



ATLAS

BIBLIOGRAPHIQUE
DU **BIOFOULING**

des façades maritimes françaises
dans un contexte d'énergies
marines renouvelables



ATLAS BIBLIOGRAPHIQUE DU BIOFOULING

des façades maritimes françaises
dans un contexte d'énergies
marines renouvelables

AUTEURS :
Nolwenn Quillien, Morgane Lejart et Guillaume Damblans,
France Energies Marines

Tous droits réservés.

Les textes de cet atlas sont la propriété de France Energies Marines.

Ils ne peuvent être reproduits ou utilisés sans citer la source
et sans autorisation préalable. Les photos, les schémas et les tableaux
(sauf indication contraire) sont protégés par le droit d'auteur.

Ils restent la propriété de France Energies Marines
et ne peuvent être reproduits sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit,
sans l'autorisation écrite préalable de France Energies Marines.

Citer le document comme ci-dessous :

Quillien N., Lejart M. et Damblans G.

Atlas bibliographique du biofouling des façades maritimes françaises
dans un contexte d'énergies marines renouvelables.

Plouzané : France Energies Marines, 2018, 76 pages.

Edition : Novembre 2018

Dépôt légal à parution.

Achevé d'imprimer sur les presses de Cloître Imprimeurs, 29800 Saint-Thonan

Conception graphique : halys.com

Table des matières

	Page
• Liste des figures	5
• Liste des tableaux	5
• Remerciements	6
• Direction scientifique et coordination	7
• Collecte des données, analyse des données, cartographie et rédaction	7
• Crédits iconographiques	7
• Préface	8
1 - Vision croisée biologie/ingénierie du biofouling	10
1.1 • Définition du processus biologique	10
1.1.1 • <i>Un développement en quatre étapes clés</i>	10
1.1.2 • <i>Un processus complexe et variable</i>	11
1.1.3 • <i>Les facteurs expliquant sa variabilité</i>	12
1.2 • L'encrassement biologique d'un point de vue ingénieur	16
2 - Les enjeux du biofouling pour la filière EMR	18
3 - Méthodologie de réalisation de l'atlas	21
3.1 • Composition du corpus documentaire	21
3.2 • Analyse du corpus documentaire	22
3.3 • Découpage de l'atlas	22
3.4 • Petit guide à l'usage du lecteur	24
4 - Atlas du biofouling et des communautés de substrats durs	25
4.1 • Biofouling en Manche	25
4.2 • Biofouling dans le Golfe de Gascogne	34
4.3 • Biofouling en Méditerranée	44
4.4 • Biofouling dans les DOM-TOM	52
5 - Le biofouling des eaux françaises	61
6 - Sigles et acronymes	63
7 - Références bibliographiques	64
8 - Annexes	66
9 - Notes	71

Liste des figures

Page

1	• Logo et localisation des sites d'études du projet ABIOP	9
2	• Un des protocoles expérimentaux développés dans le cadre d'ABIOP	9
3	• Acquisition de données <i>in situ</i>	9
4	• Développement schématique du biofouling et influence des variables environnementales basé sur le modèle de Wahl, 1989	10
5	• Exemple du suivi hebdomadaire de la biocolonisation de plaques placées dans un port du Connecticut (USA) entre le 2 et le 24 juillet 2014	11
6	• <i>Ulva</i> spp., <i>Corallina</i> sp., <i>Balanus perforatus</i> , <i>Pomatoceros triqueter</i> , <i>Laminaria digitata</i> reposant sur des <i>fucal</i> es du genre <i>Ascophyllum</i> , <i>Mytilus</i> spp.	11
7	• Forêt de laminaires et espèces associées à cet habitat en surplomb d'un tombant rocheux en Bretagne	12
8	• Illustration des variables et co-variables environnementales influençant le biofouling	14
9	• Installation d'hermelles, de balanes et d'huîtres sur des supports parfois insolites	14
10	• Influence de l'orientation du substrat sur la colonisation d'une structure	15
11	• Piles en bois endommagées par des organismes perceurs tels que le taret	16
12	• Coraux sur les jackets d'une plateforme pétrolière au large de la Guinée.....	16
13	• Schéma montrant les variables épaisseur, hauteur de la rugosité et diamètre effectif d'un tuyau colonisé par du biofouling composé d'espèces calcifiées et/ou rigides	17
14	• Schéma de principe illustrant l'apparition de phénomène de portance lié à un bilan négatif de pression s'ajoutant à l'augmentation de l'effort de traînée dûe à la dissymétrie de la biocolonisation sur une section circulaire	17
15	• Eolienne flottante et représentation des composants sous-marins en présence de biofouling	17
16	• Une hydrolienne colonisée par des laminaires après 3 années d'immersion au site de Race Rocks, Canada	18
17	• Matelas protégeant le câble reliant le site d'essai de Paimpol-Bréhat au continent colonisé par des espèces sessiles et des espèces vagiles	18
18	• Des paysages hydrologiques contrastés le long de la côte Manche Atlantique française	23
19	• Délimitation des éco-régions marines européennes.....	23
20	• Poids frais total (valeurs continues) à différentes profondeurs et mesurées dans trois zones géographiques.....	61
21	• Poids frais total de la biocolonisation mesuré pendant des cycles de mesure de 9 et 16 mois.....	61
22	• Richesse spécifique à différents stades de la biocolonisation	61
23	• Variation du pourcentage de recouvrement au cours du processus de colonisation à 5 sites	61

Liste des tableaux

Page

1	• Assemblages d'organismes sessiles observés à des sites + ou - profonds et exposés à la houle ou aux courants de marée	13
2	• Quelques exemples de prédateurs d'organismes composant le biofouling	15
3	• Détermination des technologies et/ou composants EMR les plus sensibles au biofouling	19
4	• Liste de mots-clés utilisés dans les recherches.....	21

Remerciements

Nous tenons à remercier et à exprimer notre reconnaissance aux nombreuses personnes qui ont contribué à la réalisation de cet atlas.

Pour la transmission de précieux documents indisponibles au format électronique, ou confidentiels (rapports issus de la littérature grise, rapports d'expérimentation menées dans le cadre de projets EMR) et leur relecture attentive : **Chantal Compère**, Responsable du Département de Recherche Technologique à l'Ifremer, **Catherine Dreanno**, Responsable du laboratoire Détection, Capteurs et Mesures (DCM) et **Kada Boukerma**, Ingénieur au DCM à l'Ifremer ; **Hervé Gueuné**, Directeur de Corrodys, **Dominique Jacob**, Ingénieur d'études en charge de la veille bibliographique et **Vanessa Leblanc**, Ingénieure biocorrosion et biofouling à Corrodys ; **Jean-François Briand**, Maître de Conférences en biologie moléculaire (axes de recherche : écologie microbienne et chimique du biofilm) et **Christine Bressy**, Maître de Conférences (axes de recherche : biofilm, antifouling) à l'Université de Toulon ; **Marine Reynaud**, Ingénieure de recherche en biologie marine au SEM-REV (Ecole Centrale Nantes) ; **Jean-Philippe Pagot**, Directeur environnement maritime chez EDF Renouvelables ; **Françoise Dubois**, Expert matériaux organiques, référent biofouling à Naval Energies ; **Valérie Debout**, Spécialiste de la biocorrosion chez Naval Group ; **Hamed Ameryoun**, Chargé d'études dans le domaine des structures offshore à l'Université de Nantes/CAPACITES ; **Franck Schoefs**, Professeur à l'Université de Nantes ; **Agnès Barillier**, Docteure au centre d'ingénierie hydraulique d'EDF et **Agathe Grenier**, Ingénieure environnement chez EDF ; **Julien Dubreuil**, Chargé de mission au comité régional des pêches maritimes et des élevages marins de Bretagne. Le travail en équipe associant les écologues, biologistes, chimistes, ingénieurs, développeurs et opérateurs précédemment cités, a été très fructueux et a permis de proposer une vision pluridisciplinaire du processus de la biocolonisation dans un contexte d'énergies marines renouvelables.

Pour les conseils et le partage de données cartographiques : **Kelly Cayocca**, Responsable opérations et qualité à France Energies Marines, et **Axel Creach**, Maître de Conférences en géographie à Sorbonne Université.

Et tous les autres partenaires du projet ABIOP, pour des discussions toujours enrichissantes lors des réunions scientifiques et d'avancement du projet, en particulier **Christian Berhault**.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'**Agence Nationale de la Recherche** au titre du programme Investissements d'Avenir portant la référence ANR-10-IEED-0006-21, ainsi que de France Energies Marines.

Direction scientifique et coordination

Franck Schoefs

Professeur à l'Université de Nantes (Faculté des Sciences et des Techniques) et à l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR CNRS 6183 ; Chef d'équipe Calcul de Structures et responsable de la thématique Fiabilité des Structures.

Morgane Lejart

Docteure en Biologie Marine à France Energies Marines, Responsable du programme Impacts Environnementaux et Socio-Economiques des Energies Marines Renouvelables (EMR).

Collecte des données, analyse des données, cartographie et rédaction

Nolwenn Quillien

Chargée de recherche à France Energies Marines, docteure en Biologie Marine sur les thèmes Interactions EMR/écosystèmes marins et Biofouling.

Crédits iconographiques

Couverture : Service des Moyens à la Mer/Observatoire Océanologique de Banyuls | p. 1, Fig. 1 : France Energies Marines | p. 1, Fig. 2 : Université de Nantes | p. 1, Fig. 3 : ECN/SEM-REV | p. 10, Fig. 4 : Nolwenn Quillien/France Energies Marines | p. 11, Fig. 5 : Lord, 2017 | p. 11, Fig. 6 (de gauche à droite et de haut en bas) : Pierre Tuan/Pixabay, doris.ffessm.fr/Véronique Lamare, Auguste Le Roux, Stemonitis, Fancyday/Pixabay | p. 12, Fig. 7 : Erwan Amice/CNRS | p. 13, Tab. 1 (de gauche à droite et de haut en bas) : Mandy Lindeberg/NOAA Library and Department of Commerce, Fancyday/Pixabay, Auguste Le Roux, Stan Shebs, Serenrednib, Matthieu Sontag, Keith Hiscock/MarLIN, Matthieu Sontag, Paul Newland/MarLIN, Ifremer/Olivier Dugornay, Stemonitis, Fancyday/Pixabay, doris.ffessm.fr/Sandra Roby, Matthieu Sontag, Bernard Picton/NMNI, doris.ffessm.fr/Pierre Cottin, Pino Bucca/MondoMarino.net, Bernard Picton/NMNI, doris.ffessm.fr/Frédéric André, Haplochromis | p. 14, Fig. 8 : Nolwenn Quillien/France Energies Marines | p. 14, Fig. 9 : Ifremer/Nicolas Desroy | p. 15, Tab. 2 (de haut en bas) : David Blaikie, Ratha Grimes, Frédéric Ducarme, Aldaron | p. 15, Fig. 10 : Loxton et al., 2017 | p. 16, Fig. 11 (de haut en bas) : Captain Eric Van Dormolen, Wrap It Up Piling Solutions | p. 15, Fig. 12 : Université de Nantes/Total | p. 17, Fig. 13 : France Energies Marines | p. 17, Fig. 14 : France Energies Marines | p. 17, Fig. 15 : Guillaume Damblans/France Energies Marines | p. 18, Fig. 16 : Race Rocks Ecological Reserve - www.racerocks.ca - Lester B. Pearson College - photo by Garry Fletcher | p. 18, Fig. 17 : Ifremer/Olivier Dugornay | p. 19, Tab. 3 (de gauche à droite et de haut en bas) : France Energies Marines, Guillaume Damblans/France Energies Marines, Untrakdrover, Naval Energies, Wenex Equipements, France Energies Marines | p. 23, Fig. 18 : cartographie France Energies Marines et données Ifremer | p. 23, Fig. 19 : France Energies Marines d'après ICES | p. 25 (de gauche à droite et de haut en bas) : Auguste Le Roux, Matthieu Sontag, Keith Hiscock/MarLIN, doris.ffessm.fr/Franck Hervochon, Denis Ader, doris.ffessm.fr/Murielle Tourenne, SIMoN/MBNMS, Erwan Amice/CNRS, Andreas Trepte, Haplochromis, Luis Fernández García, Cwnhiraeth | p. 26 à 28 : France Energies Marines | p. 34 (de gauche à droite et de haut en bas) : Auguste Le Roux, Matthieu Sontag, Frédéric Ducarme, doris.ffessm.fr/Frédéric André, Cwnhiraeth, Stan Shebs, Matthieu Sontag, Erwan Amice/CNRS, Andreas Trepte, Haplochromis, Matthieu Sontag, Cwnhiraeth | p. 35 à 40 : France Energies Marines | p. 44 (de gauche à droite et de haut en bas) : doris.ffessm.fr/Franck Hervochon, Ifremer/Olivier Dugornay, Hectonichus, doris.ffessm.fr/Véronique Lamare, doris.ffessm.fr/Murielle Tourenne, Brian Nedved, Andy Cowley, Georges Jansoone, doris.ffessm.fr/Frédéric André, Ifremer/Olivier Dugornay, Flyingdream | p. 45 à 47 : France Energies Marines | p. 52 : France Energies Marines, Parent Géry | p. 53 à 58 : France Energies Marines | p. 61, Fig. 20 à 23 : France Energies Marines | p. 70, Annexes 2a et 2b : France Energies Marines

Préface

Cet atlas a été réalisé dans le cadre du projet **ABIOP** (ANR-EMR-ITE FEM 2016 ; Fig. 1) *Accounting for BIOfouling through established Protocols of quantification*. Ce projet, d'une durée d'un an et demi et lancé en mars 2017, a pour principal objectif d'améliorer la connaissance et les moyens de suivi du biofouling pour fiabiliser les données d'entrée nécessaires au dimensionnement et à la maintenance des systèmes d'Énergies Marines Renouvelables (EMR). Ce projet vise en particulier à atteindre cinq objectifs :

- réaliser la synthèse des connaissances sur le biofouling à l'échelle des façades maritimes françaises ;
- inventorier les protocoles existants pour caractériser la biocolonisation et émettre des recommandations méthodologiques pour la mesure du biofouling dans un contexte EMR ;
- développer des méthodes de caractérisation du biofouling adaptées au contexte EMR (Fig. 2) ;
- tester *in situ* les méthodes et protocoles développés dans le cadre du projet (Fig. 3) ;
- acquérir des données de biocolonisation à 3 sites d'études (SEM-REV, UN-SEA-SMS, Banyuls) (Fig. 1).

Ce projet constitue la première pierre en termes de recherche et développement sur le thème du biofouling à France Energies Marines où **tous les systèmes et sous-systèmes liés aux projets EMR (connecteurs, câbles, ancrages...) sont pris en compte**.

Le **consortium** du projet est formé de 10 partenaires : Université de Nantes, France Energies Marines, Corrodys, Ecole Centrale de Nantes, EDF, EDF Renouvelables, Ifremer, Naval Group, Naval Energies et Université de Toulon. Ainsi, il est composé de scientifiques (**biologistes, écologues, spécialistes du génie des matériaux, de la métrologie, des interactions fluides/**

structures), de **personnel de site d'essai** et de **développeurs** d'énergies marines renouvelables afin d'acquérir des données, partager des connaissances et développer une expertise pertinente dans un contexte de développement des EMR.

Le présent atlas a pour principal objectif de **synthétiser des connaissances acquises sur le biofouling**, et plus généralement sur les communautés d'organismes vivants sur les substrats durs, disponibles aujourd'hui en France métropolitaine et ultra-marine, **afin d'anticiper les problématiques que posera ce phénomène dans un contexte EMR**.

L'atlas repose sur une **analyse bibliographique** la plus exhaustive possible, comprenant des articles scientifiques de rang A, des rapports (stage, suivis, études), et des ouvrages exposant les résultats d'études menées dans les eaux françaises et visant à caractériser la **biocolonisation** et/ou les **assemblages de substrats durs** du domaine subtidal. La synthèse de ces connaissances informe le lecteur des données disponibles sur le biofouling et sur les colonisateurs potentiels. La disponibilité des données issues des documents analysés est cartographiée et les informations clés extraites de chacune des sources analysées sont résumées en un court paragraphe.

Organisé en quatre sections (correspondant à différentes aires biogéographiques), l'atlas comprend également des éléments de contexte introduisant les enjeux que représente le biofouling pour la filière des énergies marines renouvelables et un guide d'utilisation. Ainsi, ce document a pour ambition de constituer un **outil synthétique, illustré et adapté** (portée ingénierie) rassemblant les connaissances disponibles à ce jour sur le **biofouling des différentes façades maritimes françaises**.

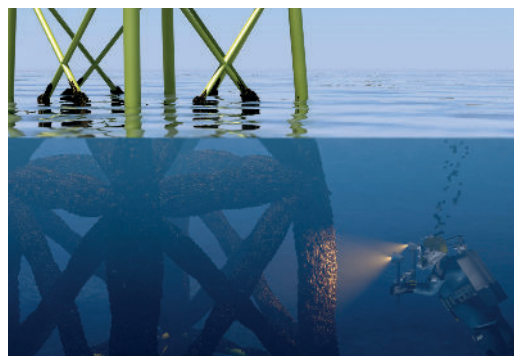
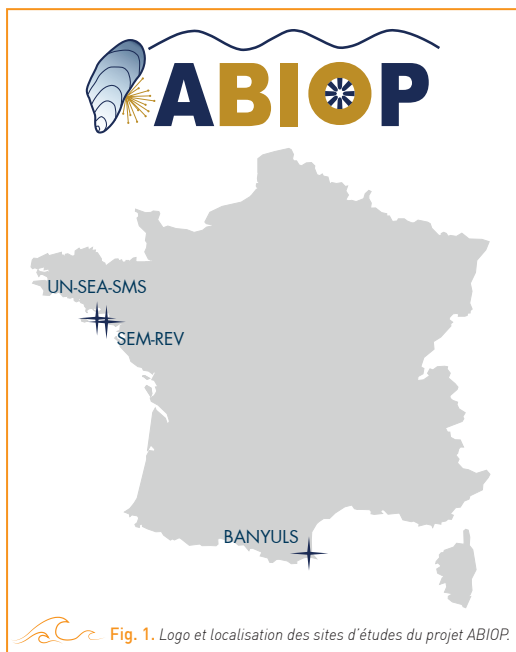


Fig. 2. Un des protocoles expérimentaux développés dans le cadre d'ABIOP.

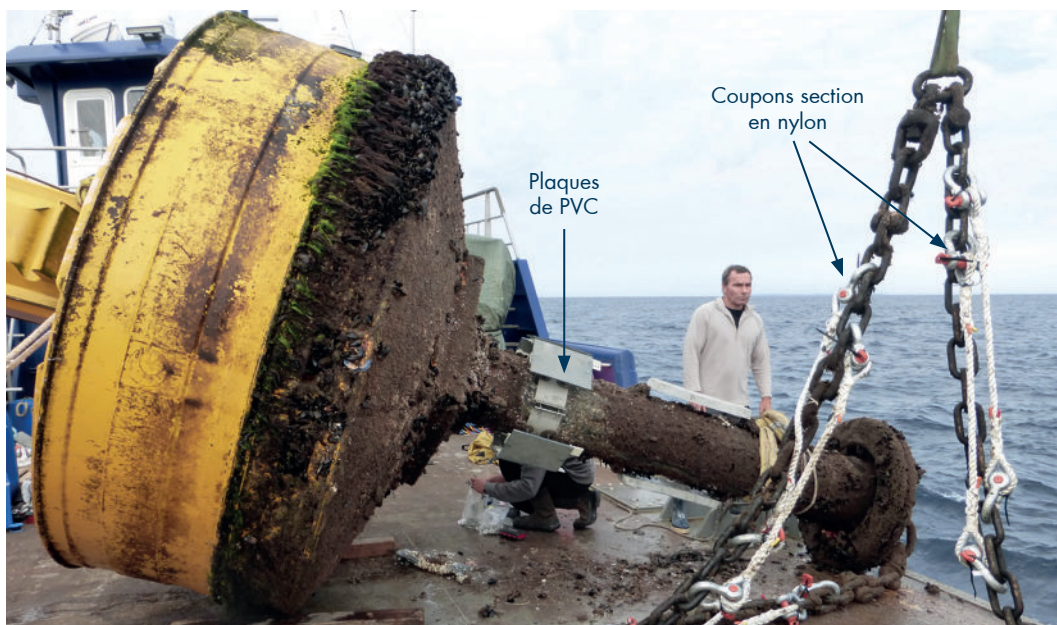


Fig. 3. Acquisition de données in situ.

1 - Vision croisée biologie/ingénierie du biofouling

1.1 Définition du processus biologique

Le **biofouling** (ou **encrassement biologique**, ou encore **biosalissure**) est le résultat d'un processus biologique nommée biocolonisation qui se met en place dès lors qu'un support est ajouté au milieu aquatique, ou qu'une surface déjà présente dans le milieu est libre. Ce support d'origine naturelle ou anthropique (ex. platier rocheux, coquille de mollusque, ponton, coque de navire) forme un nouvel espace disponible où peuvent se développer des organismes vivants fixés (organismes sessiles). Dans cet atlas, seul le biofouling marin (éventuellement estuarien) est considéré.

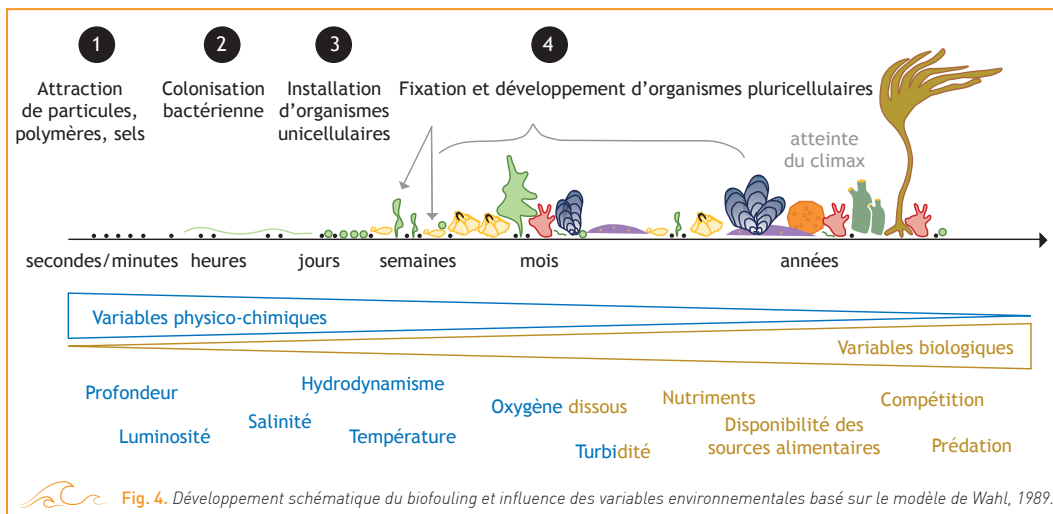
1.1.1 Un développement en quatre étapes clés

Lorsqu'un nouveau substrat dur (ex. jacket d'éolienne, fondation d'hydrolienne, ponton, coque d'un navire) est mis en place en mer, cette surface est colonisée par des organismes vivants. On parle de **biocolonisation** (Wahl, 1989) ou de **succession écologique** (i.e. changement progressif de la composition des espèces d'un écosystème de la [re]colonisation au stade d'équilibre dynamique) (Noël *et al.*, 2009; Richmond & Seed, 1991). Selon le modèle de Wahl (1989), la biocolonisation se décompose en **quatre grandes étapes** (Fig. 4).

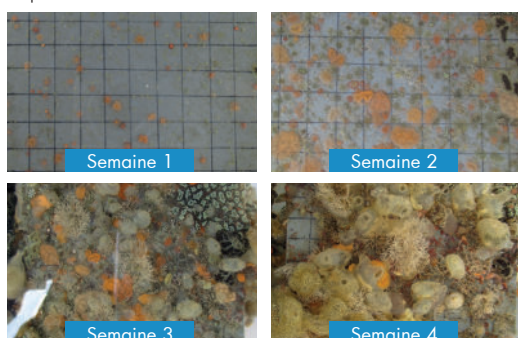
Quasi instantanément après la mise à l'eau, des **macromolécules** telles que des protéines, des sucres, des acides humiques, des glycoprotéines et des matières minérales (ex. sels, silice)

sont spontanément attirées à la surface de la structure par **adsorption** (Fig. 4, étape 1).

Dans les minutes et les heures suivantes, un film bactérien se met en place (Fig. 4, étape 2). Les **bactéries** sont elles aussi adsorbées et adhèrent à la surface de la structure immergée via la sécrétion de composés communément appelés EPS (*Extracellular Polymeric Substances*). Plusieurs jours après l'immersion, des groupes d'**organismes unicellulaires**, principalement composés de diatomées, se fixent au substrat via la sécrétion d'un mucus (Fig. 4, étape 3). Enfin, après plusieurs jours ou semaines, les premiers **organismes pluricellulaires** s'établissent à la surface de la structure sous la forme de **larves** et de **plantules**, qui se développent et croissent (Fig. 4, étape 4) jusqu'à atteindre un climax qui est le point culminant, l'équilibre dynamique d'une succession. Il est important de noter que cet équilibre est relatif : le climax est un état qui varie dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions environnementales (qui varient saisonnièrement et sont modifiées localement par les organismes colonisateurs) et de plusieurs mécanismes, comme la compétition. Ainsi, des espèces peuvent en remplacer d'autres (celles précédemment installées) car elles sont plus compétitives (adaptées) dans l'environnement modifié. Ces nouvelles espèces altèrent à leur tour les propriétés physiques, chimiques et biologiques de leur habitat, favorisant ou inhibant l'installation d'autres espèces jusqu'à ce que le climax soit atteint.



Les **trois premières phases** de développement du biofouling **chevauchent la quatrième**. En effet, les macromolécules, bactéries, micro-algues et larves continuent d'adhérer et de se fixer sur le substrat qui est remis à nu suite à une perturbation et/ou sur certains macro-organismes (e.g. le stipe des laminaires, les valves des moules) présents qui constituent eux-mêmes un substrat. Les échelles temporelles indiquées dans le modèle de biocolonisation (Wahl, 1989) sont indicatives. La séquence de succession est discutée par plusieurs auteurs qui ont observé que certaines étapes peuvent se produire de manière simultanée ou même être manquantes (e.g. Roberts, Rittschof, Holm, & Schmidt, 1991). De plus, les différentes étapes peuvent se succéder plus ou moins rapidement (Fig. 5, exemple d'une colonisation relativement rapide).



 **Fig. 5.** Exemple du suivi hebdomadaire de la biocolonisation de plaques placées dans un port du Connecticut (USA) entre le 2 et le 24 juillet 2014 [adapté de Lord, 2017].

Cet atlas centralise les connaissances disponibles concernant la **macro-colonisation**, c'est-à-dire l'installation d'organismes pluricellulaires dont la taille adulte est supérieure à 1 mm (étape 4, Fig. 4), et présente également quelques données concernant le processus de micro-colonisation (étape 3, Fig. 4) dans les DOM-TOM où le nombre d'études disponibles est plus limité.

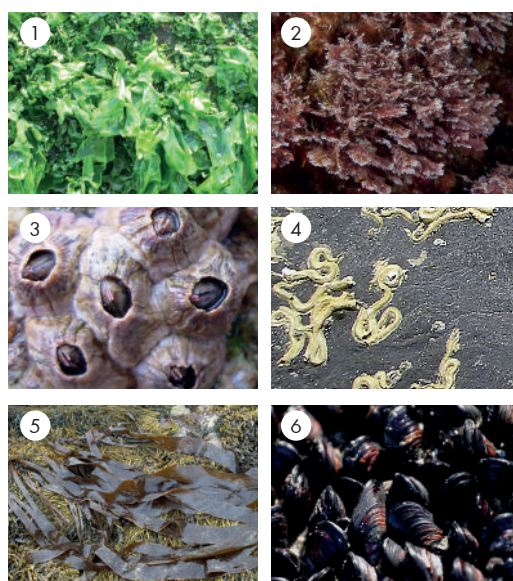
1.1.2 Un processus complexe et variable

La **succession écologique** peut être **primaire** (mise en place d'une communauté sur un substrat « neuf ») ou **secondaire** (colonisation par des organismes d'un espace ayant été colonisé précédemment et devenu libre après une perturbation, comme une tempête par exemple).

Ainsi, la communauté de biofouling devient un **patchwork** relativement complexe, composé d'assemblages d'organismes à différents stades de succession.

En ce qui concerne le macro-fouling, les **espèces pionnières** (espèces qui s'installent au début de la macro-colonisation d'un substrat vierge ou perturbé) sont souvent celles ayant des périodes de recrutement étendues et sont généralement de faibles compétiteurs en comparaison aux **espèces dominantes** qui, elles, recrutent dans une plage temporelle plus restreinte (J. H Connell & Slatyer, 1977).

Si on prend l'exemple de la macro-colonisation d'un substrat mis en place dans le milieu marin en zone euphotique (i.e. zone où la lumière est assez intense pour permettre la photosynthèse) (Noël *et al.*, 2009) : dans un premier temps des **espèces pionnières** de l'embranchement des chlorophytes (i.e. les algues vertes, ex. *Ulva* spp.) se développent, puis des espèces d'algues gazonnantes (ex. *Corallina* spp.) et/ou des invertébrés sessiles (ex. *Balanus* spp., Serpulidae) s'établissent. Des **espèces à plus long-cycle** de vie et ayant des **morphologies plus complexes** s'installent ensuite, notamment les fucales et laminaires ainsi que des macro-invertébrés comme *Mytilus* spp. (Benedetti-Cecchi, 2000) (Fig. 6).



 **Fig 6.** 1 - *Ulva* spp., 2 - *Corallina* sp., 3 - *Balanus perforatus*, 4 - *Pomatoceros triqueter*, 5 - *Laminaria digitata* reposant sur des fucales du genre *Ascophyllum*, 6 - *Mytilus* spp.

Aux premiers stades de la colonisation, la **nature tridimensionnelle du biofouling** est négligeable, mais à mesure que les organismes fixés se développent, l'assemblage lui-même constitue un **habitat** pour de nombreuses espèces vagiles et sessiles (Fig. 6, 7). Tout un **écosystème** se met alors en place et les interactions (notamment la prédation et la compétition) entre espèces s'intensifient. L'influence de ces variables biologiques sur la composition du biofouling augmente (Fig. 4). Dans le cas de la colonisation de structure d'origine anthropique, on parle d'**effet récif** (ex. Langhamer, 2012).



 **Fig 7.** Forêt de laminaires et espèces associées à cet habitat en surplomb d'un tombant rocheux en Bretagne.

Lorsqu'on considère le biofouling à un stade plus avancé, les espèces les plus communément rencontrées appartiennent aux embranchements suivants : arthropodes (en particulier : **balanes**), **bryozoaires**, annélides (en particulier : **serpulidés**), chordés (en particulier : les **ascidies**), porifères (ou **éponges**), cnidaires (en particulier : **hydraires**), chlorophytes, rhodophytes et ochrophytes (soit **algues vertes, rouges et brunes**). Des guides aidant à l'identification des salissures marines sont disponibles : Catalogues of Marine Fouling, 1963, vol. 1 à 7 ainsi que de nombreuses clés d'identification pour déterminer de manière plus exhaustive les organismes composant le biofouling.

Pour chaque aire biogéographique de l'atlas, les principales espèces biocolonisatrices sont présentées. Les références annotées informent le lecteur des conditions environnementales (notamment hydrodynamisme, profondeur, type de substrat) aux sites étudiés. Davantage de détails sont disponibles dans la base de données

développée dans le cadre du projet ABIOP (FEM/ ANR AAP-EMR-ITE, 2016).

De très nombreuses propagules sont disponibles dans l'environnement marin, or les océans sont soumis à des événements météorologiques et hydrologiques ; qui induisent une **variabilité plus ou moins marquée** des processus d'installation des espèces composant le biofouling, de la vitesse de succession écologique, et *in fine*, de la composition du biofouling (Valiela, 1995). Ces facteurs sont détaillés et leur influence est explicitée dans la section suivante.

1.1.3 Les facteurs expliquant sa variabilité

La biocolonisation varie dans l'espace et le temps en fonction de **nombreux paramètres physico-chimiques et biologiques** (Fig. 4, 8), qu'ils soient d'**origine naturelle ou anthropique**. Ainsi, avec l'augmentation de la profondeur, diminuent l'**intensité lumineuse**, l'hydrodynamisme, la température. Ces gradients physiques influencent la composition des communautés d'organismes marins qui se développent en fonction de leurs affinités à ces différentes variables (ex. Rule & Smith, 2007). Avec la diminution de l'intensité lumineuse, les macroalgues disparaissent progressivement (Hiscock & Mitchell, 1980).

Ex. de distribution de types d'algues dominants avec l'augmentation de la profondeur : macroalgues dressées → algues buissonnantes → algues encroûtantes → aucune algue.

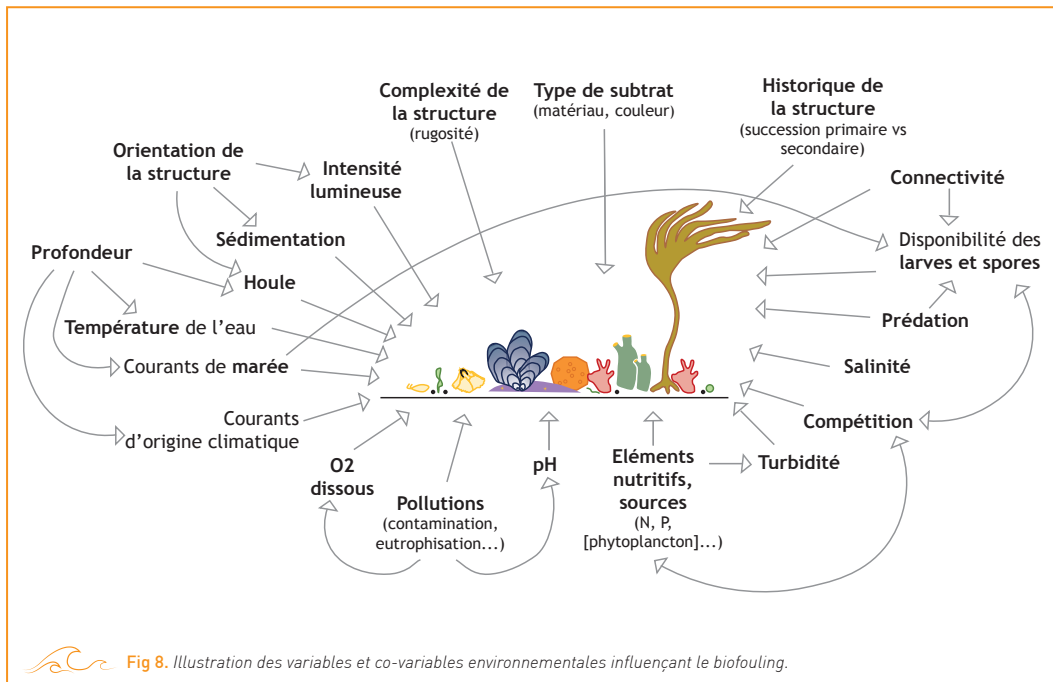
Les macroalgues ne peuvent plus photosynthétiser, ce qui empêche leur développement. Si le rôle de la lumière est indiscutable pour l'étagement des algues, ce facteur semble beaucoup moins essentiel pour les animaux. Les spongiaires peuvent être assez sensibles à la lumière, mais les hydraires et les bryozoaires réagissent surtout aux variations d'hydrodynamisme et de turbidité (Castric-Fey, 1974).

L'**hydrodynamisme** (houle et courants de marée), qui varie en fonction de la saison et de la localisation géographique, modifie aussi sensiblement les assemblages d'organismes marins sessiles (Burrows, 2012; Castric-Fey, 1988). Par exemple, Castric-Fey & Chassé (1991) ont déterminé quatre types de faciès (i.e. quatre assemblages d'organismes différents) selon l'exposition à la houle, aux courants de marée, et à la profondeur dans les environs de Brest (Tab.1).

	Profondeur -	Profondeur +
Houle +	• <i>Alaria</i> sp. • <i>Mytilus</i> sp. • <i>Balanus perforatus</i> • <i>Metridium senile</i> • <i>Pollicipes cornucopiae</i>	• <i>Axinella dissimilis</i> • <i>Aglaophenia tubulifera</i> • <i>Eunicella</i> sp. • <i>Gymnangium</i> sp. • <i>Alcyonium glomeratum</i>
Courants de marée +	• <i>Laminaria digitata</i> • <i>Mytilus</i> sp. (classées selon l'ordre des listes d'espèces)	• <i>Hydrallmania</i> sp. • <i>Raspailia ramosa</i> • <i>Bougainvillia ramosa</i> • <i>Haliclona</i> sp. • <i>Polymastia mamillaris</i> • <i>Nemertesia antennina</i> • <i>Cellaria salicornioides</i> • <i>Alcyonium digitatum</i>



 **Tab. 1.** Assemblages d'organismes sessiles observés à des sites + ou - profonds et exposés à la houle ou aux courants de marée (adapté de Castric-Fey & Chassé, 1991).



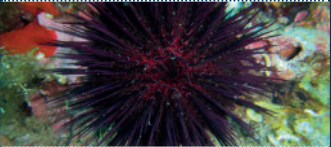
La **disponibilité des larves et des spores**, évoquée précédemment, varie aussi dans le temps en réponse à des forçages climatiques, à des changements au sein de populations de géniteurs, etc. ce qui modifie la structure spatio-temporelle de la biocolonisation (Richmond & Seed, 1991). Au cours d'une année, le recrutement peut être très différent d'un mois à l'autre, tant du point de vue qualitatif que quantitatif (Castric-Fey, 1974). L'éloignement à la côte peut aussi expliquer la disponibilité larvaire. DePalma (1982) a observé une diminution de 50 % et de 90 % de la colonisation respectivement à 800 et 5500 m de la côte de la Floride.



Fig 9. Installation d'hermines, de balanes et d'huîtres sur des supports parfois insolites, ici un tracteur abandonné depuis une vingtaine d'années en Baie du Mont Saint-Michel. Les composants métalliques sont totalement recouverts par des organismes alors que les pneus ne sont quasiment pas colonisés.

La **nature du substrat** (type de matériau) influence essentiellement les premiers stades de la biocolonisation. Certains matériaux semblent toutefois avoir une influence sur des stades plus avancés de la colonisation. Par exemple, les pneus d'un tracteur à l'abandon en Baie du Mont Saint-Michel sont le support de récifs d'hermines (*Sabellaria alveolata*) alors que les composants métalliques de cette machine en sont complètement recouverts (Observation, N. Desroy) (Fig. 9). Cette différence pourrait aussi être expliquée par la libération de substances toxiques contenues dans le caoutchouc du pneumatique.

En revanche, l'**orientation du substrat** dur structure de manière significative et sur le long terme les communautés d'organismes marins formant le biofouling (Glasby & Connell, 2001; Langhamer, Wilhelmsson, & Engström, 2009). (Fig. 10). Par exemple, le biofouling se développant sur le dessus d'une surface horizontale sera une communauté photophile qui n'est pas sensible à la sédimentation (dépôt de matières organique et minérale), tandis que celui s'installant en dessous sera composée d'organismes sciaiphiles (Annie Castric-Fey, 1974). L'accumulation de matières par sédimentation inhibe la fixation de certains organismes (Ghobashy & El Komy, 1980). Par exemple, l'hydraire *Tubularia larynx* ne

Prédateurs	Aire de répartition	Proies	Illustrations
Dorade (<i>Sparus aurata</i>)	- Atlantique Nord-Est - Méditerranée	Essentiellement mollusques bivalves (ex. moule bleue [<i>Mytilus edulis</i>])	
Oursin vert (<i>Strongylocentrotus droebachiensis</i>)	- Atlantique Nord-Ouest, - Pacifique Est	Laminaires	
Oursin violet (<i>Paracentrotus Lividus</i>)	Très courante en Méditerranée	Algues brunes (notamment <i>Sargassum muticum</i>)	
Etoile commune (<i>Asterias rubens</i>)	- Manche - Atlantique	Mollusques bivalves (en particulier huîtres, moules), balanes, ascidies (<i>Ciona intestinalis</i>)	

 **Tab. 2.** Quelques exemples de prédateurs d'organismes composant le biofouling.

peut se fixer à une surface couverte de dépôts organiques et minéraux, alors que certaines espèces de bryozoaires peuvent survivre dans des zones soumises à de forts taux de sédimentation.



 **Fig 10.** Influence de l'orientation du substrat (et donc de la luminosité et de la sédimentation) sur la colonisation d'une structure ; exemple du biofouling recouvrant les côtés (en haut) et le dessous de Pelamis, structure houlo-motrice (en bas), figure extraite de (Loxton et al., 2017).

De même, des facteurs biotiques tels que la **prédation** ou la **compétition** pour le substrat peuvent contrôler le recrutement et la composition des communautés (J. H Connell & Slatyer,

1977). L'espace est souvent considéré comme le facteur limitant le développement du fouling (Canning-Clode & Wahl, 2010; Richmond & Seed, 1991). Aussi, la compétition pour l'espace est considéré comme une variable forçante qui a une influence très significative sur la structure des communautés du biofouling (Joseph H. Connell, 1972 ; Vance et al., 2009). La prédation est aussi un facteur explicatif probablement très significatif, mais son influence sur la dynamique de biocolonisation de substrats artificiels est peu documentée (mais voir par exemple Osman & Whitlatch, 2004). La pression de prédation peut s'exercer à différents stades de la colonisation du substrat et à différents stades de vie des organismes composant le biofouling (broutage du biofilm, consommation de larves, de macro-organismes juvéniles ou adultes, de macroalgues). Le tableau 2 présente quelques exemples de prédateurs qui peuvent avoir une influence sur la colonisation de structures déployées dans les eaux françaises (y compris ultra-marines). De manière générale, la **matière organique** produite sur place ou allochtone (transport de nutriments, de détritits amenés par les courants) a une influence sur le développement du biofouling. Cette influence est d'autant plus marquée dans les eaux côtières, généralement plus riches que les eaux océaniques.

La **mobilité de la structure** sur laquelle se développe la biocolonisation influence aussi la composition du biofouling. Par exemple, Hunsucker, Hunsucker, Gardner & Swain (2016) ont mesuré l'influence de la vitesse de rotation d'une structure sur le pourcentage de recouvrement de cette structure par des organismes marins. Ces auteurs ont montré que les composants statiques étaient toujours moins colonisés que les composants dynamiques et arboraient des communautés différentes. Les plaques dynamiques sont couvertes d'algues et de biofilm tandis que les plaques statiques sont couvertes de bryozoaires, hydraires et recrues de balanes). **Une structure en mouvement peut aussi modifier le comportement de certains organismes et induire des changements de biocolonisation**, par exemple réduire l'activité de broutage d'oursins ou de patelles, ce qui induirait une augmentation de la biomasse d'algues sur la structure (Tiron, Pinck, Reynaud, & Dias, 2012).

1.2 L'encrassement biologique d'un point de vue ingénieur

La biocolonisation **affecte toutes les structures d'origine anthropique placées en milieu marin**. Depuis les premières coques de navires en bois endommagées par les tarets (i.e. des mollusques perceurs du genre *Toredo* spp.) (Fig.11), jusqu'aux plateformes offshore colonisées par exemple par des moules ou des coraux (Fig.12), la biocolonisation est un phénomène connu des ingénieurs réalisant ces structures.



Fig 11. Piles en bois endommagées par des organismes perceurs (haut) tels que le Taret (*Toredo* sp.) (bas).

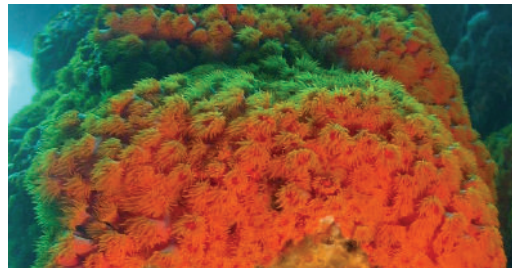


Fig. 12. Coraux sur des jackets d'une plateforme pétrolière au large de la Guinée.

Les effets du biofouling sur les structures en mer sont nombreux ; dès les premiers stades de la colonisation, le fouling peut former un **écran hydrodynamique**, **affecter les échanges thermiques**, **bloquer des fonctions mécaniques**, induire la **fatigue de certains matériaux** et **accélérer la corrosion** et la **biodégradation** (Compère, 1999). Aussi, les ingénieurs perçoivent souvent la biocolonisation comme une nuisance, et parlent notamment d'**encrassement biologique** ou de **concrétions marines** (ex. Gaurier *et al.*, 2014). Le recouvrement des structures par des organismes induit directement :

- Une augmentation du **diamètre** (Fig. 13) qui influence la poussée d'Archimède, les efforts de houle, la trainée et la masse ajoutée ;
- **modification du profil** d'une surface ou dissymétrie/excentricité d'une structure circulaire qui impacte l'effort de trainée, mais peut aussi générer des phénomènes de portance, voir d'instabilité fluide/structure autoentretenue type "Gallop" (Damblans *et al.* 2013), pouvant mettre en péril l'intégrité de la structure. Ces phénomènes ont été identifiés dans l'industrie parapétrolière sur corps élancés cylindriques pour lesquels la colonisation s'est répandue de façon dissymétrique et/ou avec une excentricité marquée (Fig.14).
- **modification de la rugosité par une augmentation irrégulière d'épaisseur** (Fig. 13) (impacte l'effort de trainée) ;
- Une augmentation du **poids** de la structure, (i.e masse additionnelle) qui impacte la poussée d'Archimède, les efforts inertiels de la structure en mouvement et décale les modes propres/la réponse de la structure vs design initial ;
- Une augmentation de la **masse ajoutée** (i.e. effort fluide subi par la structure en mouvement proportionnel à son accélération) ;

Ces changements entraînent (impacts indirects du biofouling) **l'entrave à l'inspection visuelle des structures et même à leur fonctionnement** (ex. encrassement d'une hélice), ce qui nécessite des opérations de nettoyage et de maintenance coûteuses. Pour illustrer un cas d'entrave au bon fonctionnement d'un composant, on peut prendre l'exemple d'un câble d'export dynamique d'une éolienne flottante déployée en profondeur modérée (<50m) et colonisé sur quasiment toute sa longueur (Fig. 15).

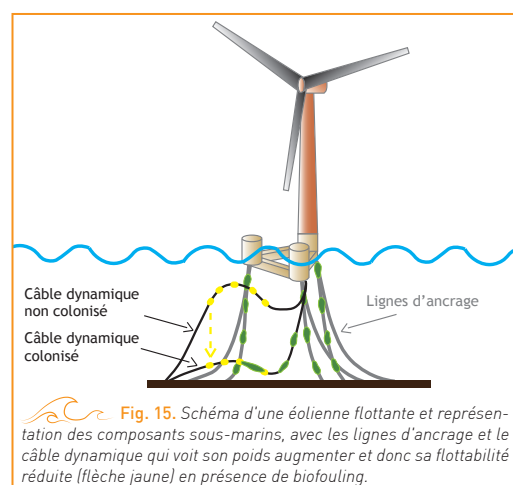
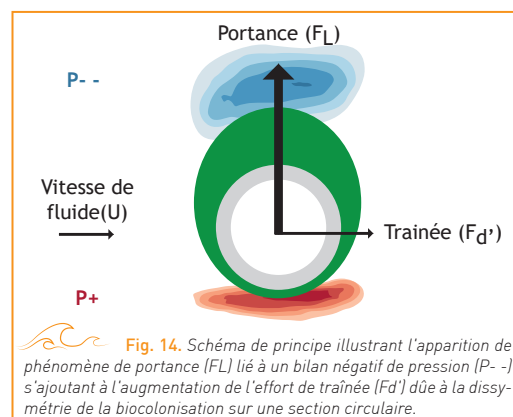
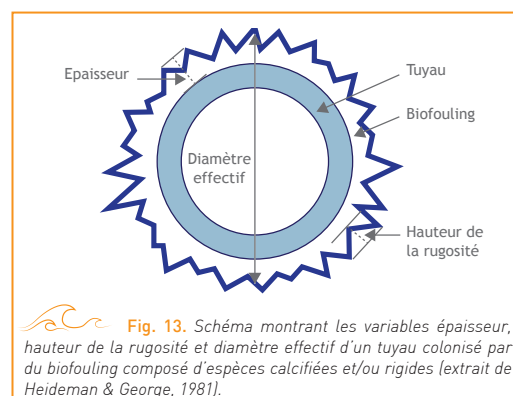
Afin d'absorber la dynamique de houle ainsi que celle imposée par le flotteur, le câble dynamique dispose d'une sur-longueur supportée par un arrangement de bouées. L'alourdissement du câble lié à la biocolonisation (poids additionnel des organismes marins présents sur le câble) se traduit alors par la disparition de cette sur-longueur, ce qui peut engendrer des dégradations, voire la rupture du câble. En effet, le câble est dimensionné pour ne pas toucher le fond, car l'abrasion répétée est critique, de même que la transmission directe de la dynamique du flotteur qui peut alors se traduire par un arrachement des connexions.

Dans le cadre d'un autre projet coordonné par France Energies Marines (projet ANR-EMR-ITE 2015 OMDYN), des observations réalisées sur le site du SEM-REV (partenaire du projet), ont permis d'estimer que la colonisation du câble par des moules (*Mytilus edulis*) peut générer :

- Une augmentation du poids du câble dans l'air d'un facteur 3.5 ;
- Une augmentation de la masse dans l'eau d'un facteur 1.8 ;
- Une augmentation de la masse ajoutée d'un facteur 5.8.

L'étude préliminaire ne présente pas les impacts sur les réponses structurales même s'ils sont très probablement non négligeables (Damblans, 2017). Les organismes rigides et souples qui composent le biofouling augmentent la masse et la taille d'une structure biocolonisée, mais pas nécessairement proportionnellement à leur longueur/hauteur. **Un cylindre colonisé (en proportions comparables) par des organismes rigides et par des organismes souples aurait des coefficients hydrodynamiques différents d'un cylindre colonisé seulement par des organismes**

rigides (Heideman & George, 1981). La réponse du cylindre lui-même, ou de la structure EMR, est susceptible d'être modifiée par la dynamique propre de l'organisme souple (ex. laminaire), ce qui représente une problématique physique complexe d'interaction fluide/structure. Sa prise en compte nécessite des investigations expérimentales et des développements numériques dédiées.



2 - Les enjeux du biofouling pour la filière EMR

Bien que la problématique du biofouling soit bien connue et étudiée en milieu marin (navigation, activités offshore, etc.) elle pose de **nouveaux enjeux dans un contexte EMR** (détails disponibles dans le livrable du projet ABIOP intitulé : Etat de l'art des problématiques liées au biofouling rencontrées pour les différentes technologies EMR) (Fig.16). En effet, les systèmes d'énergies marines renouvelables sont composés de **matériaux nouveaux** pour lesquels le retour d'expérience concernant leur sensibilité au fouling n'est pas établie. De plus, les machines EMR sont mises en place dans des **environnements très dynamiques** (zone où les courants, la houle et le vent sont intenses), **éloignés des côtes** et/ou profonds, donc peu accessibles aux scientifiques et **peu connus**.



 **Fig. 16.** Une hydrolienne colonisée par des lami-naires après 3 années d'immersion au site de Race Rocks, Canada (www.racerocks.ca).

Les enjeux que représente le biofouling sont de trois ordres : environnementaux, techniques et économiques. L'enjeu environnemental principal qui s'intègre dans une problématique d'acceptabilité des projets EMR est de **maintenir (ou améliorer) les fonctionnalités d'un écosystème**. Le principal enjeu technique est d'**optimiser le dimensionnement des structures**, tout en leur assurant une bonne résistance et un bon fonctionnement sur le long terme en faisant évoluer les réglementations (i.e. affiner les recommandations des bureaux de certification). **Limiter ou mieux gérer les opérations de maintenance pour maintenir le LCOE** (sigle anglais de Levelized Cost of Energy, signifiant « coût actualisé de l'énergie ») **le plus bas possible** constitue le principal enjeu économique (Livrable ABIOP Synthèse des enjeux du biofouling pour la filière EMR ; Loxton *et al.*, 2017).

Des estimations (Want, 2018) suggèrent que la **réduction de la maintenance (une visite en moins par an)** réduirait de 23 k€ et de 4 tonnes de carbone les coûts économiques et environnementaux d'une machine (type hydrolienne). **A l'échelle d'une ferme de taille moyenne** (composée de 10 machines) en fonctionnement pendant 25 ans, cela **reviendrait à une économie de 5,8 millions d'euros**. Aussi, il est très important de bien comprendre le processus de biocolonisation afin de mieux prévoir la maintenance des systèmes EMR et réduire le LCOE.

Afin d'accompagner au mieux l'intégration environnementale et la viabilité technique et économique des projets EMR, il est essentiel de déterminer, dans le large panel des technologies existantes, les **composants plus ou moins sensibles au biofouling**.

Le **biofouling peut être toléré**, voire favorisé, sur certains composants comme par exemple les fondations des éoliennes posées, ou les matelas de protection des câbles de transport du courant (ex Taormina *et al.*, 2018, Fig. 17). Bien dimensionnés, ces éléments peuvent supporter la biocolonisation et promouvoir l'**effet récif**. Le développement d'écosystèmes sur/autour de ces structures, allié aux restrictions de pêche qui peuvent être prévues dans le périmètre des fermes éoliennes (**effet réserve**), peuvent constituer des zones de refuge et de repeuplement pour plusieurs espèces d'intérêt commercial (Langhamer, 2012; Taormina *et al.*, 2018) et ainsi jouer le rôle d'aires marines protégées. Cet effet peut avoir un impact socio-économique important et **améliorer l'acceptabilité des projets EMR**.



 **Fig. 17.** Matelas protégeant le câble reliant le site d'es-sai de Paimpol-Bréhat au continent colonisé par des espèces sessiles (ascidies, ser-pules, etc.) et des espèces vagiles telles que le homard (*Homarus gammarus*), photo prise dans le cadre du projet ANR-EMR-ITE-FEM SPECIES et extraite de Taormina *et al.*, 2018.

Certains composants des structures EMR sont en revanche plus sensibles à la biocolonisation. Des groupes de travail conduits par FEM à partir de 2015 et menés au sein du consortium du projet

ABIOP ont permis de distinguer onze **composants** où la prise en compte de la problématique du biofouling est prioritaire (Tab. 3).

Illustrations

Technologie :
Hydrolien

Composants :

Stator

Carénages et pales

Rotor

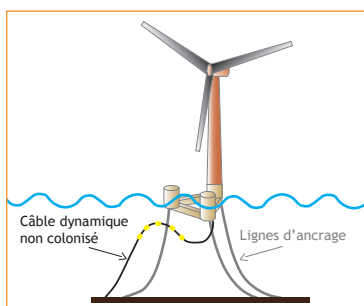


Technologie :
Eolien flottant
(et autres technologies flottantes)

Composants :

Ancrages

Câble dynamique



Technologie :
Energie thermique des mers

Composants :

Ancrages

Câble dynamique

Conduites

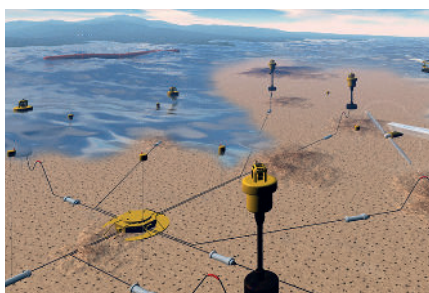


Technologie :
Toutes technologies

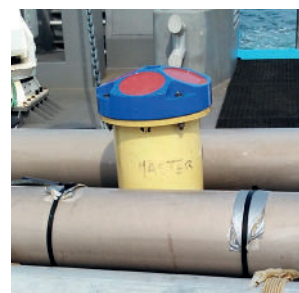
Composants :

Connecteurs sous-marins

Appareil de mesure (sondes, ADCP, etc.)



Connecteurs sous-marins



ADCP

 **Tab. 3.** Détermination des technologies et/ou composants EMR les plus sensibles au biofouling.

Il existe un **fort enjeu d'acquisition de connaissances sur le biofouling** dans les environnements très dynamiques (forte courantologie) dans lesquels sont déployées les structures EMR et un enjeu d'acquisition de variables caractérisant le biofouling **qui soient utiles à la fois pour répondre aux problématiques environnementales et sciences de l'ingénieur** (Macleod, Stanley, Day, & Cook, 2016 ; Want *et al.*, 2017). Le livrable du projet ABIOP, intitulé Synthèse des protocoles in situ existants et recommandations de méthodes de suivi du biofouling adaptés aux EMR, propose une revue des moyens existants de caractérisation du biofouling et des pistes pour leur adaptation au contexte des EMR (Quillien *et al.*, in prep.).

Il a notamment été recommandé de mesurer les variables suivantes :

- Biovolume,
- Epaisseur (*in fine* rugosité),
- Poids frais,
- Distribution/masse linéique,
- Dymétrie (géométrie de la colonisation),
- Groupes fonctionnels,
- Richesse spécifique,
- Présence/absence d'espèces allochtones,
- % de recouvrement,
- Abondance.

La mesure de ces variables dépend des objectifs initiaux de l'étude du biofouling (prospection/étude préalable, suivi ou évaluation des effets/impacts environnementaux) (cf. livrable du projet ABIOP intitulé Synthèse des protocoles in situ existants et recommandations de méthodes de suivi du biofouling adaptées aux EMR).

3 - Méthodologie de réalisation de l’atlas

3.1 Composition du corpus documentaire

La combinaison d’une **recherche bibliographique et de requêtes auprès des partenaires** du projet ABIOP a permis de constituer un corpus documentaire qui forme la base de cet atlas. La recherche bibliographique a été menée à partir de deux moteurs de recherche (**Web Of Science et Google Scholar**) et de l’outil de recherche des documents disponibles à la **bibliothèque La Pérouse** (spécialisée dans les ouvrages et journaux portant sur le milieu maritime) à partir d’une liste de mots-clés (Tab. 4).

Au total, près de 200 documents (articles scientifiques, thèses, rapports, ouvrages) ont été rassemblés. **Un sous-ensemble de documents** a ensuite été constitué en sélectionnant les **études menées dans les eaux françaises** (y compris ultra-marines) et visant à caractériser

la biocolonisation et/ou les assemblages de substrats durs du domaine subtidal. Les études ciblées portent très majoritairement sur la macrocolonisation (cf. livrable du projet ABIOP intitulé Synthèse des protocoles in situ existants et recommandations de méthodes de suivi du biofouling adaptées aux EMR). Quelques études portant sur les premiers stades de la biocolonisation ont été incluses (notamment les études menées dans les eaux ultra-marines).

De plus, les études portant spécifiquement sur le biofouling dans un contexte EMR, mais n’ayant pas été menées dans la zone géographique considérée dans la présente étude ont tout de même été ajoutées au sous-ensemble. La synthèse de ces études n’apparaît pas dans l’atlas, mais a nourri sa partie introductive.

Thème	Mots clés
Biofouling	<i>Biofouling, successional development/succession écologique, marine growth, biocolonization/biocolonisation, biosalissures, macrofouling, recolonization/recolonisation, colonization/colonisation, epibenthic communities/communautés épibenthiques, encrassement biologique, encrassage, benthic succession, fouling, epibiose/épibiose, subtidal epifauna, sessile assemblages, hard bottom fauna, épifaune, faune de substrats durs</i>
Type de substrat	<i>Artificial reef/récif artificiel, reef effect/effet récif, hard substrate, hard substratum, substrat dur, rocky habitat/habitat rocheux, structure, device, renewable energy, MRED/structures EMR, MRE/EMR, wave power/houlomoteur, turbine, offshore wind power, offshore wind farm/ferme éolienne offshore, water power, tidal power/hydrolien, oil & gas platform/e, oil rig/plateforme pétrolière, steel platform, marine cables/câbles sous-marins, piling, pontoon/ponton, wharf, buoy/bouée, boat/navire, rocky reef, offshore structure, gas platform/plateforme gazière, hull/coque, hard bottom/substrat dur</i>
Emprise géographique	<i>France, Bay of Biscay/Golfe de Gascogne, Mediterranean/Méditerranée, Polynesia/Polynésie, Réunion island/île de la Réunion, Martinique, Brittany/Bretagne, Paimpol-Bréhat, Alderney Race/Raz-Blanchard, Caribbean coast/Caraïbes</i>

 **Tab. 4.** Liste de mots-clés utilisés dans les recherches.

3.2 Analyse du corpus documentaire

L'atlas repose sur l'analyse de **45 documents** dans le périmètre défini pour le projet ABIOP (eaux françaises). Des informations précises ont été extraites de ces documents et ont permis de renseigner deux bases de données principales 1) analyse des documents (109 catégories) et 2) coordonnées géographiques des sites et stations suivis dans les études analysées (55 catégories). Au cours de l'analyse des documents, les grands champs suivants ont été renseignés lorsque les informations étaient disponibles :

- **Source** : informations générales (auteurs, journal, titre, etc.), thème général ;
- **Objet(s) de l'étude** : problématique(s), objectif(s), variables explicatives et réponses mesurées ;
- **Caractéristiques du site d'étude** : échelle spatiale (pays de la zone d'étude, zone atlas, coordonnées géographiques, profondeur), informations complémentaires (pollution, etc.) ;
- **Protocole(s)** : méthodes d'acquisition des données (technique d'échantillonnage, surface échantillonnée, analyses numériques, etc.), échelle temporelle (durée, fréquence, etc.) ;
- **Variables explicatives** : contexte (type de support, matériau, orientation de la structure, etc.), variables physico-chimiques (température, houle, pH, etc.), variables biogéochimiques (nitrates, contaminants, etc.), variables biologiques (compétition, prédation, etc.), variables transverses (type d'habitat, connectivité) ;
- **Variables réponses biologiques** : variables ayant un impact sur la géométrie du composant (taux de recouvrement, excentricité, rugosité, etc.), variables ayant un impact sur la structure dans son ensemble (biomasse, volume, etc.), variables ayant un intérêt pour l'ingénierie et l'évaluation des effets sur l'environnement (richesse spécifique, taille/dimension spécifique, évolution temporelle, etc.) ;
- **Résultats de l'étude** : principaux résultats et éléments de discussion, conclusion(s), limites identifiées par les auteurs ;
- **Remarques** : intérêt et limites de l'étude, transposition dans un contexte EMR possible, nombre de citations ;
- **Lien vers le journal de bord** : date de la recherche bibliographique, n° référence du document.

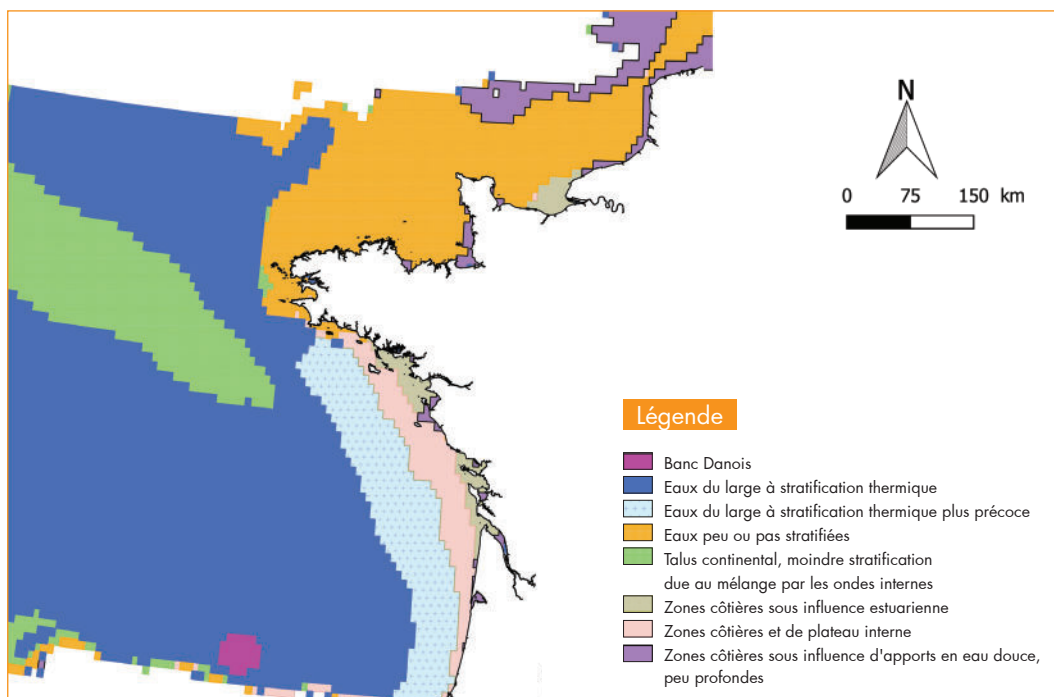
Ces bases de données se présentent sous la forme de **fichiers Excel** et sont accompagnés de **métadonnées**. Un **Système d'Information Géographique (SIG)** a été mis en place pour réaliser la cartographie des informations extraites des documents analysés et sera **mis à jour à mesure que de nouvelles informations enrichiront les deux bases de données constituées pour l'atlas**. Une troisième base de données a été créée afin de réaliser la synthèse des protocoles de caractérisation du biofouling existants (livrable du projet ABIOP intitulé Synthèse des protocoles in situ existants et recommandations de méthodes de suivi du biofouling adaptées aux EMR).

3.3 Découpage de l'atlas

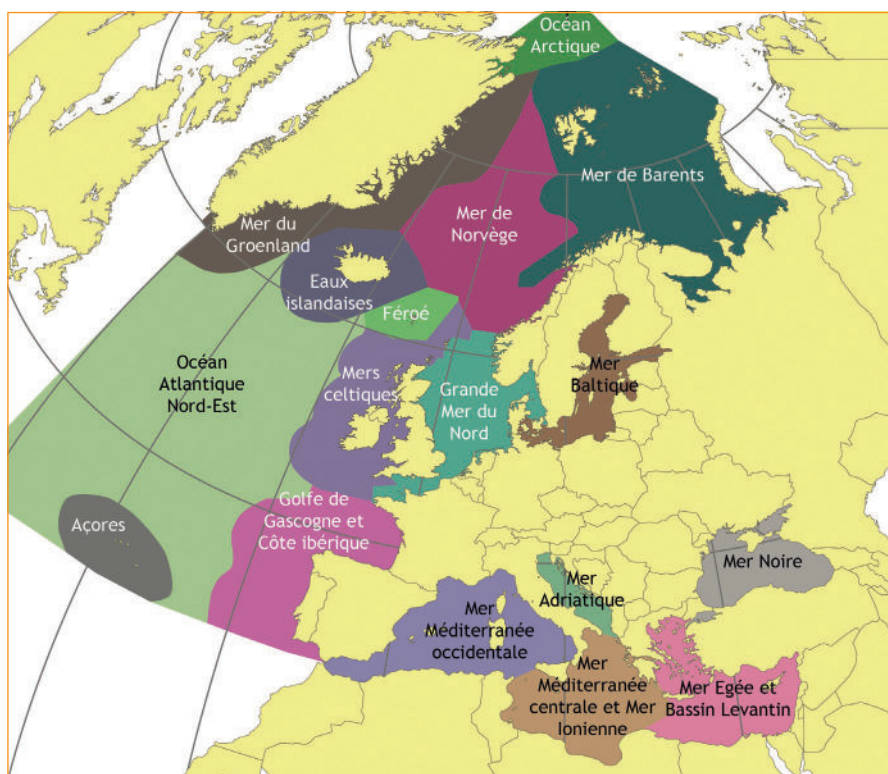
L'atlas a été découpé en **quatre zones**, se distinguant par leurs **caractéristiques biogéographiques** (ensemble de mécanismes et/ou caractéristiques physiques et hydrologiques qui régulent la biodiversité) :

- **La Manche**, dont la masse d'eau est homogène (zone orangée, Fig. 18) ;
- **Le Golfe de Gascogne**, qui présente une variation saisonnière plus marquée qu'en Manche avec une stratification de la masse d'eau qui se met en place en période estivale et une augmentation de la température de l'eau associée (zones bleue et rose clairs, Fig. 18) ;
- **La Méditerranée**, qui est une mer enclavée qui contient une eau plus salée qu'en Manche et en Atlantique, et qui présente une biodiversité spécifique (Fig. 19) ;
- **Les DOM-TOM**, et en particulier les départements et territoires de l'Océan Indien, des Caraïbes et de Polynésie correspondant à des écosystèmes tropicaux où des technologies EMR sont en test, ont été regroupés dans une quatrième partie.

Pour chacune de ces zones, **les connaissances rendues disponibles via l'analyse du sous-ensemble documentaire sont synthétisées, la disponibilité des données issues des documents analysés est cartographiée** et les **informations clés extraites de chacune des sources analysées sont résumées** en un court paragraphe. Les informations concernant le **lieu de l'étude**, sa **durée**, la **nature du substrat** étudiée, les **variables mesurées** sont mises en valeur.



 **Fig. 18.** Des paysages hydrologiques contrastés le long de la côte Manche [source des données : Ifremer].



 **Fig. 19.** Délimitation des éco-régions marines européennes [source : ICES].

3.4 Petit guide à l'usage du lecteur

Chacune des 4 sections (Manche, Golfe de Gascogne, Méditerranée, DOM-TOM) comprend (dans l'ordre) :

- Une **1^{ère} page** présentant la localisation de la zone atlas, de la section, des informations clés sur la zone biogéographique et la liste des principales espèces composant le biofouling (et plus largement les communautés de substrats durs) de la zone établie à partir de l'analyse des documents disponibles pour cette zone géographique ;
- Une **2^{ème} page** présentant une carte de localisation des sites étudiés dans la zone atlas. A chaque point est associé un numéro qui correspond à celui de la référence analysée. Certains numéros apparaissent plusieurs fois sur la carte dans le cas où plusieurs stations ont été suivies au cours d'une même étude.
- Les **pages suivantes** présentent les documents analysés de manière synthétique (références bibliographiques annotées) qui sont accompagnés de 5 cartes informatives montrant :
 - La **profondeur** & le **type d'échantillonnage** à chaque point : la profondeur est un paramètre forçant significativement la composition d'une communauté de biofouling, il est important de connaître cette variable avant de considérer les résultats d'une étude. De même, le type d'échantillonnage (stationnel vs. transect) donne une indication du degré d'intégration des données considérées (stationnel = échantillonnage réalisé à un point, et donc une profondeur ; donné / transect = échantillonnage réalisé à différentes profondeurs). La caractérisation du biofouling qui diffère en fonction de la profondeur est en quelque sorte moyennée ;
 - Le **type de substrat** étudié : artificiel, naturel ou les deux. Les études analysées présentent des résultats de suivis menés sur différents types de substrats. La nature du substrat (ex. béton, métal, roche) est également indiquée dans le texte accompagnant chacune des références ;

- La **disponibilité des données d'abondance** : un carré vert indique que des informations concernant l'abondance (nb d'individus par unité de surface) des espèces ou groupes d'espèces échantillonné(e)s sont disponibles. Des données plus détaillées peuvent être présentées dans le texte accompagnant chaque référence et tous les détails sont inclus dans la base de données de l'atlas ;

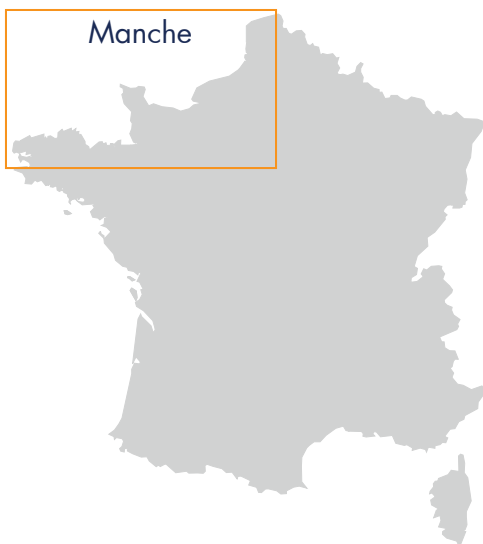
- La **disponibilité des données de biomasse** : un carré vert indique que des informations concernant la biomasse (poids spécifique ou à l'échelle de la communauté par unité de surface) sont disponibles. Sur ces cartes, la biomasse comprend le poids frais (ou poids humide), le poids sec et/ou le poids sec sans cendre. Le poids frais est une variable particulièrement intéressante dans un contexte EMR car elle peut constituer une donnée d'entrée pour le design des structures. L'information quant au type de biomasse mesurée et quelques valeurs sont décrites dans le texte accompagnant chaque référence. Les données détaillées sont incluses dans la base de données de l'atlas ;

- La **disponibilité des données de richesse spécifique** : un carré vert indique que des informations concernant la richesse spécifique (nombre d'espèces échantillonnées) sont disponibles. Cette information est intéressante pour répondre aux enjeux environnementaux que représente la biocolonisation des structures EMR.

Une planche présentant des résultats plus généraux (à l'échelle des quatre zones atlas) est incluse à la suite des quatre sections.

4 - Atlas du biofouling et des communautés de substrats durs

4.1 Biofouling en Manche



Caractéristiques de la zone :

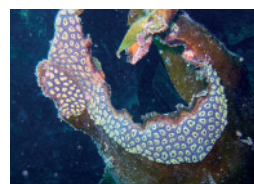
Mer épicontinentale ; profondeur moyenne de 54 m (profondeur maximale 185 m) ; bassin occidental sous forte influence de l'Atlantique et bassin oriental sous influence des apports d'eau douce de l'estuaire de la Seine ; forts courants de marée (brassage de la colonne d'eau) ; prédominance des sédiments grossiers à l'échelle du bassin ; T° hivernales de 6 à 9°C ; T° estivales de 12 à 17°C ; une des mers les plus fortement impactées par les activités humaines : extractions de granulats marins, présence de grands ports maritimes (Le Havre, Rouen, Dunkerque), présence de quatre centrales thermonucléaires (Paluel, Penly, Gravelines, Flamanville), activité de pêche (poissons, crustacés, bivalves) dont l'emprise spatiale est très importante.

Principales espèces du fouling en Manche :

B. crenatus, *B. perforatus*, *B. improvisus*, *Eliminius modestus*, *Botryllus schlosseri*, hydraires gazonnants, *Tubularia indivisa*, *T. larynx*, *Ciona intestinalis*, *Schizomavella auriculata*, *Solieria chordalis*, *Laminaria hyperborea*, *Metridium senile*, *Mytilus edulis*, *Alcyonium digitatum*, *Ascidia mentula*, *Corynactis viridis*, *Urticina felina*, *Tethya aurantium*, *Anomia ephippium*, *Pomatoceros triqueter*.



B. crenatus



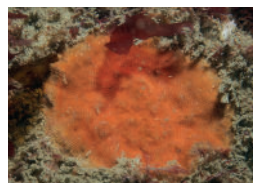
Botryllus schlosseri



Tubularia indivisa



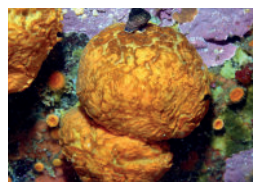
Ciona intestinalis



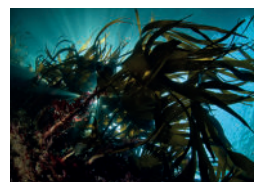
Schizomavella auriculata



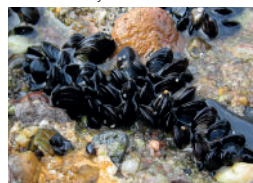
Solieria chordalis



Tethya aurantium



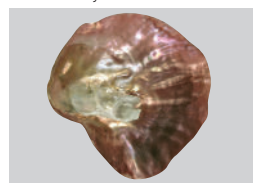
Laminaria hyperborea



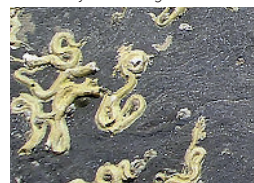
Mytilus edulis



Alcyonium digitatum

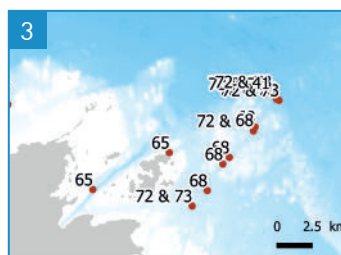
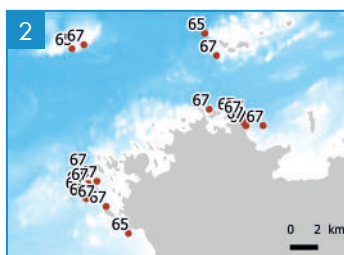
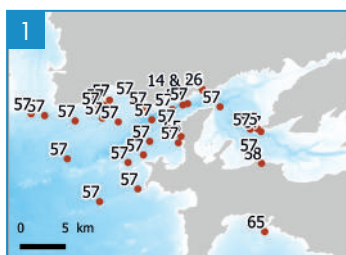
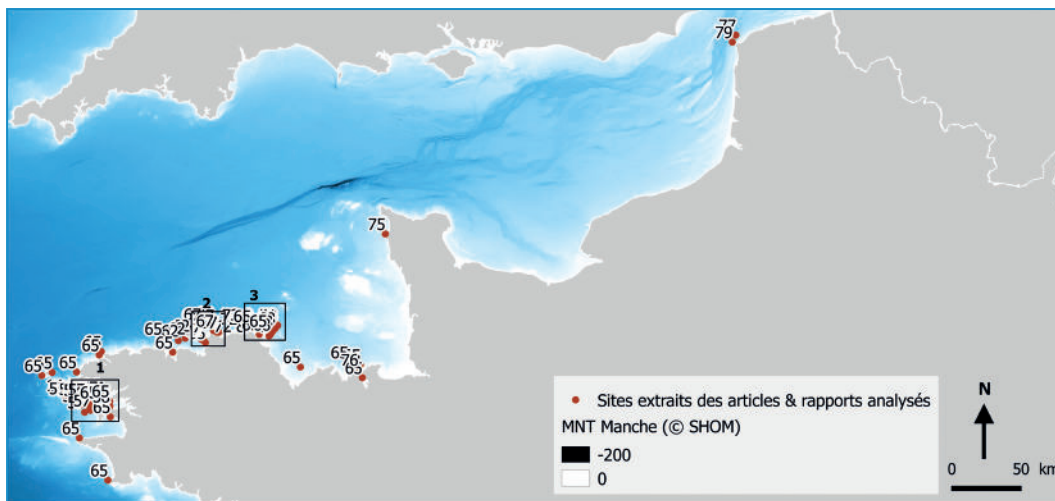


Anomia ephippium

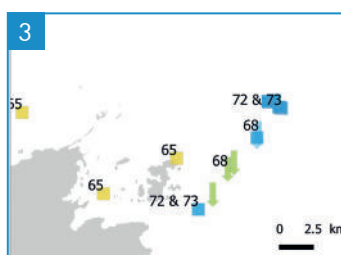
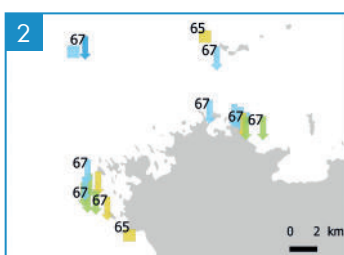
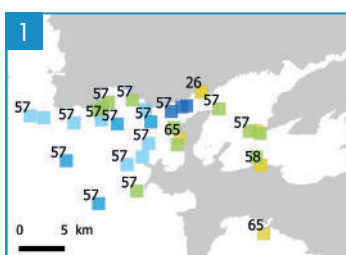
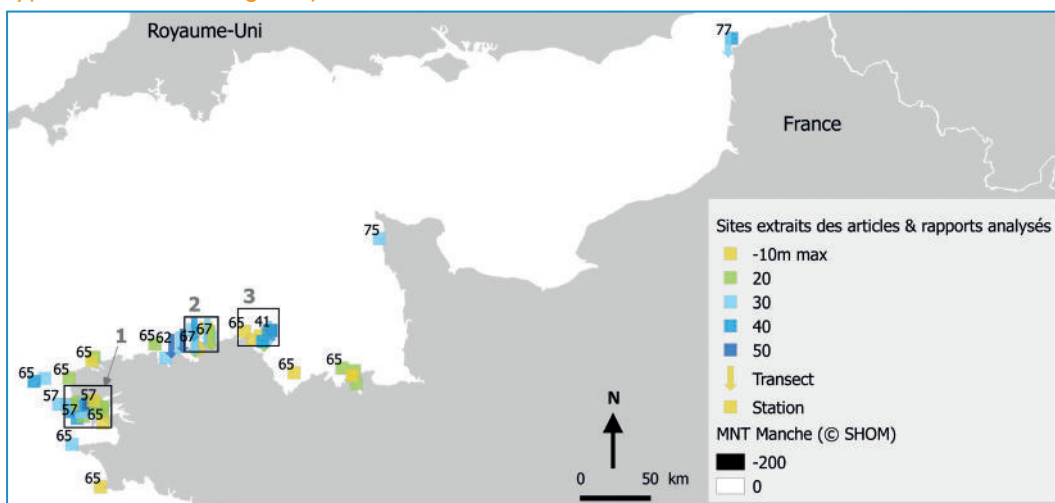


Pomatoceros triqueter

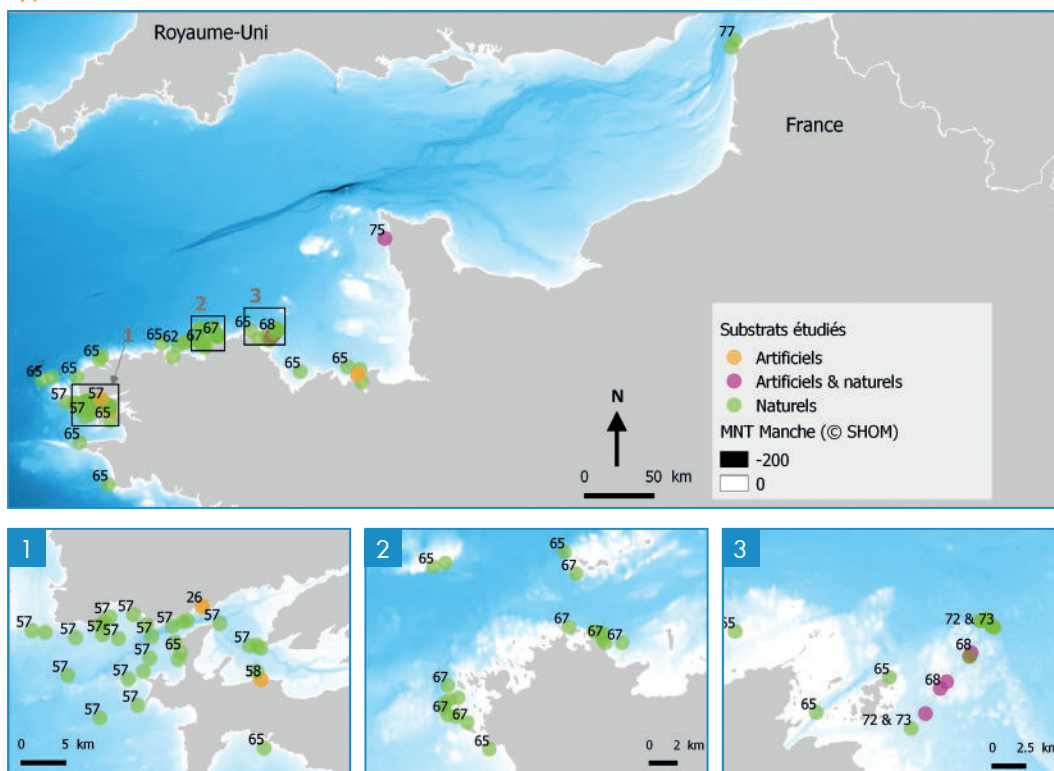
Localisation des sites étudiés en Manche



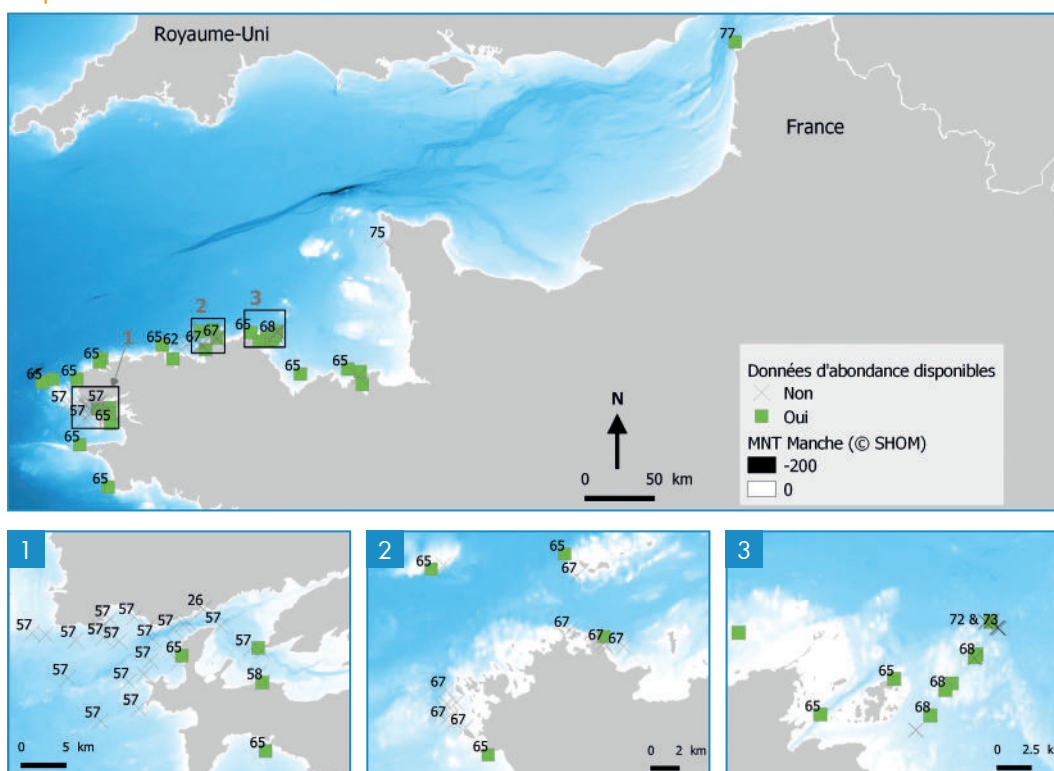
Type d'échantillonnage et profondeur maximale des sites en Manche



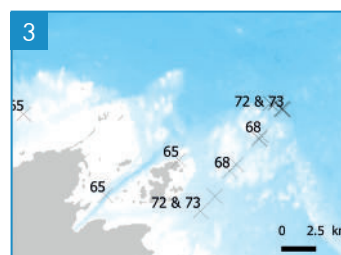
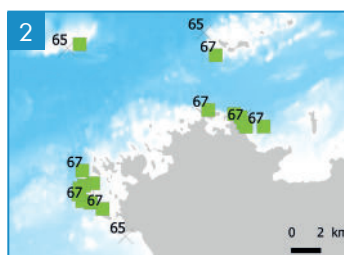
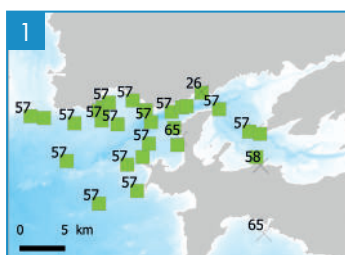
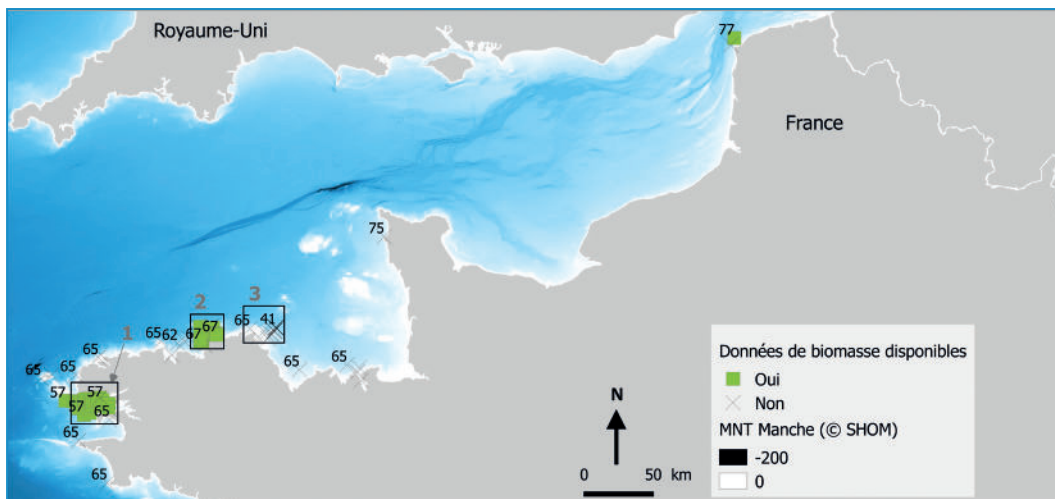
Type de substrat étudié aux différents sites en Manche



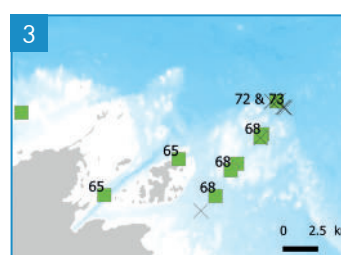
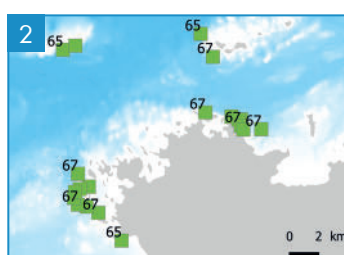
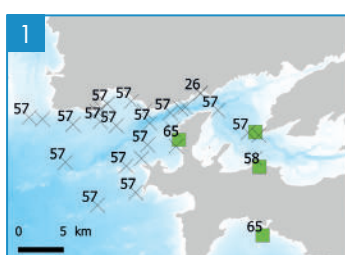
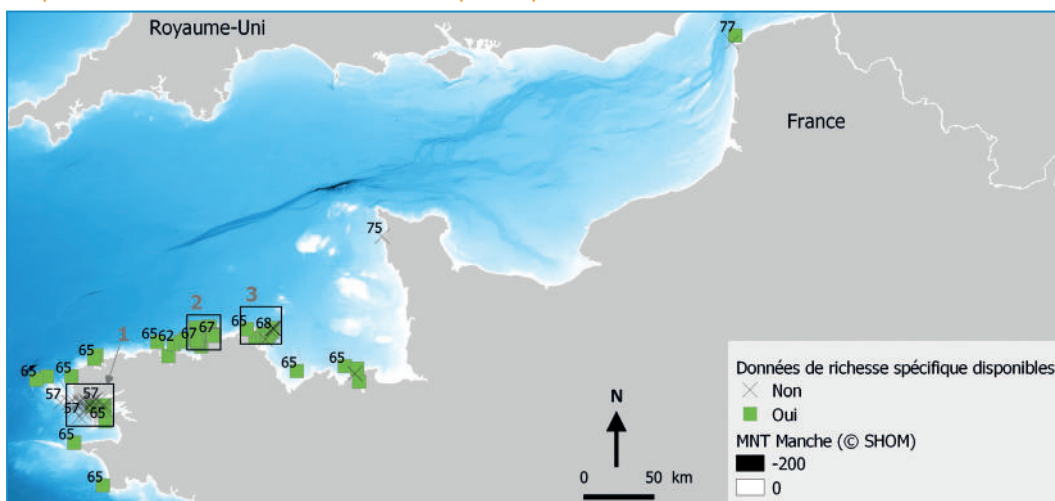
Disponibilité des données d'abondance en Manche



Disponibilité des données de biomasse en Manche



Disponibilité des données de richesse spécifique en Manche



Références-clés annotées

[14] Antoine E., 1978. *Etude du Fouling sur la station d'essais en milieu marin de Sainte-Anne du Portzic*. Rapport interne CNEXO, 6pp. **Sainte-Anne du Portzic**, Rade de Brest (29) ; **juin à déc. 1977** ; plaques d'**ardoise** placées verticalement à **8 m** de prof. ; suivi (**fréq. $\approx$ 2 mo.**) du développement du biofouling et des périodes de fixation d'organismes benthiques ; variables mesurées : **abondance absolue, abondance relative, % de recouvrement, taille moyenne espèce** ; au bout de 6 mois, colonisation > 100 % (les organismes se recouvrent les uns, les autres) ; variabilité interannuelle des périodes de fixation, mais ordre identique : ascidies (mai et juin), balanes (juin et juillet), bryozoaires et serpules (juillet et août).

[41] Duchêne J., 2014. *Evaluation du biofouling sur la machine test OH-OCT-1*. Rapport interne Istrenn, 10pp. **Paimpol-Bréhat**, Plateau de la Hoiraine (22) ; **déc. 2013 à avr. 2014** ; **composite** et **acier revêtu** d'antifouling et support acier non revêtu d'antifouling d'une **hydrolienne** Open Hydro positionnée à **40 m** de prof. ; qualif. et quantif. du biofouling s'étant développé sur l'hydrolienne ; variables réponses mesurées : **% de recouvrement, A, S** ; S = 3 sur les supports ; *Balanus balan*, *Tubularia indivisa*, *Tubularia larynx* ; S = 0 sur les pales. Pas de fouling sur les pales et le venturi (= composants revêtus d'antifouling) ; faible colonisation des supports verticaux (< 5 % de recouvrement) ; différences entre bâbord et tribord (support tribord + colonisé), mais pas de facteur explicatif identifié.

[63] Bridier G., 2016. *Dynamique temporelle d'une communauté benthique sur substrat artificiel en rade de Brest*. Rapport de stage (master 1) IUEM, 25pp. **Lanvéoc**, Rade de Brest (29) ; **janv. 2013 à oct. 2015** ; plaques de **plexiglass** inclinées placées au niveau du sédiment à **9 m** de prof. au printemps 2012 ; suivi (**fréq. mensuelle**) de la colonisation sur quasiment 3 ans ; variables explicatives mesurées : T°C, sal., O₂, pH, NH₄, NO₃⁻, NO₂, PO₄, SiOH₄, COP, NOP, MES, Chla, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$; variables réponses mesurées : **A spécifique, S** ; S = 79 ; identification de cycles dans la succession des espèces (sauf pour serpulidés) ; diminution de la densité (parfois jusqu'à disparition) de certaines espèces pourtant présentes aux 1^{ers}

stades de la macro-colonisation (ex. bryozoaires et ascidies) ; *Balanus crenatus* et *Anomia ephippium* dominant très largement le peuplement en termes d'A ; variabilité interannuelle du % de recouvrement ; autocorrélation temporelle positive (les communautés échantillonnées à deux dates consécutives sont similaires) ; variables explicatives retenues par sélection ascendante : T°, pH, $\delta^{15}\text{N}$, [PO₄³⁻], Chla, NOP (var. liées au bloom phytoplanctonique) ; autres facteurs pouvant expliquer les variations (non mesurés et donc non testés) : prédation, compétition pour le substrat.

[58] Chauvaud A., 2017. *Dynamique temporelle d'une communauté benthique sur substrat artificiel en rade de Brest : influence de l'environnement et des interactions spécifiques*. Rapport de stage (master 1) IUEM, 25pp. Suite des travaux de Bridier, 2016 ; **Lanvéoc**, Rade de Brest (29) ; **janv. 2013 à nov. 2016** ; plaques de **plexiglass** inclinées placées au niveau du sédiment à **9 m** de prof. au printemps 2012 ; suivi (**fréq. mensuelle**) de la colonisation sur 4 ans ; variables explicatives mesurées : T°C, sal., O₂, pH, NH₄, NO₃⁻, NO₂, PO₄, SiOH₄, COP, NOP, MES, Chla, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$; variables réponses mesurées : **% de recouvrement spécifique, % d'espace libre, S, J'** ; S = 39 pour 2016 ; J' $\searrow$ entre 2013 et 2016 = la communauté tend à être dominée par une ou un nombre restreint d'espèces ; taxons dominants : 2013 = *Anomia*, 2014 = *Balanus crenatus* (rec. 50 %), 2015-2016 = *Schizomavella auriculata* (rec. 40 %) ; variabilité saisonnière +/- marquée ; le temps explique à lui seul + de 50% de la variation de la communauté, l'environnement seul (unique variable sélectionnée = T°), 3 % ; équilibre dynamique atteint au bout de 4 ans (communauté dominée par des esp. très compétitrices telles que *S. auriculata*) ; à l'équilibre, les bryozoaires et les spongiaires domineraient ce peuplement.

[26] Faimali M. et al., 2016. *Report on JE-RICO Biofouling Monitoring Program (BMP)*. Rapport interne, 26pp. **2 sites Ifremer Brest** (+ autres sites européens : Italie [Gênes, Venise], Grèce) ; suivi à **3 mo.** pour site brestois de la colonisation sur plaques en **verre, métal** et **plastique** à orientation variable (plaques fixées sur plusieurs faces internes et externes

d'une boîte) immergées à une prof. non précisé ; variables explicatives mesurées : matériau, localisation sur la structure, localisation géographique ; variables réponses mesurées : % de recouvrement total, % de recouvrement par gpe fonctionnel ; grande diversité d'organismes souples/mous ; % de fouling dur plus faible qu'à Gênes ; bryos arborescents, hydraires et ascidies présents sur toutes les surfaces (matériau et orientation confondus) ; luminosité faible : balanes et bryo encroûtants ; luminosité plus élevée : algues rouges et vertes + prés. de cnidaires sur face verticale ; à 3 mo. rec. = 35 à 60 % (lux. faible) et 60 à 80 % (lux. plus élevée) ; hétérogénéité entre les ≠ sites ; importance des facteurs luminosité et matériau pour les premiers stades de colonisation.

[65] Derrien-Courtet S. et al., 2013. *Regional-scale analysis of subtidal rocky shore community*. Helgoland Marine Research, Vol. 67 : 697-712. **38 sites** subtidaux **le long des côtes bretonnes** ; transects de **0 à 31 m** de prof. max. [prof. variable selon la station] ; gradient d'exposition ; variables explicatives mesurées : turbidité, T°_{eau}, prof. de la limite entre infra et circa (dernier pied de laminaire), variables réponses mesurées : **A faune/flore** (nb ind et nb de colonies pour chaque espèce), **densité des laminaires** ; distinction de trois assemblages types en fonction de la turbidité et de la stratification des eaux : sites turbides (*Solieria chordalis*, *Ulva* sp., *Gracilaria multipartita*, *Chondracanthus acicularis*, *Chondria dasyphylla*, *Aiptasi mutabilis*, *Bougainvillia muscus*, *Nemertesia antennina*, *Hydrallmania falcata*, *Aplidium elegans*, *Morchellium argus*, *Tethya aurantium*, *Polymastia penicillus*, *Sabella spallanzanii*, *Ophiothrix fragilis*), sites eaux claires stratifiées (forêts à *Sacchoriza polyschides* avec *Pterosiphonia complanata*, *Hypoglossum hypoglossoides*, *Lomentaria clavellosa*, *Marthasterias glacialis* et *Asterias rubens*) et sites eaux claires homogènes (forêt à *Laminaria hyperborea* avec *Desselaria sanguinea*, *Phyllopora crispa*, *Plocamium cartilagineum*, *Meredithia microphylla*, *Balanus* spp., *Dysidea fragilis*) ; limite infra-circa comprise entre -1,6 m (eau turbide) à -32,2 m (eau claire) ; densité de laminaires + importante en eau claire que turbide (32,5 contre 14,8 ind/m²) ; principaux facteurs influençant la faune et la flore des milieux rocheux = température et turbidité.

[68] Cudennec N., 2015. *Dynamique de la colonisation benthique sur les substrats artificiels des installations EMR - Cas du câble de raccordement du site pilote hydrolien de Paimpol Bréhat*. Rapport de stage (master 1) Ifremer, 66pp. **Paimpol-Bréhat** ; **5 stations** (matelas + subs. naturel) et **transects** (10 m de long pour suivi câble) à une prof. max. de **30 m** ; 1650 images acquises entre 2013 et 2014 ; suivi (fréq. semestrielle) ; variables explicatives mesurées : **type de structure** (câble vs matelas), **exposition aux courants** (qualitatif) ; **fréquence d'occurrence**, **A**, **prés./abs.**, **S**, **H'**, **J'** ; >S et H entre 2013 et 2015 et entre l'hiver et l'été ; diversité taxonomique + gde sur subs. naturel que sur subs. artif ; distinction des communautés selon le type de subs. ; ressemblance des com. de subs. artif. avec celles de subs. naturels augmente au cours du temps ; suivi de l'abondance de deux espèces allochtones : *Crepidula fornicata* et *Styela clava* ; *C. fornicata* : câble = 8 à 36 chaînes/m² ; matelas = 1 à 8 chaînes/m² ; *S. clava* : câble = 1 à 45 ind/m² ; matelas = 0 à 23 ind/m².

[57] Castric Fey A. & Chassé C., 1991. *Factorial analysis in the ecology of rocky subtidal areas near Brest*. JMBA UK Vol. 71 : 515-536. **Goulet** et **sortie de rade de Brest** (27 sites) ; **2 à 4 plongées estivales** à chaque station **de 1982 à 1984** ; objectif : identifier les espèces caractéristiques de différentes communautés de **substrat dur naturel** et évaluer l'influence de facteurs environnementaux sur la structure de ces peuplements ; variables explicatives mesurées : hauteur de houle, vitesse courants, prof. limite d'extension de laminaires, luminosité, variables réponses mesurées : **A**, **bio-volume**, **% de recouvrement** ; Algues (max - lux 30 % & courants de 3 nœuds) = 15 kg/m² ; Animaux (max - zone éclairée & eau turbide) = 10 kg/m² ; Animaux (min - zone sombre & eau claire) = 0,5 kg/m² ; Cnidaires = 1/3 de la biomasse animale totale soit en zone éclairée 0,2 à 1 kg/m² et en zone peu éclairée 0,5 à 5 kg/m². **Gpe sites exposés à la houle // FRANGE INFRA** : *Alaria*, *Mytilus*, *Balanus perforatus*, *Metridium senile*, *Pollicipes cornucopiae*, **INFRA** : *Pachymatisma*, *Delesseria*, *Cellepora pumicosa*, *Clathrina*, *Corynactis*, *Sargatia elegans*, *Alcyonium digitatum*, **CIRCA** : *Axinella dissimilis*, *Aglaophenia tubulifera*, *Luidia*, *Eunicella*, *Gymnangium*, *Alcyonium glomeratum* ; **Gpe sites exposés à de forts courants de marée // FRANGE INFRA** :

Laminaria digitata, *Mytilus* ; **INFRA** : *Balanus crenatus*, *Bicellariella*, *Diphasia attenuata*, *Alcyonidium gelatinosum*, *Dysidea*, *Sertularia argentea* ; **CIRCA** : *Hydrallmania*, *Raspailia ramosa*, *Bougainvillia ramosa*, *Adocia*, *Polymastia mamillata*, *Nemertesia antennina*, *Cellaria salicorni*, *Alcyonium digitatum*. Pour les groupes de sites ouverts mais abrités des forts courants (houle et marée) et sites très abrités : voir liste détaillée dans la publication.

[67] Castric-Fey A., 1996. **Richesse et biodiversité en mer mégatidale : communautés sublitorales rocheuses de la région Trébeurden-Ploumanac'h** (Nord Bretagne, France). Cahiers de Biologie Marine Vol. 37 : 7-31. **Trébeurden-Ploumanac'h** (Région de Lannion, 29) ; **16 sites** (roche naturelle) étudiés (exposition à la houle et aux courants de marée variable) ; 3 tranches de profondeur explorées : **niveau 2** – champ de laminaires denses (**3,7 – 11 m**), **niveau 3** – champ de laminaires clairsemées (**11 – 16m**), **niveau 4** – zone sans laminaires (**16 – 30 m**) ; variables explicatives mesurées : profondeur, typo sédimentaire, courants, houle ; variables réponses mesurées : **cotes d'abondance**, **S**, biomasse (**poids frais** via méthode des biovolumes) ; distinction des communautés en fonction de l'orientation du substrat d'abord : horizontale (dominance d'algues) vs verticale (dominance d'animaux sciaphiles tels qu'*Eunicella verrucosa*, *Pentapora foliacea*, *Chartella papyracea*) + esp. indifférentes (*Henricia oculata*, *Cliona celata*, *Diazona violacea*, *térébelliens*) et en fonction de la profondeur ensuite ; Biomasse générale moyenne = 12,7 kg/m², variable selon le site (**biomasse + importante à l'extérieur de la rade** de Brest dans zones à plus forts courants).

[62] Taormina B., 2016. **Inventaire de la faune et flore marines et caractérisation des assemblages benthiques des milieux rocheux d'un site remarquable de la région de Roscoff : le Plateau de la Méloine**. Rapport de stage (master 2) Univ. Pierre et Marie Curie, 93pp. **Archipel marin de la Méloine**, situé entre Roscoff/Baie de Morlaix (W) et Lannion/Côte de Granit rose (E) : forts courants, houle ; 3 sites étudiés (selon un gradient de conditions environnementales) à deux bathy. (**infra et circa**) ; caractérisation des communautés de substrats rocheux naturels ; variables explicatives mesurées : niveau bathy. site et saison ;

variables réponses mesurées : A_{flore} , pres./abs., A_{rel} ; esp. carac. de l'**infra** : ***Perforatus perforatus***, *Modiolula phaseolina*, *Bonnemaisonia asparagoides*, *Polocarium* sp., *Acrosorium ciliolatum*, ***Laminaria hyperborea*** ; et du **circa** : ***Pentapora foliacea***, *Ocinebirna aciculata*, *Aplidium punctum*, *Parvicardium exiguum*, *Margelia coastata*, *Serpularia argentea/cupressina*, *Raphitoma linearis*, *Chartella papyracea*, *Dictyopteris membranacea*, *Heterosiphonia plumosa*, *Erythroglossum lacinia-tum* ; subs. verticaux : *Corynactis viridis*, flustri-dae, algues calcaires encroûtantes et autres org. encroûtants indét. (bryo, éponges, ascidies) ; et (pour le circa seulement) horizontaux : ***Eunicella verrucosa***, *Stolonica socialis*, algues rouges en lame et bryo/hydrozoaires gazonnants ; au total **361 taxons** déterminés (78 taxons algaux et 283 de macrofaune) ; prof. variable qui explique la plus grande part de variabilité des assemblages faune/flore ; inclinaison explique une proportion significative de variabilité pour les peuplements du circa (manip non réalisée en infra) ; variabilité inter-sites moins importante que celle liée à la prof.

[72, 73] Derrien-Courtet S. & Catherine E., 2013, 2015. **Inventaire vidéo de la biodiversité benthique sur le site d'essai hydrolie de Paimpol-Bréhat**. Rapports internes réalisés par le MNHN pour FEM, 21 et 22pp respectivement. 57 (**du 15 au 19/03/2012**) et 25 (**du 20 au 22/03/2013**) vidéos (de 4 à 15 min) des fonds du site **Paimpol-Bréhat** traitées ; transects vidéo à env. 40 m de prof. ; variables réponses mesurées : **prés./abs., fréq. d'occurrence** ; comparaison des communautés 2012-2013 et de ces dernières avec prélèvements Znieff Bréhat ; description des principaux faciès en fonction de l'hydrodynamisme : fort courant = faciès à *Cliona celata*, *Alcyonium digitatum*, *Corynactis viridis*, *Tubulariidae*, *Halidrys siliquosa*-*Cio-calypta penicillus*, et milieu turbide à fort courant = ascidies-micropolychètes ensablés, *Ascidia aspersa*-*Mimachlamys varia*, hydraires gazonnants, *Ulosa stuposa*, hydraires-balanes ; liste des taxons inventoriés en 2012 ($n=105$, $n_{flore}=14$, $n_{faune}=91$) et 2013 ($n=104$, $n_{flore}=26$, $n_{faune}=78$) ; taxons communs (occurrence relativement importante) : ascidies (simples, sociales ou coloniales) notamment *Pycnoclavella aurilucens* et *Polyclinum aurantium*, cnidaires (*Urticina felina* et *Sagartia elegans*) et hydraires (*Sertularia argentea*).

[75] Rudeault P., 2004. *Le Wharf de la mine de Dielette - les récifs artificiels*. Rapport interne, 28pp. Dielette, **1 site** (quai offshore) face à la centrale électrique de Flamanville ; **béton armé/roche** ; observations opportunistes lors de plongées amateurs ; entre **-15 m** (prof. min.) et **-22 m** (prof. max.) ; estimations visuelles ; variable réponse mesurée : **S** ; aperçu qualitatif des espèces sessiles dominants les peuplements de substrats durs artificiels du Cotentin ; espèces dominantes : *Dylsea carnosa* (Rhodophyte), *Actinothoe sphyrodeta*, *Balanus crenatus*, *B. perforatus* ; $S_{\text{totale}} = 165$; $S_{\text{algues}} = 12$; $S_{\text{éponges}} = 16$; $S_{\text{cnidaires}} = 12$; $S_{\text{vers}} = 10$; $S_{\text{bryos}} = 11$; $S_{\text{ascidies}} = 8$; + autres groupes cf. rapport.

[76] Claquin P. et al., 2015. *Suivis environnementaux : colonisation des matériaux en mésocosmes et in situ*. Rapport interne, projet RECIF, 78pp. Saint-Malo, Le Buron ; **18 parpaings** [2 types de béton : coquillier, non-coquillier] disposés à **1 site** à **5 m** de prof. ; variables explicatives mesurées : matériau, niveau bathy ; variables réponses mesurées : **S**, **% de recouvrement**, **taille** des organismes, **A**, **biomasse** ; suivi (**fréq. = 2 mo.**) du développement de la faune et de la flore sur 2 types de béton en **6 mo.** ; juillet 2015 à janvier 2016 ; recouvrement = 60% au bout de 2 mois d'immersion et total au bout de 6 mois ; S_{totale} à 6 mo. = 34 à 37 ; Dominance de *Botryllus schlosseri* à 2 mo., de *Dictyopteris polypodioides* à 4 mo., dominance d'**algues rouges** à 6 mo. ; colonisation rapide du nouveau substrat en zone subtidale et par tous les taxons présents en milieu benthique (hydrides, bryozoaires, ascidies, éponges, annélides, chlorophycées, rhodophycées, phéophycées) ; pas de différence de colonisation entre béton classique ou coquillier [remplacement du sable par débris de coquilles ok].

[77] Migné A. & Davoult D., 1995. *Multi-scale heterogeneity in a macrobenthic epifauna community*. Hydrobiologia 300/301 : 375-381. Pas-de-Calais, 1 site étudié (**cailloutis**) à **37 m** de prof. ; mesure de la structure et du fonctionnement des communautés (épifaune sessile) se développant sur des cailloutis soumis à un fort hydrodynamisme ; variables explicatives mesurées : T°C, sal., fluorescence ; variables réponses mesurées : **S**, biomasse (**poids sec** sans cendres) ; prélève-

ments **mensuels** ; durée de l'étude = **9 mo.** de juin 1992 à avril 1993 ; PSSC total : juil = 425 g/m² et fév = 155 g/m² ; PSSC moyen : 270±107 g/m² ; $S_{\text{totale}} = 98$; $S_{\text{moy}} = 51\pm7$; espèces dominantes (en termes de biomasse) : *Ophiothrix fragilis* = 62±12 % de la biomasse ; *Urticina felina* = 32±11 % ; *Alcyonium digitatum* = 5±3 %.

[78] Migné A., 1996. *Rôle des organismes suspensivores dans les transferts pelago-benthiques d'une zone de fort hydrodynamisme*. Thèse de doctorat, Station Marine de Wimereux, 263pp. Pas-de-Calais, 1 site étudié (**cailloutis**) à **37 m** de prof. ; site dont l'**hydrodynamisme est intense** ; objectif : renforcer les connaissances précédemment acquises sur les flux de matières dans un écosystème soumis à un très fort hydrodynamisme ; sites à cailloutis (**roche naturelle**) étudiés **mensuellement** en **1992-1993** (**12 mois** d'étude de juin 1992 à juin 1993) ; variables explicatives mesurées : T°C, sal., fluorescence ; variables réponses mesurées : **Biomasse** (poids sec sans cendres), détermination des **gpes trophiques**, **S**, **H'**, **J'**, PSSC total : juil = 425g/m² et fév = 155g/m² ; PSSC moyen : 270±107g/m² ; $S_{\text{totale}} = 101$; $S_{\text{moy}} = 51\pm5$; $H' = 1,24 \pm 0,17$; $J' (E) = 0,28 \pm 0,04$; densité relative en termes de biomasse : *Ophiothrix fragilis* (espèce vagile) = 62±12 % de la biomasse ; *Urticina felina* = 32±11 % ; *Alcyonium digitatum* = 5±3 % ; espèces sessiles dominantes = *Urticina felina* & *Alcyonium digitatum* ; **max de biomasse en juillet et biomasse min. en février** (variabilité temporelle modérée) ; jeunes colonies d'*Alcyonium digitatum* observées dans les échantillons à partir de février ; peuplement diversifié montrant une biomasse très importante avec pourtant seulement 3 espèces ayant une importance quantitative.

[79] Prygiel J. et al., 1988. *Description et richesse des peuplements benthiques de la partie française de la Mer du Nord*. CR de l'Académie des Sciences, t. 306, Série III, 5-10. Etude des **fonds marins (roches et sédiments)** de la zone du Pas de Calais entre **1973 et 1976**, puis entre **1985 et 1986** ; env. **6 ans** de suivi ; entre **15 et 30 m** de prof. ; hydrodynamisme intense ; objectif : cartographier les peuplements benthiques de la zone ; variables réponses mesurées : **prés/abs**, **dominance**, **A** ; espèces dominantes : espèces vagiles (cf ar-

title car moins d'intérêt pour ABIOP) ; espèces sessiles bien représentées : *Haliclona oculata*, *Raspailia ramosa*, *Tethya aurantium*, *Abietinaria abietina*, *Alcyonium digitatum*, *Halecium halecinum*, *Hydrallmania falcata*, *Sertularia cupressina*, *Urticina felina*, *Alcyonidium gelatinosum*, *Flustra foliacea* ; gradient hydrodynamique révélé dans les peuplements de Dunkerque au Cap Gris-Nez (sédiments fins → cailloutis).

[83] Antoine E., 1978. *Etude du Fouling sur la station d'essais en milieu marin de Sainte-Anne du Portzic* (Déc 1977-Déc 1978). Rapport interne, CNEXO. **Rade de Brest, Sainte-Anne du Portzic** ; étude de la colonisation d'ardoises au cours de l'année 1978 ; suite du suivi réalisé (réf. 14) ; début = juin 77 (à T+ 8 mo.) à juin 1978 ; acquisition de **données mensuelles** ; **objectif** : réaliser un étalonnage de la station d'essais en milieu marin de Sainte-Anne du Portzic ; **variables réponses mesurées** : A_{absolue} , A_{relative} , **% de recouvrement** spécifique, **taille** moy spécifique, **poids frais total** (densité) ; suivi temporel du recouvrement : à T+8 mo. = 96 %, à T+10,5 mo. = 106,6 %, à T+11 mo. = 42,45 %, à T+12 mo. = 77,5 %, à T+13 mo. = 100,06 %, à T+14 mo. = 97,47 %, à T+15 mo. = 82,2 %, à T+16 mo. = 39,8 % ; recouvrement par les org. dominants : *P. triqueter* = 13,6 % ; *Balanus crenatus* = 25-50 % ; bryos encroûtants = 13-40 % ; bryos dressés = 12,5-50 % ; *Ascidia mentula* = 17-47 % ; **suivi temporel poids frais** moy(kg/m²) : à T+8 mo. = 3, à T+10,5 mo. = 6,7, à T+11 mo. = 3, à T+12 mo. = 6, à T+13 mo. = 9,6, à T+14 mo. = 6,8, à T+15 mo. = 4,5, à T+16 mo. = 4,3 ; abondance spécifique : *A. mentula* = 130-150/m² ; *Pomatoceros triqueter* = env. 6 000/m² ; *Balanus crenatus* = env. 5 000/m² ; espèces dominantes : Balanes (*Eliminia modestus*, *B. perforatus*, *B. improvisus*), *Botryllus schlosseri*, Serpules (*P. triqueter*), Hydraires gazonnants, *Ciona intestinalis*, **chilostomes encroûtants**, *Anomia ephippium* ; mesure des dimensions spécifiques à chaque date : cf. rapport ; classement des espèces du biofouling en 2 gpes : **espèces annuelles** = se développent une saison et disparaissent en hiver (ex. ascidies coloniales, ascidies simples, bryo) ; **espèces permanentes** = certains individus survivent d'une année à l'autre (ex. balanes, serpules) ; **principale période de fixation** : juin à août.

[31] Chassé C. et al., 1976. *Etude écologique d'avant-projet sur le site de Ploumoguer*. Rapport interne, CNEXO, 127pp. Région de **Ploumoguer** (Finistère) : 1 site devant la pointe de **Brentec'h**, 1 à **Pors Ilie** et 2 sites sur le flanc Nord-est de la **pointe de l'Ilette** ; 1976 ; suivi des communautés de **substrats rocheux naturels** entre **0 et 14 m de prof.** ; échantillonnage en **été** (juillet et septembre) ; **2 acquisitions ponctuelles** aux 4 sites ; **objectif** : caractériser qualitativement et quantitativement les communautés intertidales et subtidales dans la zone pressentie pour l'installation de la centrale (focus sur le rocheux pour cet atlas, mais le meuble a été étudié aussi) ; **variables explicatives mesurées** : $T^{\circ}\text{C}_{\text{air}}$, **vents**, hauteur de **houle**, **courants** de marée ; **variables réponses mesurées** : inventaires **espèces**, **biomasse** (poids frais algues seulement), **structure démographique**, **production** (pour *L. hyperborea* et *S. polyschides*) ; recouvrement mesuré dans le domaine intertidal seulement ; biomasse ALGUES : strate crustacée (prof. <-20 m) = 0,2 kg/m², strate herbacée/muscicante (prof. entre +3 et -18 m) = max. 2 kg/m² (très variable), strate frutescente (20 cm < h < 2,50m) (prof. -14 à 0 m) = 5 kg/m² (max = 12 à 13 kg/m²) ; invertébrés entre 0 et 5 m : *Balanus perforatus*, *Didemnum maculosum*, *Desmacidon fruticosum* ; invertébrés entre 5 et 13,5 m : **polyclinidés en massue**, *Botryllus schlosseri*, **crisidés** ; algues entre 0 et 5 m : *Laminaria hyperborea*, *Saccorhiza polyschides*, *Corallina officinalis* ; algues entre 5 et 13,5 m : *Halidrys siliquosa*, *Lithophyllum sp.* ; très forte biomasse algale dans la région ; sur site, présence de roche limitée (+ de sédiments) ; **2 max de biomasse** : l'un à -2 m (15 kg/m²) avec la dominance de *S. polyschides* et l'autre à -10 m (7 kg/m²) avec la dominance d'*Halidrys siliquosa* ; estimation de la biomasse globale sur substrat rocheux : précision sans doute insuffisante, mais permet d'avoir une idée de la production.

4.2 Biofouling dans le Golfe de Gascogne

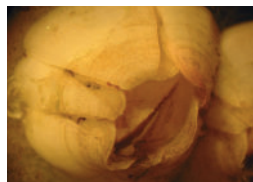


Caractéristiques de la zone :

Grande baie ouverte sur l'Atlantique Nord-Est ; plateau continental très large au nord (140 km), rétréci au sud (50 km) ; talus continental à 200 m de profondeur (prof max. 4 735 m) ; courant résiduel moyen dirigé vers le nord ; zones d'up-wellings (principalement au sud des côtes bretonnes et face à la côte basque) et de stratification ; influence de la Loire et de la Gironde ; fronts tidiaux ; prédominance de fonds rocheux au nord et de sédiments plus ou moins fins au sud ; T° hivernales autour de 11°C (masse d'eau brassée) ; T° estivales peuvent atteindre 21°C ; principales activités humaines : activité de pêche (chaluts de fond ciblant la langoustine, les soles) dont l'emprise spatiale est importante, défense (présence du port militaire de Brest, de la base de Lorient), et autres activités portuaires (grands ports maritimes de Nantes Saint-Nazaire, La Rochelle et Bordeaux).

Principales espèces du fouling dans le Golfe de Gascogne :

Balanus spp., *Botryllus schlosseri*, hydraires arbustifs, *Schizomavella sanguinea*, *Sacchoriza polyschides*, *Metridium senile*, *Corynactis viridis*, *Laminaria hyperborea*, *Mytilus edulis*, *Alcyonium digitatum*, *Tubulipora* sp., *Demosponges* (ex. d'*Axinella disimilis*), *Pomatoceros* sp., Cténosponges.



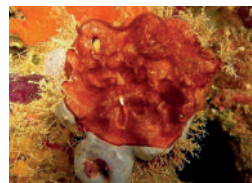
Balanus spp.



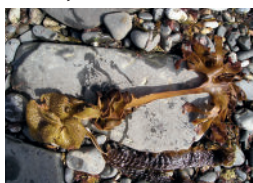
Botryllus schlosseri



Hydroides arbustifs



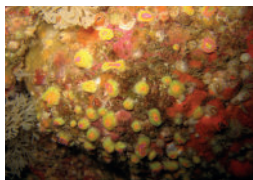
Schizomavella sanguinea



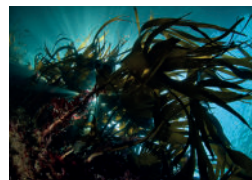
Sacchoriza polyschides



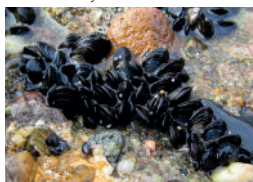
Metridium senile



Corynactis viridis



Laminaria hyperborea



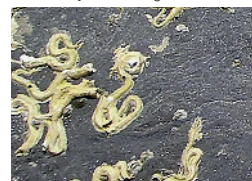
Mytilus edulis



Alcyonium digitatum

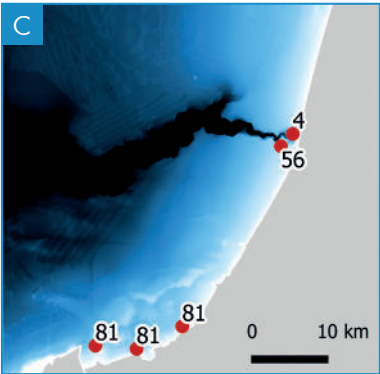
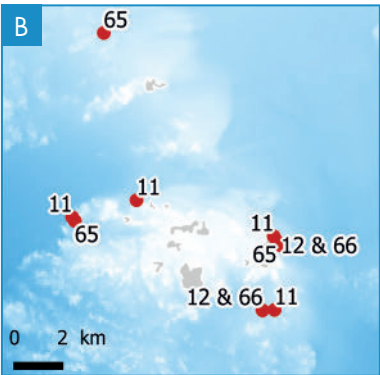
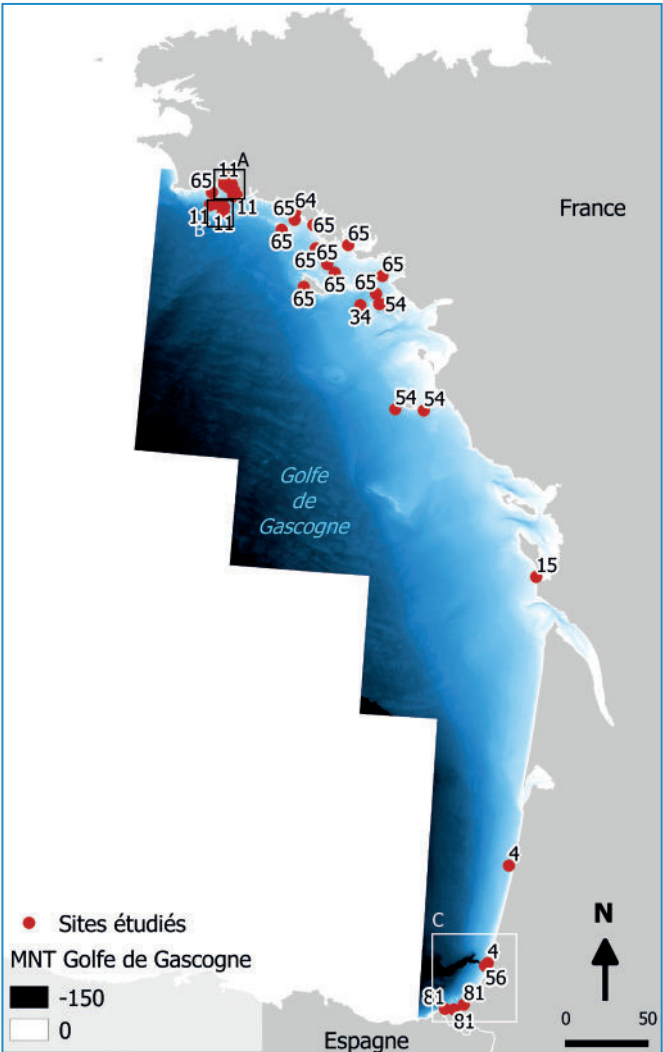


Axinella disimilis

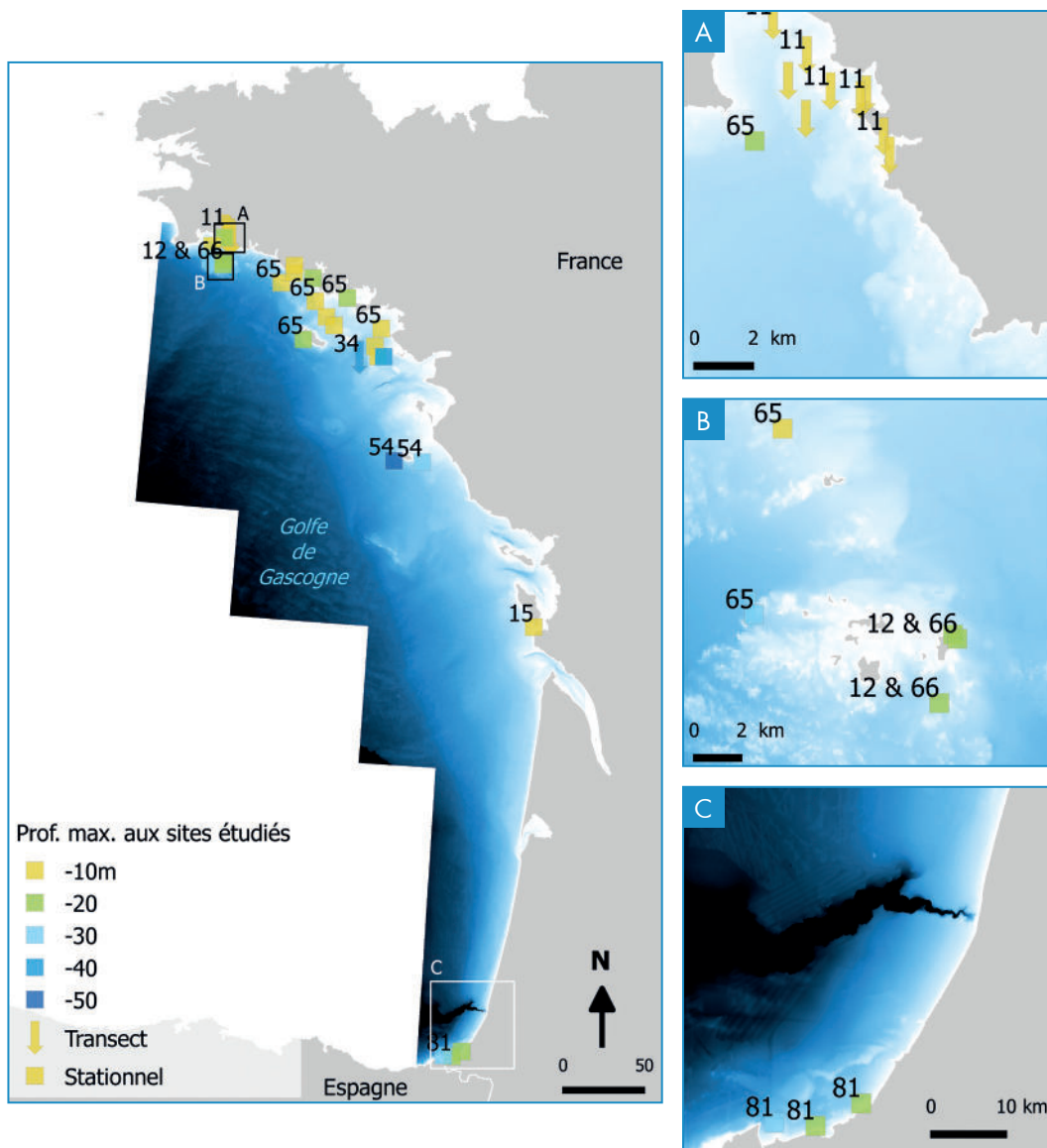


Pomatoceros sp.

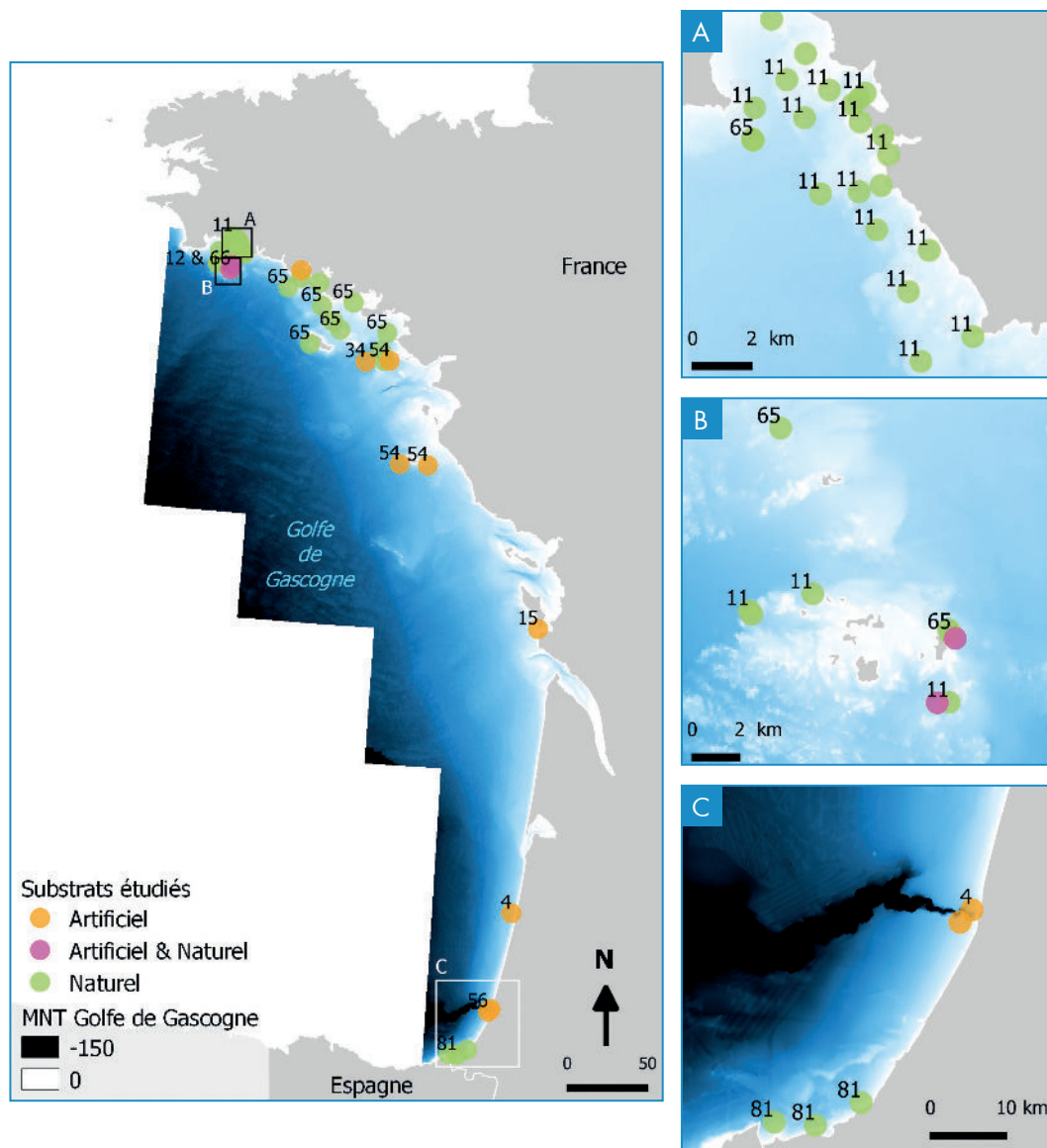
Localisation des sites étudiés dans le Golfe de Gascogne



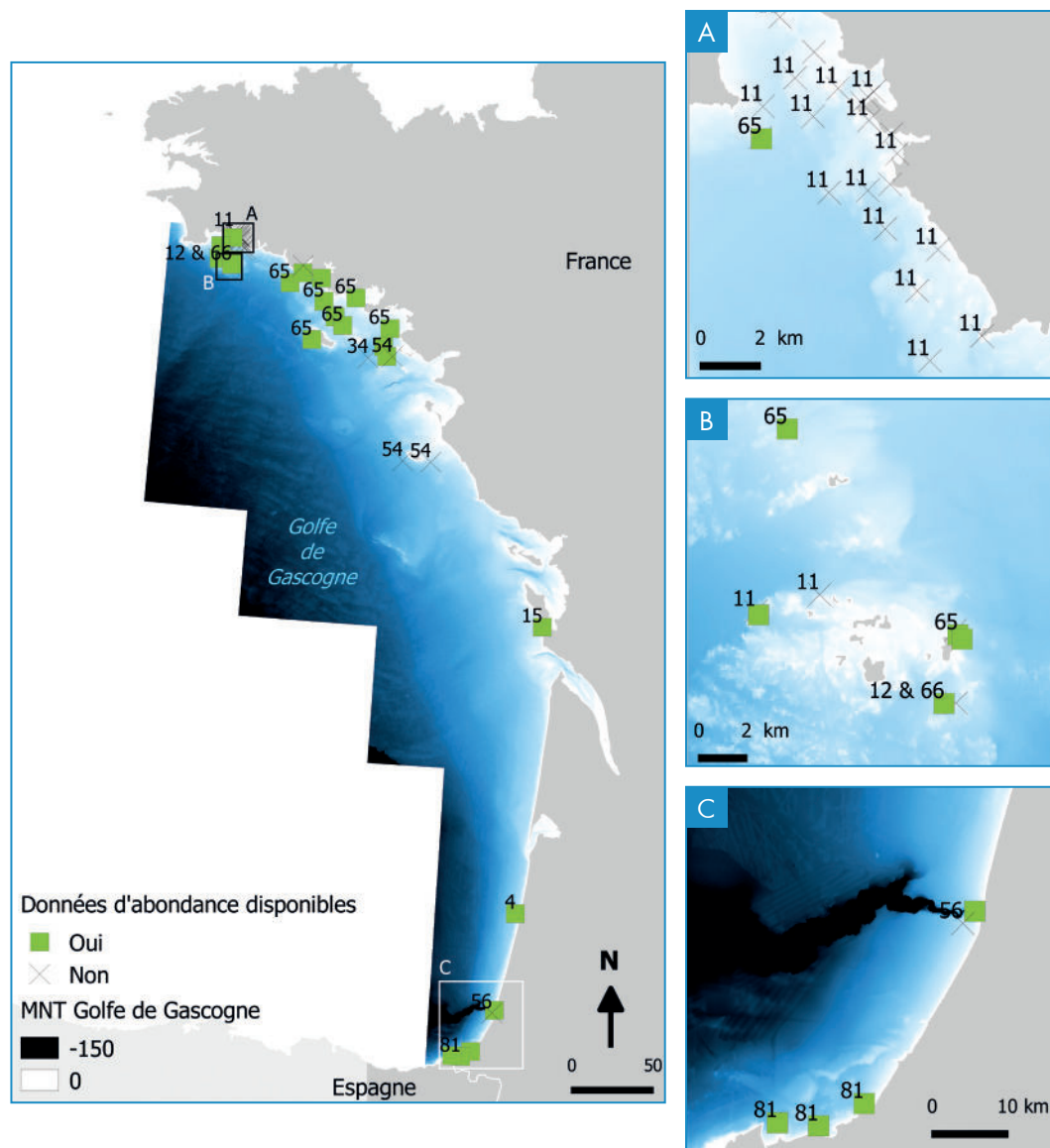
Type d'échantillonnage et profondeur maximale des sites du Golfe de Gascogne



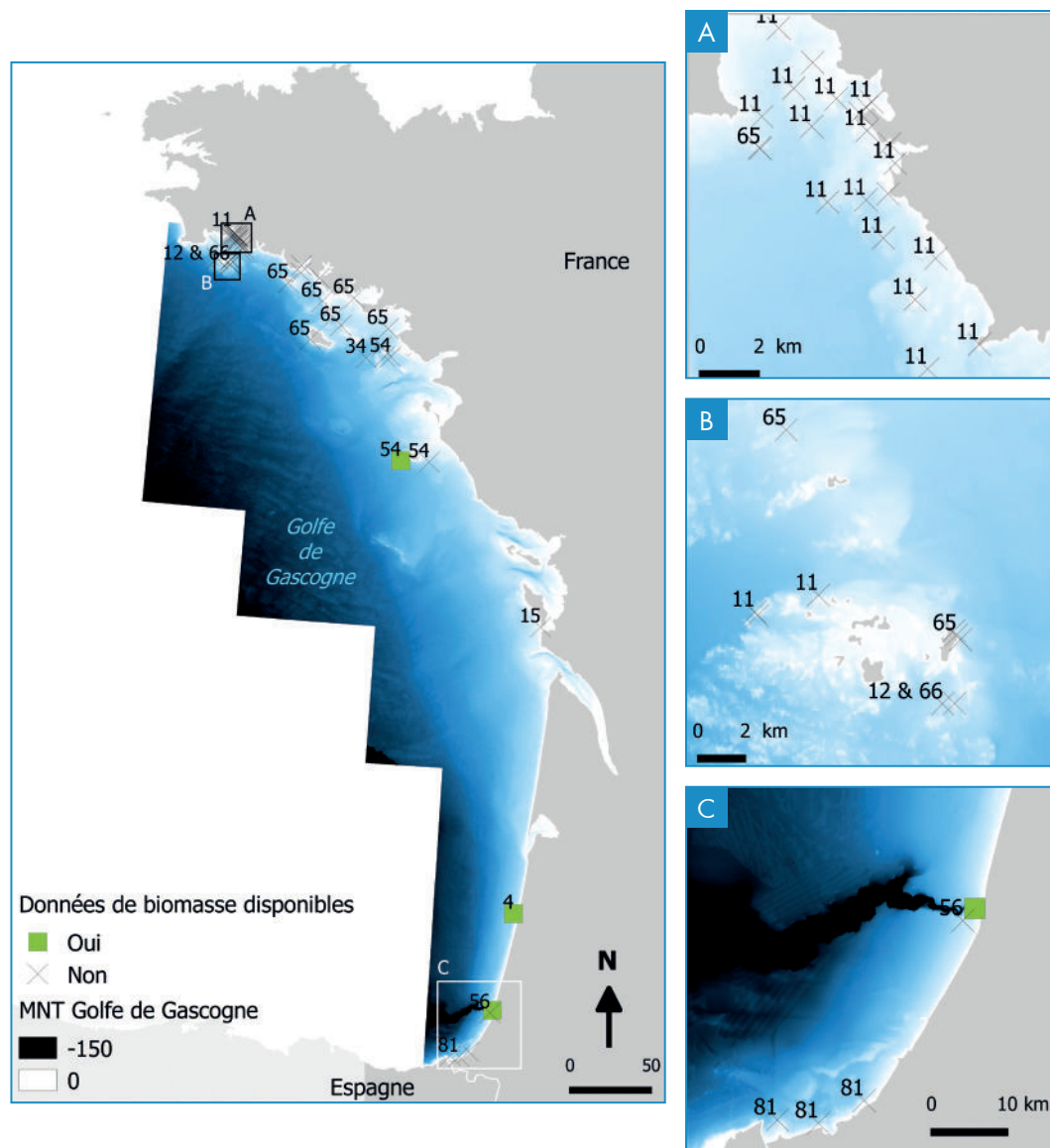
Type de substrat étudié aux différents sites du Golfe de Gascogne



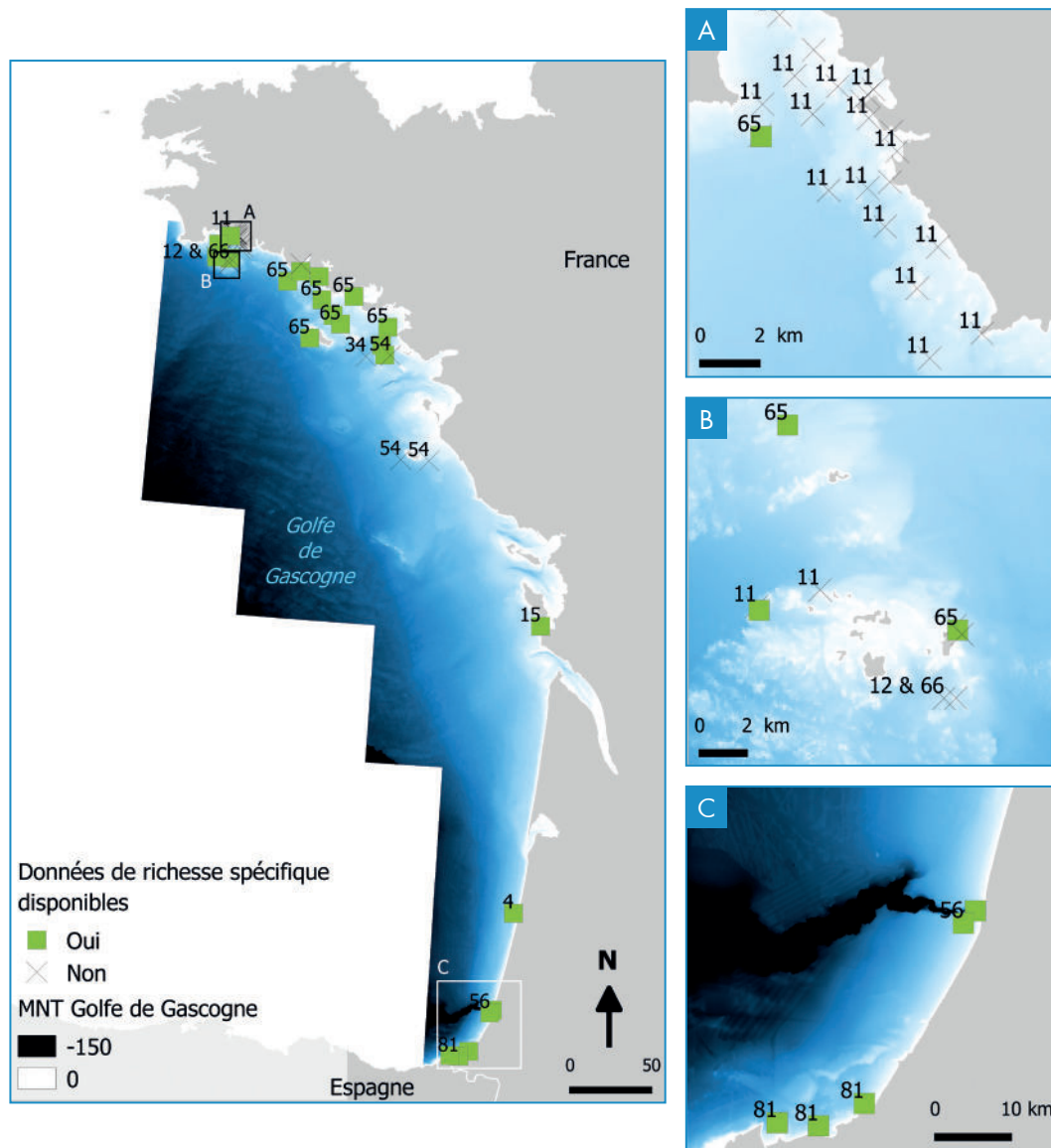
Disponibilité des données d'abondance dans le Golfe de Gascogne



Disponibilité des données de biomasse dans le Golfe de Gascogne



Disponibilité des données de richesse spécifique dans le Golfe de Gascogne



Références-clés annotées

[4] Castège I. *et al.*, 2016. *First results of fauna community structure and dynamics on two artificial reefs in the South of the Bay of Biscay*. ECSS, vol. 179, 172-180. *Mise en garde : populations de poissons mesurées* (peut-être intéressant pour estimer l'effet récif et la pression de prédation) **Mimizan** (et plus précisément Porto, site en mer) et Capbreton (Sud Ouest) ; de 2010 à 2013 (Récif Artificiel de **Capbreton**) ; **4 ans** d'étude en été (juillet, août ou septembre), **suivi annuel** (1/an) ; **5 types de RA** : **barge** (= **métal**) (18 x 3,5 m) mise

en place en 1994, modules **béton** mis en place en 2003 et grappes isolées de modules béton (100 t) en 2003 et 2004 ; à Capbreton tuyaux béton et Typi ; à **12-25 m de prof.** (Porto) et **18 m** (Capbreton) ; **variables explicatives mesurées** : type de récif artificiel ; **variables réponses mesurées** : **A**, biomasse (**poids frais** estimé) **S**, **longueur moyenne** ; $B_{\text{fraîche}} = 1\ 000 \text{ à } 6\ 000 \text{ g/m}^3$; Porto = 22 espèces (dont 11 benthiques) et Capbreton = 36 espèces ; espèces dominantes : maquereau, chinchard & tcaud commun (puis sardine, blen-

nie, congre, étrille, rouget barbet, tourteau, ombrine, pieuvre) ; pas de différences marquées en termes de communautés ichtyofauniques RA Porto (barge et modules mis en place depuis longtemps), variation interannuelle RA Capbreton pour Typi car installation récente.

[11] Castric-Fey A., 1988. *Les facteurs limitants des peuplements sessiles sublittoraux en Baie de Concarneau (Sud-Finistère)*. Vie Milieu, 1-18. Baie de Concarneau ; **Zones rocheuses** aisément repérables ; prof de **0 à 25 m** ; étude des communautés de substrats rocheux en **milieux moyennement exposés à abrités** ; variables explicatives mesurées : turbidité, exposition aux courants (variables qualitatives) ; variables réponses mesurées : **prés., cotes d'A** (à partir d'une liste de 80 esp. animales et 10 esp. végétales), recouvrement ; aux stations du large en eau claire et mode exposé seulement : les **démospouges couvrent 60-70 %** et les **calcispouges couvrent 13 - 35 %** ; espèces dominantes : mode ABRITE, 0-10 m = bugules, cténostomes, ascidies, démosponges, 15 m = mélobésiées (peuplement très appauvri), > 15 m = dominance de *Corynactis* // **mode BATTU, 0-10 m = calcispouges, crisidés, démosponges, > 15 m = Corynactis** ; deux grands groupes d'espèces se succèdent le long du double gradient agitation-pélites : les filtreurs (ou suspensivores actifs) dominant en mode abrité, tandis que les carnivores (ou suspensivores passifs) dominant en mode battu.

[12] Castric-Fey A., 1974. *Les peuplements sessiles du benthos rocheux de l'archipel de Glénan (Sud Bretagne) - Ecologie descriptive et expérimentale*. Thèse de doctorat, 333pp. **Archipel de Glénan ; 1968 - 1972**, plaque la plus ancienne = 26 mois ; toutes saisons ; prélèvements **mensuels** (pour subs. artif) ; **substrat naturel et plaques d'ardoise** (schiste) ; prof **entre 0 et 60 m** ; objectifs : décrire les peuplements de subs durs (notion d'étagement) ainsi que les processus d'installation et de développement des peuplements sur substrat vierge (notion de climax) ; variables explicatives mesurées : exposition, inclinaison, moment de l'immersion, durée d'immersion ; variables réponses mesurées : **Prés./ Abs., composition spécifique, A spécifique, taille spécifique** ; espèces dominantes = jeunes bala-

nes, *Anomia* sp., *Pomatoceros* sp., *Verruca stroemia*, *Tubulipora* sp. ; **fixat° printemps** = balanes & pomatoceros, **fixati° été** = anomia et cyclostomes encroûtants, **fixati° automne** = hydraires ; successions : série d'automne débute par *Tubulipora-Lichenopora-Chorizopora*, celle de printemps par *Anomia-Alcyonidium*, celle d'été par *Pomatoceros-Hydroides* et celle d'hiver par *Balanus crenatus* et *Pomatoceros lamarcki* ; recrutement **très différent d'un mois à l'autre** (autant qualitativement que quantitativement) ; **max. de fixation = juil-oct ; mini de fixation = déc-fév** ; espèces à fixation bien localisée dans le tps vs espèces à fixation étalée ; **débuts de successions différentes mais similarité des plaques au bout de 16 mois**.

[54] Labadie F. et Dubreuil J., 2010. *Inspection des récifs artificiels des sites expérimentaux de l'Île d'Yeu et du Croisic*. Rapport interne, 47pp. **Croisic et Île d'Yeu** ; 2009/2010 ; récifs artificiels en place depuis 6 ans au moment de l'étude, sorties ponctuelles aux deux sites ; du 6 au 10/09/2009 et 24-25 juin 2010 ; Différents types de RA en **béton** ; Croisic = **30 m** de prof. et Île d'Yeu = **20 et 47 m** ; évaluation des états physique et écologique des RA à partir de l'inventaire de la colonisation et de la comparaison des communautés avec les années de suivi antérieures ; variables explicatives mesurées : type de récif artificiel, profondeur ; variables réponses mesurées : **composition spécifique, A**, classe d'abondances (qualitatif), **biomasse** (poids frais et sec) ; recouvrement quasi total pour les RA du Croisic (*pas d'infos claires pour ceux d'Yeu*) ; biomasse à Yeu à 47m environ égale à 25 g/m² ; $S_{Yeu} = 8 \text{ à } 14$ (*mais détermination parfois seulement à la famille*) ; espèces dominantes = Y_{47m} : *Metridium senile* (+), *Corynactis viridis* (+), *Botryllus schlosseri*, *Actinothoe sphyrodeta* ; Y_{20m} : *Alcyonium digitatum* (+), *Ophiotrix fragilis* (esp. vagile), *Schizomavella sanguinea*, *Botryllus schlosseri*, *hydraires*, *Actinothoe sphyrodeta*, *Metridium senile*, *Corynactis viridis* ; C_{30m} : *Alcyonium digitatum*, *Metridium senile*, *Corynactis viridis*, *Antedon bifida* (+/- libre), *hydraires arbus-tifs*, *Ophiotrix fragilis* ; RA à 20 m ≠ de celui situé à 47 m en termes de composition spécifique : prédominance d'esp. de grande taille, recouvrement + important (explications possibles : dispo en larves & nutriments + importante et hydrody-

namisme $\approx$ à -20 m) ; pas d'algues observées à 20 m (eaux turbides).

[64] Consortium Biopaintrop [MAPIEM/UBS/ Hydrô Réunion], 2017. *Formulations intégrant les extraits actifs tropicaux et tests in situ*. Rapport confidentiel, 30pp. **Lorient** (ainsi que Toulon et La Réunion, cf. sections Méditerranée et DOM-TOM de l'atlas) ; **2016-2017** ; suivi de **9 mois** (de juin 2016 à mars 2017) ; échantillonnage **mensuel** ; plaques de **PVC** (10 x 20 cm) ; **objectif** : observer le développement du biofouling à 3 sites contrastés et sur différents revêtements (y compris un support non revêtu) ; **variables explicatives mesurées** : latitude, type de revêtement ; **variables réponses mesurées** : **N** (facteur d'efficacité d'un revêtement) ; **% de recouvrement** par gpe fonctionnel ; recouvrement par *Ulva* de 90 à 15 %, ascidies de 10 à 55 %, algues rouges env. 10 %, recouvrement important par boues en fin de suivi ; recouvrement de 90 % de la plaque au bout d'un mois ; **org. non encroûtants principal** = *Ulva* domine en termes de recouvrement jusqu'en hiver, où ces algues sont remplacées par des ascidies.

[66] Castric-Fey A. et al., 1973. *Etagement des algues et des invertébrés sessiles dans l'archipel de Glénan - définition biologique des horizons bathymétriques*. Helgoland Marine Research, 490-509. **Archipel de Glénan ; 1968-1970** ; échantillonnage ponctuel (en été) ; **substrat naturel** (roche) ; prof. **0 - 60 m** ; **objectif** : étudier de la distribution verticale des espèces les + représentatives et les principaux facteurs de répartition ; vue d'ensemble des peuplements dans les soixante premiers mètres de prof. ; **variable explicative mesurée** : profondeur ; **variables réponses mesurées** : **pres/abs, densité de pieds de laminaires** ; il arrive qu'1 seule esp. recouvre la roche à 100 % dans le quadrat considéré (ex. *Trididemnum cereum*) ; densité max (surface horiz et verti, respectivement) : **L. digitata = 30 et 25 ind/m², L. hyperborea = 31 et 19, S. polyschides = 15 et 4** ; 4 horizons : celui à *L. digitata*, à *L. hyperborea* (jusqu'à env. 26 m), à Axinellidae/brachiopodes et à *Dendrophyllia cornigera*/*Swifflia rosea* (55-60 m) ; esp. végétales des Glénan identiques à celles de la Manche, mais pénétration des laminaires en prof + importante qu'en Manche ; l'inclinaison du substrat modifie la répartition bathy des peuplements ;

4 peuplements identifiés : les 2 premiers en zone infra sont caractérisés par les algues, les laminaires, les deux derniers en circa sont caractérisés pas des espèces animales de forme arbusculaire.

[80] de Casamajor M.-N. et Lalanne Y., 2016. *Intérêt biogéographique de la côte basque rocheuse*. Bulletin société zoologique française, 3-13. **Littoral basque** (de Biarritz à Hendaye) ; **substrat naturel** (roche) ; définir quelques espèces dont le suivi permettrait d'évaluer les effets de changements d'origine anthropique sur les écosystèmes de cette zone à travers une analyse bibliographique ; mise en garde, espèces d'intérêt mais pas forcément dominantes : *Gelidium corneum*, *Leptogorgia sarmentosa*, *Paralcyonium spinulosum*, *Polycyathus muelleriae*, sont aussi citées quelques espèces de nudibranches et de poissons (espèces vagiles) ; cf. papier pour plus de détails) ; il n'y a plus de *Laminaria ochroleuca* sur la côte basque depuis 2008 ! ; spécificité méridionale des côtes rocheuses basques.

[81] de Casamajor M.-N. et al., 2014. *Suivi DCE du paramètre "macroalgues subtidales"*. Rapport interne, 37pp. **Pays Basque** (3 sites d'études : Alcyon, Abbadia et Socoa) ; **2013** ; relevés ponctuels entre juin et juillet ; **substrat naturel** (roche) ; prof. de 3, 8 et 13m ; prof. max : **Alcyon = 14,8 m ; Socoa = 19 m ; Abbadia = 25 m** ; **objectif** : suivre les populations de macroalgues à différents sites pour déterminer l'état de santé des écosystèmes marins basques ; **variables réponses mesurées** : **densité** pieds/m², **limite d'extension en prof.**, **S** ; richesse spécifique (à deux niveaux bathy.) : Alcyon = 33 et NA, Socoa = 38 et 19, Abbadia = 35 et 21 ; *Cystoseira* sp. = 20,8 ind/m² (Alcyon), 30,8 (Socoa), 18 (Abbadia).

[65] Derrien Courtel S. et al., 2013. *Regional-scale analysis of subtidal rocky shore community*. Helgoland Marine Research, Vol. 67 : 697-712. **38 sites** subtidaux **le long des côtes bretonnes** ; transects de **0 à 31 m**. de prof. max. (prof. variable selon la station) ; gradient d'exposition ; **variables explicatives mesurées** : turbidité, T°_{eau}, prof. de la limite entre infra et circa (dernier pied de laminaire), **variables réponses mesurées** : **A faune/flore** (nb ind et nb de colonies pour chaque espèce), **densité des laminaires** ; distinction de trois as-

semblages types en fonction de la turbidité et de la stratification des eaux : sites turbides (*Solieria chordalis*, *Ulva* sp., *Gracilaria multipartita*, *Chondracanthus acicularis*, *Chondria dasyphylla*, *Aiptasi mutabilis*, *Bougainvillia muscus*, *Nemertesia antennina*, *Hydrallmania falcata*, *Aplidium elegans*, *Morchellium argus*, *Tethya aurantium*, *Polymastia penicillus*, *Sabella spallanzanii*, *Ophiothrix fragilis*), sites eaux-claires stratifiées (forêts à *Sacchoriza polyschides* avec *Pterosiphonia complanata*, *Hypoglossum hypoglossoides*, *Lomentaria clavellosa*, *Marthasterias glacialis* et *Asterias rubens*) et sites eaux claires homogènes (forêt à *Laminaria hyperborea* avec *Dessalaria sanguinea*, *Phyllopora crispa*, *Plocamium cartilagineum*, *Meredithia microphylla*, *Balanus* spp., *Dysidea fragilis*) ; limite infra-circa comprise entre -1,6 m (eau turbide) à -32,2 m (eau claire) ; densité de laminaires + importante en eau claire que turbide (32,5 contre 14,8 ind/m²) ; principaux facteurs influençant la faune et la flore des milieux rocheux = température et turbidité (Informations valables pour cette zone géographique ainsi que celle de la Manche).

[56] Laborde A., 2010. *Suivi scientifique des récifs artificiels Capbreton, Soustons/Vieux-Boucau, Messanges/Azur/Moliets*. Rapport interne, 62pp. Capbreton ; 2010 ; étude sur 3 mois (été) ; fréquence d'acquisition des données variable (hebdomadaire à mensuelle, 15 plongées au total) ; récifs artificiels en béton (certains venant d'être installés, d'autres ayant 11 ans) ; objectif : poursuivre le suivi des structures immergées en 1999 et initier celui des Typi mis en place en juin 2010 ; variables réponses mesurées : A_{rel}, classes d'abondance, composition spécifique ; 68 espèces (invertébrés et vertébrés confondus) ; 36 espèces d'invertébrés dont 17 fixées et 11 espèces de cnidaires (bryos et spongiaires sans doute sous évalués) ; 29 espèces de poissons ; présence d'individus jeunes/de petite taille et de pontes = indicatrice du rôle de protection et de production du récif ; structure et complexité du récif = paramètres déterminants pour les peuplements.

[34] Reynaud M., 2016. *Analyse sur le biofouling présent sur SEM-REV*. Rapport interne, 33pp. SEM-REV ; 2013 et 2015 ; Relevés ponctuels en automne-hiver ; fréquence d'acquisition va-

riable ; suivi des lignes d'ancrage en Deltex® (fibre synthétique) ; prof. de 35 m (max) ; objectif : mesurer les caractéristiques du fouling (biomasse, épaisseur) et de ses effets (coeff de traînée) en fonction de la profondeur, de la portion de câble, du temps ; variables explicatives mesurées : profondeur, temps ; variables réponses mesurées : composition en termes de grands groupes d'organismes, épaisseur ; espèces dominantes : algues filamenteuses (0 à -20 m), hydrozoaires (-20 à -35 m), *Mytilus edulis* (0 à -29 m) ; hauteur max proxy de l'épaisseur max.) : algues filamenteuses, h < 10 cm, hydrozoaires, h = 6 cm, moules (à 2 ans) = 10 cm ; moule = espèce la + impactante à ce site pour le dimensionnement des câbles ; épaisseur de biocolonisation indépendante de la profondeur ; extrapolation poids du biofouling à 2 ans : 25,7 kg/m de câble (poids sec ?).

[15] Brown C.J. et al., 2003. *Assessment of effects of chromated copper arsenate (CCA)-treated timber on nontarget epibiota by investigation of fouling community development at seven european sites*. Archives of environmental contamination and toxicology, 37-47. Île d'Oléron ; 1996 – 1997 ; suivi sur 18 mois ; prélèvement tous les 6 mois ; plaques de bois (*Pinus sylvestris*) traité ou non au CCA (pour la synthèse, focus sur plaques non traitées) ; prof. 0 et 5-10 m ; objectif : comparer les communautés sur des plaques traitées et non-traitées pour évaluer les effets du CCA sur les organismes épifauniques ; variables réponses mesurées : localisations géo et bathy (inter vs sub), sal., T°C ; variables réponses mesurées : A, surface occupée par les colonies ; richesse spécifique totale = 14 ; A moy./m² : hydriaires = 5 550, *E. modestus*/B. *crenatus* = 900, *Electra pilosa* = 50 ; différences significatives entre les plaques traitées et non-traitées ; au site français, des conditions météo défavorables ont perturbé l'expérimentation.

[93] Augris C. et al., 2009. *Atlas thématique de l'environnement marin du Pays Basque et du sud des Landes*. Ed. Quae, 128pp. Saint-Jean de Luz (2002-2003) et Hendaye (2007) ; objectif : réaliser un atlas des connaissances disponibles sur l'environnement marin de la côte basque.

4.3 Biofouling en Méditerranée



Caractéristiques de la zone :

L'une des plus grandes mers semi-fermées ; l'atlas se concentre sur le bassin occidental ; profondeur max. du bassin occidental : 1500 m ; mer oligotrophe ; mélange de la masse d'eau par processus de convection de fond, principal mécanisme permettant le renouvellement des nutriments (induisant des blooms au printemps) ; influence de deux vents froids et sec (Mistral et Tramontane) sur la température de l'eau et la salinité (évaporation) qui peut atteindre 37 ppm ; prédominance de fonds sédimentaires (sédiments fins) ; T° hivernales autour de 11°C (la zone la plus froide est le Golfe du Lion) ; T° estivales pouvant dépasser 25°C ; forte pression anthropique liée à l'urbanisation intense des côtes, zones côtières touchées par l'eutrophisation (influence du Rhône notamment).

Principales espèces du fouling en Méditerranée occidentale :

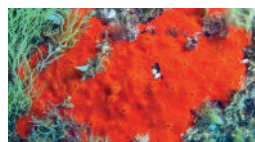
Ciona intestinalis, *Phallusia mammillata*, *Botryllus* sp., *Plocamium cartilagineum*, *Aphanocladia stichidiosa*, *Balanus perforatus*, *Pyura dura*, *Lithophyllum encrustans*, *Crambe crambe*, *Hemimycale culomella*, *Alcyonium acaule*, *Dysidea avara*, *Agelas oroides*, *Ircinia oros*, *Axinella damicornis*, *Schizomavella* sp., *Sycon* sp., *Bugainvillia ramosa*, *Hydroides norvegica*, *Pomatoceros triqueter*, *Spirobranchus polytrema*, *Serpula vermicularis*, *Eunice harasii*, *Spirographis spallanzani*, *Polycirrus aurantiacus*, *Balanus amphitrite* (puis *B. perforatus*), *Anomia ephippium*, *Musculus subpictus*, *Hiatela rugosa*, *Mytilus galloprovincialis*, *Ostrea edulis*, *Spirographis mammillata*, *Microcosmus sabatieri*, *Codium fragile*, *Bryopsis plumosa*, *Dasya hutchinsiae*, *Scrupocellaria reptans*.



Ciona intestinalis



Phallusia mammillata



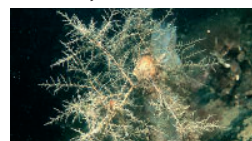
Crambe crambe



Alcyonium acaule



Sycon ciliatum



Bugainvillia ramosa



Hydroides sp.



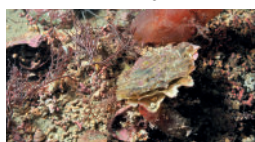
Musculus subpictus



Hiatela rugosa



Mytilus galloprovincialis

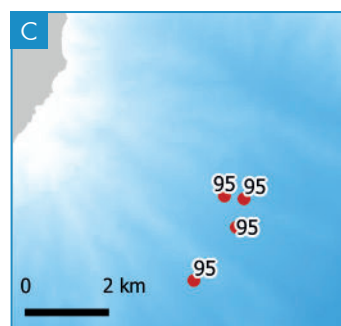
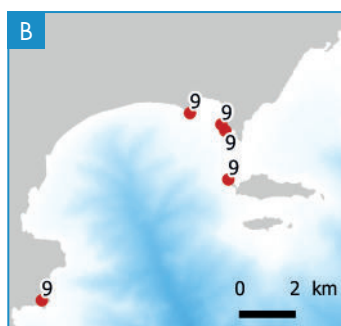
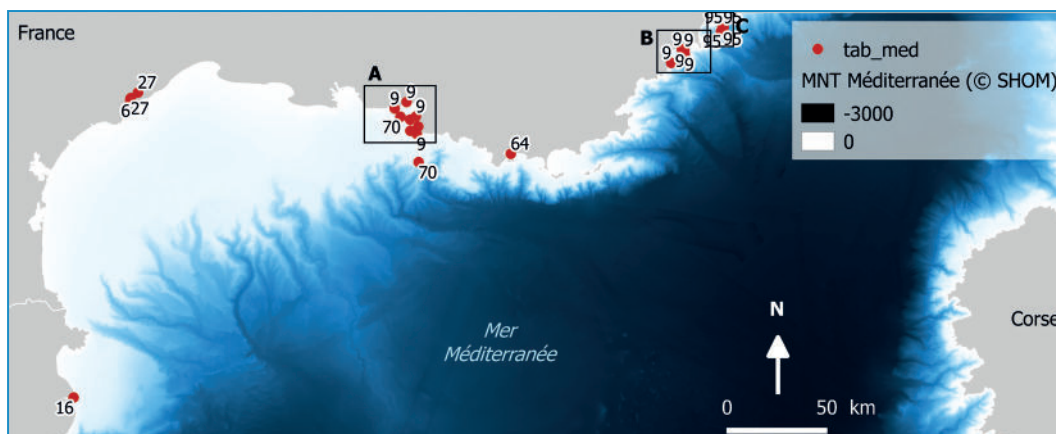


Ostrea edulis

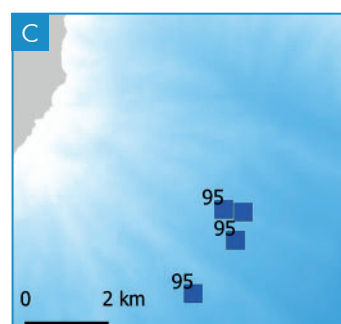
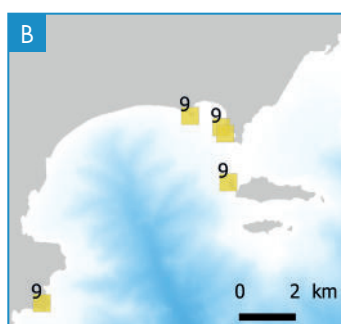
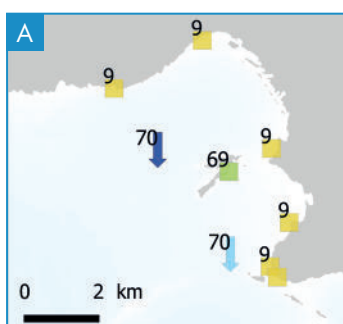
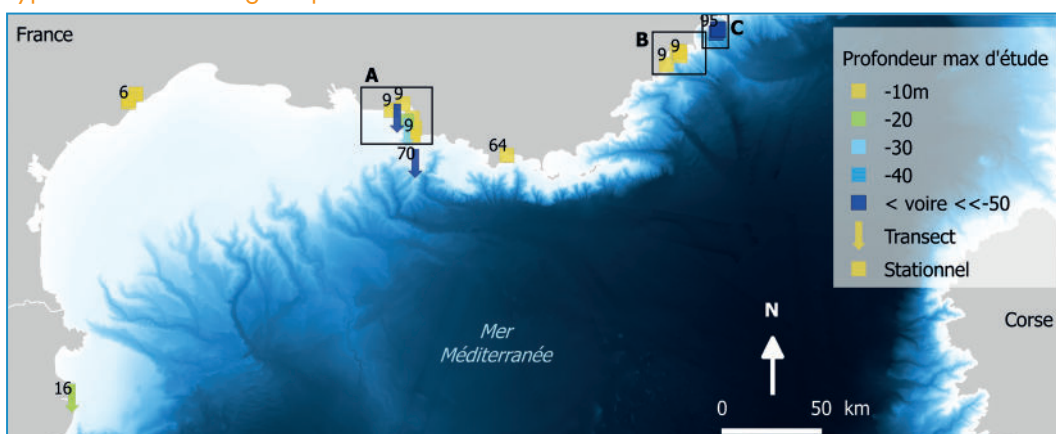


Codium fragile

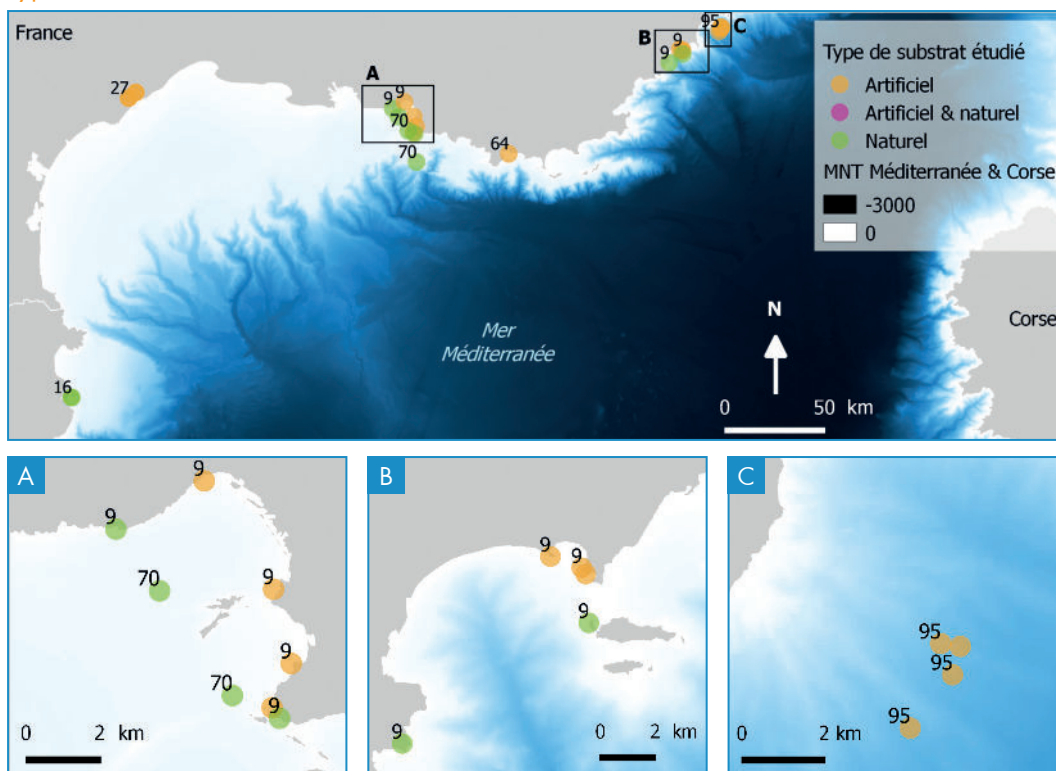
Localisation des sites étudiés en Méditerranée



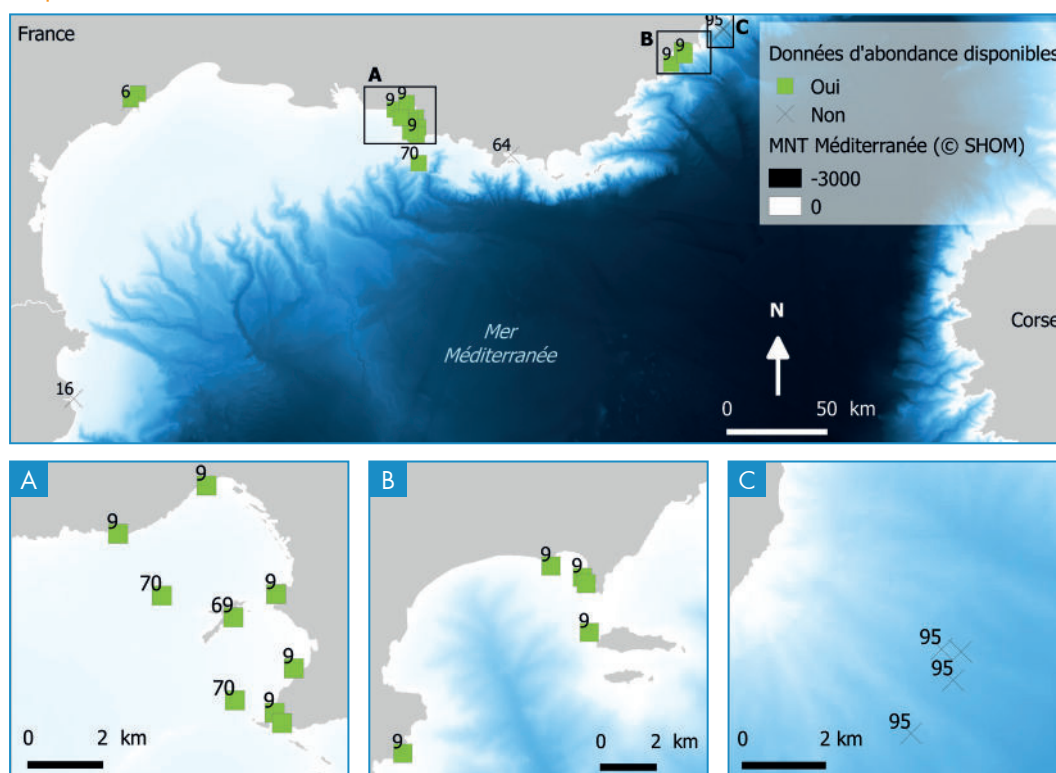
Type d'échantillonnage et profondeur maximale des sites en Méditerranée



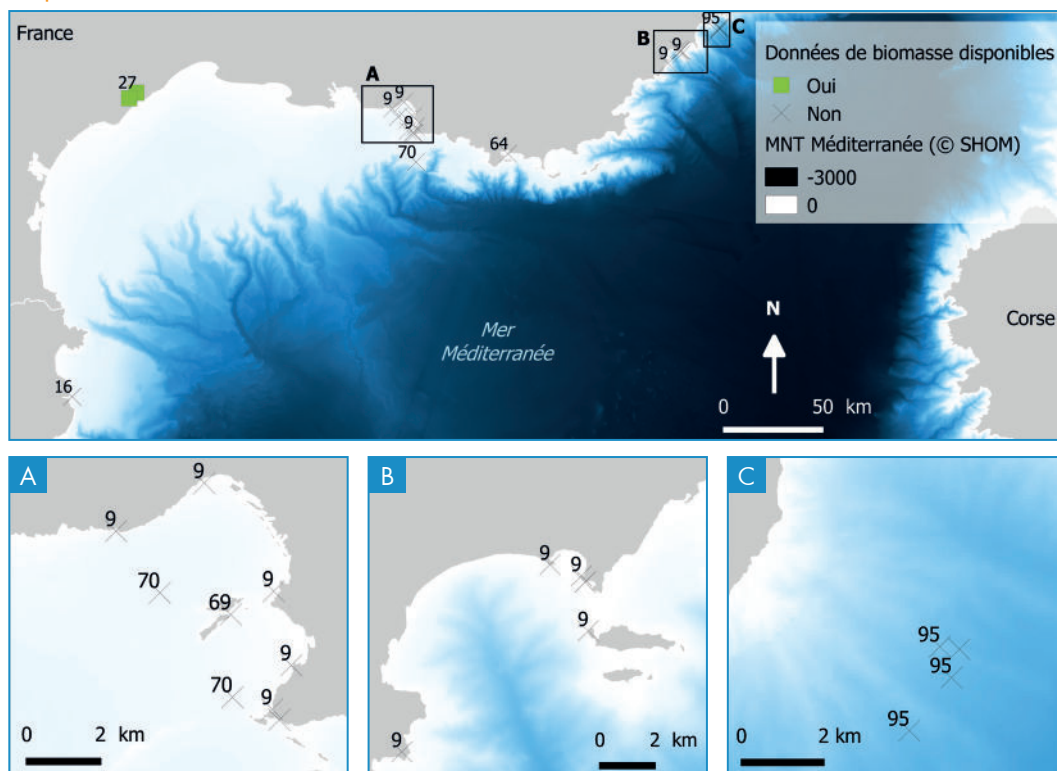
Type de substrat étudié aux différents sites en Méditerranée



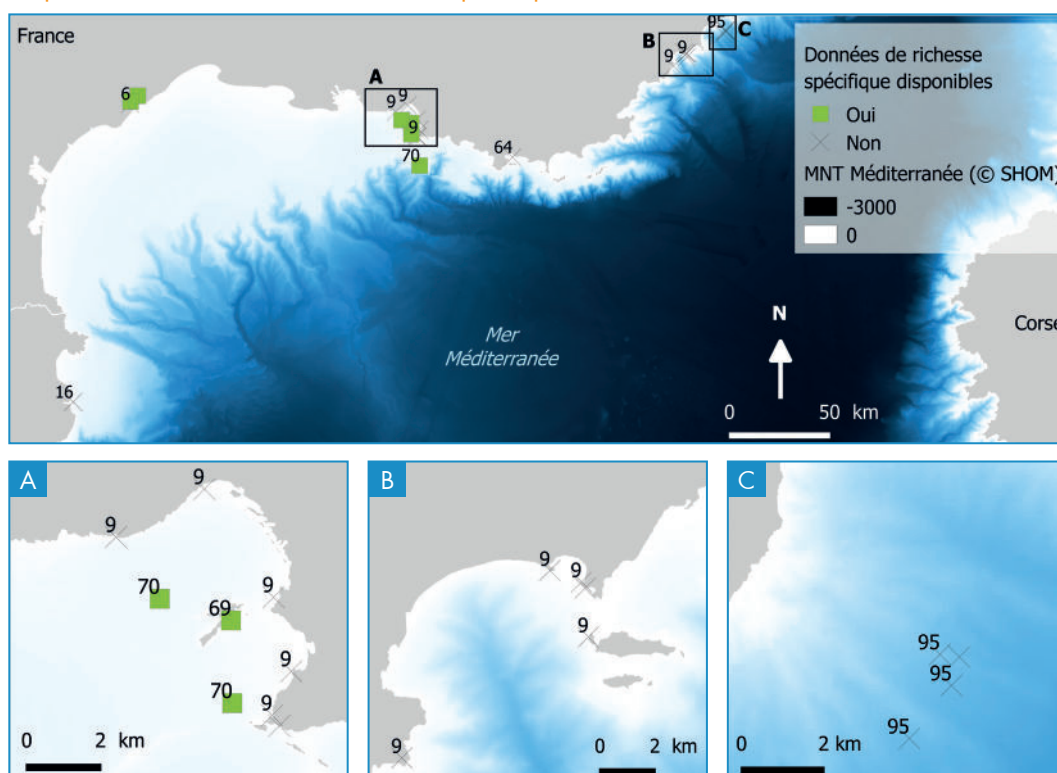
Disponibilité des données d'abondance en Méditerranée



Disponibilité des données de biomasse en Méditerranée



Disponibilité des données de richesse spécifique en Méditerranée



Références-clés annotées

[69] Bellan-Santini D., 1970. *Salissures biologiques de substrats vierges artificiels immergés en eau pure durant 26 mois dans la région de Marseille*. Tethys, vol. 2 (2), 335-356. A proximité des **Îles du Frioul** ; étude menée **entre 1963 et 1965** ; suivi de la colonisation d'un **tuyau "vitrifié"** (de la compagnie française des pétroles) de 300 m de long et de 1m de diamètre mis en place fin 1963 sur site ; **suivi mensuel** sur **2 ans** ; tuyau **positionné en pleine eau** (à **18 m de prof.** dans un milieu de 60m de prof.) soumis aux courants et recevant de la lumière (eau pure) ; **objectif** : caractériser les salissures biologiques sur une structure en pleine eau ; **variables explicatives mesurées** : temps, type de revêtement ; **variables réponses mesurées** : **S, A, composition spécifique** ; $S_{\text{totale}} = 269$; $S_{\text{polychètes}} = 84$; $S_{\text{mollusques}} = 54$; $S_{\text{crustacés}} = 43$; pas d'unité indiquée pour l'abondance mais sans doute chiffres pour 1/25 m² soit : *Anomia ephippium* et *Musculus subpictus* = 25 000/m² max, *Hiatella rugosa* = 75 000/m² max, *Mytilus galloprovincialis* = 7 500/m² max, *Balanus amphitrite* = 12 500 max en début de colonisation, *Balanus* sp. = 500/m² max (rq : face sup. + colonisée que face inf.) ; espèces communes = Sycon abondants sur face inférieure, *Bugainvillea ramosa* et *Hydroides norvegica* (bien présents dans les premiers mois), *Pomatoceros triquetter*, *Spirobranchus polytrema*, *Serpula vermicularis*, *Eunice harasii*, *Spirographis spallanzani*, *Polycirrus aurantiacus*, *Balanus amphitrite* puis *A. perforatus* ; en regard des données d'abondance, espèces dominantes = *Anomia ephippium*, *Musculus subpictus*, *Hiatella rugosa* (que des mollusques bivalves) ; évolution de la richesse spécifique, à T+1 mois = 17, $\nearrow$ 40 à 7 mois, stabilisation (mais relative) à 46 à T+14 mois ; **peuplement face supérieure dominé par les algues, les mollusques et les échinodermes ; peuplement face inférieure dominée par les spongiaires, les bryos, et les ascidies** ; de manière générale, les **polychètes** et **les mollusques** **dominent** le peuplement ; développement particulièrement important de certaines espèces (ex. *Ostrea edulis* et *Musculus subpictus* ont des tailles géantes) ; peuplement "définitif" en place avant la fin de la première année.

[95] Bellan-Santini D. et al., 1969. *Etude qualitative et quantitative des salissures biologiques de plaques expérimentales immergées en pleine eau*. Tethys, vol. 1 (3), 709-714. Région de **Nice** ; suivi de **1964 à 1968** ; points **suivis de 2,5 à 4 ans** ; **prélèvement ponctuel** sur plaques faites de différents matériaux (rilan, polyuréthane, polyester-voile de verre, brai époxy) déployées à différentes prof. entre **-40 et -530 m** ; **objectif** : étudier l'épifaune et l'épiflore se développant sur différents types de matériaux ; **variables explicatives mesurées** : durée d'immersion en pleine eau (pas de mesures présentées dans cet article valables pour la description du protocole ; **variables réponses mesurées** : composition spécifique ; seule l'approche méthodologique est présentée dans ce papier, les auteurs ont été contactés pour compléter cette partie.

[70] Clausade M., 1969. *Peuplement animal sessile des petits substrats solides récoltés dans trois biocénoses des fonds détritiques des parages de Marseille*. Tethys, vol. 1 (3), 719-750. **Parages de Marseille** ; suivi réalisé en **1969** (mais pas d'indication de dates d'échantillonnage ou de fréquence d'acquisition) ; étude des peuplements de fragments de roche naturelle prélevés **entre env. 50 et 200 m de prof.** (DC = partie supérieure du circa ; DE = 70-80 m ; DL = 95-200 m) ; **objectif** : déterminer s'il existe une unité de peuplement propre à ces substrats épars et les environnements avoisinants ; **variables explicatives mesurées** : type de fond, profondeur (ces deux variables co-varient), taille des fragments ; **variables réponses mesurées** : **S, caractérisation des communautés, A, dominance** (quantifiée) ; S comprise entre 62 et 181 dans la zone d'étude ; espèces communes : DC = *Josephella marenzelleri* (Arel ~ 15 %) & *Distomus variolosus* (~13 %) ; DE = *Vermiliopsis infundibulum* (~10 %) & *Epi-zoanthus arenaceus* (~9 %) ; DL = *Microporella ciliata* (~12 %) & Serpulidae [*Omphalosoma gracilis* + *Vermiliopsis infundibulum* = ~20 %) ; petits substrats durs jamais recouverts à 100 % ; conséquemment potentiellement peu de compétition pour l'espace ; instabilité de ces fragments constatée en plongée ; seuls les stades pionniers sont représentés.

[64] Consortium Biopaintrop, [MAPIEM/UBS/ Hydrô Réunion], 2017. **Formulations intégrant les extraits actifs tropicaux et tests in situ**. Rapport confidentiel, 30pp. **Rade de Toulon** (ainsi que **Lorient** et **La Réunion**, cf. sections **Golfe de Gascogne** et **DOM-TOM de l'atlas**) ; hydrodynamisme faible ; **2016-2017** ; suivi de **9 mois** (de juin 2016 à mars 2017) ; échantillonnage **mensuel** ; plaques de **PVC** (10 x 20 cm) ; **objectif** : observer le développement du biofouling à 3 sites contrastés et sur différents revêtements (y compris un support non revêtu) ; **variables explicatives mesurées** : latitude, type de revêtement ; **variables réponses mesurées** : **N** (facteur d'efficacité d'un revêtement) ; **% de recouvrement** par gpe fonctionnel ; recouvrement par des macroalgues vertes et brunes, ainsi que par des spirorbes en début de colonisation (Ulva [20 %], phaeophycées [10 %] et spirorbes [10 %]) ; en fin de colonisation = phaeo (60 %), rhodo (5 %), hydraires (10 %), spirorbes (10 %), bryo et tubes polychètes (5 % chq) et éponges (<5 %) ; gde diversité d'organismes en fin d'expérimentation à Toulon (en comparaison avec les deux autres sites étudiés) ; cette étude souligne l'importance de tester le spectre d'efficacité des antifoulings à différents sites.

[84] Dalias N. et al., 2008. **Suivi scientifique des récifs artificiels de Valras-Plage**. Rapport d'Océanide, de l'ADENA et du laboratoire des écosystèmes aquatiques tropicaux et méditerranéens (UMR 5244) pour la mairie de Valras-Plage, 100pp. **Valras-Plage** ; présences de gyres et upwellings dans la zone d'étude ; suivi de **RA** (immergés en 2006) réalisé en **2008** (**1 an**) à **2 saisons** (froide et chaude) ; des **buses en béton** et **paniers acier** localisés **entre 9 et 20 m** de prof. sont échantillonnés ; **objectif** : estimer les effets du RA sur l'écosystème côtier de Valras (aspects écologiques) et sur la pêche locale (aspects socio-économique) ; **variables explicatives mesurées** : T°C, O₂, sal. ; **variables réponses mesurées** : **S**, **densité** en fonction des classes de taille, **biomasse** (poids humide estimé pour les poissons seulement) ; S_{vertébrés} = 13 et 23 ; S_{invertébrés} = 1 et 4 (en saisons froide et chaude, respectivement) (ce chiffre est sans doute très sous-estimé, du moins pour les invertébrés, car focus sur les espèces d'intérêt commercial) ; espèces communes = **Mytilus galloprovincialis**, **Ostrea edulis**, + qq autres

espèces : **Spirographis mammillata**, **Microcosmus sabatieri**, **Phallusia mammillata**, **Pleurociona edwardsi**, **Crambe crambe** ; effet récif pour la faune fixée, par contre pour les organismes vagiles, il est difficile d'estimer la part de production du RA ; proposition de suivis plus poussés pour estimer l'effet récif (cf. rapport).

[16] Garrabou S. et al., 2002. **Structure and dynamics of north-western Mediterranean rocky benthic communities along a depth gradient**. ECSS, vol. 55, 493-508. **Île Medes** (île espagnole mais à 40 km env. de Banyuls) ; 1992-1994 ; **2 ans** de **suivi mensuel** ; station = **tombant rocheux** entre **5 et 20 m** de prof. ; **objectif** : mesurer les changements en termes de structure des communautés le long d'un gradient de profondeur ; test de 3 hypothèses = ↗ de la structure des communautés avec la prof., ↘ de la dynamique des communautés et de la variabilité temporelle avec la prof. ; **variables explicatives mesurées** : prof., temps ; **variables réponses mesurées** : **% de recouvrement**, **nombre de patches**, **taille des patches**, **H'**, **% de changements** ; communautés algales (4-6 m et 8-10 m) : **couverture totale par les algues gazonnantes au printemps et en été**, **recouvrement par une com. animale & végé + complexe en aut./hiv.** ; com. animales **de 12 à 20 m : couverture complexe, 80 % d'animaux en moy. + 1 à 40 % d'algues** (hiv. vs. été) ; en moy. ↗ de H' (indice de diversité de Shannon) ; espèces dominantes = à 4-6 m (dominance d'algues) **Plocamium cartilagineum**, **Aphanocladia stichidiosa**, **Aglophenia kirchenpaueri** (temporaire), **Balanus perforatus**, **Pyura dura**, **Clathrina coriacea** ; à 8-10 m (dominance d'algues) : **Corallina elongata**, **Aphanocladia stichidiosa**, **Lithophyllum encrustans**, **Crambe crambe**, **Hemimyscale culomella**, **Microcosmus sabatieri** ; à 12-14 m (horizon intermédiaire, codominance algale et animale) : **Alcyonium acaule**, **Crambe crambe**, **Hemimyscale columella**, **Dysidea avara**, **Mesophyllum alternans**, **Peyssonnelia spp.** ; à 17-20 m dominance des invertébrés : **Agelas oroides**, **Ircinia oros**, **Axinella damicornis**, **Alcyonium acaule**, **Mesophyllum alternans**, **Lithophyllum frondosum**, **Diplastrella bistellata**, **Oscarella lobularis**, **Spirastrella cunctatrix**, **Parazoanthus axinellae**, **Leptopsammia pruvoti**, **Schizomavella sp.**, **Reteporella septentrionalis**, **Cystodites dellachiaiei** (organismes

distribués en 3 strates : érigée, buissonnante, encroûtante ; cf. publi pour détails) ; variabilité temporelle importante à faible prof. (4-6 m, et 8-10 m), moins forte à + gdes prof. (12-14 et 17-20 m) ; ➤ **de la complexité des communautés et de la diversité avec la profondeur** ; à faible prof. dans les zones dominées par les algues, ces dernières se distribuent en patchs de grande taille ; % de changements + important pour les communautés algales (faible prof.) que pour les communautés animales (prof. + importante), en prof. il y aurait moins de ressources et moins de perturbations.

[71] Harmelin J. G. *et al.*, 1970. **Etude expérimentale de la colonisation des surfaces vierges naturelles en eau pure et en eau polluée dans la région marseillaise (conditions de l'expérience)**. Tehtys, vol. 2 (2), 329-334. **Région Marseillaise** ; fort hydrodynamisme à certains sites ; suivi de **1969 à 1970 ; 2 ans et 4 mois** ; suivi **mensuel** au départ, puis **tous les 3 mois** ; étude de la colonisation de **carreaux de calcaire naturel** (extrait dans la zone d'étude) placés à différentes prof. de **-3 à -37 m** ; **objectif** : suivre la colonisation de carreaux taillés dans une roche naturelle locale (calcaire de Cassis) à différents niveaux bathymétriques et différentes conditions hydrobiologiques ; **variables explicatives mesurées** : niveau de pollution, orientation plaque (extérieur vs. intérieur=face cachée) ; **variables réponses mesurées** : pour la faune = **A, biométrie**, état de croissance / pour la flore : **recouvrement, biomasse, niveau de reproduction** ; seule l'approche méthodologique est présentée dans ce papier, les auteurs ont été contactés pour compléter cette partie.

[27] Lamy N., 1996. **Organisation, structure et dynamique des peuplements macrobenthiques d'une table conchylicole de l'étang de Thau**. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 397pp. **Etang de Thau** ; suivis mensuels entre **1992 et 1993** (01/04/92 → 10/10/93) ; échantillonnage des collecteurs (plaques de fibro-ciment) suspendus à différentes stations au sein de l'étang entre **0,5 et 8 m de prof.** en **zone A**, et **0,5 et 5 m** en **zone B** ; **objectif** : étudier les organismes (anx & vgx) associés aux mollusques d'élevage pour répondre à la q° (entre autres - focus sur colonisation de tables ici) : quels sont le rôle, la place et l'importance du macrofouling ? ; **variables expli-**

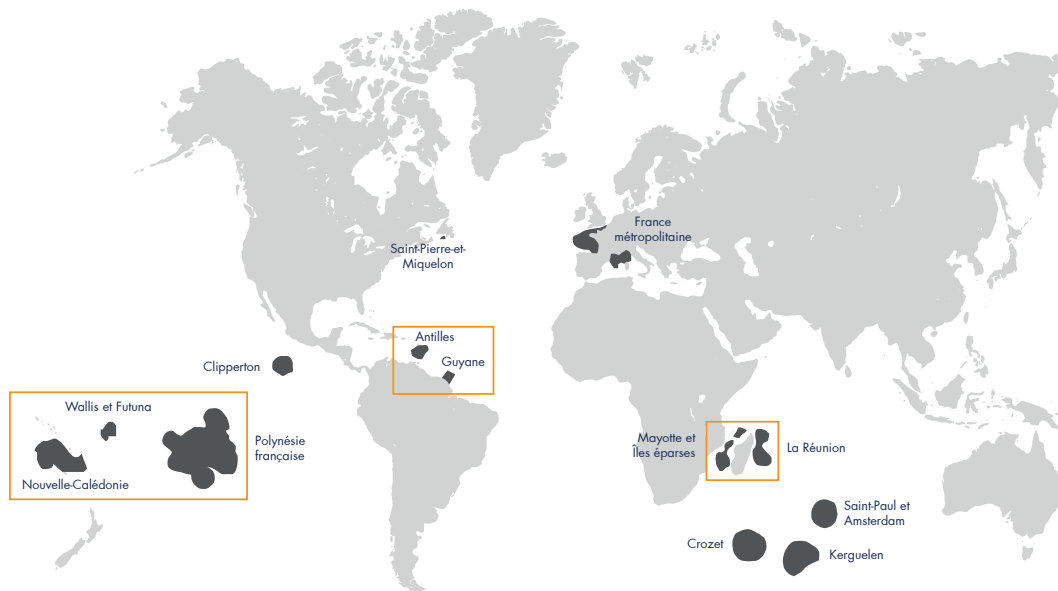
catives mesurées : courant, T°, sal., pH, O₂, turbidité, MES, phytoplancton ; **variables réponses mesurées** : **biomasse** (poids sec), **recouvrement algues, abondance, S, biométrie**, H' ; B_{max} (espèces dominantes seulement, pour le reste cf. thèse) - *Ascidia mentula* = 59 g/m², *Ciona inestinalis* = 23,61 /m², *Scrupocelleria reptans* = 200 g/m², *Reneria* sp. = 237 g/m², *M. galloprovincialis* = 20 g/m² (jeunes), *B. amphitrite* = 11.79 g/m² ; S_{totale} = 146, S_{mollusques} = 19, S_{polychètes} = 32, S_{crustacés} = 36, S_{algues} = 35 ; H' compris entre 1,199 et 4,171 (faune) et entre 0,32 et 2,56 (flore) ; A entre 100 000 et 800 000 ind/m² et B entre 100 et 500 g/m² (poids sec) ; abondance spécifique : *Ascidia mentula* = 4 000 ind /m², *Ciona inestinalis* = 2 698 à 9 008 ind/m², *Scrupocelleria reptans* = bryo le + abondant et espèce clé du biofouling [pesé mais pas dénombré cf plus haut], *Mytilus galloprovincialis* = 700 ind/m² (jeunes), *Balanus amphitrite* & *B. eburneus* = 2 pics de densité à 5 808 et 28 512 ind/m², *Spirorbis pagenstecheri* = 700 ind/m² ; **espèces dominantes** : ***Codium fragile*, *Bryopsis plumosa*, *Dasya hutchinsiae*** (seule algue trouvée sur plaques profondes), ***Scrupocellaria reptans*, *Ciona intestinalis*** (prof. +) ; les spongiaires apparaissent les derniers dans la succession ; longueurs moyennes (cf. doc pour totalité des données) ; *A. mentula* = 6 cm, *C. intestinalis* = 6 cm, *S. reptans* = 3,5 cm, *B. amphitrite* = 1,06 cm ; **évolutions saisonnières** A et B à peu près semblables : **phase initiale = colonisation par juvéniles** (170 000 ind/m² et 500 g/m²), **phase hivernale = diminution des densités** (< 100 000 ind/m² et 100 < Biom < 200 g/m²), **phase de reprise printanière** (800 000 ind/m² et 400 g/m²), les phases varient en terme d'intensité d'une année à l'autre ; S + élevée dans les eaux du fond qu'en surface car colonisation par des espèces de substrat meuble dans le sédiment piégé dans com. de substrat dur ; A & B moy. + faibles au fond qu'en surface sauf pour les ascidies ; facteurs expliquant les variations observées = compétitions inter et intraspécifiques pour l'espace et la nourriture, hétérogénéité physique des milieux, phénomène de confinement au sein d'une table ; analogie avec le **modèle de Dean et Hurd (1980) = les 1^{ers} colonisateurs induisent l'installation des suivants** ; processus en plusieurs étapes : 1) formation du biofilm, 2) colonisation par diatomées et spirorbes, 3) apparition de macrophytes, 4) installation des ascidies,

des bryos et des spongiaires, 5) apparition des esp. associées (crustacés & polychètes) → ttes ces étapes se déroulent dans les 2 à 3 mois après immersion.

[6] Mazouni N. *et al.*, 2001. *Composition of biofouling communities on suspended oyster cultures: an in situ study of their interactions with the water column*. MEPS, vol. 214, 93-102. **Etang de Thau** ; hydrodynamisme faible, lumière abondante ; **1992, 12 mois** d'étude (de janvier à décembre sauf février et septembre à cause de pb techniques) ; fréq. mensuelle ; suivi d'**Unité de Culture d'Huîtres** (OCU = Oyster Culture Unit) et plus part. la ligne d'élevage en **nylon** et les valves des huîtres (**carbonate de calcium**) ; prof. = **3 m** ; objectif : produire une vision plus réaliste de l'impact de l'aquaculture sur les écosystèmes marins en intégrant le biofouling à l'analyse et en étudiant la dynamique saisonnière de la communauté et les interactions interspécifiques pour répondre à deux questions : quels sont les facteurs contrôlant le biofouling ? et quels sont les effets de la communauté sur les systèmes alentours ? ; variables explicatives mesurées : T°, O₂, NH₄, NO₂-NO₃, PO₄, sal., Chla ; variables réponses mesurées : **poids sec** (biomasse relative), **diversité** (multi) ; biomasse relative des principaux groupes : *Crassostrea gigas* = 10-60 %, ascidies = 25 - 80 %, éponges = 10 - 20 %, bryozoaires = 5 - 15 % ; printemps caractérisé par un max de diversité (développement de **bryozoaires**, **éponges**, **polychètes** et **algues**) et à l'**automne dominance d'ascidies** (75 % de la biomasse totale) telles que *Ciona intestinalis*, *Phallusia mammillata*, *Botryllus* sp. ; les ascidies dominent le peuplement de l'épifaune indépendamment de la T°C de l'eau ; après un épisode d'anoxie, tout le fouling a disparu puis sont apparues de jeunes ascidies ; l'activité biologique des ascidies produit une quantité importante de bio-dépôts ce qui peut induire des modifications de substrats ; la structure des peuplements des OCU est basée sur un système complexe d'interactions entre plusieurs compartiments (macrofaune de substrats dur et meuble, sédiment) et niveaux trophiques (producteurs primaires, filtreurs, dépositivores).

[9] Ruitton S. *et al.*, 2000. *Relationships between algae, benthic herbivorous invertebrates and fishes in rocky sublittoral communities of a temperate sea*. ECSS, vol. 50, 217-230. **11 sites** en Mer Méditerranée (**Baies de Marseille et de Cannes**) ; pas d'indication sur l'année à laquelle a été réalisée l'étude ; de 7 à 40 ans ; sites étudiés sur une année (tous sites, tous suivis) + 1 an d'étude des poissons à prox. des substrats artificiels ; suivis des **algues et invertébrés** en hiver vs été (**2 x/an**) / suivi des **poissons** toute l'année (**6 x/an**) ; **substrat rocheux** et cubes, tétrapodes ou acropodes en **béton** ; prof. = **1 m, 3 m et 8 m** ; objectif : répondre aux 3 questions suivantes, 1) comment décrire la complexité de grandes structures anthropiques ?, 2) est-ce que la profondeur et/ou la complexité de la structure influence(nt) les relations entre couverture algale, poissons et invertébrés herbivores ?, 3) est-ce qu'un modèle intégrant ces relations peut être mis au point pour la zone "nord-ouest Méd." ? ; variables réponses mesurées : **A, % recouvrement** ; recouvrement total aux stations étudiées ; algues (distinction encroûtantes, mousses, buissonnantes et arbustives) recouvrement variable par type d'algues en fonction du site et de la prof. ; abondance des invertébrés herbivores seulement ; invertébrés herbivores : *Paracentrotus lividus*, *Arbacia lixula*, *Patella caerulea* ; poissons herbivores ou omnivores : *Sarpa salpa*, *Symphodus* spp., *Diplodus* spp. ; identification de **4 groupes différents** (=communautés différentes) **en fonction de la complexité de la structure** : 1) taille des blocs et des cavités max, 2) grande taille de blocs - petites cavités, 3) petits blocs et cavités, 4) les plus petits blocs et très petites cavités ; si la prédation par les oursins est grande, les algues souples ont tendance à être remplacées par des algues dures encroûtantes ; les poissons et les invertébrés peuvent contrôler la structure des communautés algales, mais leur abondance relative varie avec la profondeur : **à faible prof. prédation principalement liée aux invertébrés** (avec *P. caerulea* et *A. lixula*) et **à 8 m, prédation invertébrés et poissons** (*P. lividus*, *Diplodus* spp. et *S. salpa*).

4.4 Biofouling dans les DOM-TOM



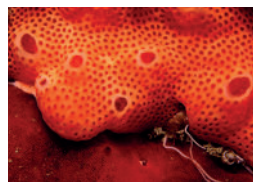
4

Caractéristiques de la zone :

Les caractéristiques des écosystèmes marins de Polynésie, de la Réunion-Mayotte-Îles éparses et des Caraïbes sont différentes, toutefois, de manière générale il faut noter que : dans les environnements tropicaux, la température de l'eau est beaucoup moins variable au cours d'une année ; la disponibilité des larves et des spores est moins cyclique et le recrutement est donc plus ou moins constant (et l'accumulation du fouling plus ou moins continue) (Richmond & Seed, 1991) ; T° de l'eau comprise entre 23 et 30°C ; ces températures élevées entraînent la formation de cyclones tropicaux et ouragans qui impactent régulièrement ces environnements.

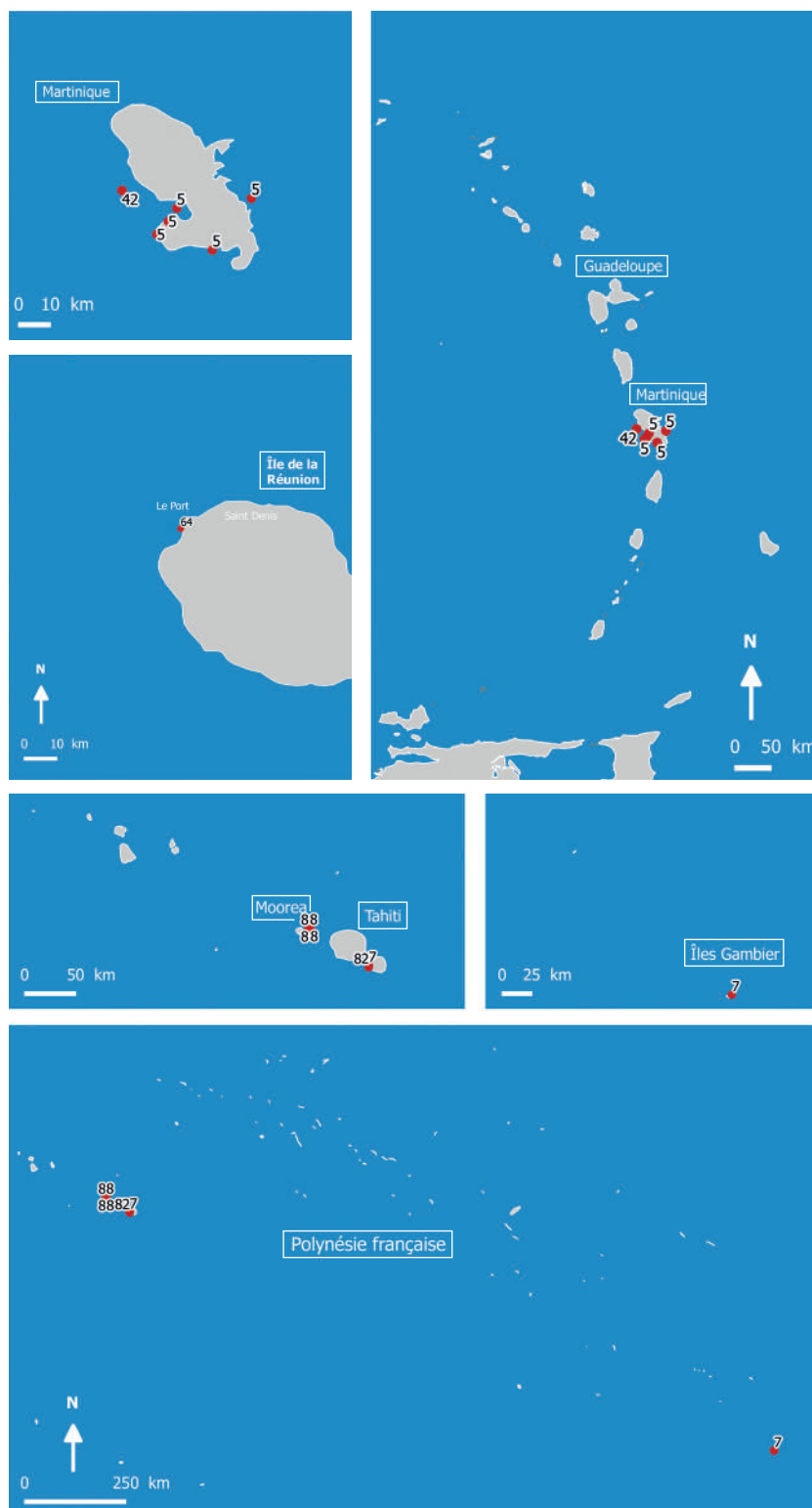
Principales espèces du fouling des DOM-TOM tropicaux :

Illustration pour une espèce, les autres groupes ne sont pas assez fins pour être illustrés : *Didemnum* sp., Ascidiacea, Polychaeta, Bryozoa, Bivalvia, hydraires, spongiaires, anatifes, algues rouges, coraux.

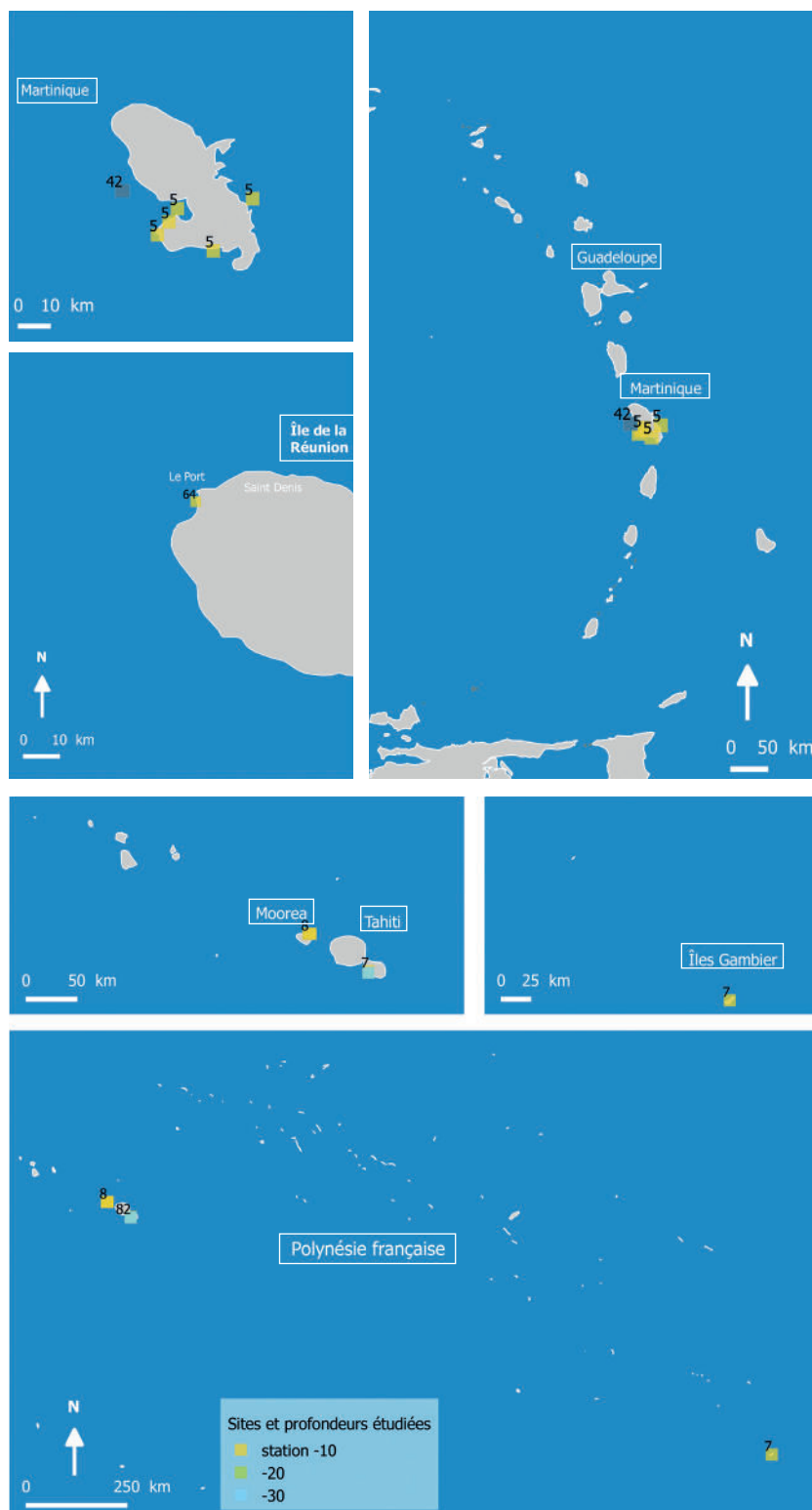


Didemnum fulgens

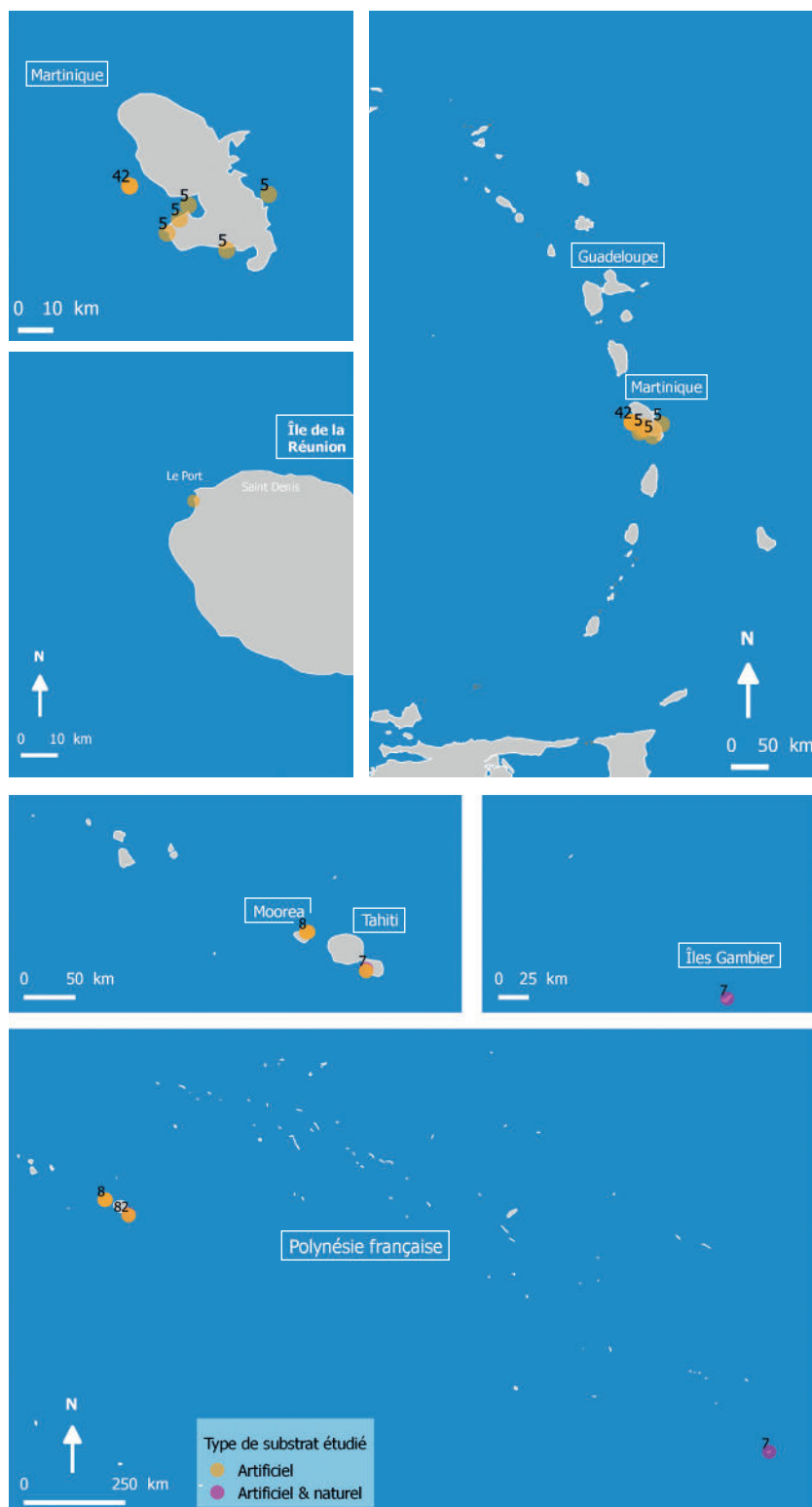
Localisation des sites étudiés dans les DOM-TOM



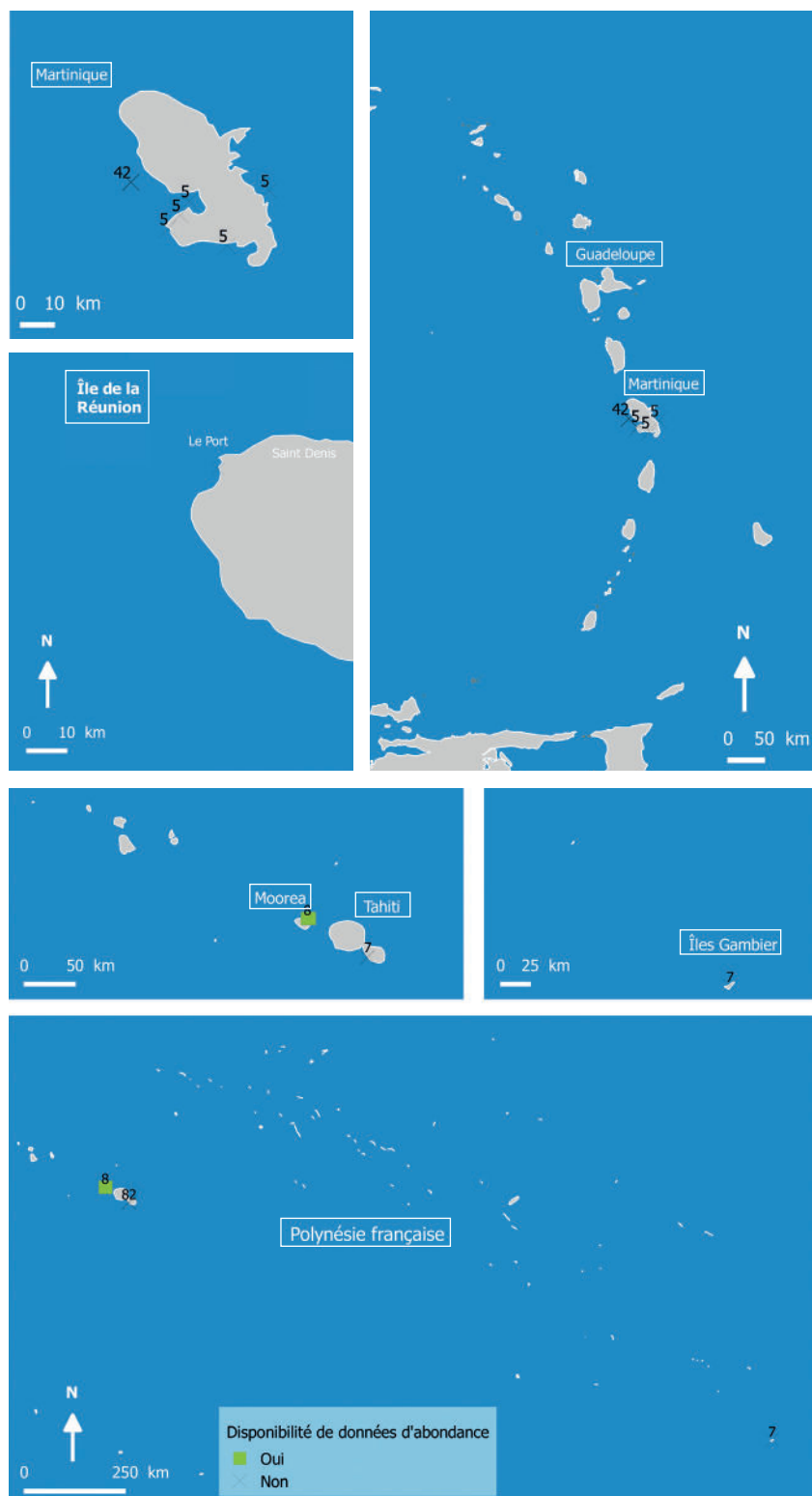
Type d'échantillonnage et profondeur maximale des sites ultra-marins



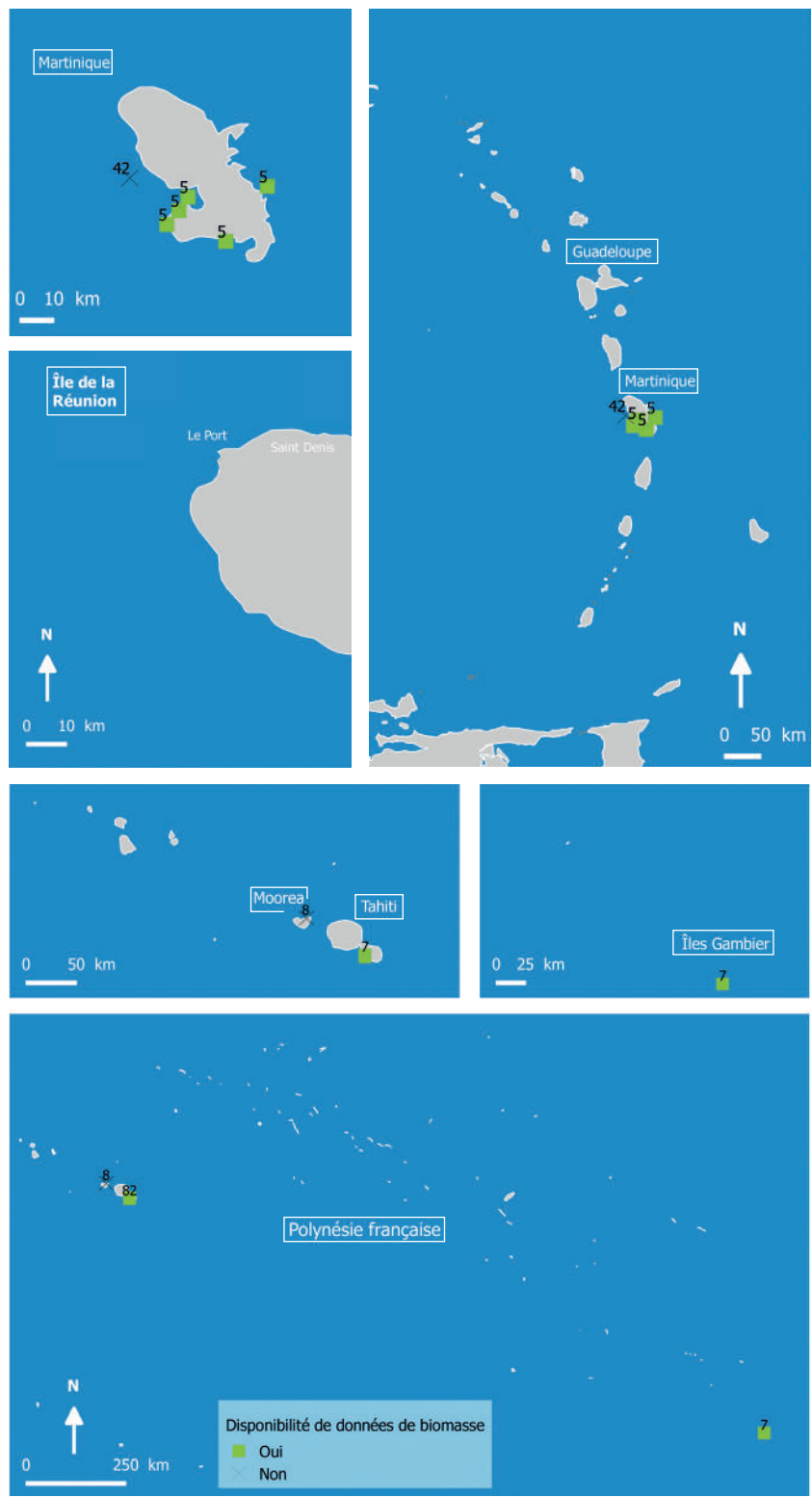
Type de substrat étudié aux différents sites ultra-marins



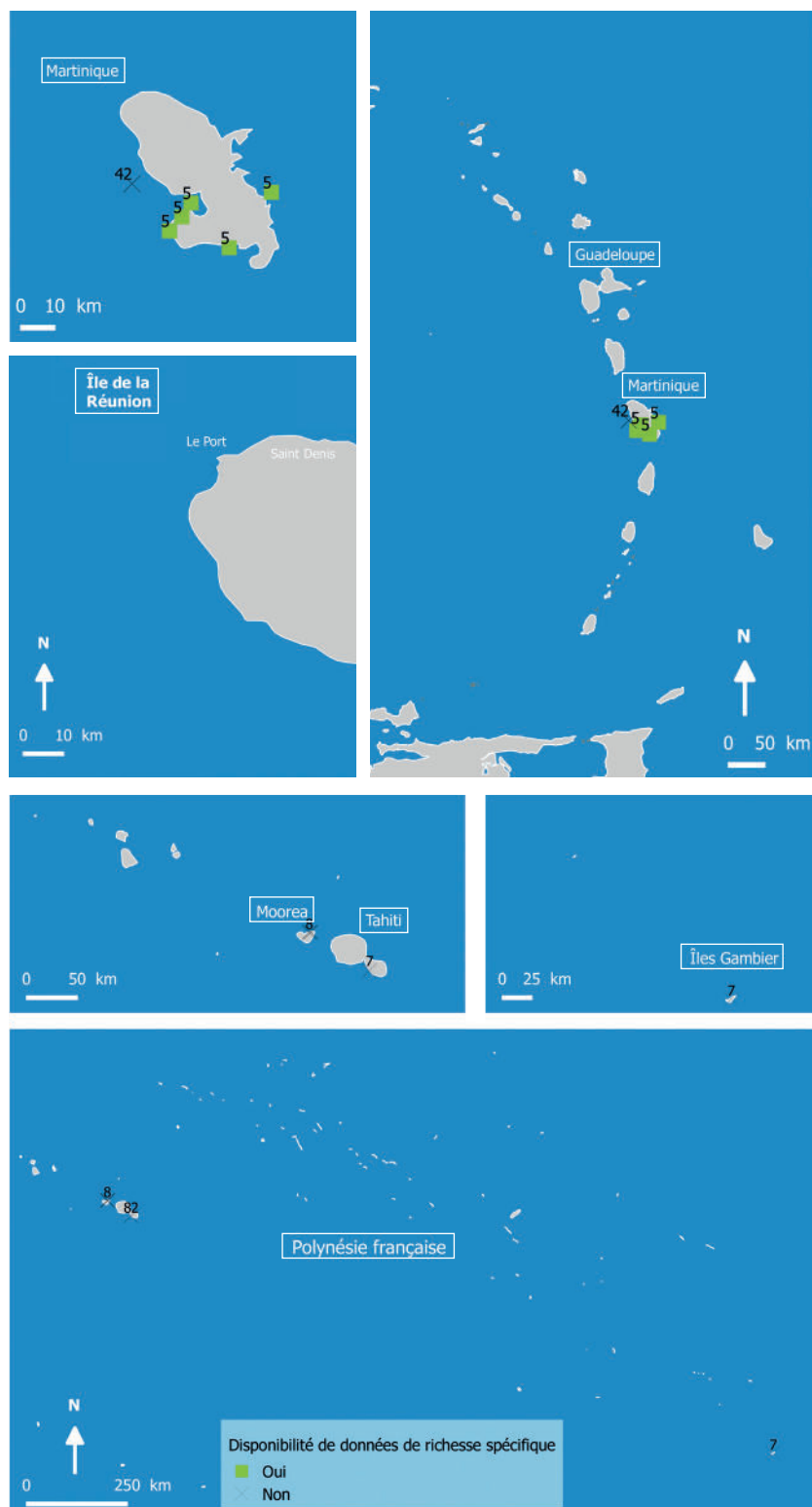
Disponibilité des données d'abondance dans les DOM-TOM



Disponibilité des données de biomasse dans les DOM-TOM



Disponibilité des données de richesse spécifique dans les DOM-TOM



Références-clés annotées

[5] Desrosiers C. et al., 2014. *Optimal colonization and growth of marine benthic diatoms on artificial substrata: protocol for a routine use in bioindication*. Journal of Applied Phycology, vol. 26, 1759-1771. (Mise en garde : suivi des tous premiers stades de colonisation, le macrofouling n'a pas été étudié) **Martinique à 5 sites** d'études (Atl1, Car1, Car2, Bay1, Bay2) représentatifs de la diversité hydromorphologique & chimique des eaux côtières de la zone ; exposition à la houle variable selon le site (de nulle à forte, data qualitatives seulement) mais même expo à la lux. ; **8 semaines** de suivi en **2011** au **printemps** (mars, avril) ; **1 prélèvement/semaine** ; 3 types de substrats artificiels de rugosité similaire (**verre dépoli, plexiglass dépoli et carreau émaillé**) en plaques déployées à ± 3 m de prof. ; **objectif** : tester le développement de diatomées marines sur différents substrats artificiels dans des environnements différents et trouver l'asymptote de stabilisation de la communauté microphytobenthique ; **variables explicatives mesurées** : prof., O_2 , $T^\circ C$, pH, sal., PO_4 , DIN, Chla, turbidité, hydrodynamisme (qualitatif) ; **variables réponses mesurées** : **biomasse, densité, S** ; biomasse maximale = $11,4 \text{ mg/cm}^2$; $S = 45$; communautés de diatomées dominées par des formes pennées ; le genre *Nitzschia* est représenté par 31 espèces, suivi d'*Amphora* et *Mastoglia* ; 3 phases clés de développement du biofilm : sem.1 = établissement du biofilm, sem. 5 = phase de dvpt exponentiel, sem. 8 = biofilm mature ; les sites ne se distinguent par leurs paramètres biogéochimiques, mais plutôt par l'hydrodynamisme et le type d'habitat ; B du biofilm plus grande sur du plexi sur du verre ou du carreau en sem. 5 et B du biofilm plus faible sur verre qu'aux 2 autres substrats en sem. 8 ; mais pas de différence significative en termes de densité valvaire et de S ; composition spécifique des communautés de diatomées dépend du site et du moment de développement.

[7] Lacoste E. et al., 2014. *Biofouling development and its effect on growth and reproduction of the farmed pearl oyster *Pinctada margaritifera**. Aquaculture, vol. 434, 18-26. **Tahiti (lagon de Vairao)** et **archipel Gambier (Mangareva)** ; étude qui s'est déroulée **entre 2011 et 2013**, sur **21 mois** ; échantillonnage toutes saisons (novembre 2011 à

juillet 2013) de la colonisation d'huîtres perlières (substrat = **carbonate de calcium**) et des filets "kangourou" (substrat = **plastique**) ; échantillonnage à **7 m** de prof. ; **objectif** : déterminer les effets de l'accumulation du fouling sur i) la croissance de la coquille, ii) le poids de la chair, et iii) la reproduction ainsi que connaître la dynamique temporelle du développement du biofouling en Polynésie française en partant de l'hypothèse qu'il varie saisonnièrement (focus sur le 2^{ème} objectif pour cet atlas) ; **variables explicatives mesurées** : T° , Chla ; **variables réponses mesurées** : **prés/abs** de groupes de fouders, biomasse (poids frais) ; **biomasse** de fouling **minimale : $786 \pm 316 \text{ g/groupe}$** (= moyenne des 4 filets de 12 huîtres) ; biom. **max. : 1798 g/groupe** (=moyenne des 4 filets de 12 huîtres) ; espèce pionnière : *Didemnum sp.*, puis développement des espèces dominantes appartenant aux groupes : **Ascidacea, Polychaeta, Bryozoa** et **Bivalvia** ; présence d'espèces de la faune vagile : crabes, amphipodes et isopodes ; en 3 à 12 mois d'immersion, le fouling a atteint une biomasse humide de 800 à 1 800 g/filet, ce qui représente 75 % du poids de la structure totale (poids du filet, des huîtres et du fouling) ; conclusion relative au 1er objectif de l'article : le fort développement de biofouling ne modifie pas le taux de croissance des huîtres.

[8] Gleason M.G. , 1996. *Coral recruitment in Moorea, French Polynesia: the importance of patch type and temporal variation*. JEMBE, vol. 207, 79-101. Suivi à **Moorea** en **1990, 1991, 1992, 1993** ; au total, **3 ans** de suivi de **carreaux de céramique non émaillée** immergés à **1-2 m** et **8-10 m** de prof. **9x4 mois**, soit : **août-déc., déc.-avr.** (saison la plus chaude), **avr.-août**, chaque année ; **objectif** : identifier les patrons de recrutement des coraux de récifs après une perturbation ; **variables explicatives mesurées** : avant vs arrière récif ; **variables réponses mesurées** : **A, diversité** de coraux ; biocolonisation **rigide** ; back-reef : moy. 3,5 naissains par carreau (soit $155,56/\text{m}^2$) ; fore-reef : 2,4 naissains ; espèces dominantes = recrues de pocilloporidés et poritidés puis recrues d'acroporidés + recrues d'autres familles ; recrues âgées de quatre mois : poritidés = 0,4-3,2 mm, acroporidés = 0,6-3,5 mm, pocilloporidés = 0,6-11,7 mm, taille variable en fonction de

la saison ; patrons de recrutement de coraux à Moorea caractérisés par l'influence de la saison d'immersion de la structure colonisée et l'année d'immersion (forte variabilité annuelle).

[42] Dubois D., 2017. *Analyses de macrofouling d'éprouvettes immergées en Martinique*. Rapport interne confidentiel, 24pp. **Martinique** ; zone turbulente, faible luminosité ; mise en place en milieu naturel d'éprouvettes faites de **différents matériaux** (acier revêtus, membranes polymère [plrs types] et acier non peint) à 8 profondeurs différentes (**1 m, 2 m, 10 m, 20 m, 50 m, 100 m, 150 m et 500 m**) ; suivi de **5 mois entre déc. 2015 et avr. 2016**, 1 date de prélèvement ; objectif : évaluer le recouvrement par le biofouling d'éprouvettes composées de différents matériaux et déployées à différentes profondeurs pendant 5 mois ; variables explicatives mesurées : profondeur, matériau, type de revêtement ; variables réponses mesurées : % de **recouvrement** ? (mais pas de données dispo) ; espèces dominantes : **hydrides, spongiaires et anatifes** + quelques **algues rouges** ; pas de fouling à 500 m de prof. ; hydrides et spongiaires dominant sur les plaques immergées entre 10 et 100 m avec un gradient décroissant en termes de densité ; à 1 m de profondeur, présence d'anatifes.

[64] Consortium Biopaintrop (MAPIEM/UBS/Hydrô Réunion), 2017. *Formulations intégrant les extraits actifs tropicaux et tests in situ*. Rapport confidentiel, 30pp. **Île de la Réunion**, dans Le Port (ainsi que Lorient et Toulon, cf. sections Golfe de Gascogne et Méditerranée de l'atlas) ; hydrodynamisme faible ; **2016-2017** ; suivi de **9 mois** (de juin 2016 à mars 2017) ; échantillonnage **mensuel** ; plaques de **PVC** (10 x 20 cm) ; objectif : observer le développement du biofouling à 3 sites contrastés et sur différents revêtements (y compris un support non revêtu) ; variables explicatives mesurées : latitude, type de revêtement ; variables réponses mesurées : **N** (facteur d'efficacité d'un revêtement) ; **% de recouvrement** par gpe fonctionnel ; début col = Ulva (5 %), phaeophycées (60 %) et fin de col = huîtres (100 %) ; grosse colonisation d'huîtres sur le site réunionnais ; cette étude souligne l'importance de tester le spectre d'efficacité des antifoulings à différents sites.

[82] Faberes D., 1981. *ETM - étude de site - rapport préliminaire de l'étude du fouling dans le lagon de Vairao*. Rapport interne au CNEXO/Ifremer, 58pp. **Tahiti (lagon de Vairao = milieu abrité)** étudié en **1980-1981 (15 mois)** prélèvements **mensuels/trimestriels** ; **plaques** faites de différents matériaux (**PVC blanc, PVC noir, inox, acier doux, AG3, AG4, béton, titane, cupro alu, cupro nickel**) déployées à **2 et 25 m** de prof. ; objectif : identifier les effets de la bio marine sur divers matériaux potentiellement utilisés dans la construction de la centrale à énergie thermique des mers, suivi de la colonisation (période de fixation & développement long terme) ; variables explicatives mesurées : T°, sal., O₂ dissous, nitrates, silicates, composition du phytoplancton ; variables réponses mesurées : **composition faunistique, biomasse** (poids frais), **corrosion** ; biomasse du fouling ayant colonisé les éprouvettes en PVC à -2 m = 1-1,6 kg/m² (3 mo.), 2-2,6 kg/m² (6 mo.), 3,7 kg/m² (9 mo.) ; à -25 m = 300 g (3 mo.), 1,3-1,8 kg (6 mo.), 1,2-1,7 kg (9 mo.) ; espèces dominantes : **ascidies**, et à plus long terme = **coraux** ; **de la biomasse** entre 3 et 9 mois : on passe de 1 à 3,7 kg à -2 m et de 300 g à 1,7 kg à -25 m ; **période de fixation qui semble la + propice dans le lagon : avril** (biomasse fixée la + grande) ; **échantillons à 25 m 2 x moins salis que ceux à 2 m de profondeur** ; périodes de fixation pas si claires qu'en milieu tempéré (on voit tout de même que le recrutement est plus important vers avril en termes de biomasse) ; facteur prédation non étudié mais évident ! ; peu de fouling dans le lagon comparé aux zones rapidement étudiées à l'extérieur du lagon ou aux côtes métropolitaines ; conclusions sur les matériaux : cf. doc.

5 - Le biofouling des eaux françaises

L'extraction des informations présentées dans les différents documents analysés nous a permis de représenter graphiquement certaines **données en fonction de la profondeur** (Fig. 20) **et du temps** (Fig. 21, 22 et 23).

Les données de biomasse présentées en figure 20 correspondent au poids frais total (tous les organismes vivants sont considérés) et la durée d'immersion des substrats étudiés varie entre 9 mois et bien plus (substrat naturel en place). Premièrement, toutes zones confondues, nous pouvons observer que **la biomasse** (seul le poids frais total [à l'échelle des communautés] a été considéré pour la réalisation des Fig. 20 et 21) **varie beaucoup** en fonction de la profondeur (de **20 g/m² à 40 kg/m²**) et particulièrement dans les dix premiers mètres de la tranche d'eau (Annexe 2a). Ces valeurs extrêmement variables sont **cohérentes avec celles mesurées à d'autres**

sites en Europe, et notamment au large de l'Ecosse et de la Suède (Annexe 2b).

En ce qui concerne la biomasse à l'échelle de la communauté (i.e. tous les organismes composant le biofouling), l'hétérogénéité des données disponibles rend difficile la comparaison inter zones géographiques [données disponibles : DOM-TOM, n = 2 ; Golfe de Gascogne, n = 2 ; Manche, n = 12] et ces **données sont difficilement comparables à celles indiquées dans les normes précisant les densités de biofouling critiques pour les structures offshore** qui sont exprimées en kN/m³, la masse étant une notion volumique. Ce constat est un point de vigilance qui doit être intégré dans les nouveaux protocoles. En effet, les masses surfaciques doivent être a minima associées à des épaisseurs afin de pouvoir remonter à des données volumiques pour être exploitable dans les études d'ingénierie.

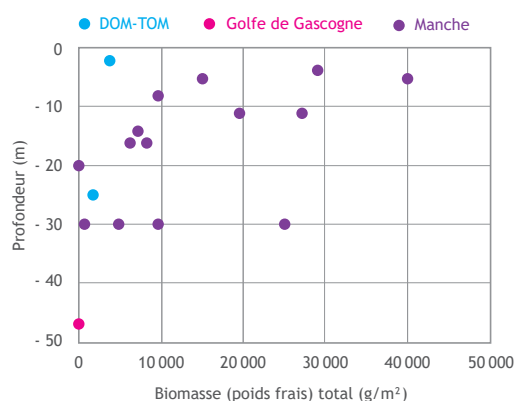


Fig. 20. Poids frais total (valeurs continues) à différentes profondeurs et mesurées dans trois zones géographiques.

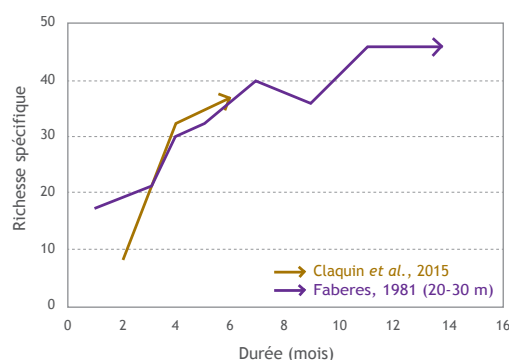


Fig. 22. Richesse spécifique à différents stades de la biocolonisation.

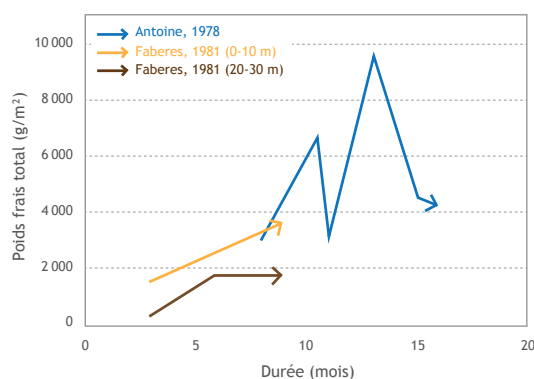


Fig. 21. Poids frais total de la biocolonisation mesuré pendant des cycles de mesure de 9 et 16 mois.

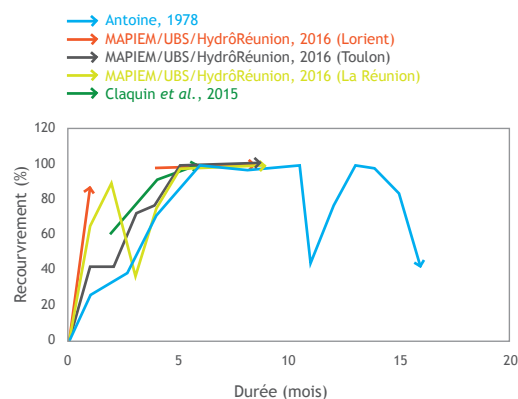


Fig. 23. Variation du pourcentage de recouvrement au cours du processus de colonisation à 5 sites.

La synthèse du corpus documentaire nous a également permis d'extraire des données quantitatives à différents pas de temps. Un suivi des variations en termes de biomasse (poids frais) est présenté dans deux rapports (Antoine, 1978 ; Faberes, 1981) ; en plaçant ces données dans un même espace temporel (Fig. 18, 21), on observe que, **de manière générale, la biomasse augmente au cours du temps, mais varie de manière importante**. La figure 21 montre également que le poids total de la colonisation varie en fonction de la profondeur : la biomasse du biofouling est plus importante entre 0 et 10 mètres qu'entre 20 et 30 mètres à Tahiti (Faberes, 1981). La **richesse spécifique (S)**, mesurée à différents pas de temps au cours de deux autres études (Claquin *et al.*, 2015 ; Bellan-Santini, 1970), **tend à augmenter au cours du temps et selon le même patron** (Fig. 22). La richesse spécifique se stabilise ensuite au site suivi durant plus d'un an.

Le **taux de recouvrement mesuré** dans le cadre de trois études et **à cinq sites différents montre des variations temporelles marquées** et une augmentation rapide du pourcentage de recouvrement durant le premier mois après immersion (Fig. 23). La vitesse de colonisation varie en fonction du site et la séquence de colonisation enregistre des régressions (diminution importante du taux de recouvrement) au cours du temps. **Plusieurs processus naturels peuvent expliquer la diminution du taux de recouvrement à des stades avancés de la biocolonisation, avec en premier lieu : la prédation et le climat (passage de tempête)**.

Ce travail met en lumière une grande variabilité du processus de biocolonisation, y compris dans des environnements tempérés et abrités (ex. variation du taux de recouvrement mesuré à Sainte-Anne du Portzic ; Antoine, 1978). L'hétérogénéité des données extraites des documents

analysés ne permettent pas de tirer de conclusions suffisamment robustes à ce stade. Ce travail de synthèse met en exergue l'importance de mener une quantification de la biocolonisation qui soit assez ciblée spatialement. Toutefois, la mise en commun de résultats de travaux menés dans le but de caractériser le biofouling (et plus généralement les communautés de substrats durs) permettrait d'améliorer les connaissances de ce processus. Cela aiderait aussi à mettre en évidence des patrons temporels et spatiaux de colonisation exprimés par exemple en termes de biomasse, de biovolume, d'abondance ou de caractéristiques géométriques (cf. Variables du fouling à mesurer en priorité dans un contexte EMR dans Quillien *et al.*, in prep. *Existing protocols to measure biofouling characteristics: what methodological adaptations are needed within ORE contexts?*). Par ailleurs, pour mieux comprendre et prédire ces variations, il est essentiel de mener des suivis de biocolonisation à plus long terme et d'y associer la mesure de variables potentiellement explicatives (température, courants, pression de prédation, etc.).

Ce travail souligne aussi le **manque de lien existant entre les données acquises via la mise en œuvre de protocoles pour des études en écologie et celles nécessaires à l'ingénierie**. Pour le moment, la comparaison des données extraites pour la réalisation de cette synthèse avec les normes ou les standards existant dans le design offshore n'est pas réalisable. C'est particulièrement le cas pour la biomasse, le volume et le groupe fonctionnel (ex. organismes rigides ou souples) des espèces dominantes. En effet, ce sont des variables qui doivent être mesurées simultanément et pouvoir être liées afin d'aller au-delà des données surfaciques et d'obtenir une répartition de la masse volumique de la biocolonisation.

6 - Sigles et acronymes

A = abondance
Abs. = absence
Aut. = automne
B = biomasse
Bryo = bryozoaires
Chq. = chaque
Chla = chlorophylle a
Circa = circalittoral
COP = carbone organique particulaire
Com. = communautés
DIN = dissolved organic nitrogen
Dvpt = développement
Fréq. = fréquence
GG = Golfe de Gascogne
H' = indice de Shannon
Hiv. = hiver
Ind = individus
Infra = infralittoral
J' = indice d'équitabilité de Pielou
Méd = méditerranée
MES = matière en suspension
Mo. = mois
Moy. = moyenne
NA = non attribué
Nb = nombre
NOP = azote organique particulaire
Phaeo. = phaéophycées (algues brunes)
ppm = partie par million (1 ppm = 1 mg/kg)
Prés. = présence
Prof. = profondeur
PSSC = poids sec sans cendre
Qualif. = qualitatif
Quantif. = quantitatif
RA = récifs artificiels
Rhodo. = rhodophycées (algues rouges)
S = richesse spécifique
Sal. = salinité
SD = standard deviation
Subs. = substrat
T° = Température

7 - Références bibliographiques

- Antoine, E.** (1978). *Etude du fouling sur la station d'essais en milieu marin de Sainte-Anne du Portzic (juin 1977 - décembre 1977)*. 28 pp.
- Benedetti-Cecchi, L.** (2000). Predicting direct and indirect interaction during succession in a mid-littoral rocky shore assemblage. *Ecological Monographs*, 70(1), 45–72. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2000\)070\[0045:P-DAIID\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2000)070[0045:P-DAIID]2.0.CO;2)
- Burrows, M. T.** (2012). Influences of wave fetch, tidal flow and ocean colour on subtidal rocky communities. *Marine Ecology Progress Series*, 445, 193–207. <https://doi.org/10.3354/meps09422>
- Canning-Clode, J., & Wahl, M.** (2010). Patterns of Fouling on a Global Scale. In *Biofouling* (pp. 73–86). <https://doi.org/10.1002/9781444315462.ch5>
- Castric-Fey, A.** (1974). *Les peuplements sessiles du benthos rochers de l'archipel de Glénan (Sub Bretagne) - Ecologie descriptive et expérimentale*. 333 pp.
- Castric-Fey, A.** (1988). Les facteurs limitants des peuplements sessiles sublittoraux en Baie de Concarneau (Sud Finistère). *Vie Milieu*, 38(1), 1–18.
- Castric-Fey, A., & Chasse, C.** (1991). Factorial analysis in the ecology of rocky subtidal areas near Brest (West Brittany, France). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 71(3), 515–536. <https://doi.org/10.1017/S0025315400053121>
- Compère, C.** (1999). Biofilms en milieu marin. *Techniques Sciences Méthodes*, 11, 48–54.
- Connell, J. H.** (1972). Community Interactions on Marine Rocky Intertidal Shores. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 3, 169–192.
- Connell, J. H., & Slatyer, R. O.** (1977). Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist*, 111(982), 1119–1144.
- Damblans, G.** (2017). Floating wind turbine power cable: a complex new challenge. 4th Floating Offshore Wind Turbines - FOWT 2017, Marseille, France, 15/03/17 - 16/03/17.
- Damblans, G., Berhault, C., Le Cunff, C., Molin, B., Wiet, P., Cinello, A., Deglaire, T., Legras, J.L.** (2013). "Investigations on Galloping of non-circular cross-section". OMAE 2013-10357
- DePalma, J. R.** (1982). Horizontal and vertical distribution of fouling in the world's oceans. In *Fouling and Corrosion of metals in Seawater* (pp. 7–14).
- Gaurier, B., Germain, G., Facq, J. V., Baudet, L., & Schoefs, F.** (2014). Effet des concrétions marines sur le comportement hydrodynamique de structures circulaires. In *Journées de l'Hydrodynamique* (pp. 1–12).
- Glasby, T. M., & Connell, S. D.** (2001). Orientation and position of substrata have large effects on epibiotic assemblages. *Marine Ecology Progress Series*, 214, 127–135. <https://doi.org/10.3354/meps214127>
- Ghobashy, A. F. A., & El Komy, M. M.** (1980). Fouling in the southern region of the Suez Canal. *Aquatic Ecology*, 14(3), 179–185.
- Heideman, J. C., & George, R. Y.** (1981). Biological and engineering parameters for macrofouling growth. In *MTS/IEEE* (pp. 550–557).
- Hunsucker, J. T., Hunsucker, K. Z., Gardner, H., & Swain, G.** (2016). Influence of hydrodynamic stress on the frictional drag of biofouling communities. *Biofouling*, 32(10), 1209–1221. <https://doi.org/10.1080/08927014.2016.1242724>
- Langhamer, O.** (2012). Artificial reef effect in relation to offshore renewable energy conversion: State of the art. *The Scientific World Journal*, 2012, 8p. <https://doi.org/10.1100/2012/386713>
- Langhamer, O., Wilhelmsson, D., & Engström, J.** (2009). Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys - a pilot study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(3), 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.02.009>
- Lord, J. P.** (2017). Temperature, space availability, and species assemblages impact competition in global fouling communities. *Biological Invasions*, 19(1), 43–55. <https://doi.org/10.1007/s10530-016-1262-7>
- Loxton, J., Macleod, A. K., Nall, C. R., McCollin, T., Machado, I., Simas, T., Vance, T., Kenny, C., Want, A., Miller, R. G.** (2017). Setting an agenda for biofouling research for the marine renewable energy industry. *International Journal of Marine Energy*, 19, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.08.006>

- Macleod, A. K., Stanley, M. S., Day, J. G., & Cook, E. J.** (2016). Biofouling community composition across a range of environmental conditions and geographical locations suitable for floating marine renewable energy generation. *Biofouling*, 32(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/08927014.2015.1136822>
- Noël, L., Griffin, J., Jenkins, S. R., Noël, L. M. J., Griffin, J. N., Moschella, P. S., ... Hawkins, S. J.** (2009). Marine Hard Bottom Communities, 206(May). <https://doi.org/10.1007/b76710>
- Osman, R. W., & Whittlatch, R. B.** (2004). The control of the development of a marine benthic community by predation on recruits. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 311(1), 117–145. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.05.001>
- Quillien, N., Damblans, G., Boukema, K., Bressy, C., Briand, J.-F., Compère, C., Dreanno, C., Jacob, D., Leblanc, V., Reynaud, M., Schoefs, F., Lejart, M.** In prep. Existing protocols to measure biofouling characteristics: what methodological adaptations are needed within ORE contexts?
- Richmond, M. D., & Seed, R.** (1991). A review of marine macrofouling communities with special reference to animal fouling. *Biofouling*, 3, 151–168.
- Roberts, D., Rittschof, D., Holm, E., & Schmidt, A. R.** (1991). Factors influencing initial larval settlement: temporal, spatial and surface molecular components. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 150(2), 203–221. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(91\)90068-8](https://doi.org/10.1016/0022-0981(91)90068-8)
- Rule, M. J., & Smith, S. D. A.** (2007). Depth-associated patterns in the development of benthic assemblages on artificial substrata deployed on shallow, subtropical reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 345(1), 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.01.006>
- Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N., & Carlier, A.** (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(July), 380–391. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.07.026>
- Tiron, R., Pinck, C., Reynaud, E. G., & Dias, F.** (2012). Is biofouling a critical issue for wave energy converters? *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 4(May), 669–679. Retrieved from <http://www.scopus.com/inwardrecord.url?eid=2-s2.0-84866110753&partnerID=40&md5=8d41ac429a5d41f62ebaffdc-4536c27f>
- Valiela, I.** (1995). *Marine Ecological Processes*. 686p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4125-4>
- Vance, T., Lauterbach, L., Lenz, M., Wahl, M., Sanderson, R. A., & Thomason, J. C.** (2009). Rapid invasion and ecological interactions of *Diplosoma listerianum* in the North Sea, UK. *Marine Biodiversity Records*, 2, e59. <https://doi.org/10.1017/S1755267209000815>
- Wahl, M.** (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series*, 58, 175–189.
- Want, A., Crawford, R., Kakkonen, J., Kiddie, G., Miller, S., Harris, R. E., & Porter, J. S.** (2017). Biodiversity characterisation and hydrodynamic consequences of marine fouling communities on marine renewable energy infrastructure in the Orkney Islands Archipelago, Scotland, UK. *Biofouling*, 7014(July), 1–13. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1336229>
- Want, A., Porter, J., Long, C.** (2018) BioFREE: a global study of biofouling impacts on wave and tidal renewable energy technologies. Oral presentation, ICOE conference, Cherbourg.

8 - Annexes

Annexe 1

Table des articles analysés formant la base des bases de données « synthèse » et « cartographie » pour la réalisation de l'atlas du biofouling des eaux françaises.

Auteur(s)	Publi.	Titre	Réf	Zone
Antoine	1978	Etude du Fouling sur la station d'essais en milieu marin de Sainte-Anne du Portzic	14	Manche
Antoine	1978	Etude du Fouling sur la station d'essais en milieu marin de Sainte-Anne du Portzic (Déc 1977-Déc 1978)	83	Manche
Augris, Caill-Milly, de Casamajor	2009	Atlas thématique de l'environnement marin du Pays Basque et du sud des Landes	93	Golfe de Gascogne
Bellan-Santini	1970	Salissures biologiques de substrats vierges artificiels immergés en eau pure durant 26 mois dans la région de Marseille	69	Méditerranée
Bellan-Santini, Arnaud, Bellan, Harmelin, Le Campion-Alsumard, Leug Tak Kit, Picard, Pouliquen, Zibrowius	1969	Etude qualitative et quantitative des salissures biologiques de plaques expérimentales immergées en pleine eau	95	Méditerranée
Bridier	2016	Dynamique temporelle d'une communauté benthique sur substrat artificiel en rade de Brest	63	Manche
Brown, Eaton, Cragg, Goulleter, Nicolaidou, Bebianno, Icely, Daniel, Nilsson, Pitman, Sawyer	2003	Assessment of effects of chromated copper arsenate (CCA)-treated timber on nontarget epibiota by investigation of fouling community development at seven european sites	15	Golfe de Gascogne
Castège, Milon, Fourneau, Tauzia	2016	First results of fauna community structure and dynamics on two artificial reefs in the South of the Bay of Biscay	4	Golfe de Gascogne
Castric-Fey	1988	Les facteurs limitants des peuplements sessiles sublittoraux en Baie de Concarneau (Sud Finistère)	11	Golfe de Gascogne
Castric-Fey	1974	Les peuplements sessiles du benthos rocheux de l'archipel de Glénan (Sud Bretagne) - Ecologie descriptive et expérimentale	12	Golfe de Gascogne
Castric-Fey	1996	Richesse et biodiversité en mer mégatidale : communautés sublittorales rocheuses de la région Trébeurden-Ploumanac'h	67	Manche

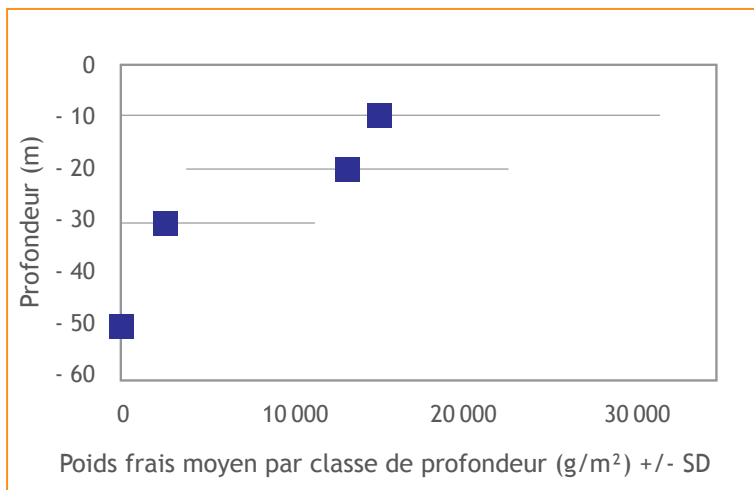
Auteur(s)	Publi.	Titre	Réf	Zone
Castric-Fey, Chassé	1991	Factorial analysis in the ecology of rocky subtidal areas near Nrest	57	Manche
Castric-Fey, Girard-Descatoire, Larfargue, L'Hardy-Halos	1973	Etagement des algues et des invertébrés sessiles dans l'archipel de Glénan - définition biologique des horizons bathymétriques	66	Golfe de Gascogne
Chassé et al.	1976	Etude écologique d'avant-projet sur le site de Ploumoguier	31	Manche
Chauvaud	2017	Dynamique temporelle d'une communauté benthique sur substrat artificiel en rade de Brest : influence de l'environnement et des interactions spécifiques	58	Manche
Claquin, Lestarcq, Leroy, Rusig, Mussio, Napoléon, Orvain, Foveau, Dauvin, Schlund, Bachelet, Feunteun, Danet, Collins, Mallinson, Jensen, Robinson	2015	Suivis environnementaux : colonisation des matériaux en mésocosmes et <i>in situ</i>	76	Manche
Clausade	1969	Peuplement animal sessile des petits substrats solides récoltés dans trois biocenoses des fonds détritiques des parages de Marseille	70	Méditerranée
Consortium Biopaintrop	2017	Formulations intégrant les extraits actifs tropicaux et tests <i>in situ</i>	64	Golfe de Gascogne, Méditerranée, Indien tropical
Cudennec	2015	Dynamique de la colonisation benthique sur les substrats artificiels des installations EMR	68	Manche
Dalias, Blouet, Foulquié, Dupuy de la Grandvire, Lenfant	2008	Suivi scientifique des récifs artificiels de Valras-Plage	84	Méditerranée
De Casamajor, Lalanne	2016	Intérêt biogéographique de la côte basque rocheuse	80	Golfe de Gascogne
De Casamajor, Popovsky, Lissardy	2014	Suivi DCE du paramètre "macroalgues subtidales"	81	Golfe de Gascogne
Derrien, Catherine	2013	Inventaire vidéo de la biodiversité benthique sur le site hydrolien de Paimpol-Bréhat. Note de synthèse - Données 2012	72	Manche

Auteur(s)	Publi.	Titre	Réf	Zone
Derrien, Catherine	2015	Inventaire vidéo de la biodiversité benthique sur le site hydrolien de Paimpol-Bréhat. Note de synthèse - Données 2013	73	Manche
Derrien-Courtet, Le Gal, Grall	2013	Regional-scale analysis of subtidal rocky shore community	65	Manche, Golfe de Gascogne
Desrosiers, Leflive, Eulin, Ten-Hage	2014	Optimal colonization and growth of marine benthic diatoms on artificial substrata: protocol for a routine use in bioindication	5	Atlantique tropical
Dubois	2017	Analyses de macrofouling d'éprouvettes immergées en Martinique	42	Atlantique tropical
Duchêne	2014	Evaluation du biofouling sur la machine test OH-OCT-1	41	Manche
Faberes	1981	ETM - étude de site - rapport préliminaire de l'étude du fouling dans le lagon de Vairao	82	DOM-TOM du Pacifique
Faimaili, Ntoumas, Hernandez, Delauney, Sivyer, Karlson, Seppala	2016	Report on JERICO Biofouling Monitoring Program (BMP)	26	Manche
Garrabou, Ballesteros, Zabala	2002	Structure and dynamics of north-western Mediterranean rocky benthic communities along a depth gradient	16	Méditerranée
Gleason	1996	Coral recruitment in Moorea, French Polynesia: the importance of patch type and temporal variation	8	Pacifique tropical
Harmelin, Bellan-Santini, Boudouresque, Le Campion -Alsumard, Leung Tack Kit, Salen	1970	Etude expérimentale de la colonisation des surfaces vierges naturelles en eau pure et en eau polluée dans la région marseillaise (conditions de l'expérience)	71	Méditerranée
Labadie, Dubreuil	2010	Inspection des récifs artificiels des sites expérimentaux de l'Île d'Yeu et du Croisic	54	Golfe de Gascogne
Laborde	2010	Suivi scientifique des récifs artificiels Capbreton, Soustons/Vieux Boucau, Messanges/Azur/Moliets	56	Golfe de Gascogne

Auteur(s)	Publi.	Titre	Réf	Zone
Lacoste, Le Moullac, Levy, Gueguen, Gaertner-Mazouni	2014	Biofouling development and its effect on growth and reproduction of the farmed pearl oyster <i>Pinctada margaritifera</i>	7	Pacifique tropical
Lamy	1996	Organisation, structure et dynamique des peuplements macrobenthiques d'une table conchylicole de l'étang de Thau	27	Méditerranée
Mazouni, Gaertner, Deslous-Paoli	2001	Composition of biofouling communities on suspended oyster cultures: an in situ study of thir interactions with the water column	6	Méditerranée
Migné	1996	Rôle des organismes suspensivores dans les transferts pelago-benthiques d'une zone de fort hydrodynamisme	78	Manche
Migné, Davoult	1995	Multi-scale heterogeneity in a macrobenthic epifauna community	77	Manche
Prygiel, Davoult, Dewarumez, Glaçon, Richard	1988	Description et richesse des peuplements benthiques de la partie française de la Mer du Nord	79	Manche
Reynaud	2016	Analyse sur le biofouling présent sur SEM-REV	34	Golfe de Gascogne
Rudeault	2015	Le Wharf de la mine de Dielette Les récifs artificiels	75	Manche
Ruitton, Francour, Boudouresque	2000	Relationships between algae, benthic herbivorous invertebrates and fishes in rocky sublittoral communities of a temperate sea	9	Méditerranée
Taormina	2015	Inventaire de la faune et flore marine et caractérisation des assemblages benthiques des milieux subtidaux rocheux d'un site remarquable de la région de Roscoff : le Plateau de la Méloine	62	Manche

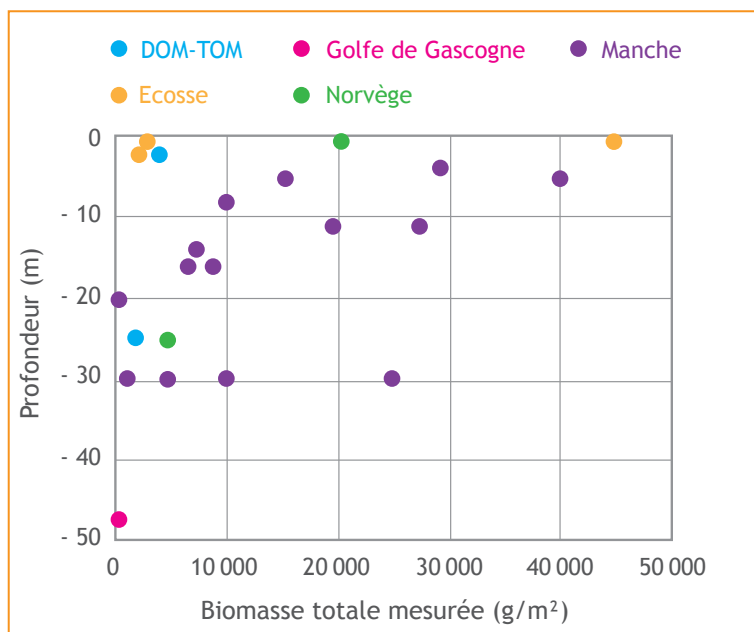
Annexe 2a

Poids frais total moyen (+/- écart type) par classe de profondeur



Annexe 2b

Comparaison des biomasses totales mesurées dans différentes zones : zones Atlas ainsi qu'Ecosse et Suède



This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 20 evenly spaced horizontal grey lines across its entire width, providing a guide for handwriting or typing. The background is a clean, solid white color.



Bâtiment Cap Océan
Technopôle Brest Iroise
525, avenue Alexis de Rochon
29280 **PLOUZANÉ**
02 98 49 98 69
www.france-energies-marines.org

ISBN 978-2-9567155-0-4



© France Energies Marines - 2018