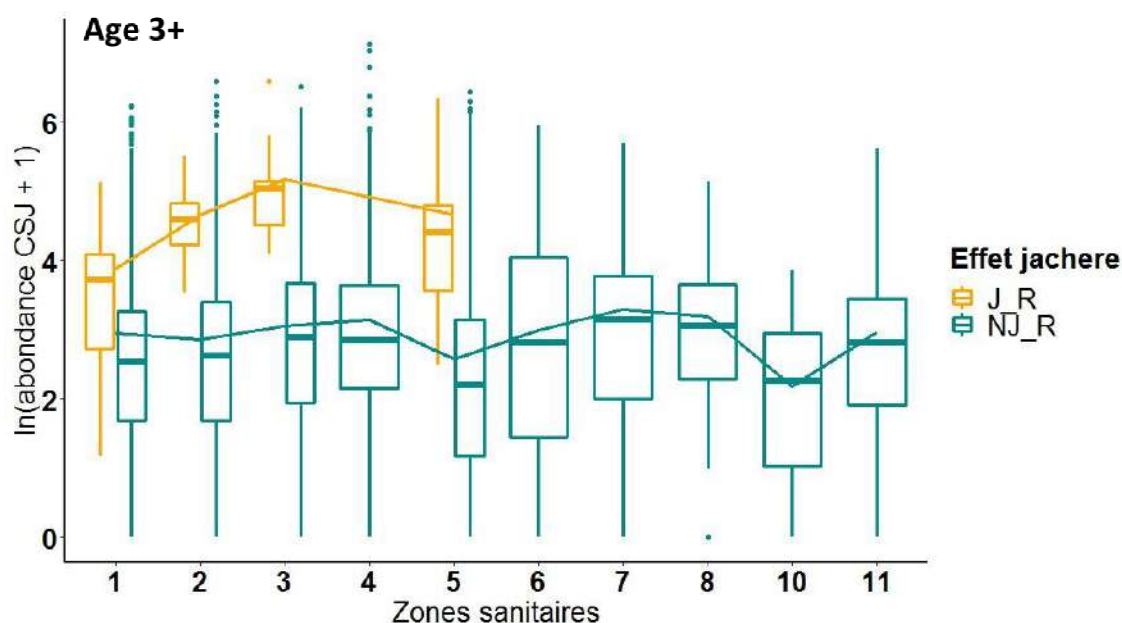


Figure 3 : Répartition de l'abondance des CSJ d'âge 1 (a), d'âge 2 (b) et d'âge 3 et plus (c) en baie de Seine après la réouverture d'une zone sanitaire mise en jachère

J_R : zone précédemment mise en jachère qui vient d'être réouverte

NJ_R : absence de politique de jachère rotationnelle

2.2. Impacts secondaires de la jachère rotationnelle sur le stock de CSJ en baie de Seine

2.2.1. Impact de la jachère rotationnelle sur l'uniformité de l'effort de pêche en baie de Seine

Selon les résultats de la partie précédente, l'impact du système de jachère rotationnelle sur la hausse d'abondance de CSJ est amoindri pour les CSJ matures. Ceci peut être lié à un changement des mortalités par pêche causé par un changement de stratégies de pêche à la CSJ à la suite de l'instauration de la politique de jachère. Dans cette section, l'intensité et la répartition de l'effort de pêche sont étudiées en baie de Seine. Pour information et pour une meilleure lisibilité des graphiques de cette section, seule la première année de la saison de pêche est légendée. Par exemple, la saison de pêche notée "2004" correspond donc à la saison de pêche "2004-2005".

2.2.1.1. Etude de l'effort de pêche absolu, des captures et CPUE

Tout d'abord, l'effort de pêche absolu est 1,5 à 2 fois plus important en baie de Seine qu'en «Proche Extérieur» de 2011-2012 à 2014-2015. (figure 4). Cet écart s'est creusé à partir de 2016-2017, au moment de l'instauration du système de jachère rotationnelle. Que ce soit pour le «Proche Extérieur» ou la baie de Seine, l'effort de pêche augmente de 2004-2005 de 20 000h à 40 000 - 60 000 h avant de chuter à 10 000h - 20 000 h à partir de 2016-2017. Cette baisse a particulièrement concerné le « Proche Extérieur ». Cette baisse de

l'effort de pêche, à partir de 2016-2017 a été accompagnée d'une augmentation des CPUE et des captures depuis cette date (figure 5).

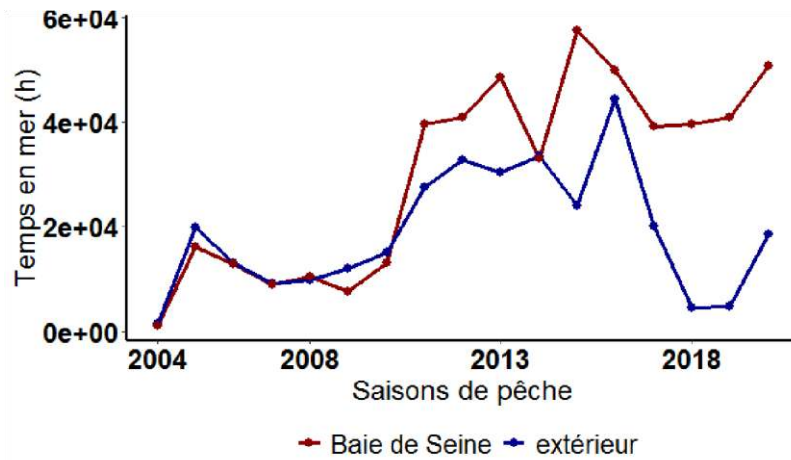
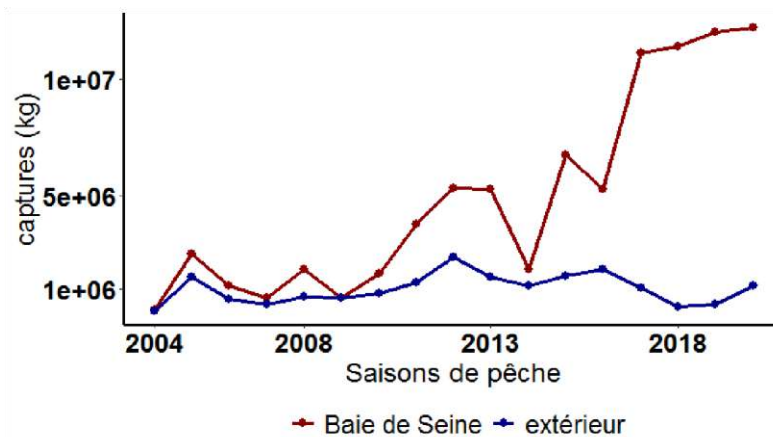


Figure 4 : Évolution de l'effort de pêche absolu de 2004 à 2021 en baie de Seine (rouge) et «Proche Extérieur » (bleu).

(a)



(b)

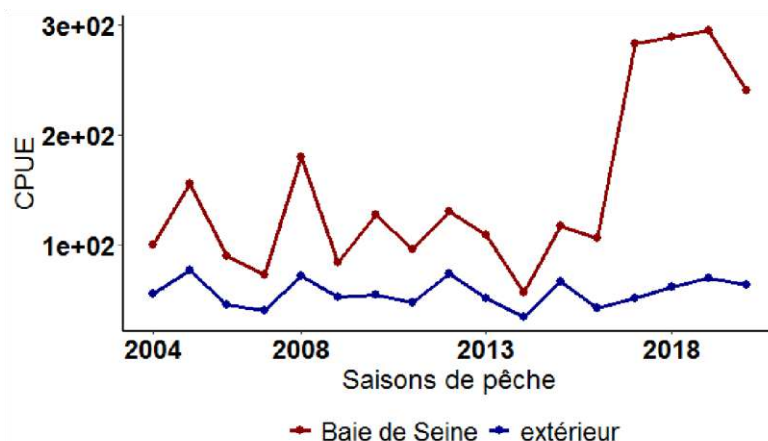


Figure 5 : Evolution des captures de CSJ (a) et CPUE (b) sur la période de 2004 à 2021

De plus, les zones 2, 3, 4 et 5 de la baie de Seine présentent les efforts de pêche les plus élevés, de 15 000 à 25 000 h depuis l'instauration de la jachère rotationnelle (figure 6). L'effort de pêche est d'ailleurs plus constant sur les zones du « Proche Extérieur » qu'en baie de Seine (figure 6) à partir de cette date.

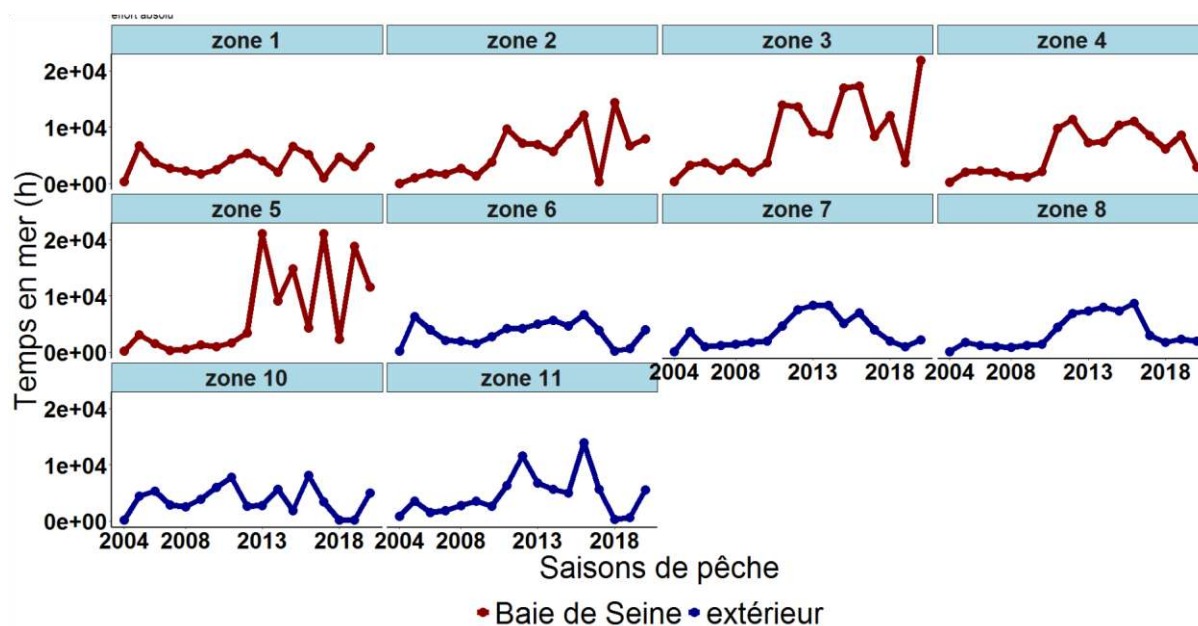
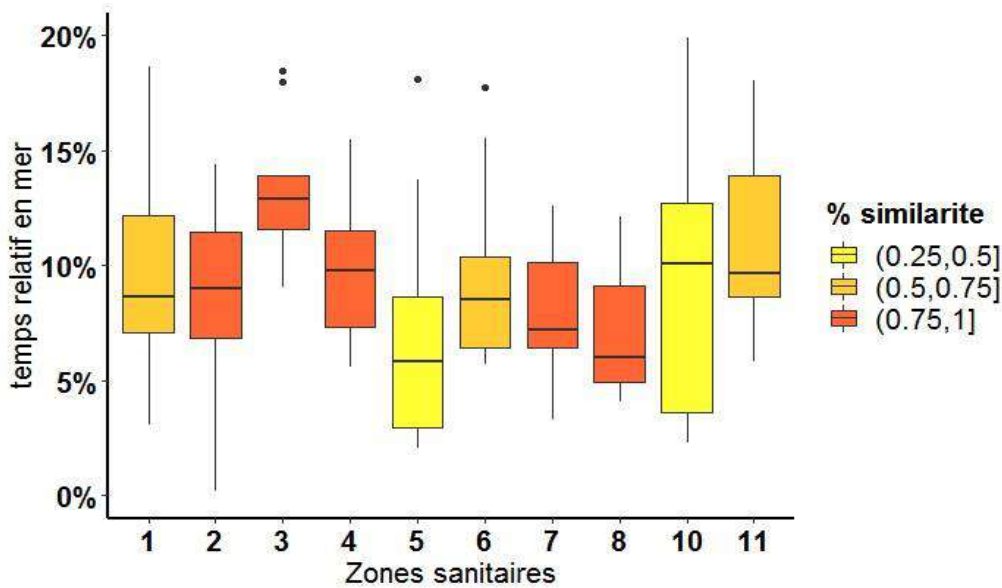


Figure 6 : Évolution de l'effort de pêche absolu par zone sanitaire de 2004 à 2021 en baie de Seine (rouge) et «Proche Extérieur» (bleu).

2.2.1.2. Étude de l'effort de pêche relatif par zone

Avant l'instauration de la politique de jachère, l'effort de pêche relatif au cours du temps est constant pour toutes les zones, à l'exception des zones 5 et 10 (figure 7). En effet, chacune de ces premières zones présente un effort de pêche relatif se ressemblant à 50-90% entre chaque saison de pêche, alors que les zones 5 et 10 ont un effort de pêche relatif semblable

de 0 à 20%. Sur l'ensemble des années, l'effort de pêche reste plus élevé en zone 3 (effort relatif médian d'environ 15%) que sur les autres zones (effort relatif médian d'environ 10%).



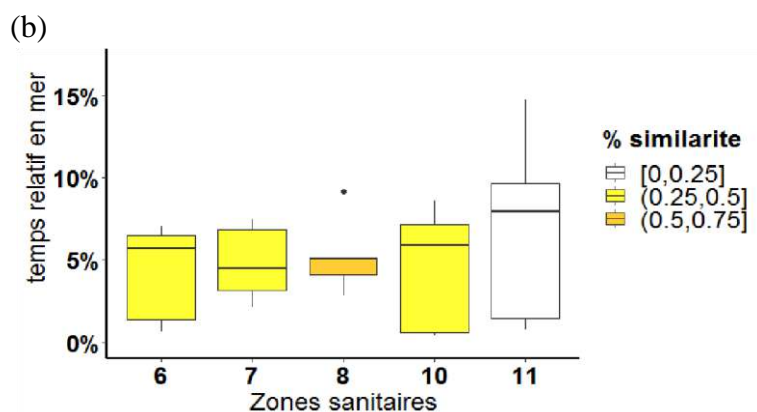
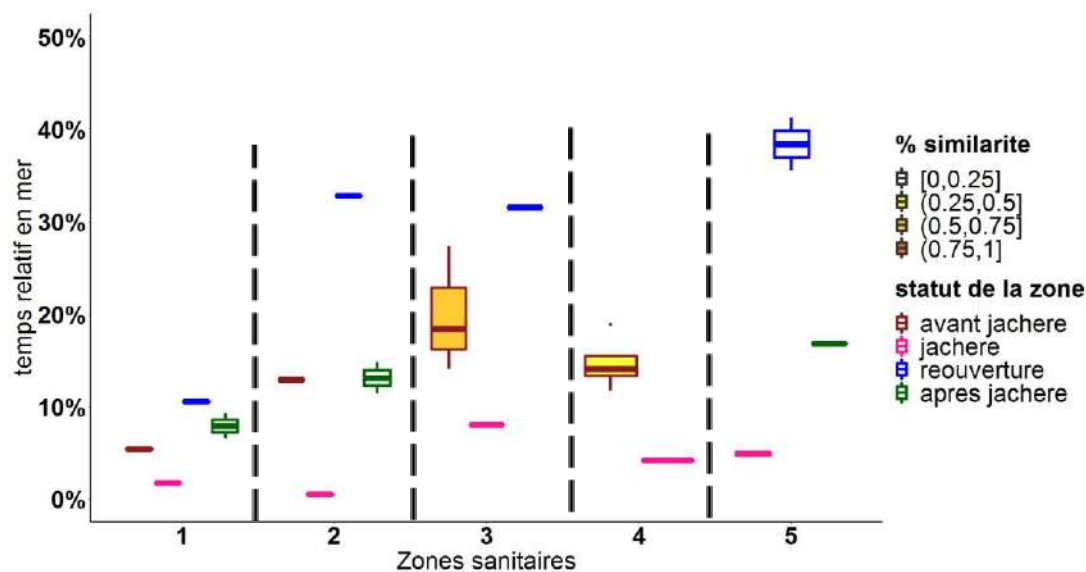
Légende :

Pour une zone donnée, le “% similarite” est le nombre de saisons de pêche présentant un effort de pêche relatif significativement similaire entre elles, divisé par le nombre total de comparaisons possibles entre les saisons (n=78). Ces pourcentages sont ensuite regroupés par classes.

Figure 7: Comparaison des efforts de pêche relatif par zone sanitaire sur la période 2004-2016, avant l'instauration de la politique de jachère rotationnelle

Après la mise en place de la jachère rotationnelle en baie de Seine, les pratiques de pêche ont été modifiées. Avant l'instauration de la politique de jachère, l'effort de pêche se répartissait assez équitablement entre les zones, à raison d'un effort relatif médian proche de 10% pour chaque zone (figure 7). Cependant, à partir de 2016-2017, la stratégie de pêche présente des similitudes, non plus par zone mais selon son état. En effet, quatre états sont à distinguer : avant que la zone ne soit en jachère, pendant la mise en jachère de la zone, lors de la réouverture de la zone et après la mise en jachère de la zone (figure 8a). Pour chaque zone de la baie de Seine, l'effort de pêche relatif est le plus élevé lorsque la zone est en réouverture (entre 30 et 40%) et est le plus faible au moment où celle-ci est en jachère (proche de 0). L'effort de pêche avant la mise en jachère et après la mise en jachère de la zone, sont assez proches (autour de 10%). Concernant le « Proche Extérieur », l'effort de pêche relatif est plus faible après la politique de jachère (autour de 5%) qu'avant la politique de jachère (environ 10%)

(a)



Légende :

(a) Pour chaque zone, les efforts de pêche relatifs sont regroupés selon le statut pris par la zone au cours du temps (“avant la mise en jachère”, “en jachère”, “en réouverture” et “après la mise en jachère”). La zone en réouverture, ne fait donc pas partie du groupe “après jachère”.

(a) et (b) Pour une zone donnée et un statut donné, le “% similarite” est le nombre de saisons de pêche présentant un effort de pêche relatif significativement similaire entre elles, divisé par le nombre total de comparaisons possibles entre les saisons:

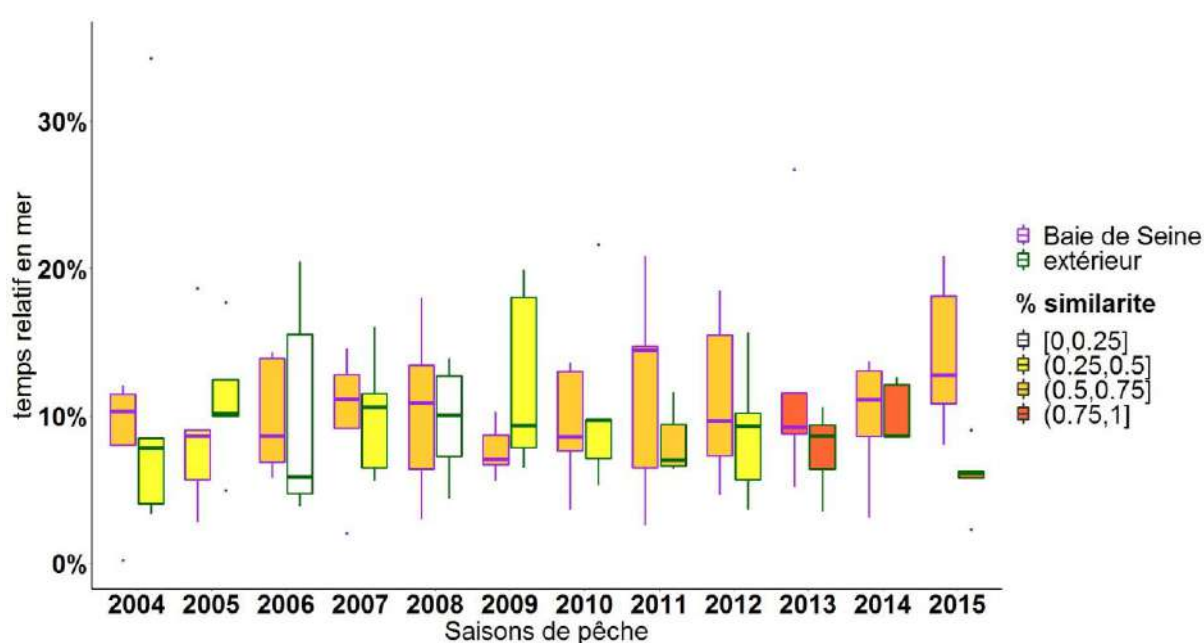
(a) $n = 3$ à 6 pour “avant jachère”, $n = 1$ pour “jachère”, $n = 1$ “réouverture”, $n = 1$ à 3 pour “après jachère”

(b) $n = 10$ pour les zones du “Proche Extérieur”

Figure 8: Comparaison des efforts de pêche relatif par zone sanitaire en baie de Seine (a) et en « Proche Extérieur » (b) sur la période 2016-2021, après l’instauration de la politique de jachère

2.2.1.3 Etude de l'effort relatif de pêche par saison

Avant la politique de jachère, l'effort de pêche relatif se répartit assez équitablement entre baie de Seine et « Proche Extérieur » : cet effort est d'environ 10% dans chacun de ces deux espaces (figure 9). La différence d'effort relatif de pêche entre Baie de Seine et « Proche Extérieur » débute en 2015-2016 (un effort médian relatif de 15% en baie de Seine vs 7% en « Proche Extérieur »). De plus, à partir de 2010-2011, l'effort de pêche relatif s'uniformise entre les zones du « Proche Extérieur ». Le pourcentage de similarité entre les zones est de 60 à 100% en 2010-2011 vs 0 à 20% avant cette date. Pour les zones de la baie de Seine, cet effort relatif était déjà relativement uniforme, environ 60% de similitudes, dès 2004-2005 (figure 9).



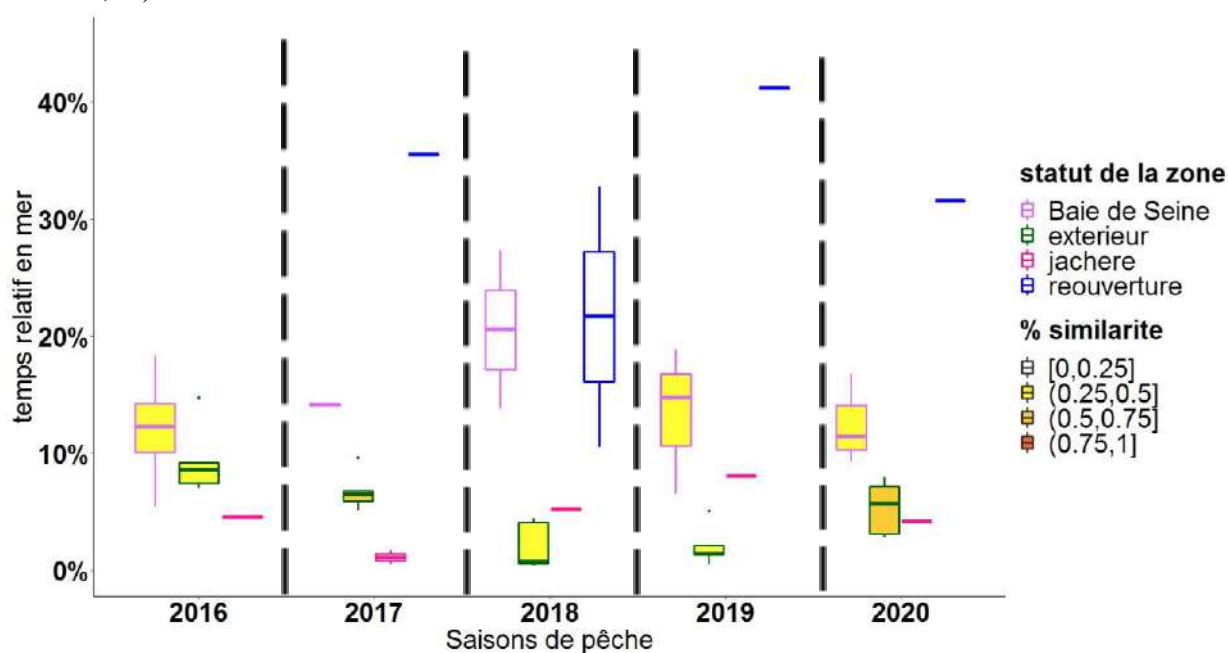
Légende :

Pour chaque saison de pêche, les efforts de pêche relatifs sont regroupés selon leur position géographique ("Baie de Seine" ou "extérieur"). Pour chaque saison de pêche et selon sa position géographique, le "% similarite" est le nombre de zone présentant un effort de pêche relatif significativement similaire entre elles, divisé par le nombre de comparaisons possibles entre les zones (n=10 pour la baie de Seine et n=10 pour l'extérieur)

Figure 9 : Comparaison des efforts de pêche relatif par saison de pêche en baie de Seine et en « Proche Extérieur » sur la période des saisons de pêche de 2004-2005 (légendée en abscisse 2004) à 2015-2016 (légendée en abscisse 2015), avant l'instauration de la politique de jachère

Après l'instauration de la politique de jachère, l'effort de pêche se répartit à nouveau entre quatre groupes selon l'état de la zone : les zones de la baie de Seine, les zones du « Proche Extérieur », la zone mise en jachère et la zone en réouverture (figure 10). Par ordre d'importance d'effort relatif de pêche, il y a tout d'abord la zone en réouverture qui concentre 0,3 à 0,4 de l'effort total de pêche de la saison en cours, puis les zones de la Baie de Seine (0,1

à 0,2) et enfin les zones du « Proche Extérieur » à peu près équivalentes à celle en jachère (de 0.07 à 0,05).



Légende:

Pour chaque saison de pêche, les efforts de pêche relatifs sont regroupés selon la position géographique de la zone sanitaire (“Baie de Seine”, “extérieur”) et son statut (“en jachère”, “en réouverture”). Les zones classées dans le groupe “Baie de Seine”, ne sont ni “en jachère”, ni “en réouverture”.

Pour chaque saison de pêche et selon cette classification, le “% similarite” est le nombre de zone présentant un effort de pêche relatif significativement similaire entre elles, divisé par le nombre total de comparaisons possibles entre les zones ($n=3$ à 6 pour la baie de Seine, $n=10$ pour l’extérieur, $n=1$ pour la “jachère” et la “réouverture”)

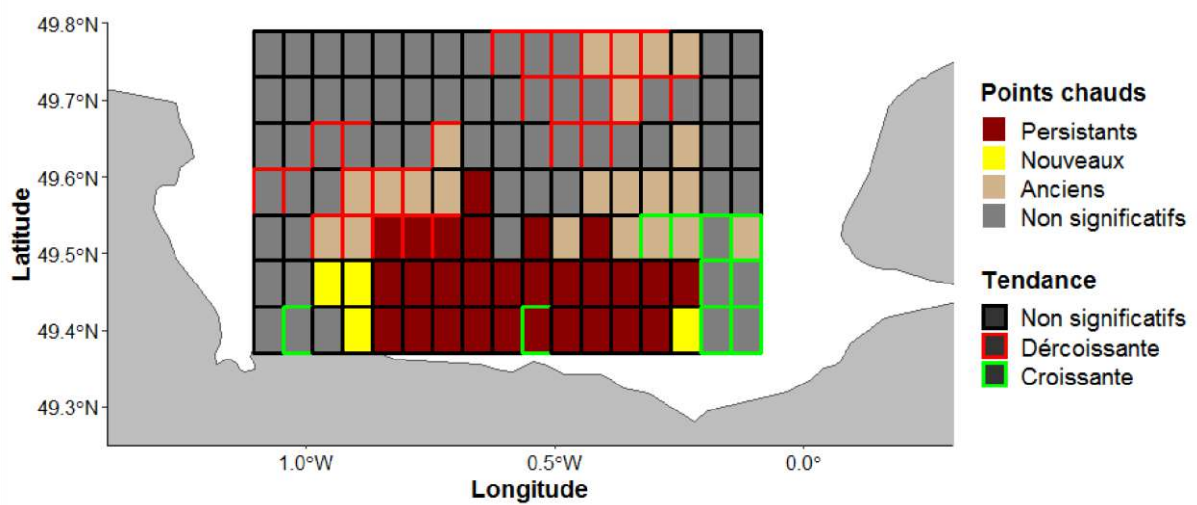
Figure 10 : Comparaison des efforts de pêche relatif par saison de pêche en baie de Seine et en « Proche Extérieur » sur la période des saisons de pêche 2016-2017 (légendée en abscisse 2016) à 2020-2021 (légendée en abscisse 2020), après l’instauration de la politique de jachère

2.2.2 Liens entre effort de pêche et répartition de l’abondance de CSJ en baie de Seine

L’étude de la répartition de l’effort de pêche montre que les points chauds d’effort se situent au niveau des zones sanitaires 3 et 4 au sud de la baie de Seine (point chaud persistant). De plus, cet effort se développe sur les zones 2 et 5 (nouveaux points chauds à tendance de pêche croissante) (figure 11a). En termes d’anciens points chauds à tendance de pêche décroissante, les zones sanitaires 1, 6 et 11 sont concernées. A l’inverse, la zone de l’ouest et du nord-ouest sont délaissées par les pêcheurs de CSJ (points froids) (figure 11b).

En ce qui concerne l'abondance de CSJ de tous les âges, les points chauds et sporadiques se situent aux niveaux des zones 2 à 4, au Sud de la baie de Seine. La plus forte concentration de points chauds d'abondance de CSJ se retrouve au niveau de la zone 3. Les nouveaux points chauds d'abondance sont sur la zone 5, à l'est et la zone 1, à l'ouest pour tous les âges de CSJ. L'abondance de CSJ d'âge 3+ présente la plus forte concentration de nouveaux points chauds à l'est et à l'ouest de la baie de Seine. Toutefois, il n'y a aucun point froid significatif pour les abondances de CSJ (figures 12 à 14), pour chaque classe d'âge. Pour chaque classe d'âge, les tendances à la baisse de l'abondance de CSJ, se situent au nord et nord-est de la baie (zones sanitaires 6 et 11) tandis que les tendances à la hausse sont au sud-est (zone 4 et 5) (figures 12 à 14).

(a)



(b)

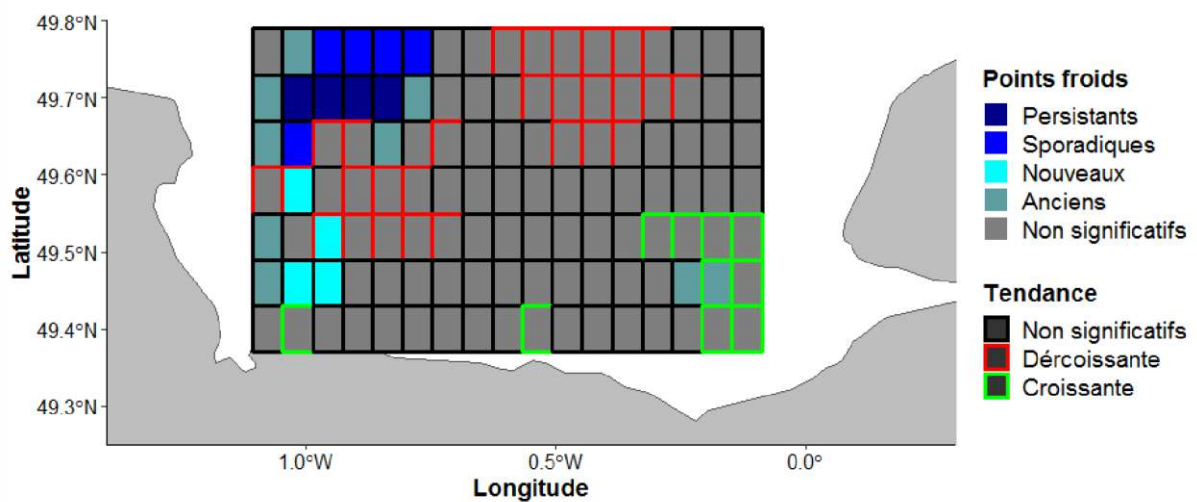


Figure 11 : Evolution spatio-temporelle de l'effort de pêche absolu en points chauds (a) et points froids (b) de 2004-2005 à 2020-2021

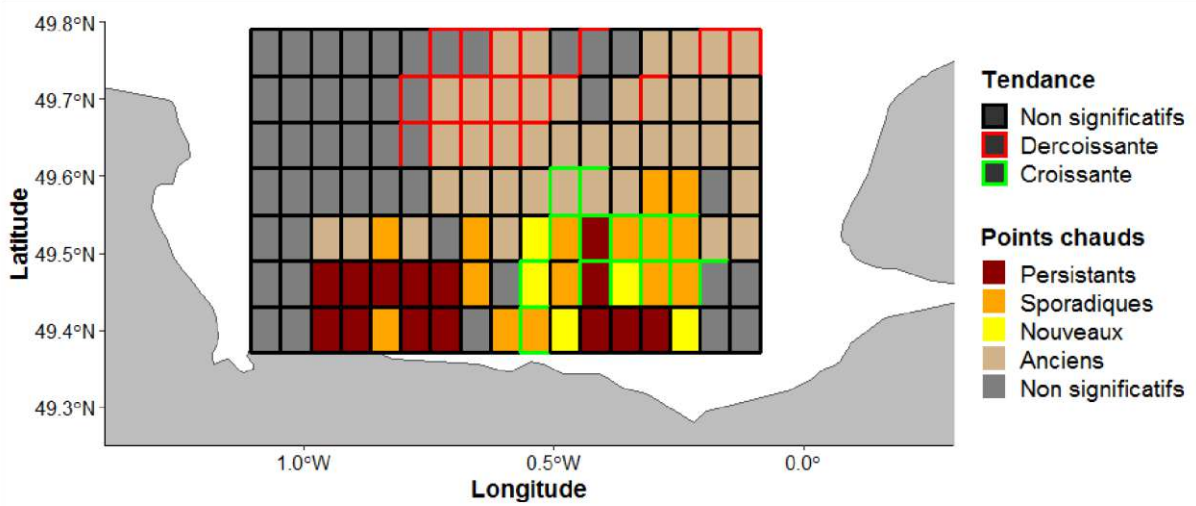


Figure 12 : Evolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ d'âge 1 en points chauds de 2004 à 2020

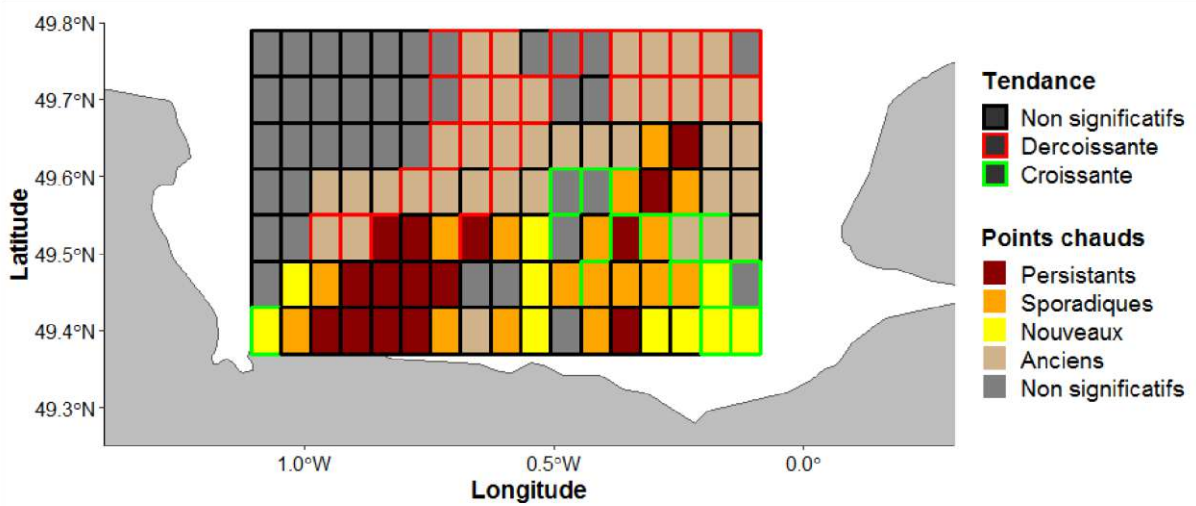


Figure 13 : Evolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ d'âge 2 en points chauds de 2004 à 2020

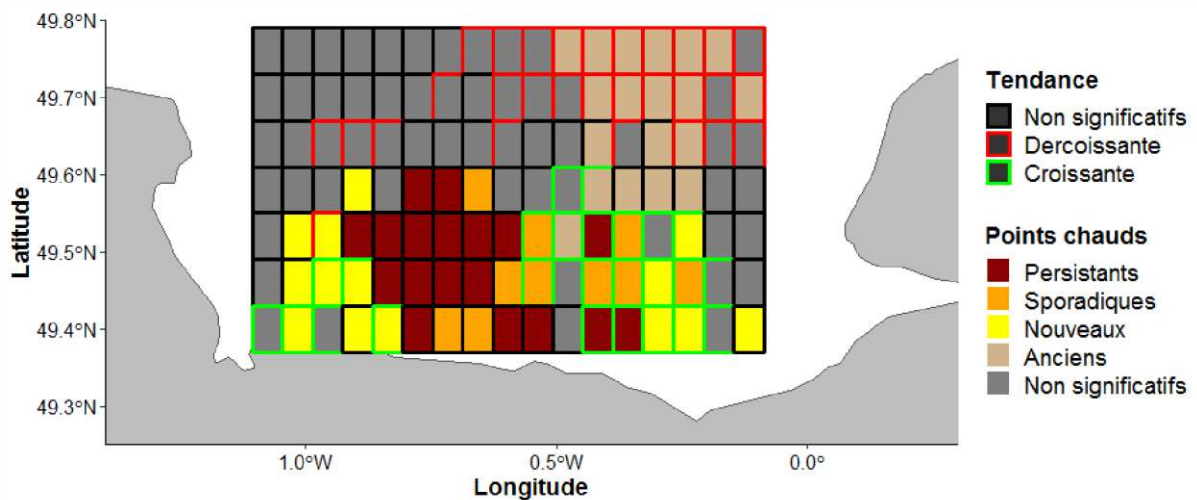


Figure 14 : Evolution spatio-temporelle de l'abondance de CSJ d'âge 3+ en points chauds de 2004 à 2020

La comparaison des points chauds et froids de la répartition de l'effort de pêche et de l'abondance de CSJ, souligne une correspondance, bien qu'imparfaite, entre ces deux grandeurs. Les points chauds nouveaux, persistants et sporadiques ainsi que les tendances à la hausse et à la baisse d'effort et d'abondance de CSJ matures se superposent mais pas totalement (figures 12 à 14).

III. Discussion

3.1. Les performances d'une mesure de gestion spatialisée: de la définition des objectifs à leur évaluation

Ce travail a mis en évidence le rôle de la politique de jachère rotationnelle mise en place depuis novembre 2016, sur la hausse des ressources de CSJ observée depuis cette date. Celle-ci répond aux objectifs d'amélioration et de protection de la structure démographique et de l'état du stock de CSJ de baie de Seine ainsi que de stabilisation des captures. En effet, un maintien des captures, des CPUE et de l'abondance peut être observé depuis la mise en place de ce système. La multiplication des CPUE par plus de deux depuis 2015-2016 peut par ailleurs expliquer la chute de l'effort de pêche de 2016 à 2020 car le "quota par navire" imposé est plus rapidement atteint. Tout comme pour la pêcherie de *P. magellanicus* aux Etats-Unis, ce système de jachère a été un succès pour la pêcherie de CSJ de baie de Seine. Ce succès s'est traduit par une hausse de l'abondance et des CPUE (Valderrama et Anderson, 2007 ; Carvalho et al., 2018). De plus, cet effet de la jachère rotationnelle a été visible beaucoup plus rapidement en baie de Seine que dans les autres pêcheries où ce même type de mesure avait été instaurée. Pour la pêcherie de CSJ de la baie de Seine, il a fallu 1 an pour constater une multiplication par 2 de l'abondance et 2 ans pour une multiplication par 3 (Foucher et Varenne, 2021). Pour le pétoncle géant de la baie de Saint Georges, ces mêmes résultats ont été obtenus après 6 ans de politique de jachère rotationnelle (Valderrama et Anderson, 2007). Pour l'ormeau nordique, il a fallu 21 ans avant d'observer une multiplication par deux de la densité (Island et Strait, 2017). Cette

différence d'efficacité de cette mesure de jachère rotationnelle peut être due aux différences de traits d'histoire de vie propre à l'espèce (taux de croissance et fécondité, période de reproduction; stratégie de reproduction (itérologue ou sémellogue), recrutement), au type d'habitat protégé (fraction du trait de côte appartenant à la zone), et à la densité d'adultes s'y trouvant à la fermeture (Chen et Hastings, 2021). Par exemple, pour l'ormeau nordique, il y a eu aucune évolution de densité pendant 16 ans, à cause d'un effet Allee : la mesure a été mise en place au moment où la densité de géniteurs était en dessous d'un seuil critique. Les probabilités de rencontre entre les gamètes étaient trop faibles et donc le stock a mis du temps à se reconstituer (Island et Strait, 2017). Dans d'autres cas, tels que celui de l'oursin rouge géant du Pacifique Nord

(Fister et Bradbury, 1996 cités dans Chen et Hastings, 2021) et celui du concombre de mer du Canada (Purcell et al., 2016), cette politique de jachère rotationnelle n'a pas permis une hausse de l'abondance du stock. Cet échec a eu pour cause, soit un temps de fermeture trop court ou décalé par rapport au taux de croissance de l'espèce, soit un mauvais contrôle et un manque de restriction de l'effort de pêche après la réouverture de la zone. La pêcherie de CSJ de la baie de Seine n'a pas été concernée par ces difficultés car cette mesure de jachère rotationnelle est accompagnée de d'autres restrictions de l'effort de pêche (sélectivité des engins, taille du navires, nombre de drague à bord, temps de pêche etc). De plus, ces cycles de jachère rotationnelle sont adaptés au cycle de vie de la CSJ.

En effet, l'intensité de l'effet de la jachère sur la dynamique de la population de la CSJ dépend du stade du cycle de vie (adultes ou juvéniles) ainsi que du moment étudié (après la fermeture de la zone ou après la réouverture de la zone).

3.2. Un système de jachère rotationnelle cohérent avec le cycle de la vie de la CSJ

Dans le cas des AMP, la fermeture permanente de la zone à la pêche entraîne une hausse de l'abondance et des densités de populations pouvant être à l'origine de compétitions inter et intraspécifiques (Lizaso et al., 2000). Il est donc important de prendre en compte l'impact de cette densité-dépendance sur les stades de vie (adulte et juvénile) de l'espèce protégée afin d'éviter une surestimation de la hausse potentielle de biomasse à la suite de l'instauration de l'AMP (Berventhon et Holt, 1957). De plus, l'intensité de ce phénomène diffère selon les stades de vie (St Mary et al., 2000). Par exemple, la mortalité naturelle des juvéniles diminue lorsque la densité de la population augmente, alors que celle des adultes est moins impactée (Lizaso et al., 2000). En effet, la survie des juvéniles dépend fortement de leur taux de croissance qui va diminuer en cas de compétition intraspécifique vis-à-vis de l'accès à la nourriture et de l'habitat (Côté et al., 1994 ; Lizaso et al., 2000). Tout comme pour l'AMP, l'effet de la jachère rotationnelle sur l'abondance de CSJ diffère selon les stades de vie, mais ce phénomène de densité dépendance y est régulé par une ouverture périodique de la zone à l'activité de pêche.

3.2.1. Après la fermeture de la zone

Tout d'abord, l'abondance de CSJ juvéniles d'âge 1 est significativement plus importante en présence de la politique de jachère, qu'en absence de celle-ci, à la suite de de la

fermeture d'une zone sanitaire. Cet effet de la jachère sur une classe d'âge théoriquement non soumise à la pression de pêche peut s'expliquer par une baisse de perturbation de l'environnement des larves en développement, à cause de l'activité de pêche. La drague est effectivement un engin de pêche ayant un fort impact sur le milieu et sur la population de CSJ (Drogou et al., 2008 ; Stewart et al., 2016). Cet impact est à la fois physique (destruction de la capacité d'accueil et réduction de la complexité de l'habitat), biologique (casse sur le fond, déterrement, hausse des mortalités par pêche, chute du recrutement) et chimique (relargage de polluant, perturbation des cycles nutritifs et de l'oxygénation du milieu) (Drogou et al., 2008 ; Stewart et al., 2016).

Ensuite, l'abondance de CSJ matures d'âge 2 et d'âge 3 et plus, est significativement plus élevée en présence de la politique de jachère, qu'en absence de celle-ci, à la suite de la fermeture d'une zone sanitaire (cf.annexe XVI). La fermeture de cette zone, en novembre, a favorisé la survie, la croissance et la maturation des juvéniles qui y étaient présents, grâce à une absence de pression de pêche. Sans jachère et malgré la taille minimale de capture, ces juvéniles auraient moins de chances d'atteindre l'âge 2, en raison des perturbations liées à l'activité de pêche. De la même manière, la jachère a permis le vieillissement des CSJ d'âge 2 et plus qui avaient survécu à la pression de pêche de l'année précédente.

3.2.2. Après la réouverture de la zone

La protection des géniteurs par la zone de jachère peut être à l'origine de l'abondance significativement plus forte des juvéniles, constatée en présence du système de jachère, après la réouverture de la zone. En effet, grâce à cette fermeture, les CSJ ont plus de chances de se reproduire au moins une fois avant d'être pêchées (Valderrama et Anderson, 2007). Ainsi, au moment de la période de reproduction, la densité de géniteurs sur la zone en jachère est plus élevée que celle sur les zones ouvertes à la pêche (Gerber et al., 2003 ; Davies et al., 2015). Comme les géniteurs sont plus proches les uns des autres, la probabilité de rencontre des gamètes est augmentée, ce qui favorise une plus forte production d'œufs (Davies et al., 2015). Clavel l'Haridon, 2021, a prouvé l'existence d'une relation stock recrutement au sein de la population de CSJ de la baie de Seine. Elle a montré qu'un plus grand nombre de géniteurs contribue à un plus grand nombre de recrues. Toutefois, ce propos reste à nuancer car la survie et la fixation des larves dépendent de facteurs environnementaux tels que la température, la disponibilité en nourriture, la prédation, la présence de polluants et de toxines. (Le Penneec et al., 2003). Davies et al., 2015 ont d'ailleurs soulevé que seulement 0.09% des œufs de pétoncle géant américain produits ont donné des larves qui se sont fixées. Cependant, ce pétoncle vit dans des conditions environnementales différentes de la CSJ (habitat plus profond, température plus froide, moins de disponibilité alimentaire). En effet, ce pétoncle vit sur le fond de l'océan Atlantique à 60 à 100 m de profondeur (Hart, 2004), alors que la CSJ vit dans des eaux plus protégées à moins de 40 m de profondeur en baie de Seine (Priol, 1930).

Lors de leur vie pélagique, les larves nées de parents spatialement proches sur la zone précédemment mises en jachère, se sont soit fixées sur celle-ci, soit dispersées vers les zones

voisines. C'est l'effet spillover évoqué par Hart et al. (2020) dans le cas du pétoncle géant (*Placopecten magellanicus*) en baie de l'Atlantique du milieu. Les larves de pétoncle géant produites dans la zone nord du Canyon d'Hudson, diffusent passivement vers celle de "l'Elefant Trunk", plus au Sud, selon un courant descendant. Nicolle et al (2013) a également prouvé l'existence de ce phénomène en baie de Seine. Toutefois, le sens et l'ampleur de cette dispersion est très variable au cours du temps, à cause d'une interaction complexe et changeante entre les courants de marées et les courants de surface (Nicolle et al., 2013). De plus, la distance parcourue par les larves dépend de leur durée de vie pélagique et de la température (Cragg, 2006 cité dans Nicolle et al., 2013). Pour Nicolle et al (2013) et Salomon (1985) les larves nées dans les zones sanitaires 1, 2, 3 diffuseraient passivement plutôt vers l'Ouest et le Nord, tandis que celles des zones 3, 4 et 5 pourraient se déplacer passivement vers l'Est (cf.annexe XVII). La présence de gyres au sud de la baie de Seine, favorise la rétention des larves à cet endroit. La présence de ces gyres dépend, cependant, de la vitesse du vent. Si celle-ci devient supérieure à 7-8m/s, le gyre n'existe plus et les larves peuvent plus facilement diffuser (Nicolle et al., 2013). Dans le cadre d'AMP, ce phénomène de spillover peut s'étendre de 5 km (homards) à 150 km (poissons), mais il est généralement observable entre 600 et 1500 m, à partir des frontières de la zone protégée (Di Lorenzo et al., 2016).

Ainsi, ce phénomène de diffusion larvaire en baie de Seine peut être à l'origine des nouveaux points chauds d'abondance de CSJ, en zone 5 à l'est, et 2 à l'ouest, pour tous les âges. Toutefois, pour vérifier cette hypothèse, il faudrait appliquer le modèle de diffusion larvaire de Nicolle et al., 2013, à l'échelle des zones sanitaires de la baie de Seine durant la période de mise en place de la politique de jachère rotationnelle (2016-2021). D'autres effets, tels que le nombre de fois qu'une zone est fermée ou l'effort de pêche, pourraient, en plus du phénomène de spillover, être à l'origine de ces nouveaux points chauds. Il est important de préciser que la zone 5 a été fermée deux années sur cinq, depuis l'instauration de la jachère rotationnelle. D'autre part, les tendances à la baisse de l'abondance des CSJ de tous les âges, au Nord de la baie de Seine peuvent être expliquées par la présence d'un environnement défavorable au développement de la CSJ. Sur ces zones, les fonds sont rocheux et rendent difficile la fixation des larves de CSJ (Minchin 1992). La politique rotationnelle de jachère a donc un impact sur la répartition spatiale des CSJ en baie de Seine.

Par ailleurs, après la réouverture de la zone, un amoindrissement de la protection des CSJ matures par la jachère est constaté. L'abondance de ces classes d'âge chute de 20 à 90% pour les âges 2, et de 20 à 80% pour les âges 3 et plus, entre la période après la fermeture et après la réouverture de la zone. Cet atténuation de l'effet de la jachère peut avoir pour origine un changement des comportements de pêche à moyen terme (cf.annexe XVI). Ce dernier est une tactique de pêche qui correspond au choix du lieu de pêche (Vermard, 2009). Un tel changement de comportement de pêche est également observable dans le cas d'AMP. Cependant, contrairement à la jachère rotationnelle de la baie de Seine, l'effet de protection de l'AMP est annulé et non affaibli. Par exemple, l'augmentation de la biomasse de poissons récifaux au sein de la réserve marine de l'île Sumilon (Philippines) après 9 ans et demi de fermeture, a complètement été effacée lors des 18 mois de réouverture qui suivirent (Williams et al., 2006).

3.3. Jachère rotationnelle, répartitions spatio-temporelles de l'abondance et de l'effort de pêche: des processus connectés

3.3.1. Contraintes exercées par la jachère sur la répartition de l'effort de pêche

Dans le cas des AMP, un changement de comportements de pêche est observable à la suite de la fermeture de la zone à la pêche. De fait, il y a une réallocation de l'effort de pêche, soit une concentration de celui-ci autour des frontières de l'AMP (Horta e Costa et al., 2013). En effet, c'est ici que se trouve la plus forte abondance de ressources halieutiques, grâce aux phénomènes de migration et de spillover (Lizaso et al., 2000). Ainsi, plus les pêcheurs sont proches des frontières, plus leurs CPUE augmentent (Nillos Kleiven et al., 2019). C'est la tactique de pêche, appelée "Fishing the line" qui consiste à aller pêcher aux limites de la zone fermée (Van der lee et al., 2013)

Pour la baie de Seine, le système de jachère rotationnelle a également entraîné un changement de distribution de l'effort de pêche : avant ce système, les pêcheurs exploitaient équitablement toutes les zones de la baie de Seine et le « Proche Extérieur », alors que dorénavant, ils sont contraints de ne pas pêcher sur la zone en jachère. Ils privilégient donc la zone sanitaire en réouverture, puis celles de la Baie de Seine. Les zones du « Proche Extérieur » sont donc moins exploitées depuis 2016, alors qu'elles sont ouvertes dès le 1er octobre, soit un mois et demi avant l'ouverture de la baie de Seine. De nombreux pêcheurs préfèrent donc ne débiter la pêche à la CSJ qu'à partir de l'ouverture de la baie de Seine, sur la zone de réouverture. Contrairement aux AMP, la jachère rotationnelle a conduit à une distribution de l'effort de pêche selon un modèle gravitaire. Cet effort est le plus intense sur la zone ayant la meilleure attractivité économique, en termes d'accessibilité à ressource et de coûts engendrés dus à l'éloignement à la côte (Vermard, 2009). La zone en réouverture et celles de la baie de Seine sont effectivement plus proches des côtes que celles du « Proche Extérieur ». Par ailleurs, le temps passé en mer par les coquillards a diminué en baie de Seine depuis l'instauration de la jachère rotationnelle. En effet, comme l'abondance de CSJ matures disponible a explosé depuis cette date, les pêcheurs ont atteint plus rapidement leurs quotas. De plus, du fait d'une fermeture et réouverture périodique d'une zone de pêche, le temps passé en mer en baie de Seine, est y beaucoup plus variable, contrairement au « Proche Extérieur » qui n'est pas concerné par cette mesure.

3.3.2. Lien entre effort et abondance

Ainsi, le comportement de pêche des coquillards en baie de Seine conditionne l'abondance de CSJ. A l'échelle d'une année, cette augmentation de pression de pêche sur la zone en réouverture de la baie de Seine peut conduire à un effort de pêche plus faible sur les zones voisines. Certes, ce changement de répartition de l'effort de pêche provoque la baisse d'abondance de CSJ matures présente sur la zone en réouverture, mais il peut favoriser le développement des juvéniles des zones voisines grâce à la baisse de la perturbation de leur environnement par la pêche. De fait, les larves ayant diffusé par effet spillover de la zone de

jachère vers celles adjacentes, en été, auront de plus fortes chances d'atteindre le stade de juvénile, au moment de la réouverture de la zone de jachère, lors de l'hiver qui suit. Cependant, cette combinaison de facteurs sur l'abondance de CSJ reste à nuancer pour les zones de la baie de Seine, car la pression de pêche relative y est restée constante entre avant et après la politique de jachère, lorsque ces zones ne sont ni en jachère, ni en réouverture. Durant les 5 années de jachère rotationnelle, l'effort de pêche se concentrant sur la zone en réouverture, a finalement entraîné une baisse de l'effort de pêche sur les zones du « Proche Extérieur », et non sur celles de la baie de Seine. Finalement, le « Proche Extérieur » pourrait également participer au recrutement de CSJ de la baie de Seine, depuis la mise en place de ce système.

Par ailleurs, les pêcheurs semblent privilégier les zones ayant la plus forte abondance de CSJ matures, d'où la correspondance significative entre les points chauds anciens, sporadiques et nouveaux de la répartition de l'effort de pêche avec celle de l'abondance de CSJ matures. Cette correspondance est toutefois imparfaite, en particulier à l'Est et à l'Ouest de la baie de Seine. En effet, d'autres facteurs que l'abondance de la ressource peuvent déterminer un comportement de pêche. Dans le cas de la pêche au thon aux Philippines, les conditions météorologiques et les courants influencent à 25% la décision de pêcher dans une zone. Le choix de cette zone est ensuite déterminé à 18% par le prix de la ressource et du carburant, à 6% par les choix des autres pêcheurs et à 5% par les expériences passées, en termes de captures obtenues précédemment (Macusi et al., 2015). En ce qui concerne la baie de Seine, la zone Ouest est connue des pêcheurs, comme ayant une forte abondance de balanes (données COMOR). Malgré l'apparition d'un nouveau point chaud d'abondance de CSJ matures dans cette zone, les pêcheurs y vont moins car les CSJ portant ces balanes sont moins rentables : demandant un travail supplémentaire, elles seront vendues moins chères. Dans ce cas-ci, c'est la connaissance du terrain et le prix de la ressource, et non son abondance, qui a déterminé le comportement de pêche des coquillards.

3.3.3. Mesures de gestion et abondance une interaction dynamique dans un environnement changeant

En baie de Seine, la politique de jachère rotationnelle a répondu aux objectifs de durabilité de la pêcherie car cette situation est positive, en termes de protection du stock et stabilisation des captures. Celles-ci, après avoir été multipliées par deux entre 2015-2016 et 2016-2017, se sont maintenues autour de 12 000 t en baie de Seine. Cependant, à l'instar des AMP il peut être difficile de différencier une augmentation locale d'abondance liée à un effet de la jachère, d'une augmentation générale du stock liée à des conditions environnementales clémentes. Par exemple, Moland et al. (2012) ont montré que le nombre de homards (*Homarus gammarus*) avait crû de manière similaire sur deux ans, entre une AMP et une zone de contrôle, non protégée, au niveau du site de Kvernskjær, au Nord-Ouest de la Suède. Pour la baie de Seine, il semblerait que des conditions environnementales favorables au recrutement de CSJ ont contribué au rapide succès de cette mesure. En effet, bien que comparable à celui des terres agricoles sur son fonctionnement, cette jachère rotationnelle en milieu marin est beaucoup plus difficile à contrôler, quant à ses résultats. Dans le système agricole, les cultures se développent dans des conditions maîtrisées par l'Homme (irrigation, apport d'intrants), alors qu'en milieu marin, le recrutement est soumis aux conditions environnementales qui peuvent fortement varier d'une année sur l'autre (Purcell et al., 2016).

C'est pourquoi, la situation actuelle de la pêcherie de CSJ de la baie de Seine reste fragile. De plus, des changements anthropiques et environnementaux pourraient venir bouleverser durablement cette situation. Par exemple, un parc éolien (64 éoliennes, 50 km²) sera mis en service en 2024, en face de Courseulle-sur-mer, proche du cœur du gisement de CSJ. Il va impacter la répartition de l'abondance de CSJ qui vont, d'une part voir leur habitat perturbé, mais d'autre part subir une plus faible pression de pêche (Raoux et al., 2018).

Pourtant, cette installation s'effectue dans le cadre d'une planification marine spatiale visant à répartir les activités humaines dans l'espace marin pour atteindre des objectifs économiques, écologiques et sociaux (Trouillet, 2018). Par ailleurs, dans le cas de l'AMP de Waikiki (Hawaï), l'arrivée de la salicorne (*Gracilaria salicornia*) a dégradé la qualité de l'habitat (coraux) des poissons des récifaux, ce qui a rendu cette mesure de gestion inefficace (Williams et al., 2006). C'est pourquoi, l'arrivée du poulpe (*Octopus vulgaris*) en Bretagne inquiète les coquillards normands. Ce céphalopode qui est l'un des principaux prédateurs de la CSJ (Duncan et al., 2016) pourrait nuire à la situation actuelle de la pêcherie de CSJ de baie de Seine.

Conclusion

La mise en place de la politique de jachère rotationnelle en baie de Seine en 2016, a permis une gestion plus durable de sa pêcherie de CSJ. Tout d'abord, la zone de jachère protège à la fois les juvéniles et les géniteurs de la pression de pêche. Par conséquent, au moment de la réouverture de la zone, une forte abondance de CSJ matures est disponible pour la pêcherie. Les pêcheurs peuvent donc minimiser leur coûts en atteignant rapidement le "quota par navire" imposé. Ensuite, cette zone de jachère rotationnelle protège le futur recrutement sur la zone fermée à la pêche, mais aussi sur celles qui lui sont voisines. Ceci a été favorisé par un effet spillover de la zone de jachère vers celles adjacentes, combiné à une baisse de la pression de pêche sur celles-ci. Cette politique de jachère rotationnelle, a donc permis en baie de Seine, la mise en place d'un cercle vertueux entre production du stock de CSJ et hausse du profit de la pêcherie de CSJ (cf.annexe XVIII). Toutefois, la durabilité de cette situation peut être menacée par des changements de conditions environnementales, dus à des pressions anthropiques ou au changement climatique.

Bibliographie

- Akaike, H. (1973). Block Toeplitz matrix inversion. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 24(2), 234-241.
- Bethoney, N. D., Asci, S., & Stokesbury, K. D. (2016). Implications of extremely high recruitment events into the US sea scallop fishery. *Marine Ecology Progress Series*, 547, 137-147.
- Beverton, R. J., & Holt, S. J. (2012). *On the dynamics of exploited fish populations* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- Caddy, J. F., & Seijo, J. C. (1998). Application of a spatial model to explore rotating harvest strategies for sedentary species. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 359-366.

- Campbell, A., Harbo, R. M., & Hand, C. M. (1998). Harvesting and distribution of Pacific geoduck clams, *Panopea abrupta*, in British Columbia. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 349-358.
- Carvalho, P. G., Jupiter, S. D., Januchowski-Hartley, F. A., Goetze, J., Claudet, J., Weeks, R., Humphries, A., White, C. (2019). Optimized fishing through periodically harvested closures. *Journal of Applied Ecology*, 56(8), 1927-1936.
- Chen, R., & Hastings, A. (2021). Advantages and Disadvantages of Rotating Spatial Closures for Managing Fisheries.
- Clavel-L'Haridon, A. (2021). Influence des conditions environnementales sur la variabilité du recrutement chez deux espèces de bivalves de la baie de Seine.
- Côté, J., Himmelman, J. H., & Claereboudt, M. R. (1994). Separating effects of limited food and space on growth of the giant scallop *Placopecten magellanicus* in suspended culture. *MARINE ECOLOGY-PROGRESS SERIES*, 106, 85-85.
- Dao, J.-C., Fleury, P.G., Mikolajunas, J.P., Norman, M., Strand, Ø. (1993). Concerted action on scallop seabed cultivation in Europe. Specific Community Programme for Research, Technological Development and Demonstration in the Field of Agriculture and Agro-Industry, Inclusive Fisheries. Intermediate Report, EC AIR 2-CT 931647, 24.
- D'Aloia, C. C., Daigle, R. M., Côté, I. M., Curtis, J. M., Guichard, F., & Fortin, M. J. (2017). A multiple-species framework for integrating movement processes across life stages into the design of marine protected areas. *Biological Conservation*, 216, 93-100.
- Davidson, R. J. (2001). Changes in population parameters and behaviour of blue cod (*Parapercis colias*; Pinguipedidae) in Long Island—Kokomohua Marine Reserve, Marlborough Sounds, New Zealand. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 11(6), 417-435.
- Davies, K. T., Gentleman, W. C., DiBacco, C., & Johnson, C. L. (2015). Fisheries closed areas strengthen scallop larval settlement and connectivity among closed areas and across international open fishing grounds: a model study. *Environmental management*, 56(3), 587-602.
- Davies, T. K., Mees, C. C., & Milner-Gulland, E. J. (2017). Use of a counterfactual approach to evaluate the effect of area closures on fishing locations in a tropical tuna fishery. *PLoS One*, 12(3), e0174758.
- Day, J. C., Laffoley, D., & Zischka, K. (2015). Marine protected area management. *Protected area governance and management*, 609-650.
- Devauchelle, N., & Mingant, C. (1991). Review of the reproductive physiology of the scallop, *Pecten maximus*, applicable to intensive aquaculture. *Aquatic Living Resources*, 4(1), 41-51.
- Di Lorenzo, M., Claudet, J., & Guidetti, P. (2016). Spillover from marine protected areas to adjacent fisheries has an ecological and a fishery component. *Journal for Nature Conservation*, 32, 62-66.
- Direction interrégionale de la mer Manche Est - Mer du Nord. Arrêt n°173/2020, 2020.
- Direction interrégionale de la mer Manche Est - Mer du Nord. Arrêt n°123/2021, 2021.
- Drogou, M., Laurans, M., & Fritsch, M. (2008). Analyse de l'impact des engins de pêche sur les habitats et espèces listées dans les directives habitats et oiseaux (Natura 2000).
- Dugan, J. E., & Davis, G. E. (1993). Applications of marine refugia to coastal fisheries management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50(9), 2029-2042.

- Duhem, E. (2013). Étude des relations entre les conditions environnementales et le recrutement dans la population de Coquilles Saint-Jacques de la baie de Seine.
- Duncan, P. F., Brand, A. R., Strand, Ø., & Foucher, E. (2016). The European scallop fisheries for *Pecten maximus*, *Aequipecten opercularis*, *Chlamys islandica*, and *Mimachlamys varia*. In *Developments in aquaculture and fisheries science* (Vol. 40, pp. 781-858). Elsevier.
- Eriksson, H., & Byrne, M. (2015). The sea cucumber fishery in Australia's Great Barrier Reef Marine Park follows global patterns of serial exploitation. *Fish and Fisheries*, 16(2), 329-341.
- FAO. (2020). La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2020. La durabilité en action. Rome.
- Foucher, E., Biseau, A., Berthou, P., Fifas, S., Forest, A., & Vigneau, J. (2010). Éléments d'information sur la coquille Saint-Jacques en baie de Seine et l'éventualité de la mise en place d'une zone de restriction spéciale.
- Foucher, E., & Fifas, S. (2012). Éléments de connaissance sur le cycle biologique de la Coquille Saint-Jacques européenne (*Pecten maximus*) en Manche.
- Foucher, E. (2019). Evaluation du stock de coquilles Saint-Jacques *Pecten maximus* de la baie de Seine. Résultats de la campagne scientifique COMOR 2019 (2 au 20 juillet 2019).
- Foucher, E., & Varenne, F. (2021). Evaluation du stock de coquilles Saint-Jacques *Pecten maximus* du gisement de la baie de Seine. Résultats de la campagne scientifique COMOR 2021 (3 au 21 juillet 2021).
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage.
- France AgriMer (2020). Chiffres-clés des filières pêche et aquaculture en France en 2020, Production - Entreprises - Échanges – Consommation.
- Francour, P. (1991). The effect of protection level on a coastal fish community at Scandola, Corsica. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 46(1), 65-81.
- Game, E. T., Bode, M., McDonald-Madden, E., Grantham, H. S., & Possingham, H. P. (2009). Dynamic marine protected areas can improve the resilience of coral reef systems. *Ecology Letters*, 12(12), 1336-1346.
- Gell, F. R., & Roberts, C. (2003). The fishery effects of marine reserves and fishery closures.
- Gerber, L. R., Botsford, L. W., Hastings, A., Possingham, H. P., Gaines, S. D., Palumbi, S. R., & Andelman, S. (2003). Population models for marine reserve design: a retrospective and prospective synthesis. *Ecological Applications*, 13(sp1), 47-64.
- Goetze, J. S., Claudet, J., Januchowski-Hartley, F., Langlois, T. J., Wilson, S. K., White, C., Weeks, R., & Jupiter, S. D. (2018). Demonstrating multiple benefits from periodically harvested fisheries closures. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), 1102-1113.
- Hannesson, R. (1998). Marine reserves: what would they accomplish?. *Marine Resource Economics*, 13(3), 159-170.
- Hart, D. R. (2003). Yield-and biomass-per-recruit analysis for rotational fisheries, with an application to the Atlantic sea scallop (*Placopecten magellanicus*).
- Hart, D. R. (2004). *Essential fish habitat source document. Sea scallop, Placopecten magellanicus, life history and habitat characteristics*. DIANE Publishing.
- Hart, D. R., & Rago, P. J. (2006). Long-term dynamics of US Atlantic sea scallop

- Placopecten magellanicus* populations. *North American Journal of Fisheries Management*, 26(2), 490-501.
- Hart, D. R., Munroe, D. M., Caracappa, J. C., Haidvogel, D., Shank, B. V., Rudders, D. B., Klinck, J. M., Hofmann, E. E., & Powell, E. N. (2020). Spillover of sea scallops from rotational closures in the Mid-Atlantic Bight (United States). *ICES Journal of Marine Science*, 77(5), 1992-2002.
- Harris, N. L., Goldman, E., Gabris, C., Nordling, J., Minnemeyer, S., Ansari, S., Lipmann, M., Bennett, L., Raad, M., Hanson, M., & Potapov, P. (2017). Using spatial statistics to identify emerging hot spots of forest loss. *Environmental Research Letters*, 12(2), 024012.
- Hilborn, R., Stokes, K., Maguire, J. J., Smith, T., Botsford, L. W., Mangel, M., Orensanz, J., Parmah, A., Ricei, J., Bellj, J., Cochranek., K. L., Garcial, S., Hallm, J. S., Kirkwoodn, G. P., Sainsburyo, K., Stefanssonp, G., & Walters, C. (2004). When can marine reserves improve fisheries management?. *Ocean & Coastal Management*, 47(3-4), 197-205.
- Horta e Costa, B., Batista, M. I., Gonçalves, L., Erzini, K., Caselle, J. E., Cabral, H. N., & Gonçalves, E. J. (2013). Fishers' behaviour in response to the implementation of a marine protected area. *PLoS One*, 8(6), e65057.
- Horwood, J. W., Nichols, J. H., & Milligan, S. (1998). Evaluation of closed areas for fish stock conservation. *Journal of Applied Ecology*, 893-903.
- Ifremer (2022). Système d'Informations Halieutiques. Département Calvados, 2020. Activité des navires de pêche.
- Ifremer (2022). Système d'Informations Halieutiques. Département Manche, 2020. Activité des navires de pêche.
- Ifremer (2022). Système d'Informations Halieutiques. Département Seine-Maritime, 2020. Activité des navires de pêche.
- Ifremer (2022). Système d'Informations Halieutiques. Flotte de la façade Mer du Nord - Manche – Atlantique, 2020. Synthèse des flottilles de pêche.
- Island, W. C. V., & Strait, Q. C. (2017). 17. Northern Abalone (*Haliotis Kamtschatkana*) abundance in British Columbia. *State of the Physical, Biological and Selected Fishery Resources of Pacific Canadian Marine Ecosystems in*, 76.
- Lefebvre, C. (2005). Aires marines protégées, les enseignements du premier congrès mondial pour la stratégie nationale. *Geelong, Australie, UICN. Union mondiale pour la nature, Comité français*.
- Légifrance. Arrêté du 21 août 2020 portant approbation d'une délibération du Comité national des pêches maritimes et des élevages marins relative aux conditions d'exercice de la pêche à la coquille Saint-Jacques, 2020.
- Le Pennec, M., Paugam, A., & Le Pennec, G. (2003). The pelagic life of the pectinid *Pecten maximus*—a review. *ICES Journal of Marine Science*, 60(2), 211-233.
- Lizaso, J. S., Goni, R., Renones, O., Charton, J. G., Galzin, R., Bayle, J. T., Jerez, P. S., Ruzafa, A.P., & Ramos, A. A. (2000). Density dependence in marine protected populations: a review. *Environmental conservation*, 27(2), 144-158.
- Lubet, P., Devauchelle, N., Muzellec, M., Paulet, Y., Faveris, R., & Dao, J. C. (1995). Reproduction of *Pecten maximus* from different fisheries areas: Rade de Brest, Baie de Saint-Brieuc, Baie de Seine. In *Fisheries, Biology and Aquaculture of Pectinids. 8. Int. Pectinid Workshop, Cherbourg (France), 22-29 May 1991*.

- Martineu, P. (1994). Modélisation du cycle vital de la coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*) en Baie de Saint-Brieuc. Approche démographique.
- Macusi, E. D., Babaran, R. P., & Van Zwieten, P. A. M. (2015). Strategies and tactics of tuna fishers in the payao (anchored FAD) fishery from general Santos city, Philippines. *Marine Policy*, 62, 63-73.
- Minchin, D. (1992). Biological observations on young scallops, *Pecten maximus*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 72(4), 807-819.
- Moland, E., Fernández-Chacón, A., Sjørdalen, T. K., Villegas-Ríos, D., Thorbjørnsen, S. H., Halvorsen, K. T., Espeland, S. H., Freitas, C., et Knutsen, J. A. (2021). Restoration of abundance and dynamics of coastal fish and lobster within northern marine protected areas across two decades. *Frontiers in Marine Science*, 8, 674756.
- Mohler, C. L., & Johnson, S.E. (2009). Crop rotation on organic farms, a planning manual. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Ithaca, NY.
- Nicolle, A., Dumas, F., Foveau, A., Foucher, E., & Thiébaud, E. (2013). Modelling larval dispersal of the king scallop (*Pecten maximus*) in the English Channel: examples from the bay of Saint-Brieuc and the bay of Seine. *Ocean Dynamics*, 63(6), 661-678.
- Nicolle, A., Moitié, R., Ogor, J., Dumas, F., Foveau, A., Foucher, E., & Thiébaud, E. (2017). Modelling larval dispersal of *Pecten maximus* in the English Channel: a tool for the spatial management of the stocks. *ICES Journal of Marine Science*, 74(6), 1812-1825.
- Nillos Kleiven, P. J., Espeland, S. H., Olsen, E. M., Abesamis, R. A., Moland, E., & Kleiven, A. R. (2019). Fishing pressure impacts the abundance gradient of European lobsters across the borders of a newly established marine protected area. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1894), 20182455.
- Plagányi, É. E., Skewes, T., Murphy, N., Pascual, R., & Fischer, M. (2015). Crop rotations in the sea: Increasing returns and reducing risk of collapse in sea cucumber fisheries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(21), 6760-6765.
- Priol, E. (1930). La coquille saint-jacques (*pecten maximus*), résumé de nos connaissances pratiques sur ce mollusque. *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes*, 3(2), 143-173.
- Purcell, S. W., Lovatelli, A., Vasconcellos, M., & Ye, Y. (2010). Managing sea cucumber fisheries with an ecosystem approach.
- Purcell, S. W., Eriksson, H., & Byrne, M. (2016). Rotational zoning systems in multi-species sea cucumber fisheries.
- Raoux, A., Dambacher, J. M., Pezy, J. P., Mazé, C., Dauvin, J. C., & Niquil, N. (2018). Assessing cumulative socio-ecological impacts of offshore wind farm development in the Bay of Seine (English Channel). *Marine Policy*, 89, 11-20.
- Rosendo, S., Brown, K., Joubert, A., Jiddawi, N., & Mechisso, M. (2011). A clash of values and approaches: a case study of marine protected area planning in Mozambique. *Ocean & Coastal Management*, 54(1), 55-65.
- Salomon, J. (1985). Courantologie calculée en Baie de Seine. In *La Baie de Seine. Colloque National du CNRS, 24-26 avril 1985*.
- Shah, K. K., Modi, B., Pandey, H. P., Subedi, A., Aryal, G., Pandey, M., & Shrestha, J. (2021). Diversified crop rotation: an approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*.

- Stewart, B. D., & Howarth, L. M. (2016). Quantifying and managing the ecosystem effects of scallop dredge fisheries. In *Developments in Aquaculture and Fisheries Science* (Vol. 40, pp. 585-609). Elsevier.
- St Mary, C. M., Osenberg, C. W., Frazer, T. K., & Lindberg, W. J. (2000). Stage structure, density dependence and the efficacy of marine reserves. *Bulletin of Marine Science*, 66(3), 675-690.
- Sumaila, U. R., Guenette, S., Alder, J., Pollard, D., & Chuenpagdee, R. (1999). *Marine protected areas and managing fished ecosystems*. Chr Michelsen Institute.
- Trouillet, B. (2018). *Les pêches dans la planification spatiale marine au crible des géotechnologies: perspectives critiques sur le «spatial» et «l'environnement»* (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
- Valderrama, D., & Anderson, J. L. (2009). Improving Utilization of the Atlantic Sea Scallop Resource: An Analysis of Rotational Management of Fishing Grounds: Reply. *Land Economics*, 85(2), 383-389.
- Van Der Lee, A., Gillis, D. M., Comeau, P., & Hurley, P. (2013). Fishing the line: catch and effort distribution around the seasonal haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) spawning closure on the Scotian Shelf. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70(7), 973-981.
- Vermard, Y. (2009). *Comportement de pêche et gestion: l'exemple de la pêcherie pélagique du Golfe de Gascogne, Fishing behaviour and management: the Bay of Biscay pelagic fishery* (Doctoral dissertation, AGROCAMPUS OUEST).
- Vigneau, J., Fifas, S., & Foucher, E. (2001). Les campagnes d'évaluation du stock de coquilles Saint-Jacques en Manche orientale: méthodologie et estimation des indices d'abondance.
- Williams, I. D., Walsh, W. J., Miyasaka, A., & Friedlander, A. M. (2006). Effects of rotational closure on coral reef fishes in Waikiki-Diamond head fishery management area, Oahu, Hawaii. *Marine ecology progress series*, 310, 139-149.
- Williams, J. R., & Babcock, R. C. (2005). Assessment of size at maturity and gonad index methods for the scallop *Pecten novaezelandiae*. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 39(4), 851-864.
- Yamasaki, A., & Kuwahara, A. (1989). Preserved area to affect recovery of overfished Zuwai crab stocks off Kyoto Prefecture. In *Proceedings of the International Symposium on King and Tanner crabs* (pp. 575-585).

ANNEXES

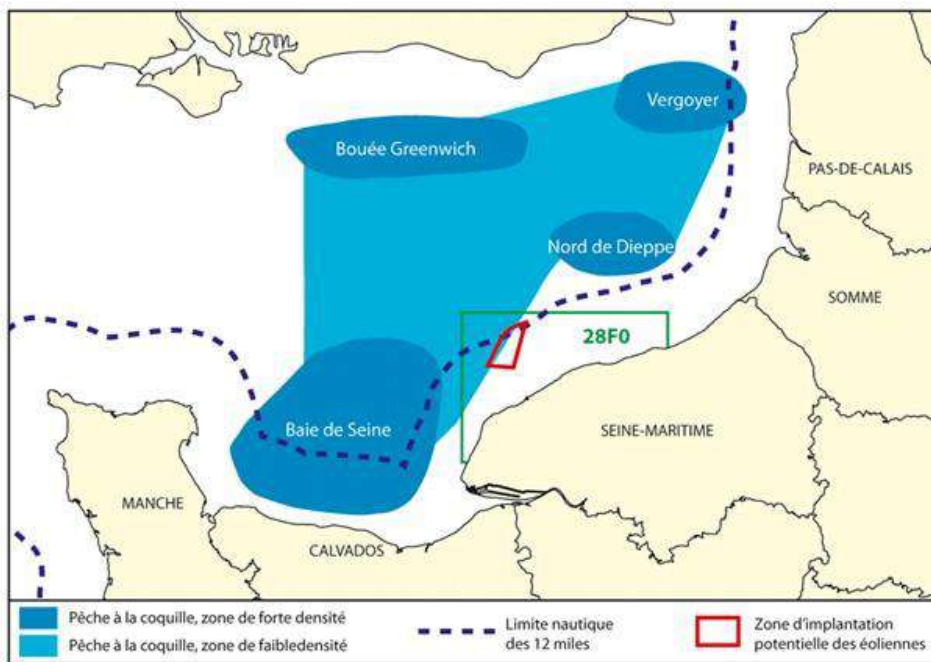
Annexe I : Calendrier des zones sanitaires mises en jachère depuis le 28 novembre 2016

Date	Zone sanitaire en jachère
28 novembre 2016 au 28 février 2017	5
13 novembre 2017 au 1 ^{er} mars 2018	1 et 2
14 novembre 2018 au 28 mars 2019	5
25 novembre 2019 au 16 mars 2020	3
9 novembre 2020 au 28 février 2021	4

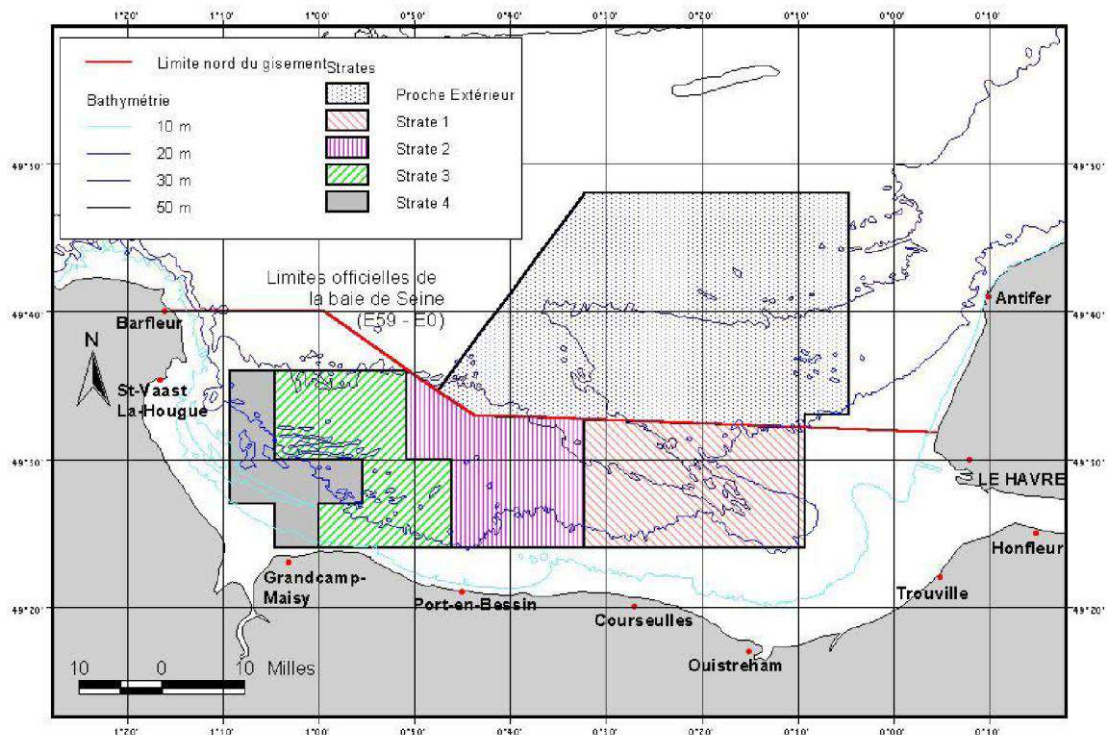
Annexe II : Zones sanitaires de la Baie de Seine jusqu'en 2021



Annexe III : Principaux gisements de CSJ en Manche Est



Annexe IV : Stratification utilisée lors de la campagne COMOR depuis 1982. Depuis 2015, la strate 4 a été supprimée.



« Proche Extérieur » : 1094 km²

Strate 1 : 412 km²

Strate 2 : 302 km²

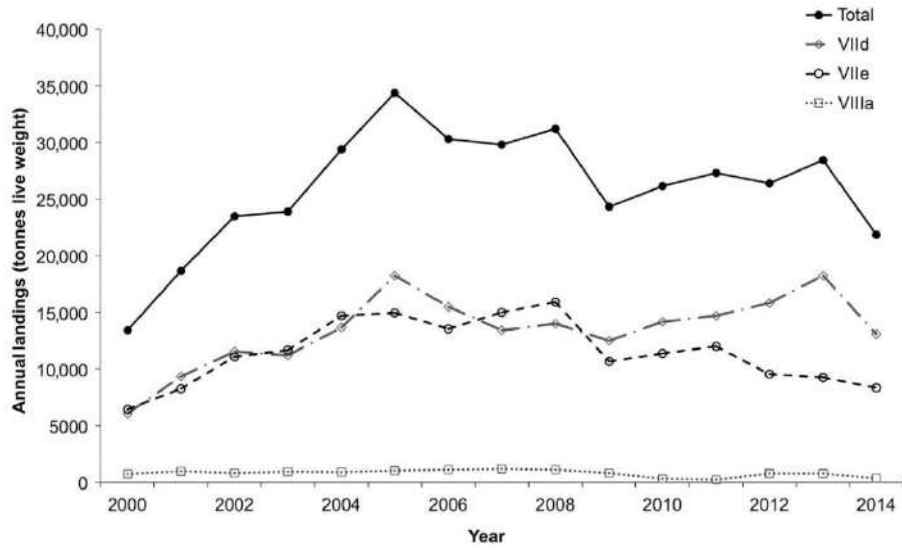
Strate 3 : 309 km²

Strate	Nb de carrés (3'X3')	
	N _{minh}	Nb d'unités d'échantillonnage ue _k
Strate 1	13	120
Strate 2	10	91
Strate 3	11	99
Strate 4	7	54
Extérieur	40	353

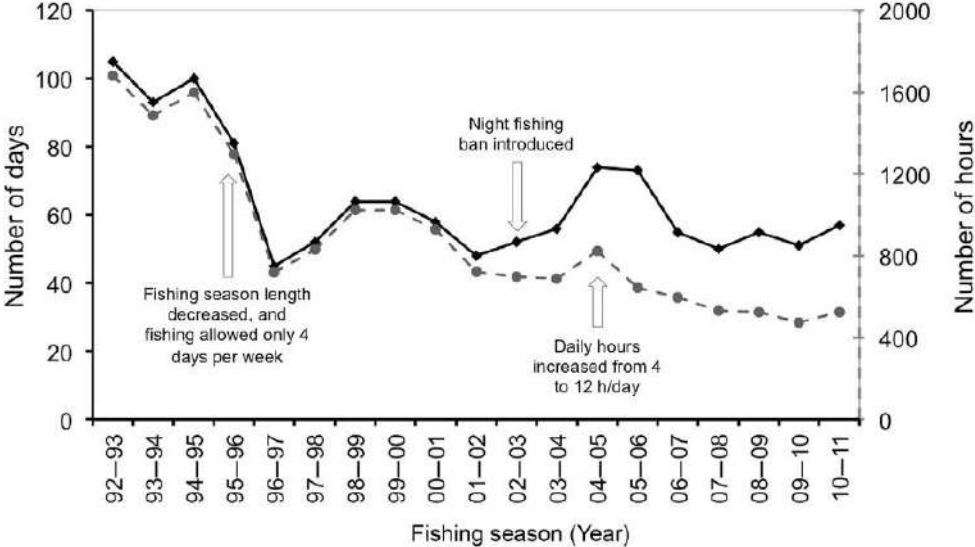
N_{minh} : nombre de carrés statistiques de 3x3 miles par strate ue_k

: nombre de carrés de 1x1 mile par strates.

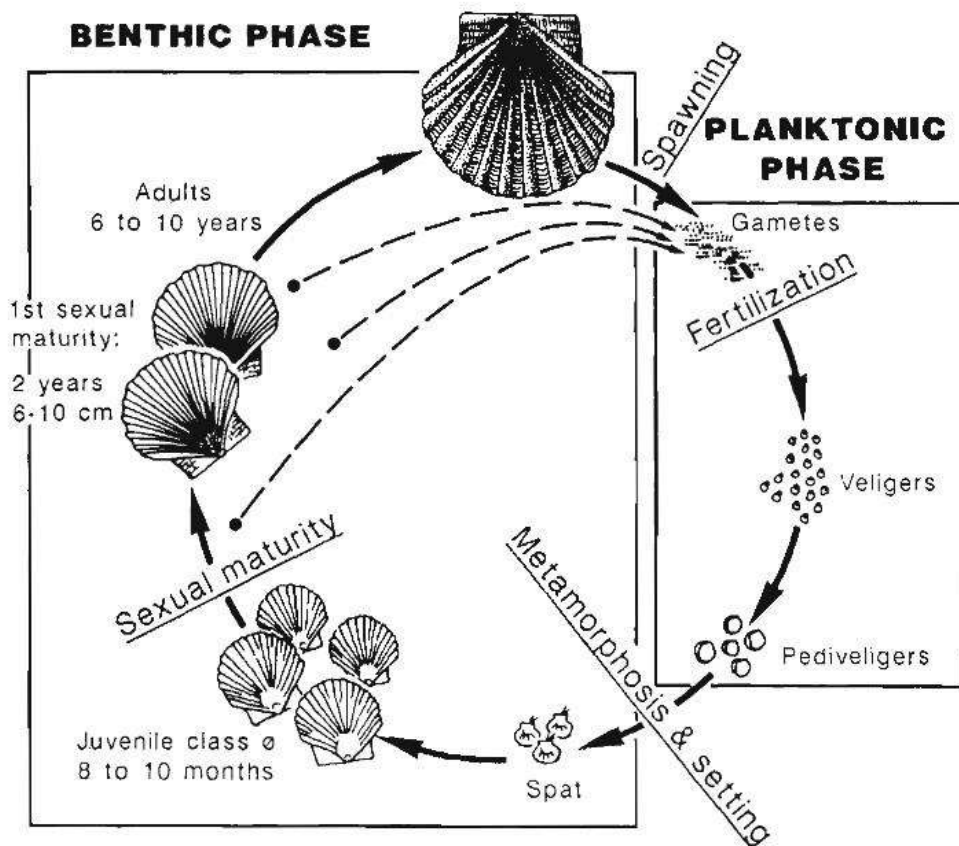
Annexe V : Evolution des captures en Manche Est (zone CIEM VII d) de 2000 à 2014 (Duncan et al., 2016)



Annexe VI : Evolution de l'effort de pêche de 1992 à 2011 en baie de Seine (Duncan et al., 2016)



Annexe VII : Cycle de vie de la coquille Saint Jacques (Devauchelle et al., 1991)



En baie de Seine, la ponte a lieu d' avril à septembre, avec un pic en juillet-août. La vie pélagique, d'environ un mois, se termine de mai à octobre. Le premier hiver correspond à la période où les larves de CSJ se transforment en juvéniles. Le deuxième hiver est la période de maturation des CSJ, où elles passent du stade de juvénile au stade adulte et mature (Duhem, 2013).

Annexe VIII : Description du protocole de la campagne COMOR (Vigneau et al., 2001)

Dans le but de minimiser la variance statistique due à la distribution des CSJ sur le fond et à l'erreur de la mesure de leur abondance, un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié est suivi lors de cette campagne (annexe IX) (Vigneau et al., 2001). Cette stratification a pour but de maintenir la série statistique homogène et de conserver l'identité des zones de production de CSJ de la baie de Seine, en termes de type de fond, de présence de CSJ sur le fond et de stratégie de pêche (Vigneau et al., 2001). En 1982, cinq strates ont été instaurées: une dans la zone du « Proche Extérieur » (EXT), deux en baie de Seine orientale (strates 1 et 2) et deux en baie de Seine occidentale (strates 3 et 4) (annexe IV). Depuis, 2015, la quasi-totalité de la strate 4 a été supprimée et le reste fusionné avec la strate 3. Chaque strate est découpée en carré statistique de 3x3 miles. Pour la campagne, un nombre de traits (N) à effectuer par strate est choisi selon la superficie des strates et l'écart-type du logarithme de l'abondance des CSJ d'âge 1 estimée l'année précédente dans chacune des strates (Vigneau et al., 2001). En effet, la prise

en compte de ce dernier critère, permet d'améliorer l'estimation de l'abondance de CSJ de 2 ans, âge auquel les CSJ entrent dans la pêcherie. Le calcul de ce nombre est exprimé dans la formule suivante :

$$N = N_{\min} + (160 - \sum_{h=1}^{ns} N_{\min} h) \times \left(\frac{\ln(\sigma h)}{\sum_{h=1}^{ns} \ln(\sigma h)} \right)$$

$N_{\min} h$: Nombre minimal de traits pour la strate h ns:

nombre de strates σh

: écart type de l'abondance de CSJ d'âge 1 estimée l'année précédente

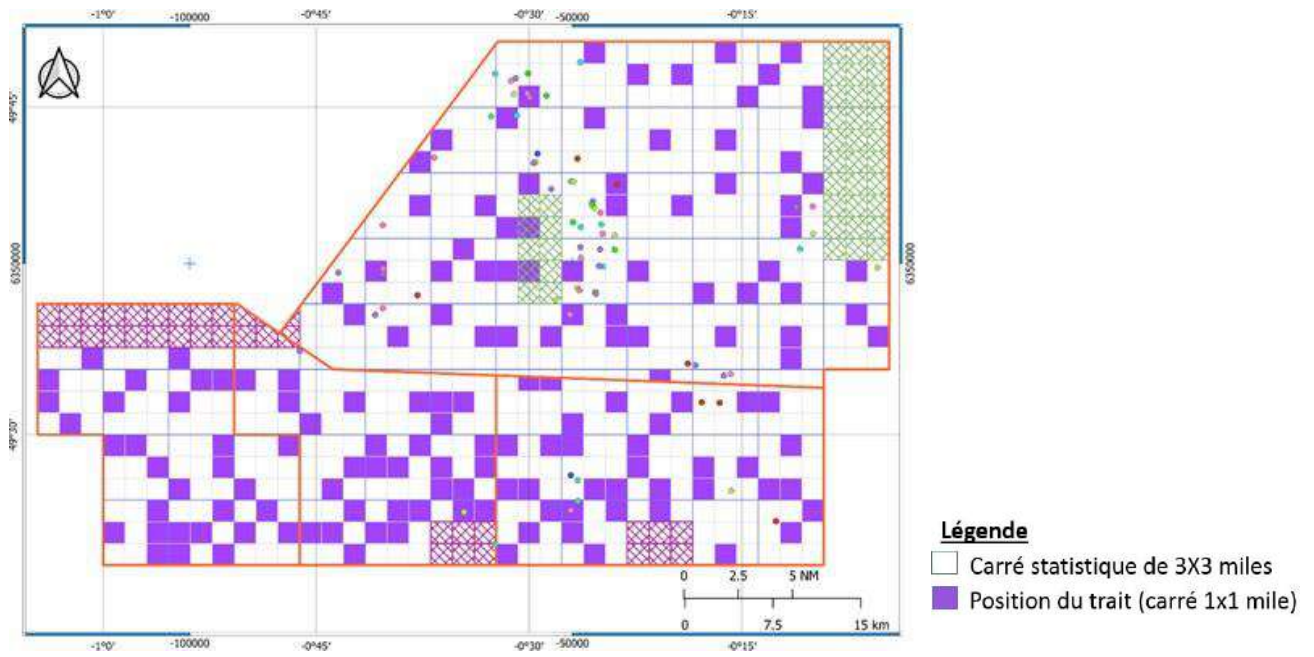
Le nombre de traits (N) sera donc plus élevé dans une strate de plus grande superficie et présentant une plus grande dispersion d'abondance de CSJ d'âge 1. De plus, ce nombre de trait (N) est chaque année différent mais est compris entre un maximum et un minimum. Le maximum correspond au nombre maximum de traits pouvant être effectués dans le temps imparti de la campagne, à raison d'une cadence maximale de 16 par jour (Vigneau et al., 2001). Le minimum (N_{\min}) est égal au nombre de carrés statistiques (3X3 miles) présents dans la strate (annexe IV). Ainsi, dans chaque strate N carrés différents de 1x1 mile sont tirés aléatoirement. Ces carrés correspondent à la position du trait de drague à effectuer lors de la campagne. Au final, 1 à plusieurs traits de dragues peuvent être réalisés par carrés statistiques.

La distance du trait (environ 0,5 miles) est un compromis entre rapidité de colmatage des engins de pêche et qualité de l'estimation de l'abondance de CSJ, qui ne doit pas être limitée à une variable de présence/absence. Deux engins de pêche expérimentaux (drague à volet de 2 m de largeur), de deux sélectivité différentes (50mm et 72 mm) sont utilisés.

Chacune de ces dragues possède deux lames à 15 dents de 11cm de longueur (Vigneau et al., 2001).

A bord de la Thalia, les CSJ pêchées sont pesées (poids de la capture totale) puis triées et comptées par âge : de 1 à 7 ans et plus. Chaque CSJ est ensuite mesurée et chaque classe d'âge est pesée. En cas d'une capture totale supérieure à 15 kg, un sous-échantillonnage est réalisé. La capture totale est, alors, divisée en plusieurs échantillons de poids égaux, et le protocole décrit précédemment est appliqué à un échantillon.

Annexe IX : Plan d'échantillonnage de la campagne COMOR en juillet 2022 (Foucher et Varenne, 2021)



Ifremer.fr

Annexe X : Présentation des données COMOR

Année	Strate	Carré statistique	Trait de chalut	Distance du trait	Type de drague	Age CSJ	Nombre total de CSJ pêchées par âge et par trait	Taille CSJ	Nombre de CSJ pêchées par taille pour chaque âge et chaque trait
1992 à 2021	STR1 STR2 STR3 EXT	A 34 à U28	N° du trait	Environ 0,5 milles	52 ou 72 mm	1 à 7 ans	0 à 5760	45 à 150 mm	0 à 2240

Annexe XI : Correction des données COMOR (Vigneau et al., 2001)

Toutefois, la base de données COMOR comporte des données biaisées ou manquantes dûes à des imprévus lors des campagnes. En effet, en 2019, il y a eu un biais d'échantillonnage, soit une sous-évaluation des données estimées, à cause d'un mauvais réglage de la drague. La drague de 72 mm a donc proportionnellement moins pêché de CSJ matures (2 ans) que la drague 50 mm. Ceci n'est toutefois pas logique car la drague à petit maillage est plus sélective que celle à grand maillage. Une correction a donc été appliquée sur les données de la drague de 72mm des 32 traits concernés par cet incident (Foucher, 2019): où $ncorr$: nombre corrigé de CSJ de 2 ans pêchées× par la drague de 72 mm $ncorr = nobs i$

$nobs$: nombre de CSJ de 2 ans pêchées par la drague de 50 mm $i = 1.36$: facteur correctif correspondant à la différence de nombre de CSJ de 2 ans pêché entre les deux dragues, moyennée sur 2008-2018.

Par ailleurs, la pandémie du covid 19 a contraint la campagne COMOR de 2020. En effet, durant celles-ci, seules les CSJ de la baie de Seine (zones sanitaires 1 à 5) ont pu être recensées (Foucher et Varenne, 2021).

Les données en nombre de CSJ par classe d'âge et par trait de la campagne COMOR sont transformées selon la drague utilisée, afin d'estimer au mieux l'abondance de CSJ présentes en baie de Seine (Vigneau et al 2001). La correction suivante a donc été appliquée :

a) pour la drague de 50 mm : $ne = np \times (1 + e^{\frac{a \cdot (efft - b)}{t}})$

où ne : nombre de CSJ

estimé t : taille des CSJ

pêchées np $a: -0.184$ $b:$

48.52

ne : nombre de CSJ pêchées par la drague de 50 mm

eff : efficacité de la drague 50 mm = 0.45

b) pour les dragues de 72 mm : $ne = np \times (1 + e^{\frac{a \times (eff - b)}{}})$

où : nombre de CSJ estimé

ne : nombre de CSJ pêchées par la drague de 72 mm

npt : taille des CSJ

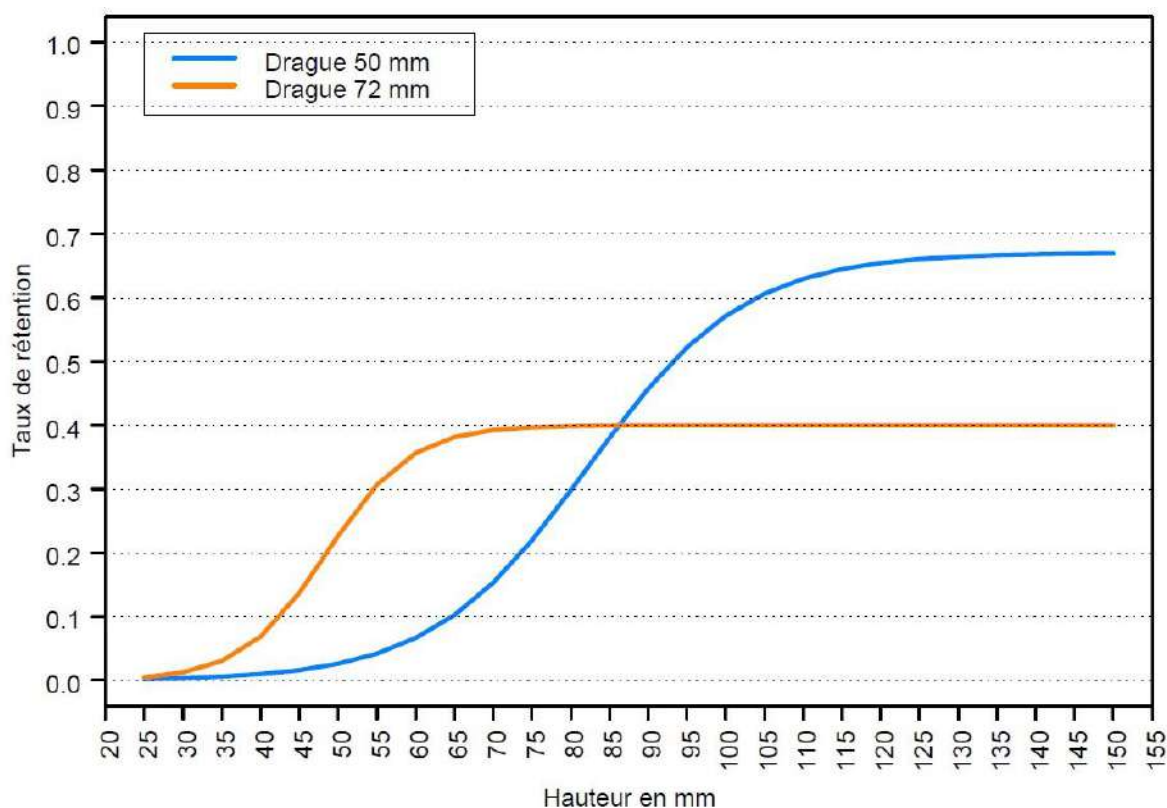
pêchées a: -0.099 b:

82.25

eff : efficacité de la drague 72 mm = 0.67

Les coefficients de ces formules correspondent à ceux des équations des courbes logistiques d'efficacité des types de dragues présentées en annexe X (Vigneau et al.,2001).

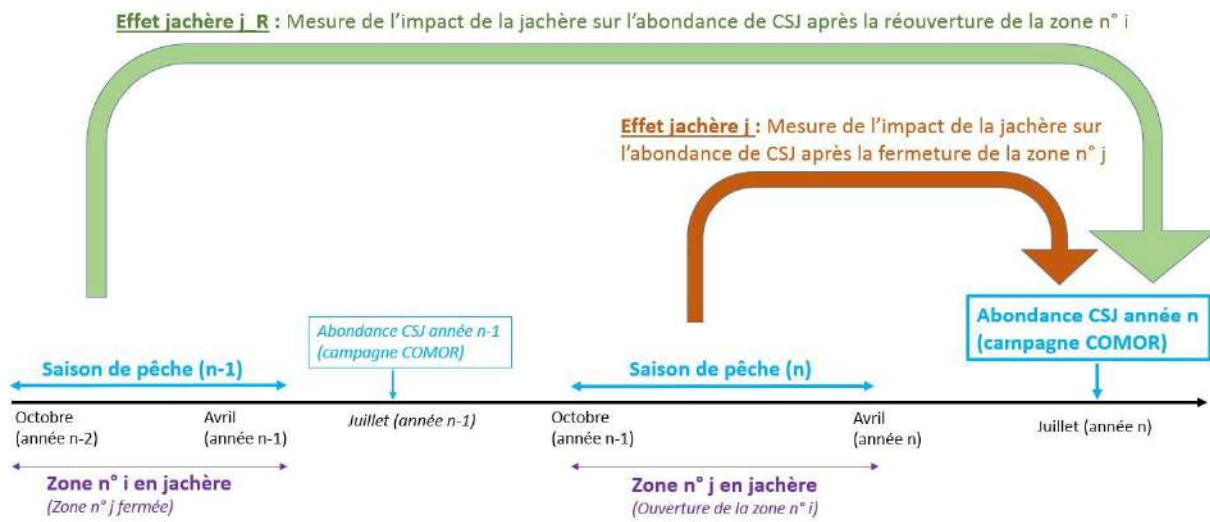
Annexe XII : Courbes logistiques d'efficacité des deux dragues utilisées lors de la campagne COMOR (Vigneau et al., 2001)



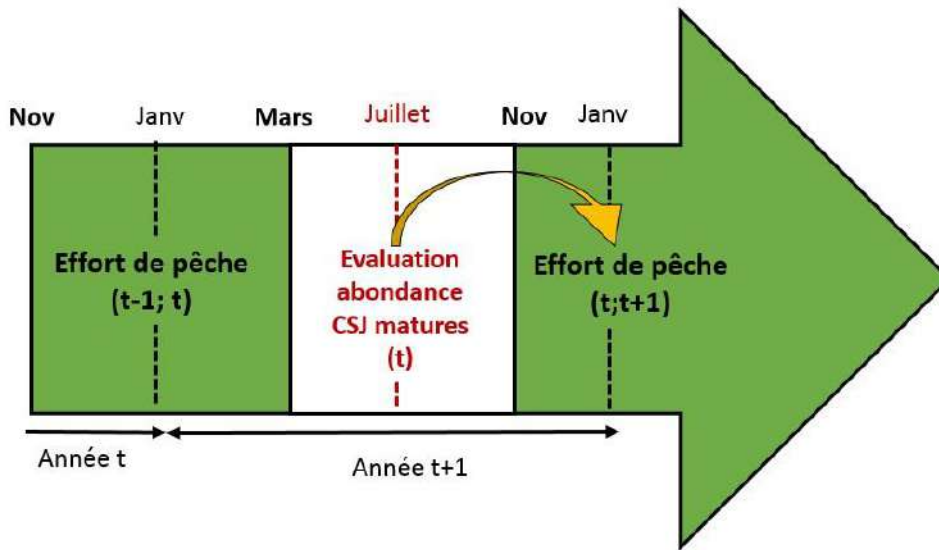
Annexe XIII : Présentation de la base de données VMS


Année	Mois *	Code espèce **	Rectangle CIEM ***	Identité du carré statistique de 3x3 miles	Position ****	Temps en mer (h)	Poids de la capture/an/mois/carré 3X3 (kg)	Valeur de la capture/an/mois/carré 3X3 (€)
2003 à 2021	1 à 3 et 11 à 12	SCE	27E9 28E9	exemple: 1491200015	POLYGON (latitude; longitude ;barycentre)	0.001 à 15,8	0.01 à 9978	0.01 à 9985


Annexe XIV : Présentation de l'étude de l'effet de la jachère rotationnelle sur l'abondance de CSJ de baie de Seine




Annexe XV : Calendrier du suivi de l'effort de pêche et de l'abondance de la population de CSJ en Baie de Seine



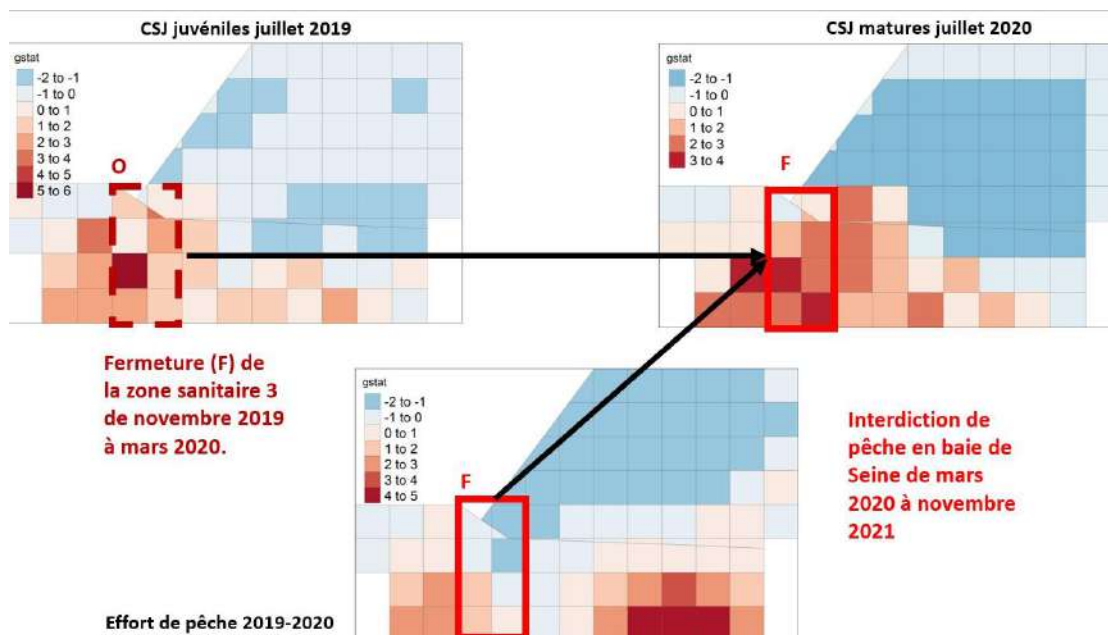
 Période d'ouverture de la baie de Seine à la pêche à la CSJ

 Période de fermeture de la baie de Seine à la pêche à la CSJ

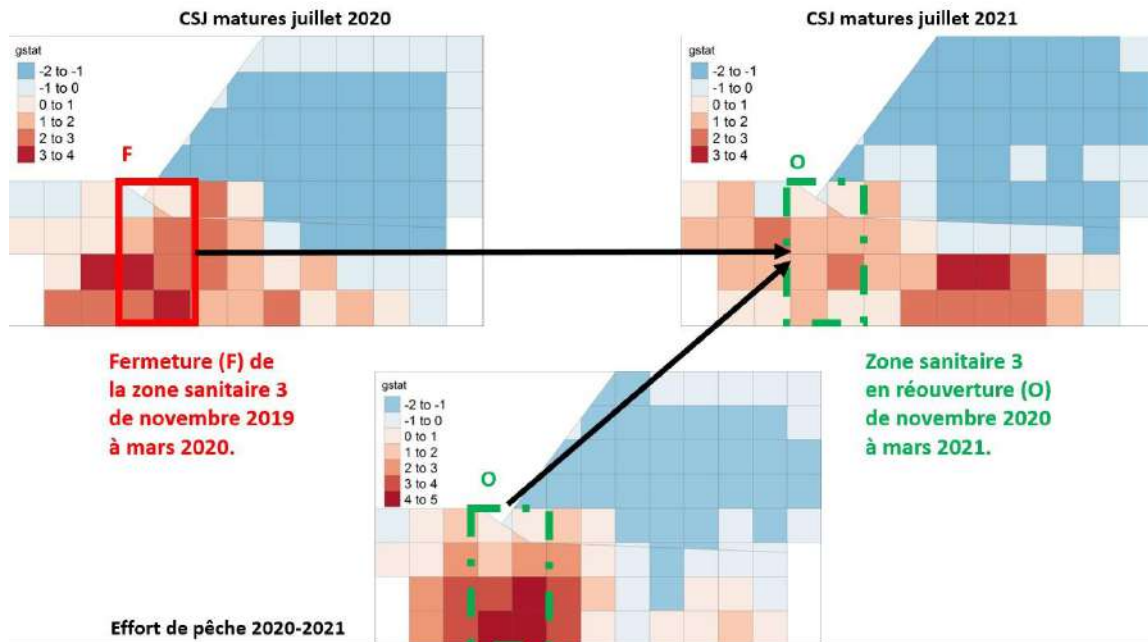
 CSJ matures disponibles pour la saison de pêche qui suit l'évaluation du stock

Annexe XVI : Mise en évidence de l'adéquation entre les temporalités de la jachère rotationnelles, de l'effort de pêche et du cycle de vie de la CSJ. Analyse en points chauds (rouges) et points froids (bleus). Suivi d'une même cohorte sur 2 ans.

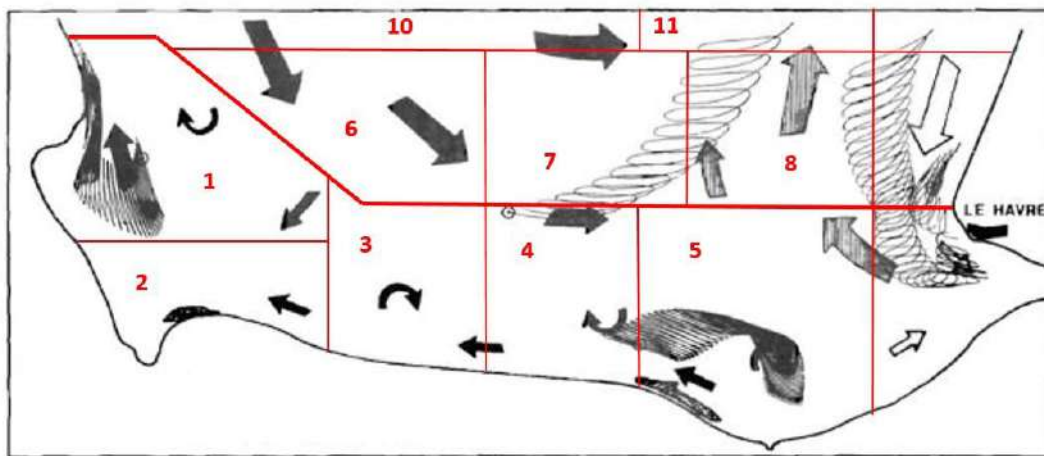
1. La mise en jachère d'une zone, par une absence d'effort de pêche, protège la croissance des juvéniles qui ont plus de chances de devenir matures



2. Après la réouverture d'une zone sanitaire, l'abondance de CSJ matures a diminué, en raison d'un plus fort effort de pêche sur cette zone.



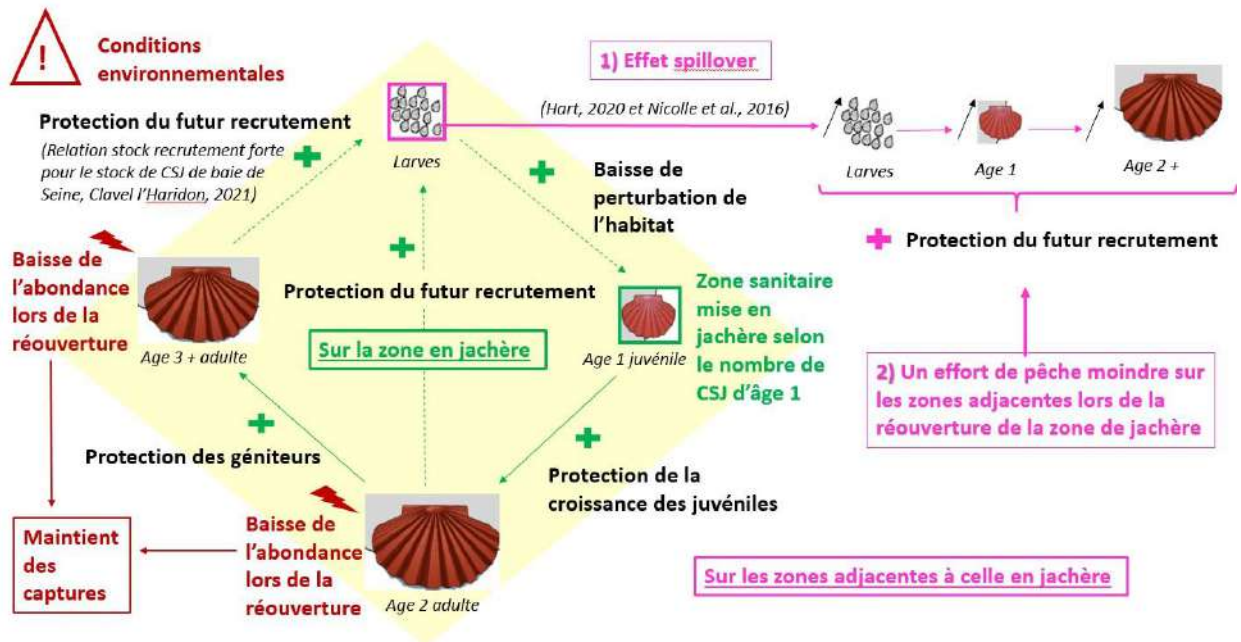
Annexe XVII : Courants en baie de Seine (Salomon, 1985) superposés aux zone sanitaires



Légende :

- Courants de surface
- Courants de fond
- Courants de surface-fond
- Gyres
- Zone sanitaire n° i
- Limite des 12 miles

Annexe XVIII : Impact de la zone rotationnelle de jachère sur le cycle de vie de la CSJ en baie de Seine





Diplôme : Ingénieur(e) agronome
Spécialité : Sciences Halieutiques et Aquacoles (SHA)
Spécialisation / option : Ressources et Ecosystèmes Aquatiques (REA)
Enseignant référent : Etienne RIVOT

Auteur(s) : Jade MOGEON
Date de naissance : 03/04/1999

Organisme d'accueil : Laboratoire Ressources Halieutiques
Centre Manche Mer du Nord - IFREMER

Nb Pages : 40 **Annexe(s) :** 17

Adresse : Avenue du Général de Gaulle, 14520 Port en Bessin
Huppain

Année de soutenance : 2022

Maîtres de stage : Eric FOUCHER et Morgane AMELOT

Titre français : Impact de l'implémentation d'une zone de jachère rotationnelle sur la dynamique de la population de coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*) en baie de Seine

Titre anglais : Impact of the implementation of marine rotational harvest area impacts on the population dynamics of King scallops (*Pecten maximus*)

Résumé : Le 28 novembre 2016, une zone rotationnelle de jachère a été instaurée sur l'un des principaux gisements de coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*) en France, la baie de Seine. Cette mesure de gestion spatialisée de l'effort de pêche vise à améliorer la durabilité de la pêcherie de *P.maximus*. Afin d'estimer les performances et impacts de celle-ci, trois approches statistiques ont été développées. (1) Un modèle statistique de type GLM (General Linear Model) a été formulé pour analyser l'impact de la jachère sur la dynamique de la population de *P.maximus* de baie de Seine. (2) Une étude de la similarité spatio-temporelle des efforts de pêche relatifs a été réalisée grâce à un test de Kruskal-Wallis. (3) Une analyse spatio-temporelle par points chauds de l'effort de pêche et de l'abondance de *P.maximus*, a été menée pour comprendre la corrélation entre ces deux items. Ces analyses ont montré une hausse significative de l'abondance de *P.maximus* de tout âge après l'instauration de la jachère. De plus, il a été constaté que les pêcheurs de *P.maximus* concentrent leur activité sur la zone qui a été précédemment fermée. Enfin, les présences de hotspot d'abondance et d'effort se superposent bien qu'imparfaitement. Ce travail a mis en évidence la pertinence de la jachère vis-à-vis de son objectif de gestion. Cependant, cette mesure a eu des effets contrastés selon les étapes du cycle de vie de *P.maximus* et les changements des stratégies de pêche. Finalement, la hausse des pressions anthropiques en baie de Seine peut amener à questionner les performances futures de cette jachère. (1594 caractères)

Abstract : On November 28th 2016, a marine rotational harvest area was implemented in the bay of Seine (France), one of the main French King scallops (*Pecten maximus*) fishing grounds. This marine spatial management tool aims to improve *P. maximus* fishery sustainability. Three statistical methods were developed in order to evaluate this tool's effects and performances. (1) To analyse the rotational harvest closure effects on *P. maximus* population dynamics in the bay of Seine a GLM (General Linear Model) has been created. (2) A spatio-temporal similarity analysis of the relative fishing efforts has been conducted based on a Kruskal-Wallis test. (3) The spatio-temporal correlation between *P. maximus* abundances and fishing efforts has been determined based on hotspot exploration. These analyses demonstrated a significant increase in every age group of *P. maximus* abundances after the rotational harvest closure implementation. Furthermore, *P. maximus* fishers concentrate their fishing activity on the area previously closed. Finally, abundance and fishing effort hotspots did overlap albeit imperfectly. This work was able to demonstrate the rotational closure area relevance to improve *P. maximus* stock sustainability. However, this measure had contrasted effects depending on *P. maximus* life stage and fishing effort strategy modification. Finally, an increase of the anthropic pressures that impact the bay of Seine might threaten the harvest closure area future performances. (1407 characters)

