Janvier 2024

ÉLABORATION D'UN PROTOCOLE VISANT À QUALIFIER L'ÉTAT DE CONSERVATION DES BANCS DE MAERL EN RADE DE BREST PAR RELEVÉS PHOTOGRAPHIQUES



RAPPORT FINAL

Anaëlle BIZIEN, Mathieu HELIAS, Adeline Tauran & Jacques GRALL

SERIES FAUNE – FLORE
OBSERVATOIRE DU DOMAINE COTIER
INSTITUT UNIVERSITAIRE EUROPEEN DE LA MER

« Cette étude a bénéficié du soutien financier du programme Life de l'Union européenne, dans le cadre du projet Life intégré Marha (LIFE 16 IPE FR001) qui a pour objectif d'améliorer l'état de conservation des habitats marins au sein des sites Natura 2000. Le contenu de ce document engage uniquement la responsabilité de ses auteurs et la Commission européenne ne peut être tenue responsable de l'utilisation qui pourrait être faite des informations qu'il contient.»

Table des matières

Introduction 2

Méthodes d'évaluation de l'état de conservation des bancs de maërl dans la zone NATURA 2000 FR 5300046 « Rade de Brest - Estuaire de l'Aulne » - Campagne 2021 3

Résultats – Campagne 2021 5

1) Résultats obtenus à partir de l'analyse photographique des bancs de maërl 5

2) Présentation d'un indice visant à caractériser l'état de santé des bancs de maërl au sein de la zone NATURA 2000 FR 5300046 « Rade de Brest - Estuaire de l'Aulne » 6

3) Pressions exercées sur les bancs de maërl et implications quant à l'évaluation de leur état de conservation 8

Recommandations et conclusions – Campagne 2021 11

Recommandations 11

Conclusions 12

Méthodes d'évaluation de l'état de conservation des bancs de maërl dans la zone NATURA 2000 FR 5300046 « Rade de Brest - Estuaire de l'Aulne » - Campagne 2023 13

1) Evaluation de l'état de santé par analyse d'images 14

2) Evaluation de la structure des communautés faune-flore associées 16

3) Récupération de la pression de dragage 16

Résultats – Campagne 2023 18

1) Evaluation de l'état de santé par analyse d'images 18

2) Pression exercées sur les bancs de maërl et implication sur l'état de santé 22

3) Analyse des communautés faunistiques et floristiques associées 25

Conclusion - Campagne 2023 34

Recommandations 36

Références 37

Annexes 38

Protocole méthodologique 43

1) Protocole d'échantillonnage 43

2) Analyse de photoquadrats de maërl à partir du logiciel Image J 44

α) Initialisation du logiciel et de la macro d'analyse 44

β) Analyse des photoquadrats : étude du recouvrement 44

γ) Etude de la biodiversité : identification faune / flore 49

δ) Macro d'analyse et scripts 52

Introduction

Le bancs de maërl sont une formation de sédiments mixtes, caractérisés par une accumulation en surface d'algues rouges calcaires libres (Corallinaceae), vivantes ou mortes, d'une épaisseur variant de quelques centimètres à plusieurs mètres. Ces algues sont regroupées par les courants, ce qui leur vaut leur répartition parcellaire, et se retrouvent en infralittoral sur les fonds meubles (vase, sable, graviers). En rade de Brest, les espèces principales composant ces bancs de maërl sont *Lithothamnion corallioides* et *Phymatolithon calcareum*, bien que d'autres espèces s'y retrouvent (*e.g*. *Lithophyllum fasciculatum* et *Lithophyllum incrustans*).

Le maërl constitue alors un substrat dur présentant des morphologies complexes et variées, avec des thalles plus ou moins ramifiés et massifs, formant une structure tridimensionnelle. Cette structure permet la création de micro-habitats et ainsi favorise l'installation d'une forte diversité de faune et de flore (plus de 2400 espèces associées, dont certaines endémiques à l'habitat). De plus, cette structure permet l'apport de nombreux services écosystémiques tels que la création d'une zone de nurserie notamment pour des espèces d'intérêt commercial (bivalves, crustacés, poissons) ou le renforcement des plages. Les bancs de maërl forment alors l'un des habitats les plus riche en espèces de l'infralittoral côtier de métropole.

Cependant, les bancs de maërl font face à de nombreuses pressions anthropiques telles que la pêche aux arts trainants, l'eutrophisation, l'apparition d'espèces invasives et l'extraction de matériel biologique, mais aussi par l'acidification des océans et les changements globaux. Toutes ces menaces affectent directement l'état de santé des bancs de maërl. En effet, l'habitat maërl et ses espèces constitutives sont cités dans la directive européenne Habitat Faune Flore 'Natura 2000' de 1992 comme nécessitant gestion et conservation.

Ainsi, un suivi de l'état de santé des bancs ainsi que de la biodiversité s'y installant semble nécessaire à large échelle spatiale et temporelle. Au vu de la diversité présente dans cet habitat, une évaluation par méthode classique (*i.e*. par identification et quantification de la communauté de macrofaune associée) restreint nettement l'emprise de l'étude, car c'est un processus long, coûteux et qui demande une importante expertise taxonomique. La mise en œuvre de processus moins long et moins coûteux, tels qu'une analyse par photographies sous-

marines, permettraient ainsi de pouvoir catégoriser à large échelle l'état de santé des bancs mais aussi de pouvoir détecter plus rapidement des altérations de cet habitat.

La présente étude, à la suite de celle de 2021, propose donc deux méthodes afin d'évaluer l'état de santé des bancs de maërl de la rade de Brest, grâce à l'analyse de photographies sous-marines. L'étude a donc deux objectifs distincts : 1) définir si l'analyse de l'état de santé des bancs de maërl est possible par l'analyse d'image du substrat ; 2) utiliser l'analyse d'image pour analyser et quantifier les communautés de faune et de flore associées.

Méthodes d'évaluation de l'état de conservation des bancs de maërl dans la zone NATURA 2000 FR 5300046 « Rade de Brest- Estuaire de l'Aulne » - Campagne 2021

Issu de Tauran & Grall (2021).

Afin d'étudier l'état de conservation des bancs de maërl au sein de la zone Natura 2000 FR 530046 grâce à la science participative, un première campagne d'échantillonnage a été mise en place en 2021, suite à une série de plongées tests réalisées en 2020. Cette étude a pour butde déterminer si la qualité des images récoltées par une campagne de science participative permet l'évaluation de l'état de santé des bancs de maërl de la rade de Brest. Pour cette campagne, dix stations étudiées historiquement (Figure 1) ont été prospectées par des plongeurs amateurs (Atlantic Civi Diving Club) entre mars et avril 2021.

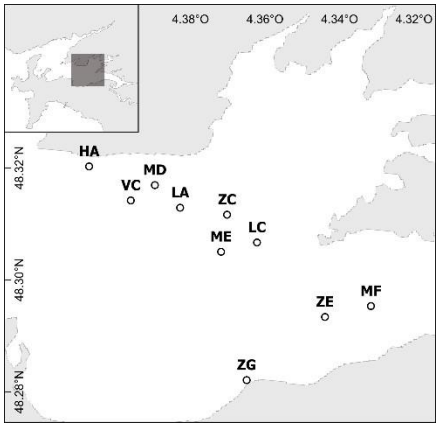


Figure 1: Localisation des stations étudiées au sein de la Rade de Brest

Des relevés photographiques ont été réalisés à l'aide d'un appareil photo Olympus TG-5 et d'un éclairage I-TORCH VENOM 60 RGB V Monoled 6600 Lumens sur trois transects le long d'une corde de 30m marquée tous les 1m. Au total, une centaine de relevés ont été réalisés à chaque station. Sur les 10 stations prospectées, seule la station ZC n'a pas été traitée car les relevés photographiques ont été jugés inexploitables en raison des algues épiphytes saisonnières qui recouvraient le maërl et rendait difficile l'analyse des photos. Les relevés de cette station ont été remplacés par des photographies réalisées par les plongeurs de l'IUEM en 2019 (la station est renommée ZC_IMP2019 dans cette étude pour la différencier des relevés fait en 2021).

L'objectif initial de cette étude était de développer une méthode d'analyse d'image automatique permettant une analyse standardisée et rapide d'un grand nombre de relevés photographiques en faisant intervenir des plongeurs amateurs pour l'acquisition et l'analyse des images. Ce type d'analyse présente également l'avantage de réduire le biais utilisateur inhérent aux analyses manuelles puisque l'analyse est effectuée par un ordinateur.

La création d'une méthode d'analyse automatique est apparue difficile à mettre en place en raison de la forte hétérogénéité parmi les photographies (conditions de luminosité, contraste, netteté) et une méthode à caractérisation manuelle a été préférée. Dans l'optique d'une mise à jour future de ce protocole faisant intervenir des plongeurs photographes amateurs, l'utilisation d'un appareil ou d'une caméra sur bâti équipé(e) de deux flash (un à droite et un à gauche par exemple) pourrait être une piste à explorer pour permettre l'acquisition de photographies plus homogènes. De même, des échanges avec des plongeurs photographes professionnels pourraient permettre d'obtenir des conseils pour l'acquisition de photos de meilleure qualité.

La méthode mise au point pour analyser les photoquadrats acquis dans le cadre de cette étude fait intervenir le logiciel gratuit Image J (Ferreira & Rasband, 2012). Chaque photoquadrat est subdivisé en un nombre défini de cellules à analyser (Figure 2). Le nombre de cellules est défini avec le nombre de lignes et de colonnes à utiliser pour subdiviser le photoquadrat.

Dans le cas présent, il a été décidé de travailler avec une grille de résolution 15 lignes x 15



Figure 2: Exemple d'analyse d'un photoquadrat. A gauche: image brute telle que fournie par les plongeurs. Au centre: grille d'analyse d'une résolution de 15x15. A droite: Image analysée telle qu'exportée

colonnes, *i.e*. 225 cellules de 4,44 cm² pour un quadrat de 0,1m². Cela est apparu comme la taille offrant le meilleur compromis temps d'analyse/précision. La finesse de l'analyse dépend de plusieurs paramètres dont la qualité de l'image et la période de prise de vue (voir la partie

Recommandations pour plus de détails). Plus l'image est nette et de bonne qualité, plus la caractérisation de chaque cellule par l'utilisateur sera aisée. Parmi l'ensemble des relevés photographiques réalisés à chaque station, 30 photoquadrats (15 pour ZC_IMP2019) ont été aléatoirement sélectionnés pour chaque station parmi les 3 transects réalisés puis analysés.

Les fichiers de résultats issus de l'analyse des photoquadrats avec Image J ne permettent pas à eux seuls de caractériser l'état des bancs de maërl. Pour cela, un script d'analyse automatique a été produit en utilisant le logiciel Rstudio®. En compilant l'ensemble des fichiers issus de l'analyse des photoquadrats, l'utilisation de ce script permet notamment de calculer les pourcentages moyens de couverture du quadrat pour chaque catégorie prédéfinie dans la méthode ainsi qu'un indice d'état de santé des bancs de maërl.

Résultats – Campagne 2021

1) Résultats obtenus à partir de l'analyse photographique des bancs de maërl

Historiquement, les stations ZC, ZE et ZG ont toujours été considérées comme des stations témoins où le maërl est en bon état car épargné des activités de pêche.

La station ZC_IMP2019 (point ZC prospecté en 2019) apparait comme la station présentant la couverture moyenne de maërl vivant la plus importante (85%) (Figure 3). En comparaison, les stations ZE et ZG montrent une couverture de maërl vivant plus réduite (1% et 15% en moyenne respectivement). Néanmoins, il est important de noter qu'une part importante de la surface est couverte par un mélange de maërl vivant et de sédiments à ces stations. En effet, de nombreux quadrats montrent du maërl en apparent bon état mais recouvert d'une pellicule de vase ce qui est un signe de perturbation. Les proportions moyennes de sédiments et d'algues sont plus importantes au niveau des stations ZE et ZG (Sédiments : 20% et 10% respectivement ; Algues : 24% et 20% respectivement) qu'au niveau de ZC_IMP2019 (Sédiments : <1% ; Algues : <1%).

Les stations MD et HA, bien qu'historiquement très impactées par les activités de pêche, présentent des couvertures de maërl vivant assez importantes (51% et 61% en moyenne respectivement) mais on note la présence d'une mosaïque de maërl mort et de maërl vivant en proportions notables (9% et 12% en moyenne respectivement) et une proportion de faune réduite sur la majorité des photoquadrats.

Les stations LA, LC, ME et MF sont principalement caractérisées par du sédiment qui peut être recouvert par des fragments de taille variable de maërl mort ou recouvrir des patchs de maërl vivant (en moyenne : Sédiment : 31%, 28%, 26% et 29% respectivement ; Maerl vivant x Sédiment :25%, 43%, 45% et 42% respectivement ; Maerl mort x Sédiment : 26%, 11%, 11% et 16% respectivement). La station VC apparaît comme extrêmement dégradée avec une absence complète de maërl (mort ou vivant). La surface est recouverte par du sédiment et des coquilles vides de crépidules. Certaines stations, notamment MD et HA, présentent une variabilité inter-quadrat élevée pour certaines catégories qu'il est important de prendre en compte.

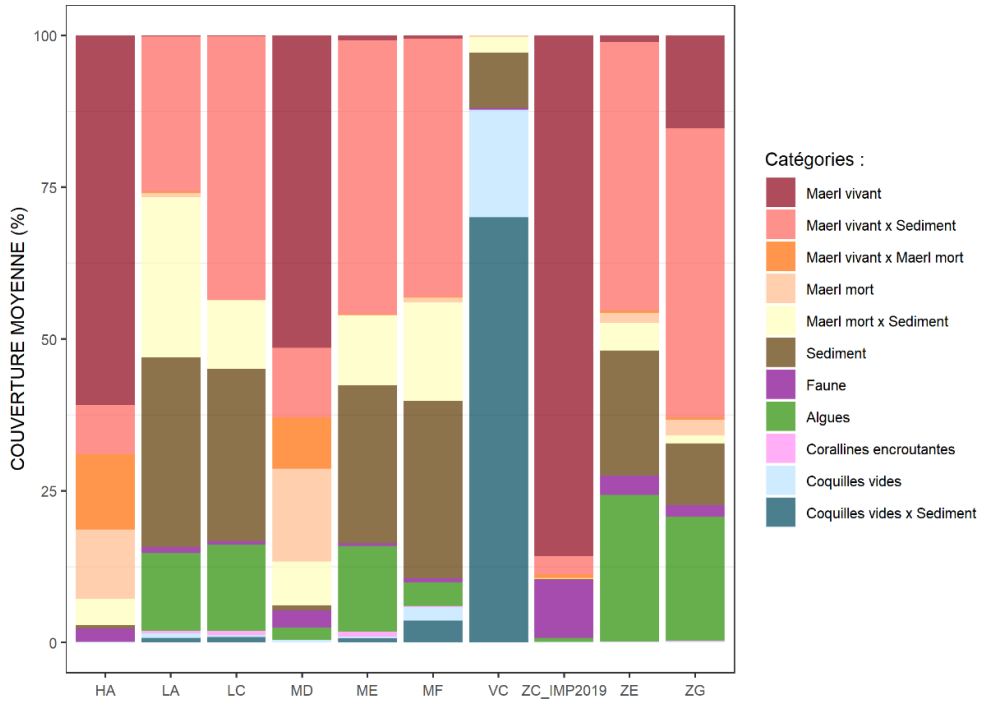


Figure 3: Couverture moyenne (%) des catégories prédéfinies pour les 10 stations étudiées

2) Présentation d'un indice visant à caractériser l'état de santé des bancs de maërl au sein de la zone NATURA 2000 FR 5300046 « Rade de Brest- Estuaire de l'Aulne »

L'un des objectifs de cette étude était de définir un indice permettant de catégoriser l'état de santé des bancs de maërl présent au sein de la zone Natura 2000 de la rade de Brest à partir de l'utilisation de relevés photographiques acquis par des plongeurs amateurs.

Un banc de maërl est considéré en bon état lorsqu'il présente une épaisseur significative de maërl vivant abritant une biodiversité très diversifiée et abondante constituée à la fois de petits organismes interstitiels et de grands organismes érigés et fixés (ex : éponges). Par

définition, la mégafaune fixée est très sensible aux perturbations physiques telles que les activités de dragages et compte parmi les premiers organismes à disparaitre lorsque le maërl est impacté par ce type d'engin.

Les paramètres les plus pertinents pour déterminer l'état de santé d'un banc de maërl sont (1) le pourcentage du quadrat qui est recouvert par du maërl vivant en bon état i.e. présentant une structure tridimensionnelle complexe et (2) la présence de faune observable directement sur les photoquadrats. Un paramètre supplémentaire a été pris en compte au vu des résultats issus des analyses précédentes (Figure 4) : le pourcentage du quadrat occupé par du maërl vivant sur/sous du sédiment (catégorie Maerl vivant x Sédiment). Ainsi, l'indice développé dans le cadre de cette étude a été défini comme suit :

$$Indice = \left(\frac{\%F}{100} + \frac{\%MV}{100} + \frac{\%MVS}{100} - \frac{\%R}{100} + 1\right) \div 2$$

Avec %F le pourcentage de la surface occupée par la faune, %MV le pourcentage de la surface occupée par du maerl vivant, %MVS le pourcentage de la surface occupée par du maërl vivant sur/sous du sédiment et %R le pourcentage de la surface restante i.e. *%R = 100 - (%F + %MV + %MVS). Cet indice varie entre 0 (très mauvais état) et 1 (très bon état) avec les seuils suivant : 0 - 0.2 : mauvais état ; 0.2 – 0.6 : état moyen ; 0.6 – 0.8 : bon état ; 0.8 – 1 : très bon état.*

Afin d'obtenir les résultats les plus fiables possibles, cet indice a été calculé pour chaque quadrat puis moyenné à l'échelle de chaque station. Les résultats montrent un gradient de station (Figure 4) au sein duquel quatre groupes semblent être présents : (1) ZC_IMP2019, (2) HA, MD et ZG, (3) LA, LC, MF, ZE et ME et (4) VC.

La station ZC_IMP2019 apparaît en très bon état (indice moyen : 0.98 ± 0.02). Le groupe constitué de HA, MD et ZG semble être en relativement bon état avec un indice moyen compris entre 0.6 et 0.8 (0.71 ± 0.30, 0.66 ± 0.31 et 0.65 ± 0.12 respectivement) mais il est important de noter l'hétérogénéité des résultats au sein des stations HA et MD qui traduit l'existence de zones plus perturbées. Le troisième groupe constitué de LA, LC, MF, ZE et ME regroupe des stations dans un état intermédiaire avec un indice moyen compris entre 0.2 et 0.6 (0.27 ± 0.13 ; 0.44 ± 0.14 ; 0.44 ± 0.16 ; 0.48 ± 0.13 et 0.46 ± 0.17 respectivement).

Il s'agit de stations qui apparaissent en partie perturbées, principalement par un dépôt de vase à la surface du maërl et une couverture de maërl vivant moindre. Enfin, le dernier groupe est

composé de la station VC qui apparaît en très mauvais état avec un indice moyen très inférieur à 0.2 (0.003 ± 0.008) où le maërl a été entièrement remplacé par des coquilles mortes.

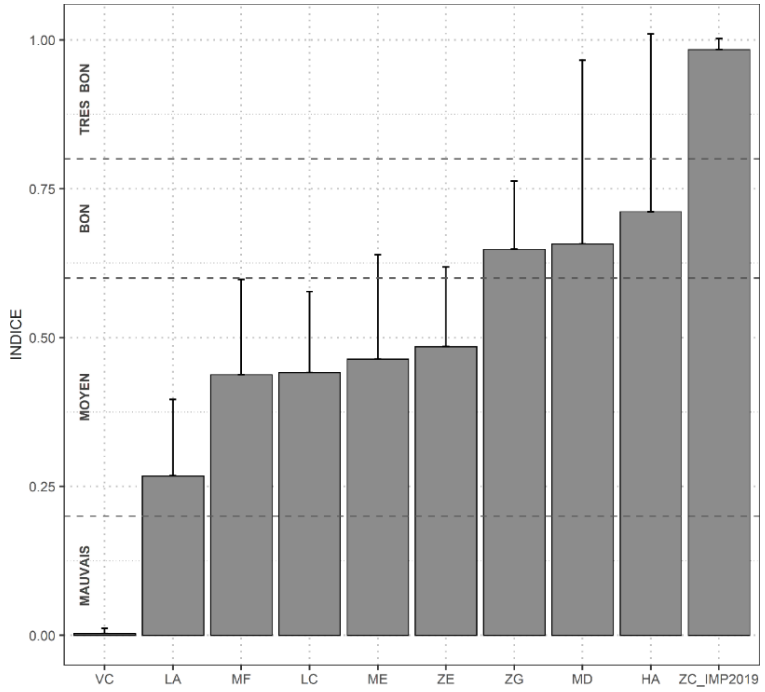
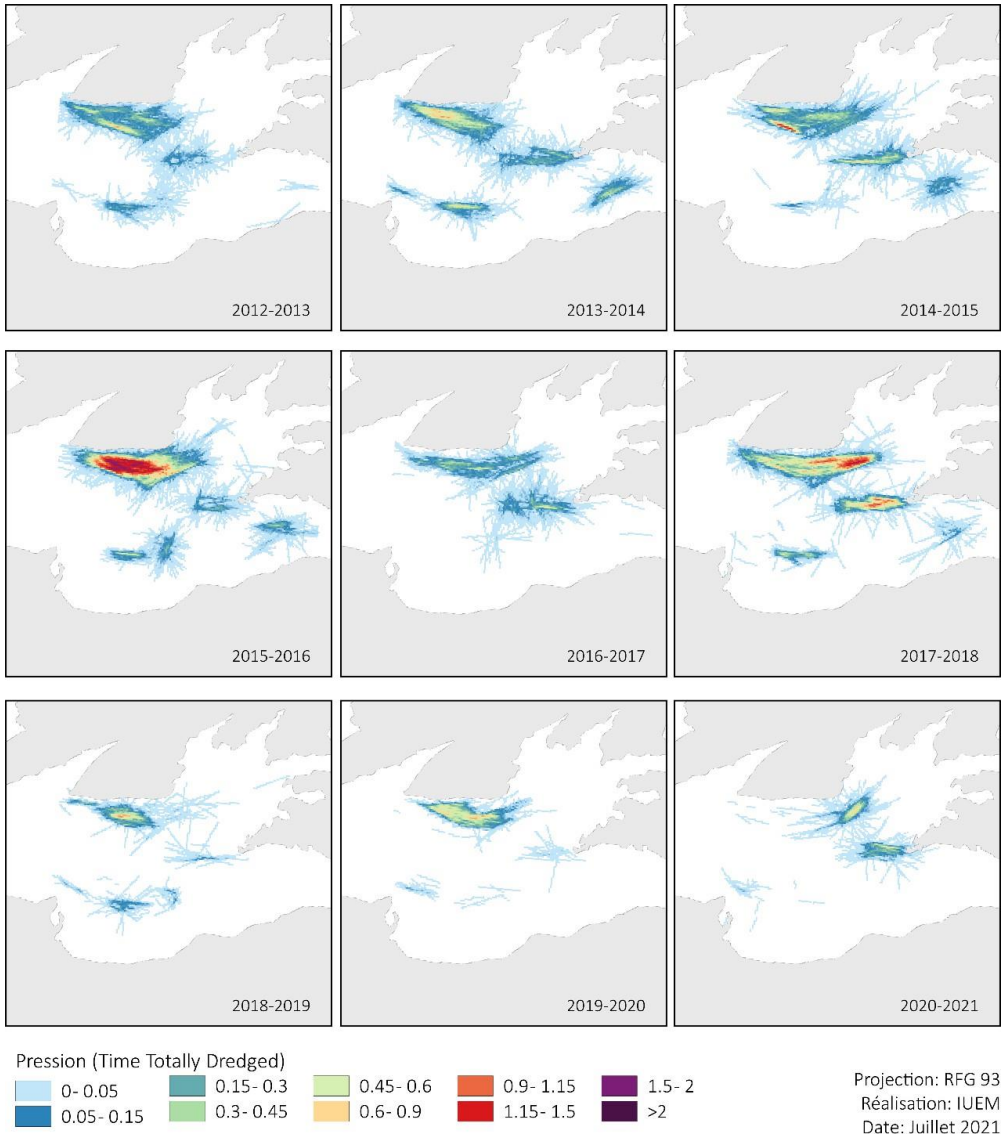


Figure 4: Valeurs de l'indice pour les 10 stations étudiées. L'indice varie entre 0 (très mauvais état) et 1 (très bon état). Les seuils définis sont 0 - 0.2 : mauvais état ; 0.2 – 0.6 : état moyen ; 0.6 – 0.8 : bon état ; 0.8 – 1 : très bon état

3) Pressions exercées sur les bancs de maërl et implications quant à l'évaluation de leur état de conservation

Les bancs de maërl étudiés ici sont régulièrement soumis à des activités de dragage, notamment dans le cadre de la pêche aux arts trainants. Cette pression est variable à la fois spatialement et temporellement et une station fortement impactée une année ne sera pas forcément impactée avec la même intensité l'année suivante (Figure 5). Il est important de prendre cela en considération lors de l'évaluation de l'état de santé et de conservation des bancs de maërl.

Les dix stations étudiées ici sont situées dans des zones historiquement soumises à de fortes pressions, à l'exception des trois contrôles ZC, ZE et ZG. Les données les plus récentes semblent cependant indiquer un déplacement de l'effort de pêche ces dernières années qui semble s'orienter davantage vers l'est du banc de Rozegat par rapport aux années passées. Il serait donc intéressant de définir de nouveaux points de suivi dans cette zone peu étudiée jusqu'ici.



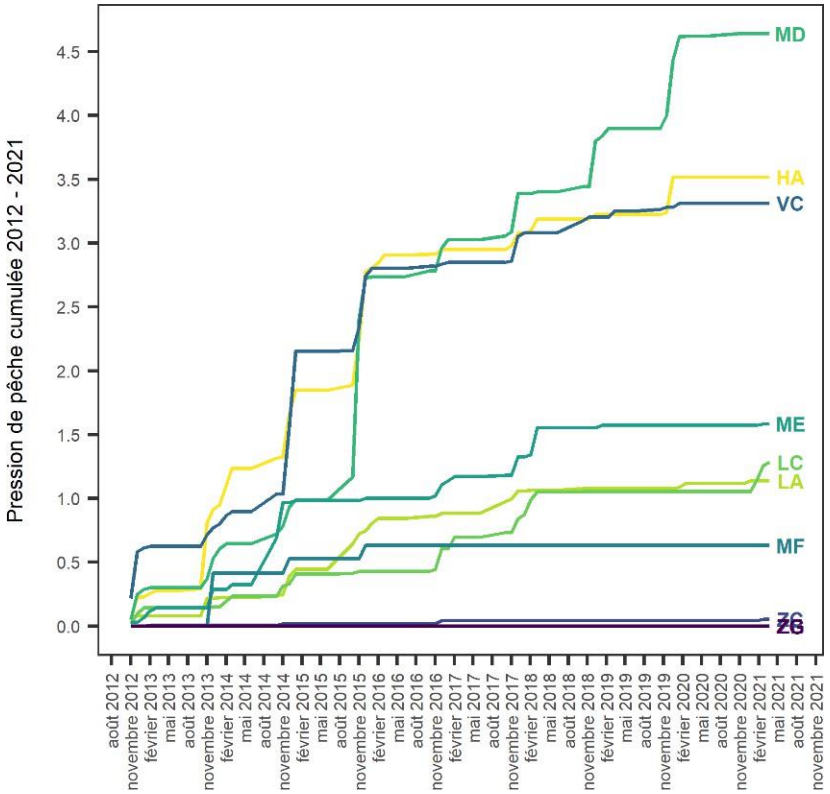


Figure 5 : Evolution spatio-temporelle de la pression liée aux activités de pêche aux arts trainants sur les bancs de maërl de la zone Natura 2000 FR 530046 « Rade de Brest – Estuaire de l'Aulne » entre 2012 et 2021. La pression est calculée comme le nombre de fois qu'une zone de 50m x 50m est entièrement draguée en une saison (d'après la méthode mise au point dans Pantalos, 2015)

Les données de pression observées ces trois dernières années apportent quelques éléments de réponse quant aux résultats observés aux stations MD et HA au travers de l'analyse des photoquadrats. En effet, il semble que ces deux stations aient été moins impactées entre 2017 et 2021 que les années passées (2012-2016). Cela a permis la remontée en surface de maërl vivant au-dessus duquel s'étaient déposés des fragments de maërl mort lors des saisons de pêche précédentes. Néanmoins, la situation actuelle n'a pas permis une recolonisation totale du maërl par la mégafaune.

Afin de connaitre l'état de santé des bancs de maërl au sein de la rade, notamment vis-à-vis de ce type de perturbations, il est nécessaire d'adapter les points de suivi aux cartes de pressions afin de cibler les zones les plus impactées. Nous proposons ainsi 10 points de suivis pour la prochaine période d'acquisition (Figure 6).

Deux stations contrôles sont proposées : la station C1 déjà étudiée ici (= ZC) et la station C2 qui correspond à un nouveau point situé sur le banc de maërl de Roscanvel. Pour suivre l'impact des activités de pêche, six stations sont proposées (stations D) selon un gradient de pression sur la base des données de pression cumulées entre 2017 et 2021 (D1 < D2 < D3 < D4 <D5 <D6). Le point D2 (= HA) permettra de surveiller le processus de recolonisation qui semble avoir eu lieu ces dernières années à cette station. Enfin, deux stations sont proposées pour suivre l'impact de l'eutrophisation sur le maërl : une sur le banc de Kéraliou (E1) et une sur le banc du Roz (E2). Un point supplémentaire dans l'anse du Poulmic pourra éventuellement être ajouté pour suivre le banc à *Lithophyllum fasciculatum*.

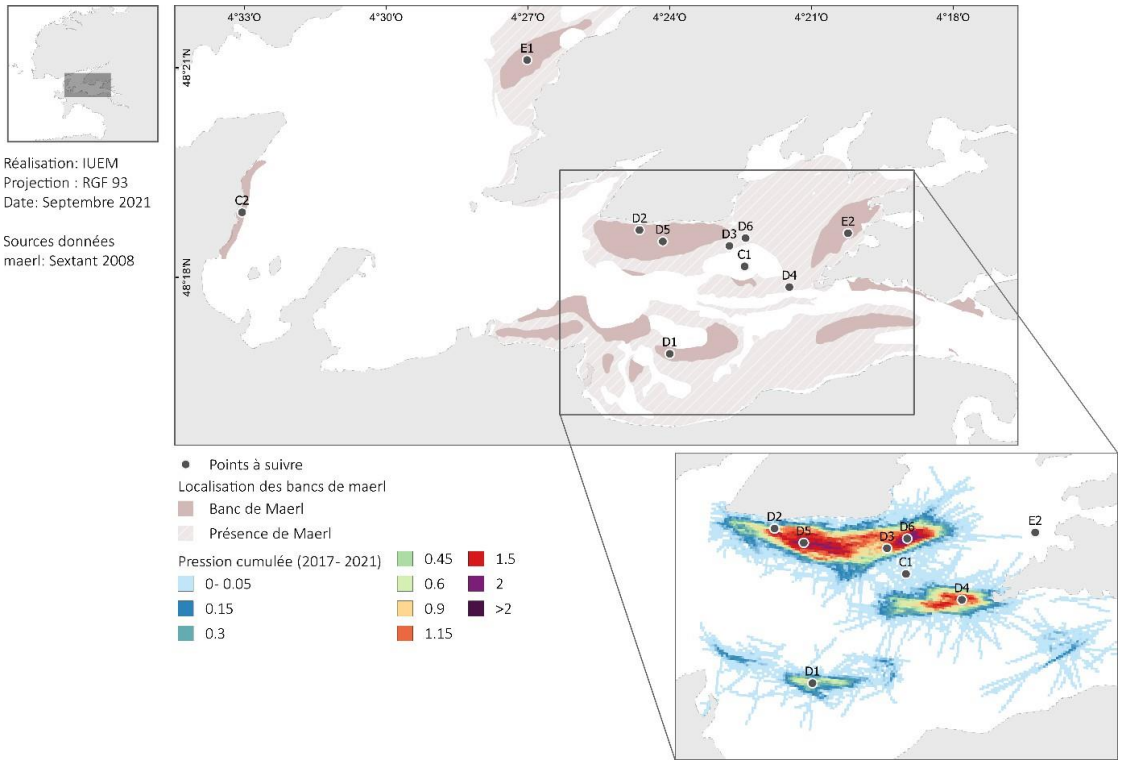


Figure 6 : Proposition de nouveaux points de suivis dans le cadre de la poursuite de l'évaluation de l'état de santé des bancs de maërl de la zone Natura 2000 FR530046 « Rade de Brest – Estuaire de l'Aulne ». Légende stations : C : stations contrôles ; D : stations impactées par la pêche à la drague ; E : stations impactées par des phénomènes d'eutrophisation

Recommandations et conclusions – Campagne 2021

Recommandations

L'ensemble des clichés qui nous ont été fournis s'avère être relativement hétérogène, ce qui engendre une baisse de la qualité de l'information qu'il est possible d'en tirer. Nous listons ci-dessous des recommandations afin d'en limiter la variabilité autant que possible :

- Faire attention à la netteté, aux ombres portées et au cadrage des photos.
- Réaliser les photos dans des conditions de lumière les plus constantes possibles.
- Réaliser les campagnes d'acquisition en dehors des longues périodes de tempêtes, en l'absence de turbidité au maximum, en dehors des périodes de fortes pluies qui peuvent amener des particules fines dans la rade de Brest (qui se déposent sur le maërl) et avant la période de développement d'algues saisonnières (épiphytes et macroalgues) qui recouvrent le maërl et biaisent l'analyse (*i.e*. avant le printemps)
- Faire en priorité l'acquisition des stations supposées être en bon état et devant servir de référence afin d'éviter qu'elles soient recouvertes d'épiphytes saisonnières.

Si nous avons conscience de la lourdeur des contraintes demandées ci-dessus, avec des conditions environnementales loin d'être idoines en période hivernale, nous insistons néanmoins sur l'importance de les respecter afin de permettre une évaluation précise et convaincante de l'état de conservation des bancs de maërl en rade de Brest. La période d'acquisition idéale pour la rade de Brest serait entre Décembre et Février. Dans l'optique d'automatiser le processus d'analyse, un intérêt particulier devra être porté à la qualité des images.

Conclusions

La méthode mise en place dans le cadre de cette étude a permis de caractériser l'état de santé des bancs de maërl de la zone Natura 2000 FR 530046 « Rade de Brest – Estuaire de l'Aulne ». L'utilisation de l'indice développé a mis en évidence l'existence d'un gradient de stations. La station ZC (données de 2019) est apparue en très bon état. Les stations ZG, MD et HA semblent être en relativement bon état mais ces dernières présentent une hétérogénéité importante et doivent donc être surveillées. Un groupe de stations intermédiaire apparaît perturbé par des dépôts de particules fines qui recouvrent la surface du maërl parfois accompagné d'épiphytes (ZE, ME, MF, LA, LC). Enfin, la station VC apparaît comme en très mauvais état avec une disparition complète du banc de maërl, remplacé par des coquilles vides de crépidules.

Au vu des résultats obtenus, la période d'acquisition choisie pour cette étude (Mars-Avril) semble ne pas être la plus adaptée et nous recommandons de réaliser l'acquisition des photos entre Décembre et Février pour la rade de Brest. La méthode mise au point se veut facilement applicable et fait intervenir des logiciels gratuits dont la prise en main et l'installation est simple. Le rapport méthodologique fourni détaille les étapes à suivre et propose une description photographique des différentes catégories pour aider à la mise en œuvre de la méthode.

La méthode proposée reste cependant relativement élémentaire. Pour une caractérisation plus précise de l'état de conservation des bancs de maërl au sein de la zone d'étude, une étude plus approfondie de la faune est nécessaire. Cependant, si cette méthode ne remplace pas les méthodes classiques d'étude des bancs de maërl (ex : prélèvement par benne avec étude de la faune associée), elle permet néanmoins de proposer un diagnostic simple de leur état de santé.

Méthodes d'évaluation de l'état de conservation des bancs de maërl dans la zone NATURA 2000 FR 5300046 « Rade de Brest- Estuaire de l'Aulne » - Campagne 2023

Afin d'évaluer l'état de santé des bancs de maërl de la en rade de Brest (zone NATURA 2000 FR 530046), 31 stations ont été prospectées (Figure 7) par un plongeur scientifique entre janvier et mars 2023. Des relevés photographiques ont été réalisés à l'aide d'un appareil professionnel sur des quadrats de 0,1 m². La prise en charge de l'échantillonnage et de l'analyse d'image a été réalisée par l'Observatoire de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (UMR3113, IUEM)

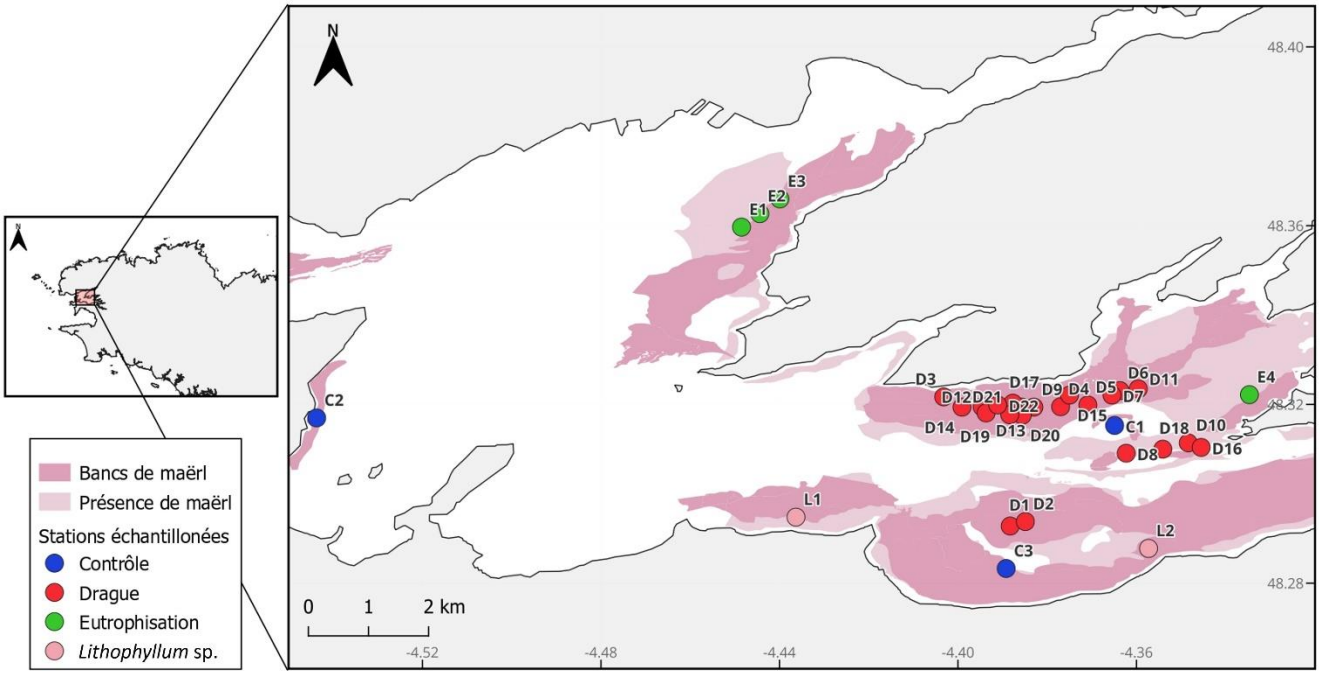


Figure 7 : Cartographie des points de suivi du projet d'évaluation de l'état de santé du maërl en rade de Brest

En tout, un minimum de 10 quadrats par site a été photographié (Figure 8). Les stations ont été renommées en 4 catégories selon la pression trouvée dans la littérature pour chacune des zones : les stations de la zone de dragage « D*n* », les stations catégorisées comme eutrophisées « E*n* », les stations de contrôle « C*n* » et les stations où l'espèce *Lithophyllum fasciculatum* est attendue « L*n* » (Annexe 1). La station « D6 » n'a pas pu être traitée à cause d'une forte présence de sédiments en suspension, empêchant la lecture des photographies (soit un total de 30 sites analysés). Deux analyses sont alors effectuées sur les quadrats afin de catégoriser l'état de santé du banc de maërl avec 1) l'analyse d'image automatique par catégories de substrat et 2) l'analyse de la structure et composition des communautés de macrofaune et de macroalgues associées aux bancs de maërl.

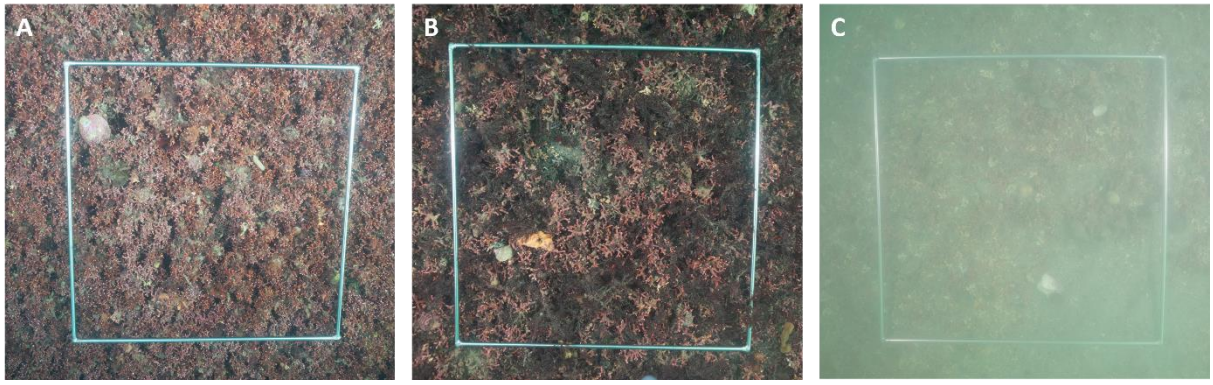


Figure 8: Exemples de photographies analysées sur les sites E1 (A) et C1(B), et d'image impossible à traiter avec la station D6 (C).

1) Evaluation de l'état de santé par analyse d'images

Cette première méthode d'évaluation a été réalisée sur un minimum de 9 quadrats par station (soit 328 images de traitées durant cette analyse). Les photographies ont été analysées grâce au logiciel ImageJ (Ferreira & Rasband, 2012). Chaque photographie est subdivisée en cellules à catégoriser manuellement (Figure 9). Le nombre de cellules est défini par l'utilisateur : ici, il a été décidé de travailler avec une grille de résolution 15 lignes x 15 colonnes, *i.e*. 225 cellules de 4,44 cm² pour un quadrat de 0,1m².

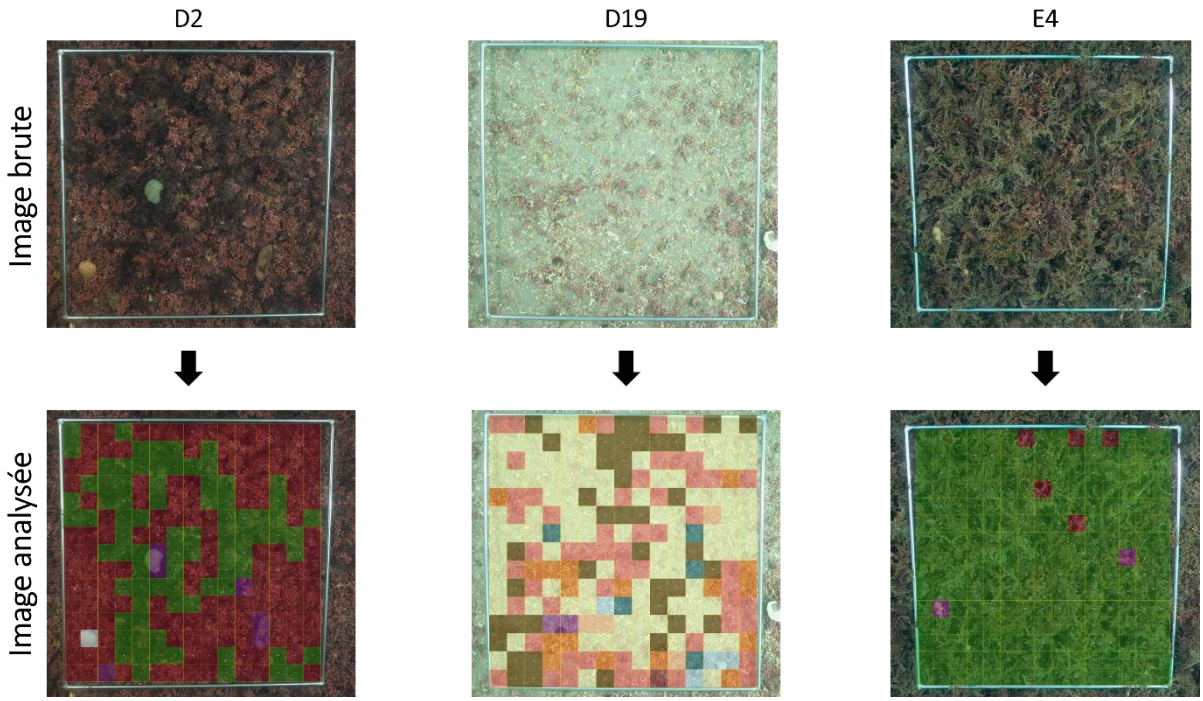


Figure 9: Exemples d'images brutes de quadrats (en haut) puis traités sur imageJ (en bas), sur les stations D2, D19 et E4

Les analyses ont été réalisées avec le mode « Avec détails » qui permet une caractérisation complète de l'image grâce à un nombre important de catégories susceptibles de couvrir l'ensemble des situations pouvant être observées sur un quadrat (selon les cas, elles ne seront pas toutes identifiables). Chaque catégorie est associée à une couleur pour faciliter l'interprétation visuelle des résultats à partir des images analysées (Tableau 1).

Tableau 1 : Catégories prédéfinies et couleurs associées au mode d'analyse « Avec Détails ».

CATEGORIE	COULEUR HEXADECIMALE	COULEUR RGB	APERCU COULEUR
Maerl vivant	#8b0015	139,000,021	
Maerl mort	#ffbb8b	255,187,139	
Sédiment	#5d3800	093,056,000	
Faune	#7f008b	127,000,139	
Algues	#268b00	038,139,000	
Corallines encroutantes	#ff8bf3	255,139,243	
Maerl vivant x Maerl mort	#ff6900	255,105,000	
Maerl vivant x Sédiment	#ff635d	255,099,093	
Maerl mort x Sédiment	#fffdb9	255,253,185	
Coquilles vides	#b9e2ff	185,226,255	
Coquilles vides x Sédiment	#00485d	000,072,093	
Autre	#DCDCDC	220,220,220	

En sortie d'analyse, il en ressort un fichier texte (.txt) par image analysée contenant, entre autres, le nom de la station, le nom du quadrat analysé, le numéro de la cellule et la catégorie sélectionnée pour la cellule. L'analyse de ces fichiers a été effectuée sur R (R version 4.3.1), en adaptant le script automatique transmis dans le rapport méthodologique de 2023 (Tauran et al., 2023). En compilant l'ensemble des fichiers issus de l'analyse des photoquadrats, l'utilisation de ce script permet notamment de calculer les pourcentages moyens de couverture pour chaque catégorie, pour ensuite pouvoir comparer les stations entre elles. Un indice de l'état de santé du banc de maërl (présenté dans le rapport d'étude Life Marha de Tauran & Grall, 2021) a été calculé pour chacun des bancs, indice défini comme le ratio de la surface occupée par du maërl vivant par rapport à la surface totale et calculé de la manière suivante :

$$Indice = \left(\frac{\%F}{100} + \frac{\%MV}{100} + \frac{\%MVS}{100} - \frac{\%R}{100} + 1\right) \div 2$$

Avec %F le pourcentage de faune, %MV le pourcentage de 'maërl vivant', %MVS le pourcentage de 'maërl vivant x sédiment' et %R le pourcentage de la surface restante.

2) Evaluation de la structure des communautés faune-flore associées

Cette deuxième méthode d'évaluation a été réalisée sur 5 quadrats par station (soit 150 images de traitées durant cette analyse). De même, les photographies ont été analysées sur le logiciel ImageJ (Ferreira & Rasband, 2012). Sur chaque image, l'abondance de la faune (nombre d'individus) et le recouvrement par la flore (surface recouverte, en cm^2) ont été mesurés pour chaque taxon. L'abondance a été mesurée en sélectionnant chaque individu de faune dans un taxon, le logiciel les dénombrant automatiquement, à l'inverse, le recouvrement a été estimé grâce à la création et l'addition de polygones autour des macroalgues. Les différents taxons ont été identifiés le plus précisément possible, selon la résolution de l'image et la possibilité d'observer les caractéristiques de l'individu. Les individus mesurant moins de 1 cm n'ont pas été quantifiés.

En sortie d'analyse, en ressort un fichier texte (.txt) par image analysée contenant, entre autres, le nom de la station, le nom du quadrat analysé, ainsi que le nombre d'individu par taxon de faune et le recouvrement sur l'image de chaque taxon de flore. L'analyse de ces fichiers et la comparaison entre les communautés ont été effectuées sur R (R version 4.3.1).

3) Récupération de la pression de dragage

Des données de trafic maritime sur la saison de pêche (octobre à mars) ont été récupérées depuis 2012, sur MarineTraffic. Des filtres ont été appliqués sur la vitesse du navire et les horaires de pêche afin de sélectionner les bateaux de pêche aux arts trainants (drague), selon la méthode de Pantalos (2015). En utilisant ces données, le pourcentage de surface draguée pour une zone d'une surface de 2 500 m^2 est mesurée par passage de bateau. La pression de pêche finale est définie par le nombre de fois que la zone de 50 x 50 m est entièrement draguée au cours d'une saison de pêche (les valeurs supérieures à 1 indiquent que la zone a été entièrement draguée plus d'une fois au cours de la saison). Ce proxy de la pression de drague a été calculé pour le sud de la rade de Brest entre 2012 et 2023 (Figure 10).

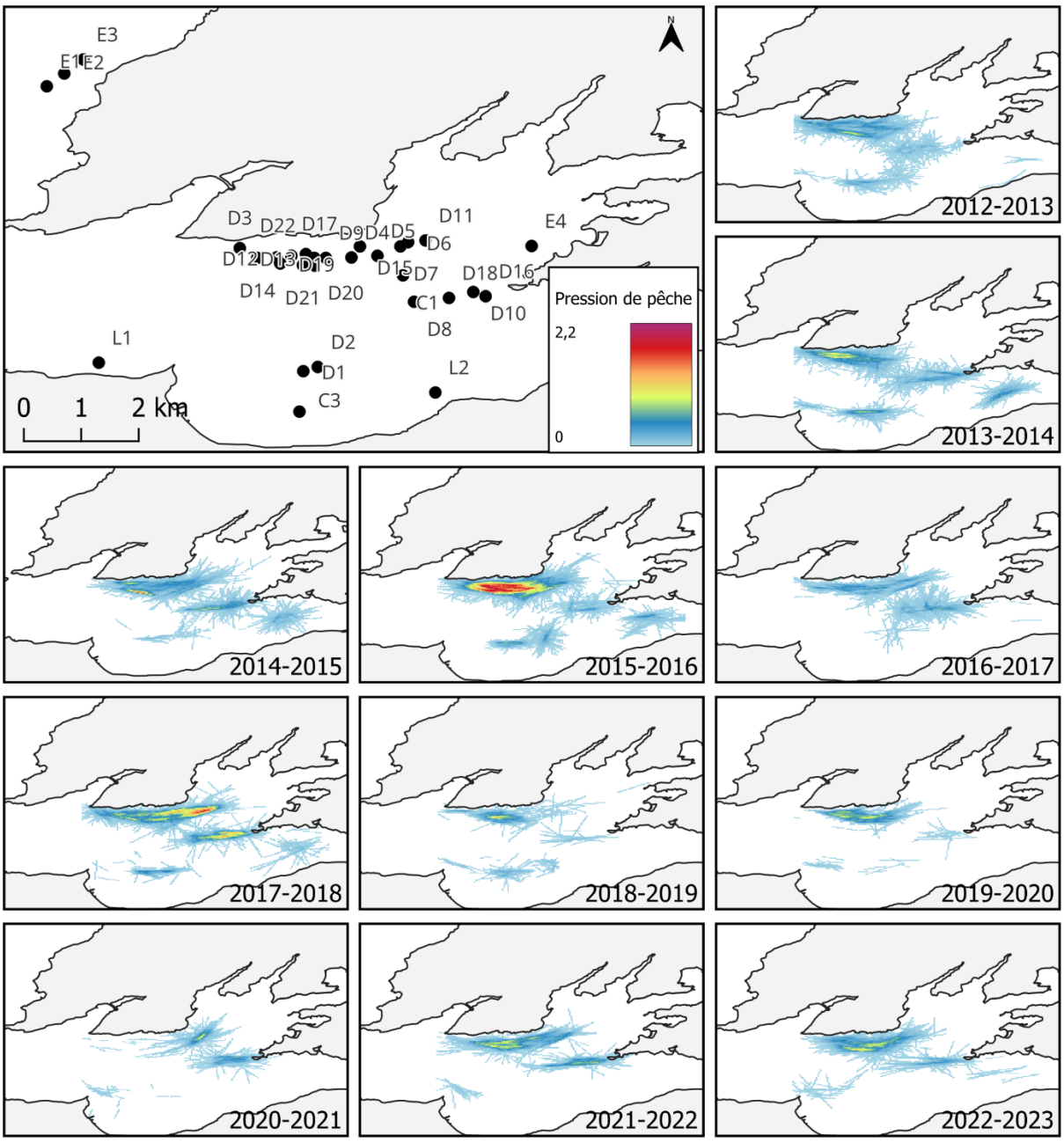


Figure 10: Evolution de la pression de pêche, calculée comme un nombre de fois qu'une cellule de 50 x 50 m est parcourue par un bateau considéré comme utilisant la pêche aux arts de traînants, pour chaque saison de pêche entre 2012 et 2023 (d'après la méthode de Pantalos, 2015)

Résultats – Campagne 2023

1) Evaluation de l'état de santé par analyse d'images

Les stations E1, L1, D3 et D2 présentent des bancs de maërl majoritairement composés de 'maërl vivant' (respectivement 91, 85, 59 et 59 % de recouvrement) (Figure 11). Au contraire, les stations D21, D16, D17 et D18 présentent des couvertures de 'maërl vivant' (non en mélange) inférieures à 3 %. Lorsque la catégorie 'maërl vivant' n'est pas majoritaire dans les bancs, ceux-ci peuvent être composés en majorité du mélange 'maërl vivant x maërl mort' (*e.g.* dans les stations D16, D17 et D11, cette catégorie composant plus entre 60 et 85 % du banc) ou d'une majorité d'algues (*e.g.* dans les stations L2 et E4, composant respectivement 84 et 76 % du banc). Les autres catégories sont minoritaires dans tous les bancs. La catégorie 'maërl vivant x sédiment' peut composer jusqu'à 46 % du banc (station D21), la catégorie 'sédiment' jusqu'à 16 % (station C2), la catégorie 'maërl mort x sédiment' jusqu'à 12 % (station D19) et la catégorie 'coquille vide' jusqu'à 11 % (station D15).

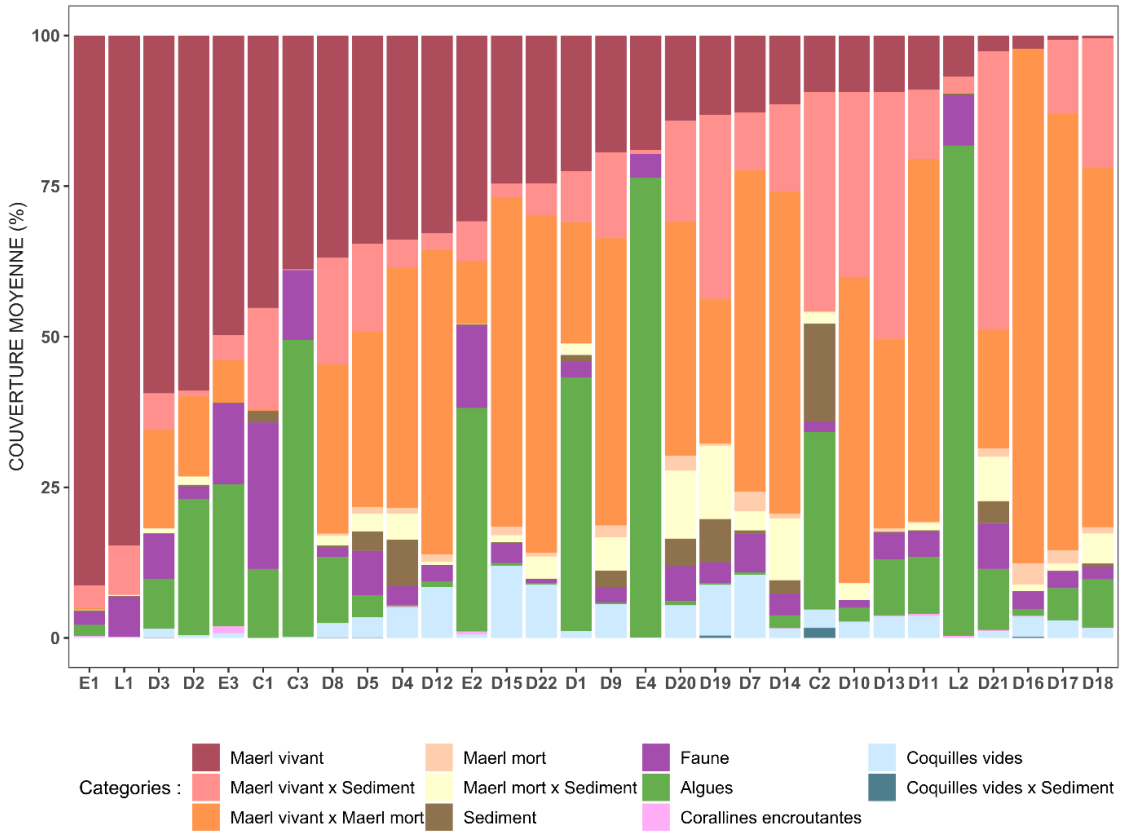


Figure 11: Couverture moyenne par catégorie de substrat (maërl vivant, maërl vivant x sédiment, maërl vivant x maërl mort, maërl mort, maërl mort x sédiment, sédiment, coquille vide, coquille vide x sédiment), de faune ou de flore par station (n = 30)

Les stations historiquement en bon état (contrôle), car épargnées des activités de pêche, présentent des compositions très différentes, les stations C1 et C3 présentent des couvertures de 'maërl vivant' proches (45 % et 39 % respectivement). Cependant, la station C3 présente une composition en algues plus importante que les autres stations (49 %), tandis que la station C1 est celle qui présente le plus de faune (24 %). La station C2, elle, est catégorisée par une forte présence de sédiments ('maërl vivant x sédiment' : 36 %, 'sédiment' : 16 %, 'maërl mort x sédiment' : 2 % et 'coquilles vides x sédiment' : < 2 %).

A partir de l'analyse des images, quatre compositions types de bancs de maërl ont pu ressortir de cette analyse (Figure 12) :

(1) un premier groupe principalement composé par du maërl vivant et caractérisé par la faible quantité de sédiment et/ou de maërl mort (regroupant entre autres toutes les images des stations E1 et L1, mais aussi la majorité des images de C1, D2, D3 et D5) ;

(2) un deuxième groupe caractérisé par une forte abondance d'algues (regroupant quasi-entièrement les stations E2, E4, C3 et L2) ;

(3) un troisième groupe essentiellement recouvert par les sédiments (regroupant quasi-entièrement les stations D21, D13 et C2);

(4) un dernier groupe principalement composé de maërl mort (dans lequel on retrouve notamment les stations D7 et D22).

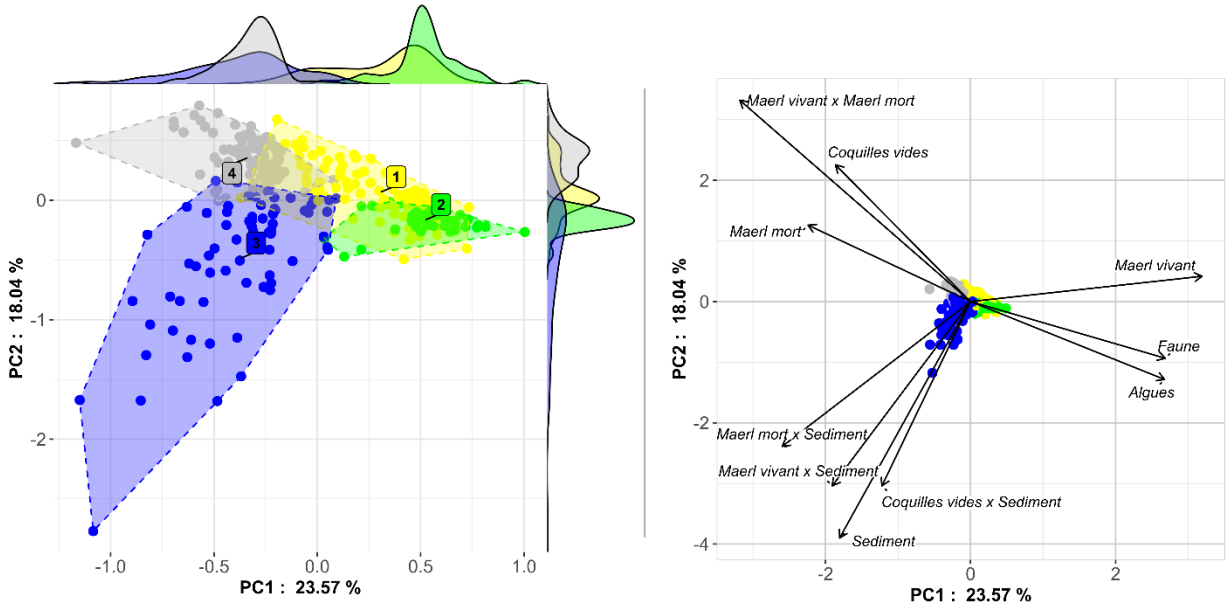


Figure 12: Analyse en composante principale (ACP) sur la composition en substrat des images analysées, avec des groupements réalisés par clustering (ward d2) sur une matrice de distance des données

Les stations semblent donc se différencier essentiellement avec la dichotomie maërl vivant contre maërl mort et sédiments. Afin de pouvoir évaluer l'état de santé des bancs de maërl grâce au substrat les constituant, l'indice de l'état de santé des bancs de maërl a été calculé, nous donnant un ratio de la surface occupée par du maërl vivant par rapport à la surface totale. Cet indice, compris entre 0 et 1, a été défini avec ici les seuils de santé comme suit : [0 - 0.25] = mauvais état,]0.25 - 0.6] = état moyen,]0.6 - 0.8] = bon état et]0.8 – 1] = très bon état (Figure 13), seuils défini sur avis d'expert.

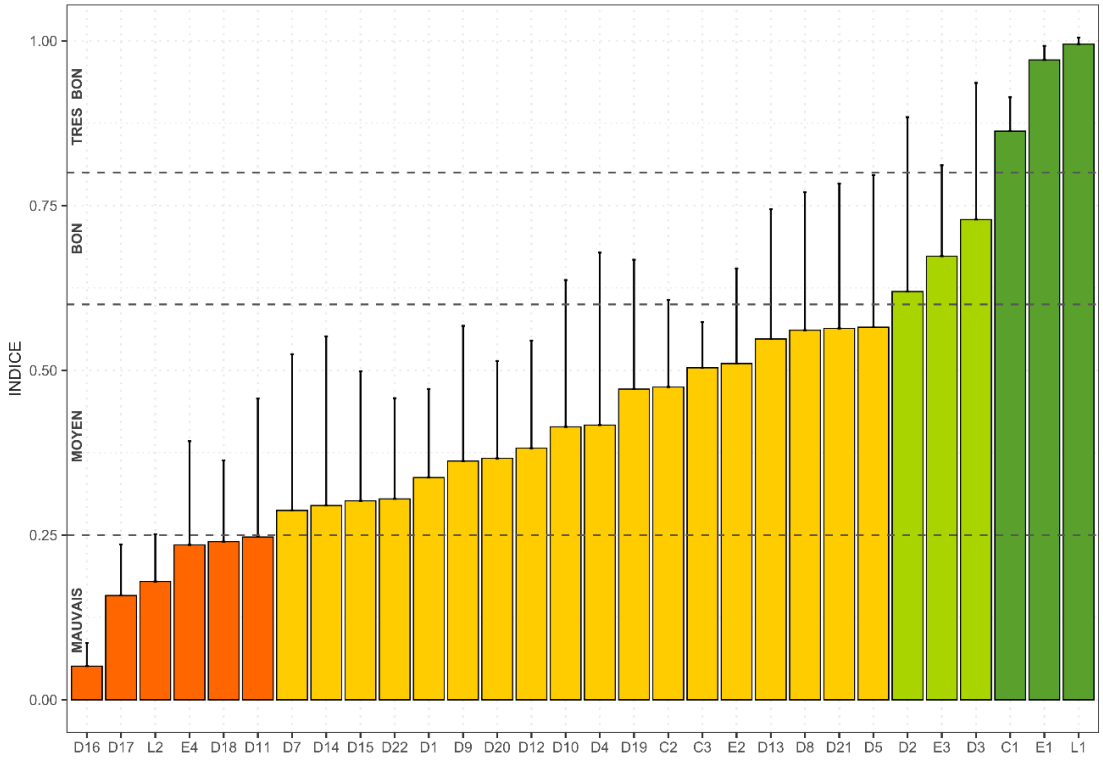


Figure 13 : Indice de l'état de santé des bancs de maërl en rade de Brest et écart-type selon la station échantillonnée. Les seuils sont définis comme suit : 0 - 0.25 = mauvais état, 0.25 - 0.6 = état moyen, 0.6 - 0.8 = bon état et 0.8 - 1 = très bon état

Les stations catégorisées en meilleure santé sont celles comprenant le plus de 'maërl vivant' (E1 et L1). Cet indice ne prend cependant pas en compte certaines catégories qui peuvent contenir du maërl vivant, telle que la catégorie 'maërl vivant x maërl mort', et ni celle de la flore, qui tout comme la faune peut comprendre du maërl vivant sous-jacent. Les stations ayant des fortes présences d'algues sont donc classées comme des habitats dégradés (*e.g.* les stations L2 et E4 sont tous les deux notés dans la catégorie « mauvais état » avec un indice moyen inférieur à 0,25).

Un autre indice, la proportion de maërl vivant théorique (Mv_{th}), a donc été proposé par Pruvot (2023), dans lequel ces catégories sont prises en compte. Cet indice fait l'hypothèse que les catégories 'maërl vivant x maërl mort' et 'maërl vivant x sédiment' sont composées à moitié de maërl vivant et que les catégories de faune et flore recouvrent à $^1/_3$ les trois substrats possibles (maërl vivant , maërl mort et sédiment).

$$Mv_{th} = \left(\%Mv + \frac{\%MvS}{2} + \frac{\%F}{3} + \frac{\%A}{3} + \frac{\%MvMm}{2}\right) \div 100$$

Avec Mv_{th} la proportion de maërl vivant théorique, %Mv le pourcentage de 'maërl vivant', %MvS le pourcentage de 'maërl vivant x sédiment', %F le pourcentage de faune, %A en 'algue' et %MvMm le pourcentage de 'maërl vivant x maërl mort'.

Avec cet indice (Figure 14), les stations L1 et E1 sont là aussi catégorisées comme celles en meilleure santé. Les stations les plus impactées par la présence d'algues (*e.g*. L2, E4), présentent de plus fortes couvertures théoriques de maërl vivant qu'avec l'indice précédent, puisqu'il considère la possibilité d'avoir du maërl vivant en dessous. Les catégories de 'Faune' et 'maërl vivant x sédiment' ne sont plus considérées comme présentant uniquement du maërl vivant, et donc les stations présentant des fortes couvertures de ces deux catégories vont être moins bien classées que par l'indice précédent (*e.g*. D21 devient inférieur à 0,5). Pour cet indice, les valeurs moyennes ne sont jamais inférieures à 0,25. Les seuils précédemment utilisés ne peuvent donc pas être appliqués ici. L'hypothèse appliquée ici serait que les bancs composés à moins de 50% de maërl vivant ($Mv_{th} < 0{,}5$) peuvent être considérés comme en mauvaise santé, tandis que les bancs comprenant entre 50% et 75% de maërl vivant ($0{,}5 < Mv_{th} < 0{,}75$) sont en moyenne à bonne santé et que les bancs composés à plus de 75% de maërl vivant ($Mv_{th} > 0{,}75$) sont en très bonne santé.

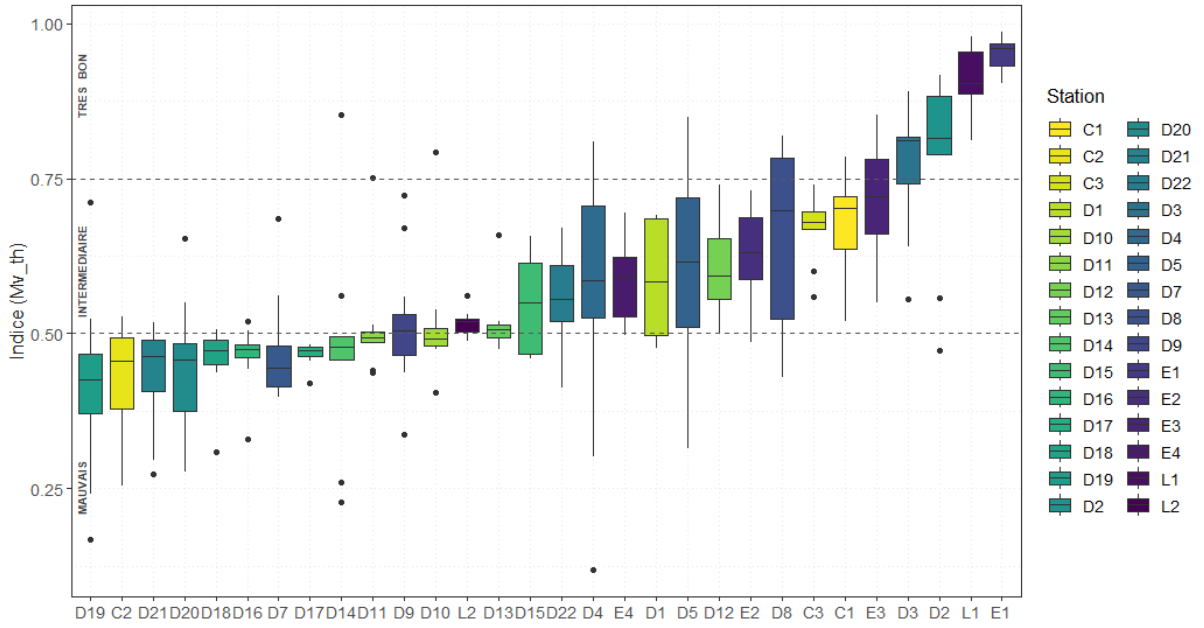


Figure 14 : Valeurs de l'indice d'état de santé du maërl proposé par Pruvot (2023). Cet indice calcule la proportion théorique de maërl vivant présent dans le quadrat. La couleur représente une station.

2) Pression exercées sur les bancs de maërl et implication sur l'état de santé

Afin d'expliquer l'état de santé des bancs de maërl, un proxy de la pression de pêche a été utilisé, ici, c'est le nombre de passage de bateaux considérés comme utilisant la pêche aux arts traînants, calculé chaque année sur la saison de pêche. La saison de 2015 - 2016 est celle présentant les plus fortes pressions sur les bancs, tandis que la saison 2020 - 2021 est celle présentant les pressions les plus faibles (Figure 15A). Sur la période 2012 - 2021, les stations D12, D22 et D9 présentent plus de 6 passages sur une zone de 2 500 m². A l'inverse, sur cette même période, les stations D8 et D1 présentent moins de 2 passages. Certaines stations telle que la station D3 ont été fortement draguées entre 2012 et 2015, depuis, moins d'un passage a été enregistré entre 2016 et 2023 (Figure 15B). D'autres stations sont, elles, fortement draguées chaque année (*e.g*. D22, D19, D9 et D17).

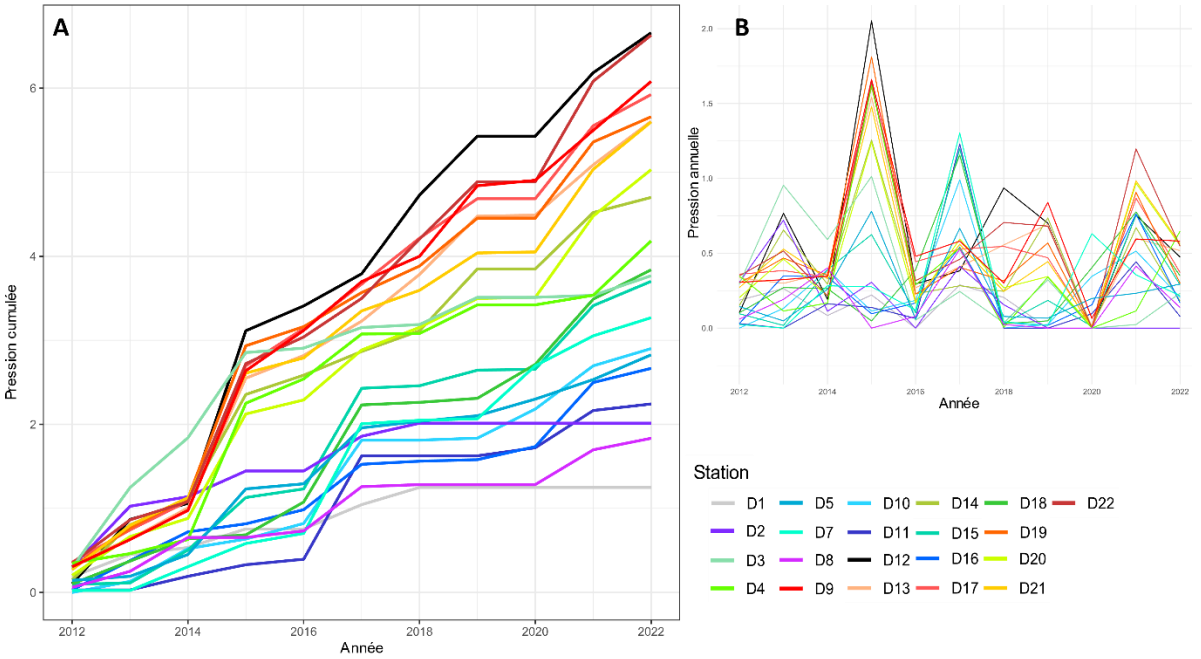


Figure 15 : Evolution de la pression de pêche, en pression cumulée (A) et en pression annuelle (B) pour chaque saison de pêche entre 2012 et 2023. La pression est calculée comme un nombre de fois qu'une cellule de 50 x 50 m est parcourue par un bateau considéré comme utilisant la pêche aux arts traînants.

Une pondération a alors été appliquée à la pression pour différencier les impacts récents des plus anciens. Ici, il a été appliqué une pondération de 10% par année depuis la dernière année d'échantillonnage (*i.e.* $Ppond_n = P_n + \left((1 - n \times 0{,}1) \cdot P_{n-1}\right)$, où $Ppond_n$ est la pression de pêche pondérée calculée à partir de P la pression de pêche à l'année $n - x$). Les stations les plus draguées et le plus récemment sont les stations D22, D12 et D9 (Figure 16A). Ce ne sont pourtant pas les stations présentant les plus faibles proportions de 'maërl vivant' mais une large couverture de 'maerl mort x maerl vivant'. La proportion théorique de maërl vivant, le sédiment et le maërl mort a alors été calculée.

Il existe une faible corrélation entre la proportion de maërl vivant théorique et la pression de dragage cumulée pondérée (Figure 16B). Malgré la variabilité, l'effet du dragage est directement visible sur la composition des bancs (Figure 16C). Les stations les plus touchées par le dragage vont présenter des plus faibles proportions théoriques de maërl vivant et des proportions théoriques élevées de maërl mort et de sédiment. La plupart des stations touchées par un dragage important présentent moins de 60% de couverture théorique de maërl vivant et peuvent présenter entre 30 et 60% de maërl mort. A partir de 30% de couverture de sédiment théorique, les stations sont soumises à un fort dragage, cependant, les stations présentant une couverture théorique de sédiment ou de maërl mort en dominance ne sont pas séparables par ce proxy de la pression de dragage.

Une tendance à l'augmentation des couvertures de maërl mort et de sédiments est donc observables lors de fortes pressions de pêche sur un banc. Cependant, cette relation n'est pas linéaire et témoigne d'autres paramètres non pris en compte. Certains sites semblent moins affectés par une forte pression de pêche (*i.e.* D12) tandis que d'autres semblent très affectés par une pression moins importante (*i.e.* 16). Certains paramètres doivent alors rentrer en compte dans la reformation des bancs (courants, etc.) et jouer sur leur état de santé actuel.

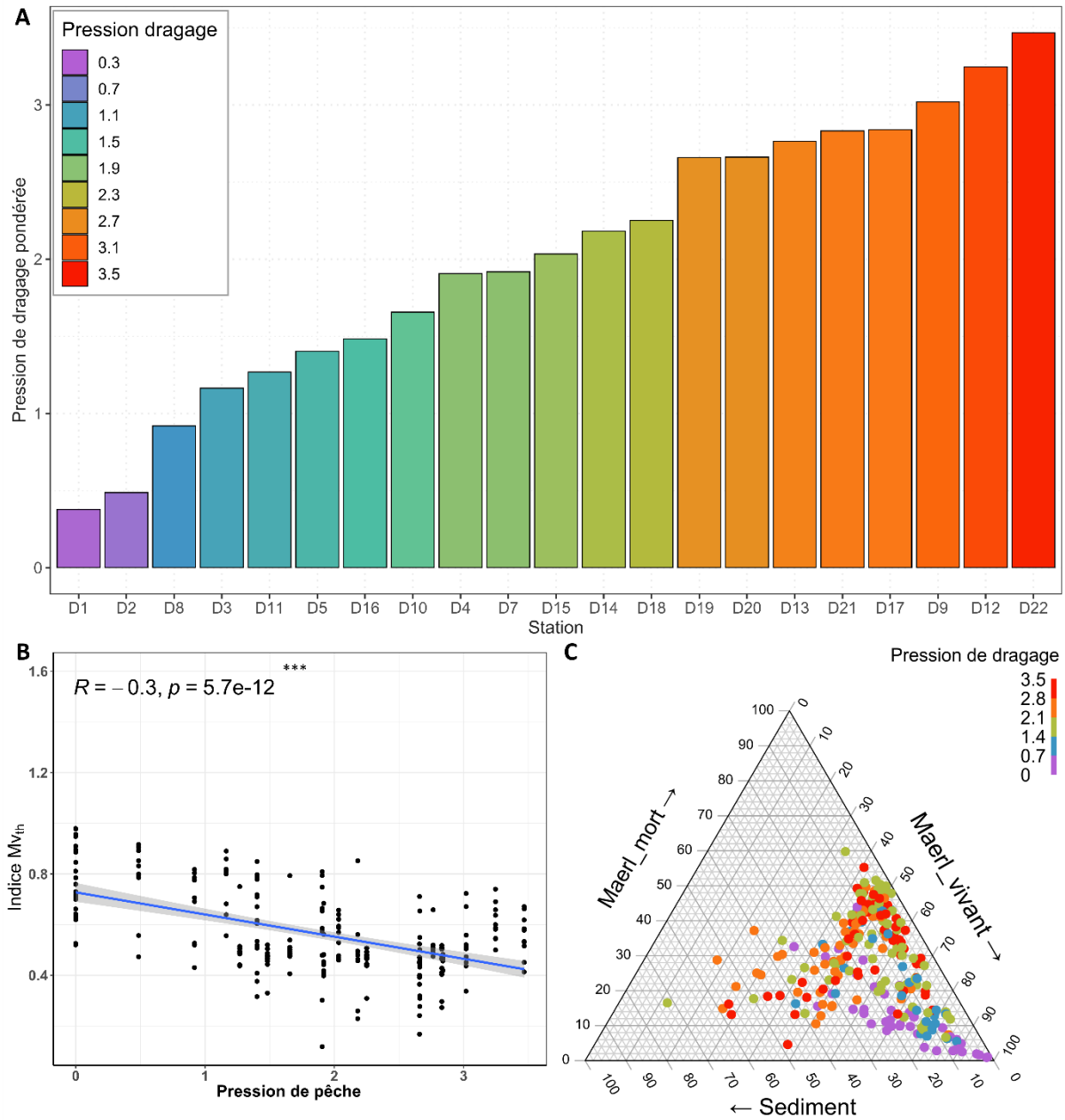


Figure 16 : Pression de pêche pondérée est calculée par station (**A**), les valeurs tendant vers le rouge sont les zones de forte pression, celles tendant vers le violet sont de faible pression. Corrélation de Kendall (**B**) entre l'indice de santé du maërl (Mv_{th}) et la pression de pêche pondérée. Les quadrats sont tracés sur un diagramme ternaire (**C**), en fonction de la proportion de maërl vivant, de maërl mort et de sédiment composant l'image, la couleur représente la pression de pêche pondérée (en rouge : le maximum de pression et en violet : le minimum)

Pour conclure, l'analyse des quadrats pour l'évaluation de l'état de santé des bancs de maërl indique que les stations les plus au sud (anse du Poulmic) sont de manière générale celles les plus épargnées par la pression de pêche et donc celles qui présentent des bancs en majorité composés de maërl vivant. Les stations présentant un mauvais état de santé se trouvent dans le banc de Rozegat et dans le banc proche de la pointe du Bindy. Ces stations se caractérisent notamment par une forte présence de maërl mort et/ou de sédiments. Il serait alors utile d'analyser d'autres facteurs environnementaux et de pouvoir tester l'efficacité du proxy de pression de pêche. Aussi, l'analyse de photoquadrats ne nous permet de mesurer seulement la couverture en maërl vivant à la surface du banc, mais d'autres critères tel que l'épaisseur du banc (variant potentiellement en fonction de la pression de dragage), pourraient nous donner plus de détails sur l'état de santé de celui-ci.

De plus, les stations de contrôle ainsi que les stations à *Lithophyllum* et celles eutrophisées sont très variables au sein même de ces groupes. En effet, l'eutrophisation, notable par une forte présence d'algues, est retrouvée dans la plupart des sites dits eutrophisés, cependant, d'autres sites sont soumis à ces fortes couvertures de macroalgues, comme ceux de l'anse du Poulmic (C3, L2, D1) qui présentent une couverture en macroalgues largement supérieure à celle des sites historiquement eutrophisés. Pour ces sites, il est impossible de connaître l'état du banc de maërl sous la couverture algale, ce qui les rends difficiles à catégoriser avec un indice basé sur la proportion de maërl vivant réelle, ce qui nous contraint à utiliser des proportions théoriques.

3) Analyse des communautés faunistiques et floristiques associées

Afin de mieux comprendre et d'appréhender les changements affectant les bancs de maërl, il est essentiel d'analyser la communauté portée par cet habitat. C'est pourquoi, en plus d'une analyse du substrat, une quantification des espèces de faune et flore a été effectuée.

- Faune

L'analyse des images de maërl nous permet d'identifier jusqu'à 82 taxons de faune. Les cinq images traitées par station sont un minimum à analyser pour avoir un échantillon représentatif de la communauté (Annexe 2).

Le site de contrôle C1 est le site présentant la diversité et l'abondance maximales (Figure 17), avec une richesse spécifique moyenne par image de 14 ± 2 espèces, ainsi qu'une abondance moyenne par image de 82 ± 14 individus. En terme de richesse spécifique, ce site est significativement différent des stations D10, D17, D22, D8 et E4 (Kruskal-Wallis, p-value < 0.01), tandis qu'en terme d'abondance, il est significativement différent des stations D10, D18, D22, D8 et E4 (Kruskal-Wallis, p-value < 0.01). Les stations les moins diversifiées sont les stations D10 et D22 (respectivement 2 ± 2 et 2 ± 1 espèces par image), c'est aussi celles avec les plus faibles abondances (respectivement 2 ± 2 et 5 ± 3 individus par image).

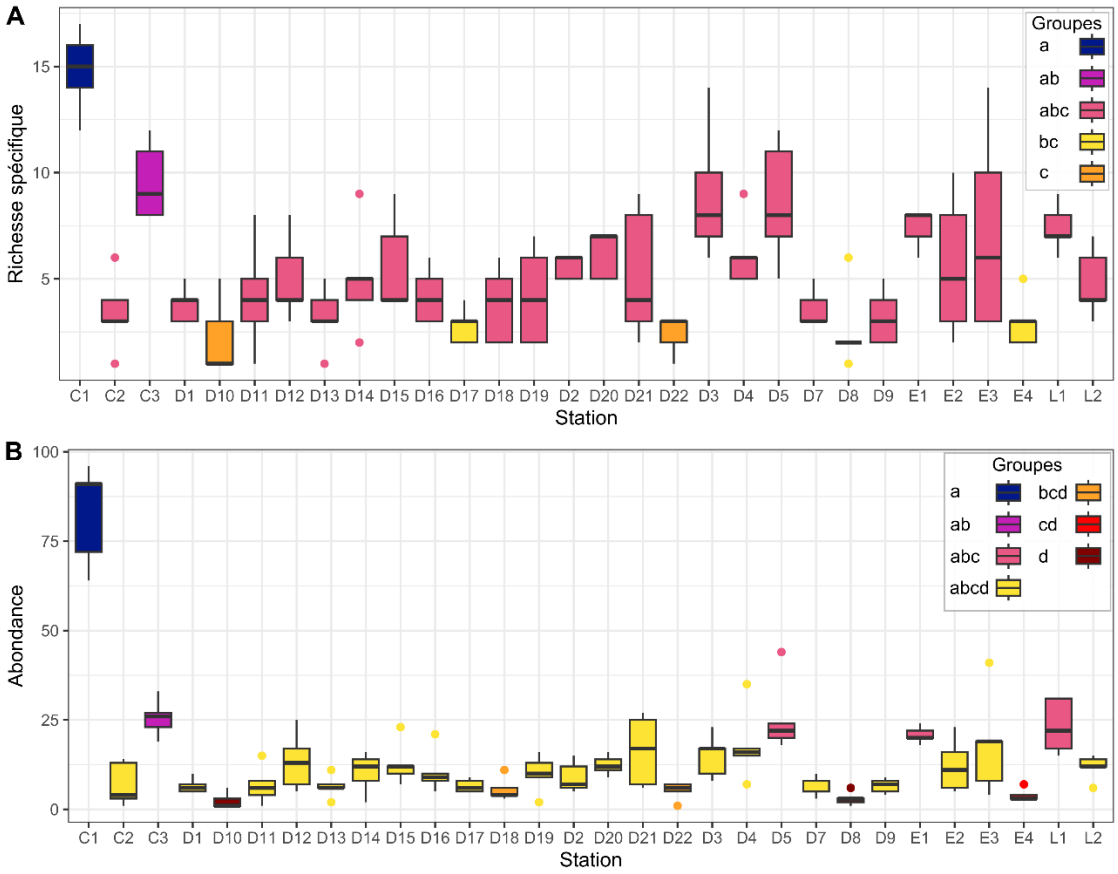


Figure 17: Richesse spécifique (A) et abondance (B) par station. Les groupes représentent les différences significatives entre les stations (test de Kruskal-Wallis, post-hoc de Dunn)

La qualité de l'habitat pour chaque banc de maërl a été calculée grâce au General-Purpose Biotic Index (GPBI), qui est une mesure de la perte par rapport à une ou plusieurs station(s) de référence (Labrune et al., 2021). Il se calcule à partir d'une proportion ($R_{quant\{r;t\}}$) d'abondance d'espèces dans la station de référence (r) qui est absente de la station testée (t):

$$(1)\ R_{quant\{r;t\}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{S_r} \max\left(r_i - t_i; 0\right)}{\sum_{i=1}^{S_r} r_i}$$

Avec S_r la richesse spécifique à la station de référence, r_i l'abondance de l'espèce i à la station de référence et t_i l'abondance de cette espèce dans la station testée.

Si une seule station est prise pour référence, le GPBI pour la station testée ($GPBI_{\{t\}}$) est égal à $R_{quant\{r;t\}}$. Au contraire, si plusieurs stations servent de référence, le $GPBI_{\{t\}}$ est calculé de la manière suivante (script disponible en ligne) :

$$(2)\ \ GPBI_{\{t\}} = 1 - \left|\overline{ref} - \%loss\right|$$

Avec $\%loss$ la moyenne de $R_{quant\{r;t\}}$ pour la station testée en comparaison à chaque station de référence et $\overline{ref}$ la moyenne de toutes les valeurs dans la matrice de distance de R_{quant} calculée entre les stations de références.

Au vues de disparités au sein de la catégorie « contrôle », le calcul a été effectué avec la station C1 pour référence. Les stations significativement différentes de la station de contrôle (Kruskal-Wallis, p-value < 0.01) sont alors considérées comme en mauvaise santé (C2, D16, D8, E4, D10 et D22). Les stations ont donc une valeur de GPBI allant de 0 à 1, avec les stations ayant un GPBI proche de 0 considérées en mauvais état écologique et celles proches de 1 en bon état écologique (Figure 18).

Parmi les stations répertoriées comme étant en mauvais état écologique, la plupart se caractérisent par une faible diversité et une abondance d'organismes limitée. Il est intéressant de noter que toutes les stations les plus fréquemment draguées ne sont pas classées en mauvais état écologique, malgré le fait que la station D22 subisse la plus forte pression de dragage. De même, toutes les stations recouvertes d'algues ne sont pas en mauvais état, même si la station E4 présente des couvertures algales très élevées. De plus, les stations avec une faible couverture de maërl vivant ne sont pas systématiquement classées en mauvais état, bien que D10, C2 et D16 affichent des couvertures très faibles de maërl vivant, privilégiant plutôt le maërl mort et les sédiments.

De manière générale, ces différences résultent d'une combinaison de facteurs connus impactant l'habitat (dragage, eutrophisation), de variabilité spatiale, mais aussi, de pressions non mesurées qui semblent impacter directement la diversité faunistique sans que le banc ne soit déjà soumis à une forte dégradation. Cela peut alors présenter les prémices d'un mauvais état de santé de l'habitat banc de maërl.

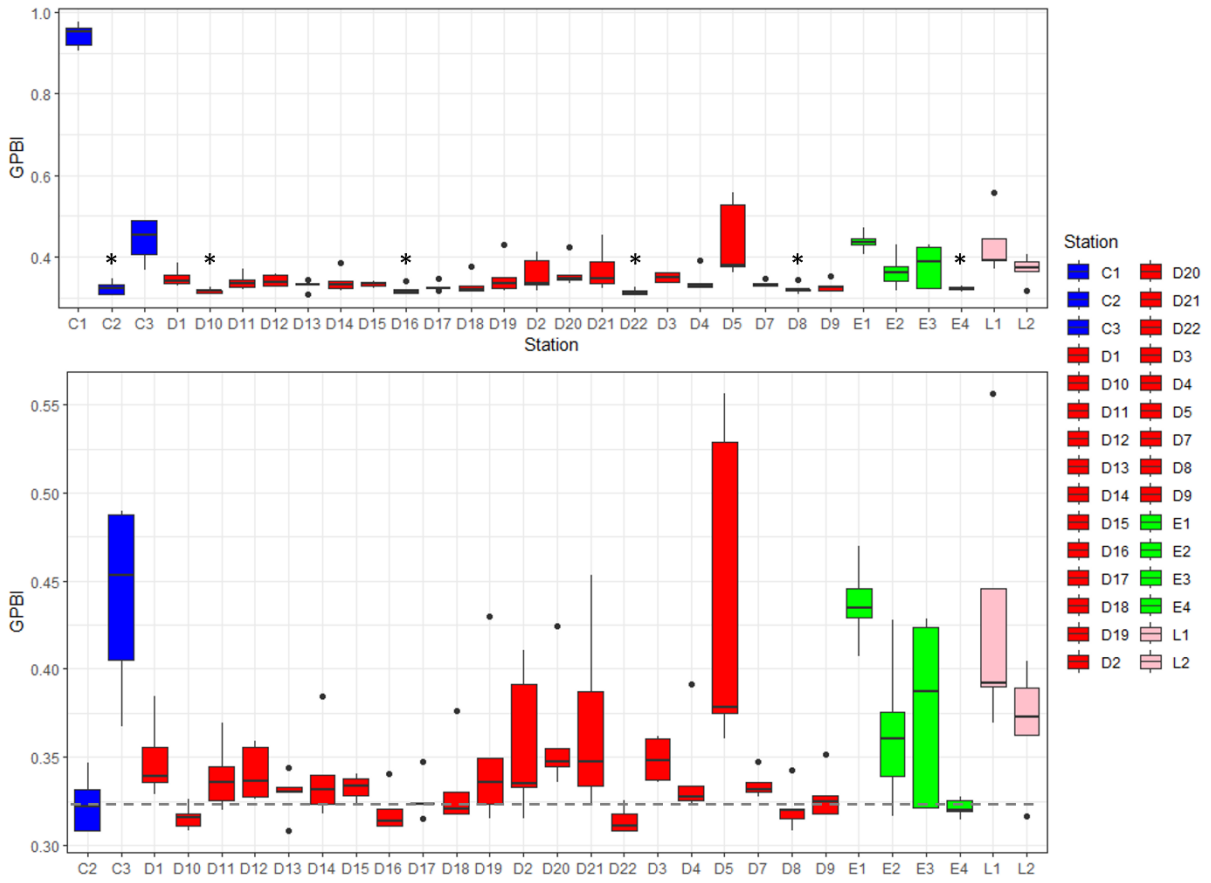


Figure 18 : Valeurs du GPBI au sein des différentes stations, la station C1 ayant été prise pour référence. Les stations portant une étoile sont celles significativement différentes de la station de référence (Kruskal-Wallis, post-hoc de Dunn). La figure du haut représente toutes les stations et celle du bas, les mêmes valeurs sans la station de référence.

Afin de s'affranchir de la problématique de l'expertise taxonomique et des limites de résolution de l'image, une analyse par groupe fonctionnel a été réalisée. Pour classer les taxons, quatre critères sont utilisés : la résistance (B : fragile vs N : résistant), le type de structure (S : structure molle vs H : structure rigide), la taille (S : petit vs L : grande) et le mode de vie (i : épifaune vs o : endofaune). Ainsi, 12 groupes permettent de catégoriser les espèces (Tableau 2).

Tableau 2 : Description des groupes taxonomiques de faune utilisés dans l'étude. Breakable = fragile ; Non breakable = résistant ; Hard = rigide ; Soft = molle ; Epibenthique = épifaune ; Endobenthic = endofaune

Résistance (B/N)	Structure (H/S)	Size (L/S)	Mode de vie (i/o)	Groupe	Nb taxons
Breakable	Hard	Large	Epibenthic	**BHLi**	12
Breakable	Hard	Large	Endobenthic	**BHLo**	2
Breakable	Hard	Small	Epibenthic	**BHSi**	2
Breakable	Hard	Large	Epibenthic	**BSLi**	18
Breakable	Soft	Large	Endobenthic	**BSLo**	3
Breakable	Soft	Small	Epibenthic	**BSSi**	1
Non breakable	Hard	Large	Epibenthic	**NHLi**	7
Non breakable	Hard	Large	Endobenthic	**NHLo**	2
Non breakable	Hard	Small	Epibenthic	**NHSi**	15
Non breakable	Soft	Large	Epibenthic	**NSLi**	15
Non breakable	Soft	Small	Epibenthic	**NSSi**	4
Non breakable	Soft	Small	Endobenthic	**NSSo**	1

Les groupes morpho-fonctionnels (Figure 19) permettent de séparer nettement le contrôle C1, caractérisé principalement par des organismes du groupe NSLi (épifaune de grande taille et de structure molle résistante). L'analyse permet aussi de séparer la station L1 principalement composée d'organismes du groupe BHLi (épifaune grande et rigide, fragile). Ces deux stations semblent porter des communautés faunistiques très différentes des autres stations.

Parmi les stations proches en terme de composition morpho-fonctionnelle, celles-ci vont alors se différencier par leur présence de NHSi et NHLi (*e.g*. D4, D12, D15), ou bien de BSLi, de BHSi et BSLo (*e.g*. C3, D5, E1, L2, E3, D3). Pour finir, le reste des stations semble se catégoriser par la faible abondance des groupes morpho-fonctionnels responsables de l'explication de la variance. Les stations présentant des fortes abondances de ces groupes ont presque toutes des couvertures de maërl vivant très importantes (excepté L2, dont l'état du banc est inconnu car recouvert d'algues). Les stations présentant de faibles proportions de maërl vivant sont donc celles caractérisées par une absence de faune.

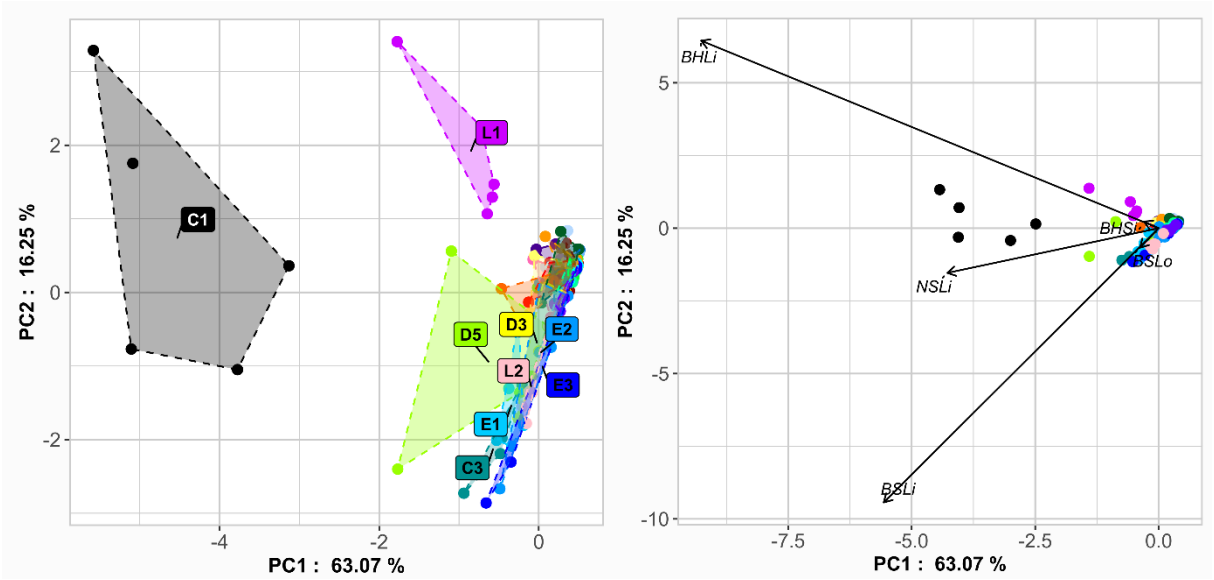


Figure 19 : Analyse en composante principale performée sur les groupes morpho-fonctionnels de la faune associée au bancs de maërl

L'abondance de faune semble avoir un comportement différent face à la pression de dragage en fonction des différents groupes morpho-fonctionnels (Figure 20). Certains groupes semblent préférer les zones plus draguées (espèces opportunistes), comme l'épifaune de petite taille et grande à structure rigide et résistante (NHSi et NHLi). Au contraire, l'épifaune de grande taille à structure molle et fragile (BSLi) disparaît dans les zones les plus draguées (espèces sensibles). Certains groupes semblent plutôt indifférents (BHSi, NSLi). Dans les stations les moins draguées vivent donc des éponges (*e.g*. *Dysidea fragilis*, *Haliclona cinerea*), des étoiles de mer (*e.g*. *Asterina gibbosa*) ou des bryozoaires (Cheilostomatida) ; qui ne se retrouvent pas dans les stations draguées, dans lesquelles vont plutôt vivre des gastéropodes (*e.g*. *Gibbula magus*) et des annélides.

Ces constats se retrouvent particulièrement sur le premier axe de l'analyse en composante principale, lorsque les stations présentant la plus forte variabilité spatiale (C1 et L1) sont retirées, la pression de pêche est donc le facteur le plus important de modification des communautés de faune des bancs de maërl, bien que cet effet peut paraître masqué par la forte variabilité qu'apporte les communautés exceptionnellement riches ou spécifiques de certaines stations non draguées.

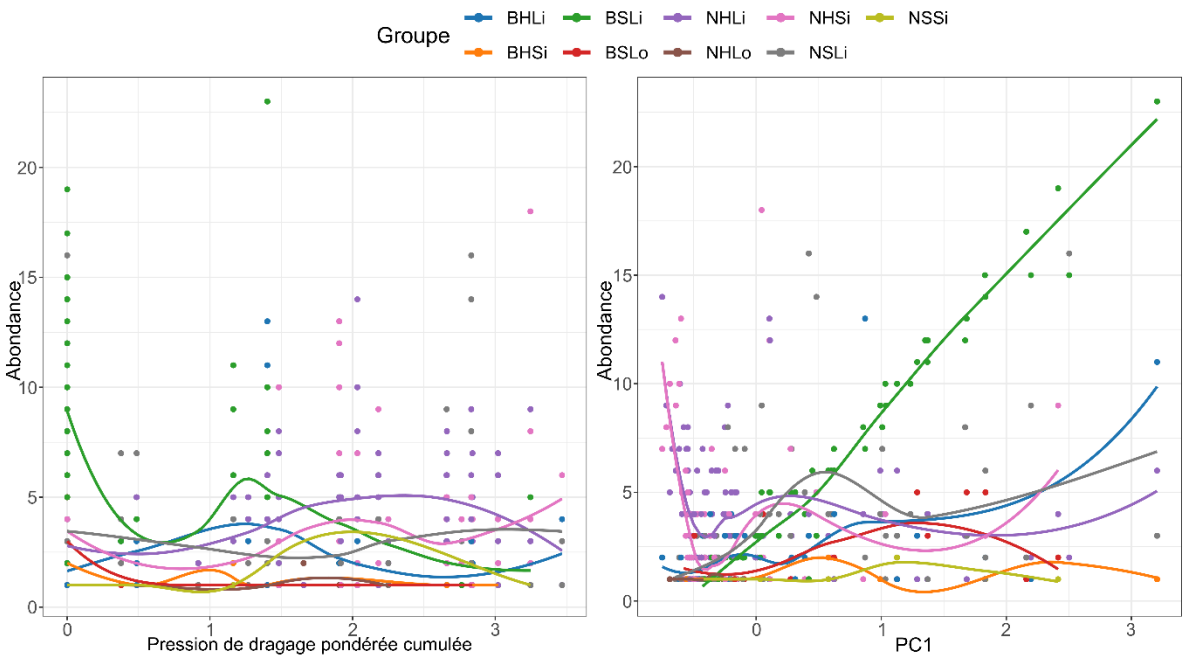


Figure 20 : Abondance de faune dans les différents groupes fonctionnels en fonction de la pression de pêche pondérée (à gauche) et en fonction des coordonnées du premier axe de l'analyse en composante principale (sans C1 et L1)

- Flore

L'analyse des images de maërl nous permet d'identifier jusqu'à 26 taxons de flore. Les cinq images traitées par station sont un minimum à analyser pour avoir un échantillon représentatif de la communauté (Annexe 2).

Le site de contrôle C1 est le site présentant la diversité maximale, avec une richesse spécifique moyenne par image de 9 ± 1 espèces (Figure 21). En terme de richesse spécifique, ce site est significativement différent des stations C1, D10, D16, D17, D8, D9 et L1 (Kruskal-Wallis, p-value < 0.01). Les sites L2, E4 et C3 présentent de plus forts recouvrements d'algue, avec respectivement des recouvrements moyens de 523 ± 64, de 435 ± 174 et de 417 ± 38 cm² d'algues (alors que le recouvrement maximal possible est de 1 000 cm²). Les stations L2, E4 et C3 sont significativement différentes des stations D16, D9, D7, D17 et D10 (Kruskal-Wallis, p-value < 0.01), présentant des recouvrements moyens inférieurs à 8 cm² d'algues.

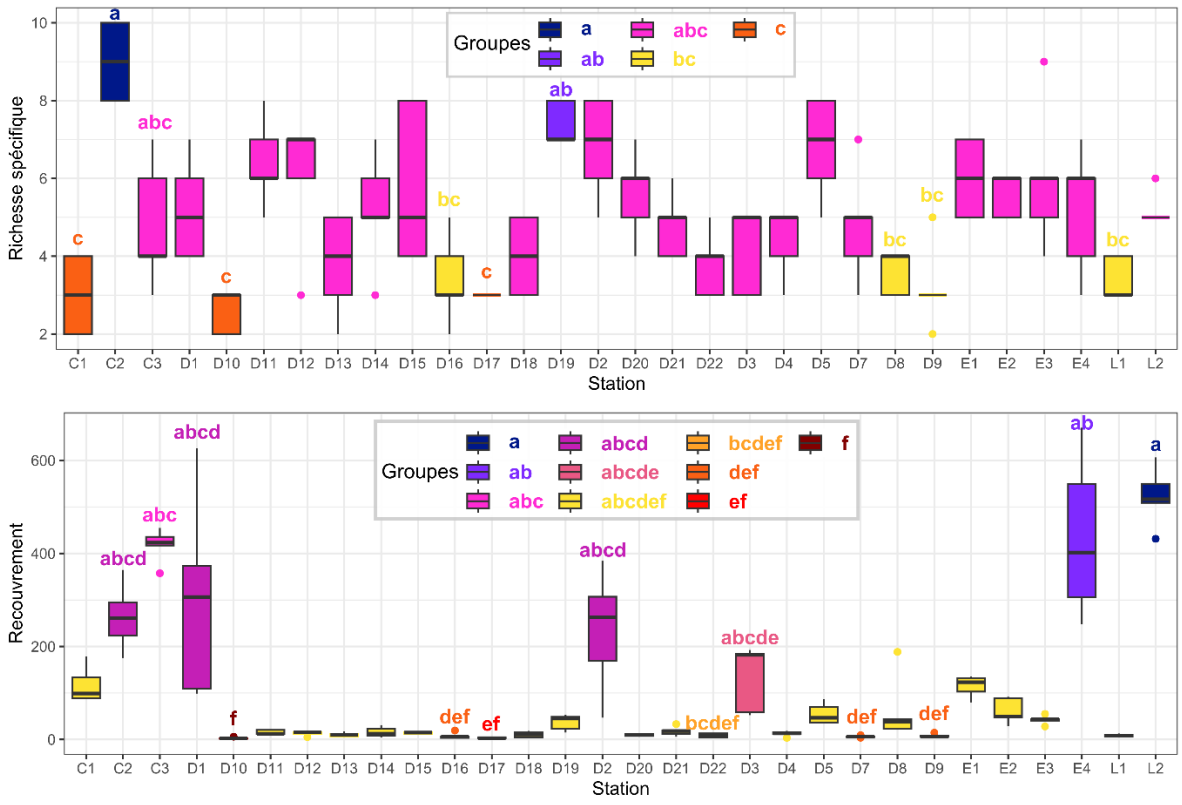


Figure 21 : Richesse spécifique (en haut) et recouvrement en cm² (en bas) d'algues par station. Le recouvrement maximal par image étant de 1 000 cm². Les groupes représentent les différences significatives entre les stations (test de Kruskal-Wallis, post-hoc de Dunn).

Les algues ont été regroupées dans 11 groupes taxo-anatomiques. Les algues vertes sont séparées en charnues (VC), filamenteuses (VF), encroûtantes (VE) et lames (VL). Les rouges sont regroupées en cartilagineuses libres (RCL) et fixées (RCF), en filamenteuse (RF), en lame fine (RLF) et en encroûtantes calcaires (REC) et non-calcaire (RENC). Chez les algues brunes, seules des espèces encroûtantes (BE) ont été retrouvées.

En terme de communauté macroalgale, les stations C3, L2, E4 et D1 sont caractérisées par une forte présence d'algues rouges libres (Figure 22) telles que *Halopithys incurva* et *Rytiphlaea tinctoria*. Les stations D8 et C1 vont, elles, être caractérisées par des algues rouges filamenteuses tandis qu'une grande majorité de stations draguées (D22, D17, D18, D12, *etc*.) vont être catégorisées par des algues encroûtantes calcaires et non calcaires.

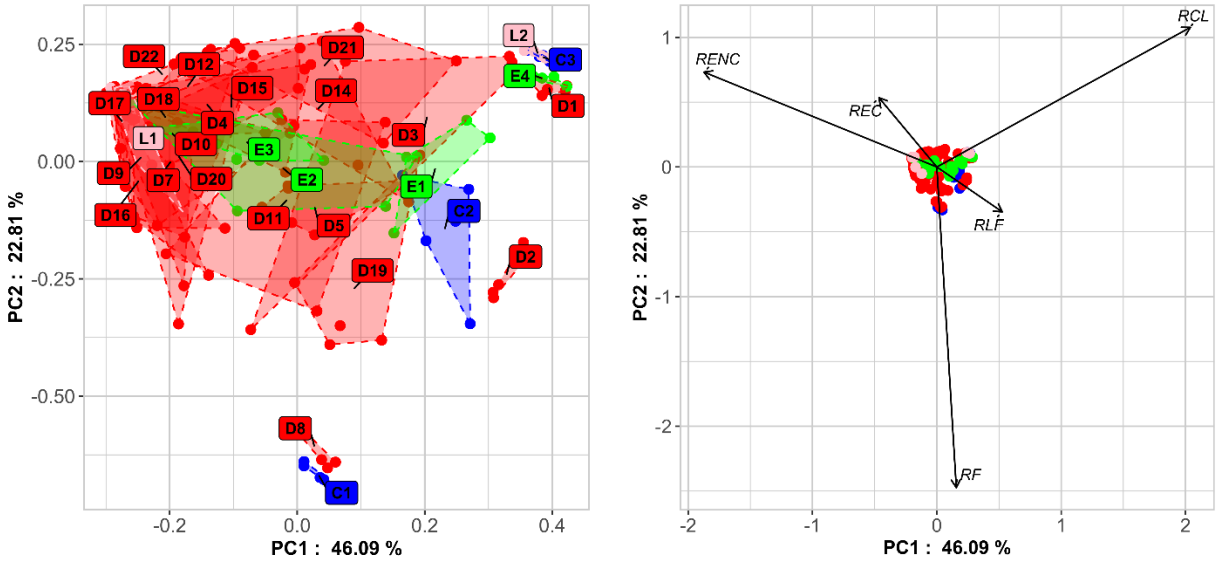


Figure 22 : Analyse en composante principale réalisée sur les données de recouvrement des groupes taxo-anatomiques des algues associées aux bancs de maërl

Le recouvrement en algue semble s'amenuiser avec la pression de dragage (Figure 23) : les sites les plus dragués présentent des recouvrements très faibles pour tous les groupes d'algues. Les sites les moins dragués présentent une forte variabilité dans leur composition en algues. En effet, les groupes de rouges cartilagineuses libres (*H. incurva* ; *R. tinctoria)*, de rouges filamenteuses et de rouges fines en lame sont très présentes dans certains sites, retrouvés dans la partie positive du premier axe de l'analyse en composante principale. La flore est donc un paramètre facilement accessible pour identifier l'état d'un banc de maërl : un faible recouvrement algal est relié à de fortes pressions de pêche. Cependant, la présence excessive d'algues pourrait signifier un déséquilibre de l'habitat, potentiellement dû à l'eutrophisation d'une zone.

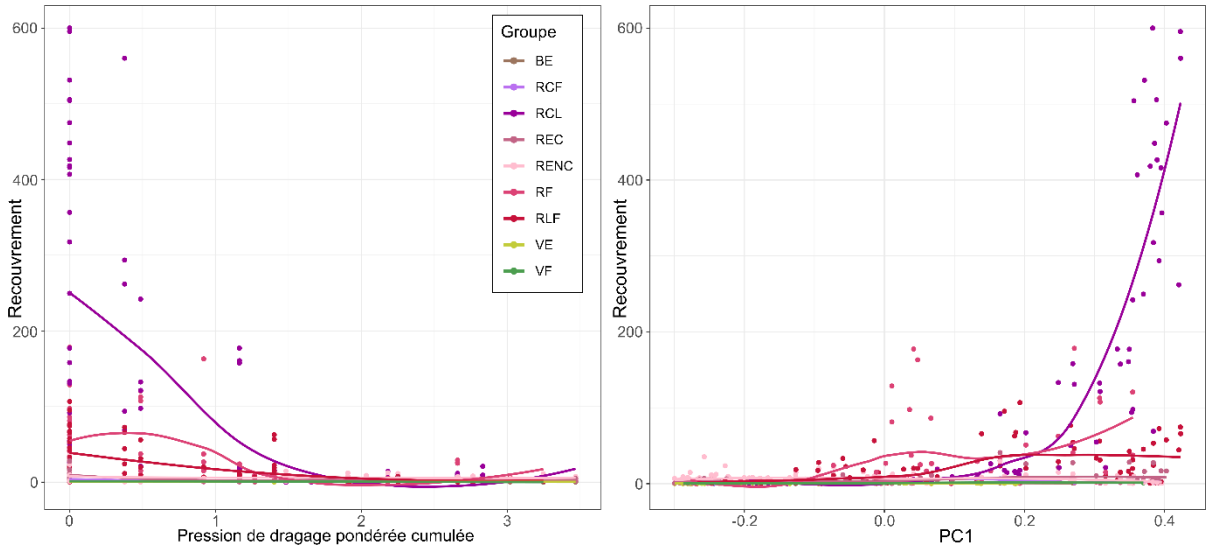


Figure 23 : Recouvrement des macroalgues par groupe taxo-anatomique en fonction de la pression de dragage pondérée cumulée (gauche) et de la position sur l'axe 1 de l'analyse en composante principale (droite)

Conclusion - Campagne 2023

En conclusion, contrairement à la campagne précédente (2021), l'ensemble des clichés pris en plongée professionnelle sont homogènes (excepté pour le site D6), avec une qualité d'image très satisfaisante pour l'analyse, bien que la présence de nuages de sédiments puisse troubler la photographie. Le matériel de photographie et l'expérience du photographe sont alors essentiels pour la qualité de l'analyse ultérieure.

La méthode utilisée pour cette analyse, réalisée en deux parties avec d'un côté l'analyse du substrat et de l'autre celle des communautés associées, a permis de caractériser l'état de santé des bancs de maërl de la zone Natura 2000 FR 530046 « Rade de Brest – Estuaire de l'Aulne ». Cette analyse complémentaire, permet non seulement de définir les bancs en bonne santé grâce à leur forte composition en maërl vivant (*e.g*. stations C1, E1 et L1), fortement reliée à l'absence de pression de pêche. Cette étude a aussi mis en évidence un gradient de dégradation vers deux états possibles : une forte composition en maërl mort (*e.g*. stations D7 et D22) ou en sédiments (*e.g*. stations D21, D13 et C2). Il est donc important de séparer le recouvrement des catégories comportant à la fois du maërl vivant et du maërl mort ou du sédiment. Réduire la taille du quadrillage appliqué lors de l'analyse d'image pourrait permettre de limiter la quantité de ces catégories mixtes.

Une autre problématique à prendre en compte, notamment pour l'établissement d'un état de santé, est la présence massive d'algues dans certains sites (*e.g*. stations L2, E4 et C3). Cela ne permet pas de connaître l'état du substrat sous-jacent, ce qui empêche l'application d'un indice basé sur la couverture de maërl vivant à ces stations. En l'absence de données environnementales concernant les concentrations en éléments nutritifs, il est impossible de connaître la nature de ces excédents de végétation, bien qu'une eutrophisation soit soupçonnée. Aussi, vérifier la quantité de macroalgues en printemps / été dans ces stations permettrait de savoir si les sites présentant de forts recouvrements d'algues en hiver présagent un développement abondant en été, signe d'une eutrophisation importante dans ces sites.

L'analyse complémentaire faune / flore a permis de relever l'abondance et le recouvrement d'un grand nombre de taxons. Cette analyse est plus longue à mettre en place, nécessite une expertise taxonomique et est limitée par la résolution de l'image. C'est pourquoi cette étude

propose l'utilisation de groupes basés sur les traits fonctionnels et morphologiques, plus faciles à catégoriser et donc apportant un gain de temps.

Au niveau de la composition et de la structure des communautés faunistiques, une forte variabilité spatiale a été trouvée. L'application d'indices préexistants sur la diversité et l'abondance des différents taxons a permis de mettre en lumière des sites dégradés tels que : C2, D16, D8, E4, D10 et D22. Pour certains de ces sites, cela est en lien avec la dégradation même du banc (avec par exemple D22 qui est très draguée et présente une forte couverture en maërl mort) ou alors en lien avec des une forte présence d'algues (avec par exemple la station E4). Cependant pour certaines stations, il manque des données environnementales pour comprendre s'il s'agit simplement de variabilité spatiale ou de dégradation encore méconnue. L'analyse en groupes morpho-fonctionnels a permis une bonne caractérisation des bancs de maërl, proche de celle utilisant les groupes taxonomiques, prouvant l'efficacité de la méthode. De plus, ces groupes répondent différemment à la pression de pêche et ont pu être catégorisés comme opportunistes, sensibles ou indifférents à la dégradation de leur habitat.

En addition de l'analyse de la communauté de macrofaune, une analyse de la communauté de macroalgue a été réalisée. Cette étude, elle aussi simplifiée en groupes taxo-anatomiques, a permis d'identifier plusieurs perturbations :

- la perte de recouvrement de flore permet d'identifier une forte pression de pêche, et
- la présence massive d'algues rouges cartilagineuses libres, de rouges filamenteuses et de rouges fines en lame semblent indiquer une toute autre perturbation

Il serait intéressant de se pencher sur cette dernière perturbation pour comprendre les différentes pressions pesant sur les bancs de maërl. En effet, ces algues entrent directement en compétition pour les nutriments et la lumière avec le maërl, et peut impacter la croissance de l'organisme ingénieur mais aussi la diversité associée.

Recommandations

De manière générale, la rade de Brest a bien été catégorisée grâce à l'analyse combinée de l'état du banc de maërl et de l'analyse faune / flore. Grâce à ces informations, des indices ont pu être calculés et des stations ont pu être identifiées comme à surveiller de près. Cependant, certains points restent à approfondir :

- L'acquisition de données environnementales manquantes (concentration en éléments nutritifs, courants, hydrodynamisme) pourraient permettre de mieux comprendre les variabilités spatiales non-explicables par la pression de dragage, par exemple dans l'anse du Poulmic, en baie de Daoulas ou en embouchure de l'Elorn.
- Les paramètres utilisés pour définir l'état de santé et les compositions des communautés associées aux bancs de maërl sont uniquement basées sur la rade de Brest. Au vue de la variabilité spatiale déjà présente en rade de Brest, la question de la possibilité d'appliquer l'étude à d'autres zones se pose. L'extension de la zone d'étude, notamment aux sites situés en baie de Concarneau, serait à envisager et serait en concordance avec les projets d'extension de la réserve naturelle des Glénan.
- Les différentes analyses prennent beaucoup de temps, la question de développer l'analyse automatique des images est aussi à envisager.

Pour favoriser une étude à plus large échelle, il serait recommandé :

- Une formation du personnel amené à traiter les images sur 1) le logiciel Image J ; 2) l'identification sur image des espèces de faune et de flore retrouvées dans les bancs de maërl ; et 3) l'analyse statistique des données obtenues grâce au traitement d'image.
- D'effectuer l'échantillonnage recommandée en dehors des longues périodes de tempêtes et de fortes pluies et avant les périodes d'efflorescence d'algues, soit une période estimée entre février et avril.
- Une optimisation de la macro crée sur Image J afin de réduire le temps d'analyse.
- Un suivi régulier de l'état de santé des bancs de maërl et de la faune sur un grand nombre de station (il est recommandé de suivre un grand nombre de stations, comme lors de la campagne de 2023, ce qui permet d'observer des gradients de dégradation). Ce suivi est à réaliser au mieux tous les ans (aux vues des changements annuels des pressions subies par les bancs), avec définition de stations de contrôle fixes sur la période de suivi.

Références

Ferreira & Rasband, 2012. Image J User-guide IJ 1.46r. https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/

Labrune, C., et al. (2021). "A general-purpose biotic index to measure changes in benthic habitat quality across several pressure gradients." *Journal of Marine Science Engineering* 9(6): 654.

Pantalos, M. (2015). Clam dredging and maerl bed health in the south basin of the Bay of Brest. Rapport de stage de Master 2 - Université de Bretagne Occidentale. 35 pages.

Pruvot, S. (2023). Etude de l'impact de la pêche à la drague et de l'eutrophisation sur les bancs de maërl en rade de Brest. Rapport de stage de Master 1 - Université de Bretagne Occidentale. 28 pages.

Tauran, A. & Grall, J. (2021) Elaboration d'un protocole visant à qualifier l'état de conservation des bancs de maërl de la rade de Brest par relevés photographiques. Rapport technique – Observatoire de l'IUEM, UBO. 21 pages.

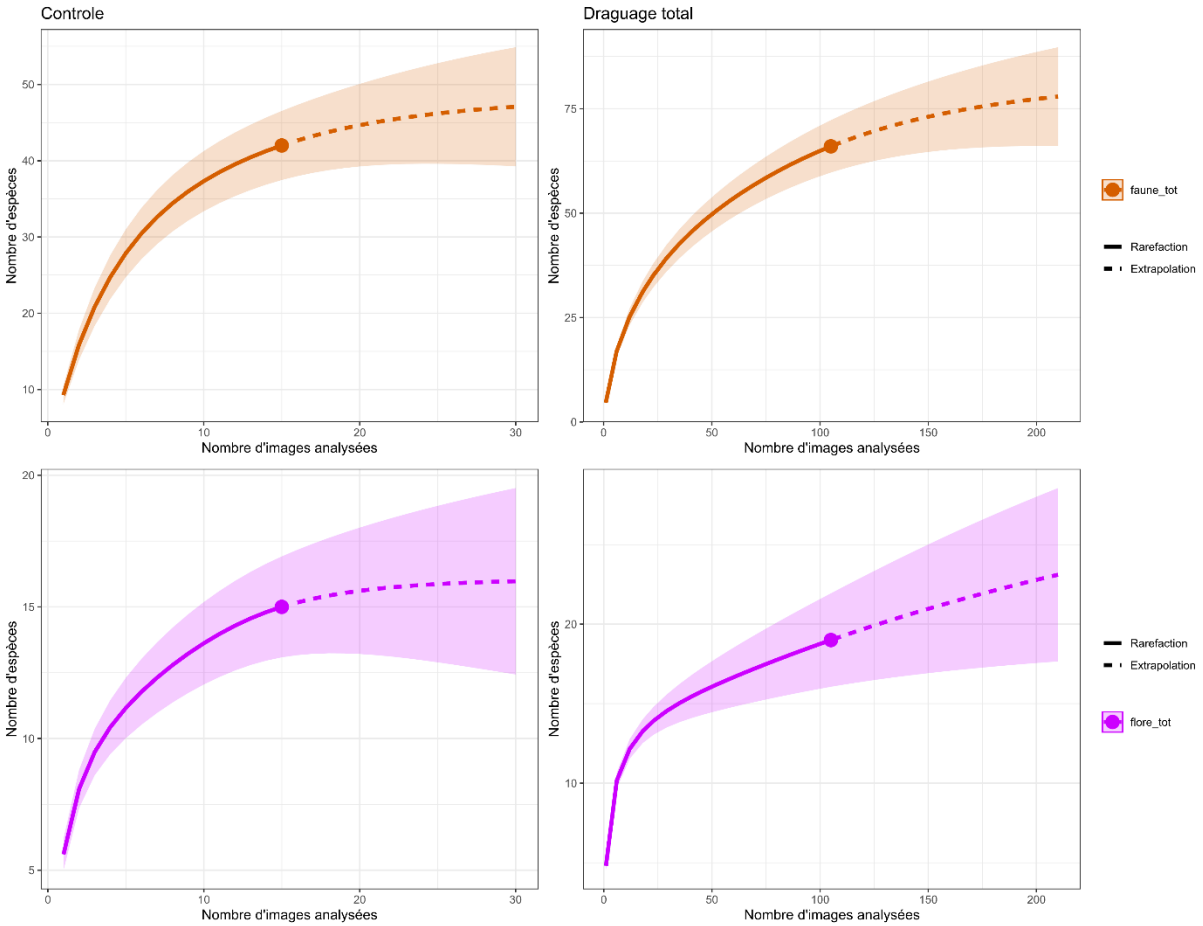
Tauran, A., Helias, M. & Grall, J. (2023) Rapport méthodologique : Etude des bancs de maërl par analyse de relevés photographiques. Rapport méthodologique – Observatoire de l'IUEM, UBO. 11 pages.

Annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des sites échantillonnés, ccomportant les coordonnées des sites, le nombre d'images analysées par les deux méthodes, le pourcentage de maërl vivant moyen par image, la richesse moyenne pour la faune et la flore par image (les moyennes sont données avec les écart-types) et la pression de pêche cumulée pondérée par station

Name	xcoord	ycoord	Nombre images (santé)	Nombre images (diversité)	% Maerl vivant moyen	Richesse sp. faune moyenne	Richesse sp. flore moyenne	Pression de pêche cumulée pondérée
C1	-4,3649	48,3153	15	5	45,2 ± 13,1	14,8 ± 1,9	3,0 ± 1,0	-
C2	-4,5548	48,3173	11	5	9,4 ± 6,6	3,4 ± 1,8	9,0 ± 1,0	-
C3	-4,3892	48,2833	11	5	38,8 ± 8,9	9,6 ± 1,8	4,8 ± 1,6	-
D1	-4,3883	48,2928	9	5	22,6 ± 15,1	3,8 ± 0,8	5,2 ± 1,3	0,377
D2	-4,3849	48,2938	10	5	59,0 ± 26,7	5,6 ± 0,5	6,8 ± 1,3	0,487
D3	-4,4032	48,3217	11	5	59,4 ± 19,5	9,0 ± 3,2	4,2 ± 1,1	1,164
D4	-4,377	48,3195	11	5	33,9 ± 24,2	6,2 ± 1,6	4,4 ± 0,9	1,907
D5	-4,3709	48,3199	17	5	34,6 ± 23,2	8,6 ± 2,9	6,8 ± 1,3	1,403
D6	-4,3637	48,3231	17	5	-	-	-	2,209
D7	-4,3655	48,3221	12	5	12,8 ± 17,8	3,6 ± 0,9	4,8 ± 1,5	1,918
D8	-4,3623	48,3091	10	5	36,9 ± 26,4	2,6 ± 1,9	3,6 ± 0,5	0,919
D9	-4,383	48,3194	12	5	19,4 ± 15,9	3,2 ± 1,3	3,2 ± 1,1	3,019
D10	-4,3484	48,3114	10	5	9,4 ± 20,2	2,2 ± 1,8	2,6 ± 0,5	1,656
D11	-4,3596	48,3235	10	5	9,0 ± 20,4	4,2 ± 2,6	6,4 ± 1,1	1,269
D12	-4,3946	48,3195	10	5	32,8 ± 15,9	5,0 ± 2,0	6,0 ± 1,7	3,247
D13	-4,3857	48,3194	10	5	9,4 ± 11,7	3,2 ± 1,5	3,8 ± 1,3	2,764
D14	-4,3991	48,3194	9	5	11,4 ± 25,5	5,0 ± 2,5	5,2 ± 1,5	2,18
D15	-4,375	48,3221	15	5	24,6 ± 17,7	5,6 ± 2,3	5,8 ± 2,0	2,034
D16	-4,3455	48,3104	12	5	2,2 ± 3,4	4,2 ± 1,3	3,4 ± 1,1	1,483
D17	-4,3877	48,3203	10	5	0,8 ± 1,0	2,8 ± 0,8	3,0 ± 0,0	2,84
D18	-4,3541	48,31	10	5	0,4 ± 1,1	3,8 ± 1,8	4,0 ± 1,0	2,251
D19	-4,3937	48,3181	10	5	13,2 ± 16,5	4,2 ± 2,2	7,4 ± 0,5	2,659
D20	-4,3856	48,3176	11	5	14,2 ± 12,1	6,2 ± 1,1	5,6 ± 1,1	2,661
D21	-4,3884	48,3177	11	5	2,6 ± 3,6	5,2 ± 3,1	4,8 ± 0,8	2,832
D22	-4,3911	48,3199	10	5	24,6 ± 12,8	2,4 ± 0,9	3,8 ± 0,8	2,468
E1	-4,4485	48,3597	10	5	91,3 ± 4,5	7,4 ± 0,9	6,0 ± 1,0	-
E2	-4,4444	48,3627	10	5	30,8 ± 16,9	5,6 ± 3,4	5,6 ± 0,5	-
E3	-4,4399	48,366	10	5	49,8 ± 17,1	7,2 ± 4,8	6,0 ± 1,8	-
E4	-4,3347	48,3222	12	5	19,0 ± 13,9	3,0 ± 1,2	5,2 ± 1,6	-
L1	-4,4363	48,2948	10	5	84,7 ± 9,9	7,4 ± 1,1	3,4 ± 0,5	-
L2	-4,3573	48,2878	10	5	6,8 ± 3,5	4,8 ± 1,6	5,2 ± 0,4	-

Annexe 2 : Courbes de raréfaction de la richesse spécifique de faune (haut) et flore (bas) par le nombre d'images analysées pour les stations de contrôle (à gauche) et les stations draguées (à droite)



Annexe 3 : Groupes morpho-fonctionnels de faune. Critères utilisés : la résistance (B : fragile vs N : résistant), le type de structure (S : structure molle vs H : structure rigide), la taille (S : petit vs L : grande) et le mode de vie (i : épifaune vs o : endofaune)

Classe	Espece	Type	Group
Bivalvia	Mimachlamys_varia	Bivalve	**BHLi**
Bivalvia	Pectinidae	Bivalve	**BHLi**
Bivalvia	Talochlamys_pusio	Bivalve	**BHLi**
Bivalvia	Anomia_ephippium	Bivalve	**BHLi**
Echinoidea	Echinus_esculentus	Urchin	**BHLi**
Echinoidea	Paracentrotus_lividus	Urchin	**BHLi**
Gastropoda	Crepidula_fornicata	Shelled Gastropoda	**BHLi**
Malacostraca	Liocarcinus_navigator	Crab	**BHLi**
Malacostraca	Macropodia_spp	Crab	**BHLi**
Malacostraca	Paguridae	Paguridae	**BHLi**
Ophiuroidea	Ophiocomina_nigra	Ophiuroidea	**BHLi**
Ophiuroidea	Ophiothrix_fragilis	Ophiuroidea	**BHLi**
Bivalvia	Lutraria_spp	Bivalve	**BHLo**
Bivalvia	Polititapes_rhomboides	Bivalve	**BHLo**
Echinoidea	Psammechinus_miliaris	Urchin	**BHSi**
Ophiuroidea	Amphipholis_squamata	Ophiuroidea	**BHSi**
Asteroidea	Asterina_gibbosa	Asteridae	**BSLi**
Asteroidea	Marthasterias_glacialis	Asteridae	**BSLi**
Calcispongia	Clathrina_spp	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Dysidea_fragilis	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Haliclona_cinerea	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Haliclona_simulans	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Haliclona_spp_blanche	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Haliclona_spp_grise	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Haliclona_spp_jaunes	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Haliclona_viscosa	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Hymeniacydon_perlevis	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Phorbas_spp	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Raspailla_spp	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Terpios_gelatinosus	Sponge	**BSLi**
Demospongiae	Tethya_citrina	Sponge	**BSLi**
Gymnolaemata	Cheilostomatida	Bryozoa	**BSLi**
Gymnolaemata	Ctenostomatida	Bryozoa	**BSLi**
Polychaeta	Polychaeta	Annelida	**BSLi**
Polychaeta	Chaetopterus_variopedalus	Annelida	**BSLo**
Polychaeta	Myxicola_spp	Annelida	**BSLo**
Polychaeta	Terebellidae	Annelida	**BSLo**
Actinopterygii	Lebetus_guilleti	Fish	**BSSi**

Gastropoda	Gibbula_magus	Shelled Gastropoda	**NHLi**
Malacostraca	Galathea_intermedia	Galathea	**NHLi**
Malacostraca	Pilumnus_hirtellus	Crab	**NHLi**
Malacostraca	Pisa_spp	Crab	**NHLi**
Polychaeta	Protula_spp	Annelida	**NHLi**
Polychaeta	Serpula_vermicularis	Annelida	**NHLi**
Polychaeta	Spirobranchus_spp.	Annelida	**NHLi**
Bivalvia	Venus_verrucosa	Bivalve	**NHLo**
Gastropoda	Tritia_reticulata	Shelled Gastropoda	**NHLo**
Gastropoda	Bittium_reticulatum	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Calyptraea_chinensis	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Jujubinus_exasperatus	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Steromphala_cineraria	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Tectura_virginea	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Trivia_arctica	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Trivia_monacha	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Gastropoda	Diodora_graeca	Shelled Gastropoda	**NHSi**
Malacostraca	Athanas_nitescens	Shrimp	**NHSi**
Malacostraca	Caridea	Shrimp	**NHSi**
Malacostraca	Eurynome_spinosa	Crab	**NHSi**
Malacostraca	Philocheras_spp	Shrimp	**NHSi**
Malacostraca	Pisidia_longicornis	Crab	**NHSi**
Polychaeta	Spirorbis_spp	Annelida	**NHSi**
Polyplacophora	Acanthochina_spp	Chiton	**NHSi**
Actinopterygii	Pomatoschistus_spp	Fish	**NSLi**
	Cnidaire_indet	Cnidaria	**NSLi**
Anthozoa	Actiniaria	Cnidaria	**NSLi**
Anthozoa	Calliactis_parasitica	Cnidaria	**NSLi**
Ascidiacea	Aplidium_spp	Tunicate	**NSLi**
Ascidiacea	Ascidia_spp	Tunicate	**NSLi**
Ascidiacea	Diplosoma_spp	Tunicate	**NSLi**
Ascidiacea	Pyura_microcosmus	Tunicate	**NSLi**
Ascidiacea	Styela_clava	Tunicate	**NSLi**
Gastropoda	Aeolidioidae	Sea slug	**NSLi**
Gastropoda	Aplysia_punctata	Sea slug	**NSLi**
Gastropoda	Aplysilla_spp	Sea slug	**NSLi**
Gastropoda	Doris_pseudoargus	Sea slug	**NSLi**
Holothuroidea	Aslia_spp	holothurian	**NSLi**
Holothuroidea	Ocnus_lacteus	holothurian	**NSLi**
Ascidiacea	Clavelina_lepadiformis	Tunicate	**NSSi**
Gastropoda	Facelina_annulicornis	Sea slug	**NSSi**
Gastropoda	Geitodoris_planata	Sea slug	**NSSi**
Gastropoda	Jorunna_tomentosa	Sea slug	**NSSi**
Anthozoa	Edwardsiidae	Cnidaria	**NSSo**

Annexe 4 : Caractérisation des groupes taxo-anatomiques de flore. Critères utilisés : Phylum (R : Rhodophyta, B : Phaeophyceae, V : Chlorophyta) et morpho-anatomie.

Phylum	Espece	Groupe	Name
Tracheophyta	Zostera marina	Autre	**Autre**
Pheaophyceae	Encroutante brune	Encroutante_brune	**BE**
Rhodophyta	Chondria spp	Cartilagineuse_fixée	**RCF**
Rhodophyta	Gracilaria multipartita	Cartilagineuse_fixée	**RCF**
Rhodophyta	Gracilaria sp	Cartilagineuse_fixée	**RCF**
Rhodophyta	Pterosiphonia complanata	Cartilagineuse_fixée	**RCF**
Rhodophyta	Schizymenia dubyi	Cartilagineuse_fixée	**RCF**
Rhodophyta	Halopithys incurva	Cartilagineuse_libre	**RCL**
Rhodophyta	Rytiphlaea tinctoria	Cartilagineuse_libre	**RCL**
Rhodophyta	Solieria chordalis	Cartilagineuse_libre	**RCL**
Rhodophyta	Vertebrata martensiana	Cartilagineuse_libre	**RCL**
Rhodophyta	Corallinaceae	Croute_rouge_cal	**REC**
Rhodophyta	Lithophyllum fasciculatum	Croute_rouge_cal	**REC**
Rhodophyta	Lithophyllum spp	Croute_rouge_cal	**REC**
Rhodophyta	Melobesioideae	Croute_rouge_cal	**REC**
Rhodophyta	Cruoria cruoriiformis	Croute_rouge_ncal	**RENC**
Rhodophyta	Peyssonnelia spp	Croute_rouge_noncal	**RENC**
Rhodophyta	Dasysiphonia japonica	Filamenteuse_rouge	**RF**
Rhodophyta	Rouges filamenteuses	Filamenteuse_rouge	**RF**
Rhodophyta	Hypoglossum hypoglossoides	Lame_fine	**RLF**
Rhodophyta	Rouges en lames	Lame_fine	**RLF**
Chlorophyta	Codium bursa	Verte_charnue	**VC**
Chlorophyta	Sporulations vertes	Encroutante_verte	**VE**
Chlorophyta	Lychaete rhodolithicola	Filamenteuse_verte	**VF**
Chlorophyta	Vertes filamenteuses	Filamenteuse_verte	**VF**
Chlorophyta	Ulva spp	Lame_verte	**VL**

Protocole méthodologique

Issu et adapté du rapport méthodologique de Tauran, Helias et Grall (2023)

1) Protocole d'échantillonnage

Afin d'éviter des biais d'échantillonnage lors du choix des quadrats, un protocole d'échantillonnage (Figure 24) a été mis en place. Sur un banc de maërl, un bout de 10 mètres est fixé au sol à l'aide de piquets, rendus visibles avec des bouées flottantes. Tous les mètres le long de ce bout, un quadrat de 0,1 m² est posé alternativement à droite et à gauche. Le plongeur se place au-dessus du quadrat, à une distance telle à avoir au maximum le quadrat dans le cadre de la photographie, c'est-à-dire que les bords du quadrat doivent au maximum se rapprocher des limites de l'image, sans jamais que ce quadrat ne les dépasse. Au total, un minimum de 10 images sont à effectuer pour un site, il est cependant préconisé d'en prendre une de plus au cas où, lors de l'analyse, une image soit inutilisable (floue, nuage de sédiment, ombre, …).

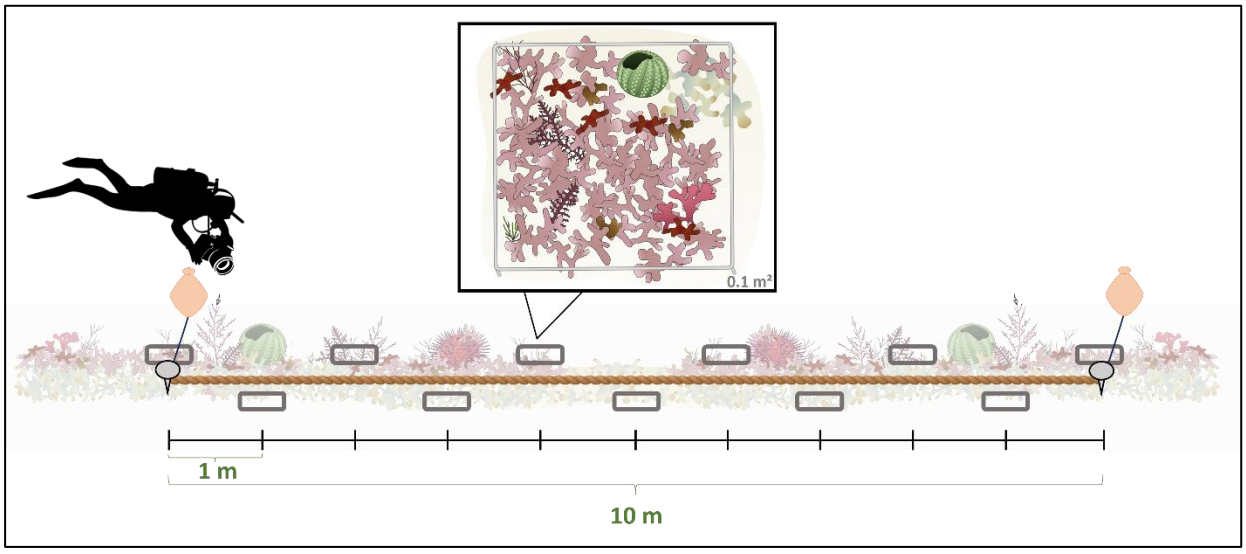


Figure 24 : Protocole d'échantillonnage pour la prise d'image

2) Analyse de photoquadrats de maërl à partir du logiciel Image J

α) Initialisation du logiciel et de la macro d'analyse

Image J Fiji est un logiciel gratuit et portable, qui permet l'analyse d'images ainsi que la création de macro et de plugin permettant d'automatiser le processus d'analyse. Il est téléchargeable sur : https://imagej.net/Fiji/Downloads.

La méthodologie utilisée dans cette étude se présente sous la forme d'un fichier .txt regroupant quatre macro d'analyse : deux pour la caractérisation du quadrat (analyse initiale et analyse secondaire pour modification) et deux pour l'étude de la faune et de la flore (analyse initiale et analyse secondaire pour modification). Ce document est à placer dans le dossier toolset du répertoire Fiji après installation du logiciel (C:\... \fiji-win64\Fiji.app\macros\toolsets). Le dossier *icons* fournit sera également placé dans ce répertoire.

Au lancement du logiciel, cliquer sur le symbole ≫ et sélectionner *Photoquadrats Maerl - PNRA* pour activer les macros d'analyses (Figure 25). Quatre nouvelles icones apparaissent correspondant aux quatre macros d'analyses développées pour l'analyse des quadrats.

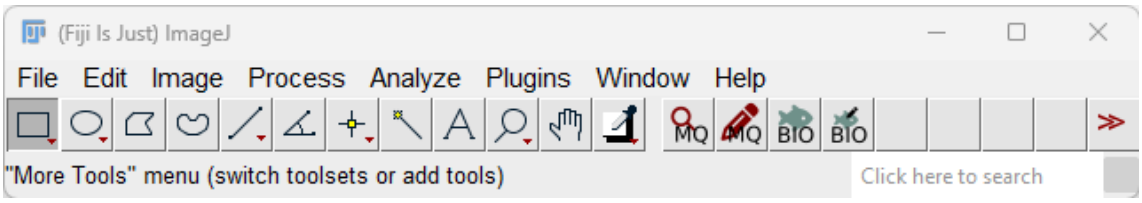


Figure 25 : Interface d'ImageJ après activation des macros d'analyse pour photoquadrats

β) Analyse des photoquadrats : étude du recouvrement

Cette partie reprend les éléments du rapport méthodologique fourni en 2021, mis à jour avec les améliorations apportées à l'interface.

L'analyse initiale se lance à partir de l'icône MQ . Il faut alors renseigner le dossier source (le dossier de l'image à analyser), choisir une image puis le dossier de sortie s'il est différent du dossier source (il est recommandé de différencier les dossiers source et sortie et de créer un dossier unique de sortie pour l'ensemble des images).

L'utilisateur.trice doit ensuite renseigner la station où le quadrat a été photographié. Si le quadrat nécessite d'être remis dans l'axe, cela est possible à l'étape suivante avec le l'outil

Rotate dans *Image > Transform > Rotate*. L'angle doit être conservé au cas où il soit nécessaire de retravailler sur l'image.

L'étape suivante consiste à créer la grille d'analyse. Pour cela, positionner successivement le coin supérieur gauche puis le coin inférieur droit du quadrat à l'aide de l'outil point (présélectionné). Il est important de faire en sorte que la grille se situe à l'intérieur du quadrat et non pas sur le quadrat lui-même (Figure 26). La taille utilisée dans cette étude est une grille de 225 cellules i.e. 15 lignes x 15 colonnes (taille par défaut). Si la grille ne convient pas une fois tracée (mauvais positionnement, taille à modifier) il est possible de la modifier avant de passer à l'analyse.

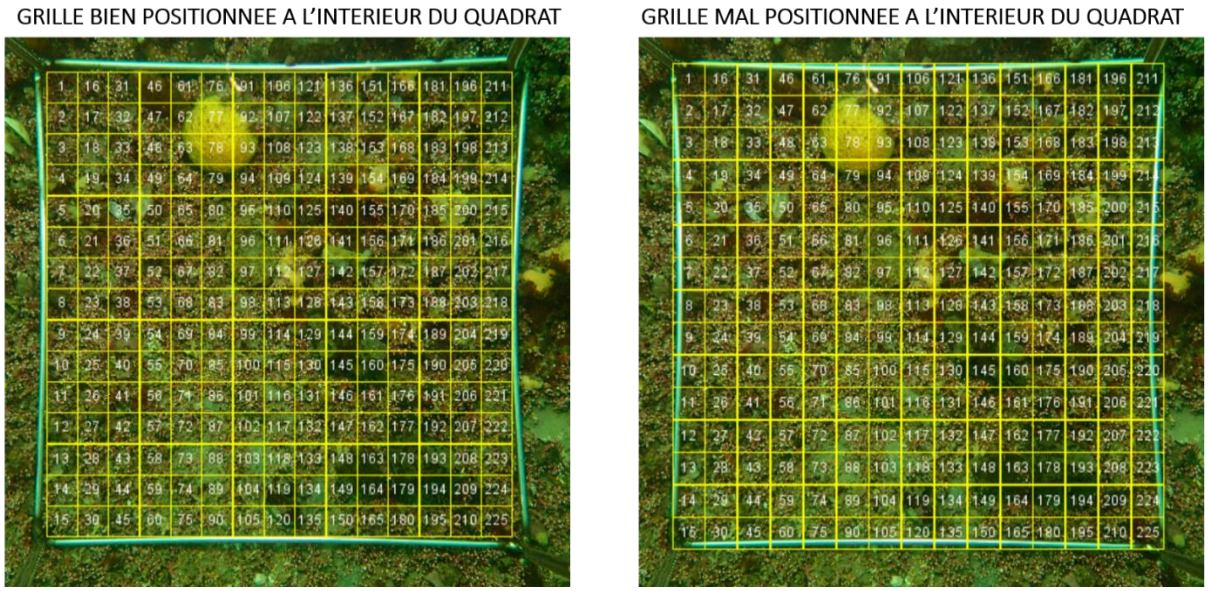


Figure 26 : Positionnement de la grille d'analyse au sein du photoquadrat

L'analyse des photoquadrats consiste à caractériser chaque cellule de la grille selon ce qui est observé. Onze catégories (Tableau 1) ont été définies lors de la création de cette méthode en 2021. Pour cette étude (2022), une douzième catégorie a été ajouté pour correspondre aux observations faites sur certains quadrats : la catégorie Cyanobactéries.

Deux degrés d'expertise/de précision dans l'analyse sont proposés au sein de cette méthode (mode Simple et mode Avec détails). Seul le mode Avec détails sera utilisé dans cette étude.

Pour plus d'informations sur le mode Simple, nous renvoyons au rapport méthodologique de 2021.

Les cellules de la grille peuvent être analysées de deux manières :

(1) soit cellule par cellule (plus long), soit par

(2) groupes de cellules (recommandé) (Figure 27).

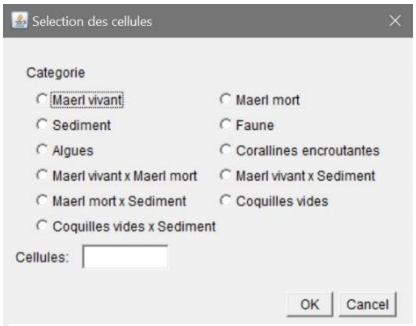


Figure 27 : Méthode par "groupe de cellules"

Dans cette option, les cellules de la même catégorie (ex : Maerl vivant) peuvent être renseigner en même temps en séparant leur numéro par un point (ex : 2.59.32.5.12.48). Dans tous les cas, l'analyse doit impérativement commencer par la cellule 1. Si l'ensemble des cellules restantes appartient à la même catégorie, cocher l'option « Toutes les cellules restantes » et la catégorie sélectionnée pour toutes les caractériser en même temps sans avoir besoin de saisir leur identifiant.

Lorsque toutes les cellules ont été catégorisées, plusieurs fichiers sont exportés dans le dossier de sortie output:

- La table **[nom du quadrat]_Output** : fichier texte qui contient les informations propres à la caractérisation des cellules, c'est-à-dire le nom de la station, l'index et le label (numéro) de chaque cellule, le nom du quadrat analysé (nom de l'image) et la catégorie sélectionnée (CatGrid).
- Le ROI Set : **dossier .zip** qui rassemble l'ensemble des données des cellules et leur affichage.

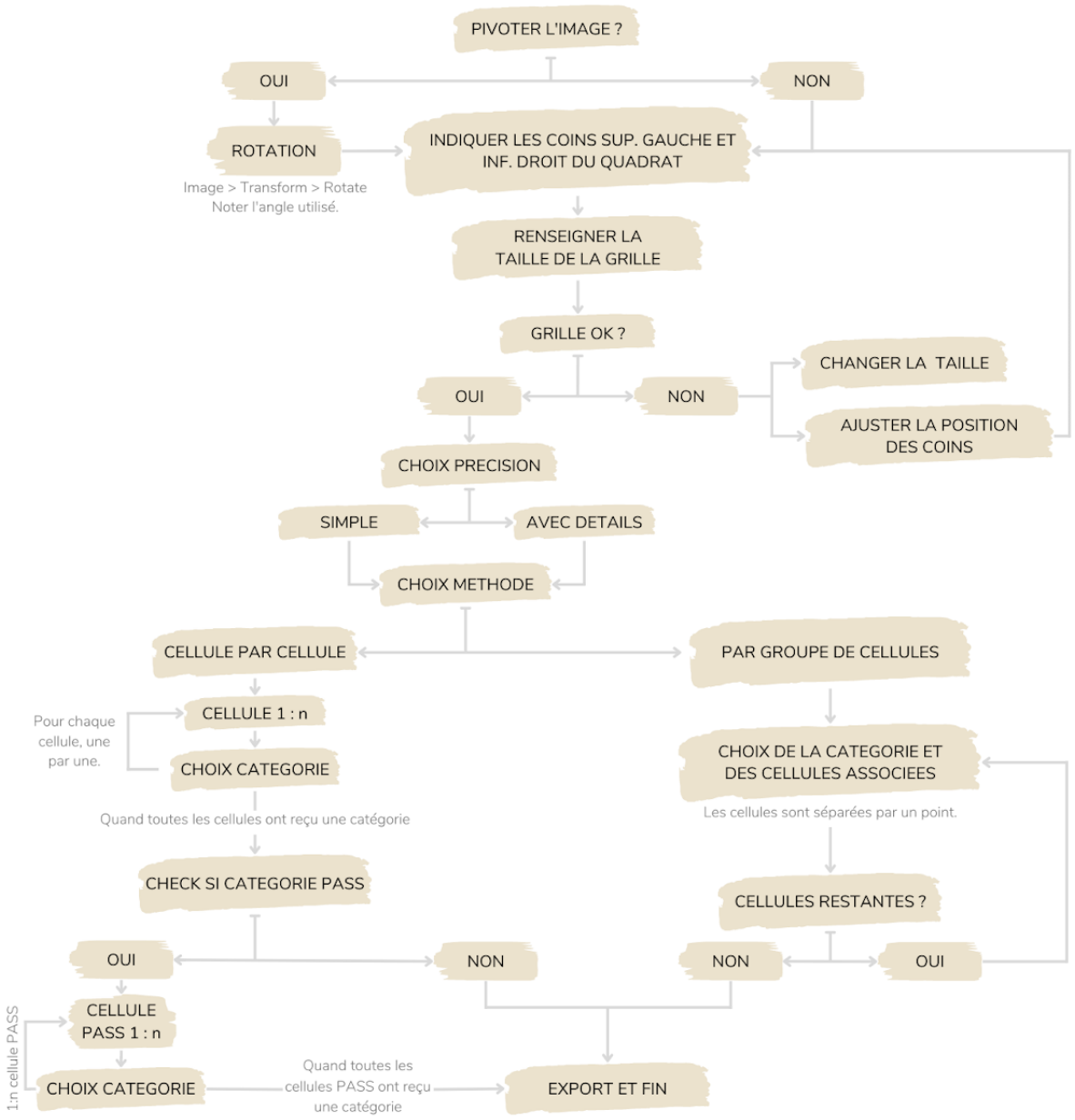
Dans la version 2022 de la méthode, l'image traitée n'est plus sauvegardée de manière automatique mais cela peut être fait manuellement si besoin (cliquer sur *Flatten* dans la fenêtre Roi Manager puis *File > Save As*).

Le temps d'analyse d'une image avec ce protocole est estimé à 20 minutes une fois le logiciel maîtrisé, soit environ 3h15 d'analyse pour un site (avec 10 images par site).

FICHE 1 : CARACTERISATION DES PHOTOQUADRATS DE MAERL

Première analyse

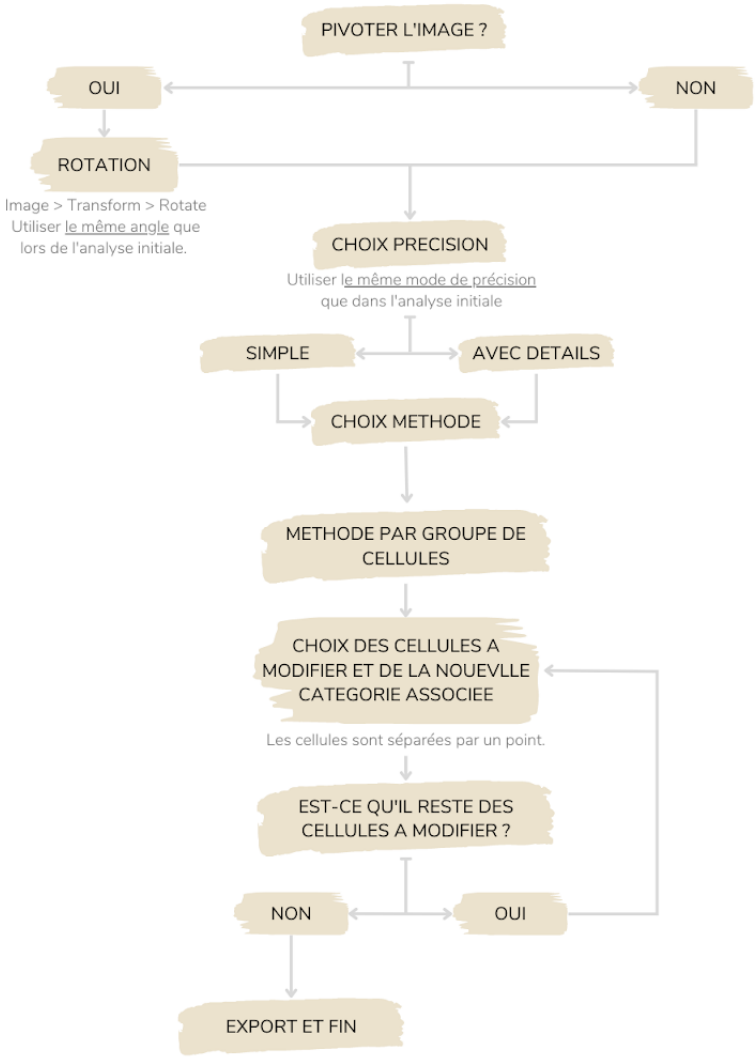
Sélectionner dossier source, dossier sortie et image selon indiqué. Conseil: différencier les dossiers input et output.
Renseigner la station



FICHE 1: CARACTERISATION DES PHOTOQUADRATS DE MAERL

Modifier un quadrat déjà analysé.

Sélectionner dossier source, dossier sortie et image brute selon indiqué.



γ) Etude de la biodiversité : identification faune / flore

Cette partie de la méthode constitue un ajout par rapport à la méthode de 2021 qui ne contenait pas de macro d'analyse pour l'étude de la faune et de la flore.

L'analyse initiale se lance à partir de l'icône BIO. Il faut alors renseigner le dossier source (le dossier de l'image à analyser), choisir une image puis le dossier de sortie s'il est différent du dossier source (il est recommandé de différencier les dossiers source et sortie et de créer un dossier unique de sortie pour l'ensemble des images). L'utilisateur.trice doit ensuite renseigner la station où le quadrat a été photographié. Si le quadrat nécessite d'être remis dans l'axe, cela est possible à l'étape suivante avec le l'outil *Rotate* dans *Image > Transform > Rotate*. L'angle doit être conservé au cas où il soit nécessaire de retravailler sur l'image. La dernière étape de l'initialisation consiste à tracer un côté du quadrat qui sera utilisé pour créer l'échelle.

Le temps d'analyse d'une image avec ce protocole est estimé à 45 minutes une fois le logiciel maîtrisé, soit environ 3h45 d'analyse pour un site (avec 5 images par site).

Identification de la Faune

L'analyse de la faune se traduit par l'identification puis par l'analyse de l'abondance des espèces. Pour cela, les individus de chaque espèce sont sélectionnés sur le quadrat. Une fenêtre permet ensuite de renseigner l'espèce, le groupe taxonomique parmi une liste déroulante et l'abondance (le nombre de points identifiés sur le quadrat). Cette opération peut être réalisée autant de fois que nécessaire.

Identification de la Flore

L'analyse de la flore et notamment des macroalgues se base sur l'analyse de la surface du quadrat recouverte par chaque espèce d'algue. Pour cela, les espèces doivent être identifiées et les thalles détourés sur l'image (Figure 28). Lorsque plusieurs thalles appartiennent à la même espèce, maintenir *Shift* permet de dessiner les contours de plusieurs thalles à la suite. Le nom de l'espèce et son groupe taxonomique sont ensuite renseignés dans une fenêtre. Si le nom de l'espèce n'est pas dans la liste proposée, sélectionner *Autre* puis entrer manuellement le nom de l'espèce.

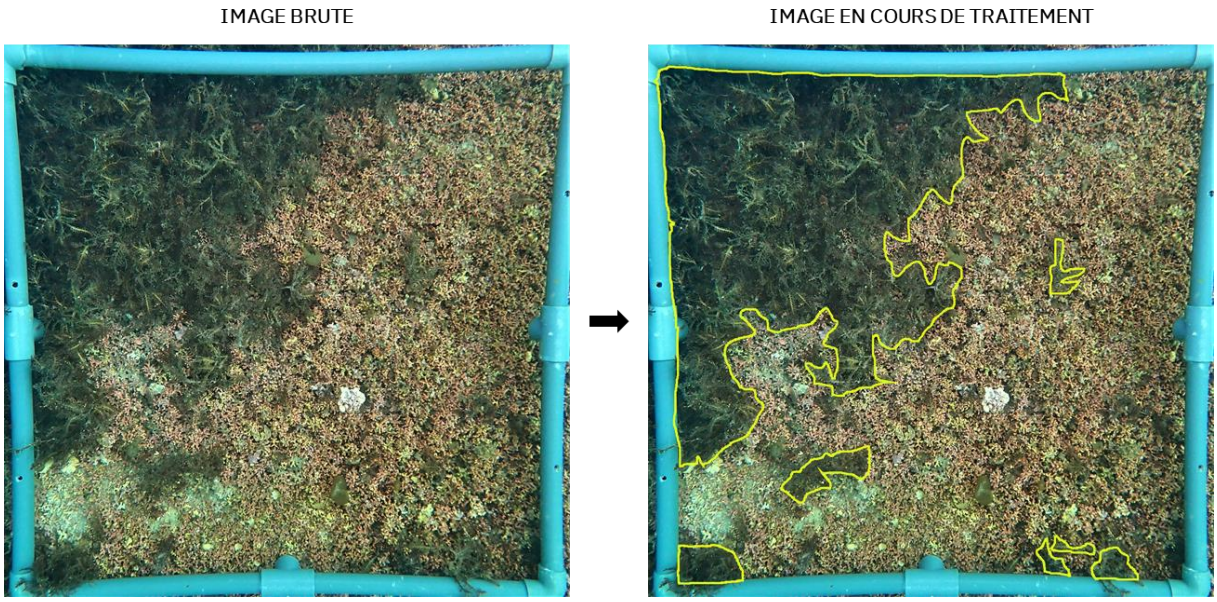


Figure 28 : Image en cours de traitement pour l'identification des espèces d'algues

L'utilisateur.trice peut alterner entre identification de la faune et identification de la flore à partir de l'interface. Lorsque l'identification est terminée, plusieurs fichiers sont exportés dans le dossier de sortie output:

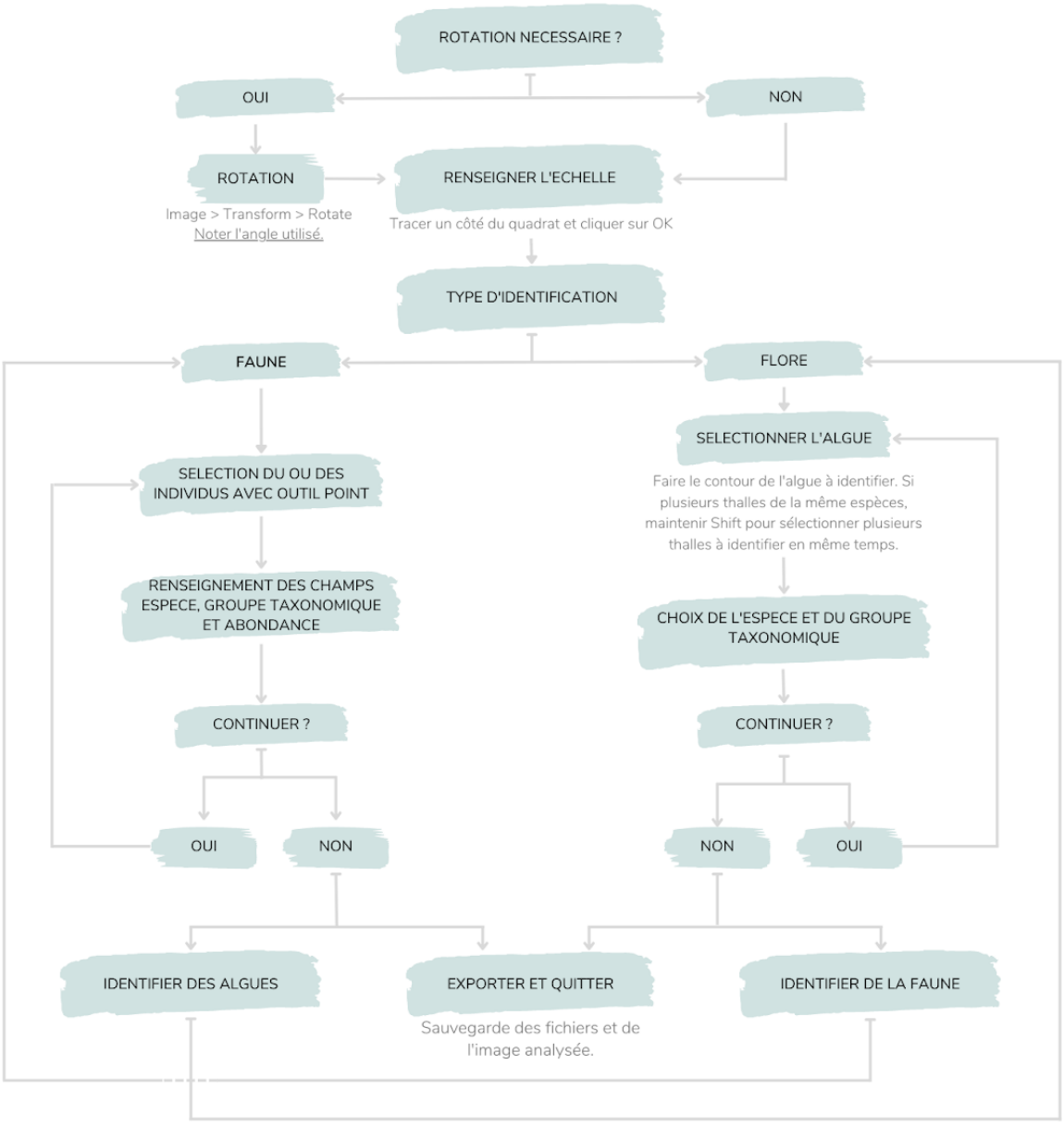
- La table **[nom du quadrat]_BiodiversityOutput** : fichier texte qui contient les informations propres à la caractérisation des cellules, c'est-à-dire le nom de la station, l'index et le label (numéro) de chaque cellule, le nom du quadrat analysé (nom de l'image) et la catégorie sélectionnée (CatGrid).
- Le ROI Set : **dossier .zip** qui rassemble l'ensemble des données des cellules et leur affichage.

Dans la version 2022 de la méthode, l'image traitée n'est plus sauvegardée de manière automatique mais cela peut être fait manuellement si besoin (cliquer sur *Flatten* dans la fenêtre Roi Manager puis *File > Save As*).

FICHE 2 : IDENTIFICATION DE LA FAUNE ET DE LA FLORE SUR PHOTOQUADRATS

Première analyse

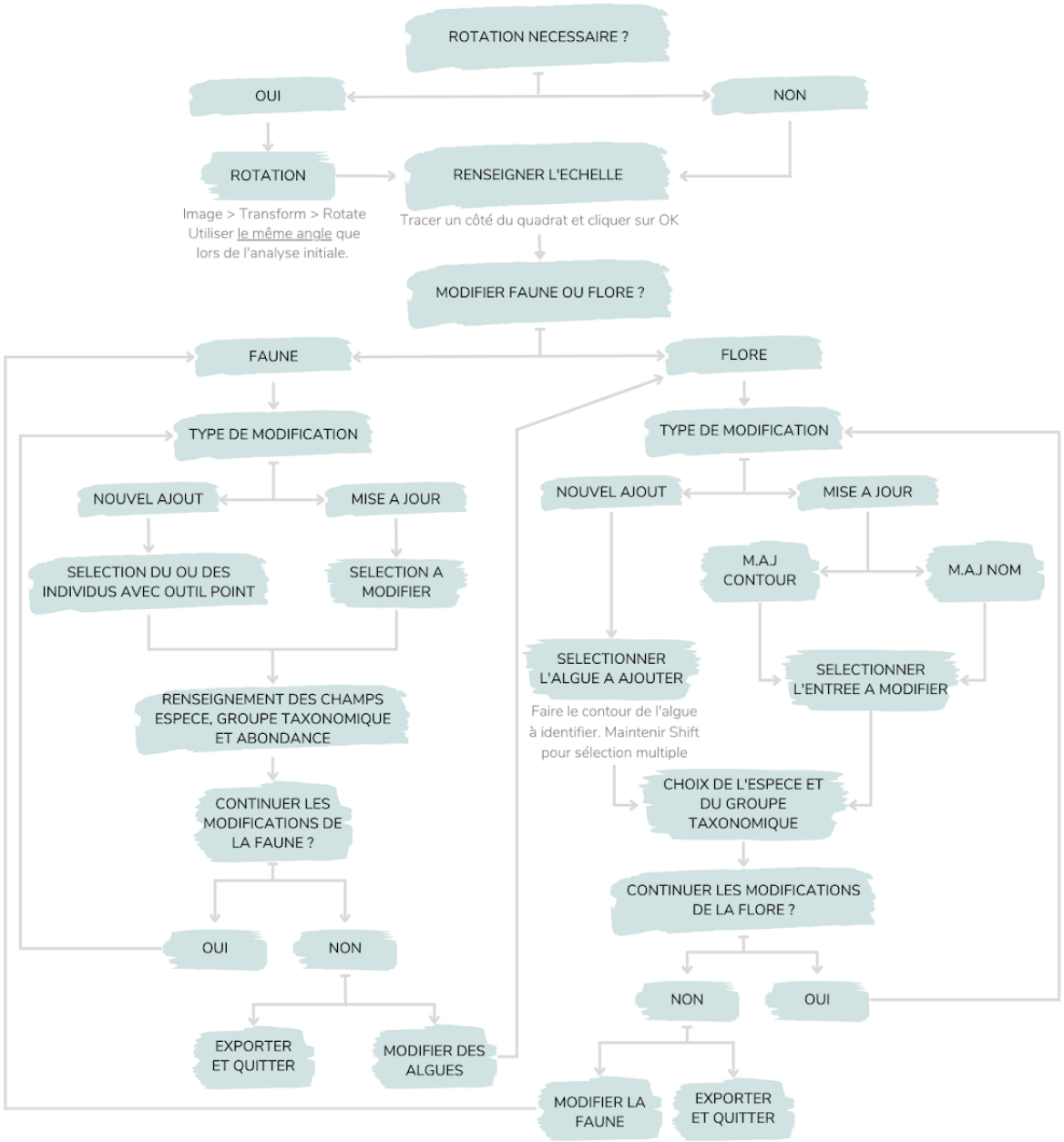
Sélectionner dossier source, dossier sortie et image selon indiqué. Conseil: différencier les dossiers input et output. Renseigner la station.



FICHE 2 : IDENTIFICATION DE LA FAUNE ET DE LA FLORE SUR PHOTOQUADRATS

Modifier un quadrat déjà analsyé

Sélectionner dossier source, dossier sortie et l'image brute selon indiqué.
Renseigner la station.



δ) Macro d'analyse et scripts

La macro et le script d'analyse sont fournis dans les documents annexes.