

MEMOIRE DE MASTER
ÉCOLE D'ÉCONOMIE DE LA SORBONNE

**Comment parvenir à analyser et quantifier l'impact du
transport maritime sur la biodiversité marine ?**

**Méthodologie de calcul d'empreinte biodiversité d'un navire
porte-conteneur sur une route maritime en Méditerranée**

Octobre 2024

Louise LORIDON

Sous la supervision de

Mouez FODHA et Emeric LENDJEL

Abstract

Cette étude cherche à établir un modèle permettant d'estimer les impacts sur la biodiversité marine et le climat, d'un navire porte-conteneur en Méditerranée. Pour ce faire, il convient de réaliser une méthodologie d'empreinte biodiversité appliquée au maritime, en s'appuyant sur les travaux déjà existant sur les indicateurs et les empreintes biodiversité terrestres. Dans un premier temps, il s'agit de sélectionner des indicateurs permettant d'évaluer les impacts du navire sur son environnement, puis d'établir des seuils afin de placer le navire en fonction de l'ampleur de ses impacts. Enfin, chaque indicateur est pondéré par un comité d'experts afin de hiérarchiser les impacts. Dans un deuxième temps, ce modèle est appliqué à un exemple empirique – un navire porte-conteneur de petite taille sur une route maritime en Méditerranée occidentale pour le premier trimestre 2024 – afin de tester sa faisabilité. Sont examinées les données disponibles sur le navire en vue de déterminer ses caractéristiques physiques, les technologies de décarbonation à l'œuvre ainsi que les émissions qu'il rejette. Elles sont ensuite comparées aux données de la route maritime qu'il emprunte et le contexte maritime de la période de navigation. Cet article conclut sur le résultat de l'empreinte biodiversité obtenue par le navire et analyse les limites et améliorations de cette recherche.

Mots clés : Economie de l'environnement, Transport maritime, Empreinte biodiversité, Pollution de l'air, Pollution marine, mer Méditerranée

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mes directeurs, Emeric Lendjel et Mouez Fodha, pour toutes leurs relectures, soutien et conseils durant la rédaction du mémoire. Je remercie aussi Caroline Roux pour son aide pendant le stage et tout le soutien et le temps qu'elle m'a accordé pour relire mon questionnaire et m'aider à l'améliorer.

Je souhaite remercier les experts qui ont accepté de participer à mon comité dans le cadre de la méthode DELPHI pour leur engagement dans la pondération de mon questionnaire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche : Caroline Roux, Marion Labrousse, Guillaume Bracq, Morgan Kerguillec, Allegra Nass, Emma d'Huy, Matthieu Lemetayer et Aurore Morin.

De plus, je voudrais remercier les experts qui m'ont permis de mieux connaître la biodiversité marine et les enjeux liés à sa protection notamment Muriel Barron et Alain Barcelo bien que n'ayant pas pu faire partie du comité. Aussi je remercie tous les experts qui m'ont permis d'avoir accès à des données et de mieux comprendre le fonctionnement des technologies sur les navires : Anthony Eydt, Manuel Pusceddu, Delphine Markt, Mathieu Massol, Charline Barresi, Elodie Letray, Raphaël Giganti, Alexandra Teyssou, Lucie Brouwer et Cécile Riou. Je voudrais remercier Emma d'Huy ayant avancé sur ce sujet et qui m'a permis d'envisager les méthodologies les plus adaptées à ma recherche.

Enfin, je souhaite, sur une note plus personnelle, remercier ma famille mais aussi mes amis et collègues, François Citton, Kévin Vandermalière, Clément Aranda, Cyrielle Jeune, Cécile Ors, Manon Pele et Thomas Darde qui m'ont soutenue pendant le stage et la rédaction de ce mémoire en m'apportant de l'aide et des compétences sur divers sujets et logiciels.

Table des matières

<i>Liste des abréviations et acronymes</i>	7
1. Introduction	9
1.1 Contexte	9
1.1.1 Secteur du transport maritime et changement climatique	9
1.1.2 Empreinte carbone et émergence de l’empreinte biodiversité	11
1.2 Contributions	14
1.2.1 Outil d’aide à la décision des entreprises	14
1.2.2 Participation à la recherche	15
2. Revue de littérature	17
2.1 Indicateurs	17
2.1.1 Indicateurs taxonomiques	17
2.1.1.1 Mesure d’abondance relative	18
2.1.1.2 Mesure de dissimilarité conjointe	19
2.1.2 Indicateurs phylogénétiques	21
2.1.3 Indicateurs de biodiversité	22
2.2 Méthodes de calcul d’empreinte biodiversité terrestre	25
2.2.1 Empreinte qualitative	25
2.2.2 Empreinte quantitative	25
2.2.2.1 Empreinte quantitative désagrégée	25
2.2.2.2 Empreinte quantitative agrégée	26
3. Données	28
3.1. Justification du choix de la zone, de la ligne maritime et du navire	28
3.2. Données du navire	29
3.3. Données de la ligne	31
4. Méthodologie de calcul de l’empreinte biodiversité	32
4.1 Prérequis : Choix de la méthodologie parmi celles évoquées dans la revue	32
4.2 Etape 1 : Justification choix des indicateurs	33
4.3 Etape 2 : Constitution du questionnaire	34
4.3.1. Indicateurs navire	34
4.3.1.1. Fiche technique du navire	34
4.3.1.1.1 Opérateur du navire	34
4.3.1.1.2 Pavillon du navire	35
4.3.1.1.3 Règlementations sur les NOx	36
4.3.1.1.4 Nombre de conteneurs réfrigérés	37
4.3.1.1.5 Type de carburant	37
4.3.1.1.6 Règlementations sur les SOx	38
4.3.1.1.7 Consommation moyenne de carburant	39
4.3.1.1.8 Rapport entre tonnes transportées par km et émissions	39
4.3.1.1.9 Sensibilisation du personnel navigant	40
4.3.1.2. Emissions	40
4.3.1.2.1 Gaz à effet de serre et polluants	40
4.3.1.2.2 Indicateur d’intensité carbone (CII)	41
4.3.1.3. Technologies à impact sur la biodiversité	43

4.3.1.3.1	Adaptation Shore Power - Navire	43
4.3.1.3.2	Présence d'un scrubber	43
4.3.1.3.3	Choix de la peinture antifouling	44
4.3.1.3.4	Traitement des eaux de ballast	45
4.3.1.4.	Trajet du navire	46
4.3.1.4.1	Vitesse moyenne	46
4.3.1.4.2	Signature acoustique	47
4.3.1.4.3	Collision	50
4.3.1.4.4	Rejets huileux	51
4.3.1.4.5	Perte de conteneur	51
4.3.1.4.6	Temps passé en escale / Temps passé à naviguer	52
4.3.1.4.7	Attente avec l'accostage	53
4.3.1.5.	Labels et certifications	53
4.3.2.	Indicateurs de la route maritime	54
4.3.2.1.	Caractéristiques météorologiques et physiques	54
4.3.2.1.1	Courants marins et météorologie	54
4.3.2.1.2	Bathymétrie	55
4.3.2.2.	Zones traversées	56
4.3.2.2.1	Adaptation Shore Power - Quai / Port	56
4.3.2.2.2	Tracé de la ligne	56
4.3.2.2.3	Présence de zone ECA	57
4.3.2.2.4	Règlementations environnementales des autorités portuaires	58
4.3.2.2.5	Passages dans des eaux territoriales	58
4.3.2.2.6	Présence de zones protégées et comportement du navire	59
4.3.2.2.7	Présence de zones dynamiques ou statiques	59
4.3.3.	Indicateurs du contexte	60
4.3.3.1	Présence d'aquacultures proche de la route	60
4.3.3.2	Activités de tourisme	61
4.3.3.3	Fréquentation de la zone	62
4.4	Etape 3 : Explication du choix des seuils	62
4.4.1.	Indicateurs navire	63
4.4.1.1.	Fiche Technique du navire	63
4.4.1.1.1	Opérateur du navire	63
4.4.1.1.2	Pavillon du navire	64
4.4.1.1.3	Règlementations sur les NOx	64
4.4.1.1.4	Nombre de conteneurs réfrigérés	64
4.4.1.1.5	Type de carburant	65
4.4.1.1.6	Règlementation sur les SOx	65
4.4.1.1.7	Consommation moyenne de carburant	65
4.4.1.1.8	Rapport entre tonnes transportées par kilomètre et émissions	66
4.4.1.1.9	Sensibilisation du personnel navigant	66
4.4.1.2.	Emissions	66
4.4.1.2.1	Gaz à effet de serre et polluants	66
4.4.1.2.2	Indicateur d'intensité carbone (CII)	67
4.4.1.3.	Technologies à impact sur la biodiversité	68
4.4.1.3.1	Adaptation Shore Power - Navire	68
4.4.1.3.2	Présence d'un scrubber	68
4.4.1.3.3	Choix de la peinture antifouling	68
4.4.1.3.4	Traitement des eaux de ballast	68
4.4.1.4	Trajet du navire	69

4.4.1.4.1	Vitesse moyenne	69
4.4.1.4.2	Signature acoustique	69
4.4.1.4.3	Collision	70
4.4.1.4.4	Rejets huileux	71
4.4.1.4.5	Perte de conteneur	71
4.4.1.4.6	Temps passé à quai et à naviguer	71
4.4.1.4.7	Attente avant l'accostage ou retards sur la ligne	71
4.4.1.5	Labels et certifications	71
4.3.2.	Indicateurs de la route maritime	72
4.3.2.1.	Caractéristiques météorologiques et physiques	72
4.3.2.1.1	Courants marins et météorologie	72
4.3.2.1.2	Bathymétrie	73
4.3.2.2.	Zones traversées	73
4.3.2.2.1	Adaptation Shore Power - Quai / Port	73
4.3.2.2.2	Tracé de la ligne	73
4.3.2.2.3	Présence de zone ECA	73
4.3.2.2.4	Règlementations environnementales des autorités portuaires	74
4.3.2.2.5	Eaux territoriales	74
4.3.2.2.6	Présence de zones protégées et comportement du navire	74
4.3.2.2.7	Présence de zones dynamiques ou statiques	74
4.3.3	Indicateurs du contexte	75
4.3.3.1	Présence d'aquaculture proche de la route	75
4.3.3.2	Activités de tourisme	75
4.3.3.3	Fréquentation de la zone	75
4.5	Etape 4 : Pondération des indicateurs grâce à la méthode DELPHI	76
5.	Résultats	77
5.1	Calcul de l'empreinte biodiversité	77
5.1.1	Traitement des données	77
5.1.1.1	Indicateurs du navire	78
5.1.1.1.1	Fiche technique du navire	78
5.1.1.1.2	Emissions	78
5.1.1.1.3	Technologies à impact sur la biodiversité	79
5.1.1.1.4	Trajets	79
5.1.1.1.5	Labels et certifications	79
5.1.1.2	Indicateurs de la route maritime	79
5.1.1.2.1	Caractéristiques météorologiques et physiques	79
5.1.1.2.2	Zones traversées	80
5.1.1.3	Indicateurs du contexte	82
5.1.2	Compte-rendu du comité avec la méthode DELPHI	83
5.2	Analyse des résultats	84
5.2.1	Analyse du résultat de l'empreinte biodiversité	84
5.2.2	Limites et biais de l'étude	85
5.2.2.1	Biais dans les données et leur traitement	85
5.2.2.2	Biais dans les indicateurs choisis	85
5.2.2.3	Biais dans la méthode	87
6.	Conclusion et Discussion	88
6.1	Conclusion générale de l'étude	88
6.2	Ouverture	90

Bibliographie	91
A. Annexes	96
A1. Ligne de l'étude en mer Méditerranée occidentale	96
A3. Prévision des coûts des combustibles par rapport au VLSFO après prise en compte de l'impact des mesures supplémentaires d'efficacité énergétique, sans prix du carbone de 100 €/t (à gauche) et avec un prix du carbone de 100 €/t (à droite) (Source : OMI)	97
A4. Paramètres nécessaires au calcul du CII Référence (Source : OMI)	97
A5. Bruit sous-marin et vitesse en fonction de la fréquence et de l'intensité selon un navire qui prend conscience et fait attention au bruit qu'il émet (Figure 1) et un navire qui est plus avancé sur le sujet et agit en conséquences (Figure 2) (Source : Bureau Véritas)	98
A6. Risques de mort des cétacés suite à une collision avec un navire en fonction de la vitesse (Source : Vanderlaan, A.S. and Taggart, C.T. 2007)	99
A7. Le Sanctuaire Pélagos et la ZMPV en Méditerranée Nord-Occidentale (Source : pelagos-sanctuary.org)	99
A8. Réglementation sur les oxydes d'azote pour les navires (Source : OMI)	100
A9. Définitions des étapes de la méthode DELPHI (Source : wikimedia.org)	100
A10. Présence d'alimentation à quai en Méditerranée occidentale (Source : European Environmental Agency)	101
A11. Présence d'aquaculture en Méditerranée dans les parcs de protection de la biodiversité (Source : WWF)	101
A12. Densité des routes maritimes en mer Méditerranée par an (Source : Marine Traffic)	102
A13. Densité annuelle de navires cargo traversant et/ou passant devant les zones de protection de la biodiversité marine et autres zones de conservation de la Méditerranée (Source : WWF)	102
A14. Questionnaire finalisé de l'empreinte biodiversité	103
A15. Approfondissement des analyses Well-To-Wake	104

Liste des abréviations et acronymes

ACB	Analyse Coûts-Bénéfices
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDB/CBD	Convention sur la Diversité Biologique
CDC Biodiversité	Caisse des Dépôts et Consignation – Biodiversité
CDP	Carbon Disclosure Project
CII	Indicateur d’Intensité Carbone
CO2	Dioxyde de carbone
CNUCED	Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement
DO	Diesel Oil
DWT	Deadweight / Port en lourd
EEXI	Energy Efficiency existing ship Index
ENCORE	Exploring Natural Capital Opportunities, Risks and Exposure
EVP/TEU	Equivalent Vingt Pieds / Twenty Equivalent Unit
FAO	Food and Agriculture Organization of the Unites Nations
FE	Facteur d’émission
FRC	Fouling Release Coatings
GBS	Global Biodiversity Score
GES/GHG	Gaz à effet de serre / Greenhouse Gas
GIEC/IPCC	Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat
GLEC	Global Logistics Emissions Council
GMP	Gross Marine Product
GNL/LNG	Gaz Naturel Liquéfié
HFO	Heavy Fuel Oil
IBAT	Integrated Biodiversity Assessment Tool
IFAW	Fond International pour la protection des animaux
KPI	Key Performance Indicator
MARPOL	Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gas Oil
MSA	Mean Species Abundance
NECA	Nitrogen Emission Control Area
NOx	Oxydes d’azote
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OFB	Office Français de la Biodiversité
OMI	Organisation Maritime Internationale
PM	Particule Matters (particules fines)
QGIS	Logiciel de Systèmes d’Information géographique
REPCET	Repérage en temps réel des cétacés
RSE	Responsabilité Sociale des Entreprises

R&D	Recherche et Développement
SBTN	Objectifs Scientifiques pour la Nature
SECA	Sulfur Emission Control Area
SOLAS	Convention internationale sur la sauvegarde de la vie en mer
SOx	Oxydes de soufre
SPC	Self-Polishing Copolymer
STAR	Species Threat Abatement and Restoration
TBT	Tributylétain
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UNWTO	World Tourism Organization
VLSFO / ULSFO	Very Low Sulfur Fuel Oil / Ultra Low Sulfur Fuel Oil
WTW/TTW	Well-To-Wake / Tank-To-Wake
WWF	World Wide Fund for Nature
ZMPV	Zone Maritime Particulièrement Vulnérable

1. Introduction

Dans cette introduction, nous définissons le contexte de la recherche et rappelons les différents enjeux du changement climatique dans le secteur du transport maritime. Ensuite, seront développés les concepts d’empreinte carbone et d’empreinte biodiversité afin de comprendre l’émergence du concept et la difficulté de la méthodologie de l’empreinte appliquée au milieu marin. Enfin, nous verrons les différentes contributions de cette étude à la recherche et aux entreprises en tant qu’outil d’aide à la décision.

1.1 Contexte

1.1.1 Secteur du transport maritime et changement climatique

Concilier les efforts pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre et ceux pour la protection de la biodiversité constitue un véritable enjeu à l’heure actuelle afin de préserver l’équilibre planétaire en traitant une partie des limites planétaires¹. La difficulté de cette conciliation entre diminution de la pollution climatique et protection de la biodiversité peut être illustrée à travers l’exemple du scrubber. Le scrubber est une technologie permettant de filtrer les émissions de soufre au niveau des cheminées des navires et de les laver pour les conserver à bord ou les rejeter directement à la mer. Il permet d’atteindre des taux d’émissions équivalents à l’utilisation de carburants réduits en soufre. Cette technologie a été répandue dans l’ensemble de la flotte mondiale parmi les armateurs dans le cadre des réglementations de l’OMI pour limiter la pollution de l’air. Cependant, le secteur revient sur cette décision depuis quelques années du fait de l’impact sur la biodiversité. En 2022, a par exemple été appliquée l’interdiction des rejets des scrubbers dans les zones littorales et portuaires françaises² puisqu’on s’est rendu compte que le fait de rejeter les eaux soufrées à la mer augmentait l’acidité de cette dernière. Le scrubber est donc un exemple parlant d’une technologie du transport maritime permettant de limiter l’impact sur le climat mais aggravant la situation déjà très préoccupante de l’état de la biodiversité marine.

Le secteur du transport maritime est une des composantes essentielles de la mondialisation et représente près de 80% des échanges mondiaux en 2023³. Cependant, le transport maritime est un enjeu majeur dans la lutte contre le changement climatique puisqu’il représente à lui seul 3% des émissions de gaz à effet de serre (GES) mondiales⁴. Ces émissions augmentent chaque année et suivent l’évolution du volume de fret maritime dans le monde qui est passé de 2,6 millions de tonnes de marchandises transportées en 1970 à près de trois fois plus en l’espace de 40 ans (8,4 millions de tonnes de marchandises transportées en 2010)⁵. Ainsi les émissions ont augmenté de près de 20% en une décennie⁶.

¹ Les limites planétaires sont au nombre de neuf, elles correspondent à des seuils définis par des scientifiques pour évaluer l’impact des activités humaines sur les équilibres naturels de la Terre. Ce concept a été introduit en 2009 par une équipe internationale dirigée par Johan Rockström du Stockholm Resilience Centre. En se concentrant à la fois sur les problèmes liés au climat et à la biodiversité appliqués au maritime, on peut traiter de cinq des neuf limites planétaires (changement climatique, érosion de la biodiversité, pollution chimique, perturbation des cycles biochimiques de l’azote et du phosphore, acidification des océans)

² [Scrubbers : entrée en application de l’interdiction de rejets dès le 1er janvier 2022 | Secrétariat d’État chargé de la Mer](#)

³ <https://unctad.org/fr/publication/etude-sur-le-transport-maritime-2023>

⁴ <https://unctad.org/fr/publication/etude-sur-le-transport-maritime-2023>

⁵ UNCATD <https://fr.statista.com/infographie/24533/commerce-maritime-mondial-evolution-volume-de-fret-maritime-de-marchandises/>

⁶ <https://unctad.org/fr/publication/etude-sur-le-transport-maritime-2023>

Le secteur prend au sérieux les enjeux du changement climatique en se concentrant tout d'abord sur la décarbonation en suivant ainsi les objectifs, fixés par l'OMI, de réduction du volume total d'émissions de GES annuelles à zéro net d'ici à 2050, par rapport à 2008⁷ (adoption d'une stratégie révisée concernant la réduction des émissions de GES pour les transports maritimes mondiaux, Juillet 2023). Cet objectif s'inscrit plus généralement au sein de l'Accord de Paris qui consiste à « maintenir l'augmentation de la température mondiale bien en dessous de 2 degrés Celsius d'ici à 2100 par rapport aux niveaux préindustriels » (CCNUCC, 2015).

Cependant, cet engagement vers un transport décarboné représente un coût substantiel. En effet, d'ici à 2050, le CNUCED estime qu'entre 8 milliards et 28 milliards de dollars devront être déployés chaque année pour décarboner l'ensemble de la flotte d'ici à 2050. Il précise que les investissements nécessaires pour développer les infrastructures permettant d'utiliser des carburants neutres en carbone pourraient représenter 28 à 90 milliards de dollars par an⁸.

Comme nous venons de le voir, le transport maritime a un impact sur la pollution de l'air à l'échelle de la planète mais qu'en est-il de son impact sur la biodiversité ? L'objectif de décarbonation du secteur du transport maritime semble être la principale problématique sur laquelle le secteur se concentre. Or les externalités négatives sur la biodiversité ne sont pas à négliger. Ces impacts sont traités au cas par cas grâce à une prise de conscience voire des réglementations notamment sur les doubles coques, les rejets huileux, le ballastage⁹ ou encore la réduction du bruit sous-marin. L'OMI traite de certains de ces sujets dans la convention MARPOL¹⁰ notamment dans l'annexe IV sur les eaux usées et les eaux de ballast ou encore dans l'annexe VI sur la pollution aérienne. Cependant, le secteur semble se concentrer sur trop de sujets parmi ces différents impacts qu'il doit traiter de front et reste encore assez discret dans ses démarches pour réduire son impact sur la biodiversité.

Dans cette étude, on définit par biodiversité, l'ensemble des entités appartenant au monde du vivant – gènes, populations, espèces, écosystèmes – mais aussi les interactions qui lient ces éléments entre eux et en structurent l'évolution. Je me suis appuyée sur la définition de la biodiversité de l'Office Français de la Biodiversité. Bien que les océans couvrent plus de 70% du globe, la biodiversité marine reste encore très peu connue. Or, elle est particulièrement importante pour l'équilibre de la planète car elle constitue un vivier important d'espèces de faune et de flore et en particulier elle est un puit de carbone nécessaire (stockage du CO₂). En effet, l'océan et la biodiversité marine fournissent de nombreux services écosystémiques à l'humanité. Ils jouent aussi un rôle dans la régulation du climat puisqu'ils absorbent 93% de la chaleur produite par les GES¹¹. De ce fait, il est aujourd'hui primordial de protéger la biodiversité marine des effets néfastes du changement climatique.

⁷ [MEPC 80-17-Add.1 - Rapport Du Comité De La Protection Du Milieu Marin Sur Les Travaux De Sa Quatre-Vingtième... \(Secrétariat\).pdf \(imo.org\)](#)

⁸ [Étude sur le transport maritime 2023 | CNUCED \(unctad.org\)](#)

⁹ Le ballastage est l'action de vider ou de remplir les ballasts d'eau de mer qui servent à équilibrer le navire. Ces eaux de ballast peuvent être des sources de transport d'espèces invasives lorsque ces dernières sont relâchées d'un port à un autre, menaçant ainsi les espèces endémiques.

¹⁰ [Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires \(MARPOL\)](#)

¹¹ <https://www.ofb.gouv.fr/le-milieu-marin>

Il faut retenir que la biodiversité et les écosystèmes sont étroitement liés. La Convention sur la Diversité Biologique, traité international adopté lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, a défini un écosystème comme « un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de micro-organismes et de leur environnement non vivant (air, terre, eau) qui, par leur interaction, forment une unité écologique fonctionnelle » (CDB, 1992)¹². La biodiversité comprend donc l'ensemble des écosystèmes et les relations entre les espèces dans ces écosystèmes constituent la biodiversité. Cette recherche est centrée sur les écosystèmes marins afin d'analyser l'impact du transport maritime sur ces derniers et prend en compte la faune et la flore marine.

Dans cette étude, compte tenu des contraintes de temps et d'accessibilité des données, il est préférable de se concentrer sur un espace marin délimité afin de limiter au mieux les biais liés au manque de données sur la biodiversité marine. De ce fait, j'ai choisi de traiter de la mer Méditerranée occidentale. Malgré sa petite taille (2,5 millions de km²)¹³ comparée à la haute mer, la Méditerranée reste un espace fortement impacté par le transport maritime de tout type : commerce et passager. Il s'agit d'un lieu de passage pour les navires empruntant la route Suez-Gibraltar mais elle constitue aussi une route importante pour le trafic commercial intérieur qui (environ 58 %). Sur la période 2010-2019, les échanges maritimes au départ et à destination de pays du bassin méditerranéen ont affiché une croissance de 284 millions de tonnes de marchandises¹⁴. De plus, d'un point de vue financier, selon le Plan Bleu « Avec 46 000 km de côtes et des ressources marines uniques (y compris en haute mer), la région méditerranéenne accueille une économie bleue dont la valeur totale est estimée à 5 600 milliards de dollars et génère une valeur économique annuelle de 450 milliards de dollars. »¹⁵. Nous nous concentrerons uniquement sur la partie occidentale de la mer Méditerranée entre les eaux territoriales de la France, de l'Espagne, de l'Algérie et de l'Italie afin de se réduire uniquement à la zone d'étude dans laquelle se trouve la route choisie qui sera explicitée dans la méthodologie.

Aujourd'hui, il n'existe pas encore de modèle permettant de quantifier l'impact général du transport maritime sur la biodiversité marine malgré des études précises sur certains impacts comme les émissions de soufre, le traitement des eaux de ballast ou encore le bruit sous-marin. Cependant, il semble nécessaire pour les acteurs du transport maritime de, préalablement connaître leur impact pour ensuite pouvoir prendre des décisions visant à le réduire. L'objectif de cette recherche est de pouvoir créer un modèle permettant d'estimer les conséquences d'un navire sur son trajet en Méditerranée occidentale et d'inclure les différentes options de réduction d'impact sur la biodiversité pour l'entreprise.

1.1.2 Empreinte carbone et émergence de l'empreinte biodiversité

La méthodologie choisie dans cette étude pour mesurer l'impact d'un navire en opération lors de son trajet, s'appuie sur le principe de l'empreinte. Le terme empreinte a beaucoup été employé ces dernières années puisqu'il est un modèle permettant d'approcher l'impact réel des activités humaines. Par exemple, l'empreinte écologique a été créée par William Rees¹⁶ en 1996, pour

¹² [Les conventions de Rio | CCNUCC \(unfccc.int\)](https://unfccc.int/fr/les-conventions-de-rio)

¹³ https://www.cetmo.org/wp-content/uploads/2023/01/CETMO_IEMED_Mar_Strategie-durable-2031_GGonzalez_FR.pdf

¹⁴ [OMI 2022 ETUDE SUR LES TENDANCES ET PERSPECTIVES DE LA POLLUTION MARINE par les navires en Méditerranée.pdf](#)

¹⁵ [Economie bleue - Plan-bleu : Environnement et développement en Méditerranée \(planbleu.org\)](https://www.planbleu.org/)

¹⁶ *Our Ecological Footprint* co-écrit avec Mathis Wackernagel, a été publié en 1996

désigner le nombre de planètes qu'il faudrait aux hommes en fonction des pays pour répondre à leurs besoins. Ce modèle a le mérite d'être très visuel et permet de faire prendre conscience que les ressources sont finies bien qu'il soit assez simplificateur.

Comme dans le cas de William Rees et son empreinte écologique, la méthodologie de l'empreinte permet de vulgariser un problème complexe scientifique et de le mettre à la portée des agents et des entreprises afin de permettre une prise de conscience nécessaire. L'empreinte carbone a été popularisée dans les années 2000 après la méthodologie de mesure des émissions de gaz à effet de serre révélée en 1997 lors du Protocole de Kyoto. L'empreinte carbone est un indicateur permettant de mesurer l'impact d'une activité sur le climat en comptabilisant les émissions de gaz à effet de serre liées à cette activité. Aujourd'hui la méthodologie retenue par les entreprises pour le calcul de l'empreinte carbone s'appuie sur le GHG Protocol¹⁷. Cette méthode permet de définir le périmètre organisationnel et opérationnel concernés afin d'établir une mesure tendancielle de la performance.

L'empreinte carbone est aujourd'hui devenu un outil incontournable des entreprises et des Etats bien que certaines méthodologies différentes soient appliquées pour la réaliser. Qu'en est-il de l'empreinte biodiversité ? On peut définir cette dernière comme un indicateur permettant de calculer l'impact sur la biodiversité, des activités de l'entreprise au travers de la quantification de ses dépendances et atteintes aux différents services écosystémiques¹⁸. L'empreinte biodiversité commence à émerger à la suite de l'empreinte carbone déjà bien acceptée et utilisée. La principale difficulté à laquelle on se heurte dans le calcul de l'empreinte biodiversité réside dans le fait qu'il n'y a pas de métrique comme c'est le cas dans l'empreinte carbone. L'analyse est dès lors rendue complexe puisqu'on ne s'appuiera pas sur un seul indicateur tel la tonne CO₂ équivalente émise mais sur plusieurs indicateurs permettant de mesurer l'impact de l'homme sur la biodiversité dans le cas où elle serait désagrégée.

Il existe différentes méthodologies pour calculer une empreinte biodiversité en fonction des milieux atteints et du type de construction ou d'industrie. Nous l'aborderons dans cette étude afin de les comparer mais la plus connue reste le Global Biodiversity Score. Le GBS est un outil porté par le CDC Biodiversité¹⁹ (Caisse des Dépôts) depuis 2020. Il s'appuie sur une métrique principale qu'est le MSA.km² et qui représente l'abondance moyenne d'espèces au kilomètre carré. Les valeurs de MSA vont de 0% à 100%, 100% représentant un écosystème intact non perturbé. Cette méthodologie sera explicitée par la suite mais il est intéressant à ce stade de retenir que le GBS permet d'établir un lien entre activités économiques et principales pressions sur la biodiversité.

Le problème actuel du GBS mais aussi de l'ensemble des empreintes biodiversité est qu'ils ne permettent pas de gérer le problème de l'impact sur le milieu marin. Même si le GBS prend en compte la biodiversité des eaux douces de surface à travers les écosystèmes aquatiques intérieurs - rivières, lacs et zones humides, il n'y a pour le moment aucune prise en compte des écosystèmes marins pourtant tout autant fragilisés et d'autre part nécessaires dans la lutte contre le réchauffement climatique que les écosystèmes terrestres. Pour le moment, il est difficile d'étendre le modèle aux

¹⁷ <https://ghgprotocol.org/>

¹⁸ Les écosystèmes permettent de fournir de nombreux services écosystémiques à travers leurs interactions entre biotope et biocénose. Par exemple, les abeilles, en pollinisant les fleurs, permettent aux plantes de produire des fruits et sont nécessaires notamment aux activités humaines liées au maraîchage.

¹⁹ Site du GBS : [Le Global Biodiversity Score | CDC Biodiversité \(cdc-biodiversite.fr\)](https://www.cdc-biodiversite.fr/)

écosystèmes marins puisque selon le GBS : « Le GBS ne prend actuellement pas en compte la biodiversité marine. Malheureusement, il n'est pas prévu de les intégrer dans un avenir proche. Dès que des données fiables seront disponibles, le GBS inclura les impacts sur la biodiversité marine et ceux des espèces envahissantes dans ses évaluations. » (Cahier de Biodiv' 2050, 2021)²⁰. Compte tenu des difficultés de la mise en place d'une empreinte biodiversité marine, on peut se demander pour quelles raisons choisir ce sujet dans cette étude.

Si le sujet de l'empreinte biodiversité a été choisi malgré les difficultés liées à l'accès aux données et aux nombreux manques d'études préalables sur le sujet, c'est en partie en raison de la volonté de créer un outil d'aide à la décision des entreprises. Même si j'ai conscience des limites de cette étude, qui seront signalées au fur et à mesure de la recherche, il me semble pertinent de créer un modèle d'étude d'impact des navires sur la biodiversité marine en fonction d'un écosystème donné puisque une fois l'analyse d'impact réalisée, il est possible pour l'entreprise de prendre des mesures de réduction de l'impact. Le fait d'avoir des indicateurs qui ont permis de le mesurer et d'échelonner chaque impact permet ensuite de voir où développer des moyens financiers et techniques.

Cette étude s'appuie, comme nous l'avons vu, sur un écosystème défini en mer Méditerranée Occidentale et le cas pratique porte sur la réalisation de l'empreinte d'un seul navire. L'empreinte porte uniquement sur le navire en opération, autrement dit l'intégralité du cycle de vie du navire de la construction au démantèlement ne sera pas prise en compte. Ce qui importe et ce qui est calculé ici est réduit à la présence d'un navire à quai puis de son trajet en Méditerranée jusqu'à ses escales. Ne sont pas prises en compte les conséquences sur la biodiversité de l'extraction des matières premières (notamment de l'acier), des moyens nécessités pour la construction du navire, de son impact durant son trajet sur d'autres lignes que celle choisie en Méditerranée ou à une période autre que celle choisie dans cette étude, ni de la fin de vie du navire et de son possible recyclage. L'étude porte sur un navire en propriété de la flotte de l'entreprise X, le navire Y de moins de 1000 conteneurs et elle ne s'appuie que sur son trajet sur une route tracée pour cette étude en Méditerranée occidentale. Cette boucle, nommée Z, commence à Marseille et passe ensuite par Alger, Malte, Naples, Livourne, La Spezia et Gênes.

La méthodologie réalisée pour mesurer les impacts de ce navire sur la route s'appuie sur quarante indicateurs et sous-indicateurs précis sur la biodiversité marine. Par ailleurs, elle prend en compte l'impact économique pour l'entreprise, représenté à travers le changement nécessaire pour réduire les conséquences de chaque indicateur. Les économistes de l'environnement ont commencé à travailler sur des indicateurs afin de permettre une meilleure prise en compte des impacts sur la biodiversité mais aussi de leur donner une valeur économique. Chaque indicateur est associé à une donnée du navire ou de la ligne, qui est classée dans des seuils, pour que l'on sache si sur cet indicateur-là, le navire a un impact qui va de neutre à néfaste sur la biodiversité. Une fois que l'ensemble des indicateurs est intégré, ils sont ensuite hiérarchisés selon les besoins de l'écosystème afin que l'on soit encore plus précis dans la mesure d'impact. Afin d'illustrer ces propos, un indicateur d'acidification²¹ de l'océan n'aura pas le même poids s'il est pris en compte en mer

²⁰ Lien vers le Cahier de Biodiv'2050 version 2021 : [Publications | CDC Biodiversité \(cdc-biodiversite.fr\)](https://publications.cdc-biodiversite.fr/)

²¹ L'acidification des océans est la baisse progressive du pH des océans causée par l'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) par l'eau de mer

Baltique ou en mer Méditerranée. En effet, la mer Baltique est naturellement plus acide que la mer Méditerranée en raison de sa géographie plus fermée et de son apport faible en eau douce²². Il est donc intéressant de pondérer cet indicateur selon l'écosystème puisque, si le navire acidifie l'eau de la mer Baltique, l'impact sur la biodiversité marine sera décuplé par rapport à son impact en mer Méditerranée.

Afin de pondérer ces indicateurs, j'ai fait le choix dans cette étude de faire appel à des experts du transport maritime et des experts du milieu marin. Ce processus s'inscrit dans la méthode DELPHI. La méthode DELPHI est un procédé participatif de communication qui vise à organiser la consultation d'experts sur un sujet complexe afin de tenter de faire émerger un consensus collectif. Pour expliciter le processus, j'ai constitué l'empreinte biodiversité avec les différents indicateurs puis je l'ai transmise une première fois à chaque expert pour qu'ils puissent pondérer les indicateurs anonymement. Ensuite une fois les questionnaires pondérés reçus, j'ai réalisé une moyenne des pondérations qui a été renvoyée à chaque expert pour qu'ils valident la pondération finale. Afin de limiter les biais liés au choix des experts, le critère principal retenu était leur appartenance à une entreprise ou à un milieu associatif, une organisation de défense pour la biodiversité ou un laboratoire. Ils proviennent donc à part égale dans le comité, d'entreprises que d'associations de protection de l'environnement marin. En effet, j'ai tenu à intégrer les contraintes liées aux objectifs de profit des entreprises en considérant à part égale des salariés même si ces derniers travaillent pour l'intégration des enjeux environnementaux en entreprise.

1.2 Contributions

1.2.1 Outil d'aide à la décision des entreprises

Comme nous l'avons vu précédemment dans l'introduction, cette étude souhaite contribuer directement aux entreprises du secteur du transport maritime. Certains armateurs ont déjà commencé à prendre en compte les enjeux du réchauffement climatique et certains aspects de la biodiversité. Entre autres, Maersk²³ s'est notamment engagé dans les objectifs de décarbonation en ayant une trajectoire validée par le SBTi (Science Based Target Initiative). En France, la compagnie maritime CMA CGM est aussi engagée dans la biodiversité et développe des moyens pour être au point sur les dernières avancées en termes de biocarburants selon leur rapport RSE²⁴ et les annonces de leur Président directeur général, Rodolphe Saadé²⁵. De ce fait, cette étude est en continuité avec les efforts déjà fournis par une partie des entreprises du secteur du transport maritime.

Le choix de réaliser cette recherche en lien avec le milieu de l'entreprise a été motivé en partie par la contribution d'experts dans les différents domaines de cette étude (réglementation, recherche et développement, biodiversité, décarbonation etc.). Il est nécessaire pour cette recherche d'être en lien avec les armateurs puisque ces derniers permettent d'apporter un regard économique sur les questions de prise en compte de la biodiversité marine. En effet, les contacts avec des experts en entreprise permettent de prendre conscience de la faisabilité et de l'investissement, d'un point de

²² La mer Méditerranée est aussi plus salée que la mer Baltique et grâce au détroit de Gibraltar elle stabilise son acidité avec l'océan Atlantique

²³ [Maersk becomes first to have climate targets validated by SBTi under the new Maritime Guidance | Maersk](#)

²⁴ [CMA CGM Rapport RSE 2023 Web \(1\).pdf](#)

²⁵ <https://www.cma-cgm.com/local/china/news/107/cma-cgm-039-s-decarbonization-commitments-at-cop28>

vue technique et financier, des efforts à mener en termes de protection des océans pour une entreprise. Les biais qui peuvent émerger de ce lien peuvent être limités grâce à la prise en compte d'avis d'experts externes à ce milieu.

L'outil résultant de la recherche pourra ainsi servir aux entreprises qui traversent la zone que nous avons définie dans cette étude et permettra d'estimer leur impact sur la biodiversité marine pendant leur trajet. L'apport de cette empreinte biodiversité pour l'entreprise de transport maritime est multiple. Tout d'abord, connaître son impact pourrait permettre d'en prendre conscience, de le réduire ou de le compenser et, grâce à l'empreinte, de savoir comment il doit être compensé afin d'orienter au mieux les fonds à venir sur les questions de biodiversité. De plus, s'agissant d'une étude économique, elle permet de prendre en compte, dans une certaine mesure, les surcoûts que représenteraient les possibles améliorations à venir de l'impact sur la biodiversité marine afin de visualiser celles qui sont les plus profitables. Les différentes solutions existantes pour réduire l'impact de l'entreprise sur la biodiversité marine sont exposées et permettent de mettre en valeur des optima pour la plupart des indicateurs entre coût pour l'entreprise et perte pour la biodiversité. Enfin, cette étude pourrait permettre de se préparer aux objectifs de l'après décarbonation et de s'aligner sur l'exigence des clients toujours grandissante en termes de biodiversité, une partie d'entre eux ayant déjà réalisé leur propre empreinte biodiversité terrestre.

1.2.2 Participation à la recherche

L'intérêt de cette recherche est d'apporter une analyse plus globale des impacts du transport maritime sur l'environnement. Cette recherche va plus loin qu'une méta-analyse bien qu'elle s'appuie sur de nombreuses analyses et études déjà menées par des chercheurs sur la biodiversité marine ces dernières années. La méta-analyse permet de combiner les résultats de plusieurs études sur un problème donné. Dans ma recherche, il s'agit plutôt de s'appuyer sur les différents résultats des études, de souligner leurs points communs et divergences et d'en tirer certaines nuances quant à la fiabilité des indicateurs conservés dans le cadre de la réalisation de la méthodologie de l'empreinte biodiversité marine.

Cette étude s'appuie sur les travaux notamment menés par des organisations spécialisées dans le transport maritime et qui développent des recherches sur les sujets d'impact sur la biodiversité marine. En particulier, je me suis servi des travaux engagés par Armateurs de France sur les questions de bruit sous-marin, eux-mêmes éclairés par les travaux menés par l'Organisation Maritime Internationale (OMI)²⁶ et ses différentes réglementations ou directives notamment sur les eaux de ballast, les zones maritimes particulièrement sensibles et la pollution sonore. En termes de réglementations, je me suis aussi appuyée sur les réglementations spécifiques de chaque port ainsi que les analyses du Bureau Veritas. Le laboratoire de l'Ifremer, l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer constitue également une ressource en termes de biodiversité en environnement marin. En ce qui concerne aussi l'environnement marin à l'échelle mondiale, les travaux menés par l'IFAW (Fonds international pour la protection des animaux) et de la WWF (Fond mondial pour la nature) ont été déterminants dans l'étude. Enfin, bien que des sources sous formes d'articles scientifiques et de rapports constituent une grande partie du socle de cette étude, il a été

²⁶ [OMI 2022 ETUDE SUR LES TENDANCES ET PERSPECTIVES DE LA POLLUTION MARINE par les navires en Méditerranée.pdf](#)

nécessaire de compléter ces informations avec des entretiens auprès des experts dans ces questions environnementales.

Plusieurs auteurs ont déjà travaillé sur le sujet des impacts du transport maritime sur le bruit sous-marin notamment. En particulier, je me suis intéressée aux études menées par Manuel Castellote, Christopher W. Clark, Marc O. Lammers sur le changement de comportement des cétacés quand ils sont exposés à de la pollution sonore des navires²⁷. Sur le sujet des espèces invasives, nous nous appuyons sur les travaux de Molnar, J., Gamboa, R. L., Revenga, C., et Spalding, M²⁸. (2008) qui ont prouvé que les espèces invasives étaient néfastes pour les espèces endémiques marine. Ensuite concernant la biodiversité marine en elle-même en Méditerranée, Coll, M., Piroddi, et al²⁹ (2010) qui analysent les risques et menaces pour les espèces marines en Méditerranée ont constitué un socle pour comprendre les enjeux autour de la biodiversité dans cette zone. Enfin sur les indicateurs marins existant et le traitement des indicateurs par l'économie, je me suis principalement appuyée sur les travaux de Teixeira, H et al³⁰ dans leur constitution d'un catalogue reflétant la capacité scientifique actuelle à répondre aux besoins d'évaluation environnementale en offrant une couverture des indicateurs les plus pertinents pour la biodiversité marine et des écosystèmes marins. Toutes ces études ont permis de mieux comprendre les conséquences du transport maritime sur la biodiversité marine.

Les trois principales contributions de ma recherche sont les suivantes. Tout d'abord, je sélectionne et recense les indicateurs principaux à prendre en compte dans le cadre d'une analyse de l'impact du transport maritime sur la biodiversité marine. De ce fait, je m'appuie sur les travaux déjà commencés par certains auteurs et complète les indicateurs manquants grâce aux entretiens avec les experts. Ma deuxième contribution est d'apporter une méthodologie de calcul d'empreinte biodiversité qui soit pondérée puisque ce n'est pas le cas des autres méthodologies, ce qui permet de rapprocher encore plus le modèle de la réalité. En particulier, elle permet une connaissance synthétique des impacts du transport maritime en mer Méditerranée occidentale. Enfin ma dernière contribution est la prise en compte de l'impact économique qu'un effort vers une protection de la biodiversité marine engendrerait pour une entreprise.

Les résultats de cette étude se fondent sur l'application à un exemple empirique de la méthodologie. Cette étape permet de connaître la faisabilité de l'étude dans le cadre d'un cas concret. Lors de l'analyse, seule une des données n'était pas accessible, l'ensemble des quarante indicateurs et sous-indicateurs restant, a pu être complété au moins en partie grâce aux différentes sources de données. Le navire Y obtient une note pour son empreinte biodiversité de 285, d'après les résultats des différents indicateurs pondérés. Il se situe au niveau 3 sur les 5 niveaux, ce stade est nommé « Conscience », ce qui signifie que l'armateur X connaît son empreinte biodiversité et a

²⁷ Castellote, M., Clark, C. W., & Lammers, M. O. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.021>

²⁸ Molnar, J., Gamboa, R. L., Revenga, C., & Spalding, M. (2008). Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. *Frontiers In Ecology And The Environment*, 6(9), 485-492. <https://doi.org/10.1890/070064>

²⁹ Coll, M., Piroddi, et al (2010). The Biodiversity of the Mediterranean Sea : Estimates, Patterns, and Threats. *PloS One*, 5(8), e11842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842>

³⁰ Teixeira, H., Berg, T., Uusitalo, L., Fürhaupter, K., Heiskanen, A. S., Mazik, K., Lynam, C. P., Neville, S., Rodriguez, J. G., Papadopoulou, N., Moncheva, S., Churilova, T., Kryvenko, O., Krause-Jensen, D., Zaiko, A., Verissimo, H., Pantazi, M., Carvalho, S., Patrício, J., . . . Borja, Á. (2016). A Catalogue of Marine Biodiversity Indicators. *Frontiers In Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00207>

commencé à mettre en place des mesures pour la réduire. Ce niveau semble plutôt élevé, compte tenu des mesures actuelles mises en place pour la protection de la biodiversité marine, cependant il faut garder en tête que cette première version de la méthodologie privilégie la participation des armateurs avant la performance de ces derniers afin de les inciter à, préalablement, connaître la mesure de leurs impacts avant de les réduire.

Le reste du mémoire est structuré comme suit. La partie 2 passe en revue la littérature sur les indicateurs de la biodiversité dans un premier temps puis sur les méthodologies de calcul d'empreinte biodiversité existantes bien qu'elles soient surtout avancées en biodiversité terrestre. Dans la partie 3, j'explique comment les données ont été sélectionnées que ce soit pour le navire, la route maritime ou le contexte économique. La partie 4 porte sur la méthodologie de calcul de l'empreinte biodiversité marine, détaille le choix des indicateurs et indique les différents seuils d'impact sur la biodiversité. Une fois les indicateurs analysés et détaillés, la partie conclut sur une analyse de la méthode de pondération des indicateurs. Enfin, après avoir présenté le calcul de l'empreinte biodiversité, la partie 5 permet d'analyser ces résultats et de discuter des différents biais et limites liés aux choix effectués dans cette étude. La partie 6 conclut l'étude et ouvre sur une discussion pour une meilleure valorisation de l'empreinte biodiversité dans le cadre des marchés des crédits biodiversité.

2. Revue de littérature

Pour bien cerner le sujet et la mise en place de la méthode, il a été nécessaire de séparer en deux parties la revue de littérature. Nous allons au préalable nous concentrer sur les indicateurs de biodiversité qui aident à construire les méthodologies et ensuite les méthodes et métriques actuelles pour calculer les empreintes biodiversité terrestres.

2.1 Indicateurs de biodiversité

Comprendre les différentes recherches menées sur les indicateurs taxonomiques et phylogénétiques constitue un socle de connaissance permettant de cerner l'importance de la diversité au sein des espèces et entre les espèces. C'est, de ce fait, une première approche non négligeable pour comprendre ce que l'on entend par biodiversité pour ensuite pouvoir la mesurer avec des indicateurs scientifiques.

2.1.1 Indicateurs taxonomiques

Les indicateurs taxonomiques ont été les premiers indicateurs économiques à être intégrés pour mesurer la biodiversité. Par définition, les indicateurs taxonomiques se rapportent à la taxonomie qui est une branche de la biologie classant et dénombrant les organismes en fonction de leurs caractéristiques communes ainsi que leurs différences. Les indicateurs taxonomiques sont donc des indicateurs qui se focalisent sur le suivi de certains taxons, groupes d'organismes comme les plantes, oiseaux, insectes, mammifères etc. Cet indicateur est qualifié de direct car il cherche à renseigner sur l'état de santé de la biodiversité en s'intéressant aux entités du vivant. L'ensemble des études qui suivent s'appuient sur la biodiversité terrestre, nous émettons l'hypothèse que leurs résultats sur la diversité des espèces et les mesures de protection sont aussi applicables à la biodiversité marine afin de les relier à notre étude.

2.1.1.1 Mesure d'abondance relative

Les indicateurs taxonomiques se divisent en deux sous catégories. Nous verrons au préalable les indicateurs taxonomiques d'abondance relative d'espèces au sein d'une communauté (May (1972)³¹, Magurran (1988)³²). C'est la manière la plus commune pour décrire la diversité en écologie. Ce qu'ils entendent par abondance relative des espèces au sein d'une communauté renvoie au nombre d'individus qui appartiennent à cette espèce dans la communauté. Ils considèrent une communauté contenant s espèces et nomment $\pi = (\pi_1 \pi_2 \dots \pi_s)$ le vecteur de l'abondance relative tel que pour tout j $\sum_{j=1}^s \pi_j = 1$. La communauté est considérée comme diversifiée en tant qu'ensemble si tous les éléments π sont proches de $\frac{1}{s}$. Dans ce modèle on ne prend en compte que les espèces d'une seule communauté, les auteurs ne prétendent pas à déterminer s puisqu'ils gardent en mémoire que le nombre d'espèces connues aujourd'hui augmente du fait des recherches menées.

Ils prouvent, en termes qualitatifs, qu'une communauté qui a connu une perturbation récente ne sera pas aussi diverse. Une raison apportée par Polasky, Costello et Solow (2005)³³ est qu'au fur et à mesure des années, les espèces moins fécondes que l'on nomme les k -stratégues mais ayant une durée de vie plus longue vont être plus fortes et donc rivaliser, ce qui permettra de rendre la communauté plus diversifiée avec le temps.

Une autre approche a été développée dans les années 1970 grâce à la contribution de Patil et Tailie (1977)³⁴, ils ont défini la diversité d'une communauté avec la relative abondance du vecteur π par la rareté moyenne :

$$D(\pi) = \sum_{j=1}^s r_j \pi_j$$

avec r_j la mesure de rareté des espèces j . Patil et Tailie ont ensuite décidé d'adopter pour le paramètre $r_j = \frac{1-r_j^\beta}{\beta}$ avec $\beta \geq -1$ comme mesure de la rareté des espèces ce qui nous conduit à l'indice suivant :

$$D_\beta(\pi) = \frac{1 - \sum_{j=1}^s \pi_j^{\beta+1}}{\beta}$$

Deux cas ont été en particulier relevés par Patil et Tailie si $\beta = -1$ ou $\beta = 1$. Si $\beta = -1$ alors $D_{-1}(\pi) = s - 1$ et de ce fait on peut mesurer la richesse des espèces. Si $\beta = 1$ alors

$$D_1(\pi) = 1 - \sum_{j=1}^s \pi_j^2$$

Il s'agit de la probabilité que deux individus pris au hasard dans la communauté soient de deux espèces différentes. Cet indicateur est appelé l'indice Simpson et cette mesure est intéressante quand on regarde sa limite : $D_0(\pi) = - \sum_{j=1}^s \pi_j * \log(\pi_j)$ que l'on appelle indice d'entropie ou indice de

³¹ May, R.M. (1972). "Will a large complex system be stable?" Nature 238, 413-414.

³² Magurran, A.E. (1988). Ecological Diversity and Its Measurement. Princeton Univ. Press, Princeton.

³³ Polasky, S., Costello, C., & Solow, A. (2005). Chapter 29 The Economics of Biodiversity. Dans Handbook of environmental economics (p. 1517-1560). [https://doi.org/10.1016/s1574-0099\(05\)03029-9](https://doi.org/10.1016/s1574-0099(05)03029-9)

³⁴ Patil, G.P., Taillie, C. (1977). "Diversity as a concept and its implications for random communities". Bulletin of the International Statistical Institute 47, 497-515.

Shannon-Wiener pour Magurran et McGill dans leur livre *Biological Diversity : Frontiers in Measurement and Assessment* (2011)³⁵.

Une limite des mesures de biodiversité que nous venons de voir est qu'elles n'ont pas pris en compte dans leur modèle le fait qu'il serait préférable d'avoir une biodiversité plus importante qu'une biodiversité plus faible. Weitzman (2000)³⁶ a justement tenté de prendre en compte ce critère à travers un modèle de relation entre l'abondance d'une culture et le nombre de maladies pathogènes susceptibles d'attaquer cette culture. Il définit le nombre de pathogènes de la culture j par $S_j = kB_j^z$ avec B_j la biomasse totale de la culture et en supposant de B_j est divisé en différentes parcelles. Si chaque élément pathogène a la probabilité ε de contaminer une parcelle de biomasse alors la probabilité de l'extinction complète de la culture est :

$$P_j(B_j) = \left(1 - (1 - \varepsilon)^{kB_j^z}\right)^{B_j}$$

Enfin, Weitzman trouve que l'ensemble des abondances relatives minimisant cette probabilité $P_j(B_j)$ maximise en réalité la mesure de la diversité $D_0(\pi)$. Cette analyse nous permet de comprendre, grâce aux modèles de mesures des indicateurs basés sur l'abondance relative, que l'on doit prendre soin de la diversité des espèces pour permettre une biodiversité riche et durable et qu'il est possible de quantifier cette biodiversité pour ensuite permettre de penser à des politiques à mettre en œuvre. Pour mettre en lien ces résultats avec notre étude, cela signifie qu'il est préférable de protéger l'ensemble des espèces de la biodiversité marine afin de maintenir une certaine stabilité dans l'écosystème que constitue l'océan.

2.1.1.2 Mesure de dissimilarité conjointe

Dans la suite de leur chapitre, Polasky, Costello et Solow (2005)³⁷ abordent une mesure quantitative de la diversité permettant de mettre en lumière la dissimilarité conjointe entre les espèces. Ils expliquent que cette étude est motivée par le besoin d'évaluer les politiques visant à protéger les espèces en voie d'extinction. Ils soulèvent une question : vaut-il mieux protéger un grand nombre d'espèces couvrant un petit nombre de gènes ou protéger un petit nombre d'espèces couvrant un grand nombre de gènes ? Haney et Eiwert (1992)³⁸ ont travaillé sur cette question dans un problème similaire appliqué à l'espèce des grues dans le cadre d'une politique de conservation. Ils montrent que les décisions auxquelles sont confrontés les décisionnaires dans le cadre d'un plan de conservation sont elles-mêmes diverses (par exemple, le choix des espèces pour la reproduction en captivité ou l'identification des habitats prioritaires pour le maintien de la spécificité taxonomique).

Pour formaliser ce problème, Weitzman (1992)³⁹ considère un ensemble $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ que l'on appelle une collection de k espèces et on définit $d(s_i, \dots, s_j)$ comme la distance de dissimilarité entre les espèces s_i et s_j . L'objectif est de trouver une fonction non négative à valeur dans R , $d(S)$ et

³⁵ Magurran, A. E., & McGill, B. J. (2011). *Biological Diversity : Frontiers in Measurement and Assessment*.

<http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB04610139>

³⁶ Weitzman, M.L. (1992). "On diversity". *Quarterly Journal of Economics* 107 (2), 363–405.

³⁷ Polasky, S., Costello, C., & Solow, A. (2005). Chapter 29 The Economics of Biodiversity. Dans *Handbook of environmental economics* (p. 1517-1560). [https://doi.org/10.1016/s1574-0099\(05\)03029-9](https://doi.org/10.1016/s1574-0099(05)03029-9)

³⁸ Haney, J.C., Eiswerth, M.E. (1992). "The plight of cranes: a case study for conserving biodiversity". In: *Proceedings of the North American Crane Workshop*, pp. 612–619

³⁹ Weitzman, M.L. (1992). "On diversity". *Quarterly Journal of Economics* 107 (2), 363–405.

permettant de mesurer la diversité dans la collection S. Une première mesure a été proposée pour montrer la diversité d'une seule espèce définie comme 0. Weitzman mentionne plusieurs conditions pour la réalisation de ce premier modèle dont notamment une condition sur deux espèces : si S et S' sont deux conditions d'espèces avec $S \subset S'$ alors $D(S) < D(S')$. Le modèle est le suivant :

$$D_w(S) = \max_{s_i} (D_w(S - s_i) + d(s_i, S - s_i))$$

avec $S - s_i$ la collection S à laquelle on enlève s_i espèces ; la distance minimale entre la collection S et les espèces s_i $d(s_i, S - s_i)$. Si $d(s_i, s_j) = 0$ alors les deux espèces sont identiques. On comprend donc que cet indice permet de révéler les dissimilarités dans une collection entre une espèce et les autres espèces de cette collection.

Polasky, Costello et Solow soulèvent un point important sur le modèle de Weitzman puisque ce dernier n'allie pas directement la biodiversité et sa valeur économique. Or un écosystème plus divers permet des avantages directs mais aussi indirects et donc de produire des services écosystémiques. La diversité des espèces peut ainsi être considérée comme ayant une valeur économique intrinsèque à préserver pour les services qu'elle permet en maintenant les espèces.

Polasky, Solow et Broadus (1993)⁴⁰ ont donc essayé de fonder une mesure de la biodiversité sur une théorie de la valeur économique. Leur analyse leur a permis de construire un modèle de probabilité de substituabilité des espèces apportant le même avantage économique (par exemple pour soigner une maladie dans le futur). Ils supposent ensuite qu'avoir plusieurs espèces qui apportent le même bénéfice n'est pas forcément mieux qu'une seule espèce apportant ce bénéfice. De ce fait, B_i est nommé l'évènement « l'espèce s_i produit un service écosystémique ». L'évènement que la collection S procure ce même bénéfice est donné par :

$$B(S) = \bigcup_{i=1}^n B_i$$

On peut alors définir le bénéfice anticipé de la collection $p(S)V$ avec V une constante qui mesure la valeur du bénéfice et $p(S) = \Pr(B(S))$. Le fait que V soit une constante permet de comparer les deux collections d'espèces en fonction de leur probabilité à permettre une valeur économique.

Solow et Polasky (1994)⁴¹ ont ensuite modifié leur modèle afin de fixer la valeur de B_i en tant que constante p ne dépendant plus de i. Ils ont ensuite pu définir la probabilité B_i conditionnellement à B_j par :

$$\Pr(B_i | B_j) = p + (1 - p) * f(d(s_i, s_j))$$

avec f une fonction satisfaisant $f(0) = 1$; $f(\infty) = 0$ et $f' \leq 0$. Les limites de ce modèle sont analysées par Solow et Polasky, ils considèrent que la mesure de biodiversité nécessite une spécification de la fonction f qui « mesure la « corrélation » entre les espèces en tant que fonction des dissimilarités entre elles »³⁶. D'autres limites comme la disponibilité des informations et des données sur les espèces sont relevées. En effet, il est très difficile de connaître voire d'estimer le

⁴⁰ Polasky, S., Solow, A., Broadus, J. (1993). "Searching for uncertain benefits and the conservation of biological diversity". Environmental and Resource Economics 3 (2), 171-181

⁴¹ Solow, A., Polasky, S. (1994). "Measuring biological diversity". Environmental and Ecological Statistics 1 (2), 95-107.

nombre d'espèces dans un écosystème et c'est encore plus vrai dans le cadre de la biodiversité marine qui est encore trop peu connue de l'homme.

2.1.2 Indicateurs phylogénétiques

Pour parvenir à contrer les biais liés aux indices taxonomiques encore assez restrictifs en termes d'analyse de la biodiversité, certains auteurs ont décidé de s'intéresser aux indicateurs phylogénétiques. La diversité phylogénétique est une mesure qui considère les relations de parenté entre les espèces. On utilise les longueurs des branches d'un arbre phylogénétique séparant les différentes espèces (unités taxonomiques) d'une collection. Les indicateurs phylogénétiques apparaissent donc au premier abord plus complexes que les indicateurs taxonomiques, concentrés sur la classification statique des espèces, du fait de leur prise en compte des relations évolutives entre les espèces. Chaque taxon n'a pas le même poids dans les indicateurs phylogénétiques.

La construction de ces indicateurs est très récente et influence déjà des politiques de conservation d'espaces naturels. Faith, D. P.⁴² met en lumière dès le début des années 1990 que si l'on veut protéger la biodiversité, il faut que les décisionnaires sachent quel taxon prioriser pour la conservation. Il compare les deux approches phylogénétiques et taxonomiques afin de savoir quel système de priorité serait le plus adapté à la mesure de la biodiversité. Plus tard en 2006, David W. Redding et Arne Mooers⁴³ reprennent cette idée d'établir des priorités en matière de conservation. Ils se concentrent sur les espèces d'oiseaux dans le monde et les classent en fonction des informations génétiques partagées et non seulement en fonction des menaces. En incluant une analyse phylogénétique ils sont parvenus à intégrer la valeur génétique d'une espèce dans le cadre de la hiérarchisation.

En 1997, R. H. Crozier⁴⁴ reprend, dans ses travaux, différentes mesures phylogénétiques et explique que selon lui, elles comportent plus d'informations nécessaires concernant les espèces puisqu'elles permettent de mettre l'accent sur le génome. Le nombre de gènes est nécessaire dans l'évaluation de la valeur de conservation de la biodiversité ce qui fait des indicateurs phylogénétiques, des indices plus précis que le nombre d'espèces. Les mesures phylogénétiques semblent gagner en popularité face aux mesures taxonomiques.

Toutes ces études ont permis de faire connaître les avantages de l'approche phylogénétique pour la prise de décision dans les choix de conservation des espèces. Cependant, ces approches ne comprennent pas l'abondance relative que l'on avait pourtant avec l'indicateur taxonomique. Pour pallier ce problème Cadotte M. et al⁴⁵, biologistes, ont rédigé un article sur les indicateurs phylogénétiques intégrant le critère d'abondance relative au sein d'une communauté. Ils se concentrent sur différents attributs de la communauté et appliquent ensuite leurs indicateurs ainsi trouvés avec ceux déjà existant à une communauté végétale de prairie en Californie.

⁴² Faith, D. P. (1992). Systematics and conservation : on predicting the feature diversity of subsets of taxa. *Cladistics*, 8(4), 361-373. <https://doi.org/10.1111/j.1096-0031.1992.tb00078.x>

⁴³ D. W Redding and A. Ø Mooers. Incorporating evolutionary measures into conservation prioritization. *Conservation Biology*, 20(6):1670–1678, 2006.

⁴⁴ R. H. Crozier, Preserving the information content of species: genetic diversity, phylogeny, and conservation worth. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1):243–268, 1997.

⁴⁵ Cadotte M. , Davies T, Regetz J, Steven W Kembel, Elsa Cleland, and Todd H Oakley. Phylogenetic diversity metrics for ecological communities: integrating species richness, abundance and evolutionary history. *Ecology letters*, 13(1):96–105, 2010.

Tout d'abord, ils définissent la diversité phylogénétique comme la somme des longueurs des branches de l'arbre phylogénétique de l'espèce en question. Ils introduisent ensuite une mesure de la diversité de la spécificité des évolutions entre les espèces qu'ils nomment H_{ED} pour représenter les évolutions qu'une espèce sélectionnée de manière aléatoire dans la communauté aurait connue. Ils utilisent pour ce faire, l'entropie qui est un facteur d'organisation des systèmes physiques et biologiques qui s'oppose à la tendance naturelle à la désorganisation. Les auteurs pondèrent ensuite leur abondance en créant deux indices. Il y a préalablement l'AED qui représente la diversité phylogénétique pondérée par l'abondance. Quand l'AED est élevée cela implique une plus grande diversité phylogénétique. Ensuite, ils construisent l' H_{AED} une mesure entropique de la diversité de la spécificité évolutive entre les individus.

Leurs indices prennent en compte à la fois l'histoire évolutive des espèces mais aussi la longueur des branches d'un arbre phylogénétique. Ils sont encore très utilisés aujourd'hui. L'inclusion de l'abondance relative est pour eux essentielle puisqu'elle leur permet d'évaluer simultanément les différences phylogénétiques et la rareté de la communauté. Strobl⁴⁶ l'utilise notamment dans son étude de cas sur les oiseaux et les cultures vivrières dans une région des Etats-Unis sur une décennie. Il regarde si le fait de diversifier les cultures agricoles permettrait une plus grande diversité phylogénétique. Il combine différentes données à la fois sur les enquêtes annuelles sur les oiseaux mais aussi les arbres phylogénétiques et l'utilisation des terres afin d'avoir un ensemble de données de panel. Les conclusions de ses analyses économétriques lui permettent d'affirmer que s'il y a une plus grande diversité de l'alimentation, alors il y a une plus grande diversité aviaire locale. Cette analyse permet de montrer qu'une politique de protection de la biodiversité peut ne pas être directement centrée sur une espèce mais sur la protection du milieu de vie afin que l'espèce prospère. Strobl considère comme essentiel le fait de prendre en compte des indicateurs phylogénétiques de la biodiversité.

2.1.3 Indicateurs de biodiversité

Les indices taxonomiques et phylogénétiques apportent une manière concrète de mesurer les impacts sur la biodiversité de la perte de diversité ou du nombre d'individus dans les espèces. Ces indicateurs économiques, malgré leurs limites, avaient pour finalité d'aider les agents dans leur prise de décision. Cependant un des avantages d'un indicateur efficace est sa facilité à être compris et à représenter une idée. Les indicateurs scientifiques utilisés en France et en Europe pour connaître l'état de la biodiversité donnent des informations sur l'état de la biodiversité et restent visuels.

Avant de détailler les différents indicateurs dont je me suis inspirée pour la méthode d'empreinte biodiversité, il est important de définir les critères nécessaires pour créer un indicateur efficace. Desrosières⁴⁷ en 2003 reprend les six critères retenus par l'OCDE et édictés officiellement par le Comité du programme statistique. Tout d'abord, il met l'accent sur la pertinence de l'indicateur qui doit être adaptée aux besoins de l'utilisateur. Le deuxième critère porte sur la précision de l'indicateur qui nécessite une correspondance entre la valeur estimée et la valeur réelle. Le troisième critère porte sur la valeur actuelle de l'indicateur qui doit être adapté aux échéances décisionnelles. Le quatrième critère met l'accent sur l'accessibilité des données statistiques nécessaires à la

⁴⁶ Strobl, E. (2021). Preserving local biodiversity through crop diversification. *American Journal Of Agricultural Economics*, 104(3), 1140-1174. <https://doi.org/10.1111/ajae.12265>

⁴⁷ Desrosières A., (2003a), « Les qualités des quantités », *Courrier des statistiques*, n°105-106, pp.51-63.

complétion de l'indicateur et le cinquième critère sur la comparabilité des données. Enfin, le dernier critère est sur l'attention portée à la cohérence entre la méthode de standardisation des données et les interprétations issues de ces données.

Une fois que nous avons compris quels étaient les critères nécessaires pour déterminer un indicateur efficace, il reste à sélectionner les bons indicateurs parmi ceux existant en biodiversité. Harold Levrel⁴⁸ a travaillé sur cette question : Quels indicateurs pour la gestion de la biodiversité ? Il distingue deux types d'indicateurs : les indicateurs à paramètre unique et les indicateurs composites. Les indicateurs à paramètre unique sont des indicateurs se fondant sur une unité de mesure unique telle que l'individu, l'espèce ou le gène. Ces indicateurs sont assez critiqués car ils ne permettent pas d'analyser les interactions entre les individus ou les espèces avec l'ensemble des écosystèmes ou de la biosphère. Balmford⁴⁹ adressait justement ce problème qui consistait à attirer le regard des populations uniquement sur les estimations des taux d'extinction des espèces alors même que ces taux étaient questionnables et très restrictifs. Par exemple, ils ne prenaient pas en compte la valeur économique de l'espèce ni l'état de son habitat. Enfin, cette analyse est faite à très court terme et l'espèce pourrait devenir résiliente aux changements exogènes en regardant avec une échelle de temps plus longue. De plus, une autre critique émise par Dudley et al.⁵⁰ a été de remarquer que chaque taxon peut réagir différemment à une même pression sur l'environnement. Si plusieurs espèces se portent bien dans un écosystème donné, cela n'implique pas forcément que l'écosystème en lui-même est en bonne santé.

H. Levrel propose de s'appuyer sur des espèces indiquant l'état de la biodiversité en se penchant sur leur rôle au sein de l'écosystème permettant son équilibre. Il cite notamment les espèces ingénieurs qui structurent l'environnement dans lequel elles évoluent (par exemple les décomposeurs), les espèces parapluie qui nécessitent un territoire étendu, les espèces clé de voûte comme l'étoile de mer qui sont au sommet de chaîne alimentaire et permettent de réguler l'ensemble de cette chaîne en tant que grand prédateur. Krebs⁵¹ dans son livre *Ecology* propose de s'appuyer notamment sur des espèces indicatrices définies par trois critères : des connaissances scientifiques suffisantes dont nous disposons sur cette espèce, la facilité avec laquelle nous pouvons continuer de les observer et la capacité à décrire des phénomènes structurels précis.

La deuxième catégorie d'indicateur : les indicateurs composites se construisent à l'opposé des indicateurs à paramètre unique puisqu'ils comparent différentes espèces. Ils permettent d'atteindre une certaine exhaustivité et nivellent par la moyenne les effets aléatoires non statistiquement représentatifs. Pour les construire, il faut savoir comment regrouper les espèces et comment les pondérer entre elles. Balmford⁵² donne ses critères pour permettre de guider les regroupements taxonomiques. Il prend en compte la taille des populations et leur degré de danger d'extinction ainsi que celui de leur habitat, les services écosystémiques fournis, les pressions à l'origine de leur extinction et enfin l'efficacité des mesures de conservation. Ces indicateurs sont principalement des

⁴⁸ Levrel H., (2007), Quels indicateurs pour la gestion de la biodiversité, Institut français de la biodiversité, pp 8-24.

⁴⁹ Balmford A., Green R.E. and Jenkins M., (2003), « Measuring the changing state of nature », *TRENDS in Ecology and Evolution*, vol.18, n°7, pp.326-330.

⁵⁰ Dudley N., Baldock D., Nasi R. and Stolton S., (2005), « Measuring biodiversity and sustainable management in forests and agricultural landscapes », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, 360, 457-470.

⁵¹ Krebs C.J., (2001), *Ecology*, San Francisco, Benjamin Cummings, Part 4 pp 385 - 434.

⁵² Balmford A., Crane P., Dobson A., Green R.E. and Mace G.M., (2005), « The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, n°360, pp. 221-228.

variations. Pour la pondération, Levrel propose trois choix possibles : accorder le même poids à chaque espèce en considérant que chacune a la même valeur, pondérer chaque espèce en fonction de la rareté (approche considérée conservacionniste), ou accorder plus de poids aux espèces remplissant des fonctions écologiques majeures dans l'écosystème.

En matière de prise de décision publique, pour contrebalancer les indicateurs axés en particulier sur la notion de durabilité faible qui implique que tant que la somme totale des stocks de capitaux reste la même, les capitaux sont substituables entre eux, Ekins⁵³ (*Ecological Economics*, 2003) a choisi de mettre en place le capital naturel critique (CNC) fondé sur un critère de durabilité forte. Il signifie que le capital naturel n'est pas substituable avec du capital physique et qu'il faut le conserver. Le capital naturel critique renvoie au capital nécessaire au maintien de la vie sur Terre. Il s'appuie sur des critères tels que l'absence de substitut, l'importance vitale pour les activités humaines et le risque de disparition des écosystèmes. Cependant le CDC n'a pas rencontré un très grand succès, relevant plus d'une méthode que d'un indicateur.

Pour finaliser cette partie sur les indicateurs, il est intéressant d'aborder brièvement les indicateurs de biodiversité principaux sélectionnés par les politiques publiques dans le monde, en Europe et en France afin de fournir quelques exemples aux théories sur les indicateurs précédemment analysés. La première conférence portant sur la protection de la biodiversité était la Conférence de Rio en 1992 où la Convention sur la Diversité Biologique a été adoptée. Cette convention a permis l'utilisation de certains indicateurs de diversité biologique mis en place afin d'atteindre des objectifs de limitation de l'érosion de la biodiversité. On retrouve notamment les indicateurs d'abondance et de diversité d'espèces, de couverture d'aires protégées ou d'occupation des sols. Nous nous concentrons un peu plus sur l'indice trophique marin qui, pour ce cas d'étude, se trouve intéressant. Il a été mis en place par la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) et permet de connaître l'état de la pêche depuis 1950. Cet indicateur distingue les espèces marines en fonction de leur rang dans la chaîne alimentaire allant de producteur primaire à grand prédateur puis décomposeur. Cet indicateur a été calculé par Pauly et Watson⁵⁴ (2005) et décroît fortement depuis 1950.

Peu d'indicateurs spécifiques au milieu marin ont été étudiés au niveau européen malgré la mise en place de la directive cadre stratégie pour le milieu marin par le Parlement européen le 17 juin 2008. Les Etats pouvaient choisir leurs indicateurs et les justifier au regard de la directive en matière de protection et de gestion des milieux marins. La Commission européenne a notamment décrit les principaux points à prendre en compte pour l'impact des activités sur la biodiversité marine. Plus précisément pour le cas de la France, des indicateurs ont été mis en place par le Muséum National d'Histoire Naturelle dans le cadre de la Stratégie nationale pour la Biodiversité Française pour être adaptés à la biodiversité du territoire et aux politiques de protection. Ils détaillent des indicateurs de diversité génétique, de diversité spécifique, de diversité de habitats, de trame écologique et de fonctionnement des écosystèmes.

⁵³ Ekins P., (2003), « Identifying Critical Natural Capital. Conclusions about Critical Natural Capital », *Ecological Economics*, 44 : 277-292.

⁵⁴ Pauly D. and Watson R., (2005), « Background and interpretation of the 'Marine Trophic Index' as a measure of biodiversity », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, n°360, pp. 415-423.

Une de limites à l'utilisation de ces indicateurs réside dans la temporalité. Les indicateurs analysent dans l'ensemble des événements passés et bien qu'ils soient visuels, ne nous permettent pas de rendre compte de l'ampleur du danger d'extinction en amont. Il faudrait qu'ils soient assez sensibles et précis pour détecter les changements dans les espèces assez tôt afin que l'on puisse agir au plus vite avant le point de bascule ne permettant plus une assez grande diversité des individus pour permettre à l'espèce de se reproduire de manière pérenne.

2.2 Méthodes de calcul d'empreinte biodiversité terrestre

2.2.1 Empreinte qualitative

Pour calculer l'empreinte biodiversité terrestre, différentes méthodes de calculs sont disponibles avec des approches mettant l'accent sur des aspects plus ou moins quantitatifs. La première approche consiste à s'appuyer sur une analyse de matérialité qualitative du type ENCORE ou IBAT. Ces méthodologies permettent d'aboutir à une catégorisation des impacts en « faibles, moyens ou élevés »⁵⁵. Exploring Natural Capital Opportunities, Risks and Exposure (ENCORE) est un outil développé par le Natural Capital Finance Alliance en partenariat avec le PUNE-WCMC et financé par le Secrétariat d'Etat suisse à l'économie (SECO) et la Fondation MAVI. Il est destiné aux entreprises pour comprendre leur impact ainsi que leurs dépendances vis-à-vis de leur environnement et quel risque commercial cet impact peut représenter sur l'économie. Il définit des critères et place les entreprises selon leur degré d'impact.

L'IBAT (Integrated Biodiversity Assessment Tool) quant à lui est un outil de cartographie qui offre trois ensembles de données : la liste rouge des espèces menacées de l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature), la base de données mondiale sur les zones protégées et la base de données mondiale sur les zones clés pour la biodiversité. L'IBAT permet d'identifier non pas les dépendances et impacts mais les risques et opportunités liés au changement climatique en matière de biodiversité. On peut obtenir un score biodiversité par zone géographique en fonction du site de l'entreprise. Cet outil est intéressant si l'on doit choisir une zones pour construire son entreprise mais il ne permet pas une application directement économique.

Ces empreintes qualitatives de biodiversité se basent finalement sur une évaluation non chiffrée de l'impact des entreprises ou de l'homme sur la biodiversité. De ce fait, ces empreintes s'appuient, comme nous l'avons vu dans les deux exemples précédents, sur l'analyse des écosystèmes à travers les espèces en danger sans pour autant mesurer spécifiquement des données chiffrées. Elles peuvent servir pour avoir une idée générale d'un écosystème (habitats, espèces, biodiversité). Elles constituent en soi une première étape qui ne nécessite pas beaucoup de ressources.

2.2.2 Empreinte quantitative

2.2.2.1 Empreinte quantitative désagrégée

Pour aller plus loin que l'empreinte qualitative, nous pouvons nous appuyer sur des empreintes quantitatives. Il en existe deux types : l'empreinte quantitative désagrégée qui rassemble différents indicateurs pris en compte et l'empreinte quantitative agrégée qui se rapproche plus de l'empreinte carbone avec une seule métrique. Ce choix de méthodologie dépend de l'objectif visé et du niveau

⁵⁵ Les informations sur les méthodologies ENCORE et IBAT proviennent des présentations de la boîte de conseil EcoAct.

de granularité attendu. Un exemple d’empreinte quantitative désagrégée est la méthodologie STAR (Species Threat Abatement and Recovery) mise en place par l’UICN. STAR mesure la contribution de deux types d’action en particulier pour réduire le risque d’extinction des espèces : la réduction des menaces et la restauration des habitats. Pour les menaces sur la biodiversité, STAR utilise la distribution mesurée comme zone d’habitat actuel d’une espèce donnée et la zone d’habitat perdu. Grâce à cette méthode il peut évaluer le potentiel d’actions spécifiques dans des zones géographiques précises pour aider à la prise de décision pour la préservation de la biodiversité. Cette mesure a pour avantage d’être modulable et comparable dans l’espace.

2.2.2.2 Empreinte quantitative agrégée

L’empreinte biodiversité la plus aboutie reste malgré tout l’empreinte biodiversité quantitative agrégée puisqu’elle permet d’avoir une seule métrique et d’être plus visuelle et transposable à différents espaces. Si l’on préfère décomposer l’analyse en facteurs de pression sur la biodiversité, il vaut toujours mieux privilégier une empreinte désagrégée cependant cette métrique permet de véhiculer un message relativement simplifié malgré la difficulté du sujet. L’empreinte quantitative agrégée la plus reconnue et la plus utilisée est le GBS (Global Biodiversity Score) qui quantifie les principales pressions en les rassemblant en une seule métrique le MSA/km². Mis en place par le CDC Biodiversité en 2020⁵⁶, partenaire officiel du SBTN (Science Based Target Network), il permet d’analyser l’impact des entreprises et des investissements sur la biodiversité. Le GBS est déjà reconnu officiellement par le Corporate Engagement Programme comme constituant la première étape de l’empreinte biodiversité.

L’objectif de cette méthodologie est de parvenir à long terme à couvrir l’ensemble des impacts des entreprises sur la totalité de la chaîne de valeur avec les impacts en amont et en aval. On crée un lien entre l’activité économique de l’entreprise et ses pressions sur la biodiversité. Il s’agit de l’outil Globio. Pour le moment, il couvre déjà l’utilisation des terres, la fragmentation des milieux, l’empiètement anthropique, les dépôts aériens azotés, le changement climatique, les perturbations hydrauliques, la conversion des zones humides, l’eutrophisation de l’eau douce et l’usage des sols. Nous allons maintenant analyser le fonctionnement du GBS et sa métrique, le MSA.km² afin de comprendre comment mesurer une empreinte biodiversité terrestre.

La MSA est la métrique de « l’abondance moyenne spécifique des espèces autochtones par rapport à leur abondance dans les écosystèmes non perturbés » (Alkemade et al., 2009; Schipper et al., 2016)⁵⁷. Elle est définie selon le cahier sur le GBS⁵⁸ :

$$MSA = \frac{1}{N_{\text{espèces référence}}} * \sum_{i=1}^{N \text{ espèces référence}} \text{Min} \left(\frac{A_{\text{observé}}(i)}{A_{\text{intact}}(i)}, 100\% \right)$$

⁵⁶ Abadie, M., & Cadi, A. (2020b). Comment et pourquoi mesurer l’empreinte biodiversité des acteurs économiques ? *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, N° 100(4), 72-75. <https://doi.org/10.3917/re1.100.0072>

⁵⁷ Schipper, A. M., Meijer, J. R., Alkemade, R., & Huijbregts, M. A. J. (2016). The GLOBIO model: a technical description of version 3.5. Consulté à l’adresse Netherlands Environmental Agency (PBL) website: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl_publication_2369.pdf

Alkemade, R., van Oorschot, M., Miles, L., Nellemann, C., Bakkenes, M., & ten Brink, B. (2009). GLOBIO3: A Framework to Investigate Options for Reducing Global Terrestrial Biodiversity Loss. *Ecosystems*, 12(3), 374–390.

<https://doi.org/10.1007/s10021-009-9229-5>

⁵⁸ [CAHIER sur le GBS.pdf](#)

Avec MSA, l'abondance moyenne des espèces autochtones ; $N_{\text{espèces référence}}$, le nombre total d'espèces dans un milieu non perturbé ; $A_{\text{observé}}(i)$, l'abondance de l'espèce i dans le milieu observé ; $A_{\text{intact}}(i)$ l'abondance de l'espèce i dans le milieu originel non perturbé. En fait, la MSA compare un état naturel non perturbé avec l'état actuel perturbé par les activités humaines. C'est un ratio d'abondance des espèces qui est à 100% quand l'écosystème est non perturbé et inférieur à 100% quand il est perturbé. Par exemple, quand on avait au départ une forêt primaire sur 10 km² à 100% de MSA et qu'on construit dessus des bureaux urbains (5% de MSA), il y a une perte de 95% de MSA donc on a : $95\% \text{ MSA} * 10 \text{ km}^2 = 9,5 \text{ MSA.km}^2$ L'entreprise a ainsi détruit 100% de la biodiversité sur 9,5 km².

Pour parvenir à mesurer l'écosystème non perturbé, le GBS s'appuie sur les indications de Bird-Life pour évaluer la population optimale sur un site en examinant l'étendue estimée de l'habitat potentiel et de la densité de population dans des conditions non perturbées (Bird-Life International, 2006). Cependant, l'hypothèse d'un écosystème non perturbé est à mettre en perspective du fait de la présence de l'Homme sur Terre, depuis 4 millions d'années, qui a modifié très fortement son environnement. Pour évaluer les variations de MSA, le GBS ne compare pas la biodiversité observée et la biodiversité dans la situation de référence, il utilise plutôt le modèle GLOBIO pour analyser les relations pression-impact entre l'activité économique et l'environnement en se fondant sur une base de données de valeurs d'impacts provenant de la littérature scientifique et issues d'études d'impact sur le terrain.

Enfin, une méthode proche de celle du GBS est le Corporate Biodiversity Footprint (CBF) produit par le Iceberg Data Lab. Il utilise aussi le MSA.km² mais peu de bibliographie est présente sur le sujet. L'objectif de cette méthodologie est de refléter le degré de dégradation des écosystèmes dû à l'activité d'une entreprise par rapport à l'état initial des écosystèmes. Jusqu'ici aucune de ces deux méthodologies ne couvre les océans et la biodiversité marine. Le GBS essaie d'ouvrir ses recherches aux espèces envahissantes mais il manque encore de données fiables et disponibles en assez grande quantité pour constituer une base. Le modèle GLOBIO commence à recenser quelques données à partir d'études scientifiques sur la question des ressources halieutiques notamment grâce à des études sur les populations de poissons issues d'autres modèles comme par exemple les travaux de Pauly et al. (2005)⁵⁹.

Les empreintes biodiversités agrégées permettent de comparer plusieurs écosystèmes différents et plusieurs impacts en les rassemblant en une seule métrique. Elles ne sont en revanche pas adaptées si jamais l'entreprise veut se concentrer sur une certaine dimension de la biodiversité. Par exemple, le MSA se focalise sur l'abondance des espèces mais pas sur les interactions entre les espèces ou la fonctionnalité des écosystèmes et comme on l'a vu avec les indicateurs taxonomiques et phylogénétiques, il est important de prendre en compte la diversité ainsi que les liens pour bien analyser l'impact sur la biodiversité. Pour les entreprises, il peut être stratégique de représenter les différents impacts sur la biodiversité afin de les mettre en lien avec les politiques environnementales déjà existantes.

⁵⁹ Pauly*, Watson and Jacki,(2005).Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, Vol. 360, No. 1453, Fisheries: A Future? (Jan. 29, 2005), pp. 5-12 (8 pages) <https://www.jstor.org/stable/30040873>

3. Données

Cette partie décrit l'ensemble des bases de données qui ont permis de réaliser la mise en pratique de la méthodologie créée dans cette étude et de confronter cette dernière à la présence ou l'absence de données afin de connaître sa faisabilité.

3.1. Justification du choix de la zone, de la ligne maritime et du navire

Dans cette section, je présente les différentes données sur lesquelles j'ai pu m'appuyer lors de la mise en place des indicateurs de cette étude. Elles proviennent en partie de rapport RSE publics de différentes entreprises du secteur maritime comme CMA CGM, Maersk, Louis-Dreyfus Armateur et autres. Une partie des données de la route maritime en Méditerranée provient de bases de données publiques accessibles en ligne et une partie est anonymisée.

J'ai choisi tout d'abord de travailler sur la mer Méditerranée parce qu'un grand nombre d'études et d'articles scientifiques permettaient de connaître mieux les espèces de faune et de flore présentes dans cette zone. Des associations comme le Parc des Calanques ou encore des espaces maritimes de protection des cétacés comme le Sanctuaire Pélagos entre l'Italie, la France, la Corse et la Sardaigne permettent d'avoir accès à des informations précises sur la vie des espèces et leur habitat. De nombreuses études publiées dans le journal *Marine Policy* étudient les impacts du transport maritime de passager ou les activités touristiques en mer sur l'environnement marin. Notamment un certain nombre d'études sur les impacts en termes de soufre (Testa D, 2020)⁶⁰, d'acidification de la mer (Rodrigues et al, 2012)⁶¹ ou encore sur les zones protégées⁶² ont permis de cerner les enjeux de pollution de l'air et de l'eau dans cette zone délimitée.

Ensuite, il a été nécessaire de choisir la ligne sur laquelle travailler en mer Méditerranée. Il était important, par mesure de simplification, de choisir une ligne Z interne à la mer Méditerranée, de cette manière le travail de recherche pouvait être plus approfondi sur cette zone. En Annexe 1, vous pouvez retrouver la carte avec le tracé de la ligne qui a été choisi pour mener cette étude. Elle a été réalisée en s'appuyant sur les données publiques et donc accessibles des différentes lignes en Méditerranée occidentale⁶³. La boucle présente un tracé intéressant puisqu'elle passe par le Sanctuaire Pélagos et reste assez proche des côtes en ayant tout de même des ports d'escale comme Malte, Marseille ou encore Alger. Le fait de rester aussi dans la même mer permet de se concentrer sur des réglementations principalement européennes au niveau des autorités portuaires et des zones économique exclusives. Enfin au niveau des recherches sur les écosystèmes, il était préférable de commencer par un seul espace marin relativement homogène afin de se concentrer sur les impacts sur un certain nombre d'espèces de faune et de flore marine.

⁶⁰ Testa, D. (2020). A note on the potential designation of the mediterranean sea as a sulphur emission control area. *Marine Policy*, 121, 104145. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104145>

⁶¹ Rodrigues, L. C., Van Den Bergh, J. C., & Ghermandi, A. (2012). Socio-economic impacts of ocean acidification in the Mediterranean Sea. *Marine Policy*, 38, 447-456. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.07.005>

⁶² Transforming marine monitoring: Using eDNA metabarcoding to improve the monitoring of the Mediterranean Marine Protected Areas network

⁶³ [CMA CGM | CMA CGM présente la nouvelle configuration de son service EURONAF desservant la Méditerranée Occidentale, le hub de Tanger et les ports algériens](#)

3.2. Données du navire

Pour réaliser cette étude, j'ai choisi de me concentrer sur un navire Y d'une entreprise X navigant sur la ligne Z analysée dans cette étude et passant par Marseille, Malte, Alger. Il a été décidé que le navire serait de moins de 1000 EVP (équivalent vingt pieds) puisque sur les lignes en boucle en Méditerranée, donc sur des courtes distance avec beaucoup d'escales, il s'agit la plupart du temps de navires de petite taille. Afin d'être au plus proche de la réalité, le navire X fait donc environ 800 EVP. Ensuite, l'analyse est réalisée sur un seul trimestre pour que l'ensemble des données soit disponible sur cette période t. Il s'agit de la période janvier – mars 2024, on considère donc les conditions météorologiques de cette partie de l'année et les lois applicables à cette période. Il faut cependant prendre en compte que certains indicateurs s'étendent sur une période plus longue que seulement un trimestre comme la peinture de la coque qui n'est appliquée en moyenne que tous les 5 ans.

La méthodologie de l'empreinte biodiversité est donc réalisée spécifiquement en rapport avec l'écosystème présent en mer Méditerranée occidentale et est appliquée au navire X sur la période janvier – mars 2024. Il serait préférable de la réaliser sur une année complète, cependant, compte tenu des difficultés citées précédemment pour l'accès aux données, j'ai été contrainte de la réaliser sur un trimestre.

Les données principales sur le navire X proviennent de sources disponibles sur les sites internet des armateurs et sont donc publiques notamment sur les données générales et techniques. Afin d'obtenir des informations plus précises sur l'impact du navire sur la pollution atmosphérique, j'ai obtenu un tableau de données avec le type de carburant utilisé par boucle sur la période janvier – mars 2024⁶⁴. Ce tableau a été complété avec des données sur les facteurs d'émissions⁶⁵ utilisés par le secteur du transport maritime. Le tableau permettait d'avoir accès aux consommations de carburant par type de carburant et par trajet en litre afin de calculer les émissions de CO2 en Well-to-Wake (WTW), c'est-à-dire le fuel utilisé tout le long du processus et que l'on peut décomposer en Well-to-Tank et Tank-to-Wake⁶⁶. Vous pouvez vous reporter à l'annexe 15 qui détaille ces termes plus précisément. Les facteurs d'émission ont dû être extraits afin de parvenir à calculer les émissions WTW par type de polluant pour chaque trajet en fonction de la consommation de carburant (ici VLSFO et DO).

Facteurs d'émission

VLSFO	Facteur Emission WTW
Emissions CO2	3,8380
Emissions SOx	0,0100
Emissions NOx	0,0759
Emissions PM	0,0076

⁶⁴ La source de ces données est anonyme

⁶⁵ La source de ces données est anonyme

⁶⁶ L'analyse des émissions Well-to-Wake est comparable et est également connue sous le nom d'analyse du cycle de vie. Elle inclut les émissions liées à chaque étape du cycle de vie d'un combustible, depuis sa production jusqu'à son utilisation pour alimenter un navire (Source : Smart Freight Center)

Diesel Oil	Facteur Emission WTW
Emissions CO2	3,9200
Emissions SOx	0,0020
Emissions NOx	0,0567
Emissions PM	0,0009

Enfin, pour connaître les consommations moyennes de carburant par trajet pour la flotte de navires en Méditerranée, j'ai obtenu des tableaux de données comprenant la distance parcourue durant le trajet ainsi que le port en lourd du navire (Deadweight ou DWT, ce que le navire peut transporter au maximum), très importants pour calculer le CII. Ces données quantitatives sont déjà très utilisées par les armateurs et sont remplies chaque jour par le personnel naviguant afin de garder une trace des consommations de carburant quotidiennes. Elles sont donc fiables et complètes.

Pour connaître les technologies à impact sur le navire, il a fallu s'adresser aux experts de chaque domaine afin d'avoir connaissance des détails nécessaires à la compréhension de la technologie. Par exemple, il a été nécessaire, notamment, de mener des entretiens avec les personnes s'occupant des scrubbers, de la peinture antifouling⁶⁷ ou encore des personnes en charge du traitement des eaux de ballast⁶⁸. Il a été nécessaire de faire de même pour la signature acoustique du navire et l'attente des navires au port bien que ces données ne soient pas accessibles pour des raisons de confidentialité ou parce qu'elles n'existent pas encore. C'est le cas du bruit sous-marin. Pour combler ce manque de données, je me suis appuyée sur les travaux du bureau Veritas⁶⁹ ainsi que sur d'autres études développées dans la partie sur la méthode pour comprendre l'impact du bruit sous-marin sur les cétacés.

Enfin pour connaître le mode d'opération des navires en temps réel et dans le passé, je me suis appuyée sur le site Marine Traffic⁷⁰ mais aussi Vessel Finder⁷¹. Ces logiciels AIS (Système d'identification automatique) sont publics et permettent de suivre les navires sur l'ensemble des océans dans le monde. Marine Traffic a notamment permis de connaître les vitesses du navire le long de son parcours sur la route à chaque point de son trajet pour observer ses variations. Cette donnée précieuse permet d'analyser plus précisément la vitesse du navire Y lorsqu'il traverse des espaces protégés en Méditerranée comme le Sanctuaire Pélagos afin de déduire s'il mettait en œuvre des actions concrètes pour la protection des cétacés (ralentissement de la vitesse dans la zone, changement de trajectoire etc.). Les données contenues dans Marine Traffic sont en partie complètes et utilisées en permanence notamment par les centres d'opération des armateurs en charge d'optimiser les routes maritimes en minimisant les risques en cas d'imprévu climatique, de conflit

⁶⁷ La peinture antifouling est nécessaire pour empêcher les organismes dans l'eau de proliférer sur la coque des navires, elle peut être faite à partir d'éléments chimiques qui rejettent des biocides dans l'eau

⁶⁸ Les navires utilisent ce qu'on appelle des eaux de ballast afin de se stabiliser dans la mer. Ces eaux sont pompées et maintenues à bord le long du trajet puis rejetées. Le principal problème que posent les eaux de ballast est le transfert d'espèces invasives, c'est la raison pour laquelle l'OMI prévoit que l'on les traite. Plus de précisions sur : [Gestion des eaux de ballast des navires \(imo.org\)](#)

⁶⁹ [Underwater Radiated Noise \(URN\) | Marine & Offshore \(bureauveritas.com\)](#) et notamment leur étude de 2018 : [URN Vessel Limit Bureau Veritas.pdf](#)

⁷⁰ [MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic](#)

⁷¹ [Suivi des navires et des conteneurs - VesselFinder](#)

etc. Cependant, ces logiciels AIS publics sont utilisés par les armateurs s'ils n'ont pas leur propre logiciel interne avec les données sur leurs navires.

3.3. Données de la ligne

Les données de la ligne proviennent de sources très variées. J'ai dû notamment travailler sur les textes juridiques et les réglementations spécifiques de chaque port afin de connaître les engagements pour l'environnement qui pouvaient être mis en place le long de la ligne. Pour ce faire, je me suis appuyée sur les sites des autorités portuaires ainsi que sur l'aide précieuse de certains juristes spécialisés dans le transport maritime pour être orientée dans les textes. Au-delà des réglementations des ports, il a été nécessaire de regarder les réglementations françaises pour les pavillons (site du gouvernement ou analyses faites par Armateurs de France) mais aussi plus généralement les réglementations maritimes en termes d'environnement de l'UE⁷² et de l'OMI⁷³. Ces données qualitatives étaient nécessaires pour comprendre le cadre juridique dans lequel le navire évoluait et s'il y avait des incitations ou des pressions qui l'amenaient à améliorer son impacts sur le climat ou la biodiversité.

Ensuite, il a été nécessaire d'obtenir des données sur le contexte géographique notamment la météorologie, la bathymétrie, les courants. Pour les courants et la météorologie, j'ai utilisé les données de Marine Traffic et l'expérience de certains chefs de ligne. Pour la bathymétrie, un certain nombre de recherches ont été nécessaires mais les données étaient peu disponibles sur les bases de sextant⁷⁴ car les satellites ne permettent pas de connaître la profondeur de l'eau. Après de longues recherches, il a été décidé de s'appuyer sur une carte de bathymétrie (Annexe 2) déjà réalisée dans une étude sur la Méditerranée⁷⁵ (Coll et al, 2010). J'ai ensuite pu géoréférencer cette carte dans QGIS et récupérer les données grâce à la légende en les complétant avec les données du tracé de la ligne (Annexe 1).

Enfin, j'ai aussi utilisé des données afin de mieux comprendre le contexte dans lequel le bateau naviguait notamment sur la fréquentation de la zone disponible sur le site de Marine Traffic (données publiques). Pour les activités économiques telles que l'aquaculture en mer Méditerranée, je me suis appuyée sur le rapport de l'Economie Bleue de la WWF⁷⁶ et pour les activités touristiques en mer Méditerranée, sur différents documents notamment le Plan Bleu mais aussi le Plan d'action pour le milieu marin de la Préfecture de Provence Alpes Côte d'Azur⁷⁷. Ces plans contiennent des données quantitatives sur le budget mais aussi des données qualitatives sur les actions concrètes mises en œuvre.

Les sources des données utilisées dans cette étude sont donc dans l'ensemble fiables car elles proviennent principalement d'organisations internationales, d'articles scientifiques ou d'entreprises qui ont besoin de données sérieuses pour publier leurs résultats, notamment en termes de décarbonation. Lorsqu'il manquait des données comme dans le cas du bruit sous-marin, il a été

⁷² Fiches thématiques du Parlement Européen : [Politique maritime intégrée de l'Union européenne | Fiches thématiques sur l'Union européenne | Parlement européen \(europa.eu\)](https://www.europa.eu/parliament/fr/themes/maritime)

⁷³ <https://www.imo.org/fr/OurWork/Environment/Pages/default.aspx>

⁷⁴ <https://sextant.ifremer.fr/Donnees/Catalogue#/metadata/5924fa10-ac45-11de-8853-000086f6a603>

⁷⁵ Coll, M., Aguzzi, J., Ballesteros, E., Estrada, M., Gasol, J. M., Gil, J., Martin, D., Oro, D., Templado, J., Turon, X., Villanueva, R., & Voultsiadou, E. (2010). Biodiversity of the Mediterranean Sea : Estimates, patterns and threats. *Steven J. Bograd, NOAA/NMFS/SWFSC, United States Of America.*

⁷⁶ [Article Economie bleue et méditerranée.pdf](#)

⁷⁷ [PERLE Plan d'action pour le milieu marin - Mediterranée Orientale 2010.pdf](#)

nécessaire de s'appuyer sur d'autres études et signaler ce manque de données dans l'étude pour tout de même considérer l'indicateur. Pour déterminer les indicateurs, je me suis appuyée sur des données quantitatives à partir d'études et d'entretiens d'experts mais, pour les compléter, j'ai dû utiliser les données quantitatives citées ci-dessus.

4. Méthodologie de calcul de l'empreinte biodiversité

Dans cette partie, je présente la méthodologie d'empreinte biodiversité marine appliquée en partie à la mer Méditerranée Occidentale dans la première version actuelle.

4.1 Prérequis : Choix de la méthodologie parmi celles évoquées dans la revue

Après m'être inspirée des différentes méthodologies d'empreinte biodiversité terrestre que nous avons vues dans la revue de littérature, il a été nécessaire de constituer une méthodologie d'empreinte biodiversité marine se rapprochant le plus possible des impacts réels des navires. Cette méthode doit être à la fois scientifique et aussi accessible aux entreprises afin que ces dernières puissent voir comment améliorer leur score tout en étant consciente des retombées économiques. Pour constituer une empreinte biodiversité utilisable par les entreprises, il a semblé pertinent de s'appuyer sur un certain nombre d'indicateurs sans toutefois les agréger en une métrique. Chaque indicateur a un poids et est rassemblé avec les autres pour obtenir un score final afin de classer le navire parmi différents seuils de prise en compte de la biodiversité. Le choix de s'appuyer sur une empreinte désagrégée est motivé par le fait que cette approche mesure la biodiversité en s'appuyant sur des données quantitatives mais en séparant les impacts en fonction d'indicateurs. Ainsi, on connaît les différentes manières dont l'entreprise impacte la biodiversité.

Au début de la recherche pour réaliser cette empreinte biodiversité, s'est posée la question de prendre en compte les impacts sur le climat et donc d'inclure l'empreinte carbone. Il a été décidé de conserver à la fois les impacts sur la biodiversité et sur le climat pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cet outil est destiné aux usages des entreprises, de ce fait, il a semblé pertinent de prendre en compte les efforts réalisés par l'entreprise sur les questions de décarbonation et d'inclure les calculs sur l'empreinte carbone. De plus, l'empreinte biodiversité étant assez récente, il a semblé préférable qu'elle inclue les outils déjà utilisés par l'entreprise afin d'être dans la continuité des actions déjà engagées.

Ensuite, le changement climatique est l'une des menaces principales de la biodiversité marine et terrestre. L'augmentation des températures de l'océan provoque notamment la migration de certaines espèces et est directement liée au changement climatique. Ne pas prendre en compte la pollution de l'air serait mettre de côté une partie des impacts provoqués par l'entreprise sur la biodiversité et ne ferait pas sens. Il a donc été décidé de prendre en compte des impacts directs et des impacts indirects sur la biodiversité. Certains indicateurs représentent un impact direct comme le bruit sous-marin qui perturbe dans l'immédiat les cétacés et autres espèces. D'autres indicateurs se focalisent plutôt sur l'impact indirect du navire sur la biodiversité qui vont plutôt avoir des impacts à long terme mais qui peuvent perdurer dans le temps. Notamment, dans les impacts indirects, on retrouve le changement climatique et donc la pollution de l'air, qui sur le long terme, contribue à l'acidification des océans et l'augmentation générale des températures.

Afin de modéliser cette empreinte biodiversité, je suis passée par plusieurs étapes détaillées dans la suite de cette partie. Tout d'abord, il a été nécessaire de sélectionner les indicateurs à prendre en compte en s'appuyant sur des études sur le sujet mais aussi des entretiens avec des experts (4.2). Nous arrivons à quarante indicateurs et sous indicateurs pris en compte pour cette empreinte biodiversité en Méditerranée. Ensuite, il a été nécessaire de les rassembler par thème et constituer le questionnaire en explicitant le rôle de chaque indicateur dans son impact sur la biodiversité et sur l'économie mais aussi les actions possibles de l'entreprise associées à l'effort pour réduire cet impact (4.3). Une fois chaque indicateur justifié, pour constituer l'empreinte, il a été nécessaire de trouver les seuils pour classer le niveau d'un navire par rapport à son impact sur la biodiversité (4.4). Enfin, une fois tous les seuils de chaque indicateur explicités, il a été possible de transmettre le questionnaire aux experts du comité afin qu'ils puissent pondérer chaque indicateur, cette méthode sera explicitée dans la sous-partie 4.5.

4.2 Etape 1 : Justification choix des indicateurs

Pour choisir les indicateurs je me suis appuyée principalement sur les entretiens des experts afin de ne manquer aucun impact important du navire pendant son trajet. Il a été nécessaire de trouver des indicateurs qui permettent de faire appel à une donnée afin de classer le navire de neutre vis-à-vis de la biodiversité à néfaste. Les indicateurs ont été ainsi séparés en trois grands groupes : les indicateurs du navire, les indicateurs de la route maritime et ceux du contexte économique. Dans les indicateurs du navire, on retrouve principalement les indicateurs provenant de données publiques pour la taille et le pavillon du navire traité, les émissions de ce navires, les technologies du navire liées aux questions de décarbonisation, les caractéristiques du navire pendant son trajet et enfin les labellisations et certification du navire en matière environnementale. La route maritime prend en compte des indicateurs pour connaître les caractéristiques météorologiques et physiques de la route mais aussi des indicateurs sur les zones traversées pour prendre en compte la réglementation. Enfin les indicateurs du contexte permettent de voir la contribution du navire à un impact plus général.

S'il a été choisi de considérer, en plus des indicateurs du navire, ceux du contexte général de la route et du contexte économique c'est parce qu'il a semblé nécessaire de prendre en compte les difficultés pouvant être liées à la navigation et qui pourraient aggraver l'impact du navire sur la biodiversité. Inclure les spécificités de la route permet d'être plus précis sur l'écosystème atteint et de connaître l'influence des réglementations et des conditions météorologiques sur le trajet du navire.

Afin de centrer au mieux l'analyse sur la biodiversité marine et ne pas s'éparpiller, il a été décidé de ne pas considérer les impacts des pollutions abordées sur les êtres humains. C'est la raison pour laquelle, je n'analyse pas l'impact des polluants du type soufre sur les populations dans les ports bien qu'ils aient un réel impact sur la santé humaine (Viana et al, 2014)⁷⁸. De nombreuses études se concentrent déjà sur ce sujet dont une récente sur le cas de la qualité de l'air dans les ports de la Méditerranée (Toscano, 2023)⁷⁹. Cette étude reprend les précédentes réalisées dans cette zone afin

⁷⁸ Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., De Vlieger, I., & Van Aardenne, J. (2014). Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, 90, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.046>

⁷⁹ Toscano Domenico, (2023) The Impact of Shipping on Air Quality in the Port Cities of the Mediterranean Area: A Review, Department of Chemical, Materials and Production Engineering, University of Naples, *Atmosphere*, 14(7), 1180; <https://doi.org/10.3390/atmos14071180>

de suggérer une méthodologie globale pour analyser cette source de pollution et des solutions pour l'atténuer efficacement. Puisqu'il ne s'agit pas directement du sujet que nous abordons et ce, bien que l'on ait conscience de ces impacts, ces derniers ne seront pas mesurés dans cette étude.

4.3 Etape 2 : Constitution du questionnaire

4.3.1. Indicateurs navire

4.3.1.1. Fiche technique du navire

Suite aux entretiens, j'ai recensé neuf indicateurs pour remplir la fiche technique du navire et connaître l'impact du navire pendant son trajet.

4.3.1.1.1 Opérateur du navire

Le premier indicateur est l'opérateur du navire. Cet indicateur est essentiel à prendre en compte puisque chaque armateur a ses propres engagements contre le changement climatique et peut choisir de ne pas agir en faveur de la biodiversité. Être un armateur engagé revient à avoir conscience de l'impact que l'on a sur la biodiversité et mettre en place des mesures afin de réduire cet impact sur certains points. Un même navire opéré par des armateurs différents peut avoir un impact totalement différent sur la biodiversité en fonction de la manière dont il est manœuvré (route choisie, vitesse etc.) mais aussi des investissements pour l'environnement implémentés sur ce navire (carburant choisi, investissements bas carbone etc.). Faute de réglementation suffisante, il est notamment important de prendre en compte l'engagement de l'opérateur bien qu'il soit limité par son pouvoir de décision.

La difficulté de cet indicateur résidait dans la recherche de critères précis permettant de savoir si l'armateur s'engage et cherche à avoir un impact moindre sur la biodiversité ou à défaut sur l'environnement. Pour correctement analyser cet indicateur, je l'ai réparti en trois sous-indicateurs qui semblent objectifs afin de connaître l'engagement de l'armateur en termes de biodiversité. Il fallait trouver des critères permettant de distinguer un grand ensemble d'armateur sur un point qu'ils partageait tous. Tout d'abord, il est intéressant de prendre en compte la présence d'un rapport RSE (Responsabilité sociétale des entreprises) et en particulier la mention des actions opérationnelles et des partenariats en faveur de la biodiversité. Un rapport RSE est un document publié annuellement par une entreprise pour rendre compte de ses actions et de ses résultats en matière de responsabilité sociale, sociétale mais aussi environnementale.

Le deuxième sous-indicateur est la participation de l'armateur au label Green Marine Europe⁸⁰. Il s'agit d'un des seuls labels à prendre en compte l'impact de l'entreprise de transport maritime sur la biodiversité marine. Ce programme volontaire de certification environnementale a été créé en 2020 par Surfrider Europe et s'adresse aux armateurs. Il s'est inspiré d'un label créé par l'Alliance Verte en Amérique du Nord. Le label s'appuie sur 11 indicateurs qui traitent d'enjeux environnementaux axés spécialement sur les impacts du transport maritime : bruit sous-marin, émissions de CO₂, NO_x, SO_x, PM (particules fines), espèces aquatiques envahissantes, gestion des déchets, recyclage des navires, rejets huileux etc. Des audits sont réalisés chaque année pour s'assurer que les armateurs agissent conformément à ce qu'ils annoncent dans le questionnaire. Aujourd'hui, 27 armateurs européens en font partie. Par l'ensemble des indicateurs qu'il prend en

⁸⁰ [Accueil | Green Marine Europe](#)

compte, le label Green Marine Europe constitue en lui-même un excellent indicateur d'engagement pour la biodiversité.

Enfin le dernier sous-indicateur pris en compte pour évaluer le degré d'engagement de l'armateur en termes de biodiversité est la complétion du questionnaire EcoVadis. Il s'agit d'un outil de rapport RSE axé sur quatre piliers : l'environnement, l'éthique, le social et les achats responsables. Chaque catégorie obtient une note distincte et nous nous concentrerons uniquement sur la partie environnementale. Cette dernière s'appuie notamment sur la gestion des impacts de l'entreprise, la biodiversité, la réduction des GES ou encore la gestion des déchets. Etant donné que la plateforme a été fondée en 2007, un grand nombre d'entreprises l'utilisent pour leur rapport d'activité extra-financière.

Ces trois indicateurs permettent ainsi d'évaluer les actions engagées par l'entreprise en matière de protection de la biodiversité et plus généralement de protection de l'environnement en restant le plus possible objectif sur les critères sélectionnés pour comparer au mieux les armateurs, d'autant plus que l'investissement financier pour participer aux labels ne semble pas représenter un budget (selon le niveau de développement de l'entreprise).

4.3.1.1.2 Pavillon du navire

Le pavillon du navire est un indicateur d'importance plus faible mais qui peut être intéressant à analyser dans le cadre de la protection de la biodiversité. Chaque navire doit être enregistré sous un pavillon et il est possible de changer de nationalité au cours de la vie du navire. Le fait d'être rattaché à un pavillon implique que le navire est rattaché juridiquement à un Etat et doit appliquer les règles de cet Etat y compris en environnement. Nous verrons, dans la suite des indicateurs, que d'autres réglementations s'ajoutent lorsque le navire traverse des eaux territoriales ou accoste dans des ports.

En fonction de l'Etat de provenance du pavillon, les réglementations sont plus ou moins contraignantes en termes de sécurité mais aussi sur des sujets approchant l'environnement comme le traitement des déchets ou le recyclage du navire. Les pavillons européens par exemple ont des règles plus contraignantes que des pavillons hors Europe car l'UE est plus stricte que l'OMI. Les pavillons connus sous le nom de « pavillons de complaisance » ou « pavillon de libre immatriculation » ont des normes plus laxistes. Il s'agit par exemple des pavillons du Panama ou des Îles Marshall.

D'un point de vue économique pour l'entreprise, on pourrait penser au premier abord qu'il serait plus avantageux d'avoir des pavillons de libre immatriculation compte tenu des coûts liés à la conformité environnementale. Cependant, il peut être intéressant d'investir dans un pavillon européen afin d'avoir des avantages fiscaux et des rétributions. En effet, outre le fait qu'un certain pourcentage de la flotte en France doit être de pavillon européen, certains Etats offrent des incitations fiscales pour encourager le maintien des navires sous pavillon européen. Ces navires peuvent être éligibles dans un cadre spécifique à des aides financières pour promouvoir la durabilité des navires et la conformité aux réglementations environnementales. Par exemple, dans le cadre du Green Deal⁸¹, certaines initiatives sont prévues pour avancer sur la décarbonation du transport

⁸¹ Le Pacte Vert européen veut permettre à l'Europe de se préparer au mieux au changement climatique et de privilégier des investissements vers une meilleure prise en compte de l'environnement [The European Green Deal - European Commission \(europa.eu\)](https://european-council.europa.eu/media/en/press-communications/infographic/Pages/infographic-2021-07-20-01.aspx)

maritime. Ainsi le choix du pavillon du navire peut avoir un impact sur l'environnement et par extension sur la biodiversité bien qu'il soit relatif.

4.3.1.1.3 Règlements sur les NOx

Les NOx ou oxydes d'azote sont des polluants émis lors de la combustion du fioul. On retrouve le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote (NO₂) qui peuvent être émis en plus ou moins grande quantité selon le fioul consommé et les technologies bas carbone utilisées (cf scrubber en introduction). Les oxydes d'azote ont des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement⁸². En particulier, sur la biodiversité, ils provoquent l'acidification des milieux et l'eutrophisation lorsqu'il y a trop d'azote dans les milieux naturels et en particulier les sols.

L'acidification des océans est liée particulièrement au dioxyde de carbone mais l'oxyde d'azote y participe tout autant. Un quart du CO₂ et des NOx que nous émettons sont absorbés par les océans et participent à la baisse du pH dans l'eau, la rendant ainsi plus acide⁸³. Cette acidification est néfaste pour les organismes marins car elle rend plus difficile la formation de leur squelette et de leur coquille étant souvent formés de calcaire. L'eau devient ainsi corrosive. Dans leur livre, *L'acidification des océans - Quels effets ? Quelles solutions ?* (2024), Pernet et Gazeau, chercheurs au CNRS⁸⁴, explicitent ce problème que constitue l'acidité pour la biodiversité et expliquent que le pH pourrait perdre jusqu'à 0,4 unités en 2100 par rapport au milieu du XIXe siècle ce qui représente près de trois fois plus d'acidité dans l'océan.

L'eutrophisation provoque elle aussi de fortes pertes en termes de biodiversité. Il s'agit d'un phénomène qui a pu être assez médiatisé suite aux marées vertes sur les côtes bretonnes dues à la prolifération d'algues toxiques liées au rejet d'azote créé avec les engrais de l'élevage intensif dans cette région. L'eutrophisation est aussi un phénomène qui s'exerce à une échelle plus globale des océans avec le rejet d'oxydes d'azote dans l'atmosphère lors des combustions⁸⁵. Sur les littoraux, les couvertures d'algues bloquent les rayons du soleil de filtrer à travers l'eau ce qui empêche la photosynthèse pour les organismes marins. Le problème de l'eutrophisation est d'une part la lumière mais de l'autre le manque d'oxygène dans l'eau. Lorsque les algues meurent, les bactéries qui les consomment utilisent une grande quantité de l'oxygène contenu dans l'eau ce qui nuit aux organismes marins.

Ces deux phénomènes sont aggravés par le rejet d'oxyde d'azote comme nous avons pu le voir. L'indicateur sur les réglementations relatives aux oxydes d'azote dépend de l'âge de la pose de la quille du navire. Cet indicateur permet de savoir quelles réglementations doit respecter le navire en termes d'émissions de NOx, en prenant bien sûr en compte que certaines zones appelées NECA (Nitrogen Emission Control Area) restreignent en plus les émissions de NOx localement. Plus la quille est ancienne, moins les réglementations sont contraignantes, ce qui nous donne une indication

⁸² [Les polluants de l'air \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)

⁸³ [L'acidification des Océans - Institut océanographique \(oceanography.org\)](https://oceanography.org)

⁸⁴ Pernet F., Gazeau F., 2024. *L'acidification des océans : quels effets ? quelles solutions ?*, Versailles : Éditions Quæ, 124 p.

⁸⁵ Pinay, Gascuel, Menesguen, Souchon, Le Moal, et al.. Eutrophisation. Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Rapport de l'Expertise scientifique collective. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA); Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER); Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA); Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). 2017. fihal-02791790

importante sur le niveau de pollution du navire compte tenu des conséquences des oxydes d'azote sur la biodiversité.

4.3.1.1.4 Nombre de conteneurs réfrigérés

Cette empreinte biodiversité porte sur les navires porte-conteneurs uniquement. Ces navires transportent des marchandises conditionnées dans des conteneurs, caissons parallélépipédiques standardisés dont la longueur fait 20 pieds, 40 pieds ou 45 pieds. Un certain type de marchandises, notamment les aliments dont les fruits et les légumes a besoin d'être transporté à température contrôlée. Les conteneurs réfrigérés ou « reefers » sont des conteneurs capables de maintenir une certaine température pour la conservation de la marchandise. Ils produisent du froid et sont alimentés par des prises spéciales sur le porte conteneur. Les conteneurs réfrigérés augmentent donc la consommation d'énergie à bord du navire. Plus ils sont nombreux, plus le navire consomme de carburant. Le fait de consommer plus de carburant implique que l'on émet plus de polluants dans l'atmosphère et donc qu'on impacte encore plus la biodiversité. Les émissions des conteneurs réfrigérés ne sont pas négligeables mais elles représentent souvent une faible part des consommations du navire.

A bord du navire le nombre de conteneurs réfrigérés dépend presque intégralement de la demande du client donc il peut y avoir un conflit entre l'offre proposée par l'armateur et les besoins du client. Ce que l'armateur peut mettre en place sans modifier son offre, pour tout de même limiter l'impact de la hausse de la consommation d'énergie, consiste à investir dans des conteneurs réfrigérés de dernière génération afin qu'ils consomment moins. Toutefois ces nouveaux conteneurs réfrigérés représentent de fait un investissement à l'achat engageant un surcoût pour l'armateur.

4.3.1.1.5 Type de carburant

Le type de carburant est un indicateur essentiel à prendre en compte puisque, en dehors des zones règlementées, par exemple en haute mer, le navire n'a pas de restrictions sur ses émissions et à ce moment-là, consommer un carburant bas carbone permet de limiter les émissions de CO₂ et autres polluants en trop grande quantité lors de la combustion.

Parmi les différents types de carburant, on retrouve tout d'abord le HFO (Heavy Fuel Oil ou fioul lourd). Il s'agit du carburant le plus utilisé pour les navires commerciaux parce qu'il a une teneur énergétique très élevée ce qui est important pour ce type de navires. Cependant il est aussi extrêmement polluant puisqu'il s'agit d'un résidu de raffinage. Il ne sert qu'au transport maritime de manière générale. Ce carburant émet cependant une quantité de soufre très problématique (3,5%) et doit nécessiter, suite aux limitations imposées par l'OMI, l'utilisation d'un scrubber pour être conforme à la réglementation en vertu de la règle « OMI 2020 » inscrite dans la Convention MARPOL (0,5% contre 3,5% de soufre depuis 2020)⁸⁶. Le carburant HFO a l'avantage d'être le moins cher et aussi d'être beaucoup plus accessible que les carburants bas carbone.

Les carburants très utilisés après le HFO sont les carburants qui ont une teneur en soufre très faible : le MGO (Marine Gas Oil ou gazole maritime), le VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil) à 0,5% de soufre et le ULSFO (Ultra Low Sulfur Fuel Oil) à 0,1% de soufre. Ils sont conformes aux réglementations de l'OMI. La principale différence entre le MGO et les deux fiouls LSFO réside

⁸⁶ [Limite en soufre du fuel-oil: air plus pur, planète plus saine \(imo.org\)](https://www.imo.org/fr/newsroom/press-releases/2020/01/20200127-sulfur-limit)

dans le prix, en effet le MGO est plus raffiné et donc coute plus cher. Il peut être plutôt utilisé dans des zones SECA (Sulfur Emission Control Area).

Nous pouvons maintenant aborder les carburants alternatifs⁸⁷ qui permettent de limiter encore plus la pollution de l'air. Tout d'abord le carburant alternatif le plus connu est le Gaz Naturel Liquéfié ou GNL produit à partir de méthane (CH₄) d'origine fossile. Le GNL permet un gain pour la préservation de la qualité de l'air. On observe une diminution de 99% de SO_x, de 92% de NO_x et de 91% de particules fines (PM). Au-delà des avantages écologiques (malgré les fuites de méthane) cette technologie est déjà mature et donc reconnue par les armateurs. Cette solution est utilisée depuis 2020 et permet de réduire jusqu'à 20% par rapport aux carburants conventionnels. Viens aussi la solution des biocarburants renouvelables obtenus à partir de ressources naturelles ou de déchets organiques.

Ces biocarburants réduisent considérablement les émissions de polluants. Il existe deux types de biocarburants : issus de première génération (par exemple des cultures) et issus de deuxième génération (par exemple des déchets). Il est préférable d'utiliser des biocarburants de deuxième génération puisque cela permet une économie circulaire qui revalorise les déchets de la biomasse. On retrouve par exemple le biodiesel qui constitue une solution disponible et permettant de réduire jusqu'à 85% les émissions par rapport aux carburants traditionnels. On retrouve aussi le biométhane (CH₄) qui est aussi produit à partir de biomasse. Les armateurs peuvent faire le choix de s'approvisionner uniquement en biométhane produit à partir de déchets et de résidus pour éviter les externalités négatives.

Le carburant constitue donc un indicateur important dans l'empreinte biodiversité mais a aussi un poids non négligeable en termes de coûts pour l'entreprise. En effet les biocarburants sont en moyenne 2 à 5 fois plus élevés que les carburants conventionnels⁸⁸. Dans l'annexe 3, on retrouve un graphique réalisé par l'OMI⁸⁹ dans son rapport MEPC 80 (2023, Marine Environmental Protection Committee) pour comprendre les estimations des prix à venir des carburants bas carbone. Ils représentent un surcoût estimé entre 50% et 250% par rapport au VLSFO conventionnel. L'OMI explique ce surcoût par la faible maturité de certains de ces carburants et par la disponibilité limitée de ces derniers.

4.3.1.1.6 Règlementations sur les SO_x

Nous avons vu la réglementation sur les oxydes d'azote mais il y a aussi des problématiques causées par le soufre. Bien que les émissions de soufre aient considérablement baissé dans les pays de l'OCDE⁹⁰, elles restent un problème majeur notamment pour les conséquences qu'elles engendrent par exemple dans les pluies acides lorsque le soufre se combine avec l'eau. Les particules de soufre émises par les navires peuvent se retrouver dans l'océan et perturber la chaîne alimentaire. Le soufre participe au phénomène d'acidification dont nous avons parlé pour les

⁸⁷ Rapport RSE de la CMA CGM page 54 : [https://www.cmacgm-group.com/api/sites/default/files/2024-02/CMA%20CGM_Rapport%20RSE%202023_Web%20\(1\).pdf](https://www.cmacgm-group.com/api/sites/default/files/2024-02/CMA%20CGM_Rapport%20RSE%202023_Web%20(1).pdf)

⁸⁸ <https://futurefuels.imo.org/home/latest-information/fuel-prices/>

⁸⁹ <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC80.INF10.pdf>

⁹⁰ OCDE (2014), « Émissions d'oxydes de soufre (SO_x) et d'oxydes d'azote (NO_x) », dans *Panorama de l'environnement 2013 : Les indicateurs de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264221802-7-fr>.

oxydes d'azote. L'armateur peut agir sur ses émissions de soufre en choisissant des carburants faibles en soufre comme nous venons de le voir.

Certaines zones citées précédemment, les SECA, imposent une teneur en soufre minimale mais ce n'est pas encore le cas en Méditerranée. Le 79^e MEPC a bien approuvé la création d'une zone SECA dans cette mer en 2022⁹¹ et elle sera en vigueur en 2025, ce n'était donc pas le cas pendant le cas pratique sur l'année 2024. Etant donné que les armateurs étaient libres de choisir les émissions de soufre du moment qu'elles restaient inférieures à 0,5%, il est intéressant d'étudier cet indicateur pour voir si des décisions ont été prises volontairement pour limiter ces émissions. Il est important de noter que cette réglementation de l'OMI ne s'applique cependant pas à la haute mer qui est une zone dans laquelle aucune réglementation ne s'applique car ne représentant pas une entité juridique.

4.3.1.1.7 Consommation moyenne de carburant

La consommation moyenne de carburant est intéressante à analyser et complète certains indicateurs comme le type de carburant, les spécificités de la route ou le rapport entre les tonnes transportées par kilomètre et les émissions. La consommation de carburant dépend de l'efficacité du moteur du navire et donc en partie de son âge. Cependant, elle dépend aussi des conditions météorologiques dans lesquelles le navire a pu se trouver. En effet, des conditions météorologiques difficiles rendent complexes la manœuvre du navire et peuvent provoquer une hausse de la consommation de carburant. Un autre aléa qui peut survenir est le retard. Par exemple, un navire arrivant à son escale avec du retard peut manquer la fenêtre horaire de quai qui lui était réservée au port et attendre avant d'en avoir un autre et de ce fait continuer de brûler du carburant. Un navire même à l'ancre, continue de fonctionner avec ses moteurs auxiliaires alimentés en MDO (Marine Diesel Oil) du fait du fonctionnement des machines dans le porte-conteneur (conteneurs réfrigérés, frigidaires, quartiers, lumière etc.).

4.3.1.1.8 Rapport entre tonnes transportées par km et émissions

Pour cette étude, on pourrait penser que la taille du navire importe dans les émissions de CO₂. Toutes choses égales par ailleurs, il est vrai qu'un navire de 23 000 EVP émet plus de CO₂ qu'un navire de 1 000 EVP puisqu'il consomme plus de carburant du fait de sa taille. Cependant, quand on rapporte à la tonne transportée, les plus petits navires émettent plus que les grands navires, toujours en raisonnant toutes choses égales par ailleurs. En effet, les émissions du navire varient aussi en fonction de la route qu'il emprunte, du nombre d'escale qu'il fait etc. De ce fait, il a semblé préférable de prendre en compte le rapport entre les tonnes transportées par kilomètre et les émissions produites plutôt que de s'appuyer sur des critères de taille du navire seulement.

Le Global Logistics Emissions Council (GLEC)⁹² a publié la troisième version de son rapport au sein du Smart Freight Centre pour comparer les intensités d'émission des différents modes de transport. Ils parviennent à aligner toutes les performances de chaque moyen de transport afin de lisser les différences et de les rendre comparable dans une seule unité : les grammes de dioxyde de carbone équivalents par EVP par km ou gCO₂e / EVP-KM. Le transport maritime apparaît dans ce rapport bien moins polluant que l'avion (plus de 100 fois moins polluant). Cet indicateur se

⁹¹ [Avancées pour la préservation de l'environnement marin en mer méditerranée | Ministère chargé de la Mer et de la Pêche](#)

⁹² [GLEC FRAMEWORK v3 UPDATED 02 04 24.pdf \(smart-freight-centre-media.s3.amazonaws.com\)](#)

concentrant sur les tonnes transportées par km pour analyser les émissions semble donc être un bon indicateur de la performance du navire.

Comme vu précédemment les impacts de la pollution atmosphérique sur la biodiversité, il faudrait que la navire émette le moins de CO₂ possible par tonne transportée. Nous comprenons qu'il ne s'agit pas d'avoir le moins grand navire mais plutôt que le navire soit le plus possible adapté à la demande afin que le rapport entre la taille du navire et le carburant consommé soit à l'optimum. Si le navire est petit, il consomme certes moins, mais avec une demande forte, il faudra mettre plus de navires sur la même ligne ce qui n'est pas optimal. La question du remplissage des navires par exemple dans le rapport entre tonnes transportées et CO₂ émis pourrait sans doute être optimisé en imposant des délais de livraison plus longs. Le calcul nécessitant un certain nombre de données, il sera explicité lorsque nous évoquerons les seuils dans la sous partie suivante (4.3.2).

4.3.1.1.9 Sensibilisation du personnel navigant

Il est possible de se dire que la sensibilisation du personnel relève plus de l'acte individuel et n'aurait pas de conséquence réelle sur la protection de la biodiversité, cependant pour certains problèmes complexes à analyser comme les collisions avec les cétacés, elle peut constituer une solution. En effet, un des accidents majeurs du transport maritime est lié aux collisions avec les cétacés en pleine mer, ce point sera explicité lorsque nous aborderons l'indicateur des collisions mais il est intéressant de le lier avec cet indicateur de sensibilisation. Le personnel navigant, s'il est formé, peut alerter le commandant du navire de la présence de cétacés lorsqu'il les voit entraînant ainsi une prise de décision de la part du commandant pour ralentir, contourner ou continuer sa route en prêtant attention et en surveillant. La sensibilisation des marins peut donc être essentielle dans un cas comme la collision. Cependant, pour l'entreprise, elle peut représenter un coût puisqu'il s'agit de formations que chaque personnel navigant devrait suivre. La limite de la sensibilisation du personnel survient la nuit puisque les observations sont rendues impossibles du fait de la non-visibility. Des moyens de détections seraient préférables mais impliqueraient un coût sans doute plus élevé.

4.3.1.2. Emissions

4.3.1.2.1 Gaz à effet de serre et polluants

Les indicateurs sur les gaz à effet de serre sont quantitatifs. Il s'agit de connaître la quantité de particules fines, de dioxyde de carbone, d'oxyde de soufre et d'oxyde d'azote émise sur un trajet du navire en moyenne et toutes choses égales par ailleurs. Nous avons déjà analysé en détail les conséquences du soufre et de l'azote sur la biodiversité marine. Il reste à expliciter les conséquences des PM (particulate matter) et expliciter celles du CO₂.

Les particules fines sont connues préalablement pour leur impact sur la santé. Selon la fondation pour la biodiversité, environ 3,45 millions de personnes seraient décédées à cause de la pollution par les particules fines en 2007 dans le monde⁹³. On a découvert que les particules fines ont aussi des conséquences sur les écosystèmes notamment lorsqu'elles se déposent sur le sol car elles provoquent des anomalies de croissance sur les plantes. Assez peu d'études ont été faites sur le lien

⁹³ <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2022/02/FRB-fiche-pollution.pdf>

entre particules fines et biodiversité marine. Aulinger, Matthias et al⁹⁴ ont étudié le cas des émissions de navires y compris les particules fines et leur dépôt atmosphérique sur les écosystèmes marins dans des régions pourtant éloignées des routes maritimes. Une hypothèse serait que, combinées aux autres GES, les particules fines pourraient accentuer le phénomène d'acidification.

Le CO₂ a de nombreux impacts sur les océans qui absorbe 90% de la chaleur générée par la hausse des émissions de GES selon les Nations Unies⁹⁵. Un des problèmes principaux pour la biodiversité marine suite à l'augmentation des températures sont les vagues de chaleur océaniques qui provoquent le blanchissement des coraux et la dégradation des récifs qui couvraient en 2021, 60% de la surface des océans. La hausse de la température n'atteint pas que les coraux mais toutes les espèces de la biodiversité marine. Selon l'ONU, nous pourrions voir disparaître jusqu'à la moitié des espèces marines d'ici 2100, en sachant en plus qu'étant donné nos connaissances sur les océans encore peu développées, nous n'avons pas encore une idée précise de l'ensemble des espèces marine. Une augmentation de 2°C provoquerait la disparition complète des récifs coralliens selon le GIEC. Une hausse importante du CO₂ aurait donc des conséquences irréparables et irréductibles sur le fonctionnement des écosystèmes marins. Les engagements de l'entreprise en termes de décarbonation sont donc essentiels dans le combat pour la protection de la biodiversité et cet indicateur nous permet de quantifier au même titre que l'empreinte carbone, la quantité de GES émise.

4.3.1.2.2 Indicateur d'intensité carbone (CII)

Le CII ou Indicateur d'intensité carbone mesure l'efficacité énergétique d'un navire en gramme de CO₂ émis par tonne par mille marin. Il s'agit d'un calcul d'intensité carbone au même titre que la performance des navires dont nous avons parlé précédemment mais elle est plus précise et centrée sur l'opérationnel. Elle nécessite un certain nombre de calculs et un certain nombre de données qui seront détaillées dans la partie du traitement des données.

L'OMI avait au préalable mis en place l'EEXI, indice de rendement énergétique des navires existants mais suite aux modifications apportées lors de la MARPOL (Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires) en 2022, un changement a prévu à partir de 2023 que les navires devaient être conformes à l'EEXI et au CII⁹⁶. Ces réglementations doivent amener les armateurs à réduire leur intensité carbone par navire. L'avantage de cet indicateur est qu'il mesure l'impact de l'armateur puisqu'il inclue la dimension opérationnelle. De plus étant donné qu'il s'agit d'une réglementation de l'OMI, cela signifie que quel que soit l'armateur, il doit calculer le CII ce qui rend comparables tous les navires de la flotte à travers cet indicateur quantitatif.

Le CII est le facteur de réduction par an qui vise à garantir une amélioration continue de l'intensité carbone opérationnelle du navire. Il faut passer par un certain nombre de calculs pour atteindre le CII final qui est exprimé en pourcentage et correspond à une note comprise en A et E (E étant la moins bonne note et donc non conforme à la réglementation). Le CII opérationnel annuel réel obtenu doit être vérifié par rapport au CII opérationnel annuel requis. Cela permet de déterminer

⁹⁴ Aulinger, A., Matthias, V., Zeretzke, M., Bieser, J., Quante, M., and Backes, A.: The impact of shipping emissions on air pollution in the greater North Sea region – Part 1: Current emissions and concentrations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 739–758, <https://doi.org/10.5194/acp-16-739-2016>, 2016.

⁹⁵ [Les effets du changement climatique sur les océans | Nations Unies](#)

⁹⁶ [EEXI et CII : intensité carbone des navires et système de notation \(imo.org\)](#)

la note relative à l'intensité carbone opérationnelle. Il faut au préalable calculer le CII que nous nommerons « CII atteint » :

$$CII\ atteint = \frac{CO2\ emitted\ TTW_y - 1}{Deadweight * Travelled\ distance_y - 1 * Fm * FI}$$

avec CO2 emitted TTW, les émissions de CO2 en tank-to-wake ; le deadweight représentant le port en lourd, la charge maximale qu'un navire peut porter ; travelled distance, la distance parcourue par le navire sur la période de temps donnée et enfin Fm et FI, des facteurs correctifs fixés. Une fois ce « CII atteint » calculé on doit ensuite calculer le CII Référence qui est un indicateur d'intensité carbone opérationnel :

$$CII\ Reference = a * Capacity^{-c}$$

avec a et c des valeurs fixées par l'OMI pour des groupes définis de navires en 2019 (Annexe 4) et mises en place lors de la résolution MEPC.337(76)⁹⁷. Une fois qu'on obtient le CII Référence on peut donc calculer le CII requis :

$$CII\ requis = \left(1 - \frac{Z}{100}\right) * CII\ Reference$$

avec Z le facteur de réduction dépendant de l'année durant laquelle le calcul est fait, en 2024 c'était 7 et on passera à plus de 11 à partir de 2027. Une fois qu'on a le CII requis et le CII atteint on peut calculer le pourcentage de CII :

$$CII\% = \frac{CII\ atteint}{CII\ requis}$$

On obtient un pourcentage qui permet de classer le navire selon son efficacité :

CII%	Vessel Rank
Less than or equal to 83%	A
Between 83% and 94%	B
Between 94% and 107%	C
Between 107% and 119%	D
Higher than 119%	E

Si le navire obtient une note entre A et C, il est conforme à la réglementation. Si le navire est trois années de suite D, ou qu'il est un an E, il doit modifier son mode d'opération car il n'est pas conforme. A ce moment-là, il doit proposer un plan d'action qui doit être validé par l'OMI afin de changer sa note au CII dans les années qui viennent et être plus efficace. L'armateur peut améliorer l'efficacité opérationnelle de son navire en optimisant les routes empruntées, en prenant en compte les conditions météorologiques de la traversée, en maximisant la solution du « juste à temps » pour éviter les retards mais aussi l'attente dans les ports et en optimisant les eaux de ballast (équilibrent le navire). L'OMI préconise aussi comme solutions, le nettoyage de la coque ou l'installation

⁹⁷ [MEPC 337 76 \(imo.org\)](https://www.imo.org)

d'énergies renouvelables pour les quartiers d'habitation. Bien évidemment, les navires peuvent aussi fonctionner avec des carburants alternatifs, ce qui permet de réduire les émissions de GES.

4.3.1.3. Technologies à impact sur la biodiversité

4.3.1.3.1 Adaptation Shore Power - Navire

Quand un navire entre dans un port et fait une escale, il faut qu'il garde les moteurs auxiliaires en marche afin de faire fonctionner les conteneurs réfrigérés et autres parties nécessitant d'être en service (éclairage, pompes, fonctions de communication etc.). Une solution pour éviter de garder les équipements fonctionnels alors que le navire est à quai est le shore power (alimentation à quai). Aussi connu sous le nom de cold ironing (repassage à froid), il s'agit d'une technique permettant de brancher le navire à quai pour le relier à l'électricité et éteindre les moteurs auxiliaires. Durant toute sa durée à quai, le navire peut ainsi ne pas consommer de carburant et donc ne pas rejeter de GES ce qui est préférable pour la biodiversité. Le fait d'éteindre les moteurs permet aussi de limiter dans une certaine mesure les nuisances sonores et les vibrations dans les ports. Afin de réduire les émissions de GES, il faut tout de même prendre en compte l'origine de l'électricité produite. Si l'énergie utilisée est renouvelable et bas carbone alors les émissions sont réduites en s'alimentant à quai. En Californie, de nombreux ports se sont équipés des infrastructures nécessaires au fonctionnement du shore power mais ce n'est pas le cas partout dans le monde. L'objectif en Europe est que chaque port dispose de ces infrastructures d'ici 2025, ces mesures étant motivées en partie par les risques de pollutions importants dans les villes portuaires pour la santé humaine.

Pour pouvoir se brancher à quai, il faut que le navire soit adapté de son côté. Or la pose d'une prise de repassage à froid sur le navire représente un investissement très important (chiffre confidentiel). Equiper ses navires du repassage à froid est donc une décision avec un fort impact économique. L'étude de Zis⁹⁸ sur les prospections du shore power montre qu'avec des scénarii de prix de carburant moyen et élevé, les armateurs ont une incitation économique à utiliser le repassage à froid. Ils insistent sur l'importance de la réglementation pour motiver les acteurs à investir dans cette technologie de réduction d'émission et donc indirectement permettant de réduire l'impact sur la biodiversité du changement climatique.

4.3.1.3.2 Présence d'un scrubber

Nous avons déjà évoqué le cas des scrubbers (épurateur) en amorce de ce sujet pour expliquer les divergences qu'il peut y avoir lorsqu'on souhaite allier décarbonation et protection de la biodiversité. Très rapidement, je rappelle leur définition afin d'aller plus dans le détail de la technologie. Le scrubber est un filtre que l'on installe sur les cheminées du navire afin d'éviter les émissions de soufre. Les fumées sont ensuite lavées et rejetées dans l'eau le plus souvent. Le scrubber étant au départ peu développé dans l'ensemble de la flotte mondiale, ce problème ne se posait pas, cependant en 2022, le nombre de navires équipés de scrubbers était de 4 000⁹⁹ dans le monde d'où une menace considérable pour l'acidification¹⁰⁰ des écosystèmes marins. On peut

⁹⁸ Zis, T. P. (s. d.). Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A Policy And Practice*, 119, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.003>

⁹⁹ [Scrubbers : entrée en application de l'interdiction de rejets dès le 1er janvier 2022 | Ministère chargé de la Mer et de la Pêche](#)

¹⁰⁰ Dulière V., Baetens K. and Lacroix G. (2020). Potential impact of wash water effluents from scrubbers on water acidification in the southern North Sea. Final project report. Royal Belgian Institute of Natural Sciences. Operational Directorate Natural Environment, Ecosystem Modelling. 31 pp.

penser qu'en pleine mer l'impact de l'acidification, du fait de la dilution est plus faible qu'à proximité des côtes ou des zones sensibles avec de la flore.

Il existe différents types de scrubbers et certains impactent plus la biodiversité que d'autres. Les trois principaux types de scrubbers sont les scrubbers humides, les scrubbers secs et les scrubbers hybrides. Nous nous concentrons sur les scrubbers humides. Le scrubber humide utilise de l'eau pour dissoudre et neutraliser le dioxyde de soufre, c'est le scrubber utilisé en grande partie dans le transport maritime. Il existe trois sous-types de systèmes pour les scrubbers humides. Il y a le système à boucle ouverte qui est le plus désastreux pour la biodiversité puisqu'on rejette directement à l'océan les eaux polluées. Ensuite, il y a le système en boucle fermée qui utilise de l'eau qui est recyclée et non rejetée dans l'océan directement ou seulement après traitement, ce qui permet de limiter l'impact sur la biodiversité. L'eau doit être gardée à bord et est plus ou moins traitée à l'arrivée selon la législation en vigueur, concernant le traitement des déchets et des eaux usées, dans les pays dans lesquels le navire accoste. Enfin, il y a les systèmes à boucle hybride qui combinent les deux et peuvent représenter une solution alternative à une boucle totalement ouverte pour privilégier certaines zones géographiques fragiles ou respecter les réglementations locales.

En termes de coûts, ajouter un scrubber signifie tout d'abord au même titre que le shore power réduire la capacité de chargement pour laisser la place à la technologie¹⁰¹. En elle-même la pose d'un scrubber représente un grand investissement, de l'ordre de plusieurs millions par navire mais le retour sur investissement est aussi important car il permet de continuer à acheter du carburant HFO, le moins cher des carburants pour le transport maritime plutôt que du VLSFO ou MGO ou carburants alternatifs qui représentent un coût certain. Une fois le HFO combiné avec le scrubber, il devient moins polluant que du diesel. Le scrubber représente un investissement pour la pose mais aussi pour l'exploitation, sachant qu'un scrubber boucle ouverte est moins coûteux étant donné que l'on rejette les eaux polluées dans l'océan.

4.3.1.3.3 Choix de la peinture antifouling

Afin de conserver le navire en bon état, l'antifouling est important pour éviter que des organismes comme des algues, des mollusques ou des coquillages ne prolifèrent sur la coque. Ces organismes s'incrument dans la coque et l'abîme, ils peuvent aussi multiplier les frottements de la coque avec l'eau et de ce fait contribuer à la baisse de l'efficacité du navire. Pour ne plus avoir d'organismes sur la coque, on utilise donc ce qu'on appelle l'antifouling. Il en existe différents types et il est possible d'utiliser des antifouling différents pour chaque partie de la coque du navire. Afin de comprendre les différents types de peinture antifouling, j'ai mené un entretien auprès d'une experte des peintures antifouling, Elodie Letray.

Il existe deux principaux types de peinture : les SPC (Self-Polishing Copolymer) et les FRC (Fouling Release Coatings). Les SPC vont généralement relâcher des biocides afin d'éviter l'adhésion de bio-salissures, certains SPC sont composés de biocides et de cuivre. Ces biocides vont être relâchés plus ou moins rapidement selon la vitesse moyenne du navire pendant les traversées. Les FRC quant à eux sont des antiadhérents composés de silicone. Ils ne relâchent rien, la surface en elle-même devient antiadhérente. Depuis 1998, l'UE a tout de même interdit l'utilisation des

¹⁰¹ Panasiuk, I., & Turkina, L. (2015). The evaluation of investments efficiency of SO scrubber installation. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 40, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.004>

TBT (tributylétain), qui était employé dans les peintures antifouling compte tenu de son caractère toxique pour l'environnement.

Du point de vue de la biodiversité, il vaut mieux privilégier les FRC aux SPC puisque les FRC ne rejettent pas d'élément chimique dans l'eau. Un autre problème lié aux peintures antifouling concerne l'hélice puisque pour le reste de la coque on peut attendre plusieurs années (5 ans) avant de refaire la peinture mais pour l'hélice c'est tous les 8 mois ce qui implique qu'on fasse le nettoyage dans l'eau ce qui peut poser des problèmes d'espèces invasives. A garder en tête que l'indicateur de la peinture antifouling est un indicateur essentiel même s'il n'existe peu ou pas d'alternative à la peinture car le fouling augmente considérablement la consommation de carburant en augmentant les frottements de la coque avec l'eau.

Du point de vue du coût pour l'entreprise, il faut prendre en compte un certain nombre de critères avant de faire le choix des peintures par exemple la taille du navire, la température de l'eau où le navire va être ou encore sa vitesse moyenne. Une fois ces éléments à disposition, les fournisseurs de peinture antifouling proposent une épaisseur de peinture pour 5 ans qui représente la période entre deux cales sèches¹⁰². Les FRC sont plus fragiles et coûtent plus cher que les SPC bien qu'ils soient plus adaptés pour la biodiversité. Une solution que le navire peut implémenter pour concilier économie et protection de la biodiversité peut être de choisir un antifouling moins cher pour le dessous de la coque du navire et appliquer sur les parties verticales un antifouling en silicone. Les parties verticales sont exposées à la lumière contrairement au bas du navire ce qui multiplie les organismes pouvant effectuer la photosynthèse.

Une autre solution peut aussi être de réduire la vitesse toutes choses égales par ailleurs. Il faut prendre en compte trois critères : la vitesse, la température et le pourcentage d'activité. Si la vitesse est réduite à température inchangée et même pourcentage d'activité, il est possible de limiter les coûts et de moins utiliser de peinture antifouling. Si en plus on baisse la température¹⁰³ et le pourcentage d'activité, on baisse encore les coûts.

4.3.1.3.4 Traitement des eaux de ballast

Le traitement des eaux de ballast est un indicateur très important puisqu'il concerne un enjeu bien connu : le transfert d'espèces invasives dont le transport maritime en particulier et le transport en général sont en grande partie responsables. Cet indicateur est si important qu'il avait été envisagé d'en extraire deux indicateurs sur le traitement des eaux de ballast et un autre sur les réglementations autour des eaux de ballast. Cependant ce dernier indicateur a été classifié comme non pertinent au cours des recherches puisque les réglementations qui entourent ce sujet sont devenues obligatoires donc les navires ne pouvaient pas être classés comme nous l'avons fait pour les émissions de soufre. Le seul moyen de classer les navires pour le traitement des eaux de ballastes est la technologie utilisée.

Pour rappel, les eaux de ballast constituent le réservoir d'eau permettant de l'équilibrer. Lorsque l'on vide ces eaux dans un autre port que celui dans lequel on a tiré l'eau, il a des risques de transférer dans un écosystème différent, des espèces non endémiques qui peuvent proliférer et

¹⁰² La cale sèche ou dry dock est un bassin dans un port dans lequel le navire est entretenu ou restauré hors de l'eau

¹⁰³ Une température haute nuit au maintien de la peinture antifouling

prendre la place des espèces présentes. Carlton¹⁰⁴ en 2010 a analysé l'origine du transfert d'espèces invasives dans les ports. Il explique que l'ouverture des canaux de Panama et de Suez a largement contribué à l'augmentation du transfert d'espèces invasives puisque des mers et océans avec des écosystèmes totalement différents se sont retrouvés connectés alors qu'ils n'avaient presque pas de lien par le passé. Bella Galil a particulièrement travaillé sur le cas de la Méditerranée et les espèces invasives qui pouvaient s'y trouver notamment depuis l'ouverture du canal de Suez¹⁰⁵.

Une des solutions possibles pour le traitement des eaux de ballast est le traitement par ultraviolet. Il ne nécessite pas d'ajout d'éléments chimiques comme l'autre solution qui utilise la méthode de l'électrochloration donc il est intéressant pour la protection de la biodiversité. D'autres solutions existent avec des biocides pour le traitement de l'eau. Il faut émettre une nuance sur le traitement, quel que soit le moyen utilisé, nous ne traitons en réalité que ce que nous connaissons donc il se pourrait que des espèces invasives soient transmises malgré les traitements parce que nous n'en avons pas encore connaissance dans l'état actuel de nos recherches. De plus, l'installation complète des UV est assez énergivore puisque le système de traitement impose l'utilisation permanente de pompes (et non plus seulement de l'usage de la gravité pour vider les eaux de ballast). D'un point de vue économique, il n'y a pas de réelle retombée pour l'entreprise car la réglementation impose un traitement des eaux de ballast donc quoi qu'il arrive, l'entreprise doit mettre en place des moyens pour traiter ces eaux.

4.3.1.4. Trajet du navire

4.3.1.4.1 Vitesse moyenne

Cet indicateur est un indicateur primordial à prendre en compte parce que l'entreprise peut agir presque intégralement puisqu'elle prend la décision de choisir sa vitesse. Si la vitesse est plus faible de nombreux impacts sur la biodiversité comme les collisions, le bruit sous-marin ou la consommation de carburant et donc les émissions de GES en sont diminués. Les navires sont conçus pour fonctionner à une certaine vitesse qui est la vitesse pour laquelle le moteur est le plus efficace. Il ne suffit pas de baisser toutes les vitesses des navires à 10 nœuds car ils peuvent faire plus de bruit si jamais le moteur n'est pas conçu de manière optimale pour cette vitesse. De ce fait, il faut regarder les vitesses auxquelles le navire est optimal. Cet indicateur se concentre donc sur la vitesse optimale du navire par rapport à sa consommation de carburant mais aussi ses impacts.

Les impacts sur la biodiversité d'une vitesse élevée sont nombreux. Plus la vitesse est élevée, plus le risque de graves blessures des cétacés lors des collisions est fort. De même plus la vitesse est élevée, plus la signature acoustique du navire augmente. Ces deux impacts seront détaillés dans les deux sous-parties suivantes qui seront exclusivement focalisées dessus. Si j'ai choisi de conserver l'indicateur de la vitesse en plus des indicateurs de collision ou de bruit sous-marin c'est parce que cet indicateur-là se concentre aussi sur le point de vue économique pour l'entreprise. Plus le navire livre vite, plus il est compétitif et donc plus il permet à l'entreprise de faire du profit. Pour être compétitif le navire augmente sa vitesse afin de faire plus de rotations à l'année et de transporter

¹⁰⁴ Carlton, J. (2010). The Impact of Maritime Commerce on Marine Biodiversity, *The brown journal of world affairs*, Volume xvi, issue ii, 131-139

¹⁰⁵Bella Galil. "Taking Stock: Inventory of Alien Species in the Mediterranean Sea." *Biological Invasions* 11 (2008): 359-372; Gil Rilov and Bella Galil. "Marine Bioinvasions in the Mediterranean Sea—History, Distribution, and Ecology," *Biological Invasions in Marine Ecosystems* (Berlin: Springer-Verlag, 2009): 549-575.

plus de marchandise dans des temps records. La consommation de carburant pourrait être un critère ayant un impact sur la volonté ou non d'appliquer des mesures de réduction de vitesse du navire.

4.3.1.4.2 Signature acoustique

La problématique que constitue le bruit sous-marin est un des enjeux de biodiversité les plus reconnus par le secteur du transport maritime et est un point que l'OMI prend très au sérieux. Bien que le bruit sous-marin ne provienne pas seulement des porte-conteneurs qui ne sont pas les plus bruyants, ils sont à considérer dans l'équation car s'ajoutent au bruit ambiant provoqué par l'ensemble des navires (croisière, tourisme, vraquiers, pétroliers, bâtiments militaires etc). Le bruit sous-marin a en effet des conséquences prouvées sur les cétacés bien que les recherches soient encore en cours pour déterminer les niveaux de hertz et décibels qui provoquent une gêne, un changement de comportement, une fuite des proies ou encore une surdité temporaire ou définitive. Certaines recherches trouvent aussi un impact du bruit sous-marin sur les plantes et notamment sur la posidonie en Méditerranée¹⁰⁶.

Le bruit sous-marin se caractérise, d'une part, par le niveau sonore exprimé en décibels et qui représente l'intensité perçue d'un son. D'autre part, il est caractérisé par la fréquence en hertz qui correspond au nombre d'ondes acoustiques par secondes en un point donné, c'est la hauteur du son, plus elle est élevée plus le son est aigu. Ensuite il faut aussi prendre en compte si le bruit est persistant dans le temps ou s'il est soudain. Si le niveau est constant et stable en fréquence avec une intensité faible à moyenne, le bruit marin est nommé « ambiant ». Il peut se propager dans toutes les directions. Si le son est provoqué avec de fortes intensités mais est relativement bref il est appelé « bruit impulsif ». Le cas du transport maritime se situe plutôt dans le champ « bruit ambiant »¹⁰⁷.

Concrètement la provenance du bruit sous-marin chez les navires est la conséquence de deux causes : la cavitation des hélices et les moteurs. La cavitation est un phénomène qui se produit lorsqu'une bulle de gaz naît dans un liquide soumis à une dépression. Ces bulles se forment avec le fonctionnement de l'hélice dans l'eau. Le liquide s'écoule à très forte vitesse et un sillage de bulles se forme. On parle de cavitation hydrodynamique. Le bruit est dû aux fluctuations des bulles qui, au vu de la vitesse des navires et de la taille de l'hélice, sont forts. Le moteur, quant à lui, émet des vibrations mais le principal problème du bruit sous-marin provient de la cavitation. Sachant que dans l'eau, le son se transmet 4,5 fois plus vite que dans l'air, ces bruits se propagent vite dans toutes les directions et peuvent heurter sur une longue distance¹⁰⁸.

Il faut cependant prendre en compte le fait que la signature acoustique de chaque navire est différente selon son type, son moteur, sa taille mais aussi la manière dont il est manœuvré et en partie sa vitesse. Le problème du bruit sous-marin est amplifié avec l'augmentation du trafic maritime. Par exemple, dans l'océan Pacifique, on estime que l'intensité a doublé depuis les soixante dernières années selon l'étude du Port de Vancouver évoquée précédemment. Notamment le bruit sous-marin est responsable de l'augmentation du bruit ambiant à basses fréquences (10-100 Hz) dans beaucoup de régions du monde avec une augmentation de 3 dB tous les 10 ans selon un

¹⁰⁶ Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M. *et al.* Seagrass *Posidonia* is impaired by human-generated noise. *Commun Biol* 4, 743 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02165-3>

¹⁰⁷ https://www.armateursdefrance.org/sites/default/files/decryptages/decryptage_bruits_sous-marins_0.pdf

¹⁰⁸ [Underwater Noise Infographic v14 20160527-WEB \(portvancouver.com\)](https://www.armateursdefrance.org/sites/default/files/decryptages/decryptage_bruits_sous-marins_0.pdf)

certain nombre d'études (Andrew et al., 2002, 2011; Chapman and Price, 2011; Miksis-Olds et al., 2013; Miksis-Olds and Nichols, 2016).

Nous allons tout d'abord analyser l'impact du bruit sous-marin sur les cétacés. En fonction de son intensité et de sa hauteur, le bruit sous-marin a un impact plus ou moins handicapant. Tout dépend aussi de l'espèce concernée. Il existe cinq différents types d'impacts graduels¹⁰⁹. Tout d'abord, le cétacé peut se trouver dans la zone d'audibilité ce qui provoque une gêne. Cette gêne peut être analysée à travers une accélération du rythme cardiaque due à un stress provoqué par le bruit. Ensuite il y a la zone de masquage acoustique dans laquelle les individus ont du mal à communiquer et peuvent avoir des difficultés à se localiser entre eux et à localiser des proies. Ce niveau de bruit est un problème notamment pour la reproduction des grands cétacés qui se repèrent grâce à leur chant. Le niveau au-dessus concerne la modification du comportement des cétacés qui vont fuir ou changer leur trajet migratoire. Enfin, le dernier niveau de bruit sous-marin lorsque le cétacé est très proche de la zone d'émission du bruit peut provoquer une perte temporaire ou définitive de l'audition du cétacé voire provoquer des lésions entraînant la mort.

Afin de détailler au mieux ces impacts, nous voyons selon une étude faite par le Bureau Véritas que plus le navire a une vitesse élevée, plus il se rapproche de la limite, en termes de bruit sous-marin des bateaux « controlled », fixée par le bureau Véritas, société de classification choisie pour la méthodologie (Annexe 5). En effet, différentes sociétés de classifications donnent des limites en termes de bruit sous-marin et elles ne sont pas unifiées donc chaque entreprise doit en choisir une. Le seuil « controlled » chez le Bureau Véritas signifie que le navire fait attention au bruit qu'il émet. Ainsi un navire émettant du bruit sous-marin à la vitesse de 9 nœuds semble avoir un impact moindre comparé à un navire opérant à la vitesse de 15 nœuds.

Les niveaux exactes de bruit sous-marin à ne pas dépasser pour protéger les cétacés sont difficiles à trouver et encore plus lorsqu'il s'agit des niveaux de gêne. Dans leur article, Christine Erbe et al¹¹⁰ analysent les effets du bruit sous-marin et tentent de définir des seuils précis de dB à ne pas dépasser. Ils trouvent qu'aucun changement de comportement n'a été observé à des niveaux de 90 dB à 124 dB provenant d'un navire de pêche récréative. Castellote et al¹¹¹ analysent notamment l'impact du bruit sous-marin sur le comportement des rorquals en mer Méditerranée et dans l'océan Atlantique Nord-Est. Ils trouvent que les rorquals adaptent la durée de leur chant lorsqu'il y a un niveau de bruit élevé (déroit de Gibraltar etc). Les rorquals communs mâles modifient leur chant dans des conditions de bruit de fond important. Les auteurs émettent ainsi l'hypothèse que les changements acoustiques survenus arrivent puisque les rorquals doivent s'adapter pour la survie de leur population. Les grands cétacés ne sont pas les seuls à être importunés, d'autres études (Gannier et al, 2022¹¹²) commencent à montrer l'impact du bruit sous-marins sur les dauphins notamment en mer Méditerranée.

¹⁰⁹ Infographie de l'IFAW : [bruit-sous-marin-infographie-IFAW.pdf](#)

¹¹⁰ Erbe C, Marley SA, Schoeman RP, Smith JN, Trigg LE and Embling CB (2019) The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review. *Front. Mar. Sci.* 6:606. doi: 10.3389/fmars.2019.00606

¹¹¹ Castellote, M., Clark, C. W., & Lammers, M. O. (2012a). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.021>

¹¹² Gannier, A. J., Boyer, G., & Gannier, A. C. (2022). Recreational boating as a potential stressor of coastal striped dolphins in the northwestern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114222>

Marta Solé et al (2021)¹¹³ ont montré que le bruit sous-marin avait un impact sur les plantes et en particulier sur les posidonies (*Posidonia oceanica*) de Méditerranée. La posidonie est une prairie sous-marine dans les eaux côtières poussant entre 0 m et 40 m de profondeur. Elle est très importante dans la lutte contre le changement climatique puisqu'elle stocke du dioxyde de carbone dans le sol et permet ainsi de contribuer à la décarbonation. Malheureusement elle subit de nombreux impacts anthropiques notamment l'ancrage qui arrache les plants de posidonies, l'augmentation de la température et aussi le bruit sous-marin. Grâce à des essais en laboratoire, Marta Solé a tenté d'analyser l'impact de différentes fréquences sonores sur les posidonies allant de 50 à 400 Hz. Elle remarque que les tissus de la plante sont affectés après une exposition au bruit en comparant avec des plantes non exposées au bruit. Le bruit sous-marin impacte aussi la capacité de la plante à se nourrir puisqu'elle parvient moins à collecter les nutriments dans le sol. De ce fait, bien que peu d'études analysent pour le moment l'impact du bruit sous-marin sur la flore, cela ne signifie pas pour autant, par principe de précaution, que la problématique du bruit sous-marin n'affecte que les cétacés.

L'OMI a soulevé pour la première fois la problématique du bruit sous-marin en 2004. Etant donné que les navires traversent les frontières internationales, il a semblé important que l'OMI se charge de communiquer à ce propos¹¹⁴. Dès 2014, l'OMI a publié des directives pour prendre en compte cette problématique. Le Comité de la protection du milieu marin de l'OMI (MEPC 80) a approuvé en 2023, des directives pour limiter le bruit sous-marin produit par les navires de commerce. Bien que l'OMI publie des lignes directrices¹¹⁵, il n'existe cependant actuellement aucune réglementation internationale contraignante à ce sujet. Elles ont pour but de « fournir des recommandations générales à l'intention des concepteurs, constructeurs et propriétaires de navires au sujet de la réduction du bruit sous-marin ». L'OMI a mis en place par exemple les ZMPV soit les zones maritimes particulièrement vulnérables afin que les armateurs en aient connaissance. L'UE a aussi alerté sur cette problématique mais aucune réglementation n'a été mise en place pour le moment. En France, le Ministère de la Transition Ecologique a publié en 2020 un guide méthodologique pour réduire l'impact des émissions acoustiques.

Les lignes directrices citent plusieurs moyens pour les armateurs de réduire leur signature acoustique. Tout d'abord, il est conseillé de réduire la vitesse car une réduction de la vitesse entraîne une réduction du phénomène de cavitation et dans une certaine mesure une réduction de la propagation des ondes de vibration provenant du moteur (si le navire reste bien dans les vitesses qui correspondent au moteur). Un autre élément à prendre en compte concerne d'un point de vue technique, les innovations permettant d'améliorer le moteur du navire lorsqu'il est modernisé (retrofit). Une autre technique consiste à optimiser la forme de l'hélice pour minimiser la cavitation mais aussi la nettoyer régulièrement (maintenance) ce qui nous renvoie à la peinture antifouling déjà abordée avec le cas particulier de la peinture de l'hélice changée plus régulièrement. Enfin un autre moyen d'éviter de déranger les cétacés est de changer de route pour rester le plus loin possible des zones sensibles avec les baleines.

¹¹³ Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M. *et al.* Seagrass *Posidonia* is impaired by human-generated noise. *Commun Biol* 4, 743 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02165-3>

¹¹⁴ [Le bruit produit par les navires \(imo.org\)](https://www.imo.org)

¹¹⁵ Ligne directive de l'OMI : [AC21_Inf_3.2.1_IMO_NoiseGuidelines.pdf \(ascobans.org\)](https://www.imo.org)

En ce qui concerne les coûts pour l'entreprise, le fait tout d'abord d'obtenir et analyser la signature acoustique constitue un investissement. En effet, il faut que le navire déploie des moyens afin d'obtenir sa signature acoustique puisqu'il faut investir dans des bouées acoustiques qui enregistrent les signatures des navires. Ensuite, la difficulté dans l'analyse est de faire ressortir la signature de chaque navire puisqu'il suffit que d'autres navires passent en même temps pour que la signature soit brouillée. Il est ainsi complexe et long d'obtenir le bruit sous-marin que chaque navire peut émettre. D'autre part, il n'est pas nécessaire de connaître sa signature pour la réduire puisqu'avec la vitesse, on peut être capable de savoir si le bruit sous-marin émis est trop important ou non bien que ce ne soit pas une mesure précise. Dans ce cas, il est intéressant de chercher à comprendre ce que coûterait la baisse de la vitesse d'un navire.

Cet indicateur est donc primordial à analyser dans le cadre de la protection de la biodiversité car le bruit sous-marin est reconnu comme ayant un impact sur une grande partie de la faune et de la flore marine. Bien qu'il soit difficile de l'analyser du fait du manque de données et qu'il demande un certain investissement de la part de l'entreprise, le prendre en compte fait une grande différence pour la biodiversité.

4.3.1.4.3 Collision

L'indicateur de la collision est un indicateur impacté au même titre que le bruit sous-marin par la vitesse des navires. Cet indicateur ne concerne que les cétacés. Il arrive que les baleines entrent en collision avec les navires et soient blessées voire tuées lors de l'impact. Par exemple dans le sanctuaire du Pélagos, entre 8 et 40 individus sont touchés par an selon la WWF¹¹⁶, principalement les espèces présentes : le Rorqual commun et le Cachalot. On estime que les collisions sont la première cause de mortalité non naturelle pour les grands cétacés, représentant 16 à 20% selon le site internet de REPCET (repérage en temps réel des cétacés). Dans le Pélagos, la mortalité par collision est 3,25 fois plus forte que dans le reste du bassin méditerranéen. Il y a des risques que cette situation s'aggrave avec l'augmentation du transport maritime. Selon une étude menée par Quiet Oceans et financée par la WWF France en 2016, dans le Pélagos, tous types de navires confondus, les calculs de probabilité aboutissent à 3168 collisions potentielles par an pour le Rorqual commun et 297 pour les Cachalots¹¹⁷.

La vitesse a un impact considérable sur les collisions. En effet, l'IFAW et la WWF s'accordent pour dire qu'entre 10 nœuds et 13 nœuds (18 à 24 km/h) les risques de mort sont plus faibles en cas de collision car les animaux peuvent avoir le temps d'éviter les navires ou être blessés superficiellement. Cependant à 18 nœuds (33 km/h), il y a 90% de risques que la baleine décède suite à la collision. Les études sur ce point sont assez d'accord, Vanderlaan, A.S. and Taggart l'ont montré dans leur graphique en 2007¹¹⁸ (Annexe 6). Ils ont réalisé une étude permettant de savoir en fonction de la vitesse, le taux de risques de mort pour les cétacés en cas de collision avec un navire.

¹¹⁶ Rapport WWF : [16_rapport_trafic_maritime_et_risques_de_collisions_avec_les_grands_cetaces_sanctuaire_pelagos.pdf](http://www.wwf.fr/16_rapport_trafic_maritime_et_risques_de_collisions_avec_les_grands_cetaces_sanctuaire_pelagos.pdf) (wwf.fr)

¹¹⁷ Folegot T., Gallou R., David L. & Di-Méglio N., 2015, Analyse des Impacts Economiques de scénarios de réglementation du trafic dans le Sanctuaire Pelagos, rapport d'étude Quiet-Oceans, QO.20150612.01.RAP.001.02A, Brest, décembre 2015.

¹¹⁸ Vanderlaan, A. S. M., & Taggart, C. T. (2006). VESSEL COLLISIONS WITH WHALES : THE PROBABILITY OF LETHAL INJURY BASED ON VESSEL SPEED. *Marine Mammal Science*, 23(1), 144-156. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2006.00098.x>

Pour ce faire, ils se sont appuyés sur de nombreux recensements historiques de collisions afin de construire un modèle plus proche de la réalité.

Une des solutions que l'entreprise peut mettre en place est donc de réduire sa vitesse mais nous avons vu l'estimation des coûts avec le bruit sous-marin dans la sous-partie précédente. Cependant d'autres solutions existent : prêter attention lorsqu'on est dans une zone sensible ou contourner la zone sensible. Pour le moment, il n'existe pas de système embarqué permettant de détecter les cétacés à bord d'un navire de commerce. On peut seulement s'appuyer sur la formation et la sensibilisation du commandant de bord et du personnel navigant afin qu'ils observent la présence de cétacés. Dans le Pélagos, il existe tout de même une technologie abordée plus haut, REPCET permettant de réduire les risques. Ce système mutualise les observations des cétacés afin de prévenir les navires de l'arrivée éventuelle d'un cétacé pour mettre en place des mesures afin de l'éviter. Comme aucune réglementation n'oblige l'utilisation de cet outil, seules les entreprises voulant agir pour la protection de la biodiversité l'utilisent aujourd'hui.

4.3.1.4.4 Rejets huileux

L'indicateur des rejets huileux est un indicateur relevant plus du détail puisqu'il est à relativiser aujourd'hui avec les technologies disponibles et les réglementations. Cependant, étant donné qu'il contribue tout de même à la pollution de l'eau, il a semblé plus prudent de le considérer sachant que les navires peuvent tenter d'aller plus loin que les réglementations. Concrètement les rejets huileux peuvent apparaître lorsque les navires rejettent à la mer les eaux grises (vaisselle, douche etc) et les eaux de cale (eaux de pluies qui ruissellent). La réglementation de la MARPOL (Annexe IV de MARPOL Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires, 2003) prévoit que cette eau ne soit pas directement rejetée à la mer mais qu'elle passe par un séparateur d'eau et d'huile à 15 ppm¹¹⁹. L'huile ainsi récupérée est gardée dans les sludges (dépôt gras du moteur) et traitée en arrivant à destination. A noter que l'annexe IV de MARPOL n'est pas directement centrée sur les rejets huileux mais est plus générale sur les sujets relatifs au rejet des eaux usées des navires dans la mer.

Pour les grands navires comme les porte-conteneurs, il est obligatoire de traiter ses eaux avant de les rejeter. Le retour d'expérience sur ce filtre montre qu'il fonctionne bien dans l'ensemble bien qu'il s'encrasse régulièrement. Des tests ont été faits pour aller au-delà de la réglementation en voulant traiter jusqu'à 5 ppm mais d'un point de vue technique le séparateur s'encrassait trop souvent et devenait trop complexe à gérer. Il n'y a pas d'avantage économique dans cet indicateur puisqu'il s'agit de la réglementation et que 15 ppm d'huile rejetée ne semble pas représenter un danger pour la biodiversité. Outre les eaux usées à bord, des navires peuvent mettre en place des systèmes de récupération rapide d'hydrocarbures pour qu'en cas d'échouement ou de collision de navire, cette technique pompe rapidement les fuites en soutes.

4.3.1.4.5 Perte de conteneur

L'indicateur de la perte de conteneur peut faire partie des KPI (Key Performance Indicator) des armateurs et il a semblé pertinent de prendre en compte ce critère bien que ce phénomène ne soit pas quotidien. Le fait que cet indicateur fasse partie des KPI permet d'aller dans le même sens que la stratégie RSE des armateurs qui peuvent fixer des objectifs en nombre maximal de conteneurs

¹¹⁹ [Prévention de la pollution par les eaux usées des navires \(imo.org\)](http://imo.org)

perdus en mer par an. L'OMI met en place depuis quelques années des directives à ce sujet mais pas encore des réglementations. Le World Shipping Council estimait qu'en 2022, 661 conteneurs ont été perdus en mer sur 250 millions transportés¹²⁰ (OMI, 2023). Les chiffres que l'on trouve dans la presse sont beaucoup plus élevés de l'ordre des 1000 à 10 000 conteneurs par an.

Les risques pour la biodiversité que peut constituer la perte de conteneur en mer concernent, avant tout, l'ajout de plastique (emballages, granulés, jouets etc.) qui peuvent se disperser et se retrouver sur les côtes ou contribuer au « continent de plastique ». L'impact peut être aggravé lorsque les conteneurs contiennent des produits chimiques voire toxiques voire des batteries qui dégradent les écosystèmes marins et la chaîne alimentaire lorsque les poissons s'en nourrissent. Des conteneurs même vides peuvent avoir un impact car en coulant ils atteignent et détruisent les fonds marins. Antidia Citores, porte-parole de l'ONG Surfrider Foundation Europe a déclaré en 2024 : « Un conteneur qui se perd en mer, c'est un mini désastre écologique à chaque fois, et l'addition de ces mini désastres finit par faire des dégâts considérables sur l'environnement marin. »

Les pertes de conteneur peuvent survenir suite à des conditions de navigation difficiles ou des incidents. Des organisations et associations d'armateurs comme Armateurs de France tentent de favoriser les échanges autour de ce sujet afin de réduire collectivement les risques de pertes de conteneurs en mer. Au niveau européen, le Parlement avait adopté en 2009, le paquet « Erika III » suite à des marées noires survenues et qui comprenait différentes directives comme le fait de connaître le poids exact de chaque conteneur afin d'équilibrer au mieux le navire et que les conteneurs soient certifiés VGM (Verified Gross Mass). Avec la Convention SOLAS (Convention internationale sur la sauvegarde de la vie en mer) cette mesure est devenue obligatoire (2016)¹²¹. Pour l'armateur, le risque lié aux pertes de conteneurs peut être d'ordre réputationnel puisque la presse en parle mais aussi commercial puisque la marchandise n'est pas livrée. Sachant qu'il n'y a toujours pas de réglementation sur ce sujet, ce sont les seuls risques que l'armateur peut encourir.

Pour éviter de perdre des conteneurs, l'armateur peut mettre en place quelques solutions comme implémenter une veille météorologique, engager une ou plusieurs personnes pour constituer un centre de navigation de la flotte ou améliorer les systèmes de sécurité à bord des conteneurs. Une autre solution plus difficile à mettre en place pour le commerce mais qui pourrait limiter l'impact de la perte des conteneurs dangereux à la mer serait de les organiser différemment à bord du navire pour éviter qu'ils ne se retrouvent trop proches du bord. A nuancer par le fait que les matières dangereuses et leur place à bord des navires sont déjà réglementées par le code IMDG (International Maritime Dangerous Goods)¹²². Ainsi certains conteneurs avec des matières dangereuses ne peuvent se retrouver côté à côté ou dans les cales pour des questions de sécurité à bord du navire. La marge de manœuvre pour cette solution est donc réduite.

4.3.1.4.6 Temps passé en escale / Temps passé à naviguer

Cet indicateur relève du détail mais permet de savoir le pourcentage de temps passé à quai ou en mouvement. Il rejoint l'indicateur portant sur la consommation des navires qui distingue la consommation de carburant à quai (souvent du MDO) et la consommation pendant le trajet. Lorsque le navire est en escale, il consomme moins de carburant (moteurs auxiliaires) et produit moins de

¹²⁰ OMI : <https://www.wcdn.imo.org/localresources/fr/MediaCentre/HotTopics/Documents/CCC%209-13fr.pdf>

¹²¹ [Verification of the gross mass of a packed container](#)

¹²² [The International Maritime Dangerous Goods \(IMDG\) Code \(imo.org\)](#)

bruits ce qui est préférable pour la biodiversité. De plus cela signifie qu'il a beaucoup d'escales et donc dessert un certain nombre de ports. Cependant d'un point de vue économique, le navire doit être le plus possible en mer et non à quai donc l'entreprise essaie de limiter au maximum le temps passé en escale.

4.3.1.4.7 Attente avant l'accostage

Un des leviers de décarbonation des navires est la technique du « juste à temps » qui signifie que les navires arrivent dans leur fenêtre d'arrivée à quai et n'attendent pas parce qu'ils sont en avance (rare) ou parce qu'ils sont en retard (fréquent). Les navires doivent optimiser leur route afin d'arriver dans les ports en temps voulu sachant que les attentes des clients en termes de ponctualité sont hautes. Cependant, l'attente avant l'accostage ne dépend pas seulement de la volonté de l'armateur, beaucoup de paramètres entrent en jeu comme par exemple les intempéries, les zones de baisse de vitesse pour les baleines etc.

L'attente avant l'accostage varie considérablement d'une période de l'année à une autre et aussi en fonction des événements. Pendant la crise du COVID, les navires étaient congestionnés dans les ports ce qui a mené à beaucoup de retards dans le transport des marchandises. Un autre exemple est l'Ever-Given qui avait bloqué le Canal de Suez en mars 2020 provoquant ainsi des retards de livraison dans le transport maritime international. Plus récemment, les événements géopolitiques liés à la situation en mer Rouge ont aussi provoqué des retards du fait de la déviation par le Cap de Bonne Espérance. Les ports de Méditerranée ont particulièrement été saturés au début de l'année. La congestion est donc une cause importante de retard dans le transport maritime

D'un point de vue de la biodiversité, il vaut mieux que les navires soient à l'heure et non en retard car une pratique commune lorsque les navires sont en retard est d'accélérer la vitesse ce qui comme nous l'avons vu précédemment augmente le bruit sous-marin ainsi que les risques de blessures graves lors de collisions avec des cétacés. Du point de vue de l'entreprise, il faut aussi maximiser les chances d'être à l'heure pour les livraisons dans les fenêtres du port car les risques pour ne pas s'engrainer dans des retards encore plus grands sont de finalement faire le choix de ne pas aller dans un port. Les conteneurs non livrés doivent donc nécessiter des opérations de logistique complexes afin de savoir comment les acheminer vers leur lieu d'arrivée prévu.

4.3.1.5. Labels et certifications

Les deux indicateurs suivant concernent les labels et les certificats que le navire possède. Pour obtenir un label (marque protégée), l'entreprise doit répondre aux exigences du cahier des charges et être contrôlée par le label privé ou un organisme tiers indépendant. En ce qui concerne la certification, elle évalue la conformité d'un service ou d'une organisation et est obligatoirement délivrée par un organisme indépendant pour maintenir une certaine impartialité. La certification peut être encadrée par la loi alors que ce n'est pas le cas du label. Les labels et certifications ont une grande importance d'un point de vue environnemental car pour pouvoir y prétendre, les entreprises doivent correspondre à leurs critères et évoluer d'une année sur l'autre comme c'est souvent le cas dans les certifications chez les armateurs. En général, le label ou la certification est appliqué à l'intégralité de la flotte en propriété mais certains armateurs peuvent choisir de ne l'appliquer qu'à la partie la plus récente de la flotte.

Certains peuvent s'appuyer sur des exigences générales environnementales comme la certification ISO 14001 entre autres et d'autres comme le label Green Marine Europe sont aussi axées sur l'impact sur la biodiversité des navires. Nous avons déjà abordé rapidement le label Green Marine Europe de Surfrider. Pour détailler plus la norme ISO 14001 mise en place en 2015 et revue en 2021¹²³, elle fait partie de la famille des ISO 14000 portant sur les problématiques liées à la responsabilité environnementale des entreprises. La norme ISO 14001 définit les exigences d'un système de management environnemental (SME). Cette norme peut faire l'objet d'une certification dans le cadre d'une entreprise¹²⁴. L'ISO 14001 fournit un cadre pour les entreprises qui souhaitent prendre en compte différents aspects concernant l'environnement que ce soit l'engagement des parties prenantes, l'utilisation des ressources ou la gestion des déchets. Cette norme contribue à atteindre la neutralité climatique mais aussi à s'adapter au changement climatique. Les labels et certifications peuvent donc permettre aux entreprises d'aller chercher au-delà de la réglementation concernant les enjeux environnementaux. Les labels poussent à l'amélioration continue, une fois un navire ou une flotte labellisée, il est difficile de retourner en arrière sur sa décision.

Les raisons pour lesquelles il est intéressant pour les entreprises de se conformer à un label et/ou une certification sont nombreuses. Tout d'abord, la certification et les labels peuvent aider d'un point de vue réputationnels puisqu'ils montrent des efforts concrets de l'entreprise pour qu'elle reste labellisée d'une année sur l'autre alors que dans le cas de Green Marine Europe, il devient plus dur chaque année de rester labellisé. D'un point de vue commercial, il peut aussi être très important d'avoir des certifications puisque certains clients exigent des armateurs que leur flotte soit certifiée ISO 14001. Enfin d'un point de vue financier, le fait d'avoir des certifications peut aider à obtenir des crédits auprès de certaines banques mais aussi permettre d'avoir des avantages dans certains ports, où l'armateur reçoit des avantages lorsqu'il est certifié ISO 14001¹²⁵.

4.3.2. Indicateurs de la route maritime

Nous avons vu les indicateurs reliés au navire et à l'opérateur du navire et afin de constituer une empreinte biodiversité prenant en compte les écosystèmes, il faut aussi se concentrer sur la route maritime en elle-même. Ces indicateurs ne dépendent pas directement de l'armateur mais permettent de comprendre l'environnement dans lequel le navire évolue et s'il y a des difficultés auxquelles il se confronte.

4.3.2.1. Caractéristiques météorologiques et physiques

4.3.2.1.1 Courants marins et météorologie

Un indicateur sur les courants marins et la météorologie permet de comprendre dans quel contexte le bateau navigue. Certaines mers sont plus difficiles à naviguer que d'autres, par exemple l'océan Atlantique Nord est connu pour avoir des conditions difficiles à cause des tempêtes fréquentes, des vagues puissantes et des vents violents. Certains creux de vagues peuvent se former. Bien évidemment, les armateurs connaissent ces difficultés et certains ont un centre de contrôle qui permet d'éviter des zones avec un trop grand danger dû aux conditions météorologiques. Il est difficile de lisser sur plusieurs mois le courant marin ainsi que les conditions météorologiques car elles varient d'une saison à une autre et d'une année à une autre. Avec le changement climatique,

¹²³ [ISO 14001 2015 F.pdf](#)

¹²⁴ [ISO - La famille ISO 14000 — Management environnemental](#)

¹²⁵ Source de cette donnée confidentielle

les conditions météorologiques sont amenées à devenir plus difficiles dans certaines parties du globe du fait du bouleversement des températures.

L'intérêt de cet indicateur est donc de savoir si jamais le navire a fait face à des conditions exceptionnelles qui pourraient mener à une hausse de la consommation de carburant avec les détours que ces conditions auraient pu causer. Dans ce cas, la biodiversité serait plus impactée s'il fallait allonger le trajet et accélérer pour ne pas prendre de retard, ce qui est souvent le cas. Parfois, le vent n'est pas assez fort pour obliger le navire à changer de route mais s'il est à contre-courant alors le navire peut tout de même consommer plus de carburant car il avancera avec plus de difficultés.

La question de la méthodologie se pose plus fortement pour cet indicateur : comment en effet parvenir à analyser les courants marins et les vents ? Il faut trouver une méthodologie qui prenne à la fois en compte la météo et la force du vent. L'échelle de Beaufort, inventée en 1805 par un amiral britannique, peut fournir une première approche intéressante pour distinguer les différents états météorologiques. Elle permet de mesurer la vitesse moyenne du vent sur une durée de dix minutes et classifie les états de 0 (absence de vent à 1 km/h) à 12 (ouragan à 118 km/h). L'échelle de Beaufort se base principalement sur des observations empiriques pour estimer la force du vent en observant l'état de la mer. Les anémomètres restent plus précis que l'échelle de Beaufort mais elle permet tout de même d'approcher le réel et est appliquée aux conditions marines.

4.3.2.1.2 Bathymétrie

Un élément physique très important à prendre en compte est la profondeur de l'eau ou la bathymétrie. En effet, selon la profondeur de l'eau on retrouve différentes espèces de faune et de flore marine. Plus on s'enfonce dans les profondeurs, moins la lumière peut traverser et donc plus on retrouve des espèces qui se sont adaptées à des conditions de température et de pression extrême. Il existe des relevés de bathymétrie sur le site de l'Ifremer¹²⁶ mais les données ne sont pas complètes puisqu'il faut que les navires océanographiques sillonnent les mers pour parvenir à connaître la profondeur, les satellites utilisés en télédétection ne pouvant pas parvenir à traverser l'eau pour avoir des données de profondeur.

Bien que l'homme n'ait pas encore connaissance de l'ensemble des espèces vivant dans l'océan, il semblerait qu'une grande partie de la faune et de la flore marine se trouve dans les 200 premiers mètres de profondeur, c'est le cas en mer Méditerranée (Coll et al, 2010)¹²⁷. Or dès 150 mètres de profondeur, 99% de la lumière est absorbée et au-delà de 1000 mètres il n'y a plus du tout de lumière, il fait plus froid et la pression est plus forte. Les cétacés peuvent aller au-delà de 1000 m et ce jusqu'à 3000m selon le Muséum national d'Histoire Naturelle¹²⁸. Cependant, les navires ont plus de risques de rentrer en collision lorsqu'il se situent sous la barre des 200 mètres puisque c'est dans cette profondeur-là que les baleines peuvent se nourrir et il y a aussi plus de trafic proche des littoraux¹²⁹. En navigant proche des côtes, les navires peuvent aussi contribuer à la turbidité des

¹²⁶ [Bathymétrie - Portail des données marines \(ifremer.fr\)](http://ifremer.fr)

¹²⁷ Coll M, Piroddi C, Steenbeek J, Kaschner K, Ben Rais Lasram F, et al. (2010) The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. PLoS ONE 5(8): e11842. doi:10.1371/journal.pone.0011842

¹²⁸ [Comment respirent les Cétacés, ces plongeurs exceptionnels \(mnhn.fr\)](http://mnhn.fr)

¹²⁹ Laist, D. W., Knowlton, A. R., Mead, J. G., Collet, A. S., & Podesta, M. (2001). COLLISIONS BETWEEN SHIPS AND WHALES. *Marine Mammal Science*, 17(1), 35-75. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2001.tb00980.x>

eaux en soulevant des sédiments dans les écosystèmes benthiques (fond de la mer) du fait des mouvements et de la vitesse.

Ainsi le navire risque d'impacter plus la biodiversité marine en navigant près des côtes plutôt qu'en navigant au large, avec l'étendu des connaissances que nous avons pour le moment. De ce fait, il semblerait préférable que le navire longe le moins possibles les côtes pour ne impacter la biodiversité. Cependant, les navires sont obligés de se rapprocher des côtes lors des escales et peuvent emprunter les couloirs maritimes ou cheneaux autorisés afin de limiter leur impact sur la biodiversité vivant dans les premiers 200 mètres de profondeur.

4.3.2.2. Zones traversées

4.3.2.2.1 Adaptation Shore Power - Quai / Port

Nous avons déjà abordé l'indicateur sur l'alimentation à quai ou shore power précédemment lorsque nous étions du point de vue du navire. Si le navire est équipé mais que les ports ou terminaux dans lesquels il accoste ne sont pas adaptés, cette mesure ne permet pas un retour sur investissement pour l'entreprise et ne permet pas de réduire les GES et le bruit pour la biodiversité marine. Plusieurs ports sont déjà équipés en Europe, la Suède étant précurseur, en Chine et aux Etats-Unis en particulier en Californie. En 2012, l'International Electric Committee a prévu que les Etats s'accordent sur un standard de câble et de prises afin que tous les ports et navires soient construits de la même manière¹³⁰. Les quais doivent donc être équipés d'un transformateur et une quantité d'énergie suffisante pour alimenter plusieurs quais mais cet équipement représente un investissement non négligeable pour les autorités portuaires et les terminaux. Cet indicateur sert à nuancer le premier en le mettant en valeur et en faisant gagner des points dans le cadre de l'empreinte, si jamais une partie des ports sur la route sont équipés ou à l'inverse si aucun port n'est équipé. Il faut noter que cependant ce n'est pas parce que le port et le navire ont des adaptations pour l'alimentation à quai, que le navire se branche forcément, les places étant peu nombreuses. Il faut aussi prendre en compte qu'il faut corréliser l'effort supplémentaire de route nécessaire afin d'accéder à un port équipé en alimentation à quai et que selon le cas de figure, ce n'est pas la solution la moins émettrice.

4.3.2.2.2 Tracé de la ligne

Le titre de l'indicateur n'est pas très évocateur mais en réalité, il s'agit de savoir la manière dont le tracé de la ligne est fait et si jamais le navire traverse des écosystèmes très différents. Quand un navire traverse plusieurs écosystèmes très différents pendant son trajet du fait de la température de l'eau, des conditions de pression, de la faune et de la flore présente etc. il y a plus de risques, malgré le traitement des eaux de ballast et la peinture antifouling qu'il transporte des espèces invasives d'un écosystème à un autre plutôt que s'il restait dans des écosystèmes proches. La difficulté dans cet indicateur est la manière de définir un écosystème plus ou moins proche dans un espace par exemple comme la Méditerranée. Quand le navire traverse plusieurs océans, il est plus facile d'admettre qu'il a été des écosystèmes très divers. Ce que l'on peut supposer c'est qu'en traversant des écosystèmes différents, il a plus de risques de transporter avec lui des espèces invasives et de les transmettre ce qui est comme nous l'avons vu précédemment néfaste pour les espèces endémiques.

¹³⁰ [IEC/IEEE 80005-1:2019 - Alimentation des navires à quai — Partie 1: Systèmes de connexion à quai à haute tension — Exigences générales \(iso.org\)](#)

Du point de vue de l'entreprise, le tracé de la ligne est optimisé pour répondre aux clients mais aussi pour arriver le plus vite possible à destination entre le port de départ et le port d'arrivée. Une solution que l'on peut imaginer pourrait être de faire des relais entre les navires comme c'est le cas lorsqu'ils doivent rattraper leur retard et ne pas s'arrêter à un port. On pourrait imaginer que des navires fassent des boucles en restant dans des écosystèmes semblables pour éviter de les traverser. La faisabilité économique de cette solution ne semble cependant pas pour le moins appréciable car non seulement il y aurait une perte de temps mais en plus pour déplacer les conteneurs, chaque mouvement dans un port représente un coût, ce qui incite l'armateur à limiter au maximum les déplacements des boîtes.

4.3.2.2.3 Présence de zone ECA

Cet indicateur se concentre sur la présence de zones NECA (Nitrogen Emission Control Area) ou SECA (Sulfur Emission Control Area) sur la route maritime empruntée par le navire. Nous avons déjà évoqué ces zones rapidement auparavant puisqu'elles sont reliées à d'autres indicateurs de l'analyse. Les zones ECA ont été mises en place par la convention internationale MARPOL pour limiter les émissions de polluants atmosphériques (NO_x et SO_x). Les normes d'émissions de polluants dans ces zones sont plus contraignantes, le soufre est limité à 0,1% contre 0,5% dans le reste des zones (hors haute mer). Cette réglementation s'applique aux navires, quel que soit leur pavillon. Il existe pour le moment plusieurs zones ECA au Canada, Etats-Unis, mer Baltique et Manche-Mer du Nord. Un projet de zone ECA en 2025 est prévu pour la Méditerranée par l'OMI à la demande de la France¹³¹. Selon le Ministère chargé de la Mer et de la Pêche : « A Marseille, les émissions de polluants atmosphériques liées au transport maritime représentent 20 % des émissions d'oxydes d'azote (NO_x), 70 % des émissions d'oxydes de soufre (SO_x) et 2 % des émissions primaires de particules fines (PM10) ». Limiter ces émissions permettrait de réduire les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation, néfastes pour la biodiversité, bien que ces mesures soient avant tout motivées par les conséquences sur la santé humaine.

La littérature économique s'est beaucoup intéressée à la question des zones ECA ainsi qu'à leur efficacité. Lähteenmäki-Uutela et al¹³² en 2017 se sont posé la question de connaître l'impact de cette réglementation SECA sur les performances des économies. Leur objectif est de parvenir à analyser les effets socio-économiques de la réglementation environnementale, notamment en s'appuyant sur les coûts évités liés à la santé publique. Une autre analyse basée sur un calcul coût bénéfique et menée par Åström S. et al en 2018¹³³ permet d'estimer l'impact monétaire d'une mise en place d'une zone NECA en mer Baltique et en mer du Nord. Ils trouvent que les réglementations représentent un coût de mise en conformité de l'ordre de 230 000 000 d'euros par an jusqu'en 2030 après une mise en place en 2021. Les bénéfices quant à eux seraient de l'ordre de 1 007 000 000 d'euros par an. Apparemment en mer Baltique, la réglementation serait moins profitable qu'en mer du Nord. A la fin de leur étude, ils analysent le cas particulier du GNL (gaz naturel liquéfié) si les armateurs décidaient d'utiliser cette solution, les avantages nets en seraient plus élevés. L'ACB

¹³¹ [Projet de zone de réglementation des émissions de polluants \(ECA\) en mer Méditerranée | Ministère chargé de la Mer et de la Pêche](#)

¹³² Lähteenmäki-Uutela, A., Repka, S., Haukioja, T., & Pohjola, T. (2017). How to recognize and measure the economic impacts of environmental regulation : The Sulphur Emission Control Area case. *Journal Of Cleaner Production*, 154, 553-565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.224>

¹³³ Åström, S., Yaramenka, K., Winnes, H., Fridell, E., & Holland, M. (2018). The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 59, 223-236. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.014>

montre donc que les zones NECA en mer Baltique peuvent être justifiées dans les conditions actuelles.

Chen et al¹³⁴, la même année, analysent l'impact des zones ECA sur le transport maritime mondial afin de voir si jamais le commerce international est impacté. Ils regardent notamment les décisions des navires de changer de route en prévision de l'éventuelle présence d'une zone ECA en Méditerranée. En l'occurrence, leur modèle prédit que de nombreux navires de petite taille déroutent leur trajet initial autour de la zone ECA, polluant ainsi plus les ports non concernés pour cette zone. De ce fait leur conclusion amène à se poser la question d'une uniformisation au niveau international pour éviter des dérives. Pour la protection de la biodiversité, il serait en effet préférable que cette réglementation s'applique sur des zones plus étendues mais l'investissement nécessaire serait très significatif pour les armateurs que ce soit en investissant dans des carburants alternatifs ou en investissant dans des scrubbers en boucle fermée.

4.3.2.2.4 Règlements environnementaux des autorités portuaires

Un certain nombre d'indicateurs se concentre sur les différentes réglementations qui s'appliquent aux navires (OMI, UE, Etat) mais il peut être intéressant de regarder les différentes réglementations qui s'appliquent sur le navire durant sa route que ce soit les ports ou les eaux territoriales qu'il traverse. Concernant les autorités portuaires, certaines d'entre elles encouragent les armateurs à prendre des mesures plus poussées sur les questions environnementales. Ces incitations sont le plus souvent en faveur de la protection de la biodiversité et encouragent les armateurs à poursuivre leurs efforts. Nous avons déjà pris en exemple les ports en Espagne qui fournissent des avantages si le navire est labellisé ISO 14 001. Au Canada, d'autres autorités portuaires comme le port de Vancouver rétribuent les navires limitant leurs émissions atmosphériques et leur bruit sous-marin en réduisant leur vitesse¹³⁵. Les armateurs peuvent obtenir jusqu'à 75% de réduction sur les droits de port dans le cadre du programme EcoAction mis en place par l'Administration portuaire Vancouver-Fraser. Ces incitations peuvent être favorables à la fois pour la biodiversité mais aussi pour l'économie de l'entreprise, elles représentent un compromis efficace.

4.3.2.2.5 Passages dans des eaux territoriales

Les dernières réglementations qui peuvent s'imposer au navire pendant sa route sont les différentes eaux territoriales qu'il traverse. Comme nous l'avons vu précédemment, il est préférable pour la biodiversité que le navire se trouve plutôt en eaux territoriales qu'en haute mer puisqu'aucune réglementation internationale ou nationale n'est possible là-bas. Les eaux territoriales sont quant à elles plus ou moins contraignantes en termes de vitesse ou d'émissions. En Méditerranée, on retrouve une séparation entre la Méditerranée Nord qui est régie par les réglementations de l'UE et la Méditerranée Sud qui est régie par les réglementations de l'OMI. De manière générale, les réglementations de l'UE sont plus poussées en termes environnementaux que l'OMI. L'armateur ne peut pas directement agir sur cet indicateur d'un point de vue économique

¹³⁴ Chen, L., Yip, T. L., & Mou, J. (2017). Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 58, 280-291
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.003>

¹³⁵ [L'autorité portuaire Vancouver-Fraser récompense les transporteurs maritimes pour leurs efforts volontaires de réduction des émissions atmosphériques en leur décernant le prix Blue Circle | Port of Vancouver \(portvancouver.com\)](#)

mis à part, le changement de la route initiale pour limiter le temps passé en eaux territoriales hors UE.

4.3.2.2.6 Présence de zones protégées et comportement du navire

Cet indicateur prend en compte deux étapes : la présence de zones protégées (aires marines protégées, parcs nationaux etc.) sur la route et si présence de zones protégées alors analyse du changement de comportement du navire. En France, la définition des aires marines protégées est un espace délimité en mer qui répond à des objectifs de protection de la biodiversité et des écosystèmes à long terme¹³⁶. Ces aires marines permettent de protéger la biodiversité si elles sont gérées activement et protégées intégralement. Elles permettent de renouveler les stocks de poissons si la pêche y est régulée et offrent des possibilités de développer du tourisme comme les activités de plongée. Pour la biodiversité, l'élargissement et la création d'aires marines protégées est indéniablement bénéfique.

En Méditerranée, il existe différentes aires protégées, la plus importante étant le sanctuaire Pélagos que nous avons cité plus tôt. L'accord Pélagos a rassemblé la France, l'Italie et la principauté de Monaco dès 1999. Le sanctuaire couvre une partie des côtes françaises et italiennes jusqu'à la Sardaigne et englobe intégralement la Corse. En 2001, le Sanctuaire Pelagos est devenu une ASPIM (aire spécialement protégée d'importance méditerranéenne) selon l'Article 16 de l'Accord¹³⁷. Le sanctuaire Pélagos recense huit espèces de mammifères marins qui vivent régulièrement dans cette zone, parmi elles, six espèces de dauphin et deux de baleines : le rorqual commun et le cachalot qui sont majoritairement victimes des collisions avec les navires. En Méditerranée, on retrouve aussi un certain nombre de parcs nationaux comme le Parc National des Calanques¹³⁸ ou le Parc National de Port-Cros et Porquerolles, deux des onze parcs nationaux français. Ces parcs abritent notamment plus de 60 espèces marines patrimoniales et de la flore marine comme les herbiers de posidonie nécessaires dans la captation du CO2. Bien que les navires ne passent pas forcément dans les parcs mais à proximité, la présence de l'implémentation de ces derniers démontre l'importance de la biodiversité marine et côtière.

Du point de vue du transport maritime, les aires maritimes peuvent avoir certaines conséquences. Certaines routes seront difficilement empruntables voire interdite du fait des problèmes liés au bruit sous-marin, aux collisions ou autres pollutions. Les infrastructures portuaires pourront difficilement s'agrandir du fait des contraintes de non-bétonisation, de même pour les canaux. Pour le moment, les aires marines protégées sont surtout incitatives. Lorsque le navire entre dans le Pélagos, il est préférable qu'il ralentisse, prête attention aux cétacés ou contourne certaines zones cependant aucune réglementation n'est imposée pour l'ensemble du sanctuaire. La décision dépend donc de la volonté du navigant et de l'opérateur. Par ailleurs, s'il ne veut pas avoir à ralentir dans cette zone, il peut tout à fait la longer et garder une vitesse élevée ce qui n'est pas optimal pour la biodiversité.

4.3.2.2.7 Présence de zones dynamiques ou statiques

En lien avec le dernier indicateur évoqué, les ZMPV ou Zones maritimes particulièrement vulnérables ou PSSA en anglais, ont été mises en place par l'OMI pour protéger des espaces de

¹³⁶ [Le patrimoine marin et les aires marines protégées françaises | Ministère chargé de la Mer et de la Pêche](#)

¹³⁷ [Accord Pelagos - Pelagos Sanctuary \(pelagos-sanctuary.org\)](#)

¹³⁸ [Qu'est-ce qu'un Parc national ? | Parc national des calanques](#)

biodiversité en particulier comme la Grande Barrière de Corail ou l'Archipel des Galapagos. En 2022, une ZMPV a été désignée en mer Méditerranée Nord-Occidentale et elle passe à côté notamment du sanctuaire Pélagos¹³⁹. Cette ZMPV (Annexe 7) a été décidée conjointement par le gouvernement français, le gouvernement italien et la principauté de Monaco afin de réduire les risques de collisions et a été créée en 2023. Il est demandé aux navires de signaler la présence et la localisation de cétacés si jamais ils en aperçoivent afin de prévenir les autres navires de faire attention. Comme dans le cas des aires marines protégées, il n'existe pour le moment aucune obligation de réduction de vitesse pour les navires, toutes les mesures restent volontaires. Il faudrait que l'information soit accessible et surtout actualisée en temps réel afin que les navigants puissent éviter au mieux les impacts sur les cétacés.

4.3.3. Indicateurs du contexte

Nous avons analysé en détail les indicateurs concernant le navire ainsi que la route maritime. Les derniers indicateurs se focalisent sur la remise dans le contexte économique du navire dans les écosystèmes choisis. La difficulté de l'étude est de rapporter les conséquences sur la biodiversité à court et long termes à un seul navire puisqu'il s'agit au global de l'impact de l'ensemble des navires de la flotte mondiale. A part quelques indicateurs comme la perte de conteneurs que l'on pourrait relier à un navire, il est très complexe d'attribuer les conséquences à un navire précis. Cependant, il semblait important de remettre le navire dans son contexte afin de visualiser la contribution du navire à l'impact global économique et environnemental dans la zone analysée.

4.3.3.1 Présence d'aquacultures proche de la route

Cet indicateur sur la présence d'aquacultures proche de la route maritime s'appuie sur les études réalisées dans le cadre de l'impact du changement climatique sur les bivalves ou autres élevages de crustacés et poissons. L'intérêt de cet indicateur serait de mener une analyse économique afin de savoir s'il existe une perte financière pour les producteurs due aux conséquences en termes de bruit sous-marin que l'on pourrait relier au transport maritime. Selon la WWF¹⁴⁰, l'aquaculture en Méditerranée représente plus de la moitié de la production totale de poissons dans cette région et continuera d'augmenter dans les années à venir. L'impact économique d'une réduction de la production aquacole pourrait donc être important. Compte tenu du temps imparti pour cette étude, je me suis contentée des articles scientifiques déjà rédigés à ce propos pour analyser l'impact du transport maritime sur l'économie locale autour des cultures de crustacés.

Concernant l'impact du bruit sous-marin sur les crustacés, Nathan J Edmonds et al (2016)¹⁴¹ montrent tout d'abord que les crustacés peuvent percevoir les sons et y sont sensibles bien que les données actuelles ne soient pas assez fiables pour conclure à une corrélation entre changement du comportement des crustacés étudiés et bruit sous-marin d'origine anthropique. La même année Tidau, S., & Briffa, M.¹⁴² réalisent une métanalyse en reprenant des études sur les impacts

¹³⁹ [Avancées pour la préservation de l'environnement marin en mer méditerranée | Ministère chargé de la Mer et de la Pêche](#)

¹⁴⁰ [Aquaculture | WWF \(wwfmmi.org\)](#)

¹⁴¹ Edmonds, N., Firmin, C., Goldsmith, D., Faulkner, R. & Wood, D., 2016. A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin* 108 (1), 5-11. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.05.006.

¹⁴² Tidau, S., & Briffa, M. (2016). Review on behavioral impacts of aquatic noise on crustaceans. *Proceedings Of Meetings On Acoustics*. <https://doi.org/10.1121/2.0000302>

comportementaux du bruit des navires, battage de pieux à basse fréquence¹⁴³ et autres sur les crustacés en eau douce et en mer. Ces études montrent des changements de comportement des crustacés allant du stress à l'augmentation de l'activité physique. Une critique qu'ils formulent par rapport aux études menées concerne la transparence ainsi que la divergence des méthodes utilisées dans les études pour exposer les espèces au bruit sous-marin.

Pour conclure sur l'impact du bruit sous-marin sur les crustacés, nous avons analysé le document du Ministère de la transition écologique et solidaire sur les préconisations en termes d'impact du bruit sous-marin sur la faune marine (2020)¹⁴⁴. Ils trouvent que les études sur les crustacés et les mollusques ne sont pas encore assez avancées pour prouver un changement de comportement mais sachant qu'ils sont capables de percevoir des sons à basse fréquence grâce à leurs récepteurs sensoriels, il se pourrait qu'il réagissent face au bruit sous-marin dû au battage de pieux avec un stress pouvant affecter le métabolisme. Les crustacés ne représentent pas dans l'état actuel de nos connaissances, l'espèce la plus impactée par le bruit sous-marin comparée aux cétacés basse fréquence ou aux phocidés (par exemple les phoques), mais il n'en demeure pas moins que cet impact est tout de même présent et pourrait affecter les producteurs.

4.3.3.2 Activités de tourisme

Au-delà des navires de commerce, selon la zone dans laquelle la route se situe, il peut y avoir plus ou moins d'activités touristiques qui peuvent soit contribuer à la protection de la biodiversité, soit contribuer aux pollutions ambiantes. Les activités touristiques engagées et décarbonées comme le kayak ou la randonnée ont un impact que les pouvoirs publics et élus locaux tentent de réduire au maximum en mettant en place des campagnes de communication sur le dépôt de déchets dans la nature, le respect de la faune et de la flore, le respect des sentiers balisés etc. D'autres activités non décarbonées comme les croisières, les navires de plaisance à moteur ou autres engins motorisés types jet-sky posent encore plus problème car elles contribuent à l'impact sur le bruit sous-marin et le rejet de polluants dans l'air et dans l'eau.

Des études scientifiques se sont concentrées sur l'impact des activités de tourisme sur les cétacés. En 2022, Gannier A¹⁴⁵ analyse le cas des dauphins en mer Méditerranée qui sont exposés à un certain nombre d'activités nautiques bruyantes depuis une trentaine d'années près des côtes. Notamment, il trouve qu'il y a eu une diminution significative des habitats des dauphins sur la côte entre la période 1988-2003 et 2004-2019. L'étude analyse aussi le bruit et les nuisances causées par le trafic maritime de bateaux à moteur qui pendant l'été dépassait souvent un navire par minute. Le bruit sous-marin près des côtes a été analysé comme étant environ 10 dB supérieur à la haute mer selon cette étude. L'étude suppose donc que le bruit sous-marin et l'activité des navires a eu un rôle significatif parmi d'autres facteurs du déplacement de l'habitat des dauphins.

Les activités touristiques semblent donc avoir un impact au minimum près des côtes et la présence des navires porte-conteneur en plus de cela implique des nuisances décuplées pour les

¹⁴³ Le battage de pieux est un procédé qui consiste à enfoncer des pieux ou des pilotis dans le sol afin de solidifier ou de stabiliser des fondations, on l'utilise notamment pour les fondations des projets éoliens en mer et génère énormément de bruit.

¹⁴⁴ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20preconisations%20pour%20limiter%20l%20impact%20des%20bruits%20sous-marins%20sur%20la%20faune%20marine.pdf>

¹⁴⁵ Gannier, A. J., Boyer, G., & Gannier, A. C. (2022b). Recreational boating as a potential stressor of coastal striped dolphins in the northwestern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114222>

cétacés vivant près des côtes. L'impact économique d'une meilleure prise en compte de la protection de la biodiversité dans cette région pourrait être important mais cette action est nécessaire. Si l'on baisse le nombre d'activités touristiques dans la région, il devrait y avoir un impact économique sur les finances de la région sur les pourtours de la Méditerranée qui est la première destination touristique au monde. Cependant, certaines activités touristiques en lien avec la biodiversité par exemple la plongée sous-marine ou les paysages marins dans le cadre des randonnées, doivent impérativement protéger la biodiversité afin de garder la clientèle qui vient pour voir en grande partie la richesse de la biodiversité. Tout comme l'aquaculture précédemment, il serait intéressant d'analyser monétairement cet impact afin de savoir s'il y aurait un bénéfice à conserver la biodiversité dans cette région et à réguler les activités de tourisme et le transport maritime afin de limiter les conséquences sur la biodiversité et l'économie de la région.

4.3.3.3 Fréquentation de la zone

L'indicateur de fréquentation de la zone par l'ensemble des navires porte-conteneurs permet d'évaluer l'importance de la prise en compte des indicateurs et mesures évoquées précédemment dans cette étude. Il est préférable pour la biodiversité que les indicateurs soient intégrés par les armateurs, qu'il n'y ait pas de navires dans une zone ou un grand nombre de passages et de routes empruntées. Cependant dans le cadre d'une zone très fréquentée, c'est d'autant plus important que les conséquences sont aggravées. Par exemple, dans le cadre du bruit sous-marin, si les navires passent très fréquemment dans la même zone et se croisent alors le bruit est persistant sur la durée et peut amener à des conséquences plus graves sur les cétacés. Il en va de même pour la pollution visuelle et lumineuse que nous n'avons pas évoquée jusqu'ici puisque peu d'études ont travaillé sur ce sujet dans le cadre de la biodiversité marine, la biodiversité terrestre étant plus atteinte par la pollution lumineuse. Le navire en lui-même ne peut pas agir sur la fréquentation d'une zone mais il peut contribuer à réduire l'impact global sur la biodiversité en réduisant au préalable son propre impact.

4.4 Etape 3 : Explication du choix des seuils

Une fois que tous les indicateurs nécessaires à l'étude ont été sélectionnés, il a été nécessaire de trouver comment les analyser et les hiérarchiser afin de savoir où se situe le navire dans son impact sur la biodiversité. Tout d'abord, il a été décidé de découper les seuils en quatre pour éviter d'avoir une valeur neutre au milieu de la notation. Ensuite, quatre seuils semblaient suffisants pour analyser les impacts dans le cadre de cette étude. Les quatre seuils vont de l'impact le plus faible (seuil 1) à l'impact le plus dégradant (seuil 4) pour la biodiversité. On a donc :

1. Impact faible à neutre sur la biodiversité (4 points)
2. Impact modérément réduit sur la biodiversité (3 points)
3. Impact faiblement négatif sur la biodiversité (2 points)
4. Impact néfaste pour la biodiversité (1 point)

Chaque seuil correspond à un certain nombre de points attribués sachant que la meilleure empreinte biodiversité est celle qui a le plus de points (impact faible sur l'environnement), et que ces indicateurs seront ensuite pondérés donc les points accordés en fonction d'un seuil ne forment pas, à eux seuls, la note finale. Plus le navire est vertueux, plus il est proche du seuil 1 et donc plus il a de points. Si aucune case n'est cochée par le navire, cela signifie qu'il n'a pas la donnée et qu'il obtient 0 point. Dans cette empreinte, le principe est d'aider les armateurs à agir au mieux, donc

une réponse même mauvaise permet d'obtenir un point comparé à une non réponse. Ces quatre seuils servent pour la plupart des indicateurs mais certains ne sont découpés qu'en trois voire deux seuils (dans le cas d'une réponse en oui/non entre autres). Dans ces cas-là, chaque seuil est explicité pour comprendre l'impact de l'indicateur.

Il serait intéressant, dans la suite des recherches, de distinguer plus précisément les impacts en ayant une idée détaillée voire chiffrée lorsque c'est possible des seuils exacts. Cette sous-partie se concentre donc sur chaque indicateur cité et explicité précédemment en détaillant les choix des seuils dans lesquels nous pourrions ensuite en partie 5 intégrer les données du navire pour une application empirique à la méthodologie. Nous reprenons la même organisation que la sous-partie précédente et nous avons choisi de séparer ces deux sous-parties puisqu'il s'agit bien de l'étape venant après l'analyse des impacts économiques et des impacts sur la biodiversité de chaque indicateur. Il est préférable de détailler les seuils une fois que l'on a bien compris l'ensemble des indicateurs de l'empreinte.

4.4.1. Indicateurs navire

4.4.1.1. Fiche Technique du navire

4.4.1.1.1 Opérateur du navire

Le premier indicateur que nous avons évoqué était l'opérateur du navire. Afin de l'analyser au mieux je l'avais découpé en trois sous-indicateurs contribuant à la note globale pour l'indicateur opérateur du navire. Tout d'abord, il y avait la question de la participation à Green Marine Europe. Les seuils pour cet indicateur vont de 1 point attribué dans le cas d'une non-participation à Green Marine Europe à 3 et 4 points s'il y a une participation donc ce sous-indicateur ne fait appel qu'à trois seuils. La différence entre les seuils 1 et 2 est la prise en compte de la note obtenue à Green Marine Europe. Si le navire obtient une note supérieure à 3/5 à Green Marine Europe cela signifie qu'il a un impact réduit sur la biodiversité alors qu'un navire avec une note plus basse a conscience des enjeux mais doit encore se développer avant de les intégrer à sa stratégie.

Le deuxième sous-indicateur pris en compte était la mention des activités opérationnelles et des partenariats en faveur de la biodiversité dans le rapport d'activité extra-financier RSE. Ce sous-indicateur commence au seuil 4 avec zéro mention de la protection de la biodiversité dans le rapport puis dans le seuil 3 une mention brève de la biodiversité sans action concrète évoquée de la part de l'armateur. Le seuil 2 implique une mention d'au moins une action opérationnelle de l'entreprise en faveur de la biodiversité et enfin le seuil 1 correspond à une mention à la fois des actions mises en place et des partenariats variés en faveur de la biodiversité (supérieur à 10 actions). Par actions variées, on entend des actions dans des domaines divers qui peuvent toucher à la fois à de la restauration d'écosystèmes comme les mangroves ou les coraux, à de l'aide financière apportée pour des aires marines protégées ou à des programmes de protection d'espèces ou de dépollution.

Enfin le dernier sous-indicateur portait sur la participation à EcoVadis et est agencé de la même manière que les seuils pour la participation à Green Marine Europe. Le seuil 4 signifie aucune participation à EcoVadis et le reste des seuils prend en compte la note obtenue dans la partie environnement à travers une participation à EcoVadis : pour le seuil 3 le navire obtient une note inférieure à 50/100, pour le seuil 2 le navire obtient une note entre 50/100 et 80/100 et pour le seuil 1 le navire obtient une note supérieure à 80/100. Tous ces indicateurs s'appuient sur des données de l'année pendant laquelle se déroule l'analyse de l'empreinte biodiversité.

4.4.1.1.2 Pavillon du navire

Le deuxième indicateur de cette sous-partie portait sur le pavillon du navire. Les seuils ont été analysés par rapport aux différentes réglementations mises en place par l'OMI et l'UE. Le seuil 4 qui est le plus néfaste pour la biodiversité et l'environnement contient les pavillons de libre immatriculation. Le seuil 3 correspond à des pavillons en dehors des pavillons de libre immatriculation ou de complaisance qui n'imposent aucune contrainte en termes de biodiversité et de climat. Le seuil 2 correspond à une grande partie des pavillons soumis aux règles de l'OMI et imposant des contraintes sur des sujets environnementaux ayant un impact indirect ou faible sur la biodiversité marine (tri des déchets etc.). Enfin le seuil 1 correspond à un pavillon imposant des contraintes en termes de biodiversité marine et/ou de climat (comme par exemple les pavillons de l'UE).

4.4.1.1.3 Règlementations sur les NOx

Les seuils pour les réglementations sur les oxydes d'azote ont été réalisés grâce aux réglementations de l'OMI. Comme il s'agit d'une réglementation et qu'il est préférable pour la biodiversité, toutes choses égales par ailleurs, qu'un sujet soit pris en compte dans les réglementations pour réguler la situation des navires vis-à-vis de l'environnement, le seuil 4 n'est pas rempli. Pour être tout à fait précis, la réglementation dépend de la date de pose de la quille mais aussi de la vitesse de rotation du moteur. En Annexe 8 vous trouverez le détail mais ici nous n'aborderons que la date de pose de la quille. Le seuil 3 correspond donc au seuil minimal (Tier I) de la réglementation sur les NOx et s'applique aux navires dont la quille a été posée entre 2000 et 2010. Le seuil 2 correspond au Tier II dans la réglementation OMI et s'applique aux navires dont la quille a été posée après le 1er janvier 2011. Enfin le seuil 1 s'applique aux navires dont la quille a été posée après le 1er janvier 2016, mais s'applique uniquement dans les zones NECA (zone ECA pour les NOx).

4.4.1.1.4 Nombre de conteneurs réfrigérés

Pour réaliser les seuils de cet indicateur, il a fallu utiliser les données afin de trouver le pourcentage minimal de conteneurs réfrigérés. Se concentrer sur la proportion permet d'avoir une idée de ce que représentent les conteneurs réfrigérés dans l'ensemble de la cargaison du navire. Pour ce faire, je me suis appuyée sur les données du nombre de conteneurs réfrigérés des navires de même taille que celui de cette étude afin de produire un seuil sur mesure. Nous aurions pu aller de 0% à 100% de conteneurs réfrigérés mais dans la pratique, leur proportion dépasse rarement un tiers des conteneurs totaux du navire soit 33%. Pour rappel, plus un navire possède de conteneurs réfrigérés, plus il consomme car, ces conteneurs nécessitent beaucoup d'énergie pour fonctionner. C'est donc naturellement que le seuil 1 est à 0% puisqu'il s'agit de l'impact le plus réduit sur la biodiversité. En moyenne, la part de conteneurs réfrigérés des navires toutes tailles confondues est de 15%¹⁴⁶. Dans le cas des navires de petite taille (moins de 1000 EVP), la moyenne du pourcentage de conteneurs réfrigérés est autour des 20%¹⁴⁷. De fait, le seuil 4 se situe entre 20% et 33% de conteneurs réfrigérés, le seuil 3 entre 10% et 20% et le seuil 2 est inférieur à 10%. Ces calculs ont été réalisés avec les données issus de rapport RSE publics.

¹⁴⁶ Source de la donnée anonymisée

¹⁴⁷ Source de la donnée anonymisée

4.4.1.1.5 Type de carburant

Pour l'indicateur sur le type de carburant, j'ai classé selon l'impact reconnu sur la biodiversité en ne prenant que des carburants dits conventionnels et le GNL. Il serait intéressant d'étendre cette étude à des biocarburants ou e-carburants mais ici n'est mentionné que le carburant principal du navire même s'il s'agit d'un mix énergétique. En effet, les navires sont à présent souvent conçus en dual-fuel pour pouvoir utiliser deux carburants différents lors d'une traversée s'ils venaient à manquer de carburant alternatif. C'est par exemple le cas du GNL et du VLSFO qui peuvent entrer dans la catégorie dual fuel. Dans cette étude, on prendra en compte uniquement le carburant le plus utilisé car même si un navire dual fuel peut passer du GNL au VLSFO, un navire seulement au VLSFO ne peut pas passer au GNL. Concernant les seuils, on retrouve dans le seuil 4 le HFO ou fioul lourd qui émet du soufre à 3,5% et qui du fait des réglementations OMI nécessite la pose d'un scrubber. Le seuil 3 porte sur le VLSFO (Very Low Sulfur Fuel-Oil) qui émet du soufre à hauteur de 0,5%. Le seuil 2 se concentre sur le MGO ou le ULSFO qui sont tous deux à 0,1% de soufre mais sont près de deux fois plus chers que le VLSFO. Et enfin en seuil 1, on retrouve le GNL qui est meilleur en termes d'émissions de polluants type soufre ou oxydes d'azote mais assez émetteur de CO₂ du fait des fuites de méthane.

4.4.1.1.6 Règlementation sur les SO_x

L'indicateur sur les SO_x n'est pas aussi classifié que celui sur les NO_x avec les réglementations de l'OMI. Si le navire ne passe pas par une zone SECA, il doit être à 0,5% d'émissions de soufre dans les eaux territoriales depuis 2020 et autrement en haute mer il n'y a pas de réglementation. Si le navire passe dans une zone ECA, il doit être à 0,1% d'émissions de soufre depuis le 1^{er} janvier 2015. Dans cette zone d'étude et sur la période, la Méditerranée n'est pas concernée par la zone ECA qui ne sera appliquée qu'à partir de mai 2025. De ce fait, ces seuils ont été fondés sur la volonté des navires de faire mieux que la réglementation de manière volontaire. Il s'agit ici de mettre en perspective les carburants pour voir celui qui permet d'émettre le moins de soufre. Les seuils sont répartis entre 1 et 3 allant de 0,1%, 0,3% à 0,5% d'émissions de soufre. Le seuil 4 n'a pas été noté car on considère que la réglementation fait loi et qu'il est préférable d'être à 0,5% d'émissions de soufre que 3,5% comme c'était le cas avant la législation de l'OMI.

4.4.1.1.7 Consommation moyenne de carburant

Pour cet indicateur, comme dans le cas des conteneurs réfrigérés, j'ai dû calculer, à partir des données sur l'ensemble des navires de la ligne, les tonnes de carburant consommées par trajet afin de comparer le navire avec les autres de même taille. La navire A, B et C sont des navires de taille équivalente au navire Y dont nous faisons l'étude et qui permettent de situer le niveau de pollution dans le contexte de la zone d'étude. Afin d'obtenir ces données, j'ai fait appel au chef de ligne qui a transmis les consommations moyennes des navires comprises entre 33 tonnes par jour et 37 tonnes par jour. Or ces chiffres semblaient relativement élevés donc il a fallu comprendre pourquoi. En réalité, il semble que les consommations étaient hautes sur cette ligne en raison de certains retards une partie de l'année. Il s'agit donc d'une consommation définie comme « à pleine vitesse » et non une consommation économique. Pour une consommation économique, le chef de ligne a indiqué qu'il fallait considérer 6 à 10 tonnes de moins par jour.

Comme ce n'était pas assez précis, j'ai cherché des tableaux de données afin de connaître la consommation moyenne des navires par trajet en prenant en compte le moteur principal ainsi que les moteurs auxiliaires (qui produisent de l'électricité nécessaire au fonctionnement des

infrastructures du navires 24h/24). En s'appuyant sur des tableaux de données, j'ai calculé les consommations moyennes de ces navires sur la route pour le premier trimestre de l'année 2024. J'ai sélectionné les données importantes afin d'éviter les biais. Tout d'abord, il a été nécessaire de sélectionner les données entre 12h et 26h par jour car on considère que ce n'était pas assez précis si la donnée était étalée sur moins d'une journée et qu'il n'est pas possible de traverser plus de deux fuseaux horaires en une journée. En additionnant les consommations des différents moteurs et en en faisant la moyenne par navire, on obtient des chiffres qui concordent globalement avec la précédente source. Le seuil 4 implique une consommation journalière supérieure à 25 tonnes/jour, le seuil 3 entre 23 et 25 tonnes par jour, le seuil 2 entre 21 et 23 tonnes par jour et le seuil le plus faible inférieur à 19 tonnes par jour (consommations de VLSFO et MDO confondues).

4.4.1.1.8 Rapport entre tonnes transportées par kilomètre et émissions

Pour connaître le rapport entre tonnes transportées par km parcouru et les émissions, nous nous étions appuyés sur les calculs du CII. Ici on classe le navire non pas en fonction de la note obtenue au CII puisque ce calcul comme nous l'avons vu prend en compte d'autres éléments, (prise en compte notamment des conteneurs réfrigérés) mais sur le pourcentage du CII. Ces deux indicateurs sont relativement proches mais ne portent pas directement la même information puisque celui-ci porte sur la performance du navire alors que la note au CII porte plus sur les implications d'une mauvaise ou d'une bonne note au CII pour l'armateur. Les limites sont donc pour le seuil 4 un CII supérieur à 119% ce qui signifie que le navire est peu efficace et que par conséquent il a un impact néfaste sur la biodiversité. Le seuil 3 correspond à un pourcentage du CII compris entre 107% et 119%, le seuil 2 entre 94% et 107% et le seuil 1 un CII à moins de 94%. Ces seuils s'appuient sur les pourcentages prévus par le CII pour calculer les notes et le rang du navire.

4.4.1.1.9 Sensibilisation du personnel navigant

Les seuils de sensibilisation du personnel navigant se fondent sur le pourcentage de l'ensemble du personnel navigant de la flotte qui a suivi au moins une formation sur l'environnement et la biodiversité marine afin d'être au courant des problématiques liées au bruit sous-marin ou encore aux collisions, sur lesquelles nous avons vu précédemment qu'il peuvent, en partie, agir grâce aux observations le long de la route maritime. Les quatre seuils sont découpés tous les 25% en allant du seuil 4 entre 0% et 25% de personnes sensibilisées au seuil 1 allant de 75% à 100% de personnes sensibilisées. Plus les personnes sont sensibilisées, plus elles peuvent mettre en place des initiatives afin de préserver la biodiversité. Cet indicateur ne mesure pas encore la qualité de la formation ni le temps d'heures passées dans cette formation, ce qui pourrait être intéressant à connaître afin de préciser l'indicateur.

4.4.1.2 Emissions

4.4.1.2.1 Gaz à effet de serre et polluants

Afin de calculer le degré de pollution « acceptable » pour la biodiversité compte tenu du commerce international, il fallait trouver un moyen de mettre en place des échelles en s'appuyant notamment sur les chiffres de toxicité du cèdre et sur les réglementations NOx et SOx. Cependant, ces échelles restaient assez floues donc il a semblé préférable de s'appuyer sur les pollutions émises par les navires sur cette route pendant leur trajet afin de voir si jamais il était possible de polluer moins. J'ai repris les données du tableau Excel utilisées afin de connaître les consommations de chaque navire ainsi que les facteurs d'émissions associés aux carburants de chaque navire. Le seuil minimal pourrait être réduit étant donné que les navires sur lesquels je me suis appuyée pour les

chiffres n'ont pas des notes conformes au CII donc il faut prendre en compte que cette première version des seuils pourrait être revue en étant plus exigeante.

Pour réaliser les calculs, j'ai utilisé cette formule :

$$\frac{\sum_{k=1}^n \text{Conso VLSFO}_k * \text{FE}_x \text{VLSFO} + \text{Conso MDO}_k * \text{FE}_x \text{DO}}{n}$$

avec n le nombre de trajets de chaque navire sur la route étudiée ; la Conso VLSFO la consommation de tonnes de VLSFO sur le trajet de la route Z pour le navire ; FE le facteur d'émission correspondant soit au VLSFO soit au MDO et dépendant de x correspondant aux polluants CO₂, PM, SO_x et NO_x (cf 3.1 Données) ; Conso MDO, la consommation de carburant diesel-oil utilisé au port. On trouve donc quatre moyennes par navire selon le type de polluant ce qui permet de connaître la moyenne basse et la moyenne haute des émissions par type de carburant pour les navires sur la même ligne maritime à la même période.

Le tableau de données réalisé à partir de données des consommations par trajet, des facteurs d'émissions et de la formule ci-dessus est :

Navires sur la route Z	Emissions CO2	Emissions SOX	Emissions NOX	Emissions PM
Navire Y	211,00	0,48	3,99	0,36
Navire A	267,57	0,61	5,07	0,46
Navire B	269,77	0,58	5,03	0,43
Navire C	315,44	0,72	5,98	0,54

Pour les particules fines on trouve donc une moyenne comprise entre 0,2 µm et 0,6 µm (seuil 1 : 0,2 – 0,3 µm ; seuil 2 : 0,3 – 0,4 µm ; seuil 3 : 0,4 – 0,5 µm; seuil 4 : 0,5 – 0,6 µm). Pour les NO_x, on retrouve une moyenne entre 2 g/T de carburant émise et 6 g/T (seuil 1 : 2 – 3 g/T ; seuil 2 : 3 – 4 g/T ; seuil 3 : 4 – 5 g/T; seuil 4 : 5 – 6 g/T). Pour les SO_x, on retrouve une moyenne entre 0,4 g/T de carburant émise et 0,8 g/T (seuil 1 : 0,4 – 0,5 g/T ; seuil 2 : 0,5 – 0,6 g/T ; seuil 3 : 0,6 – 0,7 g/T; seuil 4 : 0,7 – 0,8 g/T). Enfin pour le CO₂, on raisonne en tonnes de CO₂ émises sur le trajet et en moyenne le navire émet entre 200 et 320 tonnes de CO₂ (seuil 1 : 200 – 230 TCO₂eq ; seuil 2 : 230 – 260 TCO₂eq ; seuil 3 : 260 – 290 TCO₂eq ; seuil 4 : 290 – 320 TCO₂eq).

4.4.1.2.2 Indicateur d'intensité carbone (CII)

Cet indicateur rejoint en partie ce qui a été vu dans l'indicateur du rapport entre tonnes transportées par km parcouru et émissions mais se concentre sur la note globale obtenue au CII. Le seuil 1 correspond à la meilleure note A et le seuil 2 à la note B qui sont toutes les deux des notes montrant que le navire est bien opéré et performant d'un point de vue des émissions produites. Le seuil 3 correspond à la note C qui est toujours une indication de conformité du navire. Le seuil 4 quant à lui comprend les notes D et E qui exigent que le navire modifie son mode d'opération l'année de l'évaluation (pour la note E) ou bien dans les trois ans (pour la note D). Il faut prendre en compte cependant qu'il est difficile pour les petits navires d'obtenir de bonnes notes au CII puisqu'il prend en compte la vitesse et le DWT (port en lourd) en fonction de la distance, or les petits navires

ont tendance à réaliser beaucoup d'escales et à rester beaucoup à quai ce qui pose problème pour leur efficacité. Ils consomment beaucoup sans faire de grandes distances.

4.4.1.3. Technologies à impact sur la biodiversité

4.4.1.3.1 Adaptation Shore Power - Navire

Pour construire l'échelle de cet indicateur, j'ai choisis quel impact sur la biodiversité pouvait avoir la présence d'une prise d'alimentation à quai sur le navire, toutes choses égales par ailleurs c'est-à-dire en supposant qu'au moins un des ports de la ligne permettrait au navire de se brancher. L'alimentation à quai permet de réduire l'impact sur la biodiversité donc on considère le seuil 1 comme étant « oui » le navire possède une adaptation et en seuil 4 « non » le navire ne possède pas d'adaptation car de fait il aura un impact néfaste sur la biodiversité.

4.4.1.3.2 Présence d'un scrubber

Contrairement à la présence d'une prise pour l'alimentation à quai scindée en deux seuils, la présence de scrubber sera plutôt découpée en trois seuils afin d'inclure la présence d'une boucle ouverte ou fermée puisque l'impact sur la biodiversité n'est pas le même. Le seuil 4 correspond à la présence d'un scrubber en boucle ouverte, pour rappel, les navires rejettent à même l'océan, les résidus contenus dans l'eau dans laquelle les filtres ont été lavés ce qui est néfaste pour la biodiversité car contribue à l'acidification. Pour les derniers seuils, suite à la lecture des différentes études citées précédemment, il a semblé juste de considérer l'absence d'un scrubber comme ayant un impact modérément réduit sur la biodiversité (seuil 2) et la présence d'un scrubber en boucle fermée comme ayant un impact faible à neutre sur la biodiversité (seuil 1).

4.4.1.3.3 Choix de la peinture antifouling

Pour l'indicateur du choix de la peinture antifouling, il était intéressant de séparer les seuils selon les types de peinture. En dernier seuil, on retrouve les peintures ayant du TBT tributylétain, biocide très néfaste pour la biodiversité et interdit par l'OMI. Ce seuil 4 n'est donc pas censé être atteint par les armateurs s'ils sont conformes aux réglementations. Dans le seuil 3 avec une atteinte plus faible sur la biodiversité on retrouve la peinture antifouling SPC (Self-Polishing Copolymer) de moindre qualité avec une grande quantité de biocides pour le dessous de la coque et/ou les verticaux. Le seuil 2 se concentre aussi sur les SPC mais de meilleure qualité en gamme permettant de relâcher moins de biocides en dessous de la coque et sur les verticaux. Enfin la meilleure solution à ce jour qui existe pour les peintures antifouling semble être les peintures FRC (Fouling Release Coatings) avec du silicone et non des biocides, c'est pourquoi je la place en seuil 1 avec un impact réduit sur la biodiversité.

4.4.1.3.4 Traitement des eaux de ballast

La majorité des systèmes de traitement des eaux de ballast fonctionnent en deux phases : d'abord une séparation mécanique, suivie d'un traitement soit physique, soit chimique. Les technologies les plus répandues sont les systèmes aux ultraviolets (UV) et ceux à électrochloration (EC). Les systèmes UV utilisent le rayonnement UV pour la deuxième phase, tandis que l'électrochloration fait appel à un agent chimique pour neutraliser les organismes biologiques qui est ensuite rejeté dans l'eau. Dans les deux cas, la filtration est généralement utilisée comme première étape de purification. Avec ces informations, le seuil 1 correspond au traitement physique avec des UV puisqu'il permet d'éviter l'ajout d'éléments chimiques tandis que la technique de l'électrochloration se situe plutôt en seuil 2 avec impact modérément réduit sur la biodiversité du fait du rejet de l'eau

chlorée. Il faudrait analyser des études plus précises afin de savoir si le traitement à l'électrochloration devrait se situer en seuil 2 ou en seuil 3. Pour le moment, le seuil 3 reste non rempli et sachant que le traitement est obligatoire selon la réglementation de l'OMI. Le seuil correspond au fait que le traitement a été choisi par l'armateur et qu'il est en cours de validation par l'OMI car « conformément à la règle D-3 de la Convention BWM, les systèmes de gestion des eaux de ballast utilisés afin de satisfaire à la Convention doivent être approuvés par l'Administration en tenant compte des Directives pour l'approbation des systèmes de gestion des eaux de ballast (G8). »¹⁴⁸

4.4.1.4 Trajet du navire

4.4.1.4.1 Vitesse moyenne

Cet indicateur fait partie de ceux qui seront à modifier selon les vitesses optimales du navire. Comme nous l'avons vu précédemment un navire a un intervalle de 2 à 4 vitesses pour lesquelles il optimise son moteur et son carburant et de fait son bruit sous-marin. Lorsqu'on réduit trop la vitesse, le moteur peut faire encore plus de bruit ce qui n'est optimal ni pour le navire ni pour la biodiversité. Ici, l'échelle a été constituée par rapport aux vitesses optimales des navires de la même taille et qui sont autour de 12 à 15 nœuds (selon les données de la vitesse du CII). A quelques détails près sur cette route, les navires auront le même intervalle de vitesses optimales. Cet intervalle serait modifié si on était sur une route beaucoup plus grande pour des navires de grandes taille qui seraient conçus pour être à leur vitesse optimale autour de 17 nœuds.

Pour choisir les seuils je me suis fondée sur les vitesses optimales pour les collisions et le bruit sous-marin principalement afin de prendre en compte au moins ces deux aspects dans la protection de la biodiversité. Le seuil 1 indique donc des vitesses inférieures ou égales à 10 nœuds, en supposant que le navire serait entre 9 et 10 nœuds puisque si la vitesse était trop faible, ce serait contre-productif comme nous l'avons vu. Le seuil 2 comprend les vitesses entre 10 et 13 nœuds, ce qui permet d'inclure une partie des vitesses optimales pour le navire mais permet de limiter grandement les risques de blessures lors de collisions avec les cétacés. Le seuil 3 entre 13 et 17 nœuds a un impact négatif sur la biodiversité même si entre 13 et 14 nœuds cet impact est plus relatif et devient fort à partir de 15 nœuds. Pour cet indicateur un partage des seuils en 5 aurait été intéressant. Le seuil 4 correspond aux vitesses dépassant les 17 nœuds sachant que les grands porte-conteneurs sont souvent conçus autour de 18 nœuds.

4.4.1.4.2 Signature acoustique

Les seuils pour la signature acoustique sont plus complexes à définir que d'autres car on manque de données précises à ce sujet en fonction de l'intensité et de la fréquence du son et en fonction des espèces exposées. Par exemple, les navires peuvent se retrouver à émettre des sons dans la même fréquence que les cétacés mais si ce ne sont pas les intervalles d'intensité dans lesquelles les baleines entendent alors ce n'est pas problématique. Le problème se forme lorsqu'on est dans des décibels hauts avec des basses fréquences au même niveau que le « langage » des baleines. Il a été nécessaire de choisir une société de classification, ici le Bureau Veritas (Annexe 5) parce que l'ensemble des sociétés de classifications ne sont pas unifiées pour déterminer les seuils de danger, de changement de comportement etc face au bruit sous-marin.

¹⁴⁸ [Gestion des eaux de ballast des navires \(imo.org\)](http://imo.org)

En se fondant sur cette classification, le seuil 1 est défini sur l'exemple du graphique « advanced vessel » de Bureau Véritas. Ce niveau correspond aux navires qui veulent observer les cétacés et donc font le moins de bruit possible pour ne pas provoquer un changement de comportement malgré la présence du bruit sous-marin dû à l'hélice et au moteur. Au niveau du seuil 1, on considère que le navire est neutre pour les individus qui entendent le bruit mais ne modifient pas leur comportement. Pour le seuil 2, je me suis appuyée sur le graphique « controlled vessel » du Bureau Véritas correspondant à un navire de commerce qui prête attention au bruit qu'il génère mais provoque une gêne relative mais nécessaire pour que le navire fasse son trajet. Au niveau du seuil 2, le bruit engendré peut masquer la communication entre les cétacés.

A partir du seuil 3, il est plus complexe d'avoir une idée de l'intensité et des fréquences qui provoquent un changement de comportement car les recherches menées sur les baleines et citées précédemment montrent qu'elles ont toutes leur chant sur différentes fréquences. Le seuil 3 reste donc assez flou et prévoit une gêne ou un stress chez les cétacés tandis que le seuil 4 va plus loin en se concentrant sur la fuite des proies et des cétacés. D'après les entretiens menés auprès des experts du bruit sous-marin dans l'entreprise, il se pourrait que le bruit provoqué par les navires n'amène pas jusqu'à la mort comme ce peut être le cas dans le battage de pieux, le minage ou la prospection sismique. Le seuil le plus risqué serait une surdité temporaire qui pourrait entrer dans le seuil 4 mais serait très complexe à analyser et à relier à un navire.

Ces seuils sont agencés autour des impacts sur la biodiversité, or quand un navire remplit le questionnaire, il peut, s'il a les données, connaître au maximum son intensité et sa fréquence à un instant t lors de la prise de la mesure. Les deux premiers seuils peuvent être plus facilement analysables grâce aux graphiques du Bureau Véritas qui nous donnent selon la fréquence et l'intensité, la situation du navire par rapport à la courbe sur le bruit sous-marin mais ce n'est pas le cas des seuils 3 et 4. Objectivement, on ne peut rien conclure, sauf qu'en général plus le bateau va vite, plus il fait de bruit. Avec l'état des connaissances actuelles, on ne peut pas dire s'il gêne beaucoup les cétacés et la flore ni quelle est l'intensité du bruit qu'il émet. On sait seulement qu'a priori le navire ne provoque pas directement la mort des individus, et qu'il est au minimum l'objet d'une légère gêne.

4.4.1.4.3 Collision

Concernant les collisions, les échelles sont complexes à mettre en place du fait de l'absence de données. Il est rare de savoir quand est-ce qu'un navire percute un cétacé puisque le navire en lui-même ne montre pas de signes de cette collision et il est rare que le cétacé reste sur le bulbe du navire (cas en juin 2012¹⁴⁹). Il est en fait très difficile d'affirmer qu'il y a eu collision d'autant plus que ce qui est grave aussi pour les cétacés ce sont les blessures liées à l'hélice. On peut regarder les échouages de baleines et voir si la mortalité est due à un navire mais il sera très complexe voire impossible de remonter jusqu'à un navire précis d'autant plus si la route est très empruntée. Ainsi afin de prendre tout de même en compte cet indicateur primordial, en seuil 1, est noté « On ne nous a fait remonter aucune information concernant une collision » et en seuil 4 « On nous a fait remonter une information », le « on » désignant avant tout le personnel de bord qui a, dans la plupart des entreprises, l'obligation de transmettre ces informations. Réseau Collision, Le Sanctuaire Pélagos et Armateurs de France ont notamment mis en place une procédure en cas de collision avérée ou

¹⁴⁹ Article de presse décrivant le fait divers : oec.corsica/attachment/1798942/

suspectée. Ce formulaire disponible sur internet prend en compte l'accident, le navire, l'espèce de cétacé et l'ensemble des conditions de la collision.

4.4.1.4.4 Rejets huileux

Nous avons compris que légalement il n'est pas possible de rejeter ses huiles dans l'eau donc cet indicateur est très règlementé. De fait, il ne faut pas dépasser le seuil des 15 ppm. Les seuils se divisent en deux pour cet indicateur : le seuil 1 correspond au seuil maximal de 15 ppm tandis que le seuil 4 correspond à plus de 15 ppm rejetés bien que normalement les navires tentent d'être conformes à la réglementation.

4.4.1.4.5 Perte de conteneur

Pour la perte de conteneurs, j'ai à la fois pris en compte le nombre de conteneurs et leur contenant afin de hiérarchiser les effets de la perte pour la biodiversité. Le seuil 4 avec le plus grand impact sur la biodiversité correspond à la perte d'au moins un conteneur avec des produits dangereux, chimiques ou des billes de plastique. Le seuil 3 correspond à la perte d'au moins un conteneur ne contenant pas de matières chimiques ou toxiques. Ensuite, on passe directement au seuil 1 avec aucune perte de conteneur pendant l'ensemble des trajets effectués sur la période qui est le moins impactant pour la biodiversité.

4.4.1.4.6 Temps passé à quai et à naviguer

J'ai séparé les seuils en allant du pourcentage de temps le plus long à quai (seuil 1) au pourcentage de temps le plus court à quai. J'ai aussi pris en compte la présence d'alimentation à quai puisque les navires se branchant limitent la pollution proche des côtes où se trouve une grande partie de la biodiversité. Ainsi le seuil 4 correspond à un impact négatif sur la biodiversité avec le navire se trouvant moins de 40% du temps en escale. Le seuil 3 prend en compte le branchement à quai et prévoit que le navire est à quai entre 40% et 70% du temps. Dans le seuil 2, le navire est plus de 70% du temps à quai sans branchement, il émet donc moins de bruit et de polluants mais n'est pas le plus vertueux, c'est pourquoi le seuil 1 porte sur un navire plus de 70% du temps à quai et avec une possibilité de branchement pour une alimentation électrique.

4.4.1.4.7 Attente avant l'accostage ou retards sur la ligne

Comme nous l'avons vu précédemment, le temps d'attente avant l'accostage dépend de nombreux facteurs et varie considérablement d'une saison à une autre et en fonction des événements géopolitiques. Un retard ou une avance trop importante en dehors de la fenêtre d'arrivée provoque l'attente du navire à l'entrée du port et est néfaste pour la biodiversité et pour l'armateur. L'armateur essaie de le résoudre mais les temps d'attente peuvent varier entre quelques heures et plus de 25h d'attente dans les ports en Méditerranée. Pour former les seuils de cet indicateur, je me suis basée sur les données d'attente générale aux ports de la ligne sachant que ces chiffres varient beaucoup et qu'il est difficile d'en déduire une moyenne. Ainsi, pour le seuil 1 nous avons noté une attente inférieure à 5h, pour le seuil 2 une attente entre 5h et 15h, pour le seuil 3 entre 15h et 25h et pour le seuil 5 une attente supérieure à 25h. Les armateurs ont plus ou moins de difficultés à tenir les délais de livraison et tout dépend aussi des trajets et des ports.

4.4.1.5 Labels et certifications

Préalablement, concernant les seuils pour analyser les labels recensés, il a été nécessaire de séparer ceux qui semblaient les plus pertinents à la recherche d'une part et ceux qui étaient les plus reconnus d'autre part. Est placé en seuil 1, le label Green Marine Europe quelle que soit la note

obtenue (mentionné précédemment). D'un point de vue économique, il peut permettre d'avoir un avantage économique réputationnel et d'avoir de meilleures relations dans les ports. Il n'y a pas de seuil 4 car aucun label n'a d'impact néfaste sur la biodiversité, le seuil 3 correspondant à un armateur qui ne détient aucun label. Pour le seuil 2, deux labels ont été retenus : le Clean Shipping Index et le Green Award et si l'armateur en possède un des deux, il peut valider le seuil 2. Le Clean Shipping Index inclue des critères strictes sur l'environnement et permet des avantages plus ou moins élevés puisqu'il dépend de la demande des clients. Il s'agit d'un outil qui classe les navires en fonction de leur performance environnementale. Le Green Award a un impact écologique élevé et des avantages économiques selon les ports car il permet des réductions sur les droits portuaires. Les trois labels retenus sont ressortis comme étant ceux qui avaient le meilleur impact positif sur la biodiversité et les meilleurs avantages économiques.

Les autres labels analysés mais non retenus pour cette recherche sont la méthodologie Clean Cargo qui n'est pas un label mais seulement un référentiel même s'il est intéressant que les entreprises s'appuient dessus. Parmi les labels on retrouve l'Environmental Ship Index géré par l'Association Internationale des Ports, intéressant d'un point de vue économique pour les navires. Il s'agit d'un indice qui mesure les performances environnementales des navires au-delà des exigences réglementaires. Il est possible de bénéficier de réduction de frais dans certains ports. Enfin on retrouve le Blue Angel qui est un label environnemental allemand qui vient récompenser les services environnementaux, il peut s'appliquer au traitement des eaux usées.

Pour enfin connaître les seuils liés aux certifications, cette étude n'a pris en compte que l'ISO 14 001 dont nous avons déjà parlé et qui a un impact modérément réduit en termes de biodiversité (seuil 2). Comme nous l'avons fait pour les labels, il n'y a pas de seuil 4 mais seulement un seuil 3 si le navire n'a pas de certifications.

4.3.2. Indicateurs de la route maritime

4.3.2.1. Caractéristiques météorologiques et physiques

4.3.2.1.1 Courants marins et météorologie

Pour parvenir à créer une échelle pour analyser cet indicateur, a été évoquée l'échelle de Beaufort. Or la météo varie considérablement au sein d'une même période de temps donc il est très difficile d'établir une moyenne qui serait assez précise. Pour le moment, il semble qu'il faudrait se contenter d'explications assez floues pour décrire chaque seuil mais qui permet cependant d'avoir une meilleure idée du contexte météorologique de navigation pendant la période. Est notamment prise en compte la puissance du vent et des vagues. En seuil 1, il y a « mer et vent favorables à la navigation sur une grande partie de la période » (75 - 100% du temps navigable). En seuil 2, la mer est agitée et le vent est fort sur une faible partie de la période (50 - 75% du temps navigable). En seuil 3, les conditions en mer et le vent fort rendent difficilement navigable la zone étudiée sur la période prévue (25 - 50% du temps navigable). Enfin en seuil 4, la zone de navigation est difficilement navigable sur une grande partie de la période (0 - 25% du temps navigable). Un moyen d'améliorer cet indicateur serait de mesurer le surplus de carburant utilisé face à des vagues puissantes et un vent fort afin de savoir à quel point la biodiversité serait impactée en cas de tempêtes et de navigation difficile.

4.3.2.1.2 Bathymétrie

Comme nous l'avons vu lors de la description de l'indicateur sur la bathymétrie, il est difficile de connaître exactement la profondeur de l'eau sur le trajet du navire. Pour ce faire, il faut utiliser QGIS et géoréférencer la carte de bathymétrie de la zone avec le trajet de la ligne. Nous verrons plus précisément comment procéder dans la partie cas pratique avec le traitement des données. J'ai formulé l'hypothèse selon laquelle le navire impacte plus la biodiversité lorsqu'il est proche des côtes, de ce fait, plus le navire est loin des côtes pendant son trajet plus il va pouvoir se rapprocher du seuil 1. Pour atteindre le seuil 1, il faut que le navire n'atteigne les côtes que pour les escales (sans les longer) et reste plus de 80% du trajet au-delà des 1000 m de profondeur, là où la biodiversité est à plus grande distance des impacts directs du navire et, selon les études, moins dense puisque loin de la lumière du soleil. Le seuil 2 prévoit que le tracé de la ligne permet au navire de rester pendant plus de 50% de son trajet au-delà de 1000 m de profondeur. Le seuil 3 prévoit que le tracé de la ligne oblige le navire à rester dans des profondeurs inférieures à 1000 m pendant plus de 80% de son trajet. Enfin le seuil 4 implique que le tracé de la ligne oblige le navire à longer les côtes jusqu'à 200 m de profondeur pendant plus de 80% de son trajet.

4.3.2.2. Zones traversées

4.3.2.2.1 Adaptation Shore Power - Quai / Port

Pour analyser cet indicateur, on peut penser à deux critères : la présence d'infrastructures nécessaires à l'alimentation à quai et leur disponibilité. Ce dernier a finalement été mis de côté car pour le moment la donnée est trop complexe à recenser mais il serait intéressant de calculer le pourcentage de fois dans les ports, où les navires ne peuvent pas se brancher à quai du fait d'une non disponibilité de la place. Le seuil 1 implique que 100% des ports permettent de se brancher à quai, ce qui est plus facile dans le cas des lignes avec seulement deux ports plutôt que les petites lignes avec plus de cinq ports. Le seuil 2, plus accessible, implique que 50% des ports permettent de se brancher à quai. Enfin le seuil 4 avec un impact néfaste pour la biodiversité implique qu'aucun port ne dispose d'infrastructures nécessaires ou alors que certains ports en ont mais que le navire ne peut pas se brancher à cause du manque d'équipement.

4.3.2.2.2 Tracé de la ligne

Afin de limiter le transfert d'espèces invasives, nous avons analysé le traitement des eaux de ballast mais aussi le tracé de la ligne afin de ne pas naviguer dans des eaux totalement différentes en termes de conditions (pression, température, espèces etc). Il vaut mieux limiter le nombre d'écosystèmes traversés bien qu'il soit difficile de définir le terme d'écosystème et qu'ici il est entendu en un sens plus étendu, c'est-à-dire, que par exemple le littoral algérien de 2000 km est entendu comme étant un seul écosystème par mesure de simplification. Dans les faits, il se peut que ce ne soit pas le cas puisqu'il peut y avoir des microclimats sur le littoral qui créent un écosystème particulier, cependant, compte tenu des contraintes de cette étude nous assumons qu'il s'agit d'un seul et même écosystème. Le seuil 1 prévoit que le navire reste dans le même écosystème tandis que le seuil 2 prévoit que le navire traverse des écosystèmes proches par exemple des littoraux de part et d'autre d'une mer. Si le navire traverse deux écosystèmes différents, il est en seuil 3 et enfin au niveau du seuil 4, le navire traverse plusieurs écosystèmes différents (mers, océans, canaux etc).

4.3.2.2.3 Présence de zone ECA

Par zone ECA, on entend prendre en compte à la fois les zones qui limitent les oxydes d'azote et les oxydes de soufre. Les zones ECA permettent une amélioration des conditions de vie de la

biodiversité marine même si la pollution est toujours présente autour donc il a été décidé de mettre leur présence en seuil 2 et leur absence en seuil 4 puisque leur absence provoque tout de même plus d'acidité dans l'océan. Le seuil 2 a aussi été choisi car certains navires ne prennent pas un carburant moins émetteur mais utilisent un scrubber ce qui n'est pas en faveur de la biodiversité. L'impact sur la biodiversité est cependant considéré comme légèrement plus faible en zone ECA comme nous l'avons vu précédemment.

4.3.2.2.4 Règlementations environnementales des autorités portuaires

Chaque incitation des autorités portuaires en faveur de la biodiversité contribue à sa protection puisqu'elle permet une compensation pour les armateurs. Les critères pour cet indicateur sont divisés en deux parties : les infrastructures disponibles au port et les mesures d'incitation pour les armateurs. Le seuil 1 implique donc que 100% des ports proposent des installations pour l'environnement (tri des déchets, traitement des résidus, traitement des eaux de ballast...). Le seuil 2 réduit cette part à 50%. Et enfin le seuil 4 réduit cette part à moins de 50%. Pour le deuxième critère sur les mesures incitatives, le seuil 1 prévoit que plus de 50% des ports d'escale adoptent des mesures ou incitations pour la biodiversité (limitation de vitesse etc.). Cette part descend à 25% pour le seuil 2 et à 0% pour le seuil 4. Pour cet indicateur, contrairement aux infrastructures nécessaires au shore power, il est plus facile sur les petites lignes avec de nombreuses escales d'avoir des adaptations dans les ports.

4.3.2.2.5 Eaux territoriales

Tout comme l'indicateur sur la météorologie, les seuils définis sont encore assez flous puisqu'il n'y a pas de données accessibles et surtout exploitables pour connaître exactement la part du trajet durant laquelle le navire est dans telle zone réglementée ou une autre. Or plus le navire est dans une zone réglementée et restrictives en matière de politique environnementale, plus il fait attention à la biodiversité une grande partie de son trajet. Pour atteindre le seuil 1, le navire doit passer plus de 75% de son temps de trajet dans des eaux territoriales réglementées et restrictives en matière de biodiversité (par exemple UE, Californie etc). Au niveau du seuil 2, cette part descend à 50% puis à 25% pour le seuil 4 en ayant plus de 75% dans des eaux internationales (haute mer) non réglementées.

4.3.2.2.6 Présence de zones protégées et comportement du navire

Cet indicateur s'appuie principalement sur le comportement du navire. S'il ne traverse pas de zone protégée alors, l'indicateur n'apparaît pas. Ainsi pour limiter l'impact sur la biodiversité, le navire contourne les zones protégées sur son trajet et reste attentif en passant à proximité (baisse de la vitesse, vigilance etc) et atteint le seuil 1. Le seuil implique que le navire traverse la zone protégée mais reste attentif tout le long et mette en place des mesures que nous avons vues précédemment. Ensuite au niveau du seuil 3, le navire passe à proximité de la zone protégée et ne change pas de comportement. Si le navire passe dans la zone protégée sans changer de comportement ni prévenir les autres navires, alors il est en seuil 4 puisqu'il a un comportement néfaste pour la biodiversité marine.

4.3.2.2.7 Présence de zones dynamiques ou statiques

Sur les mêmes arguments que l'indicateur précédent mais centré cette fois-ci sur les zones dynamiques pour les baleines dans les Zones Maritimes Particulièrement Vulnérables (ZMPV). Pour rappel la recommandation dans les ZMPV est de passer entre 10 et 13 nœuds. Si le navire

passé dans la zone dynamique et reste attentif aux signalements sur la présence de baleines et les prend en compte dans ses manœuvres, il entre dans le seuil 1. Au niveau du seuil 2, le navire reste attentif sans agir pour la protection des baleines. Enfin en seuil 4, le navire n'écoute pas les signalements dans la zone traversée quand bien même il s'agit d'une zone dynamique.

4.3.3 Indicateurs du contexte

4.3.3.1 Présence d'aquaculture proche de la route

Pour saisir les seuils de cet indicateur, il faudrait avoir accès à une base de données permettant de connaître l'emplacement exact des lieux où se développe l'aquaculture afin de connaître la distance à laquelle le navire passe du lieu pour estimer l'impact du bruit sous-marin notamment et la vitesse du navire à proximité. Dans cette étude, je ne suis pas parvenue à trouver une base de donnée telle donc les seuils ne donnent pas pour le moment d'indication de distance et restent focalisés sur le nombre d'aquacultures approchées. Dans le seuil 1, la navire n'approche aucune aquaculture, une dans le seuil 2, deux dans le seuil 3 et plus de deux dans le seuil 4.

4.3.3.2 Activités de tourisme

Cet indicateur du point de vue de la biodiversité est complexe à analyser car nous l'avons dit précédemment, avec la présence d'activités carbonées dans le cadre du secteur touristique, les écosystèmes marins sont déjà endommagés. Cependant bien que le seuil 1 implique que le navire ne traverse pas de zone touristique cela ne doit pas amener à tomber dans un autre extrême qui serait d'emprunter par exemple la route du Nord, très peu fréquentée mais qui, de ce fait, est riche en biodiversité et vulnérable (Zhu, 2018)¹⁵⁰. Une fois cette nuance mentionnée, il est possible de citer les espaces considérés selon l'UNWTO (World Tourism Organization)¹⁵¹ comme étant les espaces marins les plus touristiques : la mer Méditerranée (la première destination touristique au monde), la mer des Caraïbes, l'Océan indien notamment avec les îles comme les Seychelles ou les Maldives, la mer de Chine du Sud avec les côtes de la Malaisie, la Thaïlande et les Philippines et enfin les récifs coralliens de l'Océan Pacifique. Si le navire traverse une de ces zones pendant son trajet (moins de 50% de son trajet) il entre dans le seuil 3 et s'il y reste la plus grande partie de son trajet il entre dans le seuil 4 car contribue à la dégradation globale de la biodiversité marine.

4.3.3.3 Fréquentation de la zone

Pour la fréquentation de la zone par le trafic maritime international, je me suis appuyée tout d'abord sur les données de Marine Traffic,¹⁵² site qui permet de connaître le trafic de la flotte mondiale en temps réel. Les seuils commencent à partir du seuil 2 puisque que le navire passe avec quelques navires ou seul, la différence liée à sa pollution est moindre, elle devient plus importante lorsque le navire se retrouve dans une zone très fréquentée. Comme pour les seuils liés au tourisme, il a été nécessaire de chercher à connaître les mers et océans les plus fréquentés par le trafic maritime. On retrouve tout d'abord, les détroits ainsi que les canaux (Hormuz, Malacca, Suez, Panama) mais aussi la Manche avec plus de 500 navires par jour selon le World Economic Forum¹⁵³. A ces zones très fréquentées, on peut rajouter selon Marine Traffic, la mer de Chine méridionale,

¹⁵⁰ Zhu, S., Fu, X., Ng, A. K., Luo, M., & Ge, Y. (2018). The environmental costs and economic implications of container shipping on the Northern Sea Route. *Maritime Policy & Management*, 45(4), 456-477. <https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1443228>

¹⁵¹ [145 key tourism statistics \(unwto.org\)](#)

¹⁵² [MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic](#)

¹⁵³ [These are the world's most vital waterways for global trade | World Economic Forum \(weforum.org\)](#)

l'océan Pacifique Nord, la mer Méditerranée, la mer Baltique, la mer du Nord, le golfe de Mexico et l'océan Atlantique Nord.

4.5 Etape 4 : Pondération des indicateurs grâce à la méthode DELPHI

Tous les indicateurs que nous avons vus permettent d'obtenir une note entre 0 et 4, 0 étant la note que l'armateur obtient lorsqu'il n'a pas rempli une question. Comme nous l'avons évoqué dès l'introduction, il a semblé intéressant de pondérer chaque indicateur car l'indicateur sur le nombre de conteneurs réfrigérés n'a pas le même impact sur la biodiversité qu'une collision, de même pour les impacts directs et indirects. Pondérer les indicateurs permet de faire ressortir les plus importants et de donner plus de poids aux indicateurs demandant un effort plus important aux entreprises afin que d'une période à une autre, elles puissent voir une progression. De plus une des raisons pour lesquelles, j'ai décidé de prendre en compte une pondération par indicateur a été la comparaison avec les autres labels existant qui sont souvent peu enclins à mettre en place une pondération. Cette dernière apporte donc une différence stratégique vis-à-vis des autres labels et permet une vision à la fois plus scientifique et plus proche des ambitions des entreprises d'un point de vue économique.

Pour choisir la manière de pondérer, il aurait été possible de la constituer moi-même en me fondant sur les études lues et les entretiens menés afin de hiérarchiser les indicateurs. Or, je voulais inclure plusieurs acteurs dans cette empreinte afin que chaque acteur puisse apporter sa voix sachant que les enjeux ne sont pas les mêmes du côté des associations, que du côté des navigants ou de l'entreprise. Après avoir analysé en philosophie, *L'Ethique Communicationnelle* ou *Erläuterungen zur Diskursethik* d'Habermas (1991), il m'a semblé très important de prendre en compte un consensus collectif afin d'arriver à la solution la plus adaptée après avoir pris en compte tous les avis. L'éthique de la communication d'Habermas se fonde plutôt sur les normes et leur universalisation. Chaque norme doit satisfaire les intérêts de tout un chacun et être acceptée par les personnes concernées qui sont au courant des conséquences et effets de cette norme. La méthode DELPHI s'est alors présentée comme une possibilité d'inclure un certain nombre de personnes concernées par la question de l'empreinte biodiversité tout en permettant un certain compromis entre toutes ces voix. Il est important de rappeler que la méthode DELPHI reste incomplète puisque la principale concernée, la biodiversité, n'a pas de voix. Pour combler ce manque, je me suis appuyée sur des associations qui représentent les intérêts de la nature mais il pourrait être intéressant d'envisager l'inclusion d'un juriste spécialisé en droit de l'environnement pour représenter la biodiversité comme entité juridique à part entière.

Le terme DELPHI vient du nom de la ville de Delphes en Grèce antique, faisant référence à la Pythie qui déclamait des oracles et annonçait des prophéties. On retrouve ce côté prospectif dans la méthode actuelle. La méthode DELPHI est surtout connue aujourd'hui dans le cadre de la gestion de projet afin de consulter un certain nombre d'experts de la question abordée. Pour l'appliquer il faut tout d'abord sélectionner les experts du comité scientifique et les solliciter plusieurs fois afin de faire apparaître un consensus. En dehors des experts, il faut un analyste ou plusieurs qui communiquent et sollicitent les experts, ils constituent les questionnaires et prennent en compte les remarques du comité. Dans cette étude, il n'y a eu qu'une analyste. Les membres du comité ne se connaissent pas et ne communiquent pas entre eux, ils envoient seulement leur résultat à l'analyste qui les traite et leur renvoie le résultat final, synthèse des résultats de tous les membres du comité.

Les étapes se scindent en différentes parties. Il faut au préalable constituer le questionnaire puis envoyer les consignes de pondération claires aux membres du comité, une fois tous les membres définis et engagés dans le processus. Lorsque tous les experts ont donné leur avis sur la pondération, l'analyste fait la moyenne des réponses et renvoie le résultat final aux experts afin qu'ils le valident et corrigent au besoin quelques détails. Un résumé de cette méthode peut être vu en annexe 9.

Pour réaliser le comité, j'ai choisi des experts faisant face à différents enjeux. Ce qui primait avant tout était le cadre de travail des experts et leur métier, les autres critères sociologiques n'ont pas été considérés (genre, âge, catégorie socio-professionnelle ou autres). Il serait intéressant de regarder leur impact dans l'étude si l'échantillon était plus grand. J'ai décidé de choisir 4 personnes en entreprises (anonymes) et 4 personnes provenant du monde de la recherche ou du monde associatif (IFAW, Surfrider, Green Marine Europe, Ifremer). Pour permettre une plus grande diversité dans les personnes sélectionnées en entreprise, j'ai choisi de m'adresser à deux experts de la biodiversité et du climat, un expert en Recherche & Développement axé sur les sujets de décarbonation et de bruit sous-marin et un commandant engagé pour la biodiversité. Après leur avoir expliqué le but de la recherche, j'ai pu leur envoyer une première version du questionnaire avec l'ensemble des indicateurs décrits auparavant ainsi que des colonnes permettant d'accorder entre 1 et 4 points à chaque indicateur. Les résultats obtenus auprès du comité seront explicités dans la partie suivante.

5. Résultats

Dans cette partie, nous allons pouvoir appliquer la méthodologie explicitée dans la partie 4 en utilisant un cas concret, celui cité en introduction, le navire Y de petite taille (809 EVP) sur la route Z en Méditerranée occidentale. Nous allons tout d'abord recenser les données et les analyser puis expliciter la pondération du comité d'experts de la méthode DELPHI avant de pouvoir analyser le résultat de l'empreinte et citer l'ensemble des limites et biais de cette étude et méthodologie. L'intérêt d'appliquer la méthode à un navire permettait de voir en pratique si cette méthode était réalisable et abordable avec l'ampleur des données à disposition à l'heure actuelle. Bien évidemment, l'ensemble de la flotte mondiale n'a pas le même accès aux données, ni les mêmes méthodes de traitement mais il semblait très important de connaître la faisabilité du modèle, quand bien même cet exemple ne serait pas représentatif de l'ensemble des données accessibles sur la flotte mondiale.

5.1 Calcul de l'empreinte biodiversité

5.1.1 Traitement des données

Dans cette première sous-partie, je transmets l'ensemble des données correspondant à chaque indicateur et le seuil atteint pour le navire pour chaque indicateur du fait des données fournies. Nous rappelons que ce calcul porte sur un navire Y d'une entreprise X sur la route Z réalisée pour cette étude en Méditerranée occidentale. L'ensemble des données sur lequel je me suis appuyée est en partie public ou anonymisé comme décrit dans la partie 3.

5.1.1.1 Indicateurs du navire

5.1.1.1.1 Fiche technique du navire

Le premier indicateur était découpé en trois sous-indicateurs et portait sur l'opérateur du navire. Dans cet exemple, il s'agit d'un navire en propriété de l'armateur X qui a participé à Green Marine Europe pour l'ensemble de sa flotte en propriété et a obtenu une note supérieure à 3/5. L'armateur X a rempli aussi EcoVadis et a obtenu une note supérieure à 80/100 en 2023 à la partie environnement. Enfin le rapport RSE de l'entreprise mentionne de nombreuses actions en faveur de la biodiversité (plus de dix projets en faveur de l'environnement dans le monde) et des partenariats avec différents organismes pour l'exploration des océans¹⁵⁴. Pour cet indicateur le navire remplit le seuil 1.

Le navire a un pavillon portugais donc qui fait partie de l'UE et remplit les critères du seuil 1. Le navire a été construit en 2008 et la quille a été posée à la même date, il dépend donc du régime de Tier I avec une quille posée entre 2000 et 2010 pour les réglementations sur les NOx (seuil 3). Concernant le nombre de conteneurs réfrigérés, le navire en possède 150 sur 809 conteneurs donc il a 18,5% de conteneurs réfrigérés et remplit le seuil 3. Il consomme du VLSFO qui émet du soufre à 0,5% (seuil 3) et respecte la réglementation sans aller plus loin, volontairement, en réduisant la quantité de SOx (seuil 3). Il consomme entre 21 et 23 tonnes de fioul par jour selon la source de donnée 1 et 36 tonnes par jour selon la source de données 2 considérée comme étant en vitesse maximale en raison des retards. Comme nous l'avions mentionné précédemment, on se concentre uniquement sur le carburant consommé en temps « normal », il remplit donc le seuil 2.

Concernant le rapport entre tonnes transportées par kilomètre et le CO2 émis, je me suis appuyée sur le pourcentage de CII que j'ai calculé sur la période exacte et la route empruntée par le navire Y et j'arrive à 127% avec 7% d'erreur en reprenant les calculs décrits dans l'indicateur du CII. Certaines données étaient manquantes pour compléter le calcul. Cependant, étant au minimum à 119% cela signifie selon l'échelle des navires par rapport au pourcentage de CII que le navire est peu efficace (seuil 4). Enfin, pour conclure sur les indicateurs rentrant dans la fiche technique du navire, le personnel navigant est sensibilisé à 100% dans l'entreprise X donc on entre ici dans le seuil 1.

5.1.1.1.2 Emissions

Pour les calculs des émissions j'ai repris les tableaux de carburant utilisé par trajet et les tableaux de facteurs d'émission. En utilisant la formule citée et développée dans la 4.4.1.2.1, j'ai trouvé ces résultats :

Type d'émission	Quantité d'émission	Seuil atteint
Particules fines (um)	0,3586393	2
NOx (g/ton)	3,9931887	2
SOx (g/ton)	0,47893	1
CO2 (tons of CO2e WTW)	211,00	1

¹⁵⁴ Rapport RSE anonymisé

Enfin pour le résultat général du CII j'ai utilisé la donnée obtenue sur la note du CII du navire sur cette ligne, qui est E (seuil 4). Cette note peut s'expliquer par le fait que le navire est très petit et qu'il passe beaucoup de temps à quai sans réaliser de grandes distances.

5.1.1.1.3 Technologies à impact sur la biodiversité

Selon les données auxquelles j'avais accès dans la fiche technique du navire, il n'a ni prise pour l'alimentation à quai (seuil 4), ni scrubber (seuil 2). Concernant, par ailleurs les peintures antifouling qu'il utilise, il s'agit de peintures SPC (Self-Polishing Copolymer) avec une moindre qualité pour le dessous de la coque et une meilleure qualité pour les verticaux. Pour le navire Y, l'armateur utilise deux types de SPC différents dont un qui utilise plus de biocides que l'autre. Or dans les seuils, si le navire utilise des SPC de moindre qualité que ce soit pour le dessous de la coque ou les verticaux, il reste au seuil 3. Enfin, concernant le traitement des eaux de ballast, l'entreprise X utilise la filtration mécanique et la radiation par ultra-violets (seuil 1).

5.1.1.1.4 Trajets

La vitesse moyenne du navire est de 13,5 nœuds et il a une efficacité optimale entre 12 et 15 nœuds. Cette donnée provient du logiciel Marine Traffic. Ce navire aurait la possibilité d'aller moins vite étant donné son intervalle optimal donc, il reste au seuil 3 entre 13 et 17 nœuds. L'indicateur qui suit est la signature acoustique du navire, cette donnée est inexistante car non évaluée pour le navire Y donc, puisqu'aucun seuil n'est rempli, cet indicateur rapporte 0 point. D'après les experts de cette question, on ne peut objectivement rien conclure si ce n'est que le bruit est au minimum à l'origine d'une gêne et au maximum peut faire fuir les proies compte tenu de sa vitesse. Pour les collisions, on ne nous a fait remonter aucune information et aucun document (seuil 1). Il en va de même pour les rejets huileux (seuil 1) et pour la perte de conteneur qui est à 0 pour ce navire sur cette route pendant la période donnée (seuil 1). Le navire passe entre 70% et 80% de son temps à quai selon le chef de ligne (seuil 2) et a un retard considéré entre 5h et 15h (seuil 2) sachant que cette dernière donnée est un intervalle complexe à obtenir puisqu'il s'agit d'un élément stratégique concurrentiel et qu'elle varie beaucoup.

5.1.1.1.5 Labels et certifications

Pour conclure sur le traitement des données du navire, il a comme label le Green Marine Europe comme cité précédemment dans le cadre de l'opérateur (seuil 1) et est certifié ISO 14 001 au même titre que les autres navires de la flotte de l'entreprise X (seuil 2).

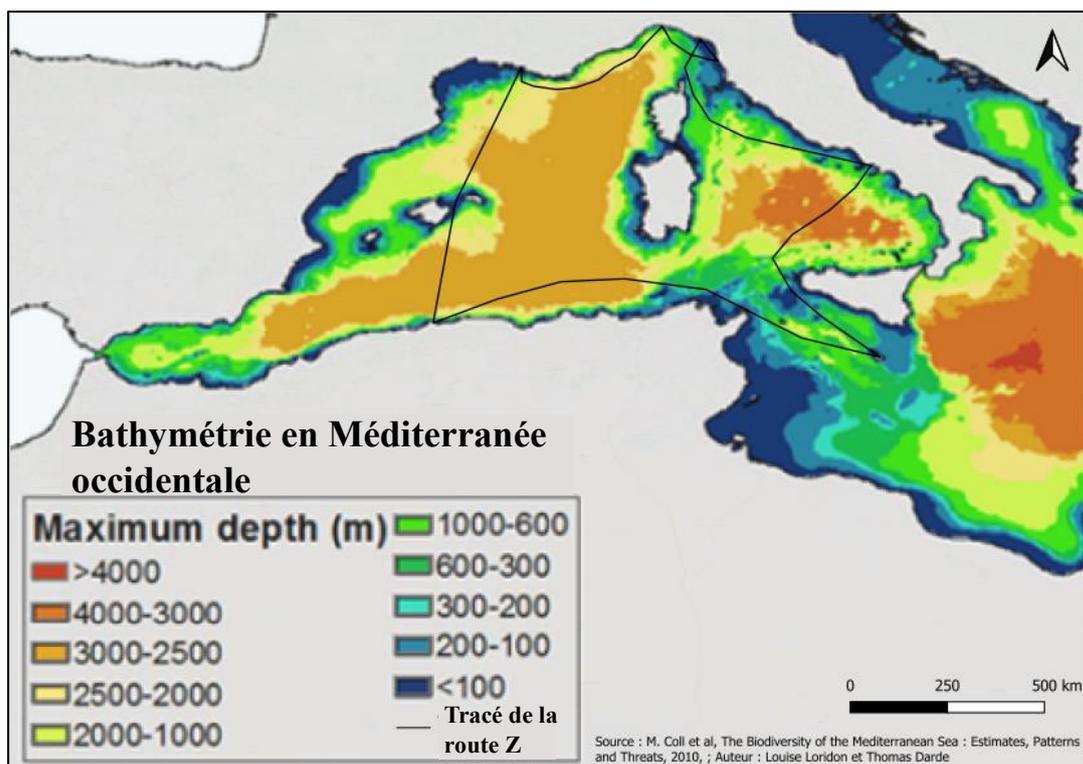
5.1.1.2 Indicateurs de la route maritime

5.1.1.2.1 Caractéristiques météorologiques et physiques

Tout d'abord, concernant les courants marins et la météorologie sur la période j'ai obtenu des données de la part de différents membres de l'équipage. Le chef de ligne a indiqué que la moitié de l'année en hiver au Sud de Marseille les vagues et les vents étaient forts. Il est très difficile de trouver des sites permettant de connaître la météorologie dans le passé pour la zone de la Méditerranée donc je me suis adressée à un spécialiste du centre de contrôle qui indiqua que sur la période le navire a été impacté par la météo pendant 4 jours, le 7 et le 8 janvier à cause d'un fort mistral empêchant d'arriver à Marseille (retard de 15h), le 20 janvier et le 6 mars à cause d'une forte mer obligeant le navire à changer de cap pour mieux prendre les vagues. Le navire aurait été relativement épargné sur cette période malgré la météorologie complexe puisqu'il était souvent à

quai lorsque les tempêtes soufflaient sur le bassin. Avec ces informations, j'ai décidé d'entrer le navire dans le seuil 2.

Ensuite, pour connaître la profondeur du trajet et le pourcentage de temps passé en-dessous de 1000 m de profondeur, j'ai cartographié cette donnée à partir d'une carte contenue dans une étude citée précédemment (Coll et al, 2010, Annexe 2). Dans le logiciel de géomatique QGIS, j'ai géoréférencé la carte de bathymétrie de l'étude dont on ne connaissait pas la projection. J'ai fait le choix de poser 10 points sur la carte qui semblait correspondre à la projection EPSG 4326. Il a été nécessaire de créer, ensuite, une couche de points avec les ports d'escales et le trajet du navire entre les ports d'escales en se fiant au tracé de la ligne (Annexe 1). J'ai utilisé l'outil « Mesure » pour connaître la distance entre deux points sur une carte afin de calculer la distance du trajet du navire en eau peu profonde (fixée à moins de 1000 m). Il a été nécessaire de l'appliquer à l'ensemble du trajet pour enfin pouvoir calculer le pourcentage de distance passé dans une profondeur inférieure à 1000 m. Le total du trajet avec une profondeur inférieure à 1000 m est de 1 945 611 m soit 1 050 545,9 miles nautique et le total du trajet est de 3 846 066 m soit 2 076 709,5 miles nautique. Le résultat est de 50,59% passé avec une profondeur inférieure à 1000 m (seuil 2). La carte finale est ci-dessous.



5.1.1.2.2 Zones traversées

Sur la route Z, deux ports, Marseille et Malte possèdent des infrastructures permettant de brancher le navire à quai afin de l'alimenter en électricité. Cependant, comme le navire n'a pas d'équipement pour se brancher, il reste au seuil 4 malgré les quelques aménagements présents sur la route selon l'Agence Environnementale Européenne (Annexe 10). La ligne étant en boucle en Méditerranée occidentale, il a été considéré qu'il ne s'agit pas d'un seul écosystème mais d'écosystèmes relativement proches en termes de conditions de pression, météorologiques et de

température (conditions douces et tempérées selon la WWF¹⁵⁵) dans cette zone de la Méditerranée (seuil 2). Selon l'ensemble des études lues dans le cadre de cette recherche, il semblerait que la Méditerranée forme un écosystème relativement homogène mais des études plus poussées et axées sur certaines côtes montrent bien la diversité au sein de cet ensemble. Pour le moment et jusqu'en 2025, la Méditerranée n'est pas une zone ECA donc la ligne n'en traverse pas (seuil 4).

En ce qui concerne les réglementations spécifiques à l'environnement et à la biodiversité dans les autorités portuaires, il a fallu regarder chaque sites des ports afin de trouver des éléments. Pour les ports de Marseille¹⁵⁶ et Malte¹⁵⁷, j'ai trouvé différents engagement pour l'environnement (déjà avec la présence des infrastructures). En particulier à Marseille, l'économie circulaire se développe ainsi que certains points sur la question de la biodiversité dans le port. A Malte, il y a une politique de contrôle et de prévention de la pollution marine. Pour Livourne¹⁵⁸ et Gêne¹⁵⁹, quelques initiatives sont mentionnées sur les sites. On retrouve notamment sur le site internet de l'autorité portuaire de Livourne le rapport RSE du port et un plan d'énergie verte pour le port de Gêne bien qu'il n'y ait pas de mention d'infrastructures pour l'environnement. Enfin, pour Naples¹⁶⁰, Alger¹⁶¹ et La Spezia¹⁶² rien n'a été trouvé à ce propos sur les sites des autorités portuaires. On ne passe donc pas le niveau des 50% des ports avec des infrastructures et des mesures pour l'environnement donc on reste au seuil 4 pour cette route.

Les données de l'indicateur des réglementations des eaux traversées ont été très complexes à trouver et pour le moment nous pouvons seulement affirmer que le navire passe par des ZEE (zones économiques exclusives) uniquement et non la haute mer ou eaux internationales. Il traverse uniquement les eaux de la France, de l'Espagne, de l'Algérie, de l'Italie (et pas de Monaco). Le navire se situe approximativement 50% du temps sous réglementation UE et 50% du temps sous réglementation OMI lorsqu'il passe dans la ZEE de l'Algérie. Je me suis notamment servie de la convention de Montego Bay¹⁶³, la convention des Nations Unies sur le droit de la mer pour connaître l'espace des eaux territoriales mais aucune carte permettant de connaître l'espace marin de l'UE n'a été fournie. Le navire est donc au niveau du seuil 2.

En ce qui concerne les zones protégées par lesquelles le navire passe on retrouve bien évidemment le Sanctuaire du Pélagos cité à de nombreuses reprises lorsqu'il passe à proximité de La Spezia, de Livourne et de Gêne. Pour le moment la Compagnie directive 26 ne s'applique qu'aux navires français or le pavillon du navire est portugais donc la décision revient à la ligne. Entre février et mars 2024, le navire allait à des vitesses variant entre 10 et 16 nœuds en entrant dans le Pélagos. Par principe de précaution, la ligne ne semble pas donner l'ordre de ralentir, il a semblé préférable de l'inclure au niveau du seuil 4 (ne change pas de comportement). Le navire Y n'est pas équipé du système REPCET donc il n'est pas alerté par les autorités ou les autres navires s'il y a des baleines. Enfin, le dernier indicateur de la ligne porte sur la présence de ZMPV qui dépend aussi

¹⁵⁵ [La Méditerranée, une mer sous pression | WWF France](#)

¹⁵⁶ [Projet stratégique 2020-2024 \(marseille-port.fr\)](#)

¹⁵⁷ <https://www.transport.gov.mt/maritime/local-waters/maritime-pollution-prevention-and-control-125>

¹⁵⁸ <https://www.portaltotirreno.it/autorita-sistema-portuale/>

¹⁵⁹ <https://www.portsofgenoa.com/en/sustainability-en/green-port-en.html>

¹⁶⁰ <https://adsptirrenocentrale.it/adsportorto-di-napoli/#1547206030084-cba5805a-0b78>

¹⁶¹ <https://arabseaports.com/algeria-ports/alger>

¹⁶² <https://www.aivp.org/en/aivp/our-members/directory/autorita-di-sistema-portuale-del-mar-ligure-orientale-porti-la-spezia-e-marina-di-carrara/>

¹⁶³ [Convention de Montego Bay \(CNUDM\) et droit de la mer — Géoconfluences \(ens-lyon.fr\)](#)

de la décision de la ligne et est plus située proche de l'Espagne et à l'ouest du Sanctuaire du Pélagos. Sur Marine Traffic, la vitesse dans cette zone est notée comme étant sur la période entre 11 et 13 nœuds ce qui dénote d'une décision de ralentir (seuil 1).

5.1.1.3 Indicateurs du contexte

Les trois derniers indicateurs ont été complexes à analyser car les données ne venaient ni de l'entreprise ni de bases de données accessibles ce qui fait qu'elles sont parfois incomplètes. Même si elles ne reflètent pas l'ensemble de la réalité, elles permettent de l'approcher et de donner une idée de l'ordre de grandeur du nombre d'aquacultures ou de ce que rapporte la Méditerranée sur une année en termes de PIB relié au tourisme. Pour sélectionner la présence des aquacultures dans cette zone j'ai repris la carte réalisée par la WWF (2018), en annexe 11, sur les aquacultures présentes dans les parcs de protection de la biodiversité. Cette carte ne recense pas toutes les aquacultures mais permet de donner une idée de certaines aquacultures présentes dans le bassin méditerranéen occidental. Certaines sont notamment situées près de Marseille, Malte, Livourne et La Spezia¹⁶⁴. Cet indicateur a donc été classé pour le navire comme dépendant du seuil 4, selon lequel le navire approche plus de 3 aquacultures pendant son trajet, étant près des côtes. Il semble pertinent de considérer la zone comme fructueuse en termes de production de poissons et de crustacés puisque selon le Plan Bleu, l'aquaculture constitue un rôle majeur dans la région avec une croissance annuelle moyenne de 5% entre 1994 et 2015¹⁶⁵.

Concernant l'indicateur sur les activités de tourisme, le navire se situe en mer Méditerranée et est donc au niveau du seuil 4 puisque la Méditerranée est la première destination touristique au monde. Selon les données de la WWF l'économie de la Méditerranée tirée de la production en mer est de 450 000 000 de dollars, la plaçant ainsi en 5^e position de la plus grande économie de la région¹⁶⁶. Elle représente 1% de la surface des océans mais constitue environ 20% du produit marin brut (GMP). Les activités touristiques représentent une très grande part de ce GMP, environ 92%, ce qui révèle l'importance du tourisme dans cette région, justifiant le seuil 4. Etant donné les impacts étudiés des activités touristiques motorisées marines, il semble juste que cet indicateur se situe en impact néfaste envers la biodiversité marine.

Enfin pour conclure sur les données et la complétion des indicateurs, il a été nécessaire de prendre en compte la fréquentation de la zone par des navires de tous types. La mer Méditerranée est une zone très fréquentée par les navires. Selon le site Marine Traffic, il existe plus de 1 142 000 routes / 1,22 km² / an sur la zone en Méditerranée occidentale en 2023 (Annexe 12). Il est possible sur ce site d'avoir accès à la densité des navires sur une année¹⁶⁷. Afin de compléter ces informations j'ai aussi analysé les cartes disponibles de la WWF sur la mer Méditerranée et le trafic maritime en 2017¹⁶⁸. Cette carte ne prend en compte que les navires de transport de marchandise et non tous les autres types de navire (passager, roulier, vraquier, pétrolier, de plaisance etc.) (Annexe 13). Le fait de ne pas prendre en compte tous les types de navires peut expliquer en partie la différence de routes maritimes sur une année entre la donnée de Marine Traffic et celle de la WWF. Il faut aussi prendre en compte la différence de date à laquelle la donnée a été sélectionnée puisque la WWF indiquait

¹⁶⁴ [Aquaculture | WWF \(wwfmmi.org\)](https://www.wwfmmi.org/)

¹⁶⁵ [Aquaculture en Méditerranée - Plan-bleu : Environnement et développement en Méditerranée \(planbleu.org\)](https://www.planbleu.org/fr/plan-bleu/le-plan-bleu/le-plan-bleu-en-mediterranee)

¹⁶⁶ [WWF reviving_mediterranean_sea_economy_full_rep_lowres.pdf \(panda.org\)](https://panda.org/fr/WWF-reviving-mediterranean-sea-economy-full-rep-lowres.pdf)

¹⁶⁷ [MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic](https://www.marinetraffic.com/)

¹⁶⁸ [Maritime traffic | WWF \(wwfmmi.org\)](https://www.wwfmmi.org/)

justement en 2017 que le trafic maritime serait amené à augmenter de 4% par an. Etant donné que le trajet est situé exclusivement en mer Méditerranée, très fréquentée, ce dernier indicateur est au niveau du seuil 4.

5.1.2 Compte-rendu du comité avec la méthode DELPHI

Une fois les seuils de chaque indicateur trouvés pour mon étude empirique sur un navire, il ne reste que leur poids à connaître afin de la pondérer et ensuite de les additionner pour obtenir la note finale de l'empreinte biodiversité. Chaque questionnaire avait été envoyé sans les données avec seulement le nom des indicateurs et l'explication de leur impact sur la biodiversité et sur le coût pour l'entreprise si elle décidait de s'améliorer. Les consignes du document indiquaient l'objectif de la pondération : prioriser les indicateurs selon des critères et évaluer la méthodologie de l'empreinte biodiversité. D'autres informations étaient présentes afin de rappeler le contexte de la recherche. Notamment, on y retrouvait la description de leur rôle en tant que membre du comité et des conseils afin de donner des exemples de critères à prendre en compte lors de la pondération. Ensuite le tableau était présenté de telle sorte que chaque membre devait cocher une case pour chaque indicateur entre 1 (détail), 2 (à considérer), 3 (important) ou 4 (essentiel). Pour chaque indicateur des cases étaient prévues pour remplir les critères pris en compte ainsi que des éventuels commentaires. Ils avaient plus d'un mois pour réaliser cette pondération.

Il aurait été possible de laisser le champ libre aux experts pour le choix de l'échelle (avec des niveaux par exemple entre 1 et 20 ou allant même de 1 jusqu'à 100) et ensuite convertir chaque échelle à une échelle à 4 niveaux comme celle que nous avons déterminée. L'avantage de cette méthode est que le comité n'est pas influencé et plus de nuances sont possibles. Cependant, je tenais à aiguiller les experts afin qu'ils comprennent bien leur rôle et que la tâche ne soit pas trop chronophage pour eux. Par ailleurs, il me semblait préférable de tenter une première fois de voir comment des experts de différents milieux utiliseraient une même échelle pour décrire les impacts du transport maritime sur la biodiversité marine.

Une fois tous les questionnaires reçus, j'ai pu les comparer et répondre aux questions que les membres avaient. Les conseils des membres ont été intégrés dans la deuxième version pondérée avec la moyenne de leurs avis avant de leur renvoyer la deuxième version. Un certain nombre de points ont notamment été très intéressants à noter lors de la première version de la pondération. Parmi les remarques, certaines méritent d'être mentionnées dans cette étude car elles permettent de mettre en perspective les indicateurs choisis. Un des membres a notamment mentionné le fait que les carburants alternatifs n'ont pour le moment pas été cités dans cette étude, ce choix a été justifié en expliquant que l'on considère complexe l'usage des seuls carburants alternatifs à l'heure actuelle. Sur la question du rapport entre tonnes transportées par kilomètre et émissions de CO₂, une partie des experts suggérait d'ajouter un indicateur portant seulement sur les tonnes transportées (2/8).

Une fois les commentaires analysés et les notes attribuées, il a été nécessaire de trouver une méthodologie permettant d'intégrer les divergences d'opinion concernant les indicateurs tout en les moyennant afin que chaque avis ait le même poids. L'idée est d'obtenir un résultat le plus fidèle possible au comité tout en dispersant les notes afin d'obtenir tout de même des pondérations à 1 et 4 bien que ce soit plus compliqué, étant moyenné que d'obtenir des 2 ou des 3. La difficulté de se retrouver avec des valeurs uniquement autour des 2 et 3 est que l'on perdait l'avantage de la pondération. J'ai pensé à tronquer les valeurs ou à les mettre en perspective par rapport aux écarts-

types calculés. Cependant, il fallait rester le plus possible sur le principe de base selon lequel chaque participant avait le même poids donc j'ai choisi finalement de garder la moyenne exacte avec trois chiffres décimaux afin de rester au plus près des pondérations du comité tout en différenciant les indicateurs le plus possible. Le questionnaire finalisé a été renvoyé au comité pour validation, comme le prévoit la méthode DELPHI et a été accepté comme tel par les membres du comité.

5.2 Analyse des résultats

5.2.1 Analyse du résultat de l'empreinte biodiversité

Comme nous venons de le voir, une fois l'ensemble des indicateurs remplis et pondérés, il est devenu possible de calculer l'empreinte biodiversité finale du navire Y sur le premier trimestre 2024 et sur la route Z. Le calcul de l'empreinte biodiversité est disponible en Annexe 14 avec le total des points par indicateur (note obtenue pour chaque indicateur multipliée par la pondération). Le navire obtient un total de 285,125. La question est de savoir où il se situe dans l'empreinte biodiversité, ce chiffre en lui-même ne représentant pas un impact précis. Pour y répondre, j'ai repris chaque indicateur pour calculer la note minimale et la note maximale.

La note minimale a été calculée en prenant chaque indicateur au seuil 4 rapportant 1 point et multiplié par la pondération. On obtient 117. Pour la note minimale il faut aussi garder en tête qu'il est possible d'obtenir moins que 117 si des cases ne sont pas cochées par manque de données ou autres raisons et qui rapportent 0 point. Cette décision a été prise afin de valoriser les entreprises faisant l'effort d'obtenir des données et des analyses bien que pour le moment leur score ne soit pas assez bon. La note maximale a été obtenue en prenant chaque indicateur au seuil 1 rapportant 4 points et multiplié par la pondération. On obtient 469. J'ai découpé en quatre niveaux cet intervalle [117 ; 469] en reprenant les noms des catégories mises en place par le CDP (Carbon Disclosure Project¹⁶⁹), outil RSE reconnu mondialement et permettant de connaître l'impact des entreprises sur l'environnement à travers les thèmes Climat, Eau, Plastique, Forêt et Biodiversité. Les cinq catégories (en comptant les entreprises n'ayant pas assez de données) sont donc :

Pas assez de données	Découverte	Conscience	Gestion	Direction
0 - 117	117 - 205	205 - 293	293 - 381	381 - 469

J'ai tenu, plutôt que de mettre une note chiffrée, à donner un nom au niveau du navire dans son empreinte biodiversité pour avoir une idée de la maturité de la politique au sein de l'entreprise. Au niveau découverte, le navire est encore au stade de la complétion des données et du début de leur analyse mais comme tout label, l'intérêt est de s'améliorer d'une année sur l'autre. Le stade suivant indique que le navire a pris conscience de son impact a mis en place quelques actions pour le réduire. Le niveau gestion implique que le navire a une vraie politique managériale mise en place pour permettre de réduire son impact et le niveau direction montre l'exemple et indique que l'entreprise essaie d'avoir un impact neutre sur la biodiversité et l'environnement pour le navire analysé en particulier.

Le navire dans cette étude avait obtenu un total de 285, il est donc dans le niveau conscience et à la lisière du niveau gestion. Ce niveau semble assez haut par rapport aux efforts mis en place et

¹⁶⁹ [Home - CDP](#)

aux émissions du navire, cependant il faut garder en tête que cette première version de la méthode privilégie la participation des armateurs avant la performance de ces derniers. De plus, certains aspects de la ligne et technologies du navire (absence de scrubber notamment) semblent avoir été valorisés dans cette étude ce qui correspond à l'objectif initial.

5.2.2 Limites et biais de l'étude

Dans cette sous-partie, nous analyserons les limites de la méthodologie, des données et des indicateurs choisis afin de proposer des pistes d'amélioration pour la version suivante du modèle.

5.2.2.1 Biais dans les données et leur traitement

Tout d'abord, j'ai relevé certains biais dans les données et leur traitement puisqu'au long de l'analyse des données je me suis rendue compte que selon les entretiens, les opinions divergeaient, notamment dans le cas de la consommation journalière de carburant. Un changement dans les données pourrait modifier la note finale et changer de niveau l'empreinte biodiversité du navire. De plus, il serait préférable de travailler sur des données annuelles afin de gagner en précision. Analyser des données sur une plus longue période permet de lisser les anomalies relevant d'évènements ou autres spécificités liées à une période mais ne représentant pas la situation que l'on pourrait nommer « normale » au sens où elle serait une situation sans perturbations.

La difficulté à laquelle j'ai fait face, est que les données sont susceptibles d'être affectées par des changements. Par exemple, on s'en est servi lors des comparaisons avec les émissions d'autres navires dans la même zone au même moment. Les trois derniers indicateurs (aquaculture proche de la route, activités touristiques et trafic maritime) auraient tous gagnés à avoir des données plus précises c'est-à-dire plus adaptées à la période et à la zone étudiées. Il faudrait que ces données fassent l'objet d'une analyse économique afin de connaître réellement leur impact. La difficulté de l'étude est précisément la difficulté de trouver des données adaptées et viables pour appliquer le modèle à la réalité et attribuer une certaine causalité à chaque navire par rapport à son impact sur la biodiversité marine.

Enfin, certaines données pourraient gagner à être issues de la même base de données lorsque c'est possible. Par exemple, dans le cas des données provenant des sites des autorités portuaires pour les réglementations environnementales, des erreurs manuelles dans la recherche des données sont possibles mais aussi le site peut ne pas être à jour ou ne pas indiquer tout simplement ses mesures pour l'environnement sur son site. Il était possible d'obtenir ces données à travers de nombreux entretiens et échanges de mails auprès des personnes compétentes, cependant à une plus grande échelle, lors de l'analyse de plusieurs navires, il faudrait avoir construit une base de données afin de parvenir à les comparer au mieux. Malheureusement, cette base de donnée est le plus souvent inexistante ou éparse chez les armateurs entre les différentes lignes.

5.2.2.2 Biais dans les indicateurs choisis

Le principal biais dans les indicateurs de cette étude peut résider dans la redondance de certains d'entre eux. On peut parler pour certains d'une colinéarité des indicateurs. En effet, les indicateurs se rejoignent et peuvent sembler relativement proches par exemple entre le rapport entre tonnes transportées par kilomètre et émissions de CO₂ et la note au CII. Cependant, ce biais est assumé car il relève d'un choix qui a été explicité chaque fois que des indicateurs pouvaient paraître redondants. Nous n'avons pas produit, dans cette étude, de régression dans laquelle la question de la

multicolinéarité des indicateurs pourrait être très problématique puisque les indicateurs mesureraient le même phénomène amenant à des conséquences sur la variance des coefficients qui augmenterait. Dans cette étude, des indicateurs proches ne sont pas analysés de la même manière dans le calcul des seuils ce qui permet de faire ressortir l'intégralité des informations propres à ces indicateurs bien qu'ils soient colinéaires.

D'autres indicateurs ne semblent pas avoir un impact assez significatif, par exemple, c'est le cas du pavillon qui dans le cadre d'une grande entreprise a un impact surtout pour la fin de vie du navire et son démantèlement. Ce biais a été limité le plus possible grâce à la pondération pour faire ressortir les indicateurs les plus importants mais tout de même prendre en compte les impacts plus faibles sur la biodiversité. Etant donné l'ampleur de la flotte mondiale, proche de plus de 5 500 navires en 2021 (UNCTAD Statistic¹⁷⁰), même un impact moindre est très important à prendre en compte dans le modèle car démultiplié à l'échelle de la planète. Concernant l'importance des indicateurs, j'avais évoqué précédemment le fait que selon la route maritime empruntée, certains pouvaient varier en termes d'importance en fonction de la biodiversité atteinte. Il pourrait être intéressant d'analyser la sensibilité des indicateurs à un changement de route maritime.

Il faut noter que certains indicateurs, comme nous l'avons mentionné précédemment, n'ont pas été abordés en tant que tels dans cette étude alors qu'ils auraient pu avoir leur place du fait d'une prise en compte après l'envoi du premier questionnaire au comité. Je pense en particulier à l'impact de la hausse des températures qui n'a pas fait l'objet d'un indicateur direct bien que pris en compte dans l'indicateur sur le CO2 mais qui a un impact scientifiquement prouvé sur la biodiversité marine notamment à travers les vagues de chaleur qui perturbent le fonctionnement des écosystèmes (TKH, 2020)¹⁷¹. Il aurait aussi été intéressant dans le contexte notamment du bruit sous-marin de prendre en compte la présence des parcs éoliens ou des plateformes pétrolières, responsables de l'augmentation du bruit ambiant en mer. Enfin, il y a aussi l'hypothèse sur laquelle nous nous sommes appuyés tout au long de cette étude fondée sur le taux de chargement à 100% du navire. Or dans la réalité, le navire n'est que rarement chargé totalement et ce taux peut considérablement varier selon les périodes et les escales, influant ainsi sur la vitesse, le poids du navire et d'autres indicateurs. Certains indicateurs semblent en revanche ne pas relever de la décision de l'armateur notamment la météorologie. Même si l'entreprise peut agir sur l'optimisation de la route, il ne faudrait pas induire, en gardant cet indicateur, le fait que les armateurs se dédouanent de certains impacts.

Enfin, sur le choix des indicateurs en lui-même, il se pourrait qu'il soit biaisé du fait d'une part de la connaissance réduite de la biodiversité marine actuelle (manque d'informations concernant des espèces, la manière dont elles vivent etc.) qui ne permet pas de recenser l'ensemble des impacts et d'autre part sur le cadre de la réalisation de cette analyse qui a été faite en parallèle d'un stage en entreprise. Ce biais a été le plus possible réduit en impliquant des experts provenant d'autres milieux que l'entreprise (associations, organisations, laboratoires). Pour conclure sur les indicateurs, il ne s'agit pas d'un biais à proprement parler, mais après réflexion, il serait possible d'organiser différemment les indicateurs entre ceux associés au navire, à la route maritime et au contexte afin

¹⁷⁰ [UNCTADstat | Data Hub](#)

¹⁷¹ Tang Kuok Ho D., 2020, Implications of Climate Change on Marine Biodiversity, The Journal of Agriculture Science

que l'approche soit plus intuitive dans la prévision d'une transmission et d'une vulgarisation scientifique du questionnaire pour les armateurs.

5.2.2.3 Biais dans la méthode

Le biais principal de la méthodologie réside dans la difficulté de rapporter et attribuer les conséquences sur la biodiversité à un seul navire sur une route maritime. Nous avons vu que même dans le cas des impacts directs comme les collisions, il est très difficile de remonter à un navire. Ce biais fait partie des risques nécessaires dans le cadre de ce modèle, il est certes difficile d'affirmer une causalité entre un navire et la fragilisation de la biodiversité mais le modèle n'en est pas pour autant totalement inutile puisqu'il permet d'approcher la réalité des conséquences sur la biodiversité en les rapportant à un navire. Comme nous ne connaissons pas l'impact réel sur la biodiversité, il n'est pas possible pour le moment de savoir de combien mon modèle approche la réalité.

Un autre biais dans la méthode pourrait provenir de la transposabilité de l'étude à d'autres individus qui devraient remplir le formulaire. Afin de limiter ce biais le plus possible, j'ai essayé de bien prendre en compte toutes les remarques du comité pour prévenir les indicateurs complexes afin de les expliciter au mieux pour que l'étude puisse être appliquée par d'autres personnes. Concernant la transposabilité de cette analyse à d'autres pays, certains indicateurs sont très centrés sur une vision européenne puisque par exemple la présence de rapport RSE n'est pas répandue partout dans le monde et constitue cependant un indicateur. Il faudrait adapter cette étude en intégrant plus de diversité régionale dans d'autres domaines que le domaine juridique avec les réglementations évoquées.

Au niveau du total des points, comme nous l'avons évoqué dans la partie résultat, il se peut qu'avec la première version beaucoup de points soient accordés puisqu'il s'agit d'inciter les armateurs à remplir le questionnaire pour, avant tout, être capable de mesurer leur impact afin de le réduire ensuite. Le questionnaire devrait se complexifier au fur et à mesure des versions en intégrant de nouveaux indicateurs (technologies, carburants alternatifs, réglementation etc) pour rester à jour et prendre en compte d'autres impacts. Il deviendra aussi plus difficile de rester au même niveau d'une année sur l'autre, de la même manière que le fait actuellement Green Marine Europe ou CDP qui, chaque année, durcissent leur notation.

Enfin, il existe de nombreux biais dans la méthodologie DELPHI que j'ai essayé de corriger le plus possible en en ayant conscience. Il est intéressant de connaître la différence de notation entre les 4 membres issus de l'entreprise et les 4 membres issus d'associations, organisations ou laboratoires en réalisant une analyse de sensibilité pour regarder l'impact de la pondération sur la note finale. Après analyse, alors que le navire avait obtenu une note de 285 avec les huit pondérations, il obtient une note de 267 avec la pondération de l'entreprise et 303 avec la pondération du laboratoire. Il obtient une note plus haute avec la pondération des experts biodiversité hors entreprise mais si l'on voulait mener cette analyse il faudrait recalculer les seuils pour connaître exactement la nouvelle note du navire. L'écart ainsi créé peut être expliqué par le fait que la plupart des experts de l'entreprise ont eu tendance à considérer des éléments moins importants comparés aux experts des associations qui ont eu tendance à pousser vers le haut la pondération des indicateurs.

6. Conclusion et Discussion

La dernière partie porte sur la conclusion de l'étude et l'ouverture. J'explique d'abord l'ensemble des résultats obtenus et je rappelle la méthodologie et les limites puis dans un deuxième temps, on reprend les objectifs de cette étude et les améliorations possibles pour le développement de la méthodologie de l'empreinte biodiversité. L'ouverture propose une réflexion sur la valorisation de l'empreinte biodiversité dans le cadre de la mise en place des marchés des crédits biodiversité en France et en Angleterre.

6.1 Conclusion générale de l'étude

Dans cette étude, j'ai tenté de mettre en place une méthodologie de calcul d'une empreinte biodiversité appliquée à la Méditerranée occidentale. Cette empreinte biodiversité prenait en compte à la fois des données sur la biodiversité mais aussi le climat. Après l'analyse des différentes méthodologies existantes ainsi que des indicateurs à prendre en compte, j'ai sélectionné quarante indicateurs et sous-indicateurs répondant à des critères. Il fallait qu'ils soient, d'une part, révélateurs d'un certain impact plus ou moins élevé des navires sur la biodiversité et/ou le climat et, d'autre part, qu'ils soient accessibles au niveau des données pour les armateurs. Pour certains d'entre eux, les données sont très complexes à obtenir donc j'ai accepté une certaine souplesse dans le niveau des réponses pour garder l'indicateur le plus scientifique possible comme dans le cas du signalement des collisions et non de l'affirmation d'une collision.

Une fois les indicateurs analysés et décrits, j'ai détaillé l'ensemble des seuils dans lesquels les navires pouvaient se retrouver s'ils avaient les données nécessaires. Afin de finaliser la méthodologie et de la confronter à des experts, j'ai transmis le questionnaire à un comité constitué pour cette recherche afin qu'ils puissent pondérer les indicateurs et les hiérarchiser en fonction de leur impact sur la biodiversité tout en prenant en compte les contraintes pour l'entreprise. Dans un deuxième temps, une fois la méthodologie constituée, j'ai pu l'appliquer à un navire en particulier afin de tester sa faisabilité et d'analyser le résultat obtenu. Le navire obtient une note raisonnable compte tenu des efforts fournis par l'entreprise et aussi de la version du questionnaire qui se veut accessible pour les entreprises afin qu'elles fassent un état des lieux de leurs impacts avant de tenter de les réduire.

Cette étude a pour but de servir concrètement aux entreprises tout en permettant une plus grande protection de la biodiversité. La méthodologie de l'empreinte biodiversité marine permet de couvrir le manque actuel qui existe en ce qui concerne l'analyse de l'environnement marin et est nécessaire pour la mise en place de politiques de réduction de la pollution à l'encontre de la biodiversité puisqu'il semble préférable de connaître préalablement ses nombreux impacts afin de les réduire ensuite. L'empreinte biodiversité permet aussi aux armateurs de faire un état des lieux sur leurs avancées en termes de décarbonation puisqu'elle prend en compte les efforts déjà fournis tout en les replaçant dans un contexte plus général prenant en compte le changement global.

Répondre à ce questionnaire sans contrainte de résultat permet, enfin, de proposer des solutions aux armateurs sur des problématiques liées à la protection de la biodiversité en citant des labels et des alternatives (carburant, opérationnel etc) et en exprimant, le plus clairement possible, les avantages économiques qu'ils pourraient en tirer. La mise en place de l'empreinte biodiversité pourrait impliquer par la suite une contrainte financière pour les entreprises si elles devaient

s'engager à réduire leur impact sur la biodiversité marine, c'est la raison pour laquelle, j'ai essayé d'inclure le plus possible des compensations financières accordées par les autorités portuaires, les Etats ou les organisations. Cette valeur informationnelle permet en même temps de sensibiliser aux différents impacts puisque bien que le bruit sous-marin ou les collisions commencent à être connus, d'autres impacts restent encore assez peu étudiés et soulevés alors qu'ils méritent qu'on y prête attention dès à présent.

La principale limite de cette étude réside dans l'attribution de certaines conséquences à un seul navire. La flotte mondiale est responsable de certains impacts sur la biodiversité marine mais rapporter ces impacts à un seul navire est très complexe. Malgré cette difficulté, j'ai préféré créer une méthodologie bien qu'elle n'approche qu'en partie la réalité afin que les armateurs aient au moins une idée de leur impact et que ce soit le plus possible comparable entre les navires des différentes flottes. Une autre limite peut résider dans la difficulté de trouver des informations au sujet de la biodiversité marine, assez peu étudiée encore dans le monde. Il pourrait être complexe de transférer cette analyse à un autre espace marin que la Méditerranée qui bénéficie de nombreux plans, analyses et parcs permettant d'avoir assez de données recensées pour parvenir à comprendre ce qui compose les écosystèmes de cette zone. Par contre, cette méthodologie devrait être transférable à d'autres contributeurs puisqu'elle reste assez accessible, étant axée sur des indicateurs.

Différentes perspectives s'ouvrent concernant cette étude notamment dans le cadre d'une thèse. Il serait au préalable primordial de retravailler les indicateurs en s'appuyant sur d'autres études et d'autres entretiens avec des experts afin de les détailler au mieux et d'être capable de quantifier l'impact du passage d'un navire sur la biodiversité. Pour ce faire, il pourrait être intéressant de réaliser des études économétriques en s'appuyant sur des grandes bases de données avec un certain nombre de navires et de trajets pour connaître les facteurs qui entrent en compte dans les impacts des navires sur la biodiversité et savoir l'impact des changements. Par exemple, il pourrait être intéressant de regarder précisément la diminution de la vitesse des navires d'un nœud par rapport aux dommages sur les baleines et de savoir en parallèle ce que ça représenterait en termes financiers pour l'entreprise. Ces analyses permettraient de se rapprocher de l'optimum du point de vue de la biodiversité et du point de vue des coûts pour l'entreprise. Afin de faire progresser l'empreinte, il faut aussi prévoir des mises-à-jour régulières des indicateurs, pour prendre en compte les nouvelles réglementations ou différentes technologies et carburants qui arriveraient sur le marché.

Au niveau de la pondération des indicateurs, il pourrait être intéressant de varier les profils des experts et d'en inclure un plus grand nombre afin de se rapprocher de l'équilibre entre protection de la biodiversité et coût pour l'entreprise. Prendre en compte des profils sociologiques différents pourrait permettre d'avoir une vision plus précise de chaque indicateur. Il serait intéressant notamment d'avoir une parité et d'inclure plus de personnel navigant, en gardant en tête que le critère important reste la bonne répartition entre les personnes plus proches des enjeux de protection de l'environnement et celles plus proches des enjeux de l'entreprise. Enfin sur les écosystèmes à analyser, en lien avec l'attention portée actuellement aux green corridors marins¹⁷², routes maritimes ayant pour objectif zéro émissions de CO2, il pourrait être intéressant de cartographier

¹⁷² [Green corridors: Definitions and approaches | Global Maritime Forum](#)

en priorité les écosystèmes des green corridors pour permettre d'inclure aussi une approche biodiversité à l'approche climat.

6.2 Ouverture

Dans cette étude nous n'avons pas abordé la question de la compensation carbone ou biodiversité. En effet, il pourrait être intéressant d'inclure un indicateur qui augmenterait la note si jamais l'entreprise décidait de financer des crédits biodiversité afin de compenser son impact. Ce choix de ne pas inclure cet indicateur a été pris puisqu'il faudrait privilégier le plus possible la réduction de l'impact avant la compensation. Nous souhaitons inciter les entreprises à suivre le plus possible la méthode ERC (Eviter, Réduire, Compenser)¹⁷³ et pour éviter et réduire, une mesure de son impact peut-être un des outils permettant d'atteindre ces objectifs avant la compensation. Pour la question de la compensation, par ailleurs, il faudrait aussi envisager une forme de monétarisation de la biodiversité marine, qui, avec les méthodologies actuelles à disposition en économie semble complexe. On pourrait utiliser le consentement à payer pour les mammifère marins et les paysages sous-marins mais pour une partie des impacts, on se heurte à des limites de l'économie pour donner une valeur monétaire au vivant.

A un certain stade de l'usage de la méthodologie, il pourrait être intéressant d'inclure les crédits biodiversité et inversement l'essor des crédits biodiversité devraient permettre une valorisation des calculs d'empreinte dans le cadre de la mise en place des marchés. Le marché des crédits biodiversité est encore en cours de mise en place mais à ce stade il peut être intéressant de comprendre son fonctionnement. Il se fonde sur le même modèle que les marchés des crédits carbone de manière à diriger les investissements vers des projets qui protègent mais aussi régénèrent la nature une fois qu'il n'est plus possible d'éviter ou de réduire ces impacts. Ils ont été mentionnés pour la première fois en 2022 comme source de financement dans la Target 19 mais ont été poussés lors du lancement d'une roadmap entre la France et la Grande Bretagne en 2023 lors du Sommet pour le Nouveau Pacte Financier Global. La feuille de route est mise en place par l'IAPB (Sylvie Goulard et Dame Amélia Fawcett)¹⁷⁴ et plusieurs initiatives existent déjà dans le monde avec différentes méthodologies.

La méthodologie européenne devrait s'appuyer sur le travail réalisé par Carbone 4¹⁷⁵ et qui se rapproche de la métrique évoquée du MSA.km² dans le modèle Globio du GBS. Dans les grandes lignes, il faudrait définir les actions mises en place dans un projet, évaluer la projection des gains biodiversité et certifier ces gains avec des audits périodiques afin de pouvoir les échanger ensuite sur un marché. Carbone 4 définit trois types de certificats différents : les certificats pour réduire l'empreinte, ceux pour contribuer localement et ceux pour contribuer globalement. Ces crédits biodiversité pourraient permettre de réduire ou de compenser l'impact des entreprises et d'être échangés sur un marché. Cependant, la première étape, avant de chercher à compenser son impact serait de connaître avant tout l'ampleur de son impact et la diversité des impacts, et pour ce faire, l'empreinte biodiversité peut constituer une solution.

¹⁷³ [Éviter, réduire et compenser les impacts sur l'environnement | Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques Ministère du Logement et de la Rénovation urbaine](#)

¹⁷⁴ Les informations concernant les crédits biodiversité proviennent d'une présentation réalisée dans le cadre d'un séminaire en entreprise pour le secteur du transport maritime (2024)

¹⁷⁵ [Carbone 4 - Certificats Biodiversité](#)

Bibliographie

Abadie, M., & Cadi, A. (2020a). Comment et pourquoi mesurer l’empreinte biodiversité des acteurs économiques ? *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, N° 100(4), 72-75. <https://doi.org/10.3917/re1.100.0072>

Alkemade, R., van Oorschot, M., Miles, L., Nellemann, C., Bakkenes, M., & ten Brink, B. (2009). GLOBIO3: A Framework to Investigate Options for Reducing Global Terrestrial Biodiversity Loss. *Ecosystems*, 12(3), 374–390. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9229-5>

Andersen, J. et al (2014). Integrated assessment of marine biodiversity status using a prototype indicator-based assessment tool. *Frontiers In Marine Science*, 1. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00055>

Åström, S., Yaramenka, K., Winnes, H., Fridell, E., & Holland, M. (2018). The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 59, 223-236. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.014>

Aulinger, A., Matthias, V., Zeretzke, M., Bieser, J., Quante, M., and Backes, A.: The impact of shipping emissions on air pollution in the greater North Sea region – Part 1: Current emissions and concentrations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 739–758, <https://doi.org/10.5194/acp-16-739-2016>, 2016.

Balmford A., Crane P., Dobson A., Green R.E. and Mace G.M., (2005), « The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, n°360, pp. 221-228.

Balmford A., Green R.E. and Jenkins M., (2003), « Measuring the changing state of nature », *Trends in Ecology and Evolution*, vol.18, n°7, pp.326-330.

Bella Galil. “Taking Stock: Inventory of Alien Species in the Mediterranean Sea.” *Biological Invasions* 11 (2008): 359- 372; Gil Rilov and Bella Galil. “Marine Bioinvasions in the Mediterranean Sea—History, Distribution, and Ecology,” *Biological Invasions in Marine Ecosystems* (Berlin: Springer-Verlag, 2009): 549-575.

Blondel, J. (2007). “Landscape Ecology in the Mediterranean : inside and outside approaches”. *Natures Sciences Sociétés*, 15(2), 193-194. <https://doi.org/10.1051/nss:2007048>

Cadotte M. , Davies T, Regetz J, Steven W Kembel, Elsa Cleland, and Todd H Oakley. Phylogenetic diversity metrics for ecological communities: integrating species richness, abundance and evolutionary history. *Ecology letters*, 13(1):96–105, 2010.

Carlton, J. (2010). The Impact of Maritime Commerce on Marine Biodiversity, *The brown journal of world affairs*, Volume xvi, issue ii, 131-139

Castellote, M., Clark, C. W., & Lammers, M. O. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.021>

Chen, L., Yip, T. L., & Mou, J. (2017). Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 58, 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.003>

Cochrane, S., Andersen, J. H., Berg, T., Blanchet, H., Borja, Á., Carstensen, J., Elliott, M., Hummel, H., Niquil, N., & Renaud, P. E. (2016). What Is Marine Biodiversity ? Towards Common Concepts and Their Implications for Assessing Biodiversity Status. *Frontiers In Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00248>

Coll M, Piroddi C, Steenbeek J, Kaschner K, Ben Rais Lasram F, et al. (2010) The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. *PLoS ONE* 5(8): e11842. doi:10.1371/journal.pone.0011842

Coll, M., Piroddi, C., Albouy, C., Lasram, F. B. R., Cheung, W. W. L., Christensen, V., Karpouzi, V. S., Guilhaumon, F., Mouillot, D., Paleczny, M., Palomares, M. L., Steenbeek, J., Trujillo, P., Watson, R., & Pauly, D. (2011). The Mediterranean Sea under siege : spatial overlap between marine biodiversity, cumulative threats and marine reserves. *Global Ecology And Biogeography*, 21(4), 465-480. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00697.x>

Crozier R. H., Preserving the information content of species: genetic diversity, phylogeny, and conservation worth. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1):243–268, 1997.

Desrosières A., (2003a), « Les qualités des quantités », *Courrier des statistiques*, n°105-106, pp.51-63.

Dudley N., Baldock D., Nasi R. and Stolton S., (2005), « Measuring biodiversity and sustainable management in forests and agricultural landscapes », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, 360, 457-470.

Dulière V., Baetens K. and Lacroix G. (2020). Potential impact of wash water effluents from scrubbers on water acidification in the southern North Sea. Final project report. Royal Belgian Institute of Natural Sciences. Operational Directorate Natural Environment, Ecosystem Modelling. 31 pp.

Edmonds, N., Firmin, C., Goldsmith, D., Faulkner, R. & Wood, D., 2016. A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin* 108 (1), 5-11.

Ekins P., (2003), « Identifying Critical Natural Capital. Conclusions about Critical Natural Capital », *Ecological Economics*, 44 : 277-292.

Erbe C, Marley SA, Schoeman RP, Smith JN, Trigg LE and Embling CB (2019) The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review. *Front. Mar. Sci.* 6:606. doi: 10.3389/fmars.2019.00606

Faith, D. P. (1992). Systematics and conservation : on predicting the feature diversity of subsets of taxa. *Cladistics*, 8(4), 361-373. <https://doi.org/10.1111/j.1096-0031.1992.tb00078.x>

Folegot T., Gallou R., David L. & Di-Méglio N., 2015, Analyse des Impacts Economiques de scénarios de réglementation du trafic dans le Sanctuaire Pelagos, rapport d'étude Quiet-Oceans, QO.20150612.01.RAP.001.02A, Brest, décembre 2015.

Gannier, A. J., Boyer, G., & Gannier, A. C. (2022). Recreational boating as a potential stressor of coastal striped dolphins in the northwestern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114222>

Haney, J.C., Eiswerth, M.E. (1992). "The plight of cranes: a case study for conserving biodiversity". In: *Proceedings of the North American Crane Workshop*, pp. 612–619

Krebs C.J., (2001), Ecology, San Francisco, Benjamin Cummings, Part 4 pp 385 - 434.

Laist, D. W., Knowlton, A. R., Mead, J. G., Collet, A. S., & Podesta, M. (2001). COLLISIONS BETWEEN SHIPS AND WHALES. *Marine Mammal Science*, 17(1), 35-75. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2001.tb00980.x>

Lähtenmäki-Uutela, A., Repka, S., Haukioja, T., & Pohjola, T. (2017). How to recognize and measure the economic impacts of environmental regulation : The Sulphur Emission Control Area case. *Journal Of Cleaner Production*, 154, 553-565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.224>

Leonard, D., Clarke, K., Somerfield, P. J., & Warwick, R. (2006). The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments. *Journal Of Environmental Management*, 78(1), 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.008>

Levrel H., (2007), Quels indicateurs pour la gestion de la biodiversité, Institut français de la biodiversité, pp 8-24.

Levrel, H., Fossat, J., & Pelletier, D. (2010). Les indicateurs de biodiversité marine et côtière : état des lieux institutionnel. *Vertigo*, Volume 10 numéro 2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.9893>

Magurran, A. E., & McGill, B. J. (2011). *Biological Diversity : Frontiers in Measurement and Assessment*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB04610139>

Mannino, A. M., Balistreri, P., & Deidun, A. (2017). The Marine Biodiversity of the Mediterranean Sea in a Changing Climate : The Impact of Biological Invasions. Dans *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69214>

Molnar, J., Gamboa, R. L., Revenga, C., & Spalding, M. (2008). Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. *Frontiers In Ecology And The Environment*, 6(9), 485-492. <https://doi.org/10.1890/070064>

OCDE (2014), « Émissions d'oxydes de soufre (SO_x) et d'oxydes d'azote (NO_x) », dans *Panorama de l'environnement 2013 : Les indicateurs de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264221802-7-fr>.

Panasiuk, I., & Turkina, L. (2015). The evaluation of investments efficiency of SO scrubber installation. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 40, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.004>

Patil, G.P., Taillie, C. (1977). "Diversity as a concept and its implications for random communities". *Bulletin of the International Statistical Institute* 47, 497–515.

Pauly D. and Watson R., (2005), « Background and interpretation of the 'Marine Trophic Index' as a measure of biodiversity », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, n°360, pp. 415-423.

Pauly*, Watson and Jacki,(2005).Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, Vol. 360, No. 1453, Fisheries: A Future? (Jan. 29, 2005), pp. 5-12 (8 pages) <https://www.jstor.org/stable/30040873>

Polasky, S., Costello, C., & Solow, A. (2005). Chapter 29 The Economics of Biodiversity. Dans *Handbook of environmental economics* (p. 1517-1560). [https://doi.org/10.1016/s1574-0099\(05\)03029-9](https://doi.org/10.1016/s1574-0099(05)03029-9)

Polasky, S., Solow, A., Broadus, J. (1993). "Searching for uncertain benefits and the conservation of biological diversity". *Environmental and Resource Economics* 3 (2), 171–181

Pinay, Gascuel, Menesguen, Souchon, Le Moal, et al.. Eutrophisation. Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Rapport de l'Expertise scientifique collective. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA); Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER); Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA); Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). 2017. fhal-02791790

Pernet F., Gazeau F., 2024. L'acidification des océans : quels effets ? quelles solutions ?, Versailles : Éditions Quæ, 124 p.

Rodrigues, L. C., Van Den Bergh, J. C., & Ghermandi, A. (2012). Socio-economic impacts of ocean acidification in the Mediterranean Sea. *Marine Policy*, 38, 447-456. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.07.005>

Redding D W. and A. Ø Mooers. Incorporating evolutionary measures into conservation prioritization. *Conservation Biology*, 20(6):1670–1678, 2006.

Schipper, A. M., Meijer, J. R., Alkemade, R., & Huijbregts, M. A. J. (2016). The GLOBIO model: a technical description of version 3.5. Consulté à l'adresse Netherlands Environmental Agency (PBL) website: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl_publication_2369.pdf

Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M. et al. Seagrass *Posidonia* is impaired by human-generated noise. *Commun Biol* 4, 743 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02165-3>

Solow, A., Polasky, S. (1994). "Measuring biological diversity". *Environmental and Ecological Statistics* 1 (2), 95–107.

Strobl, E. (2021). Preserving local biodiversity through crop diversification. *American Journal Of Agricultural Economics*, 104(3), 1140-1174. <https://doi.org/10.1111/ajae.12265>

Tang Kuok Ho, 2020, Implications of Climate Change on Marine Biodiversity, *The Journal of Agriculture Science*, [Implications of Climate Change on Marine Biodiversity \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/354111111)

Teixeira, H., Berg, T., Uusitalo, L., Fürhaupter, K., Heiskanen, A. S., Mazik, K., Lynam, C. P., Neville, S., Rodriguez, J. G., Papadopoulou, N., Moncheva, S., Churilova, T., Kryvenko, O., Krause-Jensen, D., Zaiko, A., Veríssimo, H., Pantazi, M., Carvalho, S., Patricio, J., . . . Borja, À. (2016). A Catalogue of Marine Biodiversity Indicators. *Frontiers In Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00207>

Testa, D. (2020). A note on the potential designation of the mediterranean sea as a sulphur emission control area. *Marine Policy*, 121, 104145. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104145>

Tidau, S., & Briffa, M. (2016). Review on behavioral impacts of aquatic noise on crustaceans. *Proceedings Of Meetings On Acoustics*. <https://doi.org/10.1121/2.0000302>

Toscano Domenico, (2023) The Impact of Shipping on Air Quality in the Port Cities of the Mediterranean Area: A Review, Department of Chemical, Materials and Production Engineering, University of Naples, Atmosphere, 14(7), 1180; <https://doi.org/10.3390/atmos14071180>

Vanderlaan, A. S. M., & Taggart, C. T. (2006). Vessel collisions with whales : the probability of lethal injury based on vessel speed. *Marine Mammal Science*, 23(1), 144-156. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2006.00098.x>

Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., De Vlieger, I., & Van Aardenne, J. (2014). Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, 90, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.046>

Vicente, N. (2022). Impact du changement climatique sur la biodiversité marine en Méditerranée. Dans *Presses universitaires d'Aix-Marseille eBooks* (p. 57-70). <https://doi.org/10.4000/books.puam.6181>

Wackernagel, M., & Rees, W. (2017). Our ecological footprint. Dans *Macat Library eBooks*. <https://doi.org/10.4324/9781912281282>

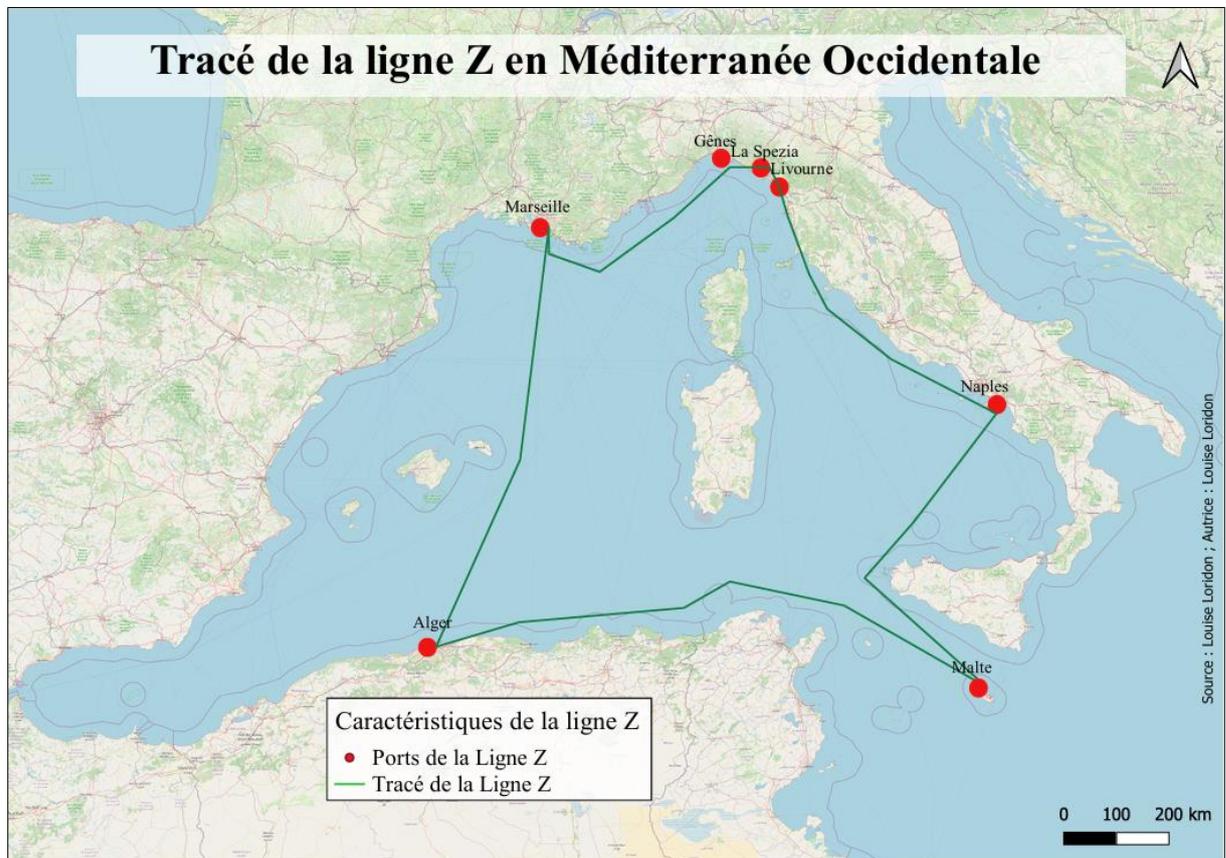
Weitzman, M.L. (1992). "On diversity". *Quarterly Journal of Economics* 107 (2), 363–405.

Zis, T. P. (s. d.). Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A Policy And Practice*, 119, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.003>

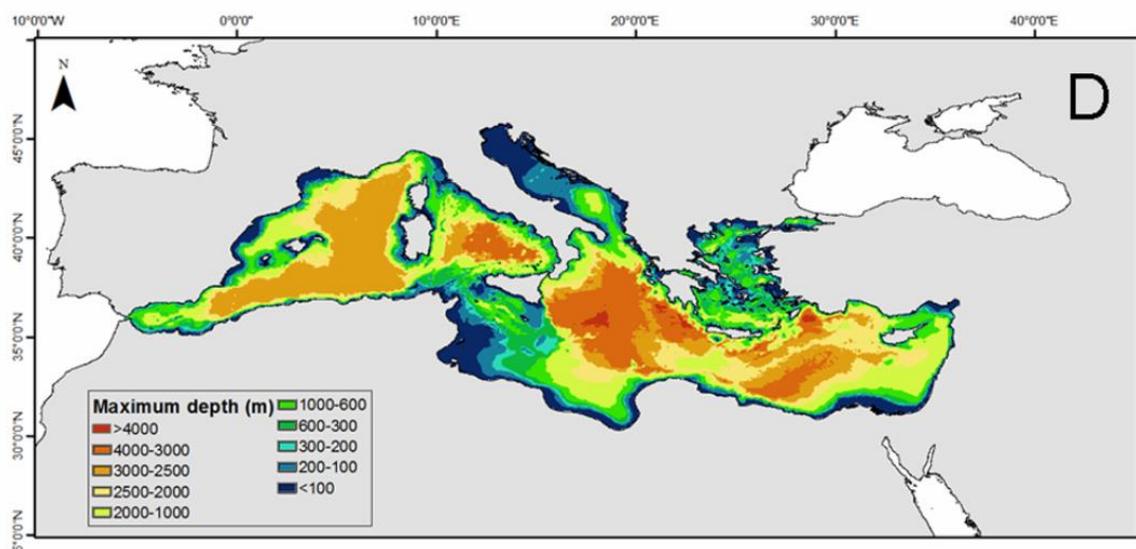
Zhu, S., Fu, X., Ng, A. K., Luo, M., & Ge, Y. (2018). The environmental costs and economic implications of container shipping on the Northern Sea Route. *Maritime Policy & Management*, 45(4), 456-477. <https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1443228>

A. Annexes

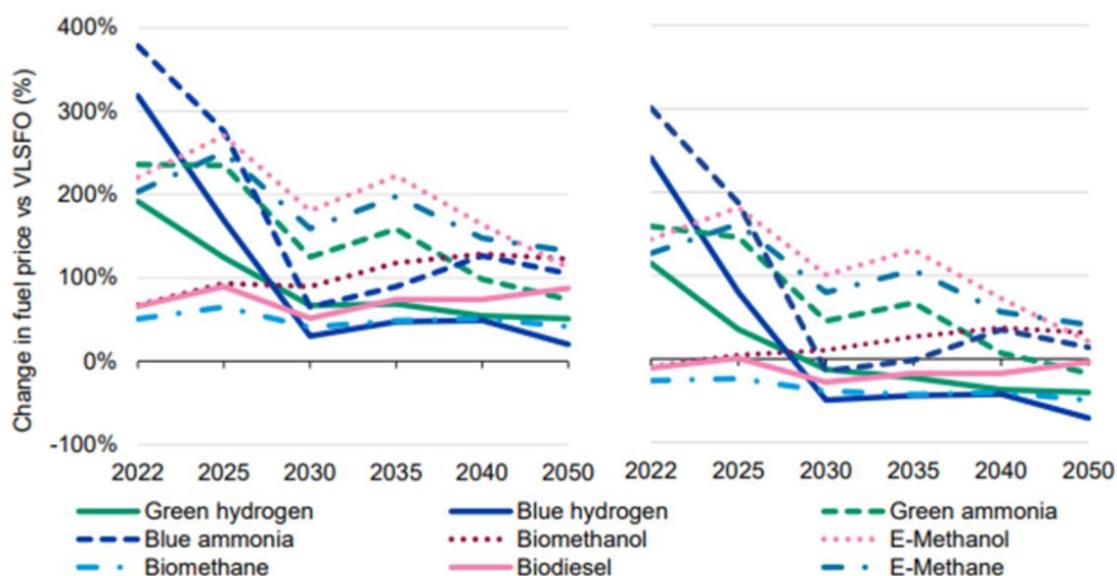
A1. Ligne de l'étude en mer Méditerranée occidentale



A2. Carte de bathymétrie en mer Méditerranée (Coll et al, 2010)



A3. Prédiction des coûts des combustibles par rapport au VLSFO après prise en compte de l'impact des mesures supplémentaires d'efficacité énergétique, sans prix du carbone de 100 €/t (à gauche) et avec un prix du carbone de 100 €/t (à droite) (Source : OMI)¹⁷⁶



A4. Paramètres nécessaires au calcul du CII Référence (Source : OMI¹⁷⁷)

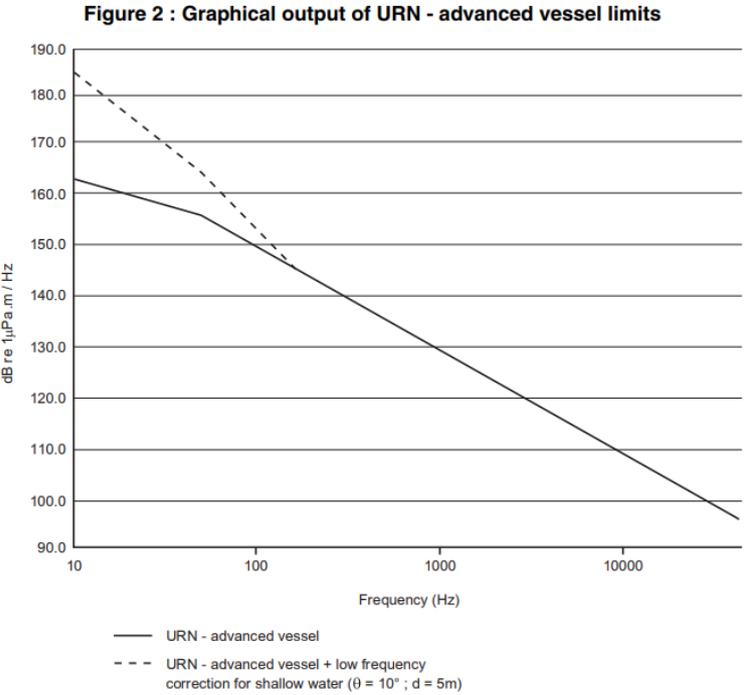
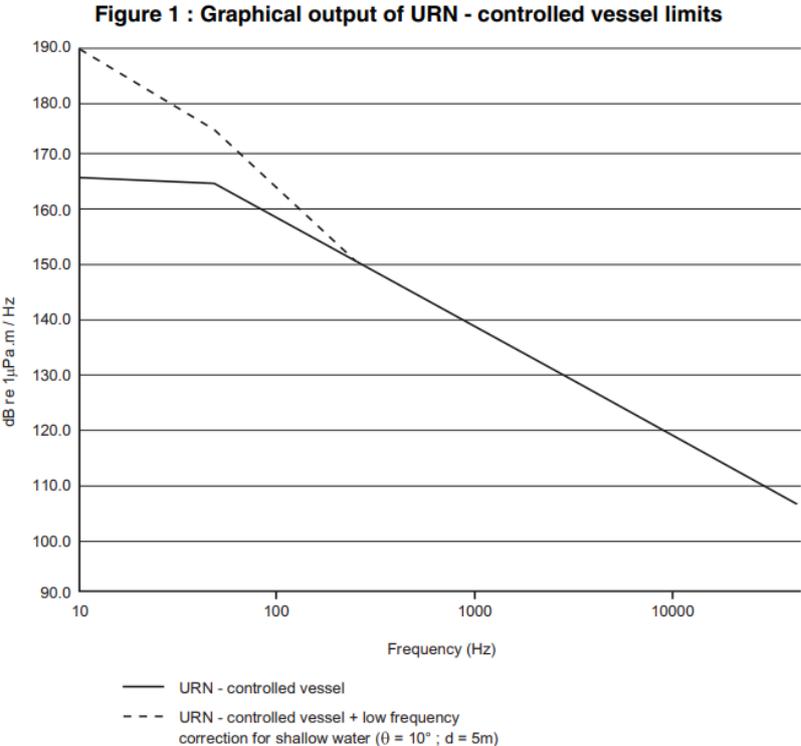
Table 1: Parameters for determining the 2019 ship type specific reference lines

Ship type		Capacity	a	c
Bulk carrier	279,000 DWT and above	279,000	4745	0.622
	less than 279,000 DWT	DWT	4745	0.622
Gas carrier	65,000 and above	DWT	14405E7	2.071
	less than 65,000 DWT	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	20,000 DWT and above	DWT	31948	0.792
	less than 20,000 DWT	DWT	588	0.3885
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	5119	0.622
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	9.827	0.000
	65,000 DWT and above, but less than 100,000 DWT	DWT	14479E10	2.673
	less than 65,000 DWT	65,000	14779E10	2.673
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	57,700 GT and above	57,700	3627	0.590
	30,000 GT and above, but less than 57,700 GT	GT	3627	0.590
	Less than 30,000 GT	GT	330	0.329
Ro-ro cargo ship		GT	1967	0.485
Ro-ro passenger ship	Ro-ro passenger ship	GT	2023	0.460
	High-speed craft designed to SOLAS chapter X	GT	4196	0.460
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

¹⁷⁶ <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC80.INF10.pdf>

¹⁷⁷ [MEPC 337 76 \(imo.org\)](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC33776.pdf)

A5. Bruit sous-marin et vitesse en fonction de la fréquence et de l'intensité selon un navire qui prend conscience et fait attention au bruit qu'il émet (Figure 1) et un navire qui est plus avancé sur le sujet et agit en conséquences (Figure 2) (Source : Bureau Veritas¹⁷⁸)



¹⁷⁸ [NR614.book \(veristar.com\)](http://NR614.book(veristar.com))

A6. Risques de mort des cétacés suite à une collision avec un navire en fonction de la vitesse (Source : Vanderlaan, A.S. and Taggart, C.T. 2007)

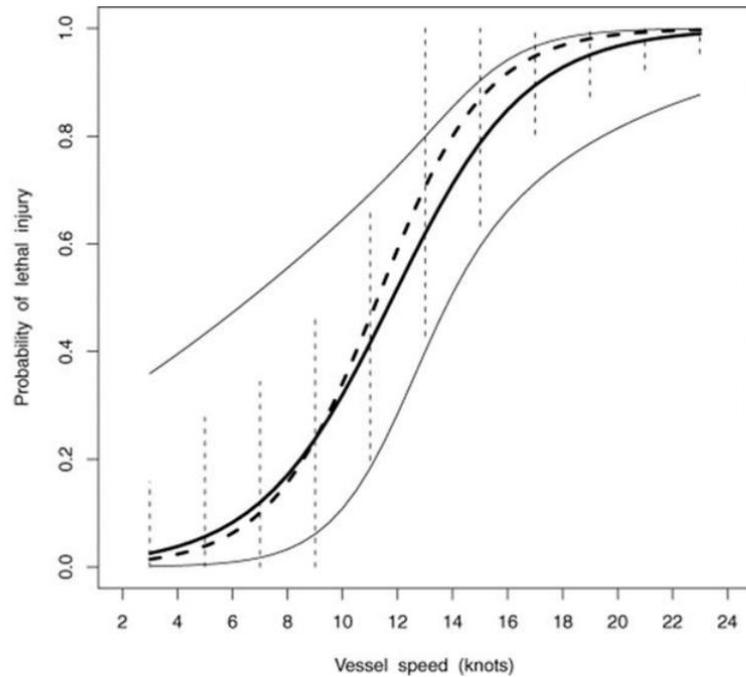
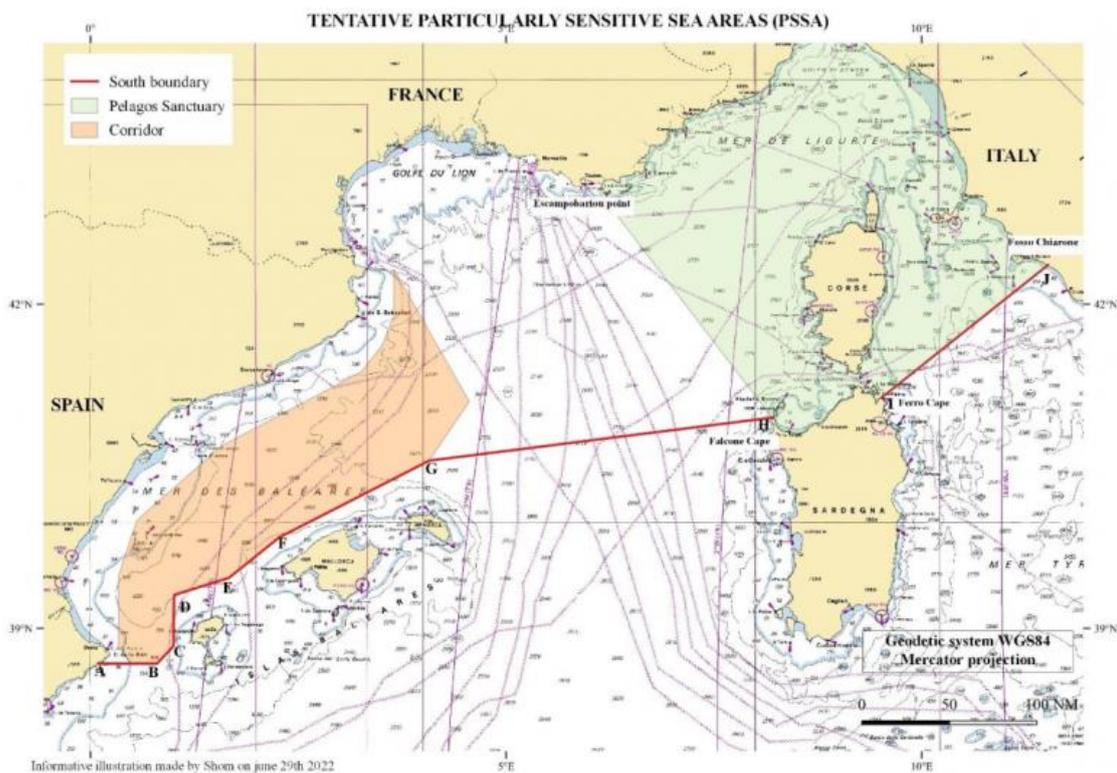


Figure 9: Vessel collisions with whales: the probability of lethal injury based on vessel speed (Vanderlaan, A.S. and Taggart, C.T. 2007)

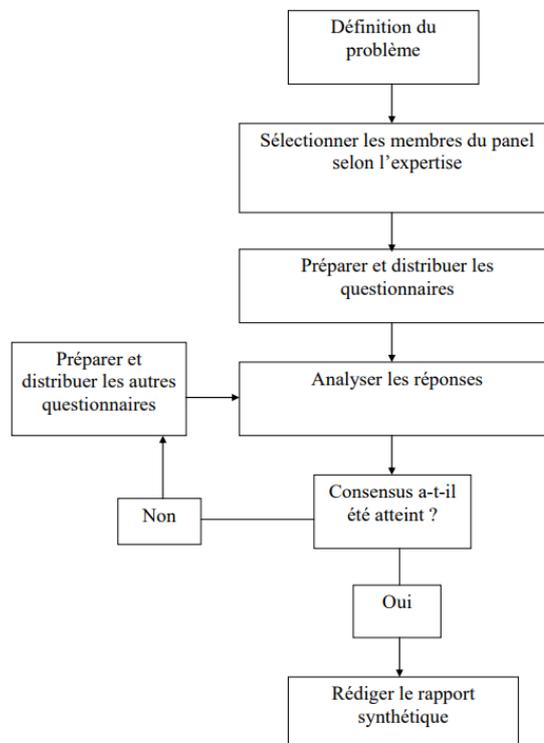
A7. Le Sanctuaire Pélagos et la ZMPV en Méditerranée Nord-Occidentale (Source : pelagos-sanctuary.org)



A8. Réglementation sur les oxydes d'azote pour les navires (Source : OMI¹⁷⁹)

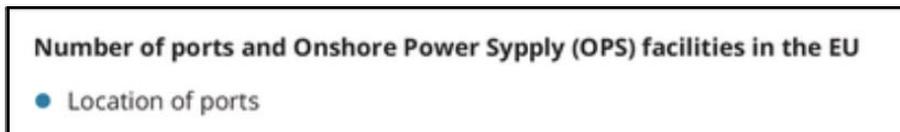
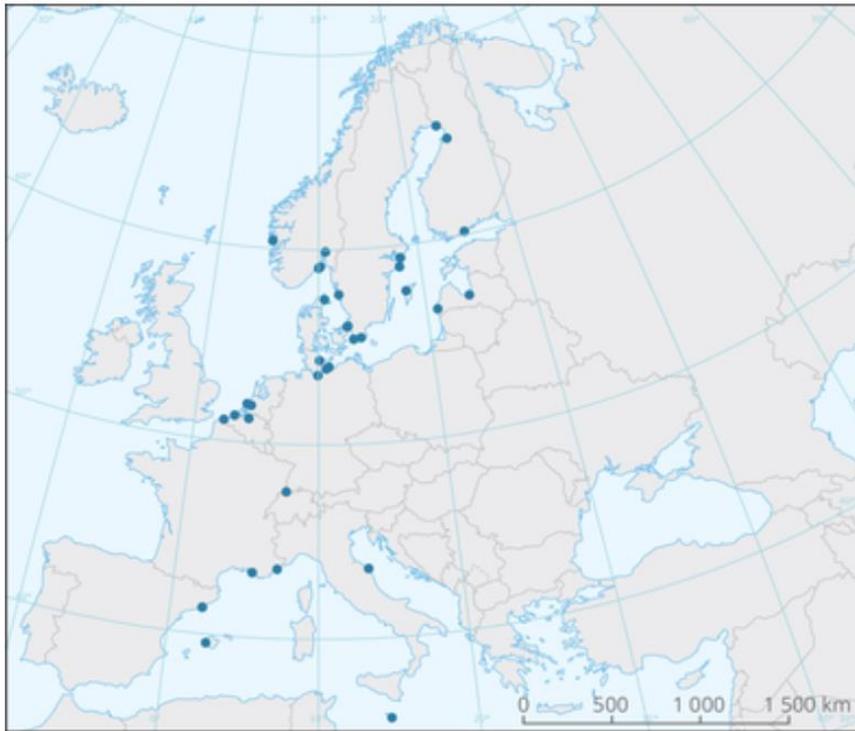
- Tier I (s'applique aux navires dont la quille a été posée entre 2000 et 2010) :
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $n \geq 130$ RPM : 17.0 g/kWh
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $130 \text{ RPM} > n \geq 2000 \text{ RPM}$: $45 * n^{(-0.2)}$ g/kWh
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $n > 2000$ RPM : 9.8 g/kWh
- Tier II (s'applique aux navires dont la quille a été posée après le 1er janvier 2011) :
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $n \geq 130$ RPM : 14.4 g/kWh
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $130 \text{ RPM} > n \geq 2000 \text{ RPM}$: $44 * n^{(-0.23)}$ g/kWh
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $n > 2000$ RPM : 7.7 g/kWh
- Tier III (s'applique aux navires dont la quille a été posée après le 1er janvier 2016, mais uniquement dans les zones ECA NOx) :
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $n \geq 130$ RPM : 3.4 g/kWh
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $130 \text{ RPM} > n \geq 2000 \text{ RPM}$: $9 * n^{(-0.2)}$ g/kWh
 - Pour les moteurs avec une vitesse de rotation $n > 2000$ RPM : 2.0 g/kWh

A9. Définitions des étapes de la méthode DELPHI (Source : wikimedia.org)

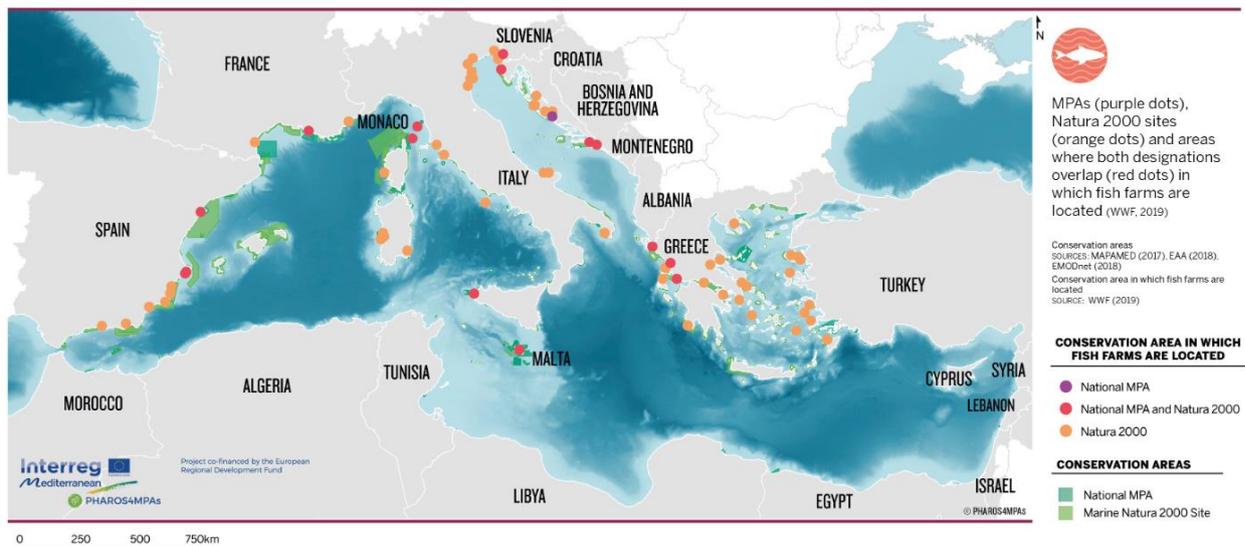


¹⁷⁹ [Oxydes d'azote \(NOx\) – Règle 13 \(imo.org\)](http://www.imo.org)

A10. Présence d'alimentation à quai en Méditerranée occidentale (Source : European Environmental Agency)¹⁸⁰

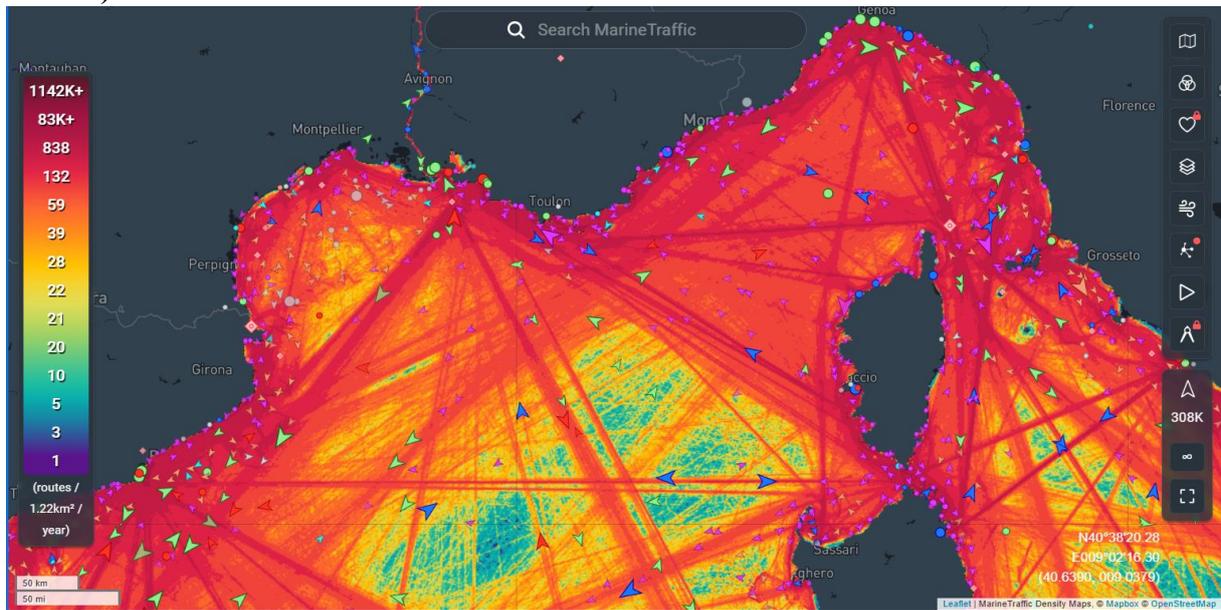


A11. Présence d'aquaculture en Méditerranée dans les parcs de protection de la biodiversité (Source : WWF)



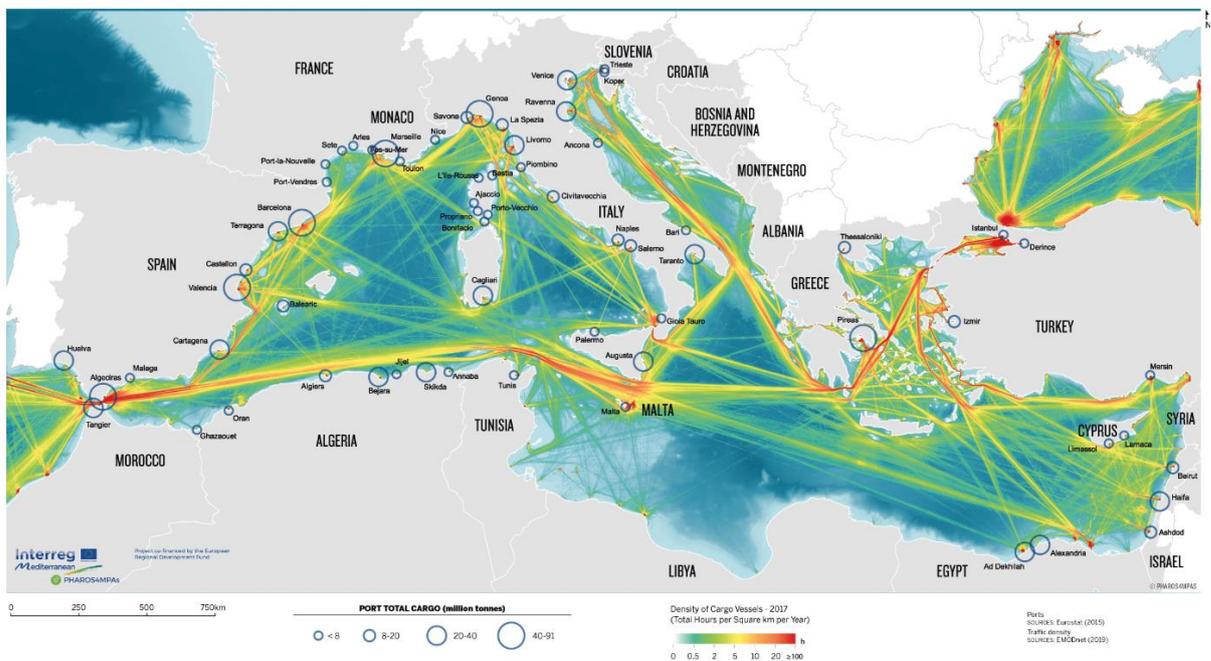
¹⁸⁰ [Number of ports and OPS facilities in the EU \(updated to December 2020\) | European Environment Agency's home page](#)

A12. Densité des routes maritimes en mer Méditerranée par an (Source : Marine Traffic)



Chaque ligne correspond à une route maritime empruntée par un à plusieurs navires selon la couleur de la route et l'échelle à gauche.

A13. Densité annuelle de navires cargo traversant et/ou passant devant les zones de protection de la biodiversité marine et autres zones de conservation de la Méditerranée (Source : WWF)



A14. Questionnaire finalisé de l’empreinte biodiversité

Numéro	Indicateur	Donnée navire Y	Seuil 1 Impact réduit à neutre sur la biodiversité	Seuil 2 Impact modérément réduit sur la biodiversité	Seuil 3 Impact faiblement négatif sur la biodiversité	Seuil 4 Impact néfaste sur la biodiversité	Total	Pondération	Note pondérée
1.	Données navire								
1.1	Fiche Technique Navire								
1.1.1	Opérateur du navire	X Note en 2023 à GME : 3,25 /5 Mention d'au moins 9 projets dans le monde + partenariats Note EcoVadis Environnement en 2023 : 80/100	Participation à GME (Note > 3/5) Mention des actions opérationnelles et des partenariats en faveur de la biodiversité dans le rapport RSE	Participation à GME (Note < 3/5) Mention des actions opérationnelles en faveur de la biodiversité dans le rapport RSE		Pas de participation à GME Pas de mention de la protection de la biodiversité dans le rapport RSE	4	3,125	12,5
1.1.2	Pavillon du navire	Portugal (Pavillon UE et OMI)	Pavillon imposant des contraintes en termes de biodiversité marine ou de climat	Pavillon imposant des contraintes sur des questions environnementales ayant un impact indirect ou faible sur la biodiversité marine (tri des déchets etc.)		Pavillon n'imposant aucune contrainte en termes de biodiversité ou de climat	4	2,375	9,5
1.1.3	Règlementations sur les NOX	2008	Tier III Quille posée après le 1 Janvier 2016	Tier II Quille posée entre le 1 Janvier 2011 et le 31 Décembre 2015	Tier I Quille posée entre le 1 Janvier 2000 et 31 Décembre 2010		2	2,75	5,5
1.1.4	Nombre de Conteneurs réfrigérés	150 soit 18,5%	0%	< 10%	10% - 20%	20% - 33%	2	1,625	3,25
1.1.5	Type de carburant	VLSFO	Liquified Natural Gaz	Maritime Diesel Oil ou Ultra Low Sulfur Fuel (émetteur du soufre à 0,1%)	Very Low Sulfur Fuel-Oil (émetteur du soufre à 0,5%)	Heavy Fuel Oil ou Fioul Lourd (émetteur du soufre à 3,5%)	2	3	6
1.1.6	Règlementations sur les SOX	Carburant VLSFO (0,5%)	0,1	0,3	0,5		2	2,875	5,75
1.1.7	Consommation moyenne de carburant	19 tons/day	< 19 tons/day	21 - 23 tons/day	23 - 25 tons/day	> 25 tons/day	3	2,75	8,25
1.1.8	Rapport entre nombre de tonnes transportées par km et CO2 émis Pourcentage CII	127% (avec 7% d'erreur)	Moins que 94%	Entre 94% et 107%	Entre 107% et 119%	Plus que 119%	1	2,75	2,75
1.1.9	Sensibilisation du personnel navigant	Obligatoire 100%	75% - 100%	50% - 75%	25% - 50%	0% - 25%	4	2,75	11
1.1.9	Règlementations affectant le navire par rapport au traitement des eaux de ballast	Mechanical filtration, Ultraviolet radiation (UV)						3,25	
1.2	Emissions								
1.2.1	Particules fines (um)	0,3586393	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4 - 0,5	0,5 - 0,6	3	2,875	8,625
1.2.2	NOX (g/T)	3,9931887	2 à 3	3 à 4	4 à 5	5 à 6	3	2,875	8,625
1.2.3	SOX (g/T)	0,47893	0,4 - 0,5	0,5 - 0,6	0,6 - 0,7	0,7 - 0,8	4	3,125	12,5
1.2.4	CO2 (en tonnes de CO2e WTW)	211,00	200 - 230	230 - 260	260 - 290	290 - 320	4	3	12
1.2.5	Résultat CII (Indicateur d'Intensité Carbone)	E	A	B	C	D - E	1	2,875	2,875
1.3	Technologies à impact sur la biodiversité								
1.3.1	Prise Cold Ironing sur le navire	Non	Oui			Non	1	2,5	2,5
1.3.2	Présence de scrubber	Non	Oui en close loop	Non		Oui en open loop	3	3	9
1.3.3	Peinture anti-fouling	SPC	FRC	(meilleure qualité avec moins de biocides pour le flat bottom et verticaux du navire)	SPC (meilleure qualité avec plus de biocides pour le flat bottom et/ou verticaux du navire)	TBT (interdit par l'OMI)	2	3,375	6,75
1.3.4	Traitement des eaux de ballast	Mechanical filtration, Ultraviolet radiation (UV)	UV Traitement physique	Electrochlorination Traitement chimique (rejet d'eau chloré)		Pas de traitement (interdit par l'OMI) ou traitement en cours de validation par l'OMI	4	3,375	13,5
1.4	Trajet								
1.4.1	Vitesse moyenne	13,5 knots	< 10 knots	10 - 13 knots	13 - 17 knots	> 18 knots	2	3,875	7,75
1.4.2	Signature acoustique	Donnée inexistante	advanced bureau veritas (cf graphique A7 dépend des dBs et des Hz) neutre pour les individus (entendent le bruit mais ne modifient pas leur comportement)	controlled vessel bureau veritas (graphique A7 dépend des dBs et des Hz) gène moyenne mais "nécessaire" pour que le navire fasse son trajet / masque la communication des baleines	gène / stress - changement de comportement des cétacés On n'a pas de seuil pour ça malgré les recherches menées sur les baleines, certaines changent de comportements à différents dB	fuite des proies et des cétacés On n'a pas de seuil pour ça malgré les recherches menées sur les baleines, certaines changent de comportements à différents dB	0	3,5	0
1.4.3	Collision	On ne nous a fait remonter aucune collision	On ne nous a fait remonté une info			On nous a fait remonté une information	4	3,375	13,5
1.4.4	Rejet huileux	0	< 15 ppm			> 15 ppm	4	3,25	13
1.4.5	Perte de conteneur	0	0			Perte d'au moins un conteneur en mer ne contenant pas de produits chimiques	4	3	12
1.4.6	Temps passé à quai vs temps de trajet	Entre 70% et 80% à quai	Navire à plus de 70% en escale et branchement à quai possible	Navire à plus de 70% en escale sans branchement à quai	Navire entre 40% et 70% en escale sans branchement à quai	Navire à moins de 40% du temps en escale	3	1,875	5,625
1.4.7	Attente avant l'accostage (prendre en compte que ce temps varie considérablement d'une saison à une autre en fonction des événements géopolitiques etc.)	14h	< 5h	5h - 15h	15h - 25h	> 25h	3	2,5	7,5
1.5	Labels								
1.5.1	Labellisation du navire	Green Marine Europe	Green Marine Europe (concentré sur les impacts environnementaux des navires y compris sur la biodiversité) -> avantage économique réputationnel, réduction de certains frais dans les ports et meilleures relations dans les ports	Clean Shipping index : inclue des critères stricts sur l'environnement (avantage plus ou moins élevé parce que clients) Green Award (impact biodiversité élevé et avantages économiques élevés bénéficie de réductions sur les droits portuaires dans certains ports)		Pas de labellisation	4	3,125	12,5
1.5.2	Certifications du navire en matière environnementale	Bureau Veritas Société de classification ISO 14001 ISM		ISO 14001		Pas de certifications	3	3	9
2.	Spécificité de la route maritime								
2.1	Caractéristiques écologiques / physiques								
2.1.1	Courants marins et météorologie	1/2 de l'année en hiver au Sud de Marseille : vagues et vent fort	Mer calme et navigable plus de 80% de l'année	Mer agitée une partie de l'année	Mer très agitée et difficilement navigable plus de 50% de l'année	Mer très agitée et difficilement navigable plus de 80% de l'année	2	2,125	4,25
2.1.3	Profondeur	50% en dessous de 1000m de profondeur	Le navire n'atteint les côtes que pour les escales et reste plus de 80% du trajet au-delà des 1000m de profondeur	Le tracé de la ligne permet au navire de rester pendant plus de 50% au-delà de 1000m de profondeur	Le tracé de la ligne oblige le navire à rester dans des profondeurs inférieures à 1000m pendant plus de 80% de son trajet	Le tracé de la ligne oblige le navire à longer les côtes (jusqu'à 200m de profondeur) pendant plus de 80% du trajet	3	3	9

2.2	Zones traversées								
2.2.1	Ports avec cold ironing Adaptation Shore Power - Quai / Port	Marseille-Fos Malte Marseille	100% des ports permet de se brancher à quai	50% des escales permettent de se brancher à quai		Les ports ont des prises cold ironing mais le navire n'en a pas OU Aucune escale ne permet de se brancher à quai	1	2,375	2,375
2.2.2	tracé de la ligne	Ligne en boucle en Méditerranée occidentale (Marseille, Tanger, Malte, Gênes)	Le navire reste dans le même écosystème	Le navire traverse des écosystèmes proches	Le navire traverse 2 écosystèmes différents	Le navire traverse plusieurs écosystèmes différents	3	2,875	8,625
2.2.3	Zone ECA	Non		Oui		Non	1	3	3
2.2.4	Règlementations environnement + biodiversité spécifiques des ports	Naple + Alger + La Spezia : pas de mention de l'environnement Marseille + Malte : engagés Livorno + Gênes : qqs initiatives mentionnées sur le site	100% des ports proposent des installations pour l'environnement (tri des déchets, traitement des sludges, traitement des eaux de ballast...)	50% des ports proposent des installations pour l'environnement (tri des déchets, traitement des sludges, traitement des eaux de ballast...)		0% à 50% des ports proposent des installations pour l'environnement (tri des déchets, traitement des sludges, traitement des eaux de ballast...)	1	3	3
2.2.5	Eaux traversées sous quelles réglementations et quels Etats	Le navire passe uniquement dans des ZEE et non des eaux internationales (pas de haute mer) : France, Espagne, Algérie, Italie (pas Monaco) Réglementation UE (zone)	Le navire passe plus de 75% de son trajet dans des eaux réglementées (UE, EU etc.) restrictives en matière de biodiversité	Le navire passe plus de 50% de son trajet dans des eaux réglementées restrictives en matière de climat / environnement (réglementation OMI)		Le navire passe plus de 75% de son trajet dans des eaux internationales (haute mer) non réglementée	3	3	9
2.2.6	Si le navire traverse des zones protégées ou passe à proximité, met- il en place des mesures ?	Le navire doit traverser le Sanctuaire du Pelagos en passant proche de La Spezia, Livorno et Genova	Le navire contourne les zones protégées sur son trajet et reste attentif en passant à proximité (baisse de la vitesse, vigilance etc)	Le navire doit traverser la zone protégée mais reste attentif tout le long et met en place des mesures	Le navire passe à proximité de la zone protégée et ne change pas de comportement	Le navire traverse la zone protégée et ne change pas de comportement	1	3,75	3,75
2.2.7	Présence de zones dynamiques ou statique sur la réduction de vitesse pour les baleines	ZMPV Décision de la ligne Sur Marine Traffic vitesse entre 11 et 13 nœuds	Le navire passe dans des zones dynamiques pour les baleines et reste attentif aux signalements pour les prendre en compte dans ses manœuvres	Le navire passe rapidement dans la zone dynamique et a conscience de sa présence		Zone dans laquelle des baleines sont présentes mais non dynamiques (cad pas de signalement en cas de présence de baleine) ou le navire est dans une zone dynamique mais n'écoute pas les signalements	4	3,625	14,5
Remise dans le contexte économique / environnemental - Contribution de notre navire à l'impact général									
3.1	Présence d'aquaculture proche de la route	Marseille, Malte, Livorno, La Spezia (source : WWF)	Le navire n'approche aucune aquaculture sur son trajet	Le navire approche une aquaculture sur son trajet	Le navire approche 2 aquacultures sur son trajet	Le navire approche plus de 3 aquacultures durant son trajet	1	2,125	2,125
3.2	Activités de tourisme	450 Milliards de dollars	Le navire ne traverse pas de zones touristiques		Le navire traverse au moins une de ces zones géographiques (constitue moins de 50% de son trajet) : - mer Méditerranée - mer des Caraïbes - Océan Pacifique Sud (Iles) - Iles de l'Océan Indien Maldives / Seychelles) - Mer de Chine Méridionale	Le navire reste dans une zone très touristique : - mer Méditerranée - mer des Caraïbes - Océan Pacifique Sud (Iles) - Iles de l'Océan Indien Maldives / Seychelles) - Mer de Chine Méridionale	1	3	3
3.3	Zone plus ou moins fréquentée par des navires de tous types	Méditerranée - Zone très fréquentée 1 142 000 routes / 1,22km ² / year		Le navire ne traverse pas ces zones géographiques : - mer de Chine méridionale - océan pacifique Nord - mer Méditerranée - Détroit de Malacca / Canal de Suez dans l'Océan indien - mer du Nord - Mer Baltique - Océan Atlantique Nord	Le navire traverse au moins une de ces zones géographiques (constitue moins de 50% de son trajet) : - mer de Chine méridionale - océan pacifique Nord - mer Méditerranée - Détroit de Malacca / Canal de Suez dans l'Océan indien - mer du Nord - Mer Baltique - Océan Atlantique Nord	Le trajet est intégralement situé dans ces zones géographiques : - mer de Chine méridionale - océan pacifique Nord - mer Méditerranée - Détroit de Malacca / Canal de Suez dans l'Océan indien - mer du Nord - Mer Baltique - Océan Atlantique Nord	1	3,5	3,5

Note : Pour comprendre le questionnaire, il est organisé de la même manière que dans le mémoire et séparé en trois parties : les informations sur le navire, celles sur la ligne et celles sur le contexte. Les cases bleues correspondent aux seuils cochés par le navire en fonction des données fournies et sont décrites dans la partie 5.1. La colonne « Total » prend en compte recense la note obtenue grâce à la case cochée et la colonne suivante la pondération du comité pour chaque indicateur. La dernière colonne correspond à la multiplication des deux précédentes.

A15. Approfondissement des analyses Well-To-Wake

Afin de comprendre ce que signifient ces méthodologies en termes d'analyse des émissions de CO₂ des navires, nous pouvons commencer par détailler en deux étapes que sont la fabrication du carburant et le transport. Tout d'abord, concernant les émissions en amont ou Well-to-Tank, ce sont les émissions générées lors de la production et du traitement du carburant qui sert au navire. En prenant en compte le processus de production du carburant, on peut ainsi comprendre son impact environnemental. Par exemple, l'impact environnemental du HFO (fossile) lors de sa fabrication est beaucoup plus important que celui du biométhane de deuxième génération qui provient de déchets.

Ensuite, il y a les émissions Tank-to-Wake qui sont les émissions résultant de la consommation du carburant pendant le trajet du navire pour le transport. Sur cette partie des émissions, on ne se concentre

que sur ce qui est émis lors de l'activité et non sur ce qu'il a fallu émettre pour produire le carburant utilisé. Enfin les émissions Well-to-Wake (WTW) combinent le Well-to-Tank (WTT) et le Tank-to-Wake (TTW) et prennent en compte à la fois les émissions rejetées pour la production du carburant et celles rejetées pendant l'activité de l'entreprise. Un navire peut émettre la même quantité de CO₂ pendant un trajet, si on prend en compte ses émissions en comptant la partie amont ou WTT, celui au carburant le moins polluant à produire aura une empreinte plus réduite que l'autre. Raisonner en WTW permet donc d'avoir une évaluation globale des émissions.