



**HAL**  
open science

# Modélisation qualitative des socio-écosystèmes marins en appui à la conservation de la biodiversité

Pierre Reaud

► **To cite this version:**

Pierre Reaud. Modélisation qualitative des socio-écosystèmes marins en appui à la conservation de la biodiversité. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03000993

**HAL Id: dumas-03000993**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03000993>**

Submitted on 12 Nov 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année universitaire : 2019 - 2020

Spécialité : Économie Appliquée :

Agriculture, Mer, Environnement

Spécialisation (et option éventuelle) :

.....

### Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences d'agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

# Modélisation qualitative des socio-écosystèmes marins en appui à la conservation de la biodiversité

Par : Pierre Reaud



© A.Lamoureux - Golfe du Morbihan Vannes tourisme

***Soutenu à Brest le 16/09/2020***

***Devant le jury composé de***

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Président : Carole ROPARS-COLLET

Maître de stage : Pierre SCEMAMA

Enseignant référent : Frédérique ALBAN

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation  
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification  
4.0 France» disponible en ligne

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Guide du mémoire de fin d'études 2017-2018 – validé par le CE plénier du 10 mars 2016

## Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier mes encadrants de stage, Frédérique et Pierre, pour leur soutien et leur disponibilité dans ce contexte si particulier. Si on m'avait dit, avant le stage, que l'approche participative serait entreprise de mon appartement, je n'y aurais pas cru. Mais on l'a fait !

Je remercie toute l'équipe de l'UMR AMURE pour leur accueil, même s'il fut bref (seulement 2 semaines !). Plus particulièrement, je désire remercier Charlène, Manuelle et Johanna, sollicitées à plusieurs reprises durant le stage, pour leurs conseils avisés et leur gentillesse.

Je remercie également Catherine et Elsa pour les nombreuses heures passées à nous expliquer le langage UML et à construire, réfléchir, argumenter et comprendre les diagrammes.

Je désire remercier Martin pour sa bienveillance et son appui précieux pour la mise en œuvre de la modélisation qualitative. Merci pour le temps accordé à m'expliquer le code R et la compréhension des résultats.

Je souhaite remercier l'équipe du Parc naturel régional du golfe du Morbihan, notamment Juliette et Thomas, pour leur connaissance et leur aide essentielles afin de mieux comprendre le golfe.

D'une manière générale, je remercie toutes les personnes ayant participé, de près ou de loin, à l'écriture et la relecture de ce mémoire.

Je veux aussi remercier la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité pour le financement de ce stage.

Enfin, je ne remercie pas la Covid-19 pour m'avoir empêché de me rendre sur le golfe du Morbihan et y découvrir ses paysages remarquables !

# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>I. Le cas d'étude : le golfe du Morbihan .....</b>                                     | <b>3</b>  |
| 1. <i>Une biodiversité remarquable .....</i>  | 3         |
| 2. <i>Une économie tournée vers la mer .....</i>  | 4         |
| 3. <i>Un « millefeuille institutionnel ».....</i>   | 6         |
| <b>II. Approche centrée sur le socio-écosystème .....</b>                                 | <b>9</b>  |
| 1. <i>Méthodes .....</i>  | 9         |
| a) <i>La modélisation qualitative .....</i>   | 9         |
| b) <i>L'analyse des perturbations de long-terme.....</i>                                  | 10        |
| 2. <i>Processus de co-construction du modèle conceptuel.....</i>                          | 11        |
| a) <i>La construction du modèle initial .....</i>   | 11        |
| b) <i>Entretiens avec les parties prenantes .....</i>                                     | 12        |
| c) <i>Synthèse des modèles .....</i>  | 13        |
| 3. <i>Résultats .....</i>   | 15        |
| a) <i>Le modèle complet .....</i>   | 16        |
| b) <i>Les réponses du système face aux perturbations .....</i>                            | 18        |
| <b>III. Approche centrée sur l'utilisateur.....</b>                                       | <b>21</b> |
| 1. <i>Méthodes .....</i>  | 21        |
| a) <i>La modélisation des systèmes multi-agents appliquée aux socio-écosystèmes .....</i> | 21        |
| b) <i>La modélisation avec le langage UML.....</i>  | 22        |
| c) <i>La conception des diagrammes.....</i>   | 23        |
| 2. <i>Résultats .....</i>   | 25        |
| a) <i>Les mesures de gestion .....</i>  | 25        |
| b) <i>Le diagramme de classe.....</i>   | 26        |
| c) <i>Le diagramme d'activité .....</i>   | 28        |
| <b>IV. Discussion .....</b>   | <b>31</b> |
| 1. <i>La modélisation du socio-écosystème .....</i>                                       | 31        |
| 2. <i>Le partage de connaissances .....</i>   | 32        |
| 3. <i>L'enjeu des données .....</i>   | 33        |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>Bibliographie .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>Annexes .....</b>  | <b>41</b> |



## Liste des abréviations

CA : Communauté d'Agglomération

CDPMEM : Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Élevages Marins

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

GM : golfe du Morbihan

PAGD : Plan d'Aménagement et de Gestion Durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques

PNR : Parc Naturel Régional

RNCFS : Réserve Nationale de Chasse et de Faune Sauvage

RNN : Réserve Naturelle Nationale

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SE : Service Écosystémique

SES : Socio-ÉcoSystème

SIAGM : Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Golfe du Morbihan

SMA : Système Multi-Agent

SMLS : Syndicat Mixte du Loc'h et du Sal

SMVM : Schéma de Mise en Valeur de la Mer

UML : Unified Modeling Language

ZMEL : Zone de Mouillages et d'Équipements Légers

ZPS : Zone de Protection Spéciale

ZSC : Zone Spéciale de Conservation

## Table des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1</b> : Les principaux usages en mer dans le golfe du Morbihan.....                                      | 5  |
| <b>Figure 2</b> : Exemple de graphe orienté .....  | 9  |
| <b>Figure 3</b> : Exemple de matrice d'interactions .....  | 9  |
| <b>Figure 4</b> : Modèle complet du socio-écosystème du golfe du Morbihan .....                                    | 17 |
| <b>Figure 5</b> : Synthèse des réponses du système face aux perturbations .....                                    | 19 |
| <b>Figure 6</b> : Chemin de réponse suite à la perturbation d'un habitat .....                                     | 20 |
| <b>Figure 7</b> : Les diagrammes UML utilisées dans cette étude .....  | 24 |
| <b>Figure 8</b> : Diagramme de classe - Instauration d'une jachère sur un spot de pêche à pied<br>récréative ..... | 27 |
| <b>Figure 9</b> : Diagramme d'activité - Activité de pêche à pied récréative de palourde .....                     | 30 |

## Table des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 1</b> : Données socio-économiques du golfe du Morbihan.....                      | 4  |
| <b>Tableau 2</b> : Organes de gestion disposant de l'appellation « golfe du Morbihan »..... | 7  |
| <b>Tableau 3</b> : Entretiens réalisés avec les parties prenantes.....                      | 13 |
| <b>Tableau 4</b> : Tableau représentant la catégorisation des interactions.....             | 14 |
| <b>Tableau 5</b> : Description des modèles conceptuels .....                                | 15 |
| <b>Tableau 6</b> : Signification des variables du modèle complet.....                       | 17 |
| <b>Tableau 7</b> : Description des scénarios présentés dans cette étude.....                | 18 |

## Tables des équations

|   |    |
|---|----|
| <b>Équation 1</b> : Matrice de communauté ..... | 10 |
|---|----|

## Introduction

À l'interface entre la terre et la mer, les espaces côtiers sont confrontés à de multiples enjeux, entre le changement climatique, le développement touristique et la protection de l'environnement. La durabilité de ces territoires peut alors résider dans la conservation des habitats marins. En effet, ces derniers rendent de nombreux bénéfices à l'Homme, appelés services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ceux-ci prennent diverses formes : stockage de carbone, amélioration de la qualité de l'eau, support d'activités récréatives ou apport de nourriture (Mongruel *et al.*, 2019). Toutefois, le niveau de services rendus par les habitats marins peut se voir diminuer par des pressions anthropiques (Halpern *et al.*, 2007). Leur état de conservation est considéré comme défavorable pour plusieurs d'entre eux et la tendance ne semble pas s'améliorer (UMS Patrinat, 2019). Étant donné la diversité des habitats marins, cette étude se concentre sur les herbiers de zostères et les vasières, prédominants dans le golfe du Morbihan. Afin d'appréhender les interdépendances existantes entre les activités anthropiques et ces habitats, le socio-écosystème se révèle être une échelle d'analyse pertinente.

D'après Schulze *et al.* (2017), un socio-écosystème représente le couplage étroit entre les systèmes sociaux et écologiques. Leur étude permet alors d'améliorer les connaissances sur les liens existants entre l'Homme et la nature. Les interactions entre ces systèmes sont en constante évolution en raison de rétroactions et de facteurs internes ou externes. Ces interactions se produisent à différentes échelles temporelles et spatiales, faisant des socio-écosystèmes des systèmes adaptatifs et dynamiques (Holland, 1995). Ces derniers représentent alors les liens entre des composantes multiples (physiques, économiques, biologiques, etc.) nécessitant d'adopter une approche interdisciplinaire. Pour contribuer à la gestion durable des ressources et assurer l'intégrité des écosystèmes, il est donc essentiel de comprendre la dynamique des socio-écosystèmes. Pour cela, il peut être utile de recourir à une ou plusieurs formes de modélisation.

En représentant la réalité de manière simplifiée, un modèle permet de conceptualiser des systèmes complexes (Booch, Rumbaugh and Jacobson, 1998). Celui-ci s'intègre dans une approche de modélisation, pouvant prendre des formes variées. Le choix de la méthode à adopter dépend de plusieurs facteurs : données disponibles, échelle d'étude ou résultats attendus. Étant donné la complexité des interactions au sein d'un socio-écosystème, la disponibilité des données est hétérogène et le territoire d'étude vaste. Ce travail mobilise alors une approche qualitative de la modélisation pour répondre à ces enjeux. Pour appréhender au mieux la conservation des habitats marins, le problème peut être analysé selon différents points de vue. Ainsi, cette étude s'appuie sur deux approches, une centrée sur le socio-écosystème et une centrée sur l'utilisateur.

La première approche vise à réfléchir à la conservation des habitats marins en regardant le socio-écosystème dans son ensemble. Cette vision holistique permet de révéler et d'étudier les interactions entre les différentes composantes du système. L'approche se fonde sur la modélisation qualitative, développée par (Puccia and Levins, 1985). Les modèles se composent de variables reliées entre elles par des liens positifs ou négatifs, sans que les processus soient quantifiés. En analysant mathématiquement ces liens, la modélisation qualitative teste ainsi la capacité de résilience du système face à des perturbations (Marzloff *et al.*, 2016). Ces dernières, pensées comme des scénarios, apportent des connaissances quant aux pressions subies par les habitats marins.

La seconde approche tend à analyser le socio-système à l'échelle d'un usager du golfe du Morbihan. Elle se base sur la modélisation des systèmes multi-agent, permettant d'étudier les interactions entre divers agents d'un système complexe (Janssen, 2002). Les systèmes multi-agent constituent l'étape finale du processus de modélisation. Ils doivent être spécifiés par des modèles conceptuels représentant les actions effectuées par les agents. Dans cette étude, les modèles s'intéressent aux usagers du golfe du Morbihan pour représenter leur comportement face à l'instauration de mesures de gestion pour préserver les habitats marins. Malgré leurs différences, ces approches visent un objectif commun : faciliter le partage des discours autour d'un problème en formulant un questionnement (Varenne and Silberstein, 2013). Ainsi, l'adoption d'une approche participative apparaît pertinente pour construire les modèles.

La priorisation des aménités environnementales à préserver diffère selon l'acteur considéré (de Juan, Gelcich and Fernandez, 2017). Ainsi, les actions à mener pour conserver les habitats marins peuvent être perçues de manière hétérogène au sein du socio-écosystème. L'inclusion des parties prenantes dans la construction du modèle permet alors d'en améliorer la précision tout en favorisant l'acceptabilité sociale des futurs résultats (Hare, 2011). En ce sens, la construction des modèles présentés dans cette étude se fonde sur la démarche de modélisation d'accompagnement. Celle-ci vise à produire des connaissances sur les systèmes complexes en se fondant sur le partage de connaissances entre les chercheurs et les acteurs locaux (ComMod, 2005). Le modèle se construit de manière itérative en simulant les perceptions de chaque partie prenante et s'insère dans un processus collectif de décision favorisant la médiation (ComMod, 2005). Cette démarche permet alors d'améliorer la compréhension des interactions au sein du SES.

Par conséquent, cette étude cherche à répondre à la problématique suivante : **Est-il préférable d'adopter une démarche de modélisation centrée sur le socio-écosystème ou centrée sur l'utilisateur pour améliorer la conservation des habitats marins dans le Golfe du Morbihan ?**

Afin de répondre à cette question, le Golfe du Morbihan, en tant que territoire d'étude, sera présenté dans une première partie. Dans une deuxième partie, l'approche de modélisation centrée sur le SES sera présentée ainsi que les résultats obtenus. L'approche centrée sur l'utilisateur sera exposée dans une troisième partie. Enfin, les deux approches seront comparées dans une quatrième et dernière partie.

# I. Le cas d'étude : le golfe du Morbihan

## 1. Une biodiversité remarquable

Le golfe du Morbihan (GM) est une mer intérieure située entre la baie de Quiberon et l'estuaire de la Vilaine, au sud de la Bretagne, sur la façade Atlantique. Le golfe forme une ria de 13000 hectares avec plus d'une quarantaine d'îles, dont deux sont des communes (l'Île d'Arz et l'Île aux Moines). La particularité du golfe réside également dans sa diversité de paysages. La partie occidentale, soumise à de forts courants, présente des sédiments grossiers et des fonds rocheux permettant la formation de récifs. Dans la partie orientale, caractérisée par un faible renouvellement des eaux, les sédiments envasés sont majoritaires, avec la présence de sables fins et de criques peu profondes. A l'extérieur du GM, des récifs sont présents, ainsi que d'importants bancs de Maërl (Cosson, Mézac and Picard, 2013). Le golfe représente également une zone d'intérêt ornithologique, avec la présence de 50 000 à 100 000 oiseaux (migrateurs et hivernants) chaque hiver (Cosson, Mézac and Picard, 2013). Leur présence s'explique par les nombreuses îles et marais, favorisant la nidification et l'alimentation. La faune marine est également variée. Cette biodiversité unique s'explique notamment par la présence d'habitats marins remarquables au sens de la directive « Habitats, Faune, Flore » (Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992), à l'image des vasières et des herbiers de zostères.

La zostère est une plante marine présente sur le littoral français. Le GM abrite deux espèces de zostères : la zostère marine (*Zostera Marina*) et la zostère naine (*Zostera Noltii*). La zostère marine se développe en zone subtidale, restant constamment immergée et dispose de feuilles comprises entre 30 cm et 1,2 m (Angst *et al.*, 2014). La zostère naine possède des feuilles plus petites (environ 15 cm) et colonise la zone intertidale. Les zostères sont des plantes pérennes (ou vivaces), mais la zostère naine perd ses feuilles en automne. Elles repoussent au printemps à partir des rhizomes. La reproduction de la zostère peut se faire par multiplication à partir des rhizomes ou par la dispersion de graines. En se multipliant, les zostères forment alors un herbier, considéré comme un habitat marin.

La zostère (marine et naine) se situe en majorité dans la partie orientale du bassin, constituée de sédiments vaseux (Denis, 1980). Leur superficie fluctue selon les années. En 1960, les herbiers de zostères marine étaient de 95 ha, atteignant à 1480 ha entre 1968 et 1972 pour arriver à 1078 ha en 2007. Les herbiers de zostères naine sont en décroissance, passant de 1240 ha en 1960 à 723 ha en 2007 (Angst *et al.*, 2014). Il a été observé une variation de leur distribution géographique dans le temps. 12 « cœurs d'herbiers », i.e. espaces colonisés de façon pérenne, ont été dénombrés pour la zostère naine, contre 7 pour la zostère marine (Urien *et al.*, 2015). Ce phénomène se traduit par des zones non colonisées par les herbiers dans le GM, mais qui pourraient le devenir si la qualité de l'eau ou la luminosité évoluent.

L'autre habitat marin majeur du bassin oriental est la vasière. Cette dernière se développe en zone intertidale, dans des secteurs protégés des vagues et de la houle, dans des estuaires ou des baies peu profondes. La vasière peut abriter des herbiers de zostères ou être « nue ». Elle se caractérise par une productivité benthique forte, notamment grâce au microphytobenthos, une micro-algue se développant à la surface de la vase à marée basse (Pardo *et al.*, 2017). Cette production biologique permet ainsi le développement d'une faune variée. Les vasières jouent également un rôle dans l'amélioration de la qualité de l'eau, à travers le stockage de matières en suspension et la dénitrification (GIP Seine-Aval, 2016). Le GM dispose de grandes étendues de vasières, surtout dans la partie est, pour une surface de 1 860 ha (Cosson, Mézac and Picard, 2013).

Les fonctionnalités écologiques associées à ces habitats peuvent favoriser le développement d'activités humaines, grâce à la production de services écosystémiques. L'étude de ces deniers permet de comprendre comment l'économie locale dépend de l'environnement marin.

## 2. Une économie tournée vers la mer

Historiquement, le secteur primaire occupe une place importante dans le GM et ses alentours. L'agriculture autour du bassin est orientée vers le littoral, à la faveur des prés-salés offrant des terres fertiles et propices à l'élevage, majoritairement bovin. 526 entreprises étaient comptabilisées autour du golfe en 2017 (voir tableau 1).

*Tableau 1 : Données socio-économiques du golfe du Morbihan*

| Secteur                    | Donnée   | Année | Source         |
|----------------------------|--|-------|----------------|
| <i>Général</i>             |  |       |                |
| Emploi                     | 64 402 emplois                                   | 2014  | (DDTM56, 2019) |
| Population                 | 123 708 habitants                                | 2015  | (DDTM56, 2019) |
| <i>Accueil touristique</i> |  |       |                |
| Hébergement marchand       | 34 710 lits touristiques                         | 2017  | (DDTM56, 2019) |
| Résidences secondaires     | 105 860 lits touristiques                        | 2017  | (DDTM56, 2019) |
| <i>Activités primaires</i> |  |       |                |
| Agriculture                | 526 entreprises*                                 | 2017  | (CA 56, 2019)  |
| Conchyliculture            | 1 761 concessions**                              | 2018  | (DDTM56, 2019) |
| Pêche à pied               | 170 pêcheurs                                     | 2018  | (DDTM56, 2019) |
| Pêche embarquée            | 88 marins  | 2014  | (DDTM56, 2019) |
| <i>Activités nautiques</i> |  |       |                |
| Kayak de mer               | 300 licenciés                                    | 2017  | (DDTM56, 2019) |
| Plaisance                  | 8 000 mouillages                                 | /     | (DDTM56, 2019) |
| Transport de passagers     | 600 000 passages annuels (vers l'île aux Moines) | 2017  | (DDTM56, 2019) |
| Voile légère               | 4 500 licenciés                                  | 2017  | (DDTM56, 2019) |
| <i>Loisirs</i>             |  |       |                |
| Pêche à pied récréative    | 737 pêcheurs (en une marée)                      | 2013  | (DDTM56, 2019) |
| Plongée sous-marine        | 25 000 plongées par an                           | 2017  | (DDTM56, 2019) |
| Randonnée                  | 71 km de sentier côtier                          | /     | (DDTM56, 2019) |

\* : sur le territoire de la communauté d'agglomération

\*\* : sur le bassin du GM et la rivière d'Auray

L'activité de pêche professionnelle majoritaire est la pêche à pied avec 170 pêcheurs. La pêche à pied vise des ressources halieutiques variées, mais l'espèce emblématique reste la palourde. En effet, la pêche à pied de palourde est inscrite au patrimoine culturel immatériel depuis 2019 (Lacombe, 2019). La pêche embarquée dans le GM se caractérise par une petite



pêche côtière pratiquant plusieurs métiers. Toutefois, une diminution de l'activité de pêche embarquée est observée depuis plusieurs années, contrairement à la pêche à pied professionnelle, relativement stable (DDTM56, 2019).

Cependant, l'activité primaire emblématique du GM est la conchyliculture, présente depuis 1860 (DDTM56, 2006). L'activité est représentée en majorité par l'ostréiculture et se pratique surtout dans les parties occidentale et centrale du GM sur des tables surélevées. 11,5% du bassin intérieur était exploité en 2019, concentrant 1 671 concessions (voir tableau 1). Toutefois, la surface de concession a diminué de 8% entre 2006 et 2018 dans le golfe, phénomène accentué par une concentration des moyens de production (DDTM56, 2019). Comme le montre la figure 1, ces activités primaires font également face à d'autres usages marins dans le GM.

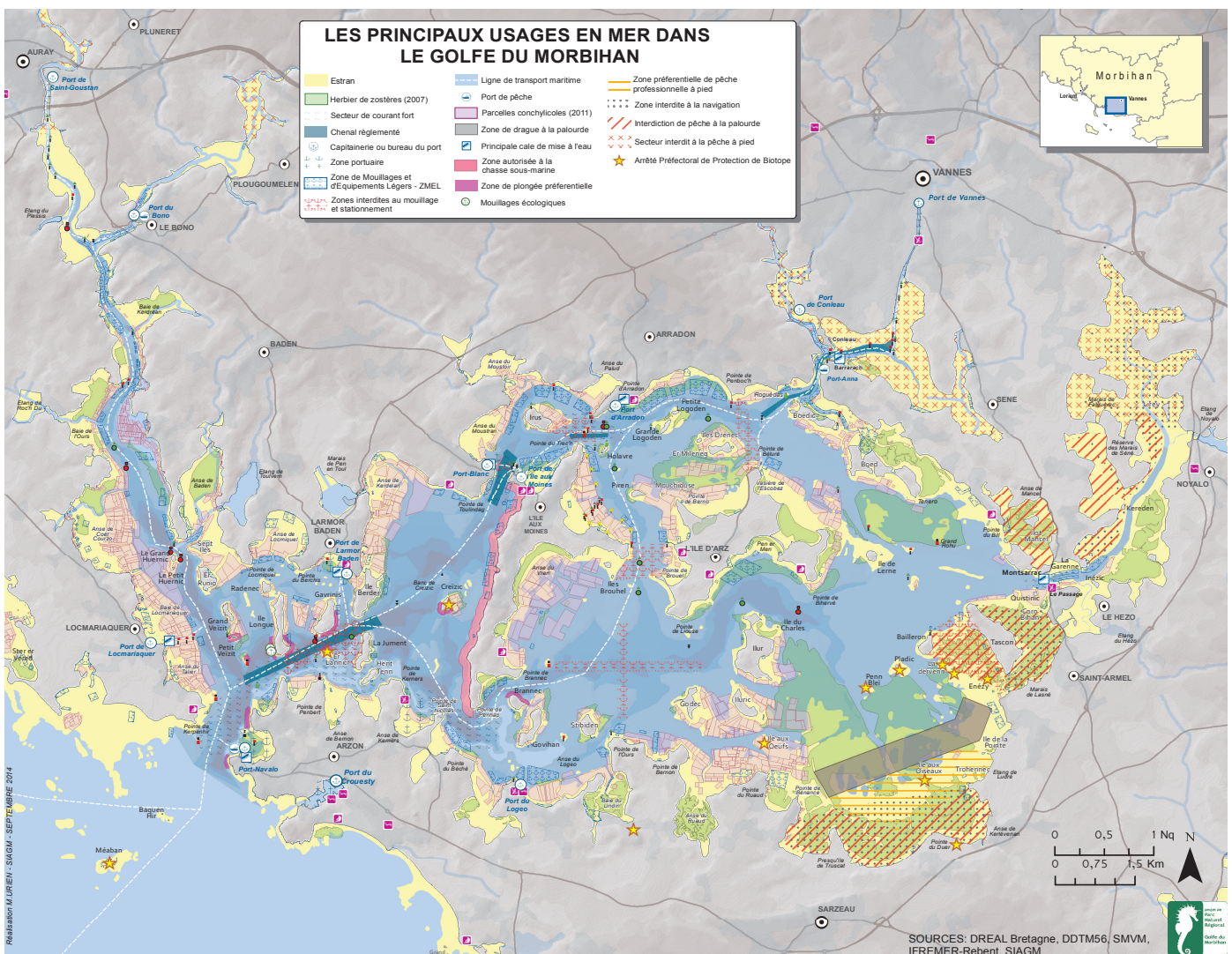


Figure 1 : Les principaux usages en mer dans le golfe du Morbihan (Source : Urien, 2014)

Protégé du vent et de la houle, le GM offre notamment une zone idéale au développement des activités nautiques. En effet, le plan d'eau est fréquenté toute l'année par les plaisanciers, grâce aux 8 000 mouillages présents dans le golfe. En dehors de la plaisance, les activités nautiques sont variées, entre le kayak, la voile ou le paddle, pratiqués par des centaines de licenciés (voir tableau 1). Étant donné les multiples îles, le transport (maritime et de passagers) est un usage important dans le GM. Le transport de passagers se développe depuis plusieurs

années, proposant des croisières ou des liaisons pour rejoindre certaines îles, avec des milliers de passage par an. De fait, ces activités ont nécessité le développement des infrastructures portuaires. Cinq ports existent actuellement au sein du GM (Cosson, Mézac and Picard, 2013).

Le paysage unique du GM a également permis le développement du tourisme, avec l'accueil de 2 millions de touristes chaque année (DDTM56, 2019). Avec 123 708 habitants en 2015, le golfe peut voir sa population doubler avec un accueil touristique important (voir tableau 1). Le nombre de résidences secondaires dépassent même le nombre de résidences principales dans certaines communes.

L'offre touristique se fonde également sur des activités de loisirs. Grâce aux 71 kilomètres de sentier côtier situé sur l'itinéraire du GR34, la randonnée et la promenade représentent les premières activités touristiques du golfe (DDTM56, 2006). En lien direct avec les ressources naturelles, la chasse est présente dans le GM, favorisée par la richesse de l'avifaune, ainsi que la pêche récréative, embarquée et à pied. Cette dernière se pratique surtout lors des grandes marées, sur les vasières ou les champs de blocs, présents dans la partie orientale du bassin. La plongée sous-marine peut se pratiquer à l'entrée du GM, autour de l'île Longue (voir figure 1) où se trouvent des champs de gorgones.

Le bassin du GM apparaît alors comme une zone aux multiples usages prenant place dans un espace réduit (voir figure 1), révélant plusieurs enjeux de gestion. Premièrement, le caractère fermé du GM couplé au développement des loisirs touristiques favorise la densification, plus ou moins ponctuelle, du plan d'eau. Ce phénomène peut ainsi engendrer une congestion des usagers, contribuant à l'émergence de conflits d'usage (Beuret, 2019). L'offre touristique diversifiée induit une fréquentation saisonnière importante sur l'espace terrestre, nécessitant une gestion des eaux usées plus importante. Une mauvaise qualité de l'eau dans un milieu fermé comme le GM peut impacter l'environnement et ceux qui en dépendent, tels que les ostréiculteurs (Cléro, 2020). Avec la présence d'habitats marins sensibles, comme les herbiers de zostères et les vasières, un enjeu autour de la préservation de la biodiversité peut apparaître. Ces différents enjeux nécessitent de développer une multiplicité d'outils de régulation, afin d'assurer la durabilité du socio-écosystème et la réduction des conflits (Cadoret, 2011).

### 3. Un « millefeuille institutionnel »

Pour protéger la biodiversité du GM, plusieurs outils réglementaires ont été mis en place. Il existe plusieurs Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique ainsi que de nombreux arrêtés de protection de biotope, notamment pour préserver l'avifaune des nuisances. Zone Ramsar, pour les zones humides. Deux réserves ont été créées, une Réserve Naturelle Nationale (RNN) des Marais de Séné de 400 hectares et une Réserve Nationale de Chasse et de Faune Sauvage (RNCFS) de 7 359 hectares portant sur le bassin du GM (voir tableau 2). À cela s'ajoutent deux sites Natura 2000, une Zone de Protection Spéciale (ZPS) pour les oiseaux (au titre de la Directive 79/409/CEE du Conseil du 2 avril 1979) créée en 2007 et une Zone Spéciale de Conservation (ZSC) pour les habitats, la faune et la flore (au titre de la Directive « Habitat » 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992) créée en 2008 et obligent, entre autres, les porteurs de projet dans ces zones à réaliser des études d'incidence sur l'environnement (Cosson, Mézac and Picard, 2013). La ZPS est animée par l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), alors que la ZSC est animée par l'équipe du PNR du GM. Ces deux sites prennent place sur les espace terrestres et marins (voir tableau 2).



*Tableau 2 : Organes de gestion disposant de l'appellation « golfe du Morbihan »*

| Organe de gestion                               | Territoire concerné |           | Nombre de communes | Source   |
|---|---------------------|-----------|--------------------|--|
|   | Terrestre           | Maritime  |                    |  |
| PNR du Golfe du Morbihan                        | 70 347 ha           | 17 000 ha | 33                 | (PNR GM, s.d.)                                   |
| ZSC « Golfe du Morbihan – côte ouest de Rhuys » | 4 740 ha            | 15 869 ha | 22                 | (PNR GM, s.d.)                                   |
| ZPS « Golfe du Morbihan »                       | 855 ha              | 8 647 ha  | 13                 | (PNR GM, s.d.)                                   |
| SAGE « Golfe du Morbihan et Ria d'Étel »        | 126 600 ha          | /         | 66                 | (SMLS, 2020)                                     |
| CA « Golfe du Morbihan – Vannes Agglomération » | 80 700 ha           | /         | 34                 | (Golfe du Morbihan - Vannes agglomération, 2020) |
| RNCFS du Golfe du Morbihan                      | /                   | 7 359 ha  | 11                 | (ONCFS, 2017)                                    |
| SMVM du Golfe du Morbihan                       | /                   | 13 000 ha | 20                 | (DDTM56, 2006)                                   |

Le GM fait partie d'une communauté d'agglomération (CA) « Golfe du Morbihan – Vannes Agglomération », disposant alors d'un Plan Local d'Urbanisme pour gérer l'aménagement du territoire. Au niveau de la gestion de l'eau, il existe un Schéma d'Aménagement et de Gestion en Eau (SAGE) « Golfe du Morbihan et Ria d'Étel ». Ces deux organes de gestion ne concernent pas la partie maritime du GM (voir tableau 2). Celui-ci est aussi classé comme un Site Inscrit depuis 1965 et dispose de plusieurs Sites Classés, afin de préserver les intérêts paysagers, historiques ou artistiques (Cosson, Mézac and Picard, 2013). De plus, le GM fait partie des eaux intérieures, intégrant le Domaine Public Maritime. L'État y définit des orientations de gestion pour les activités à enjeux ou la stratégie de gestion des constructions (DDTM56, 2006).

Plusieurs outils réglementaires sont donc en place dans le GM. Il peut être difficile d'avoir conscience des multiples enjeux et contraintes pour les acteurs du territoire. Un Schéma de Mise en Valeur de la Mer (SMVM) a alors été instauré en 2006 afin d'appréhender, au sein d'un même document, ces disparités réglementaires et de limiter les conflits d'usage. Il s'agit d'un texte réglementaire de planification. Ce texte a le pouvoir d'interdire des activités, par exemple le kite surf dans le GM pour limiter les nuisances pouvant affecter les oiseaux. Le SMVM s'applique seulement aux communes disposant d'un littoral sur le bassin du GM, soit 20 communes (voir tableau 2). Depuis 2014, la protection de l'environnement est renforcée par la création du Parc Naturel Régional (PNR) du golfe du Morbihan. Contrairement au SMVM, le PNR peut mener des actions sur l'espace terrestre comme sur l'espace maritime. Les actions en mer sont réalisées dans le cadre de la gestion du site Natura 2000 (ZSC). De plus, le PNR se caractérise par un territoire d'action plus large que celui du SMVM, 33 communes ayant adhéré à la charte (voir tableau 2). Cette dernière vise à assurer le développement économique de la zone en préservant les patrimoines culturel et vivant (SIAGM, 2014). La concertation entre les acteurs du GM est à l'origine de la création du Parc et continue lors des actions à entreprendre. Le SMVM et le PNR servent alors de lieux de dialogue entre les parties prenantes, afin de comprendre et réduire les conflits.

Le GM se révèle alors comme un « millefeuille institutionnel » où les instruments de régulation se superposent. Comme le montre le tableau 2, l'appellation « Golfe du Morbihan » est référencée dans plusieurs organes de gestion. Il peut faire référence au site du PNR, à la CA, ou au SMVM, avec des différences notables en termes de zones d'intervention. Le territoire du PNR est composé de 33 communes, équivalent en nombre aux 34 de la CA. Or, cette dernière ne peut intervenir sur l'espace maritime, contrairement au PNR. Le SMVM concerne moins de communes, mais intervient sur la totalité du bassin du GM, au contraire de la RNCFS. Ainsi, cela implique des disparités de pouvoir de gestion. Pour la qualité de l'eau, le SMVM ne peut ainsi réglementer que le plan d'eau, par conséquent les mesures liées au bassin versant sont établies dans un autre document, le SAGE. Dans cette étude, le terme « golfe du Morbihan » se réfère au bassin intérieur.

Cette superposition d'instruments de réglementation couplée à des interactions perpétuelles entre les usages et l'environnement marin font du GM un espace complexe à gérer. L'étude du socio-écosystème (SES) permet alors d'appréhender cette complexité et la diversité des enjeux induits. La modélisation peut alors être utilisée pour comprendre le fonctionnement de ce SES.

## II. Approche centrée sur le socio-écosystème

Pour cette étude, deux approches de modélisation complémentaires ont été mises en œuvre et ont été pensées à travers une approche participative tout au long de la construction des modèles. Cette première approche vise à étudier les interactions entre les habitats marins et les usages dans le GM en mobilisant la modélisation qualitative. Elle s'intéresse à l'ensemble du SES du GM et mobilise des catégories d'analyse relativement agrégées.

### 1. Méthodes

#### a) La modélisation qualitative

La modélisation qualitative, développée par (Puccia and Levins, 1985), vise à comprendre le fonctionnement des systèmes complexes tels que les socio-écosystèmes, dont elle permet d'évaluer la durabilité et d'accompagner la gestion (Monnier, 2017). Un modèle qualitatif représente le système de manière simplifiée en privilégiant réalisme et généralité plutôt que précision. Ainsi, ce type de modélisation s'avère pertinent lorsque les interactions au sein du système sont avérées mais pas quantifiées (Dambacher, Li and Rossignol, 2003), permettant de résoudre le problème du manque de données quantitatives en s'appuyant sur des dires d'experts ou sur des connaissances empiriques du système étudié. Ce problème de manque de données quantitatives est particulièrement présent lorsqu'il est question de comparer des composantes d'un SES, qui par définition se situe à la croisée de nombreuses disciplines (économie, écologie, biologie, etc.).

La représentation couramment utilisée pour définir un modèle qualitatif est le graphe orienté. Ce graphe est constitué de variables reliées entre elles par des liens positifs ou négatifs (Puccia and Levins, 1985). La figure 2 montre les différents liens existants dans un tel graphe, entre trois variables : A, B et C.  $\rightarrow$  représente un effet direct positif, alors que  $\dashrightarrow$  représente un effet direct négatif. Ici, B a un effet direct positif sur C et A un effet direct négatif sur B. Le lien étant orienté, il est possible de représenter des interactions bidirectionnelles. Par exemple, ici, A a un effet négatif sur C et C un effet positif sur A. Il est commun de représenter les processus d'auto-régulation (i.e. densité-

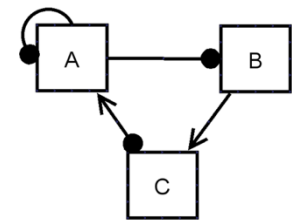


Figure 2 : Exemple de graphe orienté (réalisation personnelle)

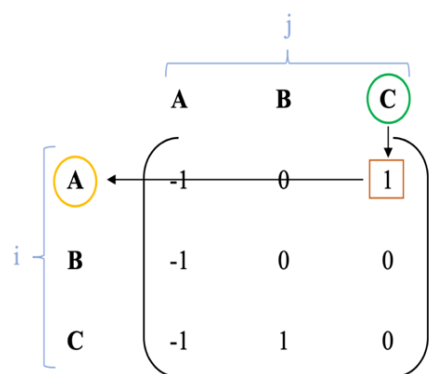


Figure 3 : Exemple de matrice d'interactions (réalisation personnelle d'après la figure 2)

dépendance, capacité de charge d'un milieu) non explicité sous forme d'un effet négatif de chaque variable sur elle-même. C'est le sens ici de la boucle négative de A vers A. Ainsi, à différents niveaux (allant de 2 à n variables où n est le nombre total de variables du système) des boucles de rétroaction émergent entre les variables, et régissent la dynamique qualitative du système. L'analyse de ces boucles, fondée sur la théorie des graphes, permet d'évaluer dans un système à l'équilibre les effets directs ou indirects produits sur une variable, par une perturbation de long-terme (Dambacher, Li and Rossignol, 2003). Le graphe est réalisé avec le logiciel DIA.

En vue de l'analyse mathématique du comportement du système, le graphe orienté est traduit sous forme de matrice, appelée matrice d'interactions (voir figure 3). Cette matrice est de taille  $n \times n$ , où n représente le nombre de variables du modèle. Chaque élément de la matrice

désigne l'effet de la variable  $j$  sur la variable  $i$ , où l'élément vaut -1, 1 ou 0 lorsque la variable  $j$  a un effet direct négatif, positif ou n'a pas d'effet sur la variable  $i$ . À partir de cette matrice, il est alors possible de réaliser des calculs matriciels afin de regarder la stabilité du système (Dambacher *et al.*, 2003). Celle-ci peut notamment être testée à la suite à de perturbations.

## b) L'analyse des perturbations de long-terme

Une perturbation consiste à changer l'état initial d'une ou plusieurs variable(s) positivement ou négativement. Les prédictions des réponses du système face à une perturbation se font soit avec une approche symbolique gardant la trace de chaque élément de la matrice (Dambacher *et al.*, 2009; Marzloff *et al.*, 2011), soit avec un approche numérique reposant sur des simulations Monte-Carlo<sup>1</sup> (Melbourne-Thomas *et al.*, 2012; Marzloff *et al.*, 2016). La seconde est mobilisée pour cette étude avec une approche probabiliste et une représentation telles que proposées par Marzloff et al (2016). La méthodologie mise en œuvre a été développée par (Melbourne-Thomas *et al.*, 2012) et se décompose en quatre étapes : (1) le choix du modèle, (2) l'attribution de valeurs aléatoires à la matrice de communauté, (3) la vérification de la stabilité du système et (4) l'étude des réponses face aux perturbations.

Le choix du(des) modèle(s) intervient après la construction d'un graphe représentant le SES. Celle-ci a été réfléchi à travers une approche participative décrite plus loin. L'attribution des valeurs aléatoires se fait à partir de la matrice de communauté ( $A_s$ ) (voir équation 1). Celle-ci, définie par (Levins, 1968), recense chaque élément  $a_{i,j}$  désignant l'effet de la variable  $j$  sur la variable  $i$ . Pour favoriser la stabilité du système, chaque variable est limitée par elle-même (Marzloff *et al.*, 2011), i.e. tous les éléments de la diagonale sont négatifs. La matrice  $A_s$  est alors transformée en une matrice adjointe<sup>2</sup> ( $B_s$ ), composée des éléments  $b_{i,j}$ . La matrice adjointe fournit les réponses qualitatives du système face à des perturbations (Dambacher, Li and Rossignol, 2002). La méthode numérique pour obtenir des prédictions du signe des réponses du modèle consiste à réaliser  $S$  simulations Monte-Carlo. Chaque simulation  $s$  (où  $s \in [1, S]$ ) assigne à la matrice de communauté  $A_s$  des valeurs tirées aléatoirement aux éléments  $a_{i,j}$  selon une loi uniforme (entre 0 et 1 pour les interactions positives et entre -1 et 0 pour les interactions négatives) puis à en estimer la matrice adjointe associée  $B_s$  (Marzloff *et al.*, 2016).

$$A_s = \begin{bmatrix} -a_{A,A} & 0 & a_{A,C} \\ -a_{B,A} & 0 & 0 \\ -a_{C,A} & a_{C,B} & 0 \end{bmatrix}$$

Équation 1 : Matrice de communauté (réalisation personnelle d'après la figure 2)

La stabilité selon les critères Hurwitz est vérifiée systématiquement pour chaque matrice numérique  $A_s$ . Un système est dit stable si toutes les variables convergent vers leur niveau original d'équilibre, après avoir subi une perturbation sur une ou plusieurs variables (Dambacher *et al.*, 2003). D'un point de vue mathématique, la stabilité du système à l'équilibre est vérifiée lorsque les parties réelles de toutes les valeurs propres<sup>3</sup> de la matrice  $A_s$  sont négatives (Dambacher *et al.*, 2003). La stabilité dépend de l'équilibre dans le système entre boucles de rétroaction positives et négatives : les boucles de rétroactions positives, communément appelées 'cercle vicieux ou vertueux', déstabilisent le système alors que les boucles négatives jouent un rôle régulateur et favorisent la stabilité (Dambacher *et al.*, 2003). Dans cette étude, les résultats sont basés sur  $S = 5\ 000$  matrices numériques tirées aléatoirement et qui remplissent ces critères de stabilité (Marzloff *et al.*, 2016).

<sup>1</sup> Méthode algorithmique permettant d'estimer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires.

<sup>2</sup> La matrice adjointe  $B_s$  est obtenue en transposant la conjuguée de la matrice  $A_s$ .

<sup>3</sup> Les valeurs propres ( $\lambda$ ) sont définies par l'équation suivante :  $|A - \lambda I| = 0$  où  $I$  est la matrice identité et  $| \cdot |$  désigne le déterminant de la matrice.

Le signe des éléments de  $B_s$  désigne alors la réponse (positive ou négative) de la variable  $i$  suite à une perturbation (positive ou négative) de la variable  $j$ . Comme dans Marzloff *et al.* (2016), les résultats sont représentés par la différence entre la proportion (sur les  $S = 5\,000$  simulations) de réponses positives et la proportion de réponses négative. Cela correspond à une estimation de la probabilité d'une réponse positive, négative ou ambiguë de chaque variable face à une perturbation. Une échelle de couleur rouge-gris-bleu permet de représenter graphiquement les réponses de chaque variable selon chaque perturbation. Si 100% des réponses prédites pour une variable sont positives, la valeur numérique de la différence est +1 (le signe de réponse positif sans ambiguïté) et est représentée en rouge foncé. Si 100% des réponses sont négatives, la valeur de la différence est -1 et est représentée en bleu foncé. Les niveaux de gris reflètent l'ambiguïté du signe de la réponse prédite lorsque les différentes matrices  $B_s$  (pour  $s \in [1, S]$ ) prédisent à la fois des réponses positives et négative. L'absence de couleur signifie que la perturbation n'affecte pas la variable. L'analyse mathématique est réalisée sous le logiciel R, en utilisant les algorithmes de simulation du package *QPress*<sup>4</sup>.

## 2. Processus de co-construction du modèle conceptuel

### a) La construction du modèle *initial*

L'approche de modélisation adoptée peut se dissocier en trois étapes, chacune s'intégrant dans un processus participatif : (1) la construction du modèle *initial*, (2) la discussion du modèle *initial* avec les parties prenantes et (3) la synthèse des modèles. Pour la première étape, des experts scientifiques ont été sollicités à plusieurs reprises afin de participer à la construction du modèle. Plusieurs réunions ont eu lieu (voir annexe 1), visant à présenter, analyser et discuter le graphe dans son ensemble. Cette démarche vise à renforcer la robustesse des interactions, à travers les dires d'experts, mais également à améliorer la clarté visuelle du modèle, pour faciliter sa lecture. La construction du modèle *initial* se base sur la conception d'un graphe orienté. Ce dernier requiert de choisir une (ou plusieurs) variable(s) d'entrée, déterminant le sens de lecture du graphe. L'intérêt premier porte sur les habitats marins du GM afin de mieux comprendre leurs interactions avec les activités anthropiques et l'environnement marin. Ainsi, les vasières et les herbiers de zostères sont les variables d'entrée du graphe.

Afin de déterminer les liens émanant de ces habitats, les « documents de gestion » du GM sont analysés. Cette littérature peut être perçue différemment selon les parties prenantes. Elle fait référence ici aux documents relatifs au Parc Naturel Régional « Golfe du Morbihan » (SIAGM, 2010), au site Natura 2000 « Golfe du Morbihan, côte de Rhuys » (Cosson, Mézac and Picard, 2013), au Schéma de Mise en Valeur de la Mer, la première version (DDTM56, 2006) et le projet en cours de révision (DDTM56, 2015, 2019; CEREMA, 2019) et au PAGD (SMLS, 2020). L'étude de ces documents permet de recueillir les problématiques propres au GM, dans un souci de neutralité. Chaque interaction référencée dans les « documents de gestion » est alors incluse dans le graphe et représentée par un trait plein noir.

La littérature scientifique portant sur le GM est ensuite étudiée, afin de préciser des liens ou de découvrir des liens non répertoriés jusqu'alors. Le GM est une zone visée par de nombreux projets de recherche, comme le projet VALMER portant sur l'évaluation des services écosystémiques associés aux herbiers de zostères (Angst *et al.*, 2014). Enfin, dans certains cas,

---

<sup>4</sup> Le package est accessible à l'adresse suivante : <http://rforge.net/QPress/>

la littérature scientifique portant sur d'autres sites peut être sollicitée. Cette dernière permet de justifier des liens entre des compartiments du système qui n'auraient pas encore été étudiés dans le GM. Ces deux types d'interaction sont représentées par un trait plein rouge dans le graphe.

Les premiers liens recherchés dans ces documents ont pour origine, ou destination, les variables d'entrée du modèle, i.e. les vasières et les herbiers de zostères. Le choix des autres variables du graphe se fait en fonction des interactions découvertes ayant pour origine ou destination les variables d'entrée. Après avoir choisi les autres variables du modèle, une catégorisation des variables est faite pour faciliter la lecture du graphe. Trois catégories sont établies, les habitats, les ressources (naturelles) et les usages. Les ressources représentent des compartiments écologiques autres que des habitats marins, alors que les usages font référence aux activités anthropiques, professionnelles comme récréatives. Des agrégations de variables entre des ressources ou entre des usages peuvent alors être réalisées pour limiter le nombre de variables. Si elles sont trop nombreuses, cela peut nuire à la lisibilité graphique, limiter la pertinence des prédictions qualitatives (qui deviennent principalement ambiguës en vertu des boucles de rétroactions qui ont des effets contraires) et perdre le lecteur dans sa compréhension des interactions.

Ensuite, les interactions entre les autres variables sont recherchées. Elles peuvent être entre les ressources et les usages, entre les ressources elles-mêmes ou entre les usages eux-mêmes. De fait, ces interactions sont de nature variée : conflit d'usage, prélèvement de ressources, occupation du plan d'eau, relation proie/prédateur, etc. Enfin, toutes ces interactions sont référencées dans des matrices de trois façons : de manière binaire, par un verbe et par une phrase. Cela vise à spécifier chaque interaction quant à : son origine, sa destination, sa signification et sa source bibliographique. Ces matrices sont disponibles en annexe (voir annexes 4a, 4b et 4c).

Grâce au processus participatif, le modèle a évolué à plusieurs reprises (voir annexe 2). A titre d'exemple, la variable « vasières » a été transformée en « vasières nues » afin de révéler les effets directs liés à celles-ci et ainsi les dissocier de ceux liés aux herbiers de zostères. Finalement le modèle initial est obtenu (voir annexe 2b), se composant de 20 variables reliées entre elles par 107 interactions. Les variables sont expliquées en annexe 3. Ce modèle est alors diffusé auprès des parties prenantes du GM, permettant de prolonger la démarche participative dans la deuxième étape.

## b) Entretiens avec les parties prenantes

La sollicitation des parties prenantes dans la construction du modèle vise à apporter des connaissances empiriques du cas d'étude. Cette expertise peut confirmer ou infirmer les interactions référencées dans le modèle *initial* et permet de développer de nouvelles interactions, non présentes dans la littérature analysée. Les parties prenantes contactées sont des représentants d'utilisateurs, des personnels de l'État et des experts scientifiques. Les représentants d'utilisateurs proviennent de différentes structures, organisation professionnelle, association ou fédération. Les parties prenantes peuvent être expertes sur un ou plusieurs compartiments (usage, ressource ou habitat) référencés dans le graphe. Toutefois, chaque usage est représenté, au moins une fois, dans les expertises des personnes contactées.

Étant donné le confinement lié à l'épidémie de Covid-19, 33 personnes ont été contactées et 8 entretiens ont pu être réalisés en visio-conférence (voir tableau 3). Ces entretiens représentent 8 usages, sur un total de 14 présents dans le modèle *initial*, la pêche récréative et

professionnelle, la chasse, la randonnée, les activités du bassin versant, la plaisance et la conchyliculture. Les entretiens n'ont été faits qu'avec des représentants d'utilisateurs du GM.

Le modèle est envoyé avant chaque entretien, afin de laisser le temps à l'acteur de prendre connaissance des différences interactions au sein du SES. L'entretien, semi-directif, se décompose alors en trois parties. La première interroge l'acteur sur sa perception du modèle d'un point de vue général : lisibilité, compréhension de la méthode, etc. Dans la deuxième, il évalue les interactions concernant l'usage (ou les usages) dont il est expert, afin sont correctes et s'il en existe d'autres. Enfin, la troisième partie questionne les autres interactions, présentes ou non, dans le modèle, pouvant induire la modification ou l'ajout de nouvelles variables/interactions.

**Tableau 3 : Entretiens réalisés avec les parties prenantes**

| <b>Partie prenante</b>      | <b>Personnes contactées</b> | <b>Entretiens réalisés</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Représentant d'utilisateurs | 23                          | 8                          |
| Personnel de l'État         | 3                           | 0                          |
| Expert scientifique         | 7                           | 0                          |
| <b>Total</b>                | <b>33</b>                   | <b>8</b>                   |

Les entretiens ont permis d'obtenir des « sous-modèles » (voir Annexe 5). Ces derniers représentent les échanges avec les parties prenantes en apportant des modifications au graphe initial, les nouvelles variables/interactions sont en orange et les interactions discutées sont en gras. Toutes les interactions n'ont donc pas été discutées avec les parties prenantes. Les entretiens réalisés ont permis d'acquiescer des précisions sur certaines interactions.

### c) Synthèse des modèles

Afin de mettre en œuvre l'analyse des perturbations de long-terme, le modèle *initial* est repensé en suivant trois étapes : (1) la revue des interactions et des variables du modèle *initial*, (2) la catégorisation des interactions gardées et (3) la création d'un (ou plusieurs) modèle(s).

Tout d'abord, les interactions du modèle *initial* sont réétudiées avec des experts scientifiques (voir annexe 1). Ces échanges se fondent sur les connaissances apportées par la littérature précédemment citée, les sous-modèles issus des entretiens avec les parties prenantes et des dires d'experts. Cette étape vise à regrouper certaines variables entre elles, intégrer une variable à une autre ou à supprimer des variables du système. Les interactions entre les nouvelles variables sont alors étudiées, afin de ne garder que les liens structurants du système.

Les entretiens ont montré que la plongée sous-marine semble peu interagir avec les autres usages. Cette activité se réalise dans une zone spécifique et utilise des mouillages réservés aux bateaux de plongée. Dans le GM, la chasse se pratique « à la passée », i.e. au lever du soleil, limitant la gêne pour les randonneurs et les promeneurs. La qualité de l'eau du GM a été mise en avant lors des entretiens comme un enjeu important, à travers l'apport en matière organique et l'impact bactériologique du bassin versant. Ces phénomènes peuvent alors impacter négativement la nature et, plus ou moins directement, les activités primaires. De nouvelles variables ont également été proposées, comme les manifestations sportives et les énergies marines renouvelables. Lors d'un entretien, il a également été proposé de dissocier le graphe en



deux, un portant sur les conflits d'usage et un autre sur les interactions entre les usages et l'environnement.

La variable « Plongée sous-marine » a été supprimée car elle ne se pratique pas dans la partie orientale du GM, zone d'étude choisie pour le SES. Ensuite, des variables ont été intégrées à d'autres afin de condenser les informations : « Résidents » et « Activités portuaires » au sein des « Activités du bassin versant » et « ENL » dans la « Plaisance ». Enfin, plusieurs variables ont été associées entre elles : « Ulves » et « Plancton » pour obtenir « Production primaire », « Pêche professionnelle » et « Pêche récréative » donnant « Pêche ». Il est certain que ces deux activités de pêche sont différentes sur plusieurs aspects : lieu, pratique, etc. Mais, sur le modèle, elles disposent des mêmes interactions. Pour l'analyse mathématique, il convient de ne faire apparaître qu'une variable pour la pêche, tout en précisant dans l'interprétation que des spécificités entre ces usages demeurent. Ainsi, les interactions entre les variables restantes peuvent être catégorisées.

Deux échelles d'intensité sont ensuite créées pour catégoriser les interactions selon leur magnitude et leur robustesse par rapport aux autres interactions du système. La première fait référence à l'ampleur ou à la force du lien, alors que la robustesse correspond à la certitude de l'interaction au sein du GM. Elles peuvent être classées comme forte, moyenne ou faible. Ces échelles permettent d'améliorer la précision du modèle initial, où les interactions étaient représentées de manière équivalente. Comme le montre le tableau 4, l'interaction allant des « Activités BV » vers « Herbiers de zostères » est classée faible pour les deux échelles (l'ensemble des arbitrages sont présentés dans l'Annexe 6). En effet, les apports venant du bassin versant peuvent impacter la zostère positivement avec la diffusion de nutriments favorisant le développement de la plante ou négativement avec l'introduction de polluants chimiques néfastes à la plante.

**Tableau 4 : Tableau représentant la catégorisation des interactions**

| De  | Vers  | Robustesse du lien | Magnitude du lien | Caractère de l'interaction |                   | Explications  | Source              |
|---|---|--------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|---|---------------------|
|   |   |                    |                   | Modèle général             | Modèle eutrophisé |   |                     |
| Activités BV  | Herbiers de Zostères                                    |                    | 1                 | N                          | N                 | effet direct complexe et variable, dépend de l'apport en nutriment, de sa quantité, et de sa situation dans l'écosystème (colonne d'eau/sédiment) ; impact potentiel négatif lié aux herbicides | (7)                 |
| Biodiversité Marine                                     | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    |                   |                            |                   | effet direct non structurant, complexité des interactions   | entretien           |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   | Plongée sous-marine                                     |                    |                   |                            |                   | pas d'interaction entre les 2 usages  | entretien (plongée) |
| Oiseaux   | Randonnée_Promenade                                     |                    | 2                 | P                          | P                 | intérêt visuel pour l'activité  | entretien +(1)      |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                        | Vasières nues   |                    | 1                 | N                          | N                 | piétinement lors de l'activité de pêche à pied  | (2)                 |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Herbiers de Zostères                                    |                    | 3                 | /                          | N                 | si niveau normal, pas d'interaction directe mais si dépasse un seuil, privation de lumières par les macroalgues (eutrophisation)  | (1,23)              |
| Vasières nues   | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 1                 | P                          | P                 | source de nourriture pour les huîtres avec la présence microphybenthos, production primaire favorisée par les fèces d'huître  | (26)                |

**Explications :** Chaque ligne correspond à une interaction, allant de la variable « de » à la variable « vers ». L'échelle de robustesse représente la véracité de l'interaction, rouge pour faible, orange pour moyenne et vert pour forte. L'échelle de magnitude représente la force de l'interaction, 1 pour faible, 2 pour moyenne et 3 pour forte. L'interaction, positive et/ou négative, peut être intégrée dans le modèle général et/ou le modèle eutrophisé ou aucun des deux. Le tableau complet est disponible en annexe 6, ainsi que la bibliographie référencée dans la colonne source. Le noir correspond à une interaction supprimée et le gris à une interaction non référencée.



Par ailleurs, des liens ont une robustesse forte mais une magnitude faible, comme entre « Oiseaux » et « Randonnée-promenade » ou entre « Pêche » et « Vasières nues ». Ces deux liens sont avérés, selon la littérature et les dires d’experts, mais sont considérés comme moins impactant en comparaison d’autres liens. Le pêcheur piétine la vasière lors de son activité, mais cet impact est relativement faible. Le lien entre les « Vasières nues » et la « Conchyliculture » se révèle aussi complexe. La vasière favorise le développement des coquillages grâce au microphybenthos, mais ce phénomène n’a pas été attesté dans le GM, donc le lien est moyennement robuste.

Les interactions représentées en noir ont été retirées du modèle *initial* (voir tableau 4). Ceci est le cas du lien entre la « Conchyliculture » et la « Plongée sous-marine », faute d’interactions entre ces deux usages. Il a également été choisi de ne pas représenter certaines interactions (en gris) qui peuvent exister mais ne sont pas pertinentes dans cette représentation du SES. Ainsi, le lien allant de la « Biodiversité marine » vers la « Production primaire » n’est pas représenté. Il n’apparaît pas comme structurant dans ce modèle, de par la complexité des interactions entre ces compartiments. Une augmentation ou une diminution de la biodiversité marine n’a pas d’effet direct sur le niveau de production primaire dans le bassin du GM. Le tableau complet expliquant la catégorisation des interactions est disponible en annexe (voir annexe 6).

La catégorisation permet d’obtenir un modèle *complet*, synthétisant les informations recueillies tout au long du processus de co-construction. Il se compose de 14 variables pour 64 interactions, nettement moins que le modèle *initial* (voir tableau 5). Un modèle *simplifié* est réalisé, ne représentant que les liens forts, i.e. liens disposant d’une magnitude et d’une robustesse fortes, du modèle *complet*. Le modèle *simplifié* ne comprend ainsi que 41 interactions. Cette logique de simplification est renforcée par la création d’un modèle *eutrophisé*, répertoriant 44 interactions pour 14 variables (voir tableau 5). Celui-ci vise à représenter le SES avec ce seuil de production primaire dépassé, impactant négativement le milieu marin. L’effet positif induit par production primaire vers la biodiversité marine et les ressources halieutiques devient négatif. De nouvelles interactions apparaissent dans ce modèle, notamment des liens négatifs vers les activités pédestres et les habitats marins. En effet, dans un milieu *eutrophisé*, le développement de la zostère et la production primaire des vasières est ralenti par la perte de luminosité. Les randonneurs peuvent subir une pollution visuelle et olfactive, comme avec les marées vertes.

*Tableau 5 : Description des modèles conceptuels*

| <b>Modèle</b> | <b>Nombre de variables</b> | <b>Nombre d’interactions</b> |
|---------------|----------------------------|------------------------------|
| Initial       | 20                         | 107                          |
| Complet       | 14                         | 64                           |
| Simplifié     | 14                         | 41                           |
| Eutrophisé    | 14                         | 44                           |

### 3. Résultats

Cette partie vise à présenter le modèle *complet* défini grâce au processus de co-construction. Une partie des résultats de l’analyse mathématique sera également présentée.

### a) Le modèle complet

Une légende a été insérée dans la représentation du modèle pour faciliter la lecture (voir figure 4). Pour améliorer la clarté visuelle, les variables ont été catégorisées en trois groupes : en bleu pour les ressources naturelles, en jaune pour les ressources naturelles et en vert pour les habitats marins. La robustesse des liens est représentée en couleur, rouge pour faible, orange pour moyenne et noir pour forte. La magnitude est spécifiée en pointillés, plus ils sont petits plus le lien est faible. Un trait plein noir correspond alors à un lien de magnitude et de robustesse fortes, considéré alors comme un lien fort. La signification des variables est précisée dans le tableau 6.

Comme le montre la figure 4, les trois groupes de variables interagissent entre eux, justifiant le choix d'étudier le GM comme un SES. Tout d'abord, les habitats marins interagissent avec les ressources naturelles, avec seulement des liens forts. Ceux-ci ont un impact positif sur les oiseaux, la biodiversité marine et les ressources halieutiques. Ils sont une source d'alimentation pour certains oiseaux, comme les bernaches avec la zostère. Les habitats servent également de zone de frayère pour les animaux, comme la seiche dans les herbiers et la sole dans les vasières. Ces dernières servent de zone de repos pour les oiseaux. La biodiversité marine a un impact positif sur les ressources halieutiques, traduisant le caractère essentiel des écosystèmes dans la production d'espèces intéressantes pour la pêche. Ces variables interagissent également avec la production primaire à travers une relation proie-prédateur.

De plus, les habitats disposent d'interactions avec les usages. La réalisation de l'activité de pêche peut induire un impact négatif sur les habitats, à travers le piétinement de la vasière et/ou l'arrachage de la zostère. Un lien existe entre les herbiers et la conchyliculture, mais sa nature est incertaine, tant sur sa robustesse que sur sa magnitude. Les tables conchylicoles peuvent priver la zostère de lumière, mais peuvent aussi permettre son développement en diminuant le courant. La zostère améliore la qualité de l'eau pour les ressources conchylicoles mais leur présence peut interdire l'installation d'une nouvelle concession, dû à une réglementation en place dans le GM visant à protéger la zostère. La vasière induit un impact positif pour l'activité conchylicole, par la production primaire du benthos. La zostère peut également être arrachée par l'ancre des bateaux de plaisance et de transport. Les rejets du bassin versant peuvent nuire aux herbiers de zostères. Mais cet effet reste ambiguë. L'excès de nutriments ou une pollution chimique se révèlent néfastes pour le développement des plantes, mais les zostères peuvent aussi bénéficier d'apports en matière organique pour leur croissance. Le lien a donc une magnitude et une robustesse faibles.

Les ressources naturelles ont, elles aussi, des interactions avec les usages. La présence de ressources halieutiques permet la tenue de l'activité de pêche. Cette dernière a un impact négatif sur la ressource en la prélevant du milieu naturel. La production primaire est favorisée par l'apport en matière organique venant du bassin versant ou par le rejet des eaux usées des bateaux. Les oiseaux présentent de nombreuses interactions avec les usages. Ils sont impactés négativement la plaisance, les activités pédestres et dans une moindre mesure le transport maritime ou la pêche. Ces usages peuvent déranger leur tranquillité en débarquant sur les îles ou en se déplaçant sur le sentier côtier. Par ailleurs, les oiseaux peuvent favoriser le développement d'usages, comme l'observation d'oiseaux, les activités pédestres ou la chasse. Toutefois, cette dernière a un impact négatif en prélevant la ressource. Enfin, la production primaire favorise le développement des ressources conchylicoles.

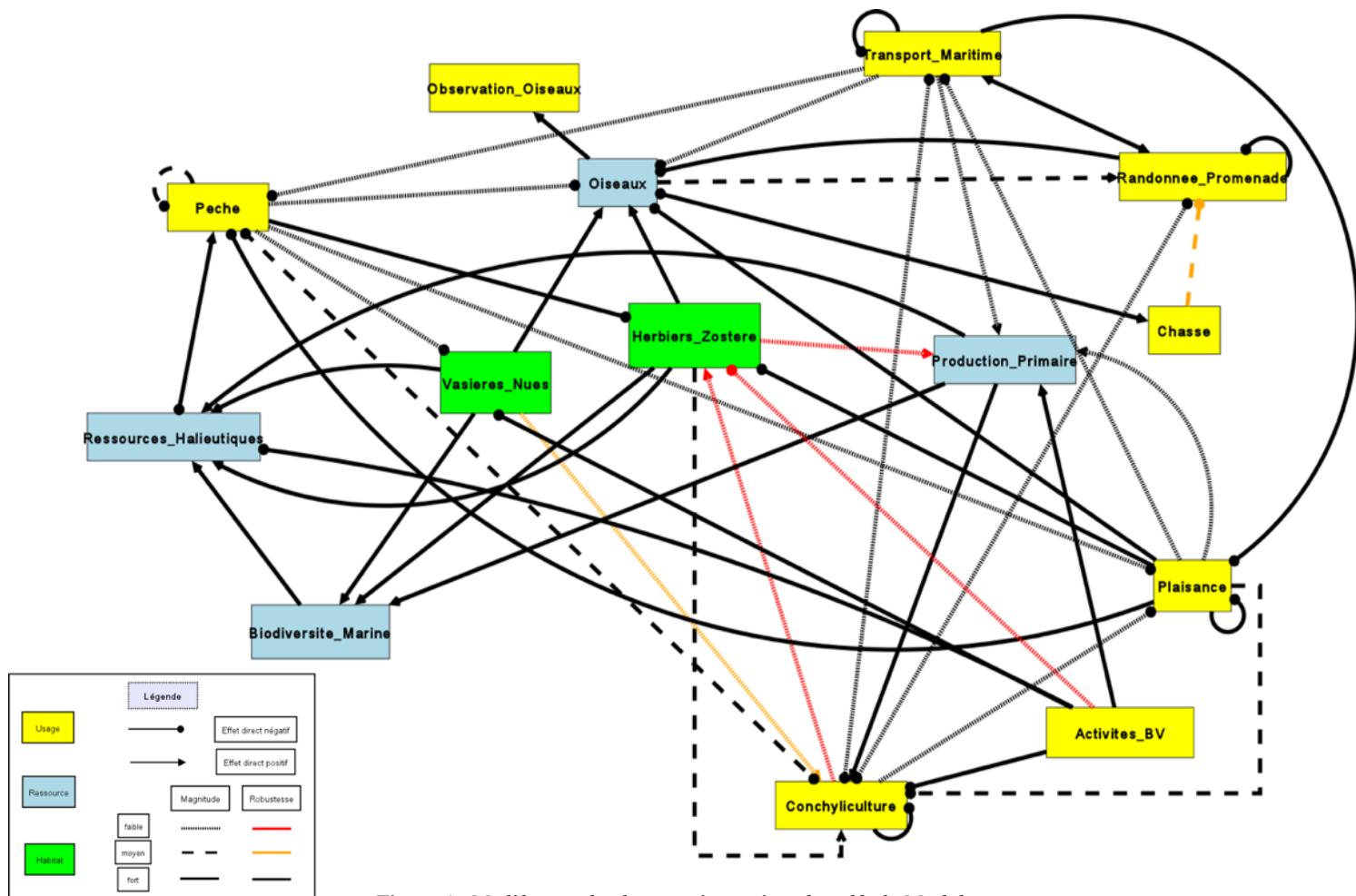


Figure 4 : Modèle complet du socio-écosystème du golfe du Morbihan

Tableau 6 : Signification des variables du modèle complet

| Variable                  | Signification   |
|---------------------------|---|
| Herbiers_Zostère          | Herbiers de zostères  |
| Vasières_Nues             | Vasières n'abritant pas d'herbiers de zostères et production primaire de la surface benthique                 |
| Biodiversité_Marine       | Espèces animales et végétales, habitats marins non présents dans les autres compartiments                     |
| Oiseaux                   | Oiseaux présents dans le bassin du GM   |
| Production_Primaire       | Production primaire de la colonne d'eau   |
| Ressources_Halieuistiques | Espèces marines sauvages commercialisables  |
| Activités_BV              | Apport en matière organique/chimique issu des bassins versants (agriculture, assainissement, industrie, etc.) |
| Activités_Pédestres       | Activités non véhiculées (randonnée, promenade, etc.)   |
| Chasse                    | Activité de chasse sur le bassin du GM  |
| Observation_Oiseaux       | Activité d'observation d'oiseaux sur le bassin du GM  |
| Conchyliculture           | Infrastructures et ressources conchylicoles   |
| Pêche                     | Pêche à pied et pêche embarquée professionnelles et récréatives   |
| Plaisance                 | Tous types de bateaux et d'embarcations du plan d'eau (hors transport)  |
| Transport_Maritime        | Navettes à passager, transport de marchandise   |

De plus, les usages peuvent interagir entre eux. Dans le GM, le plan d'eau est occupé par plusieurs usages en même temps, produisant une concurrence sur l'espace. Ainsi, il existe des interactions négatives entre le transport maritime, la plaisance, la pêche et la conchyliculture. L'interdiction de pêcher à moins de 15m d'une concession conchylicole induit une interaction négative entre la pêche et la conchyliculture. La conchyliculture peut se voir limiter par elle-même, à travers une production trop importante, limitée par la capacité de charge du milieu. Cette auto-régulation apparaît également pour l'activité de pêche, la plaisance, le transport maritime ou la randonnée, avec une congestion pouvant survenir dans le GM. Les activités pédestres peuvent être dérangées par la chasse et par la conchyliculture en cas de présence d'une concession sur le sentier côtier. Enfin, une interaction positive existe entre les activités pédestres et le transport maritime, à la faveur d'une demande importante pour se rendre sur les îles du GM.

## b) Les réponses du système face aux perturbations

Ainsi pour l'analyse des perturbations il a été choisi d'étudier : le modèle *complet*, le modèle *simplifié* et le modèle *eutrophisé*. Afin de voir les changements de réponses du SES liés à l'eutrophisation, les deux derniers modèles peuvent être comparés ensemble. Le modèle *simplifié* est également comparable avec le modèle *complet*. Les modèles sont disponibles en annexes 8a, 8b et 8c.

L'analyse du système nécessite ensuite de choisir les variables à perturber. Des scénarios de simulation ont été construits. Cinq sont présentés dans cette étude (voir tableau 7). Ils font référence aux enjeux de gestion du GM (présentés dans la partie I) et traduisent une augmentation ou une diminution d'une ou plusieurs variable(s). Ils portent sur le développement d'une ou plusieurs activité(s) touristiques, la baisse de la production conchylicole ou la perte de biodiversité. Les autres scénarios sont disponibles en annexe 9.

**Tableau 7 :** Description des scénarios présentés dans cette étude.

| Scénario   | Signification                   | Perturbation | Variable(s) perturbée(s)   |
|------------|---------------------------------|--------------|--|
| Plaisance+ | Développement de la plaisance   | +1           | Plaisance  |
| Tourisme+  | Développement du tourisme       | +1           | Activités du bassin versant, Pêche (récréative), Plaisance, Randonnée/Promenade, Transport maritime,           |
| Conch-     | Réduction de la conchyliculture | -1           | Conchyliculture  |
| Vasière-   | Diminution de la vasière        | -1           | Vasières nues  |
| Biodiv-    | Érosion de la biodiversité      | -1           | Biodiversité marine, Herbiers de Zostère, Oiseaux, Production primaire, Ressources halieutiques, Vasières nues |

**Explications :** Chaque ligne correspond à un scénario. Lorsqu'une seule variable est perturbée, le scénario est simple. Lorsque plusieurs variables sont perturbées, le scénario est multiple. Tous les scénarios utilisés dans l'analyse mathématique sont disponibles en annexe.

Étant donné l'impossibilité de représenter tous les usages lors des entretiens avec les parties prenantes, les réponses du SES face à des perturbations doivent être prises au conditionnel. Toutefois, cela permet de montrer le type de résultats que l'on peut obtenir en utilisant la modélisation qualitative. Cette méthode peut être utilisée pour anticiper les effets induits par

une perturbation du SES. Une synthèse des résultats est présentée dans cette étude (voir figure 5), avec les scénarios (décrits précédemment) en abscisse et les variables du modèle en ordonnée. Chaque case de couleur correspond à la réponse d'une variable face à un scénario. La totalité des résultats est disponible en annexe 10.

Contrairement aux autres modèles, toutes les variables du modèle *complet* répondent aux scénarios, sauf les activités du bassin versant. Cela s'explique par un nombre d'interactions plus important entre les variables. Une vingtaine de liens sont retirés pour simplifier le modèle. Toutefois, les réponses paraissent plus ambiguës (en gris) que dans les autres modèles. Un grand nombre d'interactions implique des boucles de réponse plus nombreuses, ce qui accroît l'incertitude. Les couleurs sont plus intenses dans les modèles *simplifié* et *eutrophisé*.

La simplification du modèle peut également induire une perte d'information. Pour le scénario « Conch- », seule la conchyliculture répond (négativement) à la simulation dans les modèles simplifiés. Le seul lien « fort » dirigé vers cette variable est la boucle de rétroaction dirigée vers elle-même, favorisant la stabilité et représentant la capacité de charge du milieu. Tous les autres liens ne sont pris en compte que dans le modèle *complet*. Ce dernier montre des réponses négatives pour d'autres variables : les oiseaux, les herbiers de zostères, la chasse et l'observation d'oiseaux. Le choix de ne regarder que les liens forts provoquent une suppression d'interactions, pouvant omettre des relations structurantes du SES.

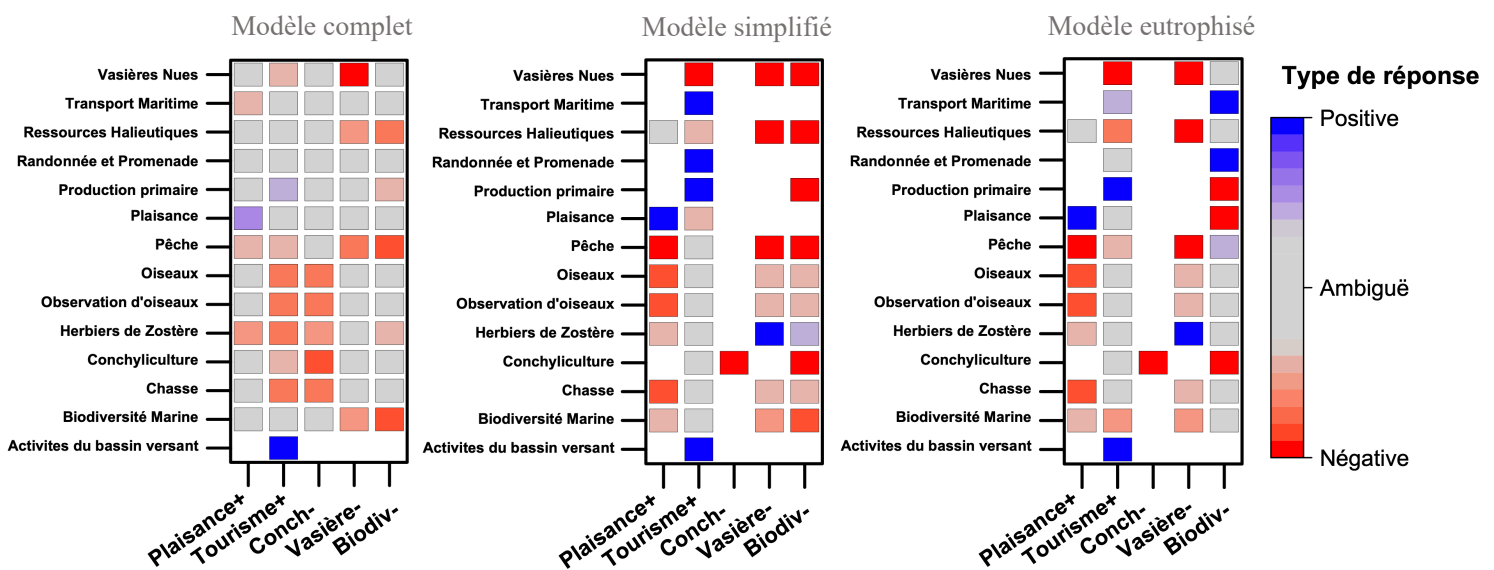


Figure 5 : Synthèse des réponses du système face aux perturbations (réalisation personnelle)

**Explications :** Chaque rectangle représente les résultats d'un modèle. Les lignes correspondent aux variables et les colonnes aux scénarios. Plus la couleur est rouge, plus la proportion des réponses est négative. Plus la couleur est bleue, plus la proportion des réponses est positive. La couleur grise signifie que la réponse est ambiguë (moins de 2/3 des réponses sont du même signe). L'absence de carré de couleur signifie qu'il n'y a pas de réponse de la variable.

La perte d'information semble moins importante avec les autres scénarios. Les variables perturbées disposent d'au moins un lien fort en dehors de leur propre boucle de rétroaction. Le scénario « Plaisance+ » donne des réponses similaires pour les modèles simplifiés, avec des réponses négatives pour la pêche, les oiseaux, la chasse et l'observation d'oiseaux. La réponse est positive pour la plaisance, grâce à la perturbation positive simulée sur elle-même. Si l'on perturbe d'autres variables en plus de la plaisance (i.e. le scénario « Tourisme+ »), toutes les variables donnent une réponse. Le développement touristique induirait une augmentation des

activités du bassin versant et de la production primaire pour tous les modèles et aussi pour le transport maritime et la randonnée/promenade avec le modèle *simplifié*.

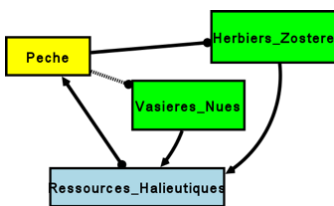


Figure 6 : Chemin de réponse suite à la perturbation d'un habitat (extrait de la figure 4)

Les scénarios portant sur la biodiversité (« Vasière- » et « Biodiv- ») donnent des réponses contre-intuitives. Une diminution de la vasière induirait une augmentation des herbiers de zostères pour les modèles simplifiés. Comme le montre la figure 6, la perturbation négative des vasières nues provoque une baisse des ressources halieutiques et de la pêche, ce qui favorise les herbiers de zostères. En choisissant de ne pas faire interagir directement les deux habitats, ils ne se limitent pas entre eux. Lorsqu'un habitat diminue, l'autre augmente. Aussi, une perte globale de biodiversité semblerait

bénéfique au transport maritime et aux activités pédestres dans le modèle *eutrophisé*. Dans ce cas, plusieurs variables sont perturbées en même temps, donnant de multiples chemins de réponse.

Ces résultats montrent la nécessité de réfléchir dès le départ aux chemins de réponse induits par chaque interaction présente dans le modèle/graphe. En effet, chaque chemin doit être structurant dans le système pour assurer une pertinence dans la simulation des scénarios et les réponses attendues des variables. Plus le nombre d'interactions est important, plus il est difficile de connaître le chemin de réponse suite à la perturbation d'une variable, complexifiant la compréhension de la méthode et du modèle.

### III. Approche centrée sur l'utilisateur

À l'instar de la première approche, cette seconde approche s'intéresse aux interactions entre les habitats marins et les usages dans le GM, par le prisme de mesures de gestion spécifiques et de leurs effets potentiels sur la pratique de différents usagers. Ce changement de point de vue nécessite alors de concevoir des modèles plus précis et détaillés. Pour cela, on peut s'inspirer de la modélisation des systèmes multi-agents (SMA) et offrir une première formalisation des enjeux identifiés à l'aide d'un langage dédié : l'Unified Modeling Language (UML).

#### 1. Méthodes

##### a) La modélisation des systèmes multi-agents appliquée aux socio-écosystèmes

Dans le paradigme multi-agents, le système est appréhendé avec une vision locale et décentralisée (Macal and North, 2010). Le système est considéré comme un environnement (plus souvent un espace) où des entités (agents et objets) possédant des attributs variables ou fixes interagissent les uns avec les autres. La dynamique du système (interactions et variation de la valeur des variables) peut résulter d'actions définies et réalisées par les entités du système, de réactions de l'environnement ou des autres entités à ces actions, ou encore de processus endogènes à l'environnement.

Si le cadre de la modélisation des SMA paraît approprié à l'étude des socio-écosystèmes (SES), c'est qu'il permet d'étudier les relations entre les comportements individuels, leurs interactions possibles et les différents états résultants du SES. En fait, il existe plusieurs usages possibles des SMA pour l'étude des socio-écosystèmes, correspondant à différentes perspectives sur les relations entre théorie et réalité et entre science et action (Bousquet, 2016). Il peut s'agir de simuler des sociétés artificielles à l'appui d'explorations théoriques. Ou alors de développer un ou plusieurs des modèles appliqués permettant d'affiner la compréhension d'un cas d'étude en intégrant des connaissances et des données diverses. Mais encore, d'entreprendre une recherche-action poursuivant l'ambition d'informer la gestion par l'usage de modèles collectivement construits.

En appui à la gestion des SES, on peut donc employer la modélisation des SMA pour explorer les processus de prise de décision individuelle et sociale, d'après différents modèles théoriques. On peut aussi recourir aux méthodes des SMA pour mieux cerner le fonctionnement de mesures de gestion envisagées ou adoptées : modalités de mise en œuvre, réception par les usagers concernés, efficacité globale de la mesure, etc. Finalement, tant les résultats obtenus que l'effort de réflexivité requis par la modélisation de SMA peuvent contribuer à une démarche de gestion adaptative, voire de prise de décision collective, comme proposé par le collectif ComMod (Barreteau *et al.*, 2003). Dans ce cas, les parties prenantes du SES collaborent activement à l'élaboration et l'utilisation du ou des modèles (exception faite de la phase d'implémentation informatique le cas échéant).

En pratique, le développement d'un modèle multi-agents comprend plusieurs phases de spécification, permettant de passer de la représentation du système de référence au code et aux simulations (Macal and North, 2010). Entre chaque phase, le niveau de formalisme s'accroît. La première étape est une étape de « cadrage », consistant en une description narrative de l'objectif du modèle et du système de référence. Le système de référence n'est autre que la partie du SES représentée dans le modèle. Définir ce dernier implique de préciser les échelles



de temps et d'espace considérées, les entités et les processus représentés, au regard de l'objectif du modèle. En d'autres termes, cette première étape consiste à raconter l'histoire que l'on cherche à mettre en scène dans le modèle et permet de préciser la question à laquelle on cherche à répondre à l'aide du modèle.

La deuxième étape est celle de la « modélisation conceptuelle », consistant en une première traduction des éléments du modèle vers une représentation multi-agents à l'aide de récits et/ou de diagrammes simples. La troisième étape est celle de la « formalisation du modèle conceptuel » et consiste à spécifier les éléments du modèle à l'aide d'un langage formel existant. Ceci permet de spécifier plus rigoureusement le modèle conceptuel et d'être en mesure de le partager sans ambiguïté avec des personnes capables d'en comprendre le formalisme. Pour cela, on peut recourir au langage UML (Unified Modeling Language), qui est un langage graphique basé sur le paradigme de programmation orientée objet. Enfin, la quatrième et dernière étape de développement d'un modèle multi-agents consiste à « implémenter » ce dernier, c'est-à-dire à écrire le code informatique déductible des étapes précédentes dans une plate-forme de simulation dédiée.

Ici, il n'est pas prévu d'aller jusqu'à la phase d'implémentation, mais plutôt d'emprunter les concepts et méthodes présentés, et notamment la formalisation UML, pour construire des représentations aisément communicables et discutables des effets possibles de certaines mesures de gestion sur les usagers d'un espace marin protégé : appropriation, respect, adaptation des pratiques ? Cette utilisation correspond à certains emplois reconnus de la modélisation, comme de faciliter une présentation intelligible d'une situation ou encore de faciliter la médiation entre discours hétérogènes autour d'un phénomène (Le Page, 2017). La démarche ComMod, par exemple, ambitionne principalement de faciliter le dialogue entre les parties prenantes, y compris les scientifiques, à l'aide d'artefacts créés et utilisés pour fournir une représentation partagée du système de référence (Bousquet, 2016).

## b) La modélisation avec le langage UML

L'Unified Modelling Language (UML) se définit comme un langage standard d'écriture de logiciel, fournissant un vocabulaire et des règles de combinaison de mots (Booch, Rumbaugh and Jacobson, 1998). Il permet la conceptualisation de modèles orientés objets, plus ou moins, complexes, afin d'atteindre quatre objectifs : construire, visualiser, spécifier et documenter les éléments d'un système (Booch, Rumbaugh and Jacobson, 1998). Ce langage a été premièrement conçu pour les systèmes complexes pour les logiciels, s'appliquant à des domaines variés, tels que les télécommunications, l'électronique ou la recherche. Mais il peut également s'appliquer à des systèmes non destinés à un logiciel, grâce à la simplicité et l'uniformité des termes utilisés. La mobilisation du langage UML dans la modélisation facilite alors la compréhension pour des personnes extérieures à sa construction.

Un modèle UML se structure par trois entités : les objets, les relations et les diagrammes. Les objets représentent la base structurante du modèle, les relations relient les objets entre eux et les diagrammes résultent d'une combinaison d'objets. Il existe une multitude d'objets et de relations, permettant de préciser au maximum les interactions au sein d'un modèle. Quant aux diagrammes, il est possible d'en dissocier neuf types. Chaque type de diagramme apporte une perspective différente à la conceptualisation du système. Ce dernier peut alors être représenté par plusieurs diagrammes, se complétant les uns les autres. Dans la modélisation des SMA, le



diagramme de classe et le diagramme d'activité se révèlent comme les plus pertinents et sont choisis pour cette étude (Müller and Bommel, 2007).

L'utilisation de ces diagrammes permet de représenter chaque système d'un point de vue statique, pour le diagramme de classe, et dynamique, pour le diagramme d'activité. D'une part, le diagramme de classe montre les interactions entre des composantes à un moment donné, aboutissant à une compréhension holistique du système. Il permet de représenter les différents comportements que peut adopter un agent lorsqu'il interagit avec d'autres objets. Cette spécification permet notamment d'énumérer les informations nécessaires, en vue d'une implémentation informatique. D'autre part, le diagramme d'activité représente une suite d'actions et de décisions. Cette vision permet de spécifier les différences de comportement entre chaque agent, induisant des réponses différentes du système. Chacun de ces diagrammes dispose d'objets et de relations propres, nécessitant d'être choisis selon leur signification. La figure 7 montre ceux utilisés pour cette étude.

En représentant le comportement de différents agents, les diagrammes UML peuvent ainsi servir à l'élaboration de systèmes complexes, tels que les SMA. Pour rappel, un SMA est un outil informatique permettant de visualiser et simuler les interactions entre plusieurs agents et objets au sein d'un même environnement (Bousquet and Le Page, 2004). Parce qu'elle nécessite une description des perceptions et des actions de chaque agent, la construction d'un SMA peut bénéficier d'une approche participative. De fait, il apparaît intéressant de mettre en place ce type d'approche dès la construction des diagrammes.

### c) La conception des diagrammes

En exerçant son activité, un usager peut impacter le milieu naturel. Dans le cas des activités marines, ces impacts peuvent affecter la durabilité des habitats marins. C'est pourquoi le gestionnaire compétent d'un espace naturel protégé a la possibilité de mettre en place des mesures de gestion, visant à limiter ces impacts. Une mesure de gestion peut prendre diverses formes : restauration écologique, cantonnement de pêche, etc. La mise en place de mesures de gestion peut affecter les différents usagers lors de la réalisation de leur activité, en accord avec les résultats attendus de la mesure, mais aussi de façon plus inattendue. En effet, chaque usager peut avoir connaissance ou pas de la mesure, adopter ou pas l'attitude attendue, tandis que les interactions entre usagers peuvent avoir un rôle à jouer dans le résultat d'ensemble (par mimétisme, ou selon l'attitude face à la congestion). Chaque usager peut par exemple décider de modifier son comportement, en changeant de zone ou en arrêtant son activité. La révélation des attitudes susceptibles d'être adoptés par l'usager peut alors servir à évaluer, de manière *ex-ante*, l'efficacité d'une mesure de gestion.

Justement, la modélisation des SMA présentée plus haut permet de représenter ces différents comportements, en mobilisant les outils du langage UML. Cette approche permet ici d'appréhender les effets de l'instauration d'une mesure de gestion sur un usager, en réalisant divers diagrammes UML. Pour cette étude, la réalisation de ces diagrammes se fait en deux étapes : (1) le choix des mesures de gestion à analyser et (2) la co-construction des diagrammes à partir de dires d'experts.

# Les diagrammes UML

## Diagramme de classe

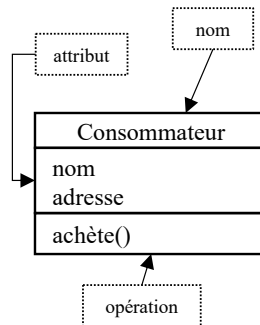
### Objectif

Ce diagramme est le plus courant pour représenter les systèmes orientés objets. Il montre les interactions entre des classes à travers une vision statique du système.

### Objets

**Classe** : un ensemble d'objets définis par les mêmes caractéristiques :

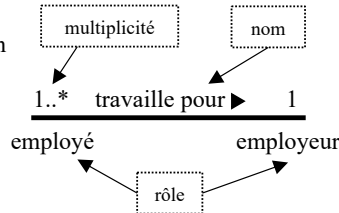
- **nom** : désigne le nom de la classe
- **attribut** : définit par un nom et une valeur (pas obligatoire) spécifiant de l'information spécifique à l'objet
- **opération** : liste des comportements que la classe peut adopter ou des réponses face à des événements



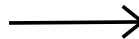
### Relations

**Association** : symbolise la connexion entre deux objets, possible de détailler le lien par des « décorations » :

- **nom** : décrit la nature de la relation
- **rôle** : rôle joué par la classe dans l'association
- **multiplicité** : nombre d'objets connectés à l'association



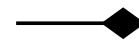
**Association avec navigation** : précise, si nécessaire, le sens de la relation entre deux objets



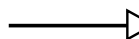
**Agrégation** : relation d'appartenance d'une classe à une autre



**Composition** : agrégation renforcée entre deux classes, une classe ne peut pas « vivre » sans l'autre



**Généralisation** : relation entre un objet général (« parent ») et un objet spécifique (« enfant »), héritage par l'« enfant » de la structure et du comportement du « parent » en plus de ses propres structure et comportement.



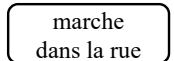
## Diagramme d'activité

### Objectif

Ce diagramme représente une séquence d'actions, allant d'un état initial à un état final. Il montre une vision dynamique du système.

### Objets

**Etat d'action** : représente l'exécution d'une action



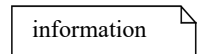
**Etat initial** : début de l'activité



**Etat final** : fin de l'activité



**Note** : signifie une description, un commentaire ou une remarque, liée à une action, ne résultant pas du choix d'un agent

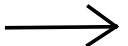


### Relations

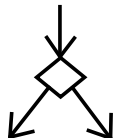
**Association** : relation entre un état d'action et une note



**Transition** : représente le passage d'une action à une autre, lorsque la première est terminée



**Branchement** : représente des chemins alternatifs entre deux états d'action, le chemin est choisi selon une expression booléenne



Références :

- Booch, G., Rumbaugh, J. and Jacobson, I. (1998) The Unified Modeling Language User Guide. Addison Wesley, p. 512.
- Müller, J.-P. and Bommel, P. (2007) 'An introduction to UML for modeling in the human and social sciences', Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences, pp. 273–294.

**Figure 7** : Les diagrammes UML utilisées dans cette étude

(réalisation personnelle d'après (Booch, Rumbaugh and Jacobson, 1998; Müller and Bommel, 2007))

Actuellement, plusieurs mesures de gestion visant les usages marins existent dans le GM, à la faveur des divers organes de gestion existant sur ce site (voir Partie I). Par exemple, une limite de 8 000 places de mouillages pour bateaux a été mise en place (DDTM56, 2006), la surface de concessions conchylicoles ne doit pas dépasser les 1 650 hectares (DDTM56, 2006) ou l'installation de mouillages écologiques destinés aux clubs de plongée (Beuret, 2019). Pour cet exercice, il est question de s'intéresser aux mesures de gestion pouvant être mise en application par le syndicat mixte, gestionnaire du PNR du GM. Ce gestionnaire a la possibilité d'instaurer des mesures pour protéger les habitats marins. C'est pourquoi nous avons sollicité l'équipe du PNR pour échanger sur les mesures de gestion pertinentes à étudier.

Après avoir choisi les mesures de gestion, il est alors possible de les modéliser grâce aux diagrammes UML. Leur construction suit un processus itératif et participatif. Ces diagrammes sont construits en amont des entretiens avec les experts scientifiques, en se basant sur les connaissances acquises sur le SES du GM grâce à la littérature étudiée et aux entretiens déjà réalisés. Ensuite, les diagrammes sont présentés à des experts scientifiques pour être discutés et modifiés (voir annexe 1). Les diagrammes UML ne visent pas l'exhaustivité, chaque information présente dans le diagramme est justifiée. De fait, il y a une recherche de précision dans le langage UML utilisé et dans le choix des informations. Le diagramme de classe est construit en premier afin d'obtenir une vision globale du système, avant d'être affiné par le(s) diagramme(s) d'activité(s). Les diagrammes sont conçus grâce au logiciel *astah UML*.

## 2. Résultats

Plusieurs mesures de gestion ont ainsi été étudiées afin de modéliser les comportements possibles de différents usagers du GM.

### a) Les mesures de gestion

L'étude du SES a révélé plusieurs enjeux de gestion autour des vasières et des herbiers de zostères. Ces habitats sont en interaction forte avec plusieurs activités, la pêche à pied pour la vasière et la plaisance pour la zostère. Ce résultat s'est trouvé confirmé lors d'un entretien avec les chargés de mission du PNR. Les mesures de gestion à analyser doivent permettre de préserver ces habitats. Deux mesures de gestion ont alors été retenues pour cette approche, l'installation de mouillages écologiques pour les bateaux de plaisance à proximité d'une île du Golfe, et la mise en place d'une jachère pour la pêche à pied récréative de palourde. Seuls les diagrammes portant sur la seconde mesure seront détaillés dans cette étude, les autres sont disponibles en annexes 12 et 13.

La première mesure choisie concerne l'île Ilur, une île publique située au sud de l'île d'Arz (voir figure 1). Dans le GM, le débarquement est autorisé sur toutes les îles, mais il est interdit de se déplacer en dehors de l'estran sur les îles privés. L'île d'Ilur attire alors les plaisanciers, qui peuvent se déplacer librement sur toute l'île. Toutefois, cette île présente de grands herbiers de zostères, marine et naine, au sud-est. Les bateaux peuvent alors s'y ancrer et potentiellement abîmer la zostère. Pour remédier à cela, le PNR a créé une ZMEL<sup>5</sup> et installé 5 mouillages collectifs et écologiques à cet endroit, pouvant accueillir jusqu'à 15 bateaux en même temps. Cette mesure concerne les bateaux de moins de 7 mètres, les plus grands bateaux devant alors

---

<sup>5</sup> Zone de Mouillages et d'Équipements Légers

s'ancrer en dehors de la ZMEL. Mais il n'y a pas d'obligation à s'amarrer à ces mouillages pour un bateau de 7 mètres, à moins qu'il se trouve dans la ZMEL.

La seconde mesure concerne la pêche à pied, un usage répandu dans le GM. Cette activité peut se pratiquer de manière professionnelle, en disposant d'une autorisation du CDPMEM du Morbihan, ou de manière récréative. La pêche se pratique à marée basse sur plusieurs zones du GM, en fonction de l'espèce visée. Concernant la pêche de la palourde, celle-ci s'effectue sur les vasières, situées à l'est du Golfe, au sein du gisement classé de palourdes (voir annexe 11). En termes de mesures de gestion, le PNR du GM ne peut influencer que sur la pêche récréative. La pêche récréative peut se pratiquer dans toutes les zones du gisement classé de palourdes sauf les zones 3, A2N et A2S, réservées à la pêche professionnelle (voir annexe 11). Il existe déjà des interdictions de pêche pour protéger la zostère et les oiseaux. Entre 2013 et 2017, le projet Life Pêche à pied de loisir a permis la sensibilisation de milliers de pêcheurs dans le GM, notamment grâce à la distribution gratuite de réglettes de sensibilisation (Mannaerts, Amice and Souche, 2018). Celles-ci comportent la réglementation en vigueur (quota, taille) concernant les ressources halieutiques et permettent au pêcheur de mesurer les espèces capturées. Cependant, d'après le PNR, cette action se révèle coûteuse en temps et en personnel, devant être répétée chaque année pour informer les nouveaux touristes et ne vise pas directement la préservation de la vasière. Actuellement, une alternative envisagée est la mise en place d'une jachère sur la vasière nue. Celle-ci peut être instaurée sur une certaine zone et pendant une durée limitée pour préserver la vasière de l'activité de pêche. Cette mesure peut alors amener le pêcheur récréatif à réaliser son activité différemment, en modifiant son comportement. Plusieurs diagrammes sont ainsi réalisés.

#### b) Le diagramme de classe

Ce diagramme représente les interactions entre le pêcheur à pied récréatif et diverses composantes pendant son activité de pêche (voir figure 8). L'objet central du diagramme est donc le pêcheur, qui dispose de plusieurs attributs et actions. Chaque pêcheur à pied dispose d'une fréquence de pratique de pêche et d'une perception d'abondance de la ressource halieutique. Il peut, ou non, utiliser un outil de pêche, connaître la réglementation, la respecter. On lui attribue également une sensibilité face à la congestion, censée représenter l'influence de la fréquentation sur son choix de spot de pêche. Enfin, chaque pêcheur dispose d'un nombre de prises associées.

Les actions du pêcheur sont également variées : il piétine la vasière en se déplaçant dessus, il a la possibilité d'utiliser une réglette de sensibilisation (pour mesurer les ressources halieutiques) et enfin il prélève des ressources. Il peut également interagir avec la zostère, en l'arrachant ou la piétinant, étant donné sa présence sur les vasières. Ses caractéristiques peuvent varier selon le profil du pêcheur. Ce dernier peut être un résident permanent du Golfe ou un touriste. La connaissance du Golfe peut varier selon le profil, ce qui peut impacter le choix du spot de pêche et la capacité individuelle à récolter des ressources intéressantes.

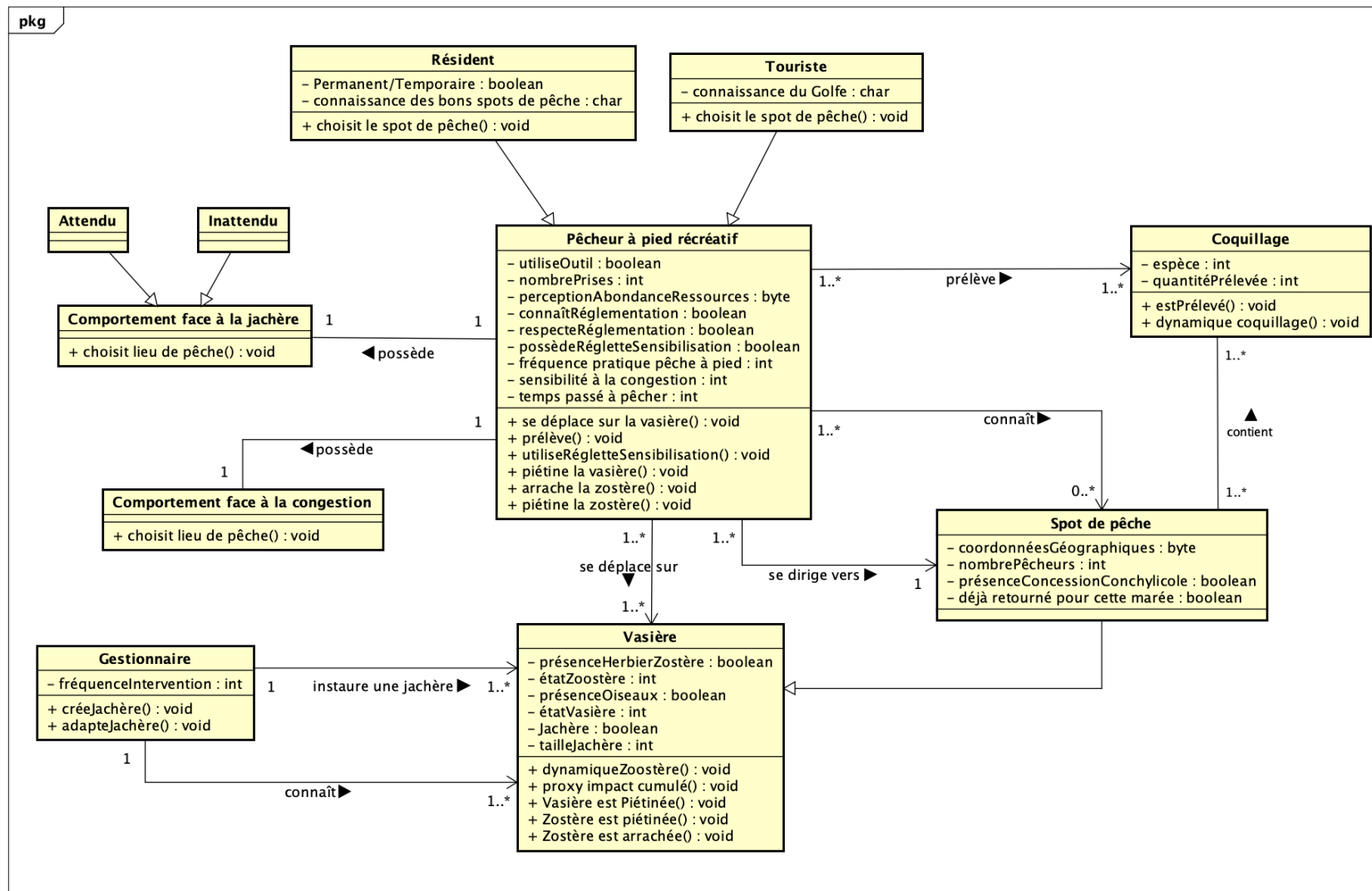


Figure 8 : Diagramme de classe - Instauration d'une jachère sur un spot de pêche à pied récréative

En réalisant son activité, le pêcheur interagit de plusieurs manières avec l'environnement. Premièrement, il se déplace sur une ou plusieurs vasière(s) pour se diriger vers un spot de pêche. Ce dernier peut être décrit par des coordonnées géographiques et par un nombre de pêcheurs à un moment précis. Une concession conchylicole peut se trouver sur ce spot de pêche, limitant la zone de pêche. En effet, il est interdit de pêcher à pied à moins de 15 mètres d'une concession conchylicole dans le GM (DDTM56, 2006). De plus, la pêche à la palourde ne peut se réaliser qu'à marée basse, limitant l'activité dans le temps. La vasière ne peut alors pas être retournée indéfiniment. Ainsi, l'arrivée sur une vasière déjà retournée peut influencer le pêcheur quant à son choix de spot de pêche.

Ce spot de pêche fait partie de la vasière et contient des coquillages. Les coquillages sont prélevés par les pêcheurs. La quantité prélevée peut alors varier selon le pêcheur. L'espèce visée est la palourde, mais il peut y avoir d'autres espèces présentes sur ce spot. La dynamique écologique des coquillages est importante pour évaluer l'impact de la pêche.

La vasière, quant à elle, se caractérise par un état écologique, susceptible de varier avec la fréquentation humaine. De plus, elle peut accueillir de la zostère, qui dispose également d'un état écologique et d'une dynamique de croissance propre. Il peut également y avoir des oiseaux, qui se reposent et/ou s'alimentent sur la vasière. À l'occasion du prélèvement de la palourde par le pêcheur, la vasière est piétinée. Il peut également impacter la zostère en la piétinant et/ou en l'arrachant. Un proxy des impacts cumulés peut être précisé pour évaluer les différentes actions : de pêche, de piétinement, etc. Enfin, la vasière peut être associée à une jachère d'une certaine taille.

La jachère correspond à une mesure de gestion interdisant la pêche à un certain endroit pendant un temps limité. Étant donnée sa connaissance des vasières, le gestionnaire peut y instaurer une jachère. Dans le cas du GM, le gestionnaire serait le PNR. Dans notre représentation, le gestionnaire intervient sur le terrain à une certaine fréquence restant à définir et a la possibilité de créer et d'adapter la jachère. Toutefois, il est important de préciser que ce gestionnaire ne peut intervenir que sur la pêche à pied récréative.

Enfin, chaque pêcheur à pied récréatif possède divers comportements. En premier lieu, il a un comportement face à la congestion. Cela peut l'inciter à changer de spot de pêche, s'il est trop fréquenté. En deuxième lieu, il possède un comportement face à la jachère, qui peut se traduire par plusieurs formes. Ce comportement peut dépendre de sa connaissance de la réglementation et donc sa capacité à la respecter, le profil du pêcheur peut également influencer, tout comme sa connaissance du Golfe. Enfin, face à la mesure de gestion, le pêcheur peut adopter un comportement attendu, en référence à des enquêtes ou d'après les connaissances du gestionnaire, ou inattendu.

### c) Le diagramme d'activité

Ce diagramme vise à représenter l'activité de pêche à pied récréative de palourde à travers une suite d'actions chronologiques, conditionnées par des critères de décision (voir figure 9). L'ordre de lecture se fait du haut vers le bas, en commençant par le rond noir, représentant l'état initial.

Le pêcheur commence son activité en se dirigeant vers un spot de pêche, pouvant différer selon sa connaissance de la réglementation. Cette dernière fait référence à l'indication d'une zone de jachère sur la vasière. S'il ne la connaît pas, il peut alors se rendre sur un spot de pêche

mis en jachère, au contraire du pêcheur qui la connaît et donc peut respecter la mesure. En allant sur ce spot, le pêcheur peut impacter indirectement le milieu, en piétinant la vasière et la zostère, si cette dernière est présente.

En arrivant sur le spot de pêche, le pêcheur décide alors de rester ou de changer de spot en fonction de la fréquentation du spot. Ce critère dépend de la sensibilité et du comportement du pêcheur face à la congestion. S'il décide de changer de spot, il retourne à l'état initial, sinon il creuse un trou pour prélever la palourde. Cette action est réalisable avec ou sans outil, en présence de zostère, avec potentiellement un arrachage de cette dernière.

Suite au prélèvement de la palourde, plusieurs nœuds de décision apparaissent pour le pêcheur. Le premier concerne sa connaissance de la réglementation vis-à-vis de la palourde. Dans le GM, il existe un quota de captures par pêcheur de 100 palourdes par personne, d'une taille minimum de 3,5 cm pour la palourde japonaise et de 4 cm pour la palourde européenne (Morineaux, 2019). Si le pêcheur connaît la réglementation, il peut choisir de la respecter ou de ne pas la respecter. En revanche, s'il ne la connaît pas, il se trouve dans une position comparable à un pêcheur ne respectant pas la réglementation. De fait, deux chemins de décision se distinguent dans l'activité.

D'une part, un pêcheur, respectant la réglementation, mesure la palourde pour connaître sa taille. Cette action peut d'ailleurs être effectuée avec une réglette de sensibilisation. Si la taille de la palourde est conforme à la réglementation, il la garde. Sinon, il la repose. D'autre part, un pêcheur peut ne pas respecter la réglementation ou ne pas la connaître. Ainsi, il décide de garder la palourde en fonction d'un jugement visuel. S'il la juge assez grosse, il la garde. Sinon, il la repose.

Lorsque le pêcheur repose la palourde, il retourne à l'état initial pour recommencer son activité de pêche. S'il garde la palourde, il peut continuer à pêcher ou rentrer chez lui. Ce choix varie selon le pêcheur : nombre suffisant de palourdes, atteinte du quota ou heure de marée dépassée. Si l'un de ces critères est vérifié, l'état final est atteint, entraînant la fin de l'activité.

Enfin, les résultats des deux approches de modélisation ont été présentés aux chargés de mission du PNR du GM le 28 juillet (voir annexe 1).





## IV. Discussion

### 1. La modélisation du socio-écosystème

La recours à la modélisation qualitative permet une représentation globale du SES du GM. Le graphe orienté permet de visualiser les multiples interactions référencées dans les « documents de gestions ». Les habitats marins disposent de liens variés avec les ressources naturelles, caractérisant leur importance au sein des écosystèmes marins. En tant que support de biodiversité, les habitats affectent positivement plusieurs usages comme les activités primaires. Toutefois, certains usages peuvent s'avérer néfastes pour la durabilité des habitats, notamment la plaisance avec l'impact des ancres. L'étude des scénarios traduit des réponses positives et négatives des habitats face à des perturbations du système. Les modèles ne cherchent pas à quantifier les pressions subies par les habitats. En revanche, ils peuvent révéler l'origine des impacts et donner une idée de leurs conséquences, permettant de mieux anticiper les mesures de conservation.

Une simplification du modèle a été nécessaire pour faciliter la compréhension visuelle et favoriser la stabilité du système lors de l'analyse mathématique. La méthodologie choisie doit être continuellement suivie lors du processus de construction. Cette approche ne cherche pas l'exhaustivité mais vise la représentation des liens structurants du SES. Cela peut induire de ne pas représenter certaines interactions avérées, ce qui peut apparaître comme contre-intuitif pour les parties prenantes interrogées. A titre d'exemple, il a été décidé d'associer les variables « Pêche professionnelle » et « Pêche récréative ». Malgré leurs différences évidentes dans le GM (engins utilisés, réglementations, etc.), les interactions sont équivalentes sur le modèle. Ainsi, leur regroupement permet de faciliter l'analyse mathématique en évitant d'avoir des liens référencés deux fois. Cet exemple traduit les critères méthodologiques à respecter pour assurer la mise en œuvre de la modélisation. En adoptant une approche participative, ces critères peuvent être mieux compris par les acteurs locaux, favorisant l'acceptabilité sociale du modèle.

Le caractère qualitatif des interactions apparaît comme une vision simplifiée de la réalité lors des entretiens. D'une part, cette simplification permet de comprendre facilement et rapidement le graphe pour une personne n'ayant pas participé à sa conception. La catégorisation des variables et la légende des interactions facilitent la lecture. D'autre part, les liens sont de même épaisseur dans le modèle *initial*, signifiant que chaque interaction a la même importance. Ainsi, les variables ayant beaucoup de liens semblent néfastes au SES en impactant beaucoup de variables.

L'approche centrée sur l'utilisateur donne une vision spécifique du SES vis-à-vis de deux enjeux de gestion en lien avec les habitats marins. Les diagrammes UML portant sur l'activité de pêche à pied de palourde comme sur l'accès par bateau à une île du GM révèlent les impacts subis par les habitats marins et leur importance en tant que supports d'activités. Les impacts ne résultent pas d'un processus intentionnel de l'utilisateur, mais leur existence nécessite d'être appréhendée pour améliorer leur conservation. Les vasières comme la zostère peuvent être piétinées lors de l'activité de pêche. L'herbier peut se voir abimé lors de la pêche d'une palourde ou par l'ancre d'un bateau. Toutefois, ces impacts peuvent se répéter lors de l'activité ou lors d'une hausse de fréquentation en fonction du comportement de l'utilisateur.

Toutefois, seules deux activités ont été modélisées dans ces diagrammes. En effet, leur construction nécessite du temps, notamment avec une approche participative. Pour cette étude,

la co-construction s'est faite avec des experts scientifiques. Il aurait été utile de solliciter des usagers en complément pour recueillir leur perception. De plus, il n'est pas possible d'être exhaustif avec ces modèles. La finalité de ces derniers étant le SMA, un surplus d'informations non-essentiels implique une perte de précision dans l'analyse et une quantité de données importantes à récolter. Aussi chaque information présente dans les diagrammes fait l'objet d'un arbitrage qui devrait être fait avec les parties prenantes.

Toutefois, la mise en œuvre de ces approches de modélisation nécessite de respecter une méthodologie rigoureuse afin d'exploiter les résultats par la suite. La simplification de la réalité induite par la modélisation implique d'effectuer des choix sur le nom des variables, les données utilisées ou les scénarios analysés. Il n'est pas possible de répertorier toutes les informations dans un modèle, un effort de simplification est nécessaire.

## 2. Le partage de connaissances

Par définition, les SES visent à refléter des processus hétérogènes. Leur étude nécessite de faire intervenir plusieurs disciplines scientifiques afin de comprendre les interactions entre les divers compartiments du système. Ainsi, l'approche interdisciplinaire est privilégiée mais peut s'avérer compliquée à mettre en œuvre. En ce sens, la démarche participative pour construire les modèles permet la construction d'une culture commune et l'émergence d'une vision « partagée » du problème. De plus, le graphe orienté conceptualise les interactions de manière binaire (positive ou négative) ce qui facilite la lecture de processus complexes. D'abord parce que certaines interactions peuvent faire référence à des processus éloignés. Par exemple : les vasières nues favorisent la biodiversité marine en servant de zone de nourricerie ou d'alimentation, correspondant à une interaction relevant de l'écologie. Sur le même graphe, l'interaction entre le transport maritime et les activités pédestres représente une situation de marché. L'offre de transport est favorisée par la demande des promeneurs pour se rendre sur les îles du GM, appartenant à l'économie.

L'utilisation du langage UML facilite également l'interdisciplinarité. Celui-ci fournit un langage commun à toutes les disciplines (Booch, Rumbaugh and Jacobson, 1998). Les modèles utilisent des termes génériques et peuvent être facilement assimilés par des chercheurs connaissant ce langage, même s'ils n'ont pas participé à la construction des modèles. Néanmoins, pour quelqu'un ne connaissant pas ce langage, un temps d'apprentissage est nécessaire afin de connaître les spécificités de chaque élément. Le caractère qualitatif des approches de modélisation vise également à faire le lien entre la recherche et les acteurs locaux.

La simplification prônée par la modélisation qualitative favorise aussi le dialogue entre les chercheurs et les parties prenantes. Celui-ci est renforcé en intégrant ces dernières dès la construction des modèles. L'inclusion des parties prenantes dans le processus de modélisation permet d'acquérir des connaissances empiriques sur le SES, favorisant la compréhension des enjeux et des spécificités locales (Prell *et al.*, 2007). Pour cette étude, leur sollicitation s'est effectuée après la réalisation d'un premier modèle, mettant en lumière de la méfiance et de l'incompréhension par rapport à la méthodologie utilisée. Si elle est trop tardive, l'implication des parties prenantes dans la démarche peut être considérée comme non essentielle, réduisant le partage de connaissances.

Toutefois, la réalisation du modèle en amont permet de gagner du temps lors de sa diffusion mais peut être perçue comme une représentation figée et définitive. Cette méthode peut faciliter la discussion, en se concentrant sur les interactions et les variables présentes sur le graphe. Cela

permet d'avoir un modèle de base sur lequel il est possible de travailler, réduisant le temps nécessaire à la co-construction. Mais, elle peut également faire apparaître un caractère inéluctable. Étant déjà réalisé, il n'est pas nécessaire de le modifier pour certains, entraînant une certaine méfiance des parties prenantes vis-à-vis de la future utilisation du graphe. De plus, le modèle donne une version statique du SES. Ainsi, il ne permet pas de voir les progrès réalisés dans le GM, notamment grâce au SMVM sur la résolution des conflits d'usage. L'idéal serait d'inclure la vision de chaque partie prenante dans le modèle, ce qui s'avère difficilement réalisable dans la pratique (Collier *et al.*, 2011).

L'intégration des parties prenantes dans la construction peut néanmoins servir de dialogue entre elles. La conceptualisation des interactions au sein du SES permet de montrer les intérêts de chacun et prévenir les conflits. Les termes génériques favorisent, là encore, le partage de connaissances entre les acteurs. Le graphe orienté donne une observation générale sur les impacts induits par chacun, pouvant être néfaste ou vertueuse pour la résilience du système. Ainsi, les scénarios soumis dans l'analyse de perturbations peuvent être choisis par les acteurs, afin de regarder les effets provoqués par le développement d'un usage et la diminution de la qualité de l'eau. Les diagrammes UML peuvent faire prendre conscience aux usagers de leur impact, même involontaire, sur le milieu naturel lors de leur activité.

Enfin, les modèles peuvent améliorer la conservation des habitats marins en servant d'appui aux gestionnaires. En présentant les résultats de l'étude à ces derniers, il a été évoqué d'utiliser les modèles, notamment les diagrammes UML, comme des outils de communication. Leur diffusion permettrait de faciliter la compréhension par les usagers des mesures de gestion mises en place. Ces diagrammes représentent par ailleurs une méthode d'évaluation (ex-post et ex-ante) de mesures de gestion. En effet, pour cette étude, il a été choisi de regarder une mesure actuelle, les mouillages écologiques à côté de l'île Ilur, et une mesure potentielle, la jachère pour la pêche à pied récréative. La modélisation basée sur l'agent permet de conceptualiser le comportement des usagers et d'envisager ses réponses face aux mesures en question. Aussi, cela peut mettre en évidence les données à récolter afin de quantifier l'évaluation de ces mesures de gestion. Les résultats obtenus dans cette étude se révèlent intéressants pour le futur en termes de communication de projets de recherche. Les réponses face aux perturbations présentés avec des couleurs ou les diagrammes UML renvoient des informations visuelles et simples, facilement compréhensibles. Les modèles peuvent alors servir d'outils pédagogiques permettant une meilleure compréhension de la conservation des habitats marins.

### 3. L'enjeu des données

L'étude des SES peut être remise en question en cas d'absence de données pour analyser les interactions. Cela est particulièrement vrai en raisonnant avec des données quantitatives. L'hétérogénéité des composantes d'un SES nécessite un nombre important de ces données, dont l'existence et la disponibilité varient (Etienne, 2010). Certains usages, comme la pêche ou la conchyliculture, disposent de multiples données quantitatives, récoltées pour contrôler le nombre de captures ou la qualité sanitaire du milieu. Cela n'est pas le cas pour d'autres usages, notamment les activités récréatives. Il est ainsi difficile de les comparer dans une analyse quantitative, faute d'hétérogénéité des données. En adoptant une démarche qualitative, cette étude a permis de simplifier la représentation et de récolter des informations variées pour étudier le SES.

La modélisation qualitative permet d'étudier de systèmes complexes en regardant les boucles de réponses émises entre les variables suite à une perturbation de celles-ci. Aucune

donnée quantitative n'est nécessaire pour réaliser cela. Seules des interactions positives ou négatives entre les variables sont spécifiées, en référence aux données qualitatives récoltées et aux connaissances apportées par les parties prenantes. Cette approche permet alors d'obtenir des résultats quant à l'évolution des composantes du SES vis-à-vis des enjeux du GM. Le caractère qualitatif de cette approche vise aussi l'intégration de processus variés dans le modèle, permettant de tester des scénarios (perturbations) très différents. Ils peuvent correspondre au développement d'un usage, à la diffusion d'une pollution ou à la réduction d'un habitat marin. Ainsi, il n'existe pas de limite dans l'analyse des scénarios. Toutefois, ces derniers doivent être cohérents pour obtenir des résultats intéressants et utilisables pour la gestion de l'environnement. La conception des scénarios par les parties prenantes est une solution pour favoriser l'acceptabilité des résultats, grâce à la connaissance des enjeux locaux (Tiller *et al.*, 2016).

La modélisation basée sur l'agent, à l'instar des SMA, nécessite une quantité importante de données pour décrire : les options comportementales des agents, le processus décisionnel des agents et les impacts de leurs actions sur l'environnement et les autres agents (Mehryar *et al.*, 2019). Ainsi, la construction de diagrammes UML met en lumière le choix des données à récolter pour mettre en œuvre la modélisation du SMA. Les diagrammes de classe se définissent par des attributs et des actions pour chaque classe, fournissant des informations précieuses pour un gestionnaire. En effet, ils permettent d'identifier les données nécessaires en vue d'une utilisation des diagrammes dans un SMA. À titre d'exemple, le pêcheur à pied récréatif pratique son activité à une certaine fréquence, a une connaissance (ou non) de la réglementation et dispose d'une certaine sensibilité face à la congestion. Ainsi, pour connaître ces informations, des enquêtes auprès des usagers peuvent être menées par le gestionnaire, pour déceler des profils-types de pêcheur ou de plaisancier, aboutissant à des probabilités. Les diagrammes UML servent alors d'étape préliminaire à l'évaluation quantitative des mesures de gestion visant à préserver les habitats marins.

## Conclusion

La mobilisation de deux approches de modélisation a permis d'analyser le socio-écosystème du golfe du Morbihan afin de mieux appréhender la conservation des habitats marins. L'approche adoptée se fonde sur une démarche participative en construisant les modèles avec des experts scientifiques et des acteurs locaux. L'objectif de cette étude ne réside pas tant sur les résultats obtenus mais plutôt sur le processus méthodologique entrepris. Ainsi, les modèles ne sont pas directement destinés à se transformer en mesure contraignante pour les usagers. Mais, ils représentent des outils d'analyse facilitant la compréhension de la dynamique du socio-écosystème en regroupant des informations hétérogènes.

La modélisation qualitative donne une vision globale en s'intéressant à toutes les composantes (économiques, sociales, écologiques, etc.) du système. Alors que la modélisation centrée sur l'agent permet une vision plus spécifique en se focalisant sur la réalisation d'une activité par un usager. De ce fait, la première approche montre les réponses potentielles du socio-écosystème face à un changement d'une ou plusieurs composante(s) du système (développement d'une activité, pollution chimique, changement climatique, etc.). La seconde questionne le comportement des usagers en faisant apparaître diverses décisions permettant de détailler les impacts induits sur les habitats marins. Dans les deux cas, la modélisation permet de conceptualiser des systèmes complexes en simplifiant la réalité.

Pour répondre à la problématique, le choix de l'approche de modélisation à adopter dépend de plusieurs facteurs. L'approche centrée sur le socio-écosystème est à privilégier en cas de disponibilité réduite de données qualitatives et homogènes. Elle donne une vision globale des pressions subies par les habitats marins, au détriment de la précision. L'approche centrée sur l'utilisateur s'avère intéressante pour analyser un cas précis de pression sur les habitats. Toutefois, elle nécessite beaucoup de données quantitatives pour analyser un système multi-agent et ainsi obtenir des résultats sur l'efficacité d'une mesure de gestion. Néanmoins, cette étude a mis en avant la complémentarité de ces approches, permettant d'appréhender la conservation des habitats marins selon plusieurs perspectives.

S'inscrivant dans le projet LIFE MarHa<sup>6</sup>, ce travail a permis d'acquérir des connaissances sur les habitats marins du golfe du Morbihan et leurs interactions avec les usages. Un atelier TRIAGE portant sur les vasières aurait dû avoir lieu au cours de l'étude. Cet atelier vise à choisir les services écosystémiques à évaluer et de quelle manière, en concertation avec des parties prenantes (Pendleton *et al.*, 2015). Ainsi, l'acquisition de connaissances sur les vasières aurait été facilitée. Toutefois, l'atelier prendra place après la rédaction de ce mémoire, permettant de poursuivre les actions amorcées avec cette étude.

---

<sup>6</sup>Un projet lancé en 2018 dans les sites Natura 2000 français pour diagnostiquer, évaluer et améliorer les connaissances sur les habitats marins via l'étude des services écosystémiques.

## Bibliographie

- Angst, B. *et al.* (2014) *Synthèse des connaissances sur les herbiers de zostères en appui à leur gestion dans le golfe du Morbihan*. AMURE et SIAGM, p. 138.
- Barreteau, O. *et al.* (2003) 'Our companion modelling approach', *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2). Available at: [http://publications.cirad.fr/une\\_notice.php?dk=545226](http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=545226).
- Beuret, J.-E. (2019) 'Des concertations et médiations pour concilier les usages du Golfe du Morbihan : réalités, enjeux et bénéfices', *Sciences Eaux & Territoires*, 53, p. 6.
- Booch, G., Rumbaugh, J. and Jacobson, I. (1998) *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison Wesley.
- Bousquet, F. (2016) 'Uses of Agent-Based Models for socio-ecosystems: a panorama'.
- Bousquet, F. and Le Page, C. (2004) 'Multi-agent simulations and ecosystem management: a review', *Ecological Modelling*, 176(3), pp. 313–332. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011.
- Cadoret, A. (2011) 'Quelle durabilité des formes de régulation des conflits littoraux ?', *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, [En ligne](Hors-série 9). doi: 10.4000/vertigo.10946.
- CEREMA (2019) *Rapport d'évaluation environnementale - Fiches AFOM*, p. 27.
- Cléro, O. (2020) 'Huîtres contaminées. Des mesures pour éviter d'autres crises', *Ouest-France (site web)*. Available at: [https://nouveau.europresse.com/Link/AGROCAMPUST\\_1/news·20200105·OFW·adb7600f-5f5a-4083-9cd0-d5fa5f0f8146](https://nouveau.europresse.com/Link/AGROCAMPUST_1/news·20200105·OFW·adb7600f-5f5a-4083-9cd0-d5fa5f0f8146).
- Collier, N. *et al.* (2011) 'Science for action: the use of scoping models in conservation and development', *Environmental Science & Policy*, 14(6), pp. 628–638. doi: 10.1016/j.envsci.2011.05.004.
- ComMod, C. (2005) 'La modélisation comme outil d'accompagnement', *Natures sciences sociétés*, 13(2), pp. 165–168.
- Cosson, T., Mézac, A. and Picard, L. (ONCFS) (2013) *Document d'objectifs des sites Natura 2000 ZSC « Golfe du Morbihan – côte ouest de Rhuys » (FR 53 000 89) et ZPS « Golfe du Morbihan » (FR 53 100 86)*. Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Golfe du Morbihan et Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, p. 533.
- Dambacher, J. M. *et al.* (2003) 'Qualitative stability and ambiguity in model ecosystems', *The American Naturalist*, 161(6), pp. 876–888.
- Dambacher, J. M. *et al.* (2009) 'Qualitative modelling and indicators of exploited ecosystems', *Fish and Fisheries*, 10(3), pp. 305–322. doi: 10.1111/j.1467-2979.2008.00323.x.

Dambacher, J. M., Li, H. W. and Rossignol, P. A. (2002) 'Relevance of community structure in assessing indeterminacy of ecological predictions', *Ecology*, 83(5), pp. 1372–1385.

Dambacher, J. M., Li, H. W. and Rossignol, P. A. (2003) 'Qualitative predictions in model ecosystems', *Ecological Modelling*, 161(1), pp. 79–93. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00295-8.

DDTM56 (2006) *Schéma de Mise en Valeur de la Mer du Golfe du Morbihan*, p. 90.

DDTM56 (2015) *Rapport d'évaluation environnementale - Diagnostic du SMVM actuel et bilan*. Dossier d'enquête publique, p. 72.

DDTM56 (2019) *Schéma de Mise en Valeur de la Mer du Golfe du Morbihan - Rapport du projet de SMVM révisé*, p. 126.

Denis, P. (1980) *Ecologie et productivité des herbiers de zostères du golfe du Morbihan*. Ministère de l'environnement et du cadre de vie. Direction de la protection de la nature. Société pour l'Etude et la Protection de la Nature en Bretagne, p. 43.

Directive 79/409/CEE du Conseil du 2 avril 1979 concernant la conservation des oiseaux sauvages (JO L 103 du 25.4.1979, p. 1)

Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages (JO L 206 du 22.7.1992, p. 7)

Etienne, M. (2010) *La modélisation d'accompagnement*. Place of publication not identified: éditions Quae. Available at: <http://www.oopen.org/download?type=document&docid=1005364> (Accessed: 5 March 2020).

GIP Seine-Aval (2016) *Les vasières intertidales de l'estuaire de la Seine*. Fiche thématique, p. 6.

Golfe du Morbihan - Vannes agglomération (2020) *Schéma de cohérence territoriale - Livret I Diagnostic*. Rapport de présentation. Golfe du Morbihan - Vannes agglomération.

Halpern, B. S. *et al.* (2007) 'Evaluating and Ranking the Vulnerability of Global Marine Ecosystems to Anthropogenic Threats', *Conservation Biology*, 21(5), pp. 1301–1315. doi: 10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x.

Hare, M. (2011) 'Forms of Participatory Modelling and its Potential for Widespread Adoption in the Water Sector', *Environmental Policy and Governance*, 21(6), pp. 386–402. doi: 10.1002/eet.590.

Holland, J. H. (1995) *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Addison Wesley.  
Janssen, M. (2002) *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-agent Systems*. Edward Elgar Publishing.



- de Juan, S., Gelcich, S. and Fernandez, M. (2017) 'Integrating stakeholder perceptions and preferences on ecosystem services in the management of coastal areas', *Ocean & Coastal Management*, 136, pp. 38–48. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.11.019.
- Lacombe, C. (2019) *La pêche à la palourde dans le golfe du Morbihan*. Parc naturel régional du Golfe du Morbihan, p. 16.
- Le Page, C. (2017) *Simulation multi-agent interactive: engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social*. Habilitation à Diriger les Recherches. Université Pierre et Marie Curie. Available at: <http://agritrop.cirad.fr/583938/> (Accessed: 22 July 2020).
- Levins, R. (1968) *Evolution in Changing Environments: Some Theoretical Explorations*. Princeton University Press.
- Macal, C. M. and North, M. J. (2010) 'Tutorial on agent-based modelling and simulation', *Journal of Simulation*, 4(3), pp. 151–162. doi: 10.1057/jos.2010.3.
- Mannaerts, G., Amice, G. and Souche, Y. (2018) *Le Life Pêche à pied de loisir 2013 - 2017 - L'essentiel*. Rapport de vulgarisation. Agence française pour la biodiversité.
- Marzloff, M. P. *et al.* (2011) 'Exploring alternative states in ecological systems with a qualitative analysis of community feedback', *Ecological Modelling*, 222(15), pp. 2651–2662. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.03.040.
- Marzloff, M. P. *et al.* (2016) 'Modelling marine community responses to climate-driven species redistribution to guide monitoring and adaptive ecosystem-based management', *Global Change Biology*, 22(7), pp. 2462–2474.
- Mehryar, S. *et al.* (2019) 'From individual Fuzzy Cognitive Maps to Agent Based Models: Modeling multi-factorial and multi-stakeholder decision-making for water scarcity', *Journal of Environmental Management*, 250, p. 109482. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109482.
- Melbourne-Thomas, J. *et al.* (2012) 'Comprehensive evaluation of model uncertainty in qualitative network analyses', *Ecological Monographs*, 82(4), pp. 505–519. doi: 10.1890/12-0207.1.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and human well-being : Synthesis*. Washington, DC: Island press.
- Mongrue, R. *et al.* (2019) *Milieux marins et littoraux : évaluation des écosystèmes et des services rendus*. IFREMER - UBO - AFB. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00600/71260/>.
- Monnier, L. (2017) *Approche participative pour la modélisation qualitative de socio-écosystèmes conchylicoles dans le Golfe Normand-Breton*. Mémoire de Master 2. Rennes : Agrocampus Ouest: IFREMER - Agrocampus Ouest, p. 65.

Morineaux, M. (2019) *Conseils pratiques Morbihan*. Support d'information. Agence des aires marines protégées, Parc naturel régional du Golfe du Morbihan, p. 2.

Müller, J.-P. and Bommel, P. (2007) 'An introduction to UML for modeling in the human and social sciences', in Phan, D. and Amblard, F. (eds) *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*. Oxford : Bardwell Press, pp. 273–294.

ONCFS (2017) *RNCFS du golfe du Morbihan - Bilan d'activités 2017*. Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage.

Parc naturel régional du golfe du Morbihan, PNR GM. Fiche d'identité du Parc [En ligne]. Disponible sur : <https://www.parc-golfe-morbihan.bzh/fiche-didentite-du-parc/> (Consulté le : 27 Août 2020).

Parc naturel régional du golfe du Morbihan, PNR GM. Natura 2000 Golfe du Morbihan [En ligne]. Disponible sur : <https://www.parc-golfe-morbihan.bzh/natura-2000-golfe-du-morbihan/> (Consulté le : 27 Août 2020).

Pardo, S. *et al.* (2017) 'COSELMAR. Compréhension des socio-écosystèmes littoraux et marins pour la prévention et la gestion des risques. Bilan scientifique 2013-2017'. FRANCE.

Pendleton, L. *et al.* (2015) 'A triage approach to improve the relevance of marine ecosystem services assessments', *Marine Ecology Progress Series*, 530, pp. 183–193. doi: 10.3354/meps11111.

Prell, C. *et al.* (2007) 'If you have a hammer everything looks like a nail: traditional versus participatory model building', *Interdisciplinary Science Reviews*, 32(3), pp. 263–282.

Puccia, C. J. and Levins, R. (1985) *Qualitative Modeling of Complex Systems: An Introduction to Loop Analysis and Time Averaging*. Harvard University Press.

Schulze, J. *et al.* (2017) 'Agent-based modelling of social-ecological systems: achievements, challenges, and a way forward', *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20(2).

SIAGM (2010) *Diagnostic territorial - Horizon 2026*. Parc naturel régional du Golfe du Morbihan, p. 112.

SIAGM (2014) *Rapport de charte - Horizon 2029*. Parc naturel régional du Golfe du Morbihan, p. 142.

SMLS (2020) *Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques*. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Golfe du Morbihan et Ria d'Étel, p. 184.

Tiller, R. *et al.* (2016) 'Stakeholder Perceptions of Links between Environmental Changes to their Socio-Ecological System and their Adaptive Capacity in the Region of Troms, Norway', *Frontiers in Marine Science*, 3. doi: 10.3389/fmars.2016.00267.

UMS Patrinat (2019) *Résultats synthétiques de l'état de conservation des habitats et des espèces, période 2013-2018*. MNHN.

Urien M. (2014) Les principaux usages en mer dans le Golfe du Morbihan [document cartographique]. Le guide des bonnes pratiques. Parc naturel régional du Golfe du Morbihan

Urien, M. *et al.* (2015) *Des habitats en mouvement, les herbiers de zostère du golfe du Morbihan*. Plaquette d'information. AMURE et Parc naturel régional du Golfe du Morbihan, p. 6.

Varenne, F. and Silberstein, M. (2013) *Modéliser & simuler: épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation. Tome 1*. Paris: Editions Matériologiques. Available at: <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3330308> (Accessed: 21 August 2020).

## Annexes

## Table des annexes

|   |    |
|---|----|
| Annexe 1 : Liste des entretiens réalisés .....  | 43 |
| Annexe 2 : Évolution du graphe (avant les entretiens avec les parties prenantes) .....                | 44 |
| Annexe 2b : Évolution du graphe - Modèle <i>initial</i> .....   | 47 |
| Annexe 3 : Explication des variables du graphe .....  | 48 |
| Annexe 4a : Matrice d'interaction – Binaire .....   | 49 |
| Annexe 4b : Matrice d'interaction - Verbe.....  | 51 |
| Annexe 4c : Matrice d'interaction - Phrase.....   | 53 |
| Annexe 4d : Matrices d'interaction – Bibliographie.....   | 56 |
| Annexe 5 : « Sous-modèles » représentant chaque entretien avec les parties prenantes.....             | 57 |
| Annexe 6 : Catégorisation des interactions.....   | 61 |
| Annexe 7 : Synthétisation des modèles – Modèle <i>complet</i> .....                                   | 64 |
| Annexe 8a : Analyse mathématique – Modèle <i>complet</i> .....  | 65 |
| Annexe 8b : Analyse mathématique – Modèle <i>simplifié</i> .....                                      | 66 |
| Annexe 8c : Analyse mathématique – Modèle <i>eutrophisé</i> .....                                     | 67 |
| Annexe 9 : Scénarios pour l'analyse des perturbations.....  | 68 |
| Annexe 10 : Réponses du système face aux perturbations .....  | 69 |
| Annexe 11 : Cartographie du gisement classé de palourdes dans le golfe du Morbihan .....              | 70 |
| Annexe 12 : Diagramme de classe – Débarquement sur une île du golfe du Morbihan.....                  | 71 |
| Annexe 13a : Diagramme d'activité – Débarquement sur une île pour une embarcation nautique légère. 72 |    |
| Annexe 13b : Diagramme d'activité – Débarquement sur une île pour un grand bateau (>7m).....          | 73 |
| Annexe 13c : Diagramme d'activité – Débarquement sur une île pour un petit bateau (<7m).....          | 74 |

## Annexe 1 : Liste des entretiens réalisés

| Date    | Personnes présentes   | Type d'acteurs                       | Objet(s) de l'entretien  |
|---------|---|--------------------------------------|--|
| 25-mars | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Martin Marzloff <sup>3</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Présentation de la modélisation qualitative, co-construction du graphe   |
| 03-avr  | Johanna Ballé-Béganton <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Charlène Kermagoret <sup>1</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup> | Expert scientifique                  | Co-construction du graphe  |
| 10-avr  | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Manuelle Philippe <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Co-construction du graphe  |
| 15-avr  | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Thomas Cosson <sup>4</sup> , Juliette Herry <sup>4</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Gestionnaire, expert scientifique    | Co-construction du graphe  |
| 06-mai  | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Présentation de la modélisation UML  |
| 13-mai  | Jean-Claude Briens <sup>5</sup>   | Partie prenante                      | Co-construction du graphe  |
| 15-mai  | Thomas Cosson <sup>4</sup>  | Gestionnaire                         | Discussion de l'approche UML   |
| 19-mai  | Céline D'Hardivillé <sup>6</sup> , Elouan Meyniel <sup>6</sup>  | Partie prenante                      | Co-construction du graphe  |
| 25-mai  | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Co-construction des modèles UML  |
| 27-mai  | Stéphane Basck <sup>7</sup>   | Partie prenante                      | Co-construction du graphe  |
| 28-mai  | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Charlène Kermagoret <sup>1</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>       | Expert scientifique                  | Co-construction des modèles UML  |
| 04-juin | Béatrice Nivoy <sup>8</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>   | Expert scientifique, partie prenante | Co-construction du graphe  |
| 05-juin | Charlotte Badouel <sup>9</sup>  | Partie prenante                      | Co-construction du graphe  |
| 05-juin | Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Co-construction des modèles UML  |
| 10-juin | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Céline D'Hardivillé <sup>6</sup> , Elouan Meyniel <sup>6</sup> , Armand Qentel <sup>6</sup>                                       | Expert scientifique, partie prenante | Co-construction du graphe  |
| 12-juin | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Co-construction des modèles UML  |
| 16-juin | Martin Marzloff <sup>3</sup>  | Expert scientifique                  | Présentation du modèle, analyse mathématique   |
| 18-juin | Philippe Cier <sup>10</sup>   | Partie prenante                      | Co-construction du graphe  |
| 19-juin | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Co-construction des modèles UML  |
| 24-juin | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Martin Marzloff <sup>3</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Modification du graphe, création d'échelles d'intensité  |
| 29-juin | Madeleine Lebranchu <sup>11</sup>   | Partie prenante                      | Co-construction du graphe  |
| 02-juil | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Martin Marzloff <sup>3</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Finalisation définitive des graphes, discussion de l'analyse mathématique, choix des scénarii                    |
| 08-juil | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Finalisation des modèles UML   |
| 20-juil | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Manuelle Philippe <sup>1</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Présentation des graphes, discussion de l'analyse mathématique, choix des scénarii, présentation des modèles UML |
| 21-juil | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Catherine Boemare <sup>2</sup> , Elsa Mosseri <sup>2</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique                  | Présentation des graphes, discussion de l'analyse mathématique   |
| 28-juil | Frédérique Alban <sup>1</sup> , Thomas Cosson <sup>4</sup> , Juliette Herry <sup>4</sup> , Pierre Scemama <sup>1</sup>  | Expert scientifique, gestionnaire    | Présentation des graphes et des modèles UML, discussion de l'analyse mathématique                                |

<sup>1</sup>: UMR AMURE (IFREMER, UBO)

<sup>2</sup>: UMR CIRED (AgroParisTech, CIRAD, CNRS, École des Ponts, EHESS)

<sup>3</sup>: Laboratoire DYNeco/LEBCO (IFREMER)

<sup>4</sup>: Parc Naturel Régional du golfe du Morbihan

<sup>5</sup>: Union des associations de navigateurs du Morbihan

<sup>6</sup>: Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Élevages Marins du Morbihan

<sup>7</sup>: Fédération Départementale de Chasseurs du Morbihan

<sup>8</sup>: Syndicat Mixte du Loc'h et du Sal

<sup>9</sup>: Comité Régional de Conchyliculture Bretagne Sud

<sup>10</sup>: Association Subaquatique de Rhuy

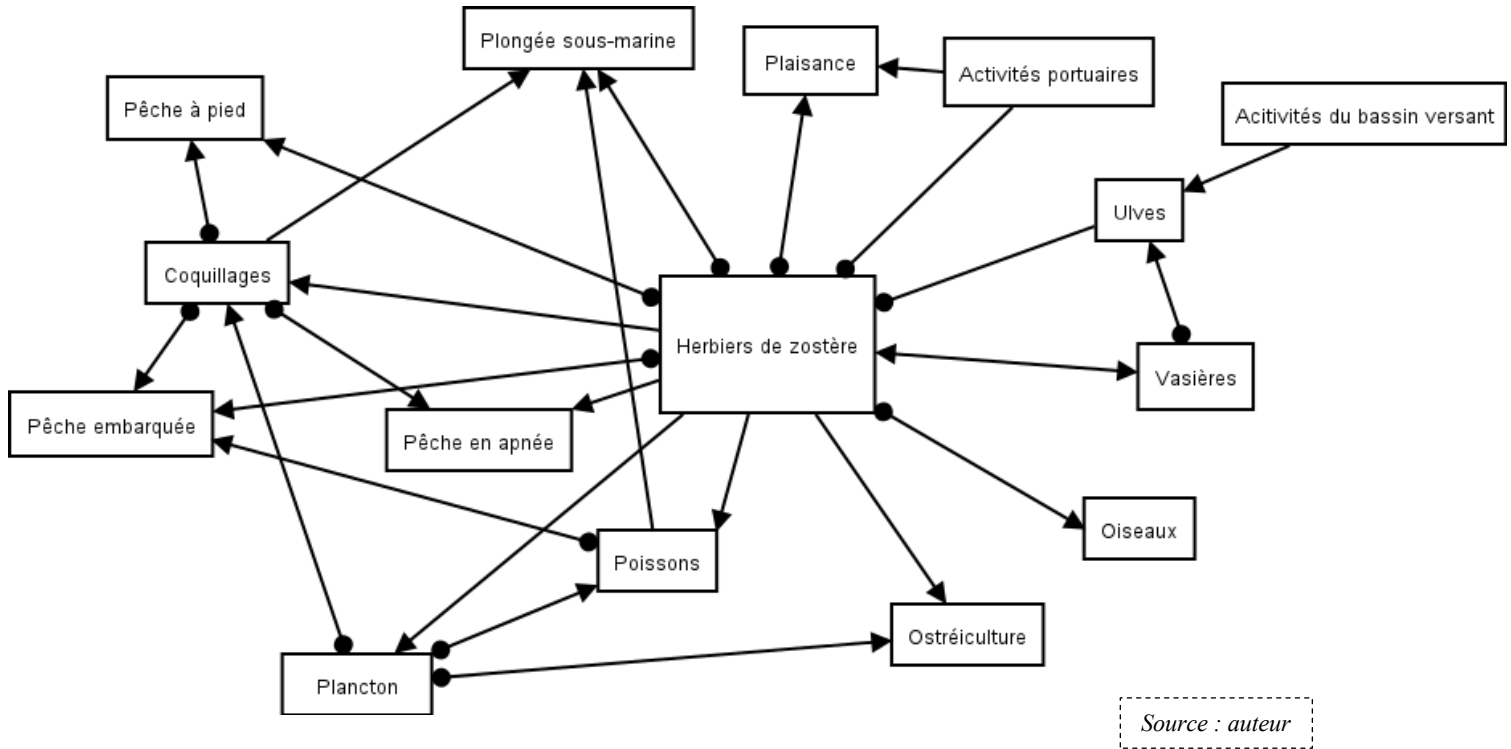
<sup>11</sup>: Fédération Française de Randonnée du Morbihan

### Légende

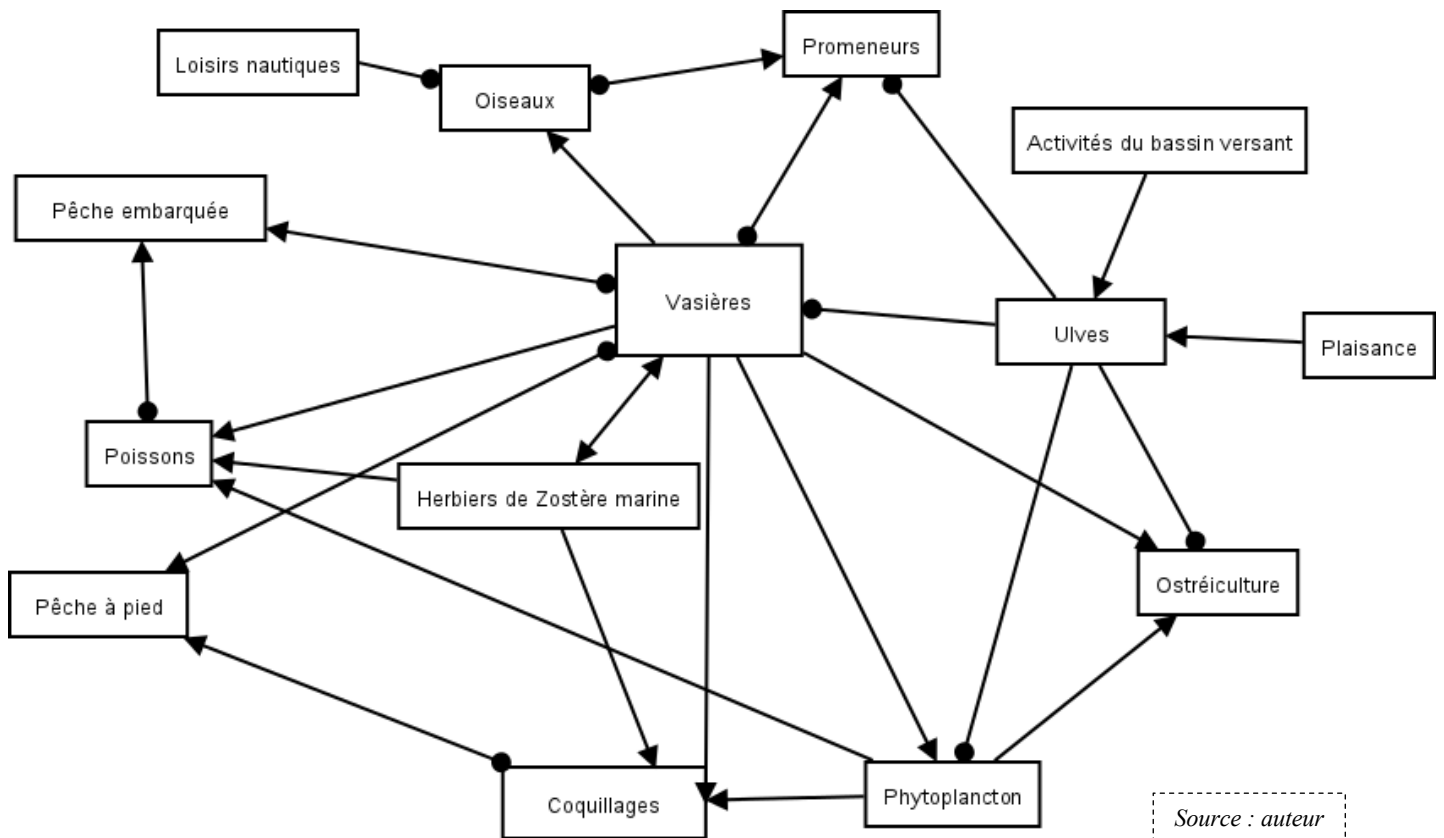
|  |                                    |
|--|------------------------------------|
|  | Approche centrée sur le SES        |
|  | Approche centrée sur l'utilisateur |
|  | Les deux approches                 |

## Annexe 2 : Évolution du graphe (avant les entretiens avec les parties prenantes)

25/03/2020

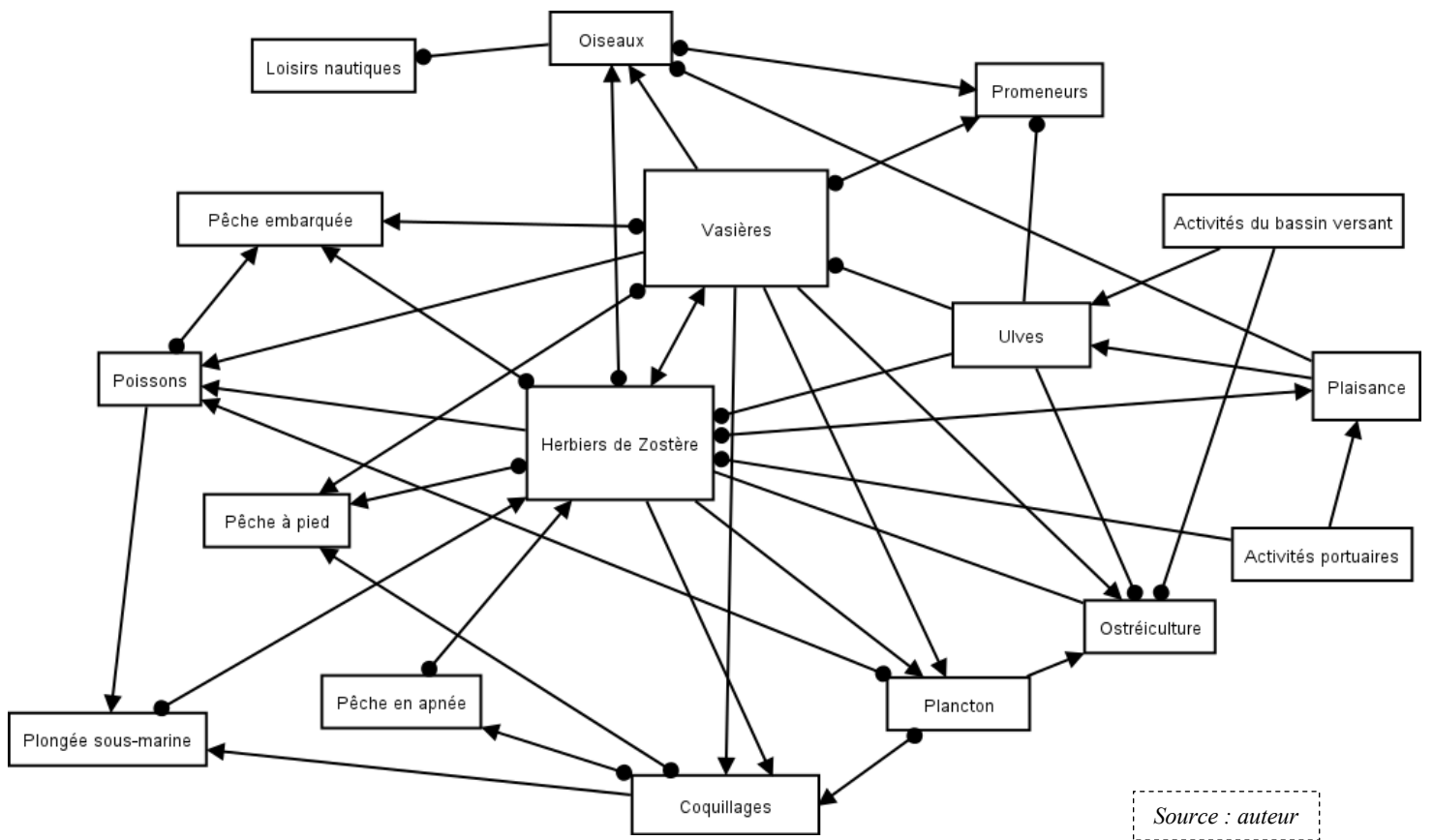


25/03/2020



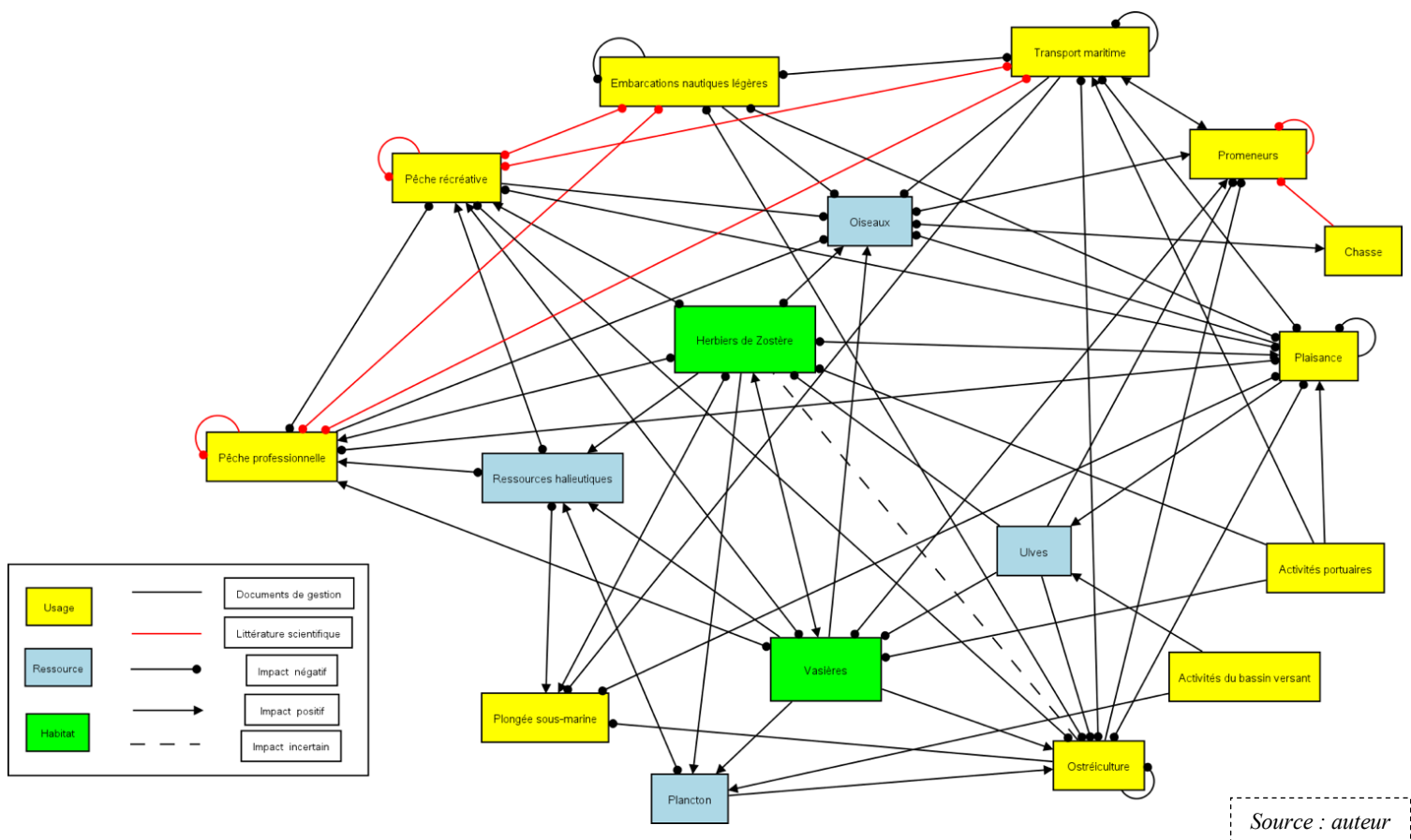


27/03/2020



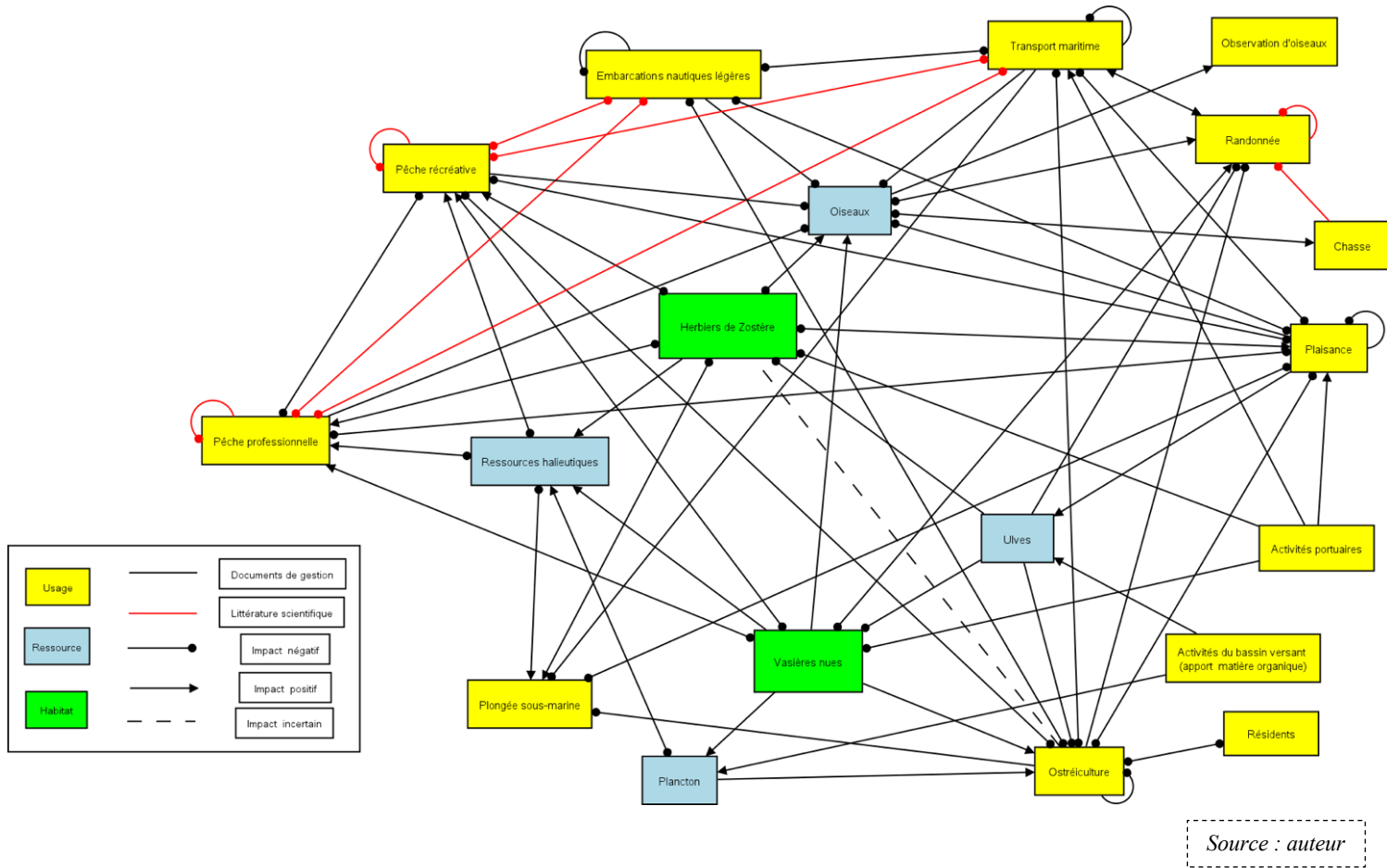
Source : auteur

03/04/2020

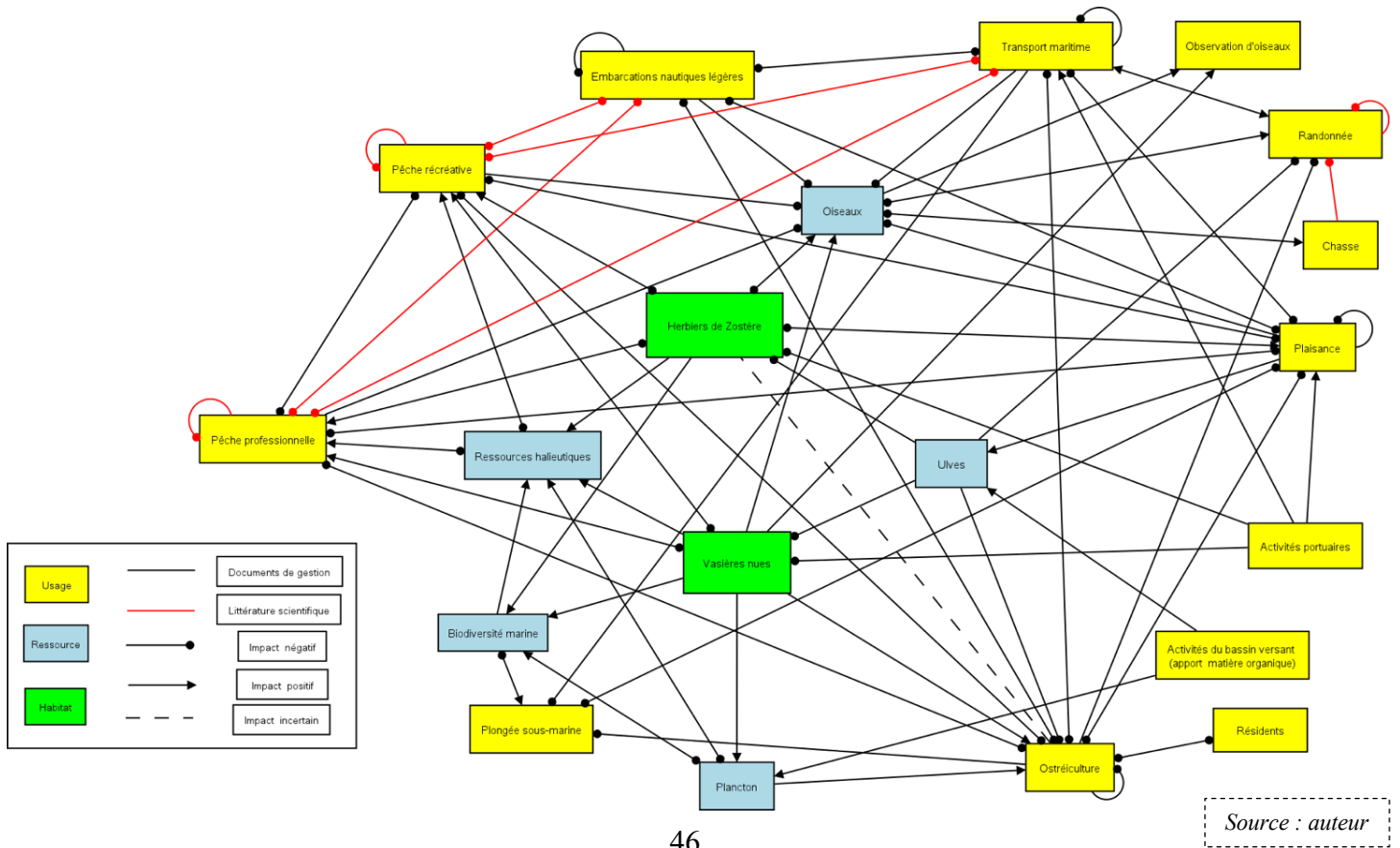


Source : auteur

10/04/2020

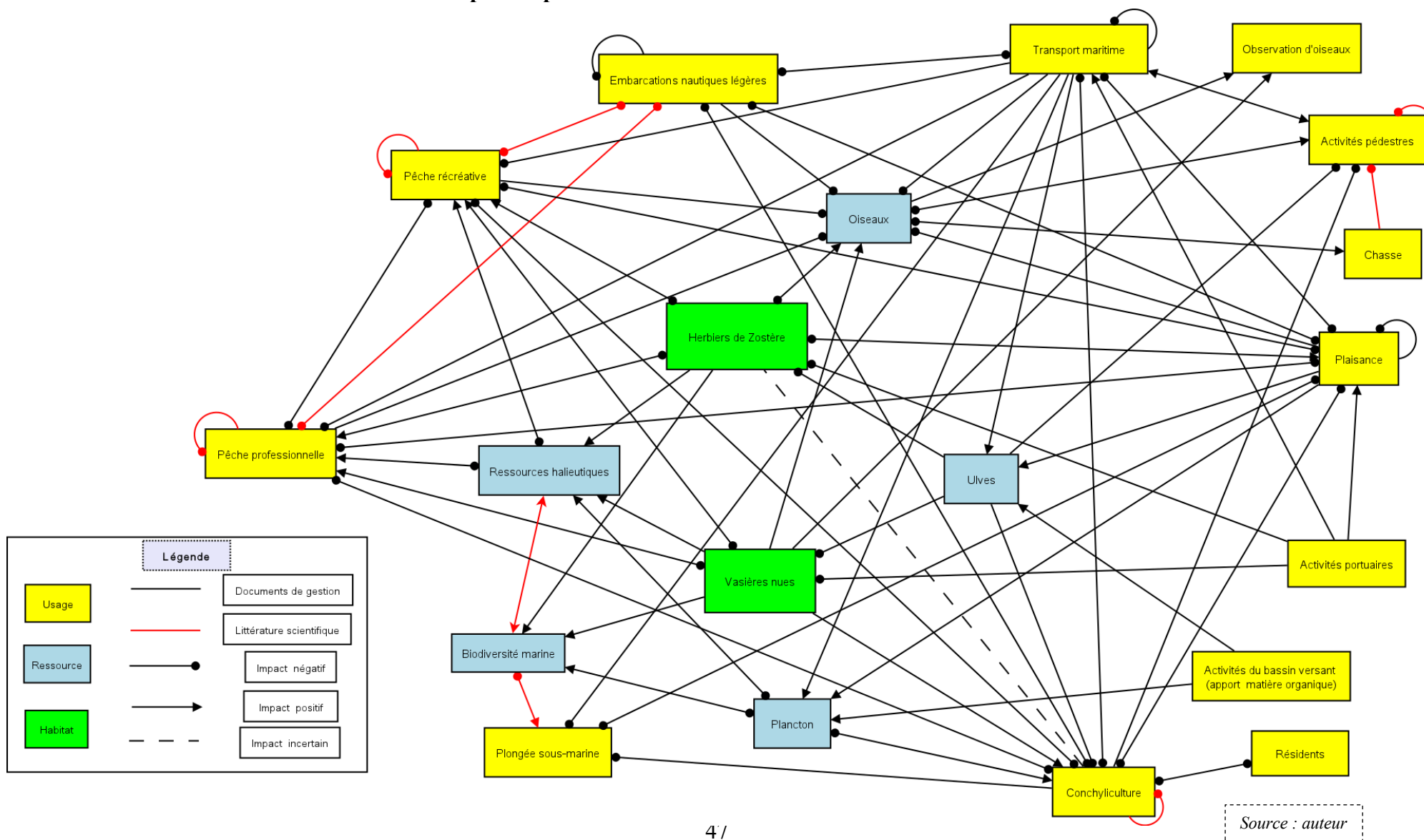


15/04/2020



## Annexe 2b : Évolution du graphe - Modèle *initial*

27/04/2020 : version définitive diffusée aux parties prenantes







## Annexe 3 : Explication des variables du graphe

| Variable                | Significations   |
|-------------------------|--|
| Herbiers de zostère     | Herbiers de Zostères   |
| Vasières nues           | Vasières n'abritant pas d'herbiers de zostères   |
| Biodiversité Marine     | Espèces animales et végétales, habitats marins non présents dans les autres compartiments            |
| Oiseaux                 | Oiseaux présents dans le bassin du GM  |
| Plancton                | Tous les types de plancton : micro, macro, phyto   |
| Ressources halieutiques | Espèces animales sauvages commercialisables  |
| Ulves                   | Macro-algues   |
| Activités BV            | Apport en matière organique issu des bassins versants (agriculture, assainissement, industrie, etc.) |
| Activités Portuaires    | Activités présentes sur les ports du GM (infrastructures, zones de mouillage, etc.)                  |
| Chasse                  | Activité de chasse sur le bassin du GM   |
| ENL                     | Activités maritimes hors bateaux : canoë, kayak, paddle, planche à voile, etc.                       |
| Observation Oiseaux     | Activité d'observation d'oiseaux   |
| Conchyliculture         | Infrastructures conchylicoles, ressources conchylicoles  |
| Pêche Professionnelle   | Pêche à pied et pêche embarquée professionnelles   |
| Pêche Récréative        | Pêche à pied et pêche embarquée récréatives  |
| Plaisance               | Bateaux de plaisance   |
| Plongée sous-marine     | Activité de plongée sous l'eau, bateau pour se rendre sur le site de plongée                         |
| Activités pédestres     | Activités non véhiculées (randonnée, promenade, etc.)  |
| Résidents               | Résidents temporaires et permanents du GM  |
| Transport maritime      | Navettes à passager, transport de marchandise  |





## Annexe 4a : Matrice d'interaction – Binaire

| Destination // Origine  | Herbiers de Zostère | Vasières nues | Biodiversité marine | Oiseaux | Plancton | Ressources halieutiques | Ulves | Activités BV | Activités Portuaires | Chasse | ENL |
|-------------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------|----------|-------------------------|-------|--------------|----------------------|--------|-----|
| Herbiers de Zostère     | 0                   | 0             | 0                   | -1      | -1       | 0                       | -1    | 0            | -1                   | 0      | 0   |
| Vasières nues           | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | -1    | -1           | -1                   | 0      | 0   |
| Biodiversité marine     | 1                   | 1             | 0                   | 0       | 1        | 1                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Oiseaux                 | 1                   | 1             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | -1     | -1  |
| Plancton                | 0                   | 0             | -1                  | 0       | 0        | -1                      | 0     | 1            | 0                    | 0      | 0   |
| Ressources halieutiques | 1                   | 1             | 1                   | 0       | 1        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Ulves                   | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 1            | 0                    | 0      | 0   |
| Activités BV            | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Activités Portuaires    | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Chasse                  | 0                   | 0             | 0                   | 1       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| ENL                     | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | -1  |
| Observation Oiseaux     | 0                   | 1             | 0                   | 1       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Conchyliculture         | ?                   | 1             | 0                   | 0       | 1        | 0                       | -1    | 0            | 0                    | 0      | -1  |
| Pêche Professionnelle   | 1                   | 1             | 0                   | 0       | 0        | 1                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | -1  |
| Pêche Récréative        | 1                   | 1             | 0                   | 0       | 0        | 1                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | -1  |
| Plaisance               | 1                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 1                    | 0      | -1  |
| Plongée sous-marine     | 0                   | 0             | 1                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Randonnée_Promenade     | 0                   | 0             | 0                   | 1       | 0        | 0                       | -1    | 0            | 0                    | -1     | 0   |
| Résidents               | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 0                    | 0      | 0   |
| Transport maritime      | 0                   | 0             | 0                   | 0       | 0        | 0                       | 0     | 0            | 1                    | 0      | -1  |

| Légende   |                    |
|---|--------------------|
|  | positif            |
|  | négatif            |
|  | inexistant/inconnu |
|  | mitigé             |
| * : non répertorié pour le GM   |                    |





| Destination // Origine ➡ | Observation Oiseaux | Conchyliculture | Pêche Professionnelle | Pêche Récréative | Plaisance | Plongée sous-marine | Randonnée_Promenade | Résidents | Transport maritime |
|--------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------|
| Herbiers de Zostère      | 0                   | ?               | -1                    | -1               | -1        | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Vasières nues            | 0                   | 0               | -1                    | -1               | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Biodiversité marine      | 0                   | 0               | 0                     | 0                | 0         | -1                  | 0                   | 0         | 0                  |
| Oiseaux                  | 0                   | 0               | -1                    | -1               | -1        | 0                   | -1                  | 0         | -1                 |
| Plancton                 | 0                   | -1              | 0                     | 0                | 1         | 0                   | 0                   | 0         | 1                  |
| Ressources halieutiques  | 0                   | 0               | -1                    | -1               | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Ulves                    | 0                   | 0               | 0                     | 0                | 1         | 0                   | 0                   | 0         | 1                  |
| Activités BV             | 0                   | 0               | 0                     | 0                | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Activités Portuaires     | 0                   | 0               | 0                     | 0                | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Chasse                   | 0                   | 0               | 0                     | 0                | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| ENL                      | 0                   | -1              | -1                    | -1               | -1        | 0                   | 0                   | 0         | -1                 |
| Observation Oiseaux      | 0                   | 0               | 0                     | 0                | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Conchyliculture          | 0                   | -1              | -1                    | -1               | -1        | 0                   | -1                  | -1        | -1                 |
| Pêche Professionnelle    | 0                   | -1              | -1                    | -1               | -1        | 0                   | 0                   | 0         | -1                 |
| Pêche Récréative         | 0                   | -1              | -1                    | -1               | -1        | 0                   | 0                   | 0         | -1                 |
| Plaisance                | 0                   | -1              | -1                    | -1               | -1        | -1                  | 0                   | 0         | -1                 |
| Plongée sous-marine      | 0                   | -1              | 0                     | 0                | -1        | 0                   | 0                   | 0         | -1                 |
| Randonnée_Promenade      | 0                   | -1              | 0                     | 0                | 0         | 0                   | -1                  | 0         | 1                  |
| Résidents                | 0                   | -1              | 0                     | 0                | 0         | 0                   | 0                   | 0         | 0                  |
| Transport maritime       | 0                   | -1              | 0                     | 0                | -1        | 0                   | 1                   | 0         | -1                 |

Source : auteur

| Légende   |                    |
|---|--------------------|
|  | positif            |
|  | négatif            |
|  | inexistant/inconnu |
|  | mitigé             |
| * : non répertorié pour le GM   |                    |

## Annexe 4b : Matrice d'interaction - Verbe



| Destination // Origine  | Herbiers de Zostère         | Vasières nues           | Biodiversité Marine | Oiseaux      | Plancton     | Ressources halieutiques | Ulves              | Activités BV | Activités Portuaires         | Chasse              | ENL                  |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------------|--------------|------------------------------|---------------------|----------------------|
| Herbiers de Zostère     | /                           | /                       | /                   | mange (1)    | envahit (23) | /                       | envahit (1)        | /            | détruit (1,7)                | /                   | /                    |
| Vasières nues           | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | envahit (1)        | pollue (1)   | modifie la sédimentation (1) | /                   | /                    |
| Biodiversité Marine     | nourrit, protège (1)        | nourrit, protège (1,16) | /                   | /            | nourrit (1)  | favorise (19, 20)       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Oiseaux                 | nourrit (1)                 | nourrit, accueille (1)  | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | /                            | chasse, dérange (1) | dérange (2)          |
| Plancton                | /                           | /                       | mange (1)           | /            | /            | mange (1)               | favorise (1)       | /            | /                            | /                   | /                    |
| Ressources halieutiques | nourrit, protège (1)        | nourrit, protège (1,16) | favorise (19, 20)   | /            | nourrit (1)  | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Ulves                   | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | favorise (1)       | /            | /                            | /                   | /                    |
| Activités BV            | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Activités Portuaires    | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Chasse                  | /                           | /                       | /                   | favorise (1) | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| ENL                     | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | gêne (espace) (2)    |
| Observation Oiseaux     | /                           | favorise (1)            | /                   | favorise (1) | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Conchyliculture         | conditionne, limite (1,7,9) | conditionne (1)         | /                   | /            | nourrit (1)  | /                       | salit (6)          | /            | /                            | /                   | dérange (vol) (4,8)  |
| Pêche Professionnelle   | conditionne (1)             | conditionne (1)         | /                   | /            | /            | favorise (1)            | /                  | /            | /                            | /                   | gêne (espace) (5)    |
| Pêche Récréative        | conditionne (1)             | conditionne (1)         | /                   | /            | /            | favorise (1)            | /                  | /            | /                            | /                   | gêne (espace) (5)    |
| Plaisance               | facilite (1)                | /                       | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | accueille (1)                | /                   | gêne (espace) (2, 8) |
| Plongée sous-marine     | /                           | /                       | attire (1)          | /            | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Randonnée_Pro menade    | /                           | /                       | /                   | attire (1)   | /            | /                       | nuit (odeur) (1,6) | /            | /                            | dérange (21)*       | /                    |
| Résidents               | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | /                            | /                   | /                    |
| Transport maritime      | /                           | /                       | /                   | /            | /            | /                       | /                  | /            | accueille (1)                | /                   | gêne (espace) (8)    |

| Légende   |                    |
|---|--------------------|
|  | positif            |
|  | négatif            |
|  | inexistant/inconnu |
|  | mitigé             |
| * : non répertorié pour le GM   |                    |

Source : auteur



| Destination // Origine  | Observation Oiseaux | Conchyliculture                                    | Pêche Professionnelle         | Pêche Récréative     | Plaisance                                 | Plongée sous-marine | Randonnée_Promenade          | Résidents         | Transport maritime                        |
|-------------------------|---------------------|--|-------------------------------|----------------------|---|---------------------|------------------------------|-------------------|---|
| Herbiers de Zostère     | /                   | protège, diminue et améliore la luminosité (1,7,9) | arrache, piétine, triture (2) | piétine, triture (2) | arrache (2)                               | /                   | /                            | /                 | /   |
| Vasières nues           | /                   | /  | piétine (à pied) (2)          | piétine (à pied) (2) | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| Biodiversité Marine     | /                   | /  | /                             | /                    | /   | dérange (10,11)*    | /                            | /                 | /   |
| Oiseaux                 | /                   | /  | dérange (3)                   | dérange (3)          | dérange (2)                               | /                   | dérange (1)                  | /                 | dérange (2)                               |
| Plancton                | /                   | consomme (1)                                       | /                             | /                    | favorise (eaux usées) (8)                 | /                   | /                            | /                 | favorise (eaux usées) (8)                 |
| Ressources halieutiques | /                   | /  | prélève (1)                   | prélève (1)          | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| Ulves                   | /                   | /  | /                             | /                    | favorise (eaux usées) (8)                 | /                   | /                            | /                 | favorise (eaux usées) (8)                 |
| Activités BV            | /                   | /  | /                             | /                    | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| Activités Portuaires    | /                   | /  | /                             | /                    | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| Chasse                  | /                   | /  | /                             | /                    | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| ENL                     | /                   | gêne (espace) (2)                                  | gêne (espace) (2)             | gêne (espace) (2)    | gêne (espace) (2,8)                       | /                   | /                            | /                 | gêne (espace) (2,8)                       |
| Observation Oiseaux     | /                   | /  | /                             | /                    | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| Conchyliculture         | /                   | gêne (espace, production primaire) (17,18)         | gêne (espace) (8)             | gêne (espace) (8)    | gêne (espace), pollue (eaux noires) (2,8) | /                   | gêne (espace) (8)            | gêne (espace) (8) | gêne (espace), pollue (eaux noires) (2,8) |
| Pêche Professionnelle   | /                   | gêne (espace) (8)                                  | gêne (espace) (3)             | gêne (espace) (3)    | gêne (espace) (2,8)                       | /                   | /                            | /                 | pollue (eaux noires) (2,8)                |
| Pêche Récréative        | /                   | gêne (espace) (8)                                  | gêne (espace) (3)             | gêne (espace) (5)    | gêne (espace) (2,8)                       | /                   | /                            | /                 | pollue (eaux noires) (8)                  |
| Plaisance               | /                   | gêne (espace) (2,8)                                | gêne (espace) (2)             | gêne (espace) (2)    | gêne (espace) (2)                         | gêne (espace) (2)   | /                            | /                 | gêne (espace, accès au port) (8)          |
| Plongée sous-marine     | /                   | gêne (espace) (2)                                  | /                             | /                    | gêne (espace) (2)                         | /                   | /                            | /                 | peturbe (activité) (2)                    |
| Randonnée_Promenade     | /                   | gêne (espace), nuit (paysage) (2,8)                | /                             | /                    | /   | /                   | gêne (encombrement) (12,13)* | /                 | favorise (2)                              |
| Résidents               | /                   | nuit (odeur, vue) (2)                              | /                             | /                    | /   | /                   | /                            | /                 | /   |
| Transport maritime      | /                   | gêne (espace) (2)                                  | /                             | /                    | gêne (espace) (2)                         | /                   | favorise (2)                 | /                 | gêne (espace) (2)                         |

| Légende  |                    |
|--|--------------------|
|  | positif            |
|  | négatif            |
|  | inexistant/inconnu |
|  | mitigé             |
| * : non répertorié pour le GM  |                    |





Source : auteur

## Annexe 4c : Matrice d'interaction - Phrase

| Destination // Origine                         | Herbiers de Zostère   | Vasières nues  | Biodiversité Marine   | Oiseaux                                      | Plancton   | Ressources halieutiques   | Ulves  | Activités BV  |
|--|---|--|---|--|--|---|--|---|
| Herbiers de Zostère                            | /   | /  | /   | source d'alimentation pour les bernaches (1) | privation de lumière à cause du phytoplancton (23) | /   | accaparement de l'espace, privation de lumière (1, 23) induit une perte de concentration en glucides (7) | /   |
| Vasières nues                                  | /   | /  | /   | /  | /  | /   | accaparement de l'espace (1)   | stockage de polluants d'origine anthropique   |
| Biodiversité Marine                            | zone de nurricerie, d'alimentation, de refuge et de reproduction (seiche) (1)               | zone de nurricerie (sole), d'alimentation, de refuge (1)   | /   | /  | source d'alimentation (1)                          | espèces intéressantes pour la pêche sont souvent des prédateurs donc importantes dans la chaîne trophique (19,20) | /  | /   |
| Oiseaux  | zone d'alimentation (bernache cravant) (1)  | zone d'alimentation, de repos (1)                          | /   | /  | /  | /   | /  | /   |
| Plancton                                       | /   | /  | prédation (1)   | /  | /  | prédation (1)   | /  | apport de matière organique favorisant l'apparition de phytoplancton (eutrophisation) (1) |
| Ressources halieutiques                        | zone de nurricerie, d'alimentation, de refuge et de reproduction (seiche) (1)               | zone de nurricerie (sole), d'alimentation, de refuge (1)   | espèces intéressantes pour la pêche sont souvent des prédateurs donc importantes dans la chaîne trophique (19,20) | /  | source d'alimentation (1)                          | /   | /  | /   |
| Ulves  | /   | /  | /   | /  | /  | /   | /  | apport de matière organique favorisant l'apparition de macroalgues (eutrophisation) (1)   |
| Activités BV<br>Activités Portuaires<br>Chasse | /   | /  | /   | espèces d'intérêt à chasser (1)              | /  | /   | /  | /   |
| ENL  | /   | /  | /   | /  | /  | /   | /  | /   |
| Observation Oiseaux                            | /   | zone de repos pour certains oiseaux (1)                    | /   | intérêt ornithologique (1)                   | /  | /   | /  | /   |
| Conchyliculture                                | améliore la qualité de l'eau, limitant pour l'installation de nouvelles concessions (1,7,9) | favorise la faible turbidité et la production primaire (1) | /   | /  | source d'alimentation (1)                          | /   | se dépose sur le coquillage et doit être nettoyé (6)   | /   |
| Pêche Professionnelle                          | fournit des espèces intéressantes à pêcher (palourdes, oursins) (1)                         | fournit des espèces intéressantes à pêcher (palourdes) (1) | /   | /  | /  | fournit des espèces intéressantes à pêcher (daurades, seiche, etc) (1)  | /  | /   |
| Pêche Récréative                               | fournit des espèces intéressantes à pêcher (palourdes, oursins) (1)                         | fournit des espèces intéressantes à pêcher (palourdes) (1) | /   | /  | /  | fournit des espèces intéressantes à pêcher (daurades, seiche, etc) (1)  | /  | /   |
| Plaisance                                      | permet un meilleur maintien de l'ancre (1)  | /  | /   | /  | /  | /   | /  | /   |
| Plongée sous-marine                            | /   | /  | intérêt visuel pour l'activité (1)  | /  | /  | /   | /  | /   |
| Randonnée_Promenade                            | /   | /  | /   | intérêt visuel pour l'activité (1)           | /  | /   | odeur désagréable pour les promeneurs (1,6)  | /   |
| Résidents                                      | /   | /  | /   | /  | /  | /   | /  | /   |
| Transport maritime                             | /   | /  | /   | /  | /  | /   | /  | /   |

| Destination // Origine                         | Activités Portuaires   | Chasse   | ENL  | Observation Oiseaux | Conchyliculture   | Pêche Professionnelle   | Pêche Récréative  |
|--|--|--|--|---------------------|---|---|---|
| Herbiers de Zostère                            | décapage des herbiers pour l'installation d'infrastructures portuaires, dragage pour l'accès au port (1,7) |  |  |                     | amélioration de la qualité de l'eau par les coquillages, réduction de luminosité sous les tables, arrachage des herbiers par les engins (1,7,9)                               | arrachement des herbiers avec pêche à la drague, piétinement, triturage à cause de la pêche à pied (2)      | piétinement, triturage à cause de la pêche à pied (2)   |
| Vasières nues                                  | modification de la sédimentation à travers les courants (1)  |  |  |                     |   | piétinement à cause de la pêche à pied (2)  | piétinement à cause de la pêche à pied (2)  |
| Biodiversité Marine                            |  |  |  |                     |   |   |   |
| Oiseaux  |  | activité de chasse, dérangement à cause du bruit pour les espèces chassées et non chassées (1) | dérangement dû au débarquement sur des îles servant de nichoirs (3)  |                     |   | dérangement des oiseaux (3)   | dérangement des oiseaux (3)   |
| Plancton                                       |  |  |  |                     |   |   |   |
| Ressources halieutiques                        |  |  |  |                     |   | action de pêche, prélèvement d'un stock halieutique (1)   | action de pêche, prélèvement d'un stock halieutique (1)   |
| Ulves  |  |  |  |                     |   |   |   |
| Activités BV<br>Activités Portuaires<br>Chasse |  |  |  |                     |   |   |   |
| ENL  |  |  | gêne (espace) (2)  |                     | concurrence sur l'espace, au niveau du débarquement, dangereux si mauvais balisage (2)  | concurrence sur l'espace, dangereux car vitesses de navigation différentes (2)                              | concurrence sur l'espace, dangereux car vitesses de navigation différentes (2)                              |
| Observation Oiseaux                            |  |  |  |                     |   |   |   |
| Conchyliculture                                |  |  | vol de coquillages, non respect du balisage, concurrence sur l'espace pour le débarquement sur certaines zones (4,8) |                     | risque de dépasser la capacité de charge (social, écologique, de production, physique) du milieu, changement de la chaîne trophique (compétition avec le zooplancton) (17,18) | concurrence sur l'espace pour la pêche à pied, interdiction de pêcher à moins de 15m d'une exploitation (8) | concurrence sur l'espace pour la pêche à pied, interdiction de pêcher à moins de 15m d'une exploitation (8) |
| Pêche Professionnelle                          |  |  | concurrence sur l'espace, dangereux car vitesses de navigation différentes (5)                                       |                     | concurrence sur l'espace pour la pêche à pied, interdiction de pêcher à moins de 15m d'une exploitation (8)   | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement (3)   | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement, non-respect des zones de pêche autorisées (3)      |
| Pêche Récréative                               |  |  | concurrence sur l'espace, dangereux car vitesses de navigation différentes (5)                                       |                     | concurrence sur l'espace terrestre pour la pêche à pied, interdiction de pêcher à moins de 15m d'une exploitation et l'espace marin, notamment si mauvais balisage (8)        | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement, non-respect des zones de pêche autorisées (3)      | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement, surfréquentation des sites de pêche (5)            |
| Plaisance                                      | zone de mouillage pour les bateaux (1)   |  | concurrence sur l'espace, dangereux car vitesses de navigation différentes (2,8)                                     |                     | concurrence sur l'espace maritime, notamment avec un mauvais balisage et l'espace terrestre si débarquement (2,8)   | concurrence sur l'espace maritime (2)   | concurrence sur l'espace maritime (2)   |
| Plongée sous-marine                            |  |  |  |                     | concurrence sur l'espace, dangereux si mauvais balisage (2)   |   |   |
| Randonnée_Promenade                            |  | risque d'accident (21)   |  |                     | arrêt de la servitude de passage pour les exploitations, perte d'aménités paysagères dû à la présence de chantier conchylicole (2,8)  |   |   |
| Résidents                                      |  |  |  |                     | perte d'aménité paysagère à cause des chantiers conchylicoles, nuisance sonore (2)  |   |   |
| Transport maritime                             | zone de mouillage pour les bateaux (1)   |  | concurrence sur l'espace, vitesses de navigation différentes (8)   |                     | concurrence sur l'espace maritime, dangereux si mauvais balisage (2)  |   |   |

| Destination // Origine                         | Plaisance  | Plongée sous-marine                   | Randonnée Promenade   | Résidents             | Transport maritime  |
|--|--|---------------------------------------|---|-----------------------|---|
| Herbiers de Zostère                            | arrachement à cause du mouillage (2)   |                                       |   |                       |   |
| Vasières nues                                  |  |                                       |   |                       |   |
| Biodiversité Marine                            |  | dérange (10,11)*                      |   |                       |   |
| Oiseaux  | dérangement dû au débarquement sur des îles servant de nichoirs (3)  |                                       | passage des promeneurs près de zones privilégiées par les oiseaux (1) |                       | dérangement des oiseaux (3)   |
| Plancton                                       | apport de matière organique favorisant l'apparition de phytoplancton (eutrophisation) (8, 24) + (3, p.103)   |                                       |   |                       | apport de matière organique favorisant l'apparition de phytoplancton (eutrophisation) (8, 24) + (3, p.103)  |
| Ressources halieutiques                        |  |                                       |   |                       |   |
| Ulves  | apport de matière organique favorisant l'apparition de macroalgues (eutrophisation) (8) + (3, p.103)   |                                       |   |                       | apport de matière organique favorisant l'apparition de macroalgues (eutrophisation) (8) + (3, p.103)        |
| Activités BV<br>Activités Portuaires<br>Chasse |  |                                       |   |                       |   |
| ENL  | concurrence sur l'espace (2,8)   |                                       |   |                       | concurrence sur l'espace, vitesses de navigation différentes (2,8)  |
| Observation Oiseaux                            |  |                                       |   |                       |   |
| Conchyliculture                                | non respect du balisage par les plaisanciers, concurrence sur l'espace pour débarquer, altération de la qualité biologique du milieu avec le rejet des eaux noires (2,8) |                                       | non respect du balisage (8)   | pression foncière (8) | concurrence sur l'espace, altération de la qualité biologique du milieu avec le rejet des eaux noires (2,8) |
| Pêche Professionnelle                          | concurrence sur l'espace maritime (2,8)  |                                       |   |                       | détérioration de la qualité de l'eau avec le rejet des eaux noires (2,8)                                    |
| Pêche Récréative                               | concurrence sur l'espace maritime (2,8)  |                                       |   |                       | détérioration de la qualité de l'eau avec le rejet des eaux noires (8)                                      |
| Plaisance                                      | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement des zones de mouillage (2,8)   | concurrence sur l'espace maritime (2) |   |                       | concurrence sur l'espace maritime et sur l'accès au mouillage dans les ports (8)                            |
| Plongée sous-marine                            | concurrence sur l'espace maritime (2)  |                                       |   |                       | peturbe (activité) (2)  |
| Randonnée Promenade                            |  |                                       | surfréquentation possible du sentier littoral et des îles (12,13)*    |                       | facilité d'accès aux îles du Golfe pour se promener (2)   |
| Résidents                                      |  |                                       |   |                       |   |
| Transport maritime                             | concurrence sur l'espace maritime et sur l'accès au mouillage dans les ports (8)   |                                       | demande forte permettant de développer le secteur et l'offre (2)      |                       | concurrence sur l'espace entre les bateaux, encombrement des zones de mouillage (2)                         |

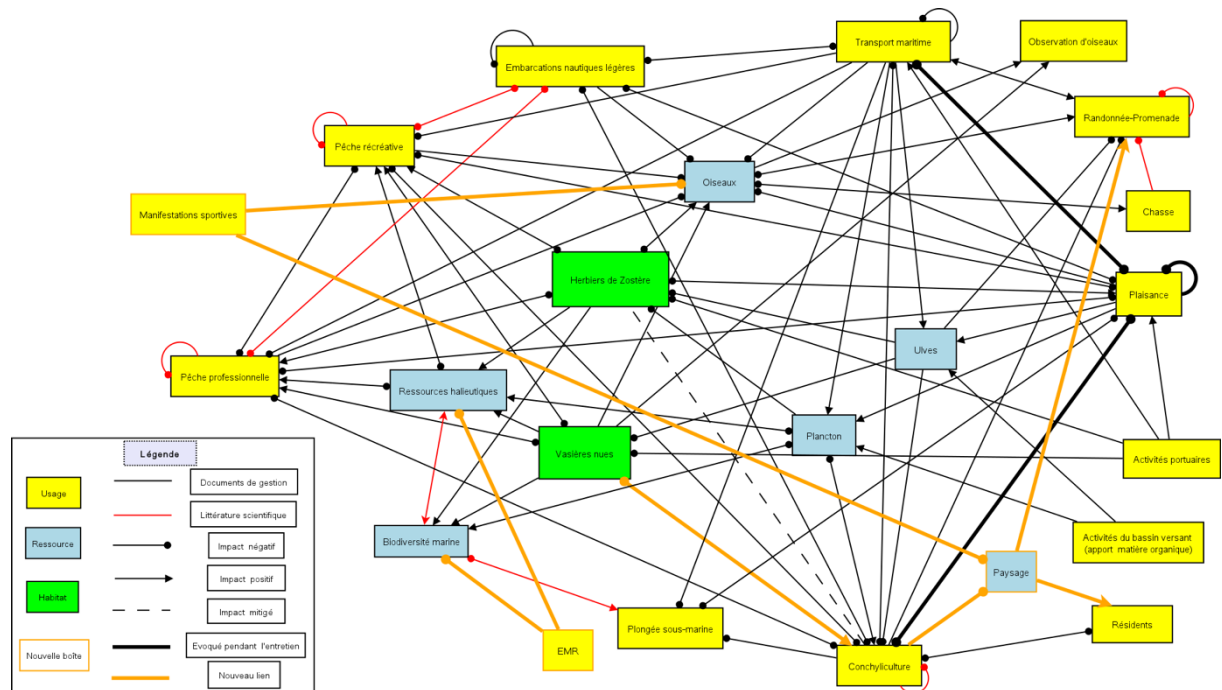
| Légende   |                    |
|---|--------------------|
|  | positif            |
|  | négatif            |
|  | inexistant/inconnu |
|  | mitigé             |
| * : non répertorié pour le GM   |                    |

## Annexe 4d : Matrices d'interaction – Bibliographie

| Numéro | Référence  |
|--------|--|
| 1      | SIAGM et ONCFS <i>et al.</i> (2013) <i>Document d'objectifs des sites Natura 2000 ZSC « Golfe du Morbihan – côte ouest de Rhuy » (FR 53 000 89) et ZPS « Golfe du Morbihan » (FR 53 100 86)</i> . Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Golfe du Morbihan et Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, p. 533.  |
| 2      | DDTM 56 (2006) <i>Schéma de Mise en Valeur de la Mer du Golfe du Morbihan</i> , p. 90.   |
| 3      | DDTM 56 (2019) <i>Schéma de Mise en Valeur de la Mer du Golfe du Morbihan - Rapport du projet de SMVM révisé</i> , p. 126.   |
| 4      | Beuret, J.-E. (2019) 'Des concertations et médiations pour concilier les usages du Golfe du Morbihan : réalités, enjeux et bénéfices', <i>Sciences Eaux &amp; Territoires</i> , 53, p. 6.  |
| 5      | Boude, J. <i>et al.</i> (2003) <i>La pêche de loisir dans le golfe du Morbihan</i> , p. 241. Available at: <a href="https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2244/">https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2244/</a> (Accessed: 21 April 2020).  |
| 6      | Colas, S. (2014) 'Les proliférations d'algues sur les côtes métropolitaines.' (Le point sur), (180), p. 4.   |
| 7      | ANGST, B. <i>et al.</i> (2014) <i>Synthèse des connaissances sur les herbiers de zostères en appui à leur gestion dans le golfe du Morbihan</i> . AMURE et SIAGM, p. 138.  |
| 8      | DDTM56 (2015) <i>Rapport d'évaluation environnementale - Diagnostic du SMVM actuel et bilan</i> , p. 72.   |
| 9      | Deslous-Paoli, J.-M. <i>et al.</i> (1998) 'Relations milieu-ressources : impact de la conchyliculture sur un environnement lagunaire méditerranéen (Thau)', <i>Oceanologica Acta</i> . Gauthier-villars/editions Elsevier, 21(6), pp. 831–843. doi: 10.1016/S0399-1784(99)80010-3.   |
| 10     | Gordon, L. M. <i>et al.</i> (2019) 'Behavioural and pathomorphological impacts of flash photography on benthic fishes', <i>Scientific Reports (Nature Publisher Group)</i> . Nature Publishing Group, 9(1).  |
| 11     | Davenport, J. and Davenport, J. L. (2006) 'The impact of tourism and personal leisure transport on coastal environments: A review', <i>Estuarine, Coastal and Shelf Science</i> , 67(1), pp. 280–292. doi: 10.1016/j.ecss.2005.11.026.   |
| 12     | Barthelemy, C. and Claeys, C. (2016) <i>La (sur) fréquentation du littoral Une analyse sociologique à partir du cas des Calanques marseillaises</i> .  |
| 13     | Vles, V. (2017) 'Hesitations and reconfigurations in the management of visitor flows in outstanding natural areas', <i>Via. Tourism Review</i> . Association Via@, (11–12).  |
| 14     | Bernard, N. (2001) 'Inventaire cartographique, par télédétection aéroportée, des habitats marins du golfe du Morbihan', <i>DESS Expertise et Gestion des littoraux d' IUEM - Société Télédétection et Biologie Marine</i> , p. 44.   |
| 15     | MAHEO, R. and DENIS, P. (1987) 'Les bernaches hivernant dans le Golfe du Morbihan (Sud Bretagne) et leur impact sur les herbiers de Zostères: Premiers Résultats', <i>Revue d'écologie</i> . Société nationale de protection de la nature et d'acclimatation de France ....  |
| 16     | Marley, G. S. A. <i>et al.</i> (2020) 'Mangrove or mudflat: Prioritising fish habitat for conservation in a turbid tropical estuary', <i>Estuarine, Coastal and Shelf Science</i> , p. 106788. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106788.  |
| 17     | Byron, C. <i>et al.</i> (2011) 'Modeling ecological carrying capacity of shellfish aquaculture in highly flushed temperate lagoons', <i>Aquaculture</i> , 314(1), pp. 87–99. doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.02.019.   |
| 18     | McKindsey, C. W. <i>et al.</i> (2006) 'Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management', <i>Aquaculture</i> , 261(2), pp. 451–462. doi: 10.1016/j.aquaculture.2006.06.044.   |
| 19     | Scheffer, M., Carpenter, S. and Young, B. de (2005) 'Cascading effects of overfishing marine systems', <i>Trends in Ecology &amp; Evolution</i> , 20(11), pp. 579–581. doi: 10.1016/j.tree.2005.08.018.  |
| 20     | Pikitch, E. K. <i>et al.</i> (2014) 'The global contribution of forage fish to marine fisheries and ecosystems', <i>Fish and Fisheries</i> . Wiley Online Library, 15(1), pp. 43–64.   |
| 21     | Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (2019) <i>Bilan des accidents de chasse survenus durant la saison 2018/2019</i> , p. 2.  |
| 22     | CEREMA (2019) <i>Rapport d'évaluation environnementale - Fiches AFOM</i> , p. 27.  |
| 23     | Hily, C. (2006) <i>Fiche de synthèse sur les biocénoses : Les herbiers de Zostères marines (Zostera marina et Zostera noltii)</i> . REBENT, p. 6.  |
| 24     | Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Golfe du Morbihan et Ria d'Etel (2020) <i>Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques</i> , p. 184.   |
| 25     | Direction départementale des territoires et de la mer (2012) <i>Arrêté préfectoral en date du 19 Juin 2012 portant schéma des structures des exploitations de cultures marines du département du Morbihan</i> .  |
| 26     | Pardo Sophie, S. F., Hess Philipp, Simon Elodie, Barille Laurent, Geslin Emmanuelle, Cognie Bruno, Martin-Jezequel Véronique, Sechet Véronique, Herrenknecht Christine, Baron Regis, Bourseau Patrick, Amzil Zouher, Masse Anthony, Vandanjon Laurent, Dumay Justine, Lebeau Thierry, Turpin Vincent, Mondeguer Florence, Petitgas Pierre, Trouillet Brice, Mercier Denis, Guillotreau Patrice, Guineberteau Thierry, Mahevas Stephanie (2017) 'COSELMAR. Compréhension des socio-écosystèmes littoraux et marins pour la prévention et la gestion des risques. Bilan scientifique 2013-2017'. FRANCE. |
| 27     | HERRY, J. and PASCO, R. (2013) <i>Diagnostic conchylicole du Golfe du Morbihan</i> , p. 28. Available at: <a href="https://fr.calameo.com/read/001841851457476106514">https://fr.calameo.com/read/001841851457476106514</a> .  |

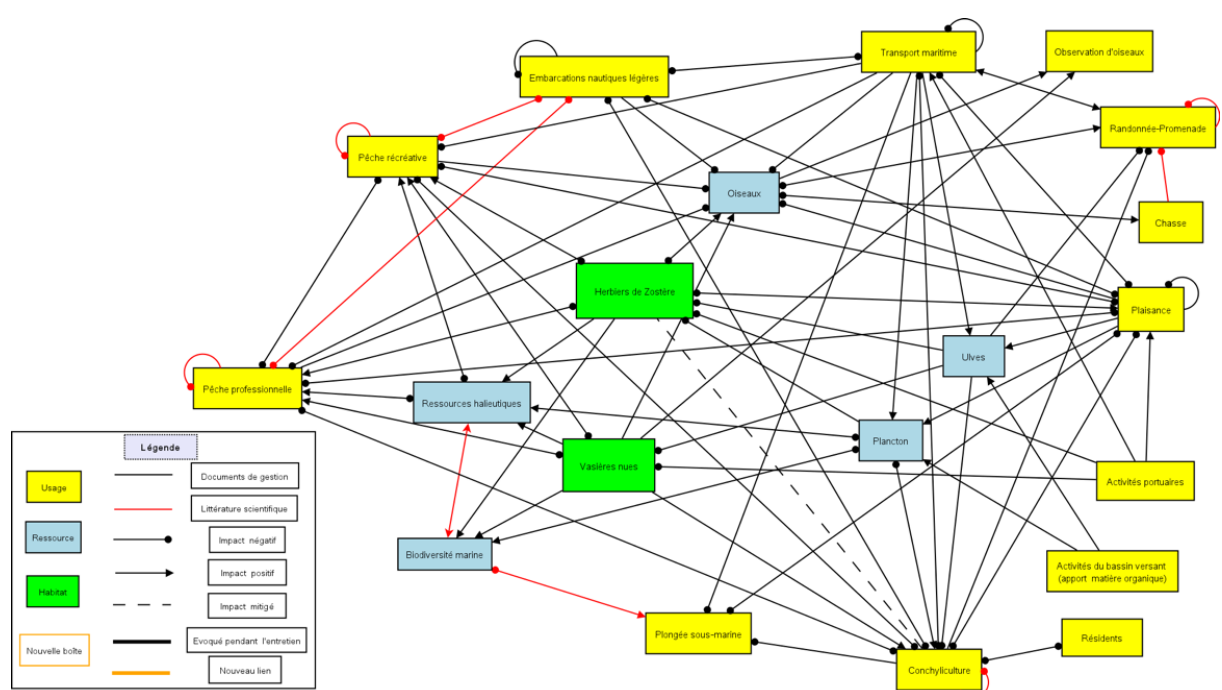
## Annexe 5 : « Sous-modèles » représentant chaque entretien avec les parties prenantes

### Plaisance (13/05)



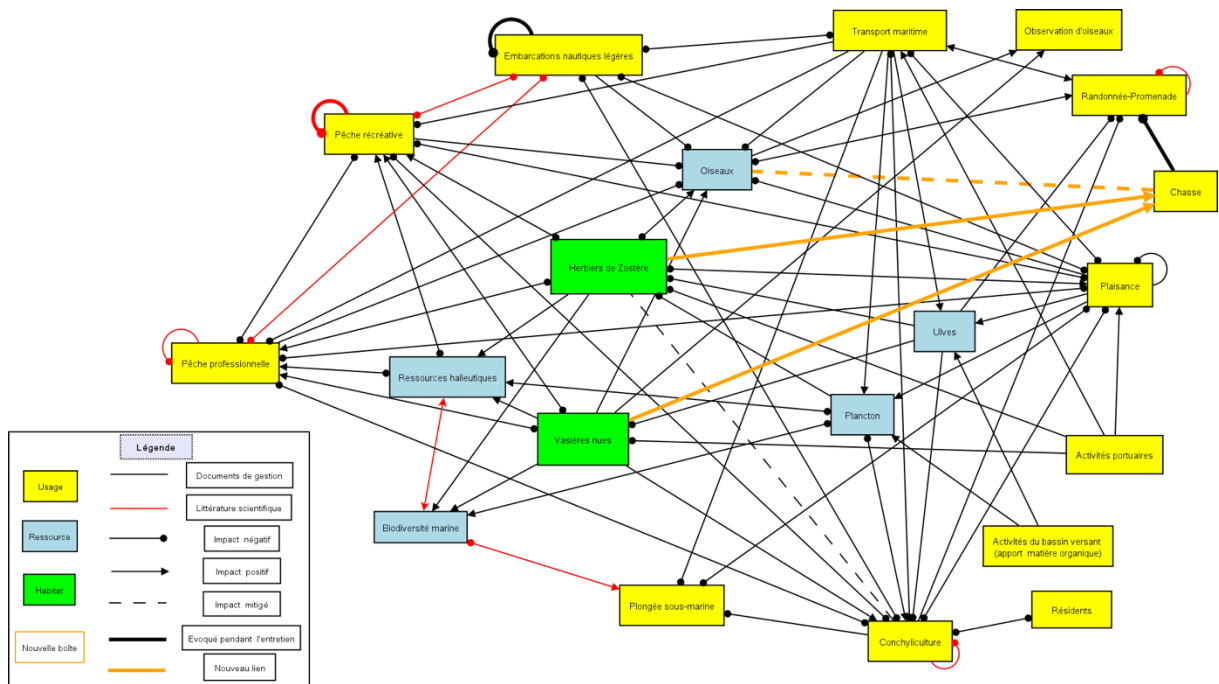
Source : auteur

### Pêches récréative et professionnelle (19/05 & 10/06)



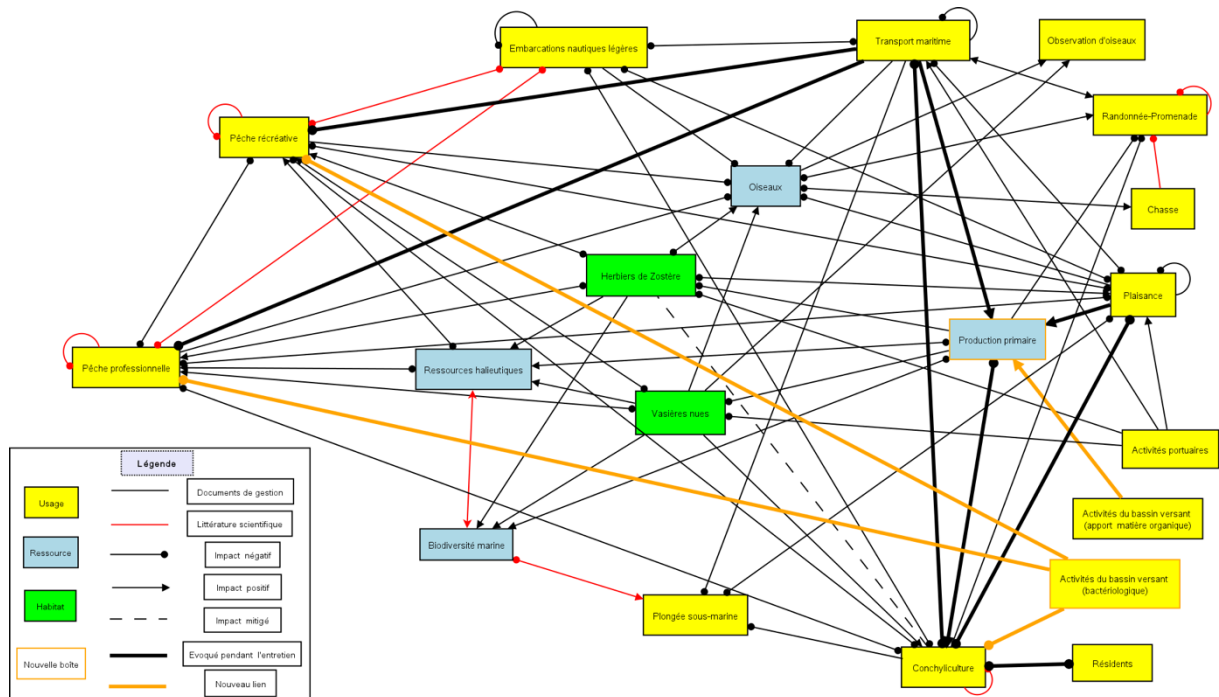
Source : auteur

## Chasse (27/05)



Source : auteur

## Activités du bassin versant (04/06)

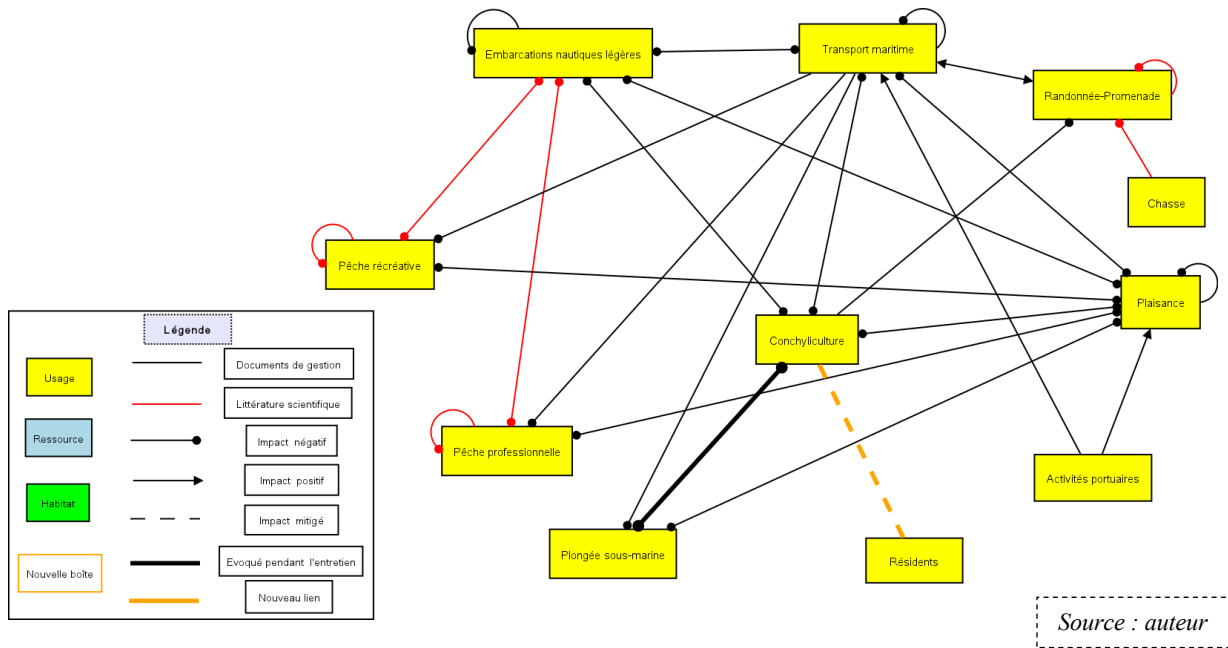


Source : auteur

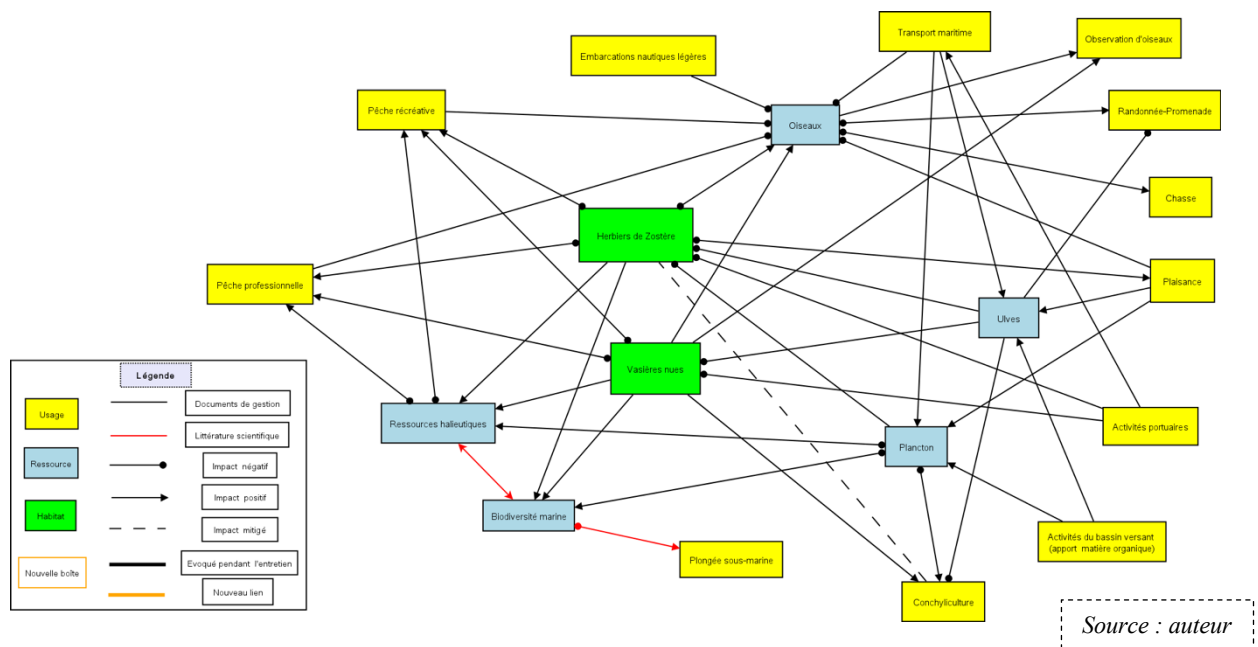


# Conchyliculture (05/06)

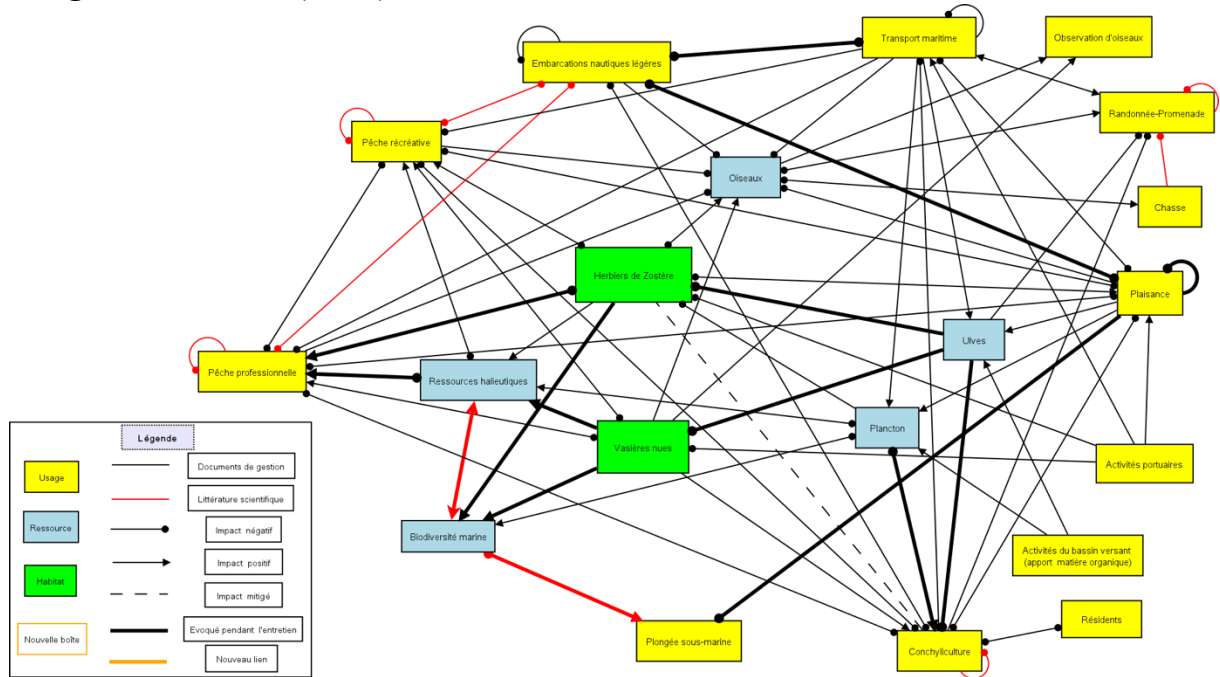
## « Conflits d'usage »



## « Interactions usages-environnement »

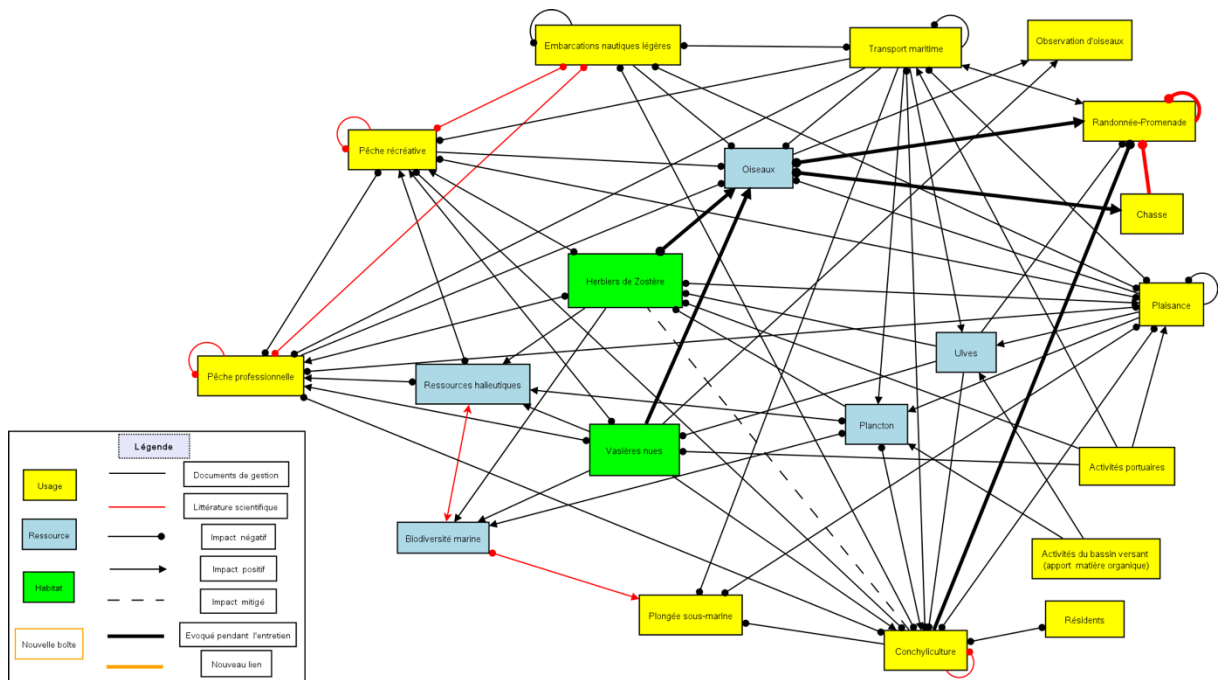


## Plongée sous-marine (18/06)



Source : auteur

## Activités pédestres (29/06)



Source : auteur

## Annexe 6 : Catégorisation des interactions

| From  | To  | Robustesse du lien | Magnitude du lien | Caractère de l'interaction |                   | Explications  | Source              |
|---|---|--------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|---|---------------------|
|   |   |                    |                   | Modèle général             | Modèle eutrophisé |   |                     |
| Activités BV  | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 3                 | N                          | N                 | déclassement sanitaire des élevages dû à une mauvaise qualité de l'eau (ex : norovirus)   | entretien + (24)    |
| Activités BV  | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    | 3                 | P                          | P                 | déclassement sanitaire des élevages dû à une mauvaise qualité de l'eau (ex : norovirus)   | entretien + (24)    |
| Activités BV  | Ressources halieutiques                                 |                    | 3                 | N                          | N                 | déclassement sanitaire des élevages dû à une mauvaise qualité de l'eau (ex : norovirus)   | entretien + (24)    |
| Activités BV  | Vasières nues   |                    | 3                 | N                          | N                 | déclassement sanitaire des élevages dû à une mauvaise qualité de l'eau (ex : norovirus), hypertrophisation du milieu  | entretien + (1,24)  |
| Activités BV  | Biodiversité Marine                                     |                    |                   |                            |                   | pas d'évidence de perte de biodiversité ou de pollution marine dans le GM   | entretien (plongée) |
| Activités BV  | Herbiers de Zostère                                     |                    | 1                 | N                          | N                 | effet direct complexe et variable, dépend de l'apport en nutriment, de sa quantité, et de sa situation dans l'écosystème (colonne d'eau/sédiment) ; impact potentiel négatif lié aux herbicides   | (7)                 |
| Biodiversité Marine                                   | Plongée sous-marine                                     |                    |                   |                            |                   | non pertinent car la plongée sous-marine est supprimée du modèle  | entretien (plongée) |
| Biodiversité Marine                                   | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    |                   |                            |                   | effet direct non structurant, complexité des interactions   | entretien           |
| Biodiversité Marine                                   | Oiseaux   |                    |                   |                            |                   | effet indirect, non structurant pour les oiseaux  | entretien           |
| Biodiversité Marine                                   | Ressources halieutiques                                 |                    | 3                 | P                          | P                 | espèces intéressantes pour la pêche sont souvent des prédateurs donc importantes dans la chaîne trophique   | (19,20)             |
| Chasse  | Randonnée_Promenade                                     |                    | 2                 | N                          | N                 | chasse dans le GM principalement au lever du soleil, risque de gêne pour les promeneurs faible  | entretien (chasse)  |
| Chasse  | Oiseaux   |                    | 3                 | N                          | N                 | activité de chasse, dérangement à cause du bruit pour les espèces chassées et non chassées  | (1)                 |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Herbiers de Zostère                                     |                    | 1                 | P                          | P                 | amélioration de la qualité de l'eau par les coquillages, diminution des courants par les tables   | entretien + (1,7,9) |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Plaisance   |                    | 1                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime, notamment avec un mauvais balisage et l'espace terrestre si débarquement   | entretien + (2,8)   |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Oiseaux   |                    |                   |                            |                   | non représenté car pas d'effet direct démontré dans le GM, pas de prédation par les oiseaux des ressources conchylicoles  | entretien           |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    |                   |                            |                   | limite de surface de concessions conchylicoles fixée par le SMVM, normes de densité d'élevage fixée par le CRC  | (2,25)              |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Randonnée_Promenade                                     |                    | 1                 | N                          | N                 | arrêt de la servitude de passage pour les exploitations, perte d'aménités paysagères dû à la présence de chantier conchylicole  | (2,8)               |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Transport maritime                                      |                    | 1                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime, dangereux si mauvais balisage  | (2)                 |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Plongée sous-marine                                     |                    |                   |                            |                   | pas d'interaction entre les 2 usages  | entretien (plongée) |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    | 2                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace pour la pêche à pied, interdiction de pêcher à moins de 15m d'une exploitation   | (2,8)               |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 3                 | N                          | N                 | risque de dépasser la capacité de charge (social, écologique, de production, physique) du milieu, changement de la chaîne trophique (compétition avec le zooplancton), schéma des structures du Morbihan : réglemente la densité, la taille des tables, le renouvellement des concessions, etc. | (17, 18, 25)        |
| Herbiers de Zostère                                   | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    | 1                 | P                          | P                 | favorise production primaire avec la photosynthèse  | (7)                 |
| Herbiers de Zostère                                   | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    |                   |                            |                   | lien supprimé car redondant, effet indirect   | entretien           |
| Herbiers de Zostère                                   | Plaisance   |                    |                   |                            |                   | lien supprimé car non pertinent, pas d'intérêt particulier à s'ancre dans un herbier de zostère   | entretien           |
| Herbiers de Zostère                                   | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 2                 | P                          | P                 | améliore la qualité de l'eau  | (1,7,9)             |
| Herbiers de Zostère                                   | Biodiversité Marine                                     |                    | 3                 | P                          | P                 | zone de nourricerie, d'alimentation, de refuge et de reproduction (seiche)  | (1)                 |
| Herbiers de Zostère                                   | Oiseaux   |                    | 3                 | P                          | P                 | source de nourriture pour les bernaches   | (1)                 |
| Herbiers de Zostère                                   | Ressources halieutiques                                 |                    | 3                 | P                          | P                 | zone de nourricerie, d'alimentation, de refuge et de reproduction (seiche)  | (1)                 |
| Oiseaux   | Randonnée_Promenade                                     |                    | 2                 | P                          | P                 | intérêt visuel pour l'activité  | entretien + (1)     |
| Oiseaux   | Chasse  |                    | 3                 | P                          | P                 | présence d'espèces intéressantes à chasser  | entretien + (1)     |
| Oiseaux   | Biodiversité Marine                                     |                    |                   |                            |                   | non représenté, car effet non structurant dans le modèle, peu d'effet direct entre les 2 compartiments  | entretien           |
| Oiseaux   | Ressources halieutiques                                 |                    |                   |                            |                   | non représenté, car effet non structurant dans le modèle, dépend de la ressource halieutique et de l'espèce d'oiseau  | entretien           |
| Oiseaux   | Herbiers de Zostère                                     |                    |                   |                            |                   | lien supprimé car pas limitant pour la production de zostère, les bernaches ne consomment que les feuilles vouées à tomber avec l'hiver   | (7)                 |
| Oiseaux   | Observation Oiseaux                                     |                    | 3                 | P                          | P                 | intérêt ornithologique pour l'activité  | (1)                 |
| Oiseaux   | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    |                   |                            |                   | principalement de l'élevage sur table dans le GM, la prédation viendrait plutôt des daurades  | (27)                |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Oiseaux   |                    | 1                 | N                          | N                 | dérangement des oiseaux   | (3)                 |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Plaisance   |                    | 1                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime   | (2)                 |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Vasières nues   |                    | 1                 | N                          | N                 | piétinement lors de l'activité de pêche à pied  | (2)                 |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 2                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace pour la pêche à pied   | (8)                 |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    | 2                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement, surfréquentation des sites de pêche  | (5)                 |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Herbiers de Zostère                                     |                    | 3                 | N                          | N                 | arrachement des herbiers avec pêche à la drague, piétinement, trituration à cause de la pêche à pied  | (2)                 |
| Pêche (Professionnelle + Loisir)                      | Ressources halieutiques                                 |                    | 3                 | N                          | N                 | action de pêche, prélèvement d'un stock halieutique   | (1)                 |

| From  | To  | Robustesse du lien | Magnitude du lien | Caractère de l'interaction |                   | Explications   | Source              |
|---|---|--------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--|---------------------|
|   |   |                    |                   | Modèle général             | Modèle eutrophisé |  |                     |
| Plaisance   | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    | 1                 | P                          | P                 | apport de matière organique avec le rejet des eaux usées   | (3,8,24)            |
| Plaisance   | Transport maritime                                      |                    | 1                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime et sur l'accès au mouillage dans les ports   | (8)                 |
| Plaisance   | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 2                 | N                          | N                 | non respect du balisage par les plaisanciers, concurrence sur l'espace pour débarquer, altération de la qualité biologique du milieu avec le rejet des eaux noires | (2,8)               |
| Plaisance   | Herbiers de Zostère                                     |                    | 3                 | N                          | N                 | arrachage à cause du mouillage   | (2)                 |
| Plaisance   | Oiseaux   |                    | 3                 | N                          | N                 | dérangement dû au débarquement sur des îles servant de nichoirs  | (3)                 |
| Plaisance   | Plongée sous-marine                                     |                    |                   |                            |                   | pas d'interaction entre les 2 usages   | entretien (plongée) |
| Plaisance   | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    | 3                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime  | (2,8)               |
| Plaisance   | Plaisance   |                    | 3                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime, effet d'encombrement des zones de mouillage   | (2,8)               |
| Plongée sous-marine                                     | Plaisance   |                    |                   |                            |                   | pas d'interaction entre les 2 usages   | entretien (plongée) |
| Plongée sous-marine                                     | Biodiversité Marine                                     |                    |                   |                            |                   | non pertinent car la plongée sous-marine est supprimée du modèle   | entretien (plongée) |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Biodiversité Marine                                     |                    | 3                 | P                          | N                 | nécessaire au développement de l'écosystème (nourriture), mais si dépasse un seuil, l'apport en nutriments devient néfaste (eutrophisation)                        | entretien + (1)     |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 3                 | P                          | N                 | la présence de plancton permet le développement des ressources conchylicoles   | (1)                 |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Herbiers de Zostère                                     |                    | 3                 | /                          | N                 | si niveau normal, pas d'interaction directe mais si dépasse un seuil, privation de lumières par les macroalgues (eutrophisation)                                   | (1,23)              |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Randonnée_Promenade                                     |                    | 3                 | /                          | N                 | si niveau normal, pas d'interaction directe, mais si dépasse un seuil, pollution visuelle, gêne pour la baignade, possibilité de putréfaction (eutrophisation)     | (24)                |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Oiseaux   |                    |                   |                            |                   | pas d'effet direct entre ces 2 compartiments   | entretien           |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Ressources halieutiques                                 |                    | 3                 | P                          | N                 | nécessaire au développement de l'écosystème (nourriture), mais si dépasse un seuil, l'apport en nutriments devient néfaste (eutrophisation)                        | (1)                 |
| Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) | Vasières nues   |                    | 3                 | /                          | N                 | si niveau normal, pas d'interaction directe, mais si dépasse un seuil, privation de lumières par les macroalgues (eutrophisation)                                  | entretien + (1,24)  |
| Randonnée_Promenade                                     | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 1                 | N                          | N                 | non respect du balisage  | (8)                 |
| Randonnée_Promenade                                     | Oiseaux   |                    | 3                 | N                          | N                 | passage des promeneurs près de zones privilégiées par les oiseaux  | (1)                 |
| Randonnée_Promenade                                     | Randonnée_Promenade                                     |                    | 3                 | N                          | N                 | surfréquentation possible du sentier littoral et des îles  | entretien + (12,13) |
| Randonnée_Promenade                                     | Transport maritime                                      |                    | 3                 | P                          | P                 | demande forte permettant de développer le secteur et l'offre   | (2)                 |
| Ressources halieutiques                                 | Oiseaux   |                    |                   |                            |                   | non représenté, car effet non structurant dans le modèle, dépend de la ressource halieutique et de l'espèce d'oiseau   | entretien           |
| Ressources halieutiques                                 | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    |                   |                            |                   | facteur non limitant, les ressources halieutiques ne peuvent pas consommer toute production primaire   | entretien           |
| Ressources halieutiques                                 | Biodiversité Marine                                     |                    |                   |                            |                   | facteur non limitant, les ressources halieutiques faisant partie de la biodiversité, à des niveaux multiples de la chaîne trophique                                | entretien           |
| Ressources halieutiques                                 | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    | 3                 | P                          | P                 | présence d'espèces intéressantes à pêcher (daurades, seiche, etc)  | (1)                 |

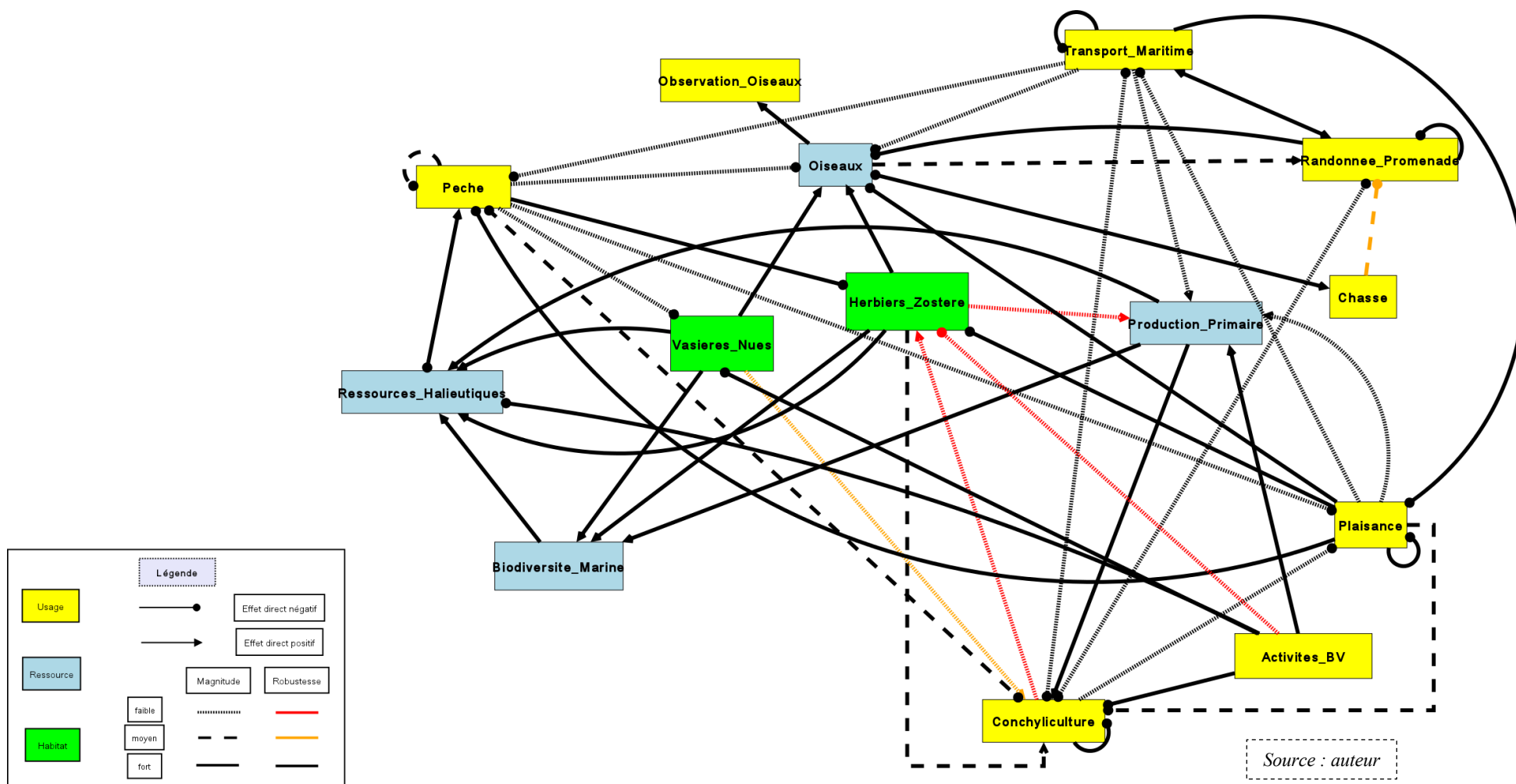
| From  | To  | Robustesse du lien | Magnitude du lien | Caractère de l'interaction |                   | Explications  | Source              |
|---|---|--------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|---|---------------------|
|   |   |                    |                   | Modèle général             | Modèle eutrophisé |   |                     |
| Transport maritime                                    | Plongée sous-marine                                     |                    |                   |                            |                   | pas d'interaction entre les 2 usages  | entretien (plongée) |
| Transport maritime                                    | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 1                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace, altération de la qualité biologique du milieu avec le rejet des eaux noires   | (2,8)               |
| Transport maritime                                    | Oiseaux   |                    | 1                 | N                          | N                 | dérangement des oiseaux   | (3)                 |
| Transport maritime                                    | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    | 1                 | N                          | N                 | détérioration de la qualité de l'eau avec le rejet des eaux noires  | (2,8)               |
| Transport maritime                                    | Production primaire colonne d'eau (ulves+phytoplancton) |                    | 1                 | P                          | P                 | apport de matière organique avec le rejet des eaux usées  | (3,8,24)            |
| Transport maritime                                    | Plaisance   |                    | 3                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace maritime et sur l'accès au mouillage dans les ports  | (8)                 |
| Transport maritime                                    | Randonnée Promenade                                     |                    | 3                 | P                          | P                 | facilité d'accès aux îles du Golfe pour se promener   | (2)                 |
| Transport maritime                                    | Transport maritime                                      |                    | 3                 | N                          | N                 | concurrence sur l'espace entre les bateaux, encombrement des zones de mouillage   | (2)                 |
| Vasières nues   | Pêche (Professionnelle + Loisir)                        |                    |                   |                            |                   | impact indirect, déjà représenté en passant par ressources halieutiques   | entretien           |
| Vasières nues   | Observation Oiseaux                                     |                    |                   |                            |                   | impact indirect, déjà représenté en passant par oiseaux   | entretien           |
| Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité) | Vasières nues   |                    |                   |                            |                   | non représenté car effet mitigé et incertain, les ressources conchylicoles apportent des nutriments aux vasières, les conchyliculteurs peuvent altérer la vasière avec les engins ou en perturbant le courant | (26)                |
| Vasières nues   | Conchyliculture (ressources conchylicoles + activité)   |                    | 1                 | P                          | P                 | source de nourriture pour les huîtres avec la présence microphybenthos, production primaire favorisée par les fécès d'huître  | (26)                |
| Vasières nues   | Biodiversité Marine                                     |                    | 3                 | P                          | P                 | zone de nourricerie (sole), d'alimentation, de refuge   | (1)                 |
| Vasières nues   | Oiseaux   |                    | 3                 | P                          | P                 | zone d'alimentation, de repos   | (1)                 |
| Vasières nues   | Ressources halieutiques                                 |                    | 3                 | P                          | P                 | zone de nourricerie (sole), d'alimentation, de refuge   | (1)                 |

| Échelles d'intensité |            |           |
|----------------------|------------|-----------|
|                      | Robustesse | Magnitude |
| Faible               |            | 1         |
| Moyenne              |            | 2         |
| Forte                |            | 3         |

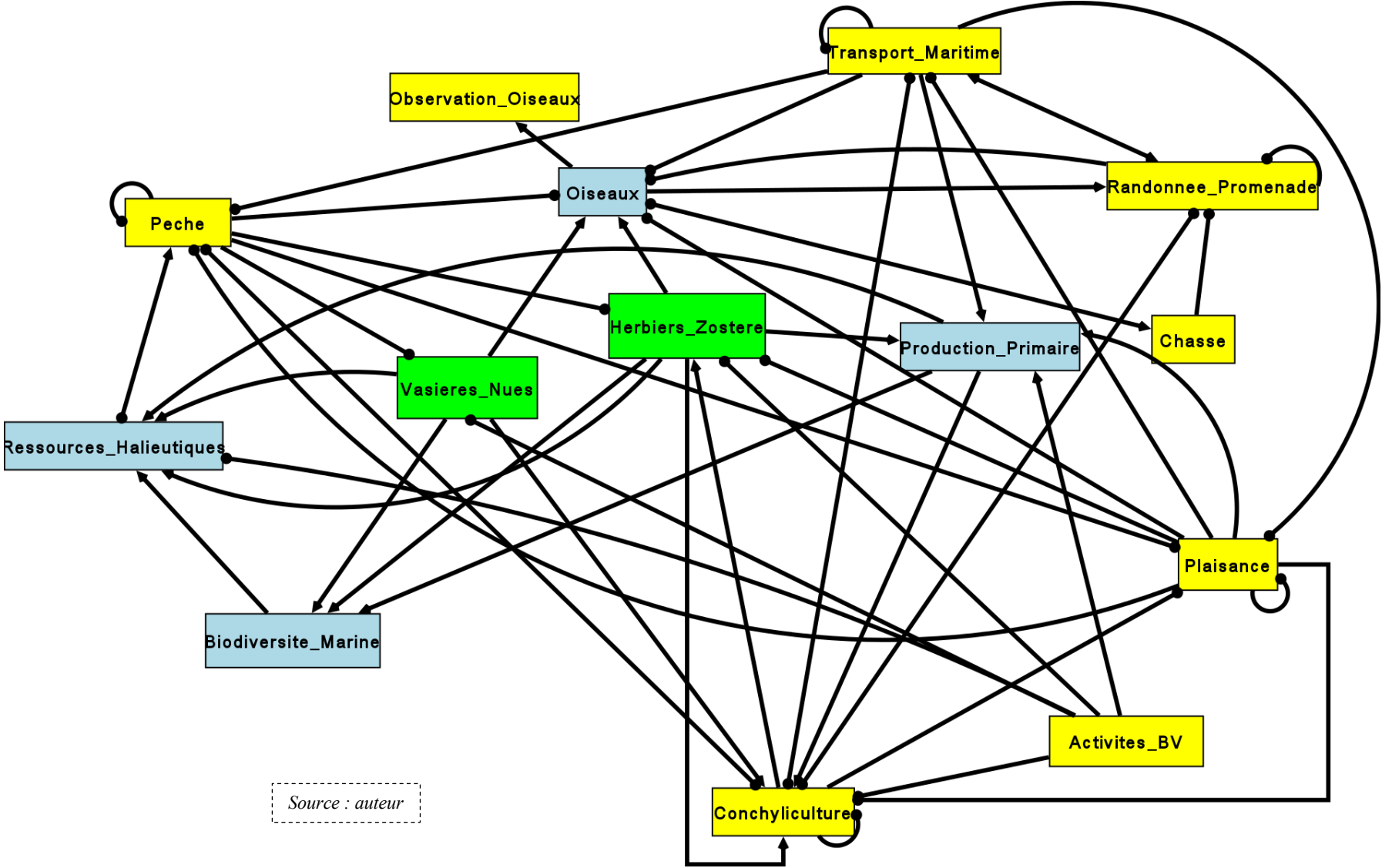
| Légende |                             |
|---------|-----------------------------|
|         | interaction supprimée       |
|         | interaction non représentée |

**Explications :** Chaque ligne correspond à une interaction, allant de la variable « from » à la variable « to ». L'échelle de robustesse représente la véracité de l'interaction, rouge pour faible, orange pour moyenne et vert pour forte. L'échelle de magnitude représente la force de l'interaction, 1 pour faible, 2 pour moyenne et 3 pour forte. L'interaction, positive et/ou négative, peut être intégrée dans le modèle général et/ou le modèle eutrophisé ou aucun des deux. Le tableau complet est disponible en annexe, ainsi que la bibliographie référencée dans la colonne source.

# Annexe 7 : Synthétisation des modèles – Modèle complet



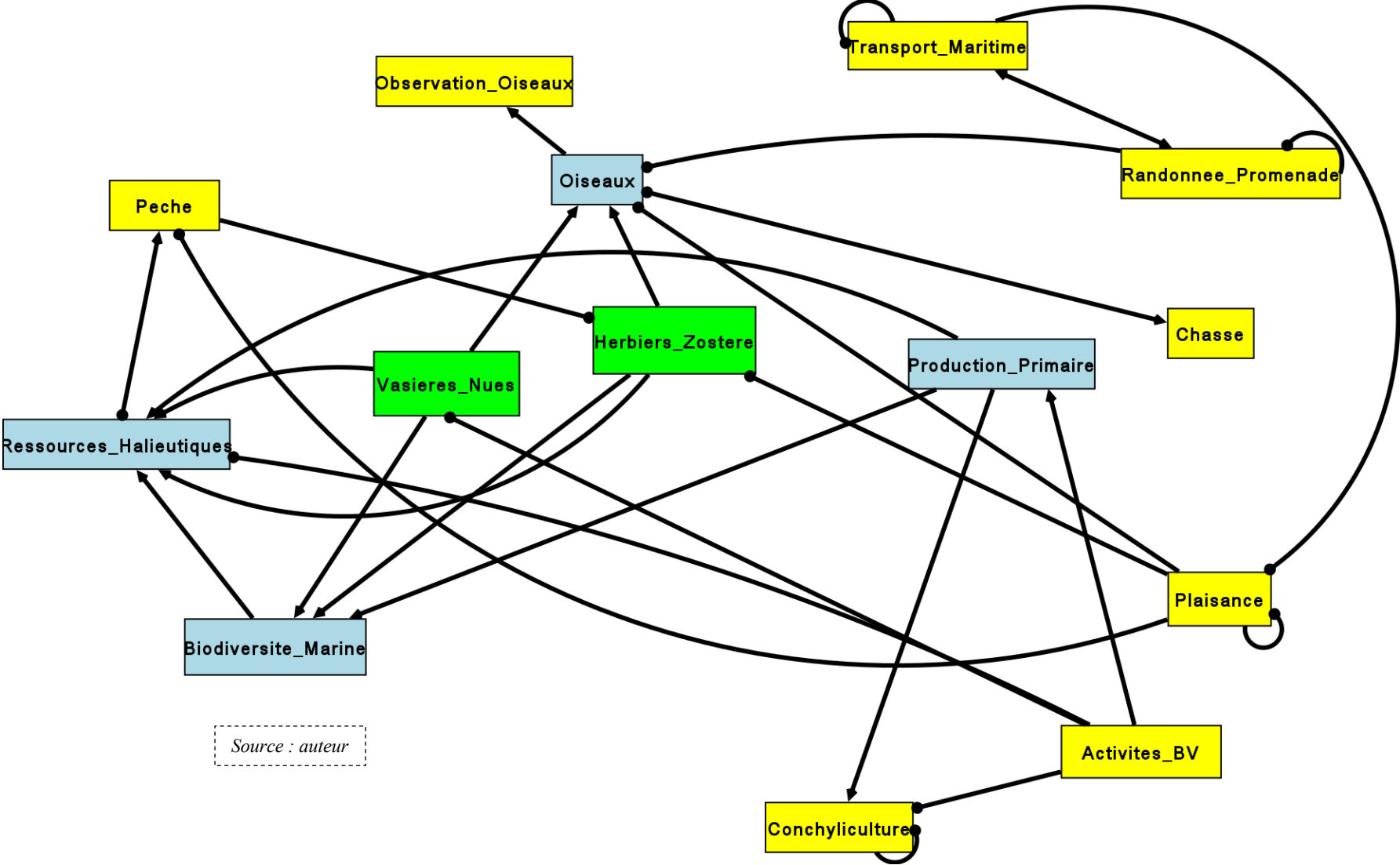
Annexe 8a : Analyse mathématique – Modèle *complet*



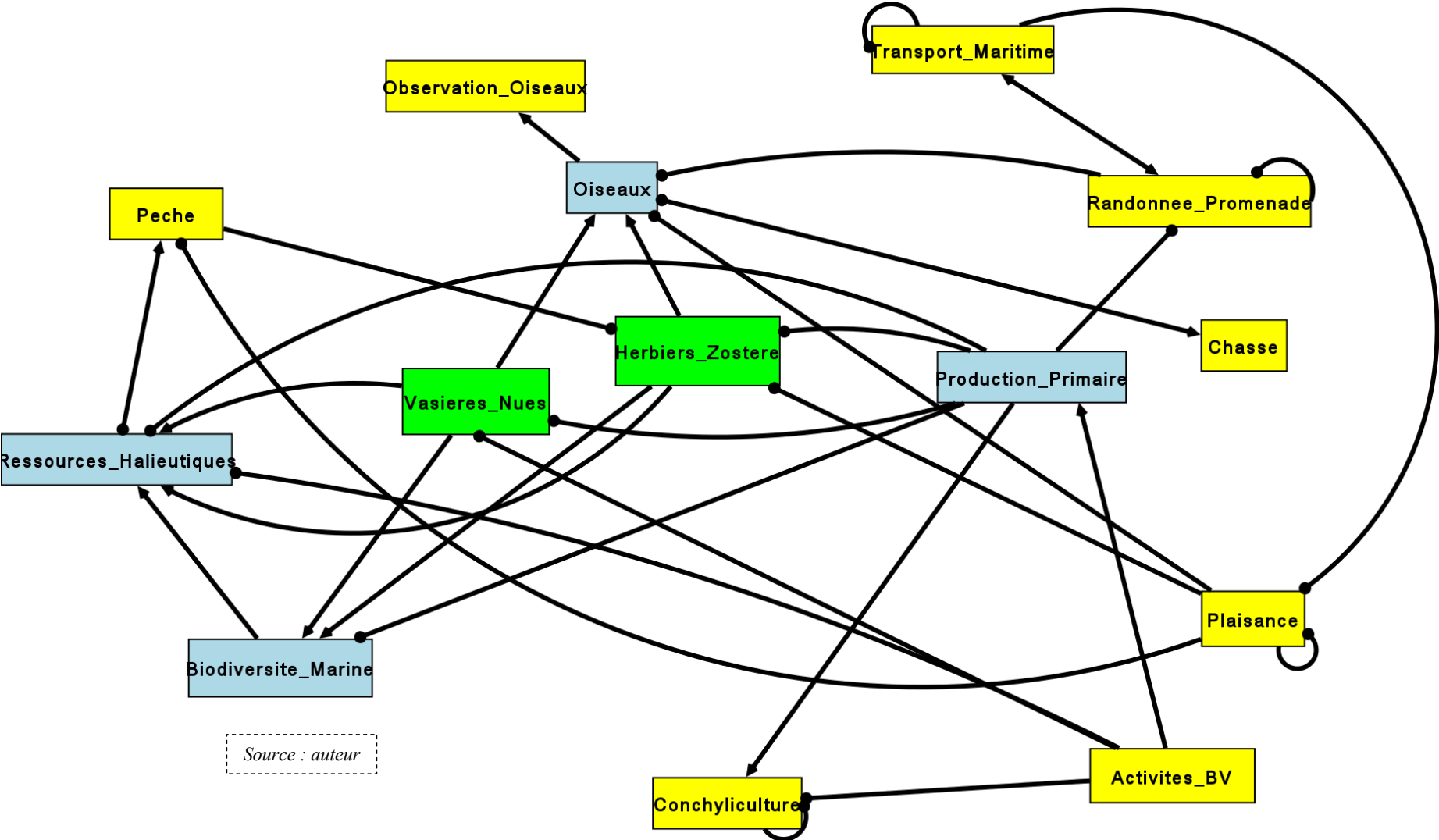
Source : auteur



Annexe 8b : Analyse mathématique – Modèle simplifié



Annexe 8c : Analyse mathématique – Modèle *eutrophisé*



Source : auteur

## Annexe 9 : Scénarios pour l'analyse des perturbations

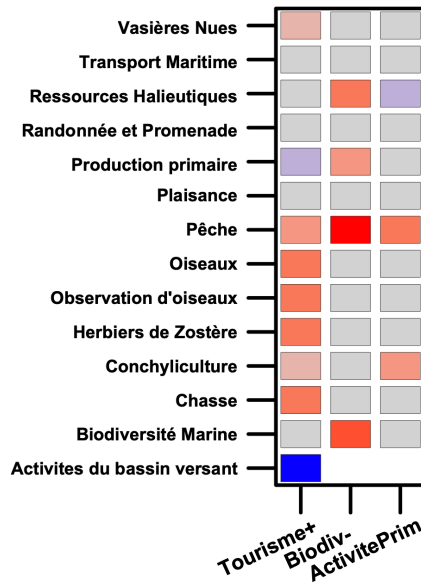
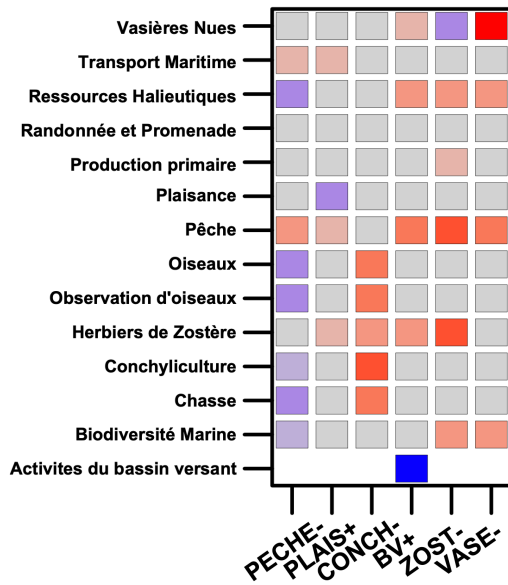
| Scénario      | Signification                                 | Perturbation | Variable(s) perturbée(s)  |
|---------------|---|--------------|---|
| Pêche-        | Réduction de l'activité de pêche              | -1           | Pêche (professionnelle et récréative)   |
| Plaisance+    | Développement de la plaisance                 | +1           | Plaisance   |
| Conch-        | Réduction de la conchyliculture               | -1           | Conchyliculture   |
| BV+           | Développement des activités du bassin versant | +1           | Activités du bassin versant   |
| Vase-         | Diminution de la vasière                      | -1           | Vasières nues   |
| Zost-         | Diminution des herbiers de zostères           | -1           | Herbiers de Zostères  |
| Tourisme+     | Développement du tourisme                     | +1           | Activités du bassin versant, Pêche (récréative), Plaisance, Randonnée/Promenade, Transport maritime,            |
| Biodiv-       | Érosion de la biodiversité                    | -1           | Biodiversité marine, Herbiers de Zostères, Oiseaux, Production primaire, Ressources halieutiques, Vasières nues |
| ActivitéPrim- | Baisse des activités primaires                | -1           | Conchyliculture, Pêche (professionnelle)  |

# Annexe 10 : Réponses du système face aux perturbations

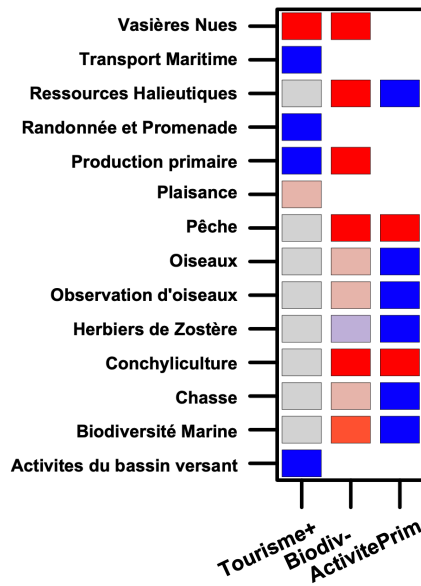
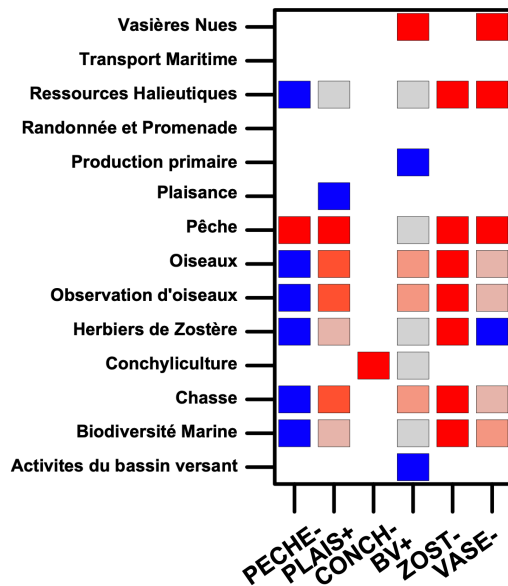
## Scénarios simples

## Scénarios multiples

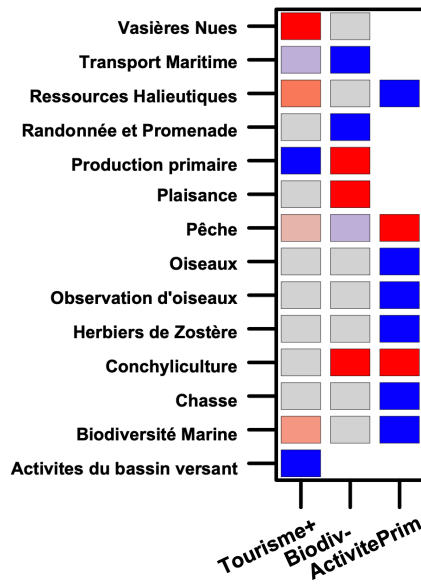
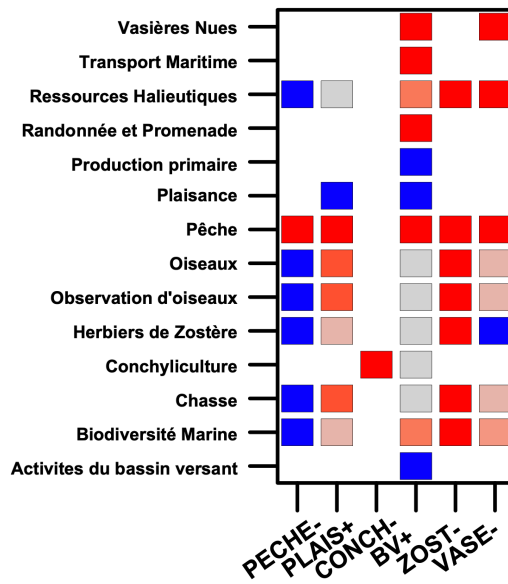
Modèle complet



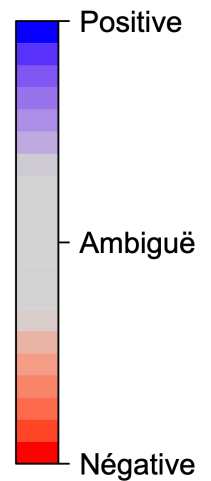
Modèle simplifié



Modèle eutrophisé



### Type de réponse



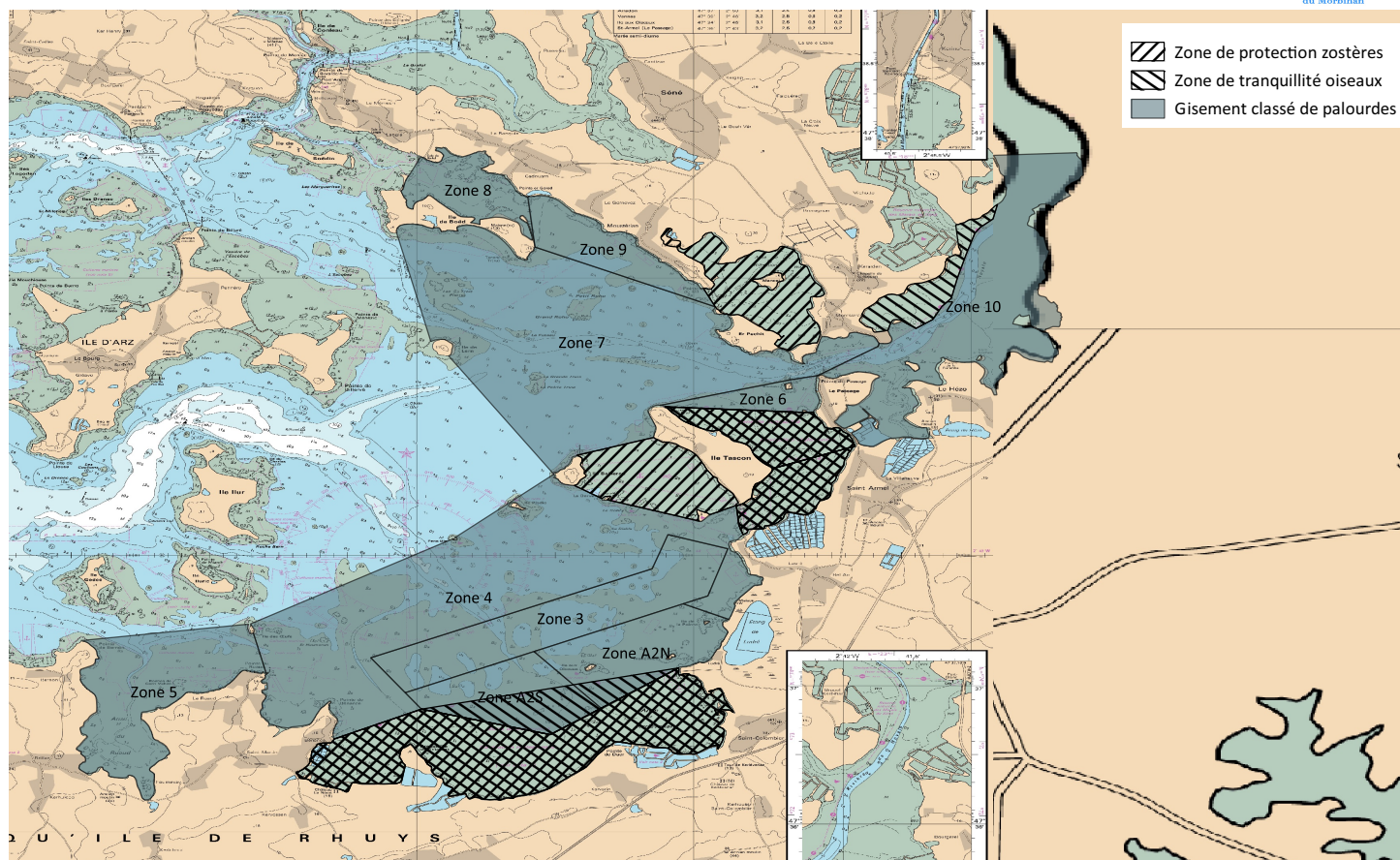
Source : auteur

## Annexe 11 : Cartographie du gisement classé de palourdes dans le golfe du Morbihan

Délibération "Pêche à pied-CDPM 56-2013/2014-B" du 11 juin 2013  
fixant les conditions de pêche à pied sur les secteurs de pêche du littoral du Morbihan

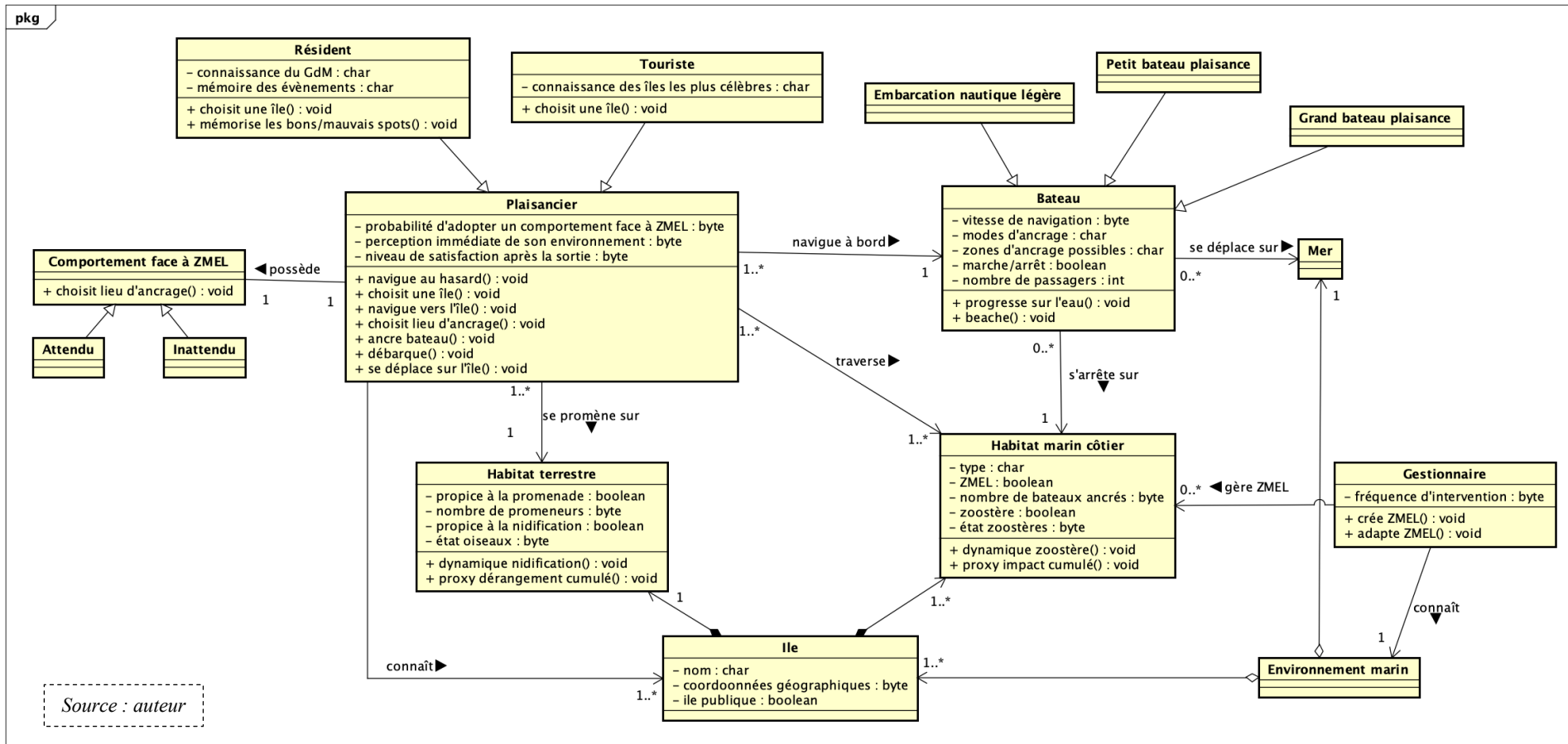


Gisement de palourdes du Golfe du Morbihan

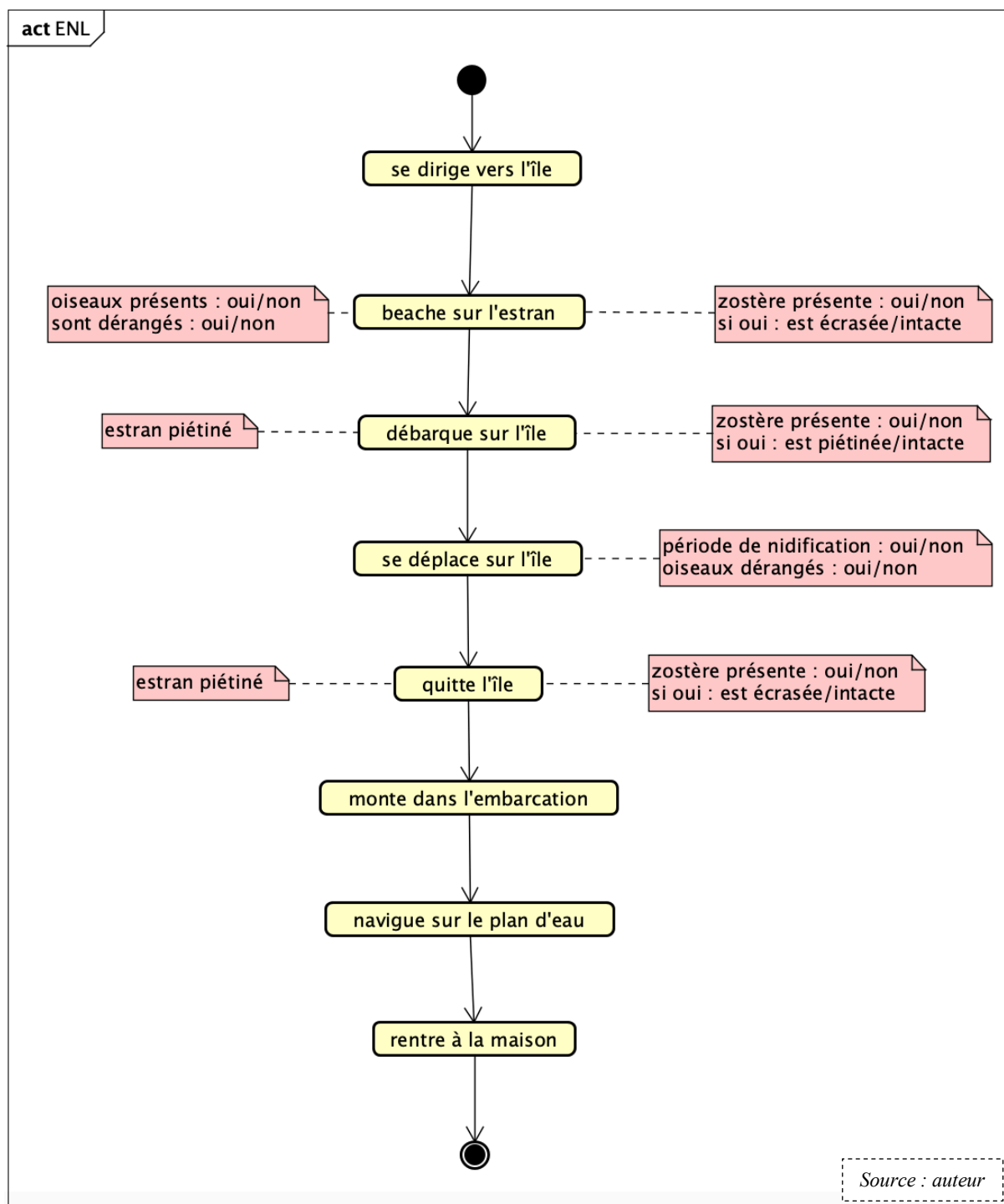


Source : Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Élevages Marins du Morbihan (2013) Gisement de palourdes du Golfe du Morbihan (délibération du 11 juin 2013) [carte].

## Annexe 12 : Diagramme de classe – Débarquement sur une île du golfe du Morbihan

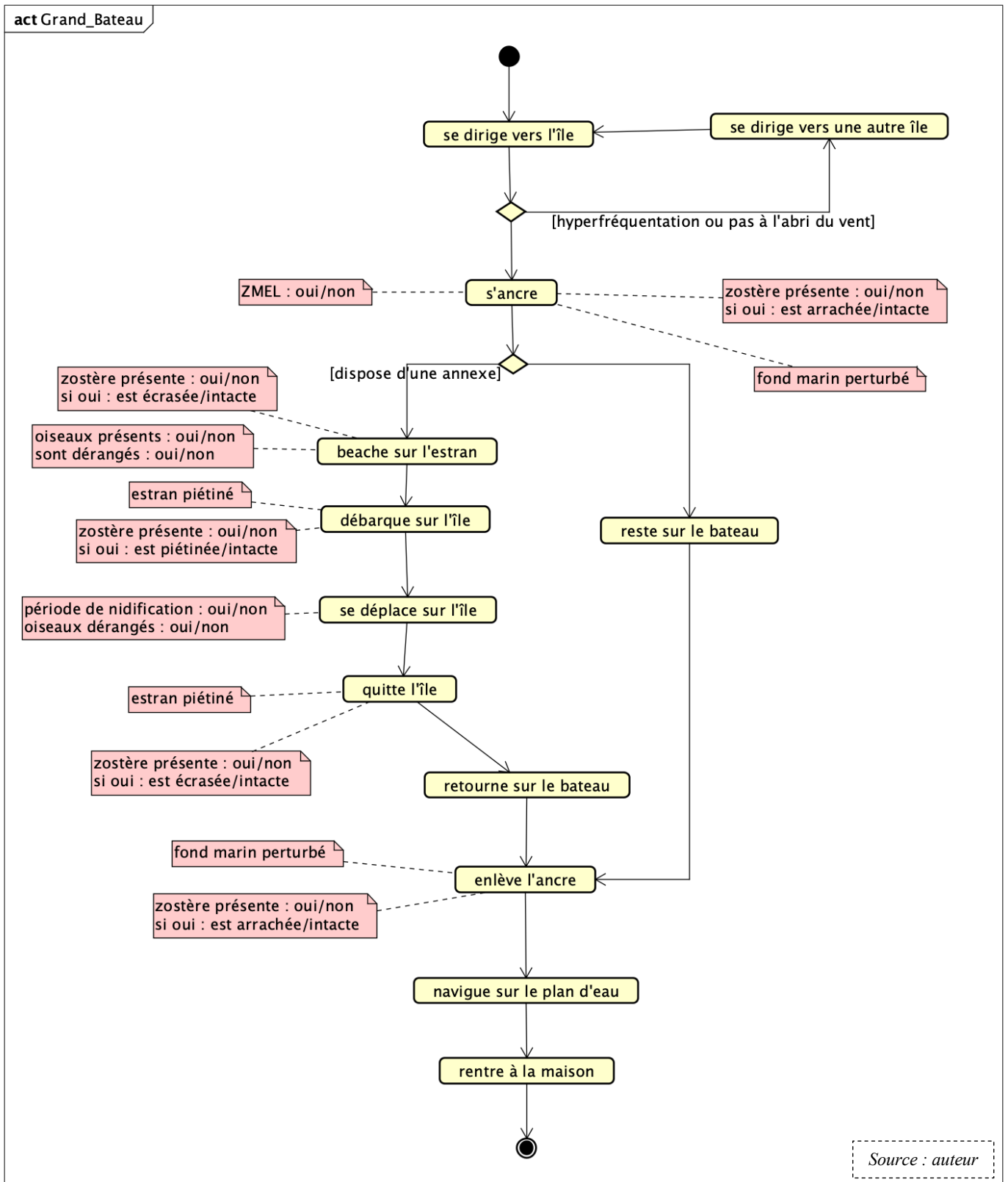


## Annexe 13a : Diagramme d'activité – Débarquement sur une île pour une embarcation nautique légère

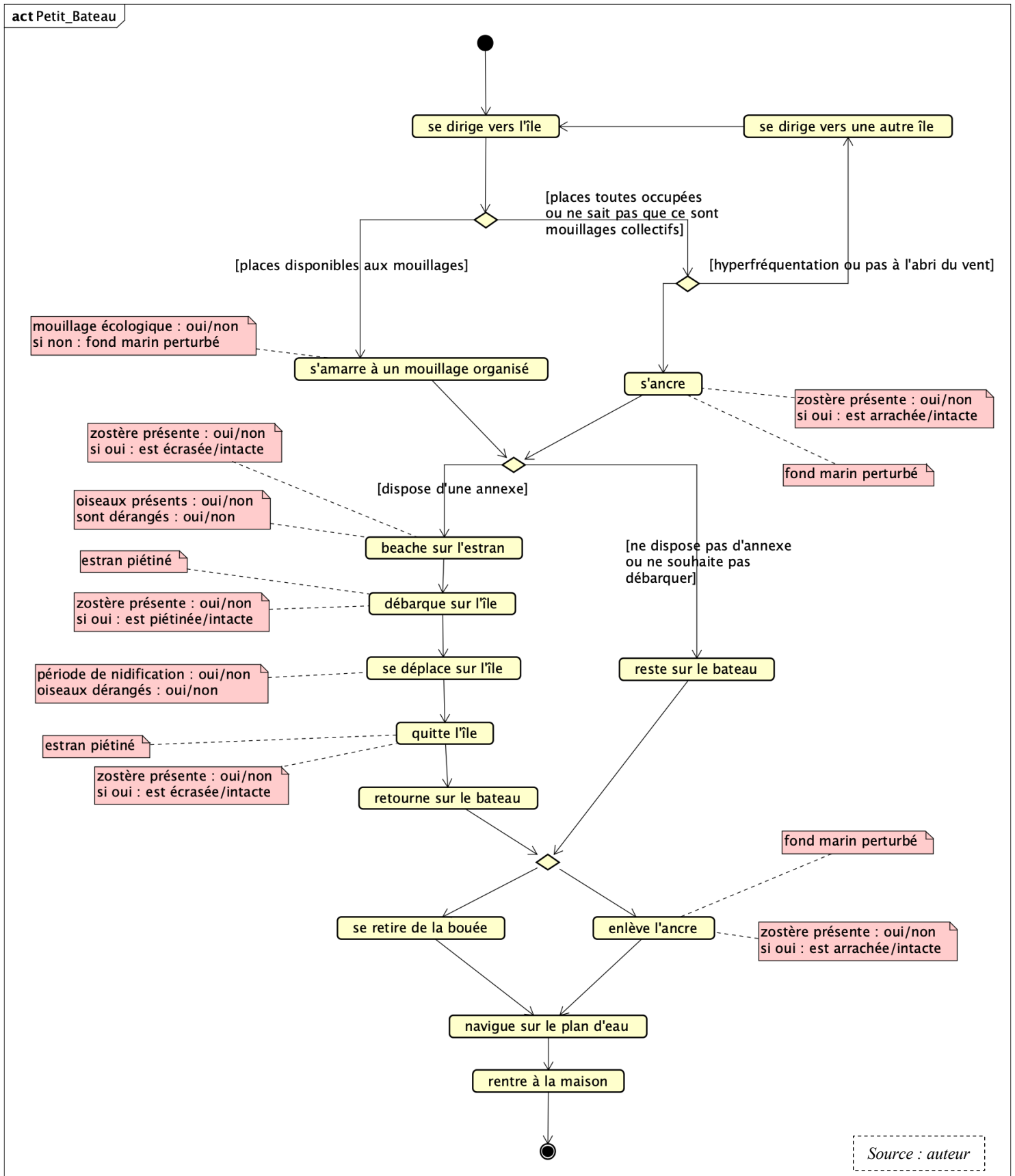






## Annexe 13b : Diagramme d'activité – Débarquement sur une île pour un grand bateau (>7m)



# Annexe 13c : Diagramme d'activité – Débarquement sur une île pour un petit bateau (<7m)





|  |  |
|--|--|
|    | Diplôme : Master<br>Spécialité : Économie Appliquée : Agriculture, Mer, Environnement<br>Spécialisation / option : /<br>Enseignant référent : Frédérique Alban |
| Auteur(s) : Pierre Reaud<br><br>Date de naissance : 23/10/1995   | Organisme d'accueil : Université de Bretagne Occidentale<br><br>Adresse : 3 rue des Archives<br>29200 BREST  |
| Nb pages : 35                      Annexe(s) : 21  | Maître de stage : Pierre Scemama   |
| Année de soutenance : 2020   |  |
| Titre français : Modélisation qualitative des socio-écosystèmes marins en appui à la conservation de la biodiversité   |  |
| Titre anglais : Qualitative modelling of marine social-ecological systems in favor of the biodiversity conservation  |  |
| Résumé (1600 caractères maximum) : Le golfe du Morbihan dispose d'habitats marins remarquables. Ceux-ci fournissent des services écosystémiques favorisant le développement d'activités anthropiques. Le golfe peut est ainsi réfléchi comme un socio-écosystème pour regarder les interactions entre les usages et les habitats marins. Deux approches de modélisation participatives sont mises en œuvre pour réfléchir à la conservation des vasières et des herbiers de zostères. La première se fonde sur la modélisation qualitative, à travers la co-construction de modèles avec des experts scientifiques et des acteurs locaux. Ces modèles sont analysés mathématiquement afin de regarder les réponses des variables du système face à des perturbations. La deuxième mobilise la modélisation basée sur l'agent. Plusieurs diagrammes UML sont construits afin de révéler le comportement d'un usager face à l'instauration une mesure de gestion. Les mesures modélisées sont la mise en jachère dans une zone de pêche à pied récréative de palourdes et l'installation de mouillages écologiques à proximité d'une île. La modélisation qualitative permet d'obtenir des résultats face à des scénarios sans utiliser de données quantitatives. Les diagrammes UML font apparaître les données nécessaires pour évaluer les mesures de gestion. Ces deux approches apportent alors des visions complémentaires pour mieux appréhender la conservation des habitats marins. |  |
| Abstract (1600 caractères maximum) : The gulf of Morbihan has remarkable marine habitats. They provide ecosystem services favoring the development of human activities. The gulf can thus be considered as a social-ecological system to look at the interactions between uses and marine habitats. Two participatory modeling approaches are implemented to reflect on the conservation of mudflats and Zostera meadows. The first is based on qualitative modeling, through the co-construction of models with scientific experts and local actors. These models are analyzed mathematically in order to look at the responses of the variables of the system following disturbances. The second involves agent-based modeling. Several UML diagrams are constructed in order to reveal the behavior of a user when faced with the introduction of a management measure. The modeled measures are the establishment of a fallow in a recreational shellfish fishing area and the installation of ecological moorings near an island. Qualitative modeling makes it possible to obtain results against scenarios without using quantitative data. UML diagrams show the data needed to evaluate management measures. These two approaches then provide complementary visions to better understand the conservation of marine habitats.  |  |
| Mots-clés : modélisation qualitative, socio-écosystème, habitat marin, approche participative  |  |
| Key Words: qualitative modelling, social-ecological system, marine habitat, participatory approach   |  |

\* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires