

**IFREMER, Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes**  
**Unité Littoral**  
**Laboratoire Environnement Ressources Bretagne Nord**  
**Station de Dinard**

**Coordination : Aurélie Foveau (Ifremer)**

**Rédaction : Aurélie Foveau (Ifremer)**, Sébastien Aubin (MNHN Dinard), Andréa Lemoine (GEMEL-Normandie), Benjamin Monnier (MNHN Dinard), Elodie Ollivier (GEMEL-Normandie), Emeline Poisson (CSLN), Manuel Rouquette (Ifremer), Olivier Timsit (GEMEL-Normandie)

**Date : Novembre 2023**

# CONTROLE DE SURVEILLANCE BENTHIQUE DE LA DIRECTIVE CADRE SUR L'EAU (2000/60/CE).

## **VOLUME I : MACROINVERTEBRES BENTHIQUES DE SUBSTRATS MEUBLES ANNEE 2021**

**District Seine-Normandie**

## Fiche documentaire

**Titre du rapport : Contrôle de surveillance benthique de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE). Volume I : Macroinvertébrés benthiques de substrats meubles, Année 2021. District Seine-Normandie**

**Référence interne:** ODE/LITTORAL/LERBN-23-019

**Date de publication :** 2023/11/10

**Diffusion :**

libre (internet)

restreinte (intranet) - date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ

interdite (confidentielle) - date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ

**Version :** 1.0.0

**Référence de l'illustration de couverture**

Crédit photo/titre/date

**Langue(s) :**

Français

**Résumé/ Abstract :** Ce rapport présente les résultats des opérations menées lors de l'année 2021 (contrôle de surveillance des invertébrés benthiques) sur l'ensemble des masses d'eau côtières, de transition et des sites d'appui rattachées au district Seine-Normandie.

This report presents results of the monitoring actions in 2021 (on benthic invertebrate communities) in the water bodies of the Seine-Normandie water district.

**Mots-clés/ Key words :** Directive Cadre Eau, Benthos, Réseau de surveillance, Manche European Water Framework Directive, Benthos, Monitoring Network, English Channel

**Comment citer ce document :** Foveau Aurélie, Aubin Sébastien, Lemoine Andréa, Monnier Benjamin, Ollivier Elodie, Poisson Emeline, Rouquette Manuel, Timsit Olivier (2023). **Contrôle de surveillance benthique de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE). Volume I : Macroinvertébrés benthiques de substrats meubles, Année 2021. District Seine-Normandie.** ODE/LITTORAL/LERBN-23-019.

**Disponibilité des données de la recherche :**

**DOI :**

<b>Commanditaire du rapport</b> : Agence de l'Eau Seine-Normandie	
<b>Nom / référence du contrat</b> :	
<input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne <b>du rapport intermédiaire</b> : ODE/LITTORAL/LERBN-23-019/97142)	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit</b> (programme européen, campagne, etc.) :	
Appui à politique publique, DCE-Benthos	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
Aurélié Foveau / aurelie.foveau@ifremer.fr	Ifremer/ODE/LITTORAL, LERBN
Sébastien Aubin	MNHN, Station de Dinard
Andréa Lemoine	GEMEL-Normandie
Benjamin Monnier	MNHN, Station de Dinard
Elodie Ollivier	GEMEL-Normandie
Emeline Poisson	Cellule du Suivi du Littoral Normand
Manuel Rouquette	Ifremer/ODE/LITTORAL, LERBN
Olivier Timsit	GEMEL-Normandie
Contributeur(s) :	
Destinataire : Yann Joncourt, Agence de l'Eau Seine-Normandie	
<b>Validé par</b> : Florence Menet - Ifremer/ODE/LITTORAL/LERN	

## Table des matières

1. Rappel du contexte et des obligations imposées par la directive européenne cadre sur l'eau .....	5
1.1. Rappel des attendus relatifs aux éléments de qualité biologique du benthos marin pour la DCE (Guillaumont & Gauthier, 2005) .....	5
1.2. Rappel des caractéristiques des masses d'eau du district côtier Seine-Normandie...	6
1.3. Partenaires de la mise en œuvre de la surveillance du compartiment benthique en Seine-Normandie .....	7
2. Suivi stationnel des macro-invertébrés benthiques .....	8
2.1. Objectifs de l'étude .....	8
2.2. Stratégie générale .....	8
2.2.1. Prélèvements et analyses biologiques .....	8
2.2.2. Prélèvements et analyses sédimentaires .....	11
2.2.3. Traitement des données .....	11
2.3. Qualification biologique des masses d'eau côtières .....	15
2.3.1. Conditions d'utilisation du M-AMBI .....	17
2.3.2. Traitement de la base de données .....	17
3. Résultats .....	18
3.1. Masses d'eau côtières en domaine intertidal .....	19
3.1.1. Caractéristiques sédimentaires .....	19
3.1.2. Caractéristiques faunistiques .....	21
3.2. Masses d'eau côtières en domaine subtidal .....	25
3.2.1. Caractéristiques sédimentaires .....	25
3.2.2. Caractéristiques faunistiques .....	27
3.3. Masses d'eau de transition en domaines intertidal et subtidal .....	32
4. Synthèse 2018 des indices benthiques .....	34
5. Opérations programmées en 2019 et 2020 .....	36
6. Références bibliographiques .....	37

# 1. Rappel du contexte et des obligations imposées par la directive européenne cadre sur l'eau

## 1.1. Rappel des attendus relatifs aux éléments de qualité biologique du benthos marin pour la DCE (Guillaumont & Gauthier, 2005)

L'application de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) nécessite la mise en place de contrôles pour évaluer l'état écologique des Masses d'Eau Côtières (MEC) et de Transition (MET) avec comme objectif l'atteinte du bon état en 2027. L'ensemble des eaux côtières, dont la limite extérieure s'établit à 1 mille de la ligne de base, et des eaux de transition, correspondant aux eaux de surface situées près des embouchures de rivières/fleuves et partiellement salines mais influencées par les eaux douces, a fait l'objet d'un découpage en Masses d'Eau (ME). Ces ME ont été définies en fonction de leurs caractéristiques physiques ainsi que des pressions qui s'y exercent.

Sur ces ME, différents types de contrôle peuvent être exercés :

- le **contrôle de surveillance**, appliqué sur une sélection de Masses d'Eau considérées comme représentatives en se référant à la typologie préétablie. Les objectifs de cette surveillance sont de « (...) concevoir de manière efficace et valable les futurs programmes de surveillance, évaluer les changements à long terme des conditions naturelles, évaluer les changements à long terme résultant d'une importante activité anthropique. » (Annexe V - art. 1.3.1) ;
- le **contrôle opérationnel**, appliqué sur les Masses d'Eau présentant un Risque de Non Atteinte des Objectifs Environnementaux (RNAOE) d'ici 2027, afin d'en établir l'état et d'en évaluer les changements dus aux programmes de mesure mis en place ;
- le **contrôle additionnel**, requis pour les zones protégées (notamment les zones de protection d'habitat et/ou d'espèces résultant des directives européennes « Oiseaux » et « Habitats », risquant de ne pas répondre à leurs objectifs environnementaux) ;
- le **contrôle d'enquête**, appliqué aux Masses d'Eau présentant un RNAOE pour des raisons inconnues, ainsi qu'aux zones touchées par des pollutions accidentelles, pour lesquelles le benthos est un indicateur privilégié de l'ampleur et de l'incidence des contaminations.

L'article 1.1.4 de l'annexe V de la DCE précise les paramètres biologiques qui participent à l'évaluation de l'état écologique des masses d'eau côtières. Ces derniers se réfèrent à la composition, l'abondance et la biomasse du phytoplancton, à la composition et l'abondance de la flore aquatique (autre que le phytoplancton) et à la composition et l'abondance de la faune benthique invertébrée.

Dans le cadre du contrôle de surveillance du compartiment benthique, la végétation benthique (macroalgues et angiospermes), ainsi que les macroinvertébrés benthiques, doivent obligatoirement être pris en considération.

Pour les contrôles opérationnels, les éléments les plus sensibles sont retenus « (...) afin d'évaluer l'ampleur des pressions auxquelles les masses d'eau de surface sont soumises, les États membres contrôlent les éléments de qualité qui permettent de déterminer les pressions auxquelles la ou les masses sont soumises. Afin d'évaluer l'incidence de ces pressions, les États membres contrôlent (...) les paramètres permettant de déterminer l'élément de qualité biologique ou les éléments qui sont les plus sensibles aux pressions auxquelles les masses d'eau sont soumises (...) ».

A partir du texte de la DCE, des travaux de réflexion ont été conduits au niveau européen (travaux du groupe COAST, aboutissant notamment à des recommandations générales consignées dans le rapport « *Guidance on monitoring* » destiné à guider les stratégies à mettre en œuvre dans chaque pays, travaux des groupes d'intercalibration NEA-GIG), chaque pays restant libre de définir

la stratégie de surveillance la plus adaptée, avec toutefois un impératif d'intercalibration sur le classement relatif à l'état écologique des Masses d'Eau défini selon cinq niveaux (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais - Art. 1.2. de l'annexe V de la DCE).

## 1.2. Rappel des caractéristiques des masses d'eau du district côtier Seine-Normandie

Le district côtier Seine-Normandie est composé de 19 masses d'eau côtières et de sept masses d'eau de transition (les masses d'eau HC06 et HT01M étant divisées en deux (Figure 1)). Au total, 15 masses d'eau côtières ainsi que six masses d'eau de transition, ont été retenues pour le contrôle de surveillance (cf. Guérin *et al.*, 2007 pour la présentation des caractéristiques générales et biologiques des masses d'eau).

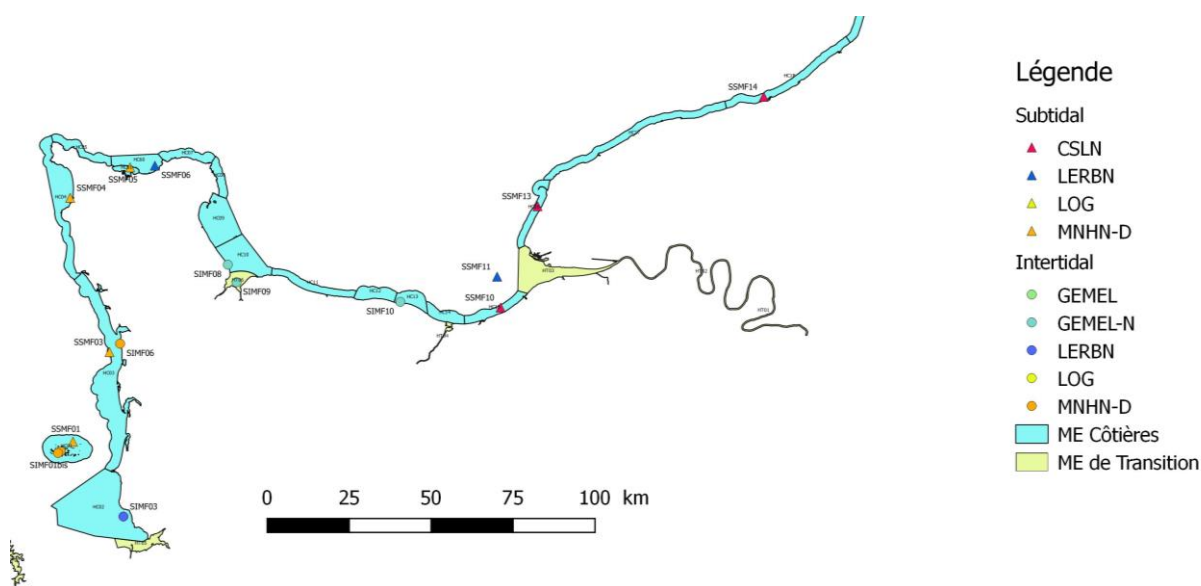


Figure 1 : Localisation des sites d'échantillonnage lors du suivi 2021 et partenaires impliqués.

### 1.3. Partenaires de la mise en œuvre de la surveillance du compartiment benthique en Seine-Normandie

Afin d'assurer la bonne réalisation du contrôle de surveillance pour l'année 2021, quatre partenaires ont été sollicités pour le suivi de l'élément de qualité « Invertébrés benthiques de substrats meubles » (Tableau 1). Les partenaires ayant participé au suivi de l'élément de qualité « Flore autre que phytoplancton » sont présentés dans le volume II de ce rapport.

**Tableau 1 : Répartition entre partenaires des stations de prélèvements pour l'élément de qualité « Invertébrés benthiques de substrats meubles » en Seine-Normandie. IM : Intertidal Meuble, SM : Subtidal Meuble, CS : Contrôle de Surveillance, SA : Site d'Appui**

Partenaires	Sites	Masse d'eau	Substrat	Statut
<b>Muséum National d'Histoire Naturelle de Dinard</b>	SIMF01 - Chausey IM	HC01	IM	SA
	SIMF01bis - Chausey IM	HC01	IM	SA
	SIMF06 - Armanville IM	HC03	IM	SA
	SSMF01 - Chausey SM	HC01	SM	SA
	SSMF03 - Pirou SM	HC03	SM	SA
	SSMF04 - Diélette SM	HC04	SM	SA
<b>CSLN</b>	SSMF05 - Cherbourg SM	HC61	SM	SA
	SSMF10 - Villers-sur-Mer SM	HC15	SM	SA
	SSMF13 - Heuqueville SM	HC16	SM	SA
<b>GEMEL-N</b>	SSMF14 - Dieppe SM	HC18	SM	SA
	SIMF08 - Madeleine IM	HC10	IM	SA
	SIMF10 - Courseulles IM	HC13	IM	SA
	SIMF09 - Brévands IM	HT06	IM	SA
<b>LERBN</b>	SIMF03 - Saint-Jean IM	HC02	IM	SA
	SSMF06 - Cap Lévy SM	HC60	SM	SA
	SSMF11 - Villerville SM	HT03	SM	SA
	SSMF11-2	HT03	SM	CS

## 2. Suivi stationnel des macro-invertébrés benthiques

### 2.1. Objectifs de l'étude

L'étude porte sur le suivi des communautés d'invertébrés benthiques des masses d'eau côtières et de transition du district Seine-Normandie et l'évaluation de leur qualité biologique. Les macro-invertébrés benthiques constituent en effet d'excellents intégrateurs et indicateurs de l'état général du milieu et peuvent permettre notamment, grâce à certains organismes sensibles, d'identifier certaines pressions anthropiques s'exerçant sur ces masses d'eau.

L'élément de qualité « invertébrés benthiques » est défini par :

- « le niveau de diversité et d'abondance des taxa (...) » ;
- tous les taxa sensibles aux perturbations (...) »

Dans le cadre du contrôle de surveillance, le suivi est effectué tous les trois ans, sur 22 sites côtiers (12 stations subtidales et 10 stations intertidales) depuis 2007 et 22 sites localisés en eaux de transition (5 stations subtidales et 17 stations intertidales) depuis 2008.

Afin de compléter le contrôle de surveillance des communautés d'invertébrés benthiques ayant lieu une fois tous les trois ans, un réseau de sites appelés "sites d'appui" a été mis en place avec une fréquence annuelle d'échantillonnage. Ces prélèvements intermédiaires, réalisés en un nombre limité de stations distribuées le long des côtes de la Manche et de l'Atlantique, ont pour but de fournir une information quant à la variabilité spatio-temporelle des communautés benthiques. Selon l'échelle de la variabilité observée, il sera possible de savoir si un phénomène observé par rapport à un état initial est de causalité naturelle ou non et/ou local ou non. A cette fin, une première étude (Goyot *et al.*, 2016) a été conduite dans le but d'identifier d'une part les évolutions des sites d'appui au cours du temps et, d'autre part, les facteurs environnementaux qui influencent ou non ces évolutions.

La façade normande comptait, depuis 2007, quatre sites d'appui situés en domaine intertidal (SIMF01, SIMF09) et subtidal (SSMF06, SSMF11). En 2011, sous l'impulsion de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, ce réseau de stations s'est renforcé par le suivi annuel de dix stations supplémentaires, puis de deux de plus en 2014, distribuées le long du littoral normand.

### 2.2. Stratégie générale

Dans le cadre du contrôle de surveillance conduit sur l'année 2021 (plan de gestion 2016-2021), les sites ont été pris en charge par différents partenaires en fonction de leur localisation géographique (Figure 1) : la station marine de Dinard (MNHN), la Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN) et le Groupe d'Etude des Milieux Estuariens et Littoraux-Normandie (GEMEL-N). Le laboratoire Environnement Littoral de Bretagne-Nord (LERBN) a repris quelques sites le long de la façade Seine-Normandie et Artois-Picardie.

Dans un souci de calibration des méthodes d'acquisition et de qualité de la donnée, le protocole en vigueur depuis 2015 pour l'étude des macro-invertébrés benthiques de substrats meubles en zone côtière est celui défini par Garcia *et al.* (2014). En zone de transition, le protocole à mettre en œuvre est celui de Blanchet et Fouet (2019).

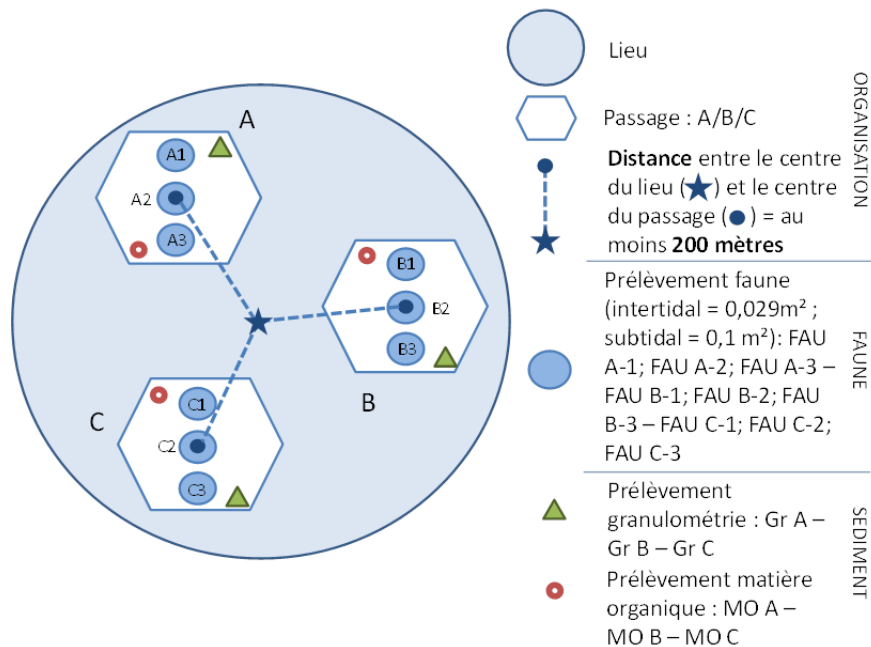
#### 2.2.1. Prélèvements et analyses biologiques

La macrofaune benthique subtidale a été échantillonnée à l'aide d'une benne Van Veen (échantillonnant sur une surface unitaire de 0,1m<sup>2</sup>) à raison de neuf réplicats (trois prélèvements sur chacun des trois passages pour un même site, Figure 2).



En domaine intertidal, les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un carottier à main (0,029 m<sup>2</sup>), à raison de neuf répliquats (trois prélèvements sur chacun des trois passages pour un même site, Figure 2). Le nombre de répliquats et les dates de prélèvement sont résumés dans le Tableau 2.

En zone de transition, les engins de prélèvements sont les mêmes ; les répliquats sont cependant réduits à trois pour un seul passage (Figure 3).



**Figure 2 : Organisation des prélèvements dans le cadre du suivi stationnel en masse d'eau côtière et pour les sites d'appui du paramètre macroinvertébrés benthiques de substrats meubles de la DCE (Garcia et al., 2014).**

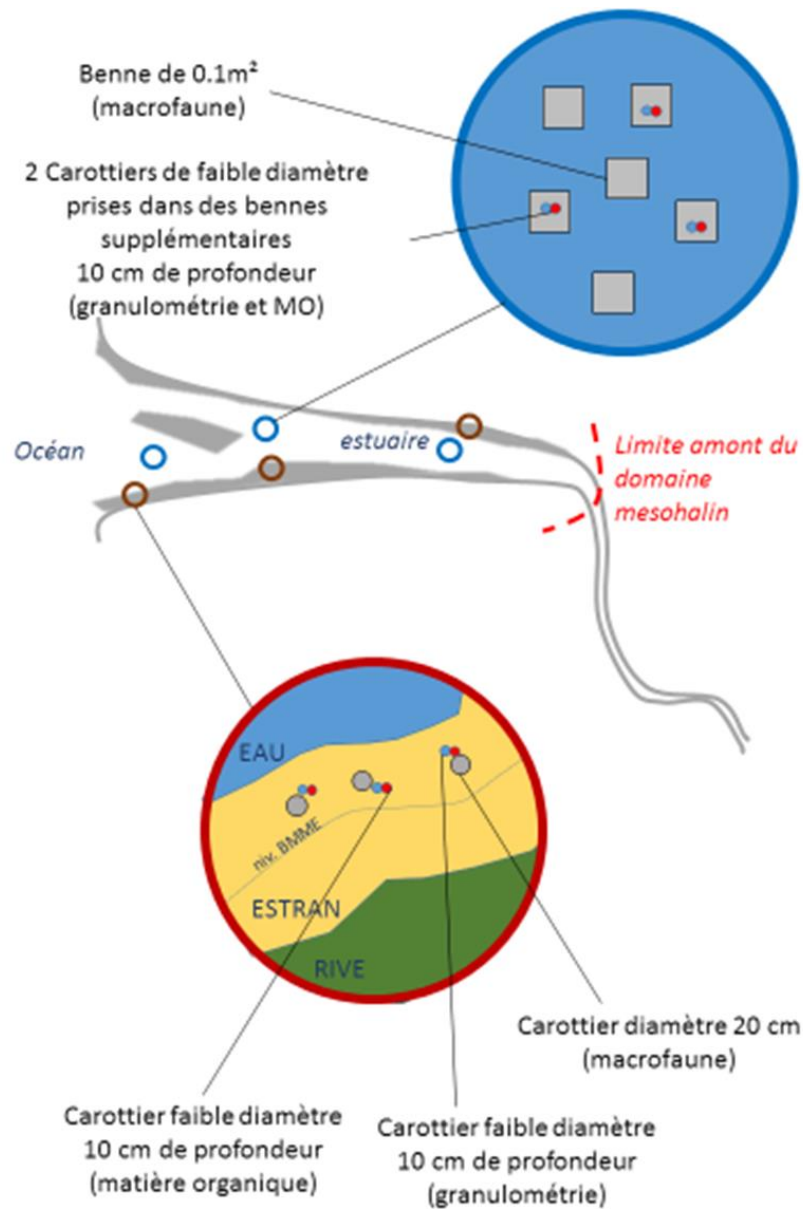


Figure 3 : Organisation des prélèvements dans le cadre du suivi stationnel dans les masses d'eau de transition du paramètre macroinvertébrés benthiques de substrats meubles de la DCE (Blanchet et Fouet, 2019).

**Tableau 2 : RESUME - Prélèvements dans le cadre du suivi stationnel du paramètre macroinvertébrés benthiques de substrats meubles de la DCE (faune). NE : non échantillonné**

Substrat	Engin d'échantillonnage	Nombre de prélèvements	Sites	Masse d'eau	Date		
IM	Carottier à main (0,029 m <sup>2</sup> )	MEC : 9 (3 x 3) Ou MET : 3 (1 x 3)	SIMF01 - Chausey IM	HC01	29/03/2021		
			SIMF01bis - Chausey IM	HC01	30/03/2021		
			SIMF06 - Armanville IM	HC02	27/04/2021		
			SIMF08 - Madeleine IM	HC10	13/04/2021		
			SIMF10 - Courseulles IM	HC13	31/03/2021		
		SM	Benne Van Veen (0,1 m <sup>2</sup> )	MEC : 9 (3 x 3) Ou MET : 3 (1 x 3)	SIMF09 - Brévands IM	HT06	06/10/2021
					SIMF03 - Saint-Jean IM	HC02	03/03/2022
					SSMF01 - Chausey SM	HC01	02/03/2021
					SSMF03 - Pirou SM	HC03	02/03/2021
					SSMF04 - Diélette SM	HC04	02/03/2021
SM	Benne Van Veen (0,1 m <sup>2</sup> )	MEC : 9 (3 x 3) Ou MET : 3 (1 x 3)	SSMF05 - Cherbourg SM	HC61	03/03/2021		
			SSMF10 - Villers-sur-Mer SM	HC15	03/03/2021		
			SSMF13 - Heuqueville SM	HC16	03/03/2021		
			SSMF14 - Dieppe SM	HC18	04/03/2021		
			SSMF06 - Cap Lévy SM	HC60	03/03/2021		
			SSMF11 - Villerville SM	HT03	03/03/2021		
			SSMF11-2	HT03	03/03/2021		

Les prélèvements ont été tamisés sur une maille de 1 mm (ronde pour le domaine subtidale ou carrée pour le domaine intertidal), puis les refus ont été fixés et conservés dans une solution de formaldéhyde (de 4 à 10%). Les organismes ont ensuite été déterminés et dénombrés spécifiquement. Certains groupes peuvent faire exception (Bryozoa, Chaetognatha, Copepoda, Ctenophora, Echiura, Hemichordata, Hydrozoa, Insecta, Nemertea, Nematoda, Oligochaeta, Ostracoda, Phoronida, Platyhelminthes, Pogonophora, Priapulida). Les noms d'espèces déterminées ont été actualisés selon le référentiel officiel international : World Register of Marine Species (WoRMS ; adossement réalisé en 2021).

### 2.2.2. Prélèvements et analyses sédimentaires

Un prélèvement supplémentaire de sédiment a été effectué au sein de chaque site afin de déterminer la distribution granulométrique du sédiment. Il a été réalisé par échantillonnage vertical avec un tube de 3 à 5 cm de diamètre sur 5 cm de profondeur en domaine intertidal. En domaine subtidal, le prélèvement est réalisé par sous-échantillonnage dans une benne additionnelle dédiée aux analyses sédimentaires.

Après désalinisation, le sédiment a été séché dans une étuve à 60°C pendant 48 heures. Pour les échantillons présentant une fraction fine (<63 µm) importante, le sédiment a été rincé sur un tamis AFNOR 63 µm ; la partie fine récupérée a été mise à sécher (60°C pendant 48h) pour obtenir le poids sec. Le refus de sédiment (> 63 µm) a ensuite été tamisé à sec sur une colonne vibrante de 26 tamis de maille décroissante (de 20 à 0,063 mm). Les refus de tamis ont été pesés au centième de gramme près.

Un second prélèvement de sédiment a également été réalisé dans chaque site selon le même procédé pour quantifier la teneur totale en matière organique. Il a été conservé à l'abri de la lumière au congélateur -20°C. Après décongélation, la teneur en matière organique des sédiments a été déterminée sur la fraction totale par la méthode de perte au feu : 4 heures à 450°C. La différence de poids, exprimée en pourcentage, indique la teneur en matière organique de l'échantillon.

### 2.2.3. Traitement des données

#### **Analyses sédimentaires**

Les indices et paramètres granulométriques permettant de caractériser le sédiment ont été calculés grâce au package G2Sd développé par Fournier *et al.* (2014). Ont ainsi été déterminés :

- la texture du sédiment et les histogrammes de distributions des fréquences de classes granulométriques (classification de Blott&Pye, 2001 ; Tableau 3). Les sédiments fins étant particulièrement visés par ce protocole dans le cadre de la DCE, seules sept classes ont été retenues pour décrire le sédiment : les vases (<63µm), les cinq classes de sable telles que définies dans le programme GRADISTAT, et la fraction supérieure à 2mm, appelée plus loin « graviers » ;
- la médiane ou D50 (paramètre de position), qui donne une estimation de la taille moyenne des grains ;
- l'indice de Trask (ou Sorting-Index)  $S_o$ , paramètre de dispersion, où  $Q_{25}$  et  $Q_{75}$  sont les quartiles (Équation 1).

**Équation 1 : indice de Trask  $S_o$**

$$S_o (mm) = \sqrt{\frac{Q_{25} (mm)}{Q_{75} (mm)}}$$

**Tableau 3 : Comparaison des classifications de Blott&Pye (GRADISTAT program, 2001), Udden (1914), Wentworth (1922) et Friedman & Sanders (1978).**

Grain size		Descriptive terminology		
phi	mm/ $\mu$ m	Udden (1914) and Wentworth (1922)	Friedman and Sanders (1978)	GRADISTAT program
			Very large boulders	
-11	2048 mm		Large boulders	Very large
-10	1024		Medium boulders	Large
-9	512	Cobbles	Small boulders	Medium
-8	256		Large cobbles	Small
-7	128		Small cobbles	Very small
-6	64			
-5	32			Very coarse pebbles
-4	16	Pebbles	Coarse pebbles	Coarse
-3	8		Medium pebbles	Medium
-2	4		Fine pebbles	Fine
-1	2		Granules	Very fine pebbles
0	1		Very coarse sand	Very coarse
1	500 $\mu$ m		Coarse sand	Coarse
2		250	Medium sand	Medium
3		125	Fine sand	Fine
4		63	Very fine sand	Very fine
5	31		Very coarse silt	Very coarse
6	16	Silt	Coarse silt	Coarse
7	8		Medium silt	Medium
8	4		Fine silt	Fine
9	2		Very fine silt	Very fine
		Clay	Clay	Clay

Le sédiment est homogène pour un indice de 1. Le Tableau 4 issu de Fournier *et al.* (2012) récapitule les classements.

**Tableau 4 : Classement du sédiment en fonction de l'indice de Trask ( $S_o$ ) (Fournier *et al.*, 2012).**

$S_o$	Classement
<b>1 à 1,17</b>	Très bien classé
<b>1,17 à 1,20</b>	Bien classé
<b>1,20 à 1,35</b>	Assez bien classé
<b>1,35 à 1,87</b>	Moyennement classé
<b>1,87 à 2,75</b>	Mal classé
<b>&gt; 2,75</b>	Très mal classé

## **Analyse de la dynamique temporelle des communautés benthiques**

Grâce à la mise en place, depuis 2007, du réseau de sites d'appui, il est maintenant possible de commencer à analyser de manière plus pertinente l'évolution temporelle de la composition des communautés benthiques.

Les communautés faunistiques ont été caractérisées par des indices de diversité communément utilisés par la communauté scientifique :

- *La richesse taxonomique (S)* correspond au nombre de taxa présents dans une communauté
- *L'abondance (N)* correspond au nombre d'individus présent dans 0,1m<sup>2</sup>.
- *L'indice de Pielou (J')* est compris entre 0 et 1 et correspond à une mesure de la répartition des espèces au sein d'une communauté donnée. Si la valeur est 0, la communauté est dominée par une seule espèce et si la valeur est 1, les espèces sont présentes dans les mêmes proportions.

De façon générale, les abondances d'espèces suivent une distribution asymétrique, certaines espèces pouvant atteindre des abondances telles qu'elles écrasent statistiquement la présence d'autres espèces. Lorsque nécessaire, la matrice des abondances a donc été transformée par la fonction racine carrée pour réduire l'importance des espèces très abondantes et donner d'avantage de poids aux espèces moins représentées, tout en conservant l'ordre de dominance entre les espèces communes (Thorne *et al.*, 1999).

Dans un premier temps, une analyse d'ordination par Positionnement Multidimensionnel non Métrique (n-MDS) des sites a permis de visualiser leur répartition au travers de l'étagement (intertidal et subtidal) et du type de masse d'eau (côtier et de transition). Cette analyse est basée sur une matrice de distance de Bray-Curtis réalisée à partir des abondances moyennes des espèces rapportées à 0,1m<sup>2</sup>.

Une analyse MDS a permis de traduire dans un plan en deux dimensions les données de la matrice de distance entre les communautés benthiques des différents sites étudiés. De façon générale, plus les sites sont proches sur le graphique, plus les communautés sont similaires. Dans le cas d'une analyse n-MDS, le but est de représenter les distances entre les objets, en respectant l'ordre entre les proximités plutôt que leurs valeurs exactes.

Le regroupement des sites, représenté par la n-MDS au travers des différents facteurs, a été évalué au moyen d'une analyse de variance multivariée par permutation (PermAnova ; Anderson, 2005). Cette analyse permet de vérifier s'il existe une réelle différence entre ces facteurs. Cette méthode statistique non paramétrique est basée sur des permutations, elle s'absout donc des conditions d'applications normalement requises en statistique paramétrique comme par exemple la normalité des résidus (Anderson et Legendre, 1999). En fonction des résultats de la PermAnova, les modalités des facteurs significatifs seront traitées séparément.

Au sein de chaque facteur significatif, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) utilisant une matrice de similarité (1-D<sub>BC</sub>, D<sub>BC</sub> : dissimilarité de Bray-Curtis) a permis de définir des groupes en utilisant un seuil de similarité arbitraire de 20%. La CAH consiste à regrouper les passages (année\_site) les plus proches sous forme d'un dendrogramme, dont la longueur des branches représente la distance moyenne entre les passages et groupes de passages, c'est-à-dire leur pourcentage de similarité. La pertinence de la différenciation des groupes a été évaluée à l'aide d'une PermAnova.

Les variations de richesses spécifiques moyennes et d'abondances moyennes ont été testées entre les différents groupes par une analyse de variance (ANOVA) suivie d'un test post-hoc de Tukey discriminant les groupes entre eux. Le test de Tukey consiste à comparer chaque paire de moyennes comme si ces deux moyennes pouvaient être la plus grande et la plus petite dans l'ensemble des *n* moyennes à comparer.

Pour chaque groupe, les espèces caractéristiques intra-groupes ont été déterminées grâce à la méthode IndVal. Cet indice créé par Dufrêne et Legendre (1997) a pour objectif de caractériser des groupes par un assemblage d'espèces. Il se base sur la spécificité (A) qui correspond à l'abondance d'une espèce (j) dans un groupe (k) plutôt qu'un autre et la fidélité (B) qui correspond à l'occurrence d'une espèce (j) dans un groupe (k) plutôt qu'un autre (Équation 2).

**Équation 2 : Méthode IndVal - Dufrêne & Legendre (1997)**

$$IndVal_{(groupe\ k, espèce\ j)} = 100 \times A_{kj} \times B_{kj}$$

Enfin, la contribution des espèces à la dissimilarité inter-groupe a été évaluée à l'aide de la routine SIMPER (SIMilarity PERcentage ; Clarke, 1993). Pour différencier les groupes, la méthode SIMPER calcule la dissimilarité de Bray-Curtis moyenne entre tous les groupes (c'est-à-dire tous les sites appartenant au groupe 1 versus tous les sites appartenant au groupe 2). Comme la dissimilarité de Bray-Curtis intègre la contribution de chaque élément (par exemple, chaque espèce), la dissimilarité moyenne entre les sites d'un groupe et les sites d'un autre groupe peut être exprimée comme la contribution moyenne de chaque espèce.

### 2.3. Qualification biologique des masses d'eau côtières

L'indice idéal, qui résume en une valeur unique représentative d'une somme importante d'informations écologiques sur les communautés benthiques, doit répondre à deux conditions :

- être indépendant des facteurs externes : il doit être indépendant de la surface totale de l'échantillonnage, du type d'habitat, du degré d'identification taxonomique ;
- être capable de refléter les différences entre les communautés qu'il s'agisse de la richesse spécifique, de l'équitabilité de la distribution des espèces ou du caractère sensible ou tolérant des espèces, en relation avec les facteurs de perturbation. C'est ce qui définit son pouvoir discriminant.

De nombreux outils ont été développés afin de répondre aux exigences de la Directive européenne Cadre sur l'Eau pour l'évaluation de la qualité des eaux côtières.

L'indicateur retenu par la France, à l'issue de sa participation à l'exercice européen d'intercalibration au sein du GIG-NEA, est le M-AMBI.

Cet indice, version améliorée de l'AMBI développé par A. Borja et son équipe (Borja *et al.*, 2000; Muxika *et al.*, 2007) repose :

- sur la reconnaissance dans la communauté de cinq groupes écologiques de polluosensibilités, comme proposé par Hily (1984) (Tableau 5). Cet indice est basé sur la pondération de chaque groupe écologique par une constante qui représente le niveau de perturbation auquel les espèces sont associées, selon la formule (Équation 3) :

**Équation 3 : AZTI Marine Biotic Index - AMBI**

$$AMBI = (0 \times \%GI) + (1,5 \times \%GII) + (3 \times \%GIII) + (4,5 \times \%GIV) + (6 \times \%GV)$$

Tableau 5 : Groupes écologiques de polluo-sensibilités différentes (d'après Hily, 1984).

Groupe	Type d'espèces	Caractéristiques	Groupes trophiques
I	sensibles à une hypertrophisation	- largement dominantes en conditions normales - disparaissent les premières lors de l'enrichissement en matière organique du milieu - dernières à se réinstaller	suspensivores, carnivores sélectifs, quelques dépositivores tubicoles de sub-surface
II	Indifférentes à une hypertrophisation	- espèces peu influencées par une augmentation de la quantité de MO	carnivores et nécrophages peu sélectifs
III	Tolérantes à une hypertrophisation	- naturellement présentes dans les vases, mais, leur prolifération étant stimulée par l'enrichissement du milieu, elles sont le signe d'un déséquilibre du système	- dépositivores tubicoles de surface profitant du film superficiel chargé en MO
IV	Opportunistes de second ordre	- cycle de vie court (souvent <1 an) proliférant dans les sédiments réduits	dépositivores de sub-surface
V	Opportunistes de premier ordre	▪ - prolifèrent dans les sédiments réduits sur l'ensemble de leur épaisseur jusqu'à la surface	dépositivores

- sur la richesse spécifique (S), ou nombre d'espèces présentant au moins un individu pour la station étudiée ;
- sur l'indice de diversité de Shannon-Weaver (H', Équation 4)

#### Équation 4 : Indice de Shannon-Weaver

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

Où :  $p_i$  est la proportion de l'espèce  $i$  dans le nombre total d'individus du milieu d'étude.  $i$  allant de 1 à S.

Ces paramètres sont calculés pour toutes les stations. Avec le jeu de données résultant, une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) est réalisée, déterminant trois axes perpendiculaires minimisant le critère des moindres carrés. La projection dans ce nouveau repère des deux points de référence correspondant à l'état le plus dégradé et l'état le meilleur, permet de définir un nouvel axe sur lequel est projeté l'ensemble des points des stations (Figure 4). Pour chacun de ces points, la distance qui le sépare du point le plus dégradé est calculée, en considérant que le segment de droite du point le plus dégradé à celui du meilleur état, a une longueur de 1. Cette distance bornée par 0 et 1 est le M-AMBI.

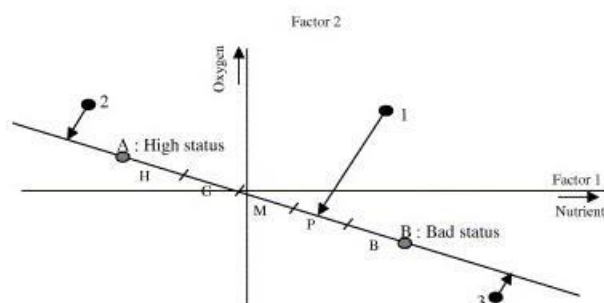


Figure 4 : Définition du statut des stations échantillonnées par projection sur l'axe factoriel défini par les conditions de référence (d'après Bald et al., 2005).

En Seine-Normandie, les stations échantillonnées se réfèrent à deux types d'environnements hydrosédimentaires : i) des sables fins plus ou moins envasés subtidiaux, ii) des sables fins plus ou



moins envasés intertidaux, auxquelles correspondent deux conditions de référence distinctes (Tableau 6).

**Tableau 6 : Conditions de référence retenues pour le calcul de la valeur de M-AMBI dans les eaux côtières.**

Environnement hydrosédimentaire	Etat	S	H'	AMBI
Sables fins plus ou moins envasés subtidaux	Très bon	58	4	1
	Mauvais	1	0	6
Sables fins plus ou moins envasés intertidaux	Très bon	35	4	1
	Mauvais	1	0	6

La grille de lecture du M-AMBI, telle qu'adoptée par la France au sein du GIG-NEA, est la suivante :

Classes	[0 ; 0,2]	] 0,2 ; 0.39]	] 0,39 ; 0,53]	] 0,53 ; 0,77]	] 0,77 ; 1]
Etat écologique	Mauvais	Médiocre	Moyen	Bon	Très bon

### 2.3.1. Conditions d'utilisation du M-AMBI

Malgré le fait qu'il soit parlant pour tous, simple d'utilisation (grâce au logiciel AMBI) et déjà testé et validé sur un large spectre de données, le M-AMBI doit être manipulé et interprété avec précautions.

D'après Borja (2013) :

- la richesse spécifique (S) doit être supérieure à 4 ;
- l'abondance (N) doit être supérieure à 6 ;
- le pourcentage de taxa Non-Assignés (% NA) à un groupe écologique doit être inférieur à 20% ;
- les taxa doivent être actualisés et les synonymes identifiés avant l'assignation à un groupe écologique ;
- la surface d'échantillonnage doit être identique pour tous les prélèvements ;
- un minimum 50 sites est recommandé pour optimiser la robustesse du M-AMBI.

### 2.3.2. Traitement de la base de données

D'après Borja et Muxika (2005), la robustesse de l'AMBI et donc du M-AMBI, peut être réduite par des événements locaux (faible salinité, stress naturel, impact physique) qui génèrent une augmentation des espèces opportunistes et par la suite, une augmentation des valeurs de AMBI, entraînant à une mauvaise classification.

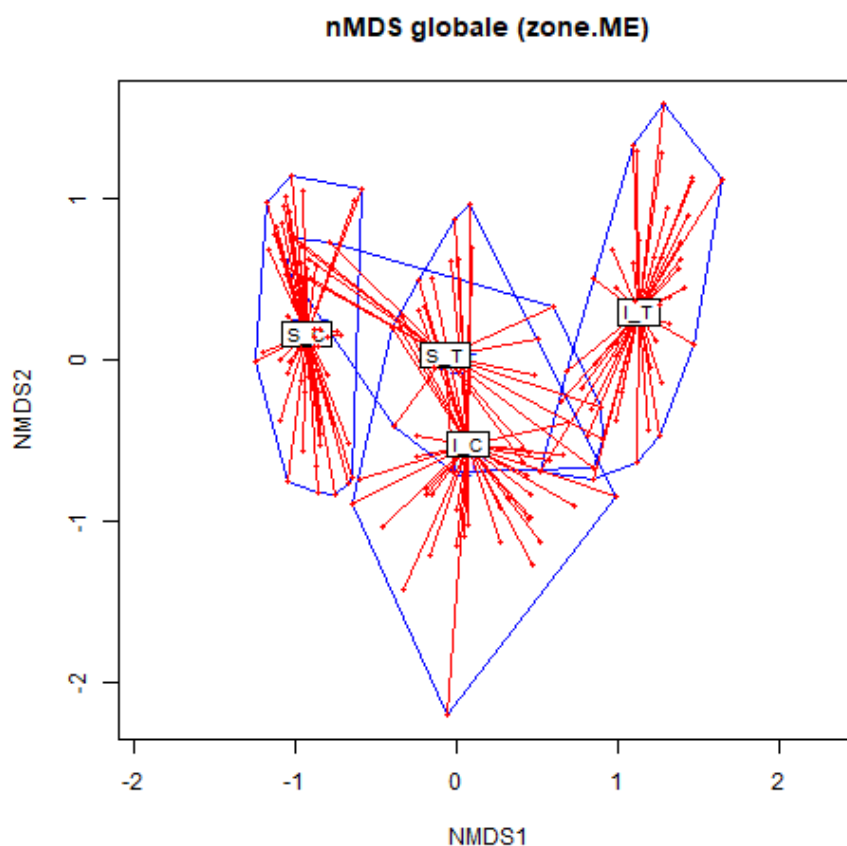
L'analyse structurale des communautés est là pour minimiser ce type de confusion mais afin que l'indice soit le plus réaliste possible, la base de données a subi quelques aménagements. Ainsi les taxa qui n'appartiennent pas aux invertébrés benthiques de substrats meubles des eaux côtières ont été exclus de la base. La norme ISO/FDIS 16665 :2005 (F) et le protocole de Guérin et Desroy (2008), préconisent d'identifier jusqu'au niveau spécifique les organismes prélevés, en tenant compte du fait que certains taxa ne peuvent être identifiés qu'à un niveau supérieur. Hormis s'ils sont référencés dans la liste d'espèces actualisée en 2012, les hauts niveaux taxonomiques n'ont pas été pris en compte.

### 3. Résultats

Dans cette partie, seuls les résultats synthétiques sont présentés. Les données brutes sont disponibles dans la base de données Quadrigé<sup>2</sup>.

La composition et la structure des communautés benthiques sont conditionnées par de nombreux facteurs environnementaux. Parmi ces facteurs, la nature du substrat (roche, cailloutis et graviers, sables, vases, etc.), le mode d'exposition à la houle et aux courants (côte battue, abritée, etc.), la profondeur, les apports d'eau douce par les rivières sont prépondérants. Le domaine intertidal est soumis à des pressions et des variations des conditions environnementales (dessiccation, température, éclaircissement) plus marquées que le domaine subtidal. Les zones de transition influencées par les apports d'eau douce des fleuves et rivières connaissent également de fortes variations (salinité, turbidité, enrichissement en éléments nutritifs...).

Au vu de ces différences, et comme cela l'est confirmé par une analyse de variance par permutation (PermAnova : p-value <0.001, stress : 0,11), les données ont été traitées selon la combinaison du domaine (intertidal ou subtidal) couplé au type de masse d'eau (côtières ou de transition ; voir la Figure 5).



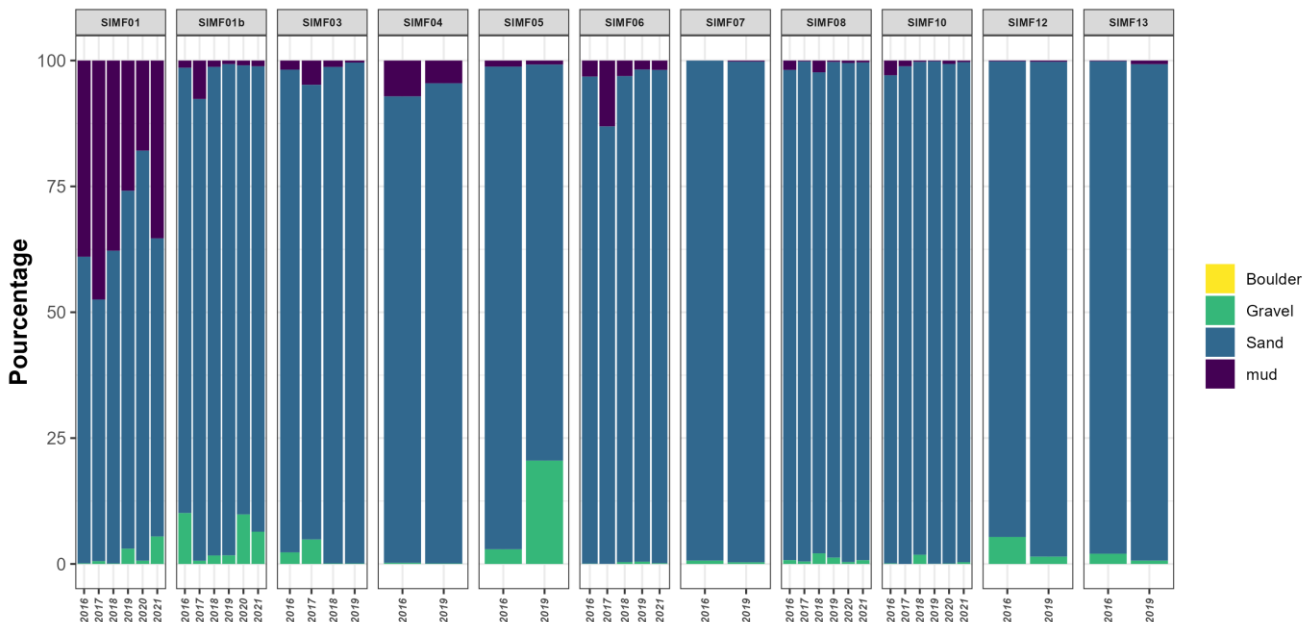
**Figure 5 : Multi-DimensionalScaling (n-MDS) de l'ensemble des sites suivis en Seine-Normandie entre 2016 et 2021. Avec S\_C : Subtidal Côtier, S\_T : Subtidal de Transition, I\_C : Intertidal Côtier et I\_T : Intertidal de Transition.**

Sur l'ensemble des sites suivis entre 2016 et 2021, 453 381 individus appartenant à 1015 taxa ont été identifiés : 463 annélides polychètes, 308 arthropodes, 166 mollusques, 24 échinodermes, 54 autres (anthozoaires, bryozoaires, hydrozoaires, insectes, oligochètes, némerthes, siponcles...).

## 3.1. Masses d'eau côtières en domaine intertidal

### 3.1.1. Caractéristiques sédimentaires

A l'exception du site de Chausey (SIMF01), l'ensemble des paramètres granulométriques est relativement stable au sein des sites côtiers intertidaux pour la période 2016-2021. Selon la classification de Blott&Pye (2001), la plupart de ces sédiments sont caractérisés par des sables plus ou moins envasés (Figure 6) homogènes (indice de Trask inférieur à 2,75 ; Figure 7B). En 2021, la station SIMF01 voit le pourcentage de graviers augmenter à nouveau.



**Figure 6 : Distribution des fréquences de classes granulométriques caractérisant les sites côtiers en domaine intertidal pour la période 2016-2021.**

Le site de Chausey (SIMF01) présente le pourcentage en particules fine (<63 µm) le plus élevé des sites côtiers intertidaux (Figure 6). Cette teneur en particule fines semble s'être stabilisée suite à un envasement entre 2009 et 2010. En 2021, la valeur moyenne de la médiane granulométrique de ce site atteint une valeur de 95 µm (Figure 7A). Au regard de l'indice de Trask, le sédiment de ce site évolue et passe de « très mal classé » à « mal classé » (période 2016-2021 ; Figure 7B). En effet, il est principalement composé de vase et de débris coquilliers (en particulier de coquilles de gastéropodes pouvant faire fortement varier la teneur en particules grossières). En 2021, la proportion de sables sur cette station représente la seconde plus faible valeur de toute la période 2016-2021. Ce sédiment possède également la teneur en matière organique moyenne la plus élevée pour la période 2016-2021 ( $3,26 \pm 0,69$  %, Figure 8).

Les sites SIMF01b, SIMF03, SIMF05, SIMF07, SIMF10, SIMF12 et SIMF13 présentent les médianes granulométriques moyennes les plus élevées sur la période 2016-2021. Pour le site SIMF03, la médiane granulométrique est la plus variable et a diminué depuis 2017 (Figure 7A). La médiane du site SIMF01b augmente progressivement depuis 2019. Quant à la médiane du site SIMF10, elle est la plus variable sur la période considérée.

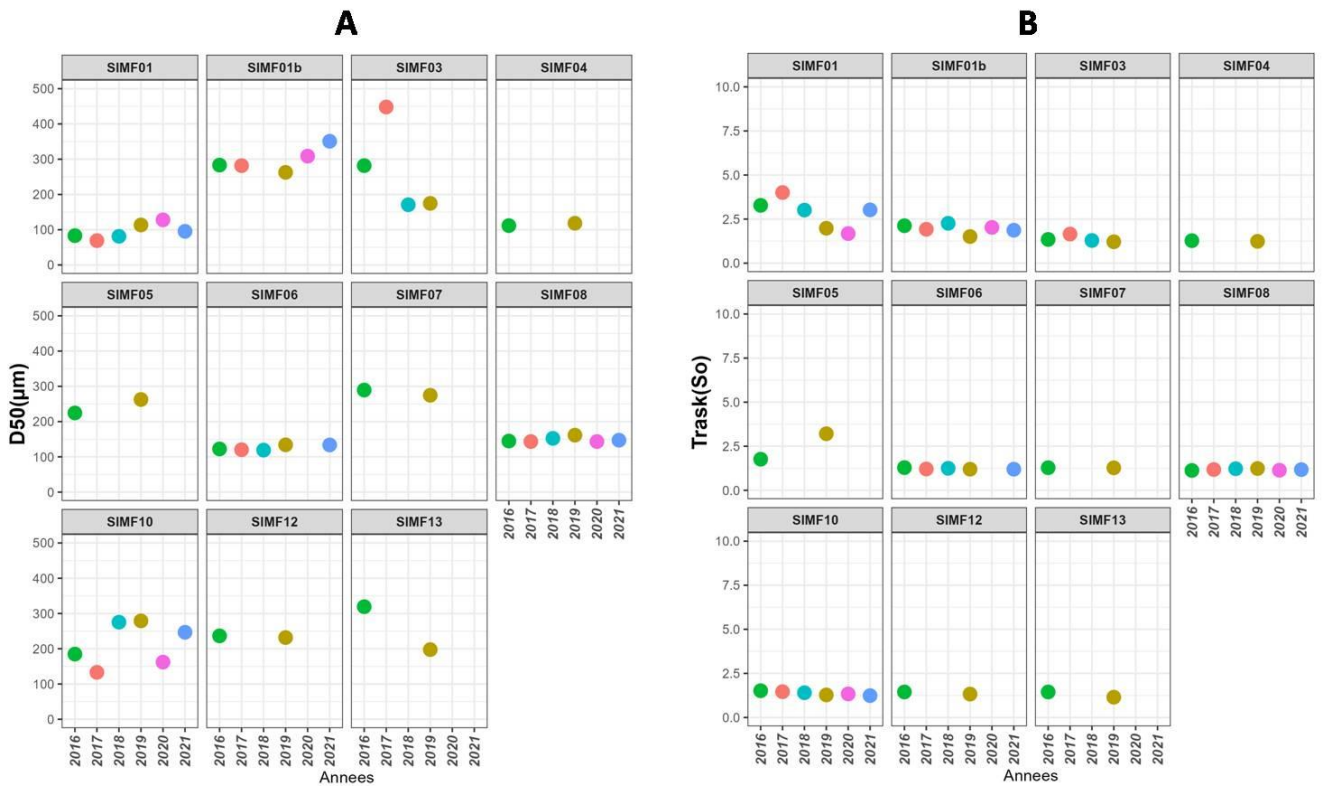


Figure 7 : Évolution des paramètres sédimentologiques des sites côtiers en domaine intertidal, 2016-2021.  
**A** : médiane granulométrique (D50, μm), **B** : indice de Trask (So).

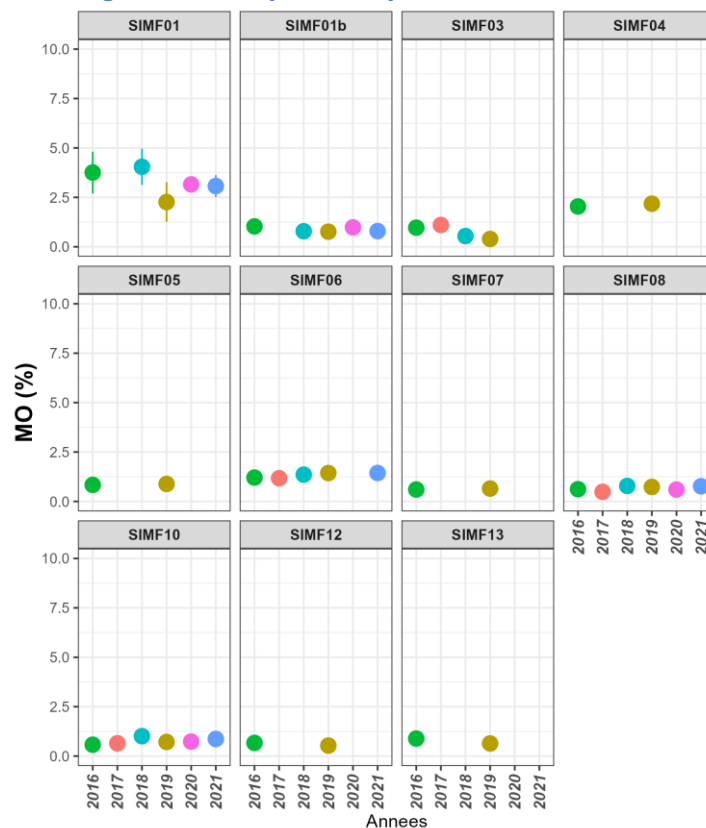
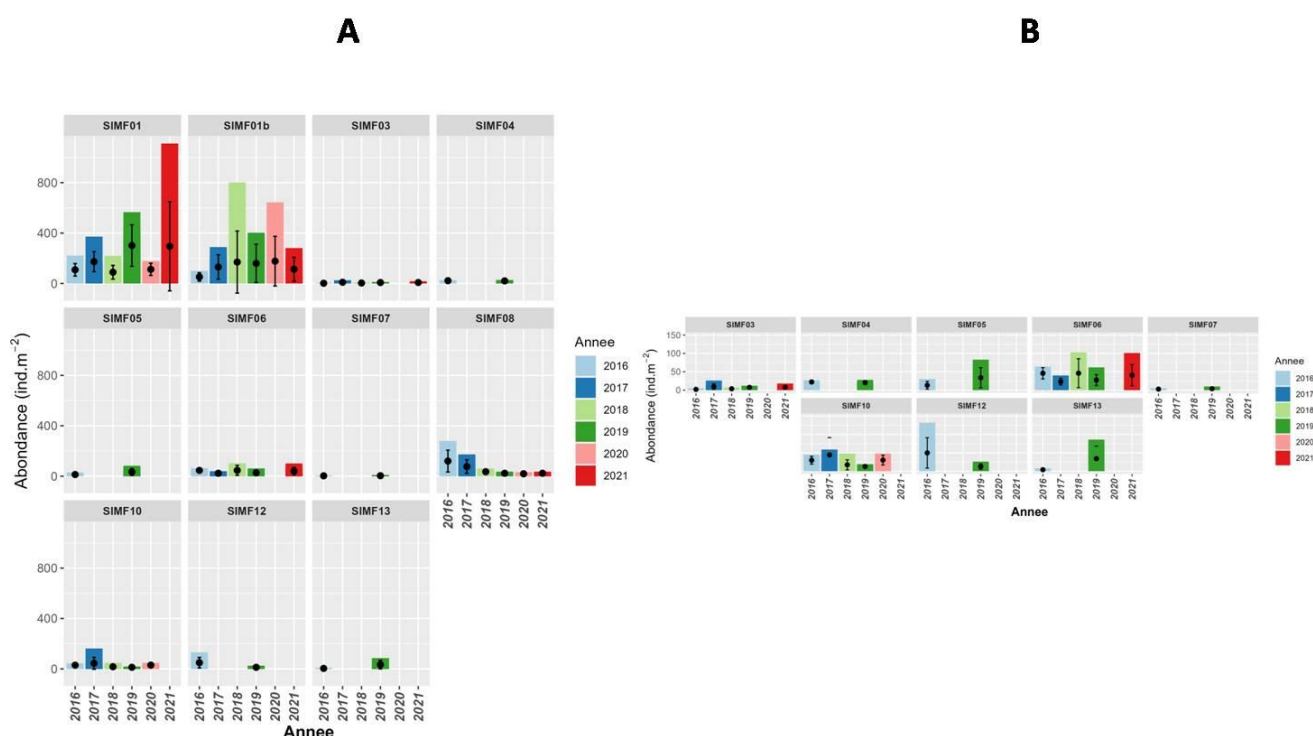


Figure 8 : Évolution des paramètres sédimentologiques des sites côtiers en domaine intertidal, 2016-2021 :  
teneur en matière organique (MO).

### 3.1.2. Caractéristiques faunistiques

#### Abondances

L'abondance moyenne sur les 11 sites intertidaux côtiers durant la période 2016-2021 est de  $63 \pm 49$  ind. $0,1m^{-2}$ , avec une abondance moyenne maximale 2016-2021 atteinte sur un site de Chausey en 2019 (SIMF01 :  $301$  ind. $0,1m^{-2}$  ; Figure 9A). Le second site de Chausey (SIMF01b) présente également une forte abondance moyenne 2016-2021 sur trois années de suivi (2018, 2019 et 2020 avec respectivement  $170 \pm 246$  ind. $0,1m^{-2}$ ,  $160 \pm 152$  ind. $0,1m^{-2}$  et  $177 \pm 197$  ind. $0,1m^{-2}$ ). En 2021, les abondances des sites de Chausey sont variables : en baisse pour le site SIMF01b et en hausse pour le site SIMF01. L'abondance moyenne 2016-2021 minimale est observée sur le site de Saint-Jean-le Thomas en 2016 (SIMF07 :  $2 \pm 1,5$  ind. $0,1m^{-2}$ ). L'évolution des sites suivis en 2021 par rapport aux années antérieures est variable en fonction des lieux.



**Figure 9 : Abondance moyenne (ind. $0,1m^{-2} \pm$  écart-type). Sites intertidaux côtiers pour la période 2016-2021. (barres colorées : abondance maximale, points noirs : abondance moyenne et écart-type). A : 11 stations intertidales côtières ; B : zoom sur les stations avec des abondances plus faibles.**

#### Indices de diversité : Richesse taxinomique (S) et équitabilité (J')

Un total de 350 taxa a été identifié entre 2016 et 2021 sur l'ensemble des 11 sites intertidaux côtiers. La richesse taxinomique moyenne 2016-2021 sur l'ensemble des sites est de  $9 \pm 3$  taxa avec une S moyenne 2016-2021 maximale atteinte sur un site de Chausey en 2021 (SIMF01 :  $17 \pm 6$  taxa) et une S moyenne 2016-2021 minimale observée sur le site de Saint-Jean le Thomas en 2016 (SIMF03 :  $1,14 \pm 0,38$  taxa ; Figure 10).

La proportion d'individus est bien répartie entre les espèces (Figure 11). Sur l'ensemble des suivis 2016-2021, 77% des indices de Pielou (J') calculés par couple année/site sont supérieurs à 0,6, 2% sont compris entre 0,4 et 0,6. Quelques valeurs de l'indice de Pielou sont faibles et traduisent la dominance d'un taxon. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées sur le site SIMF08 en 2016 et sont liées à la dominance de l'annélide *Pygospio elegans*.

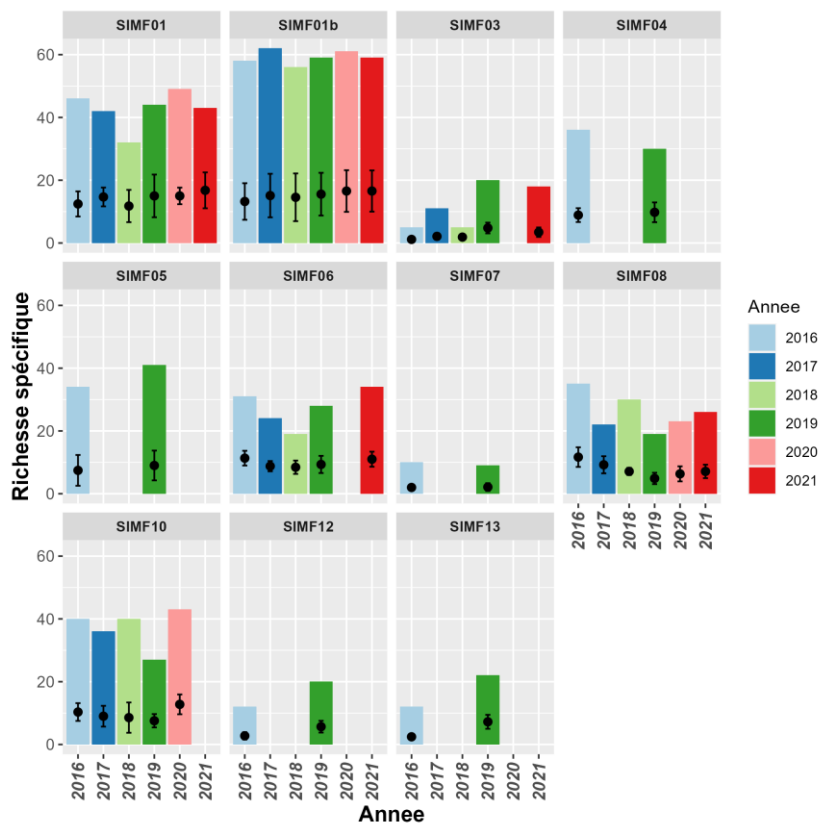


Figure 10 : Richesse taxonomique (S) des sites côtiers en domaine intertidal - 2016-2021 (barres colorées : richesse maximale, points noirs : richesse moyenne et écart-type)

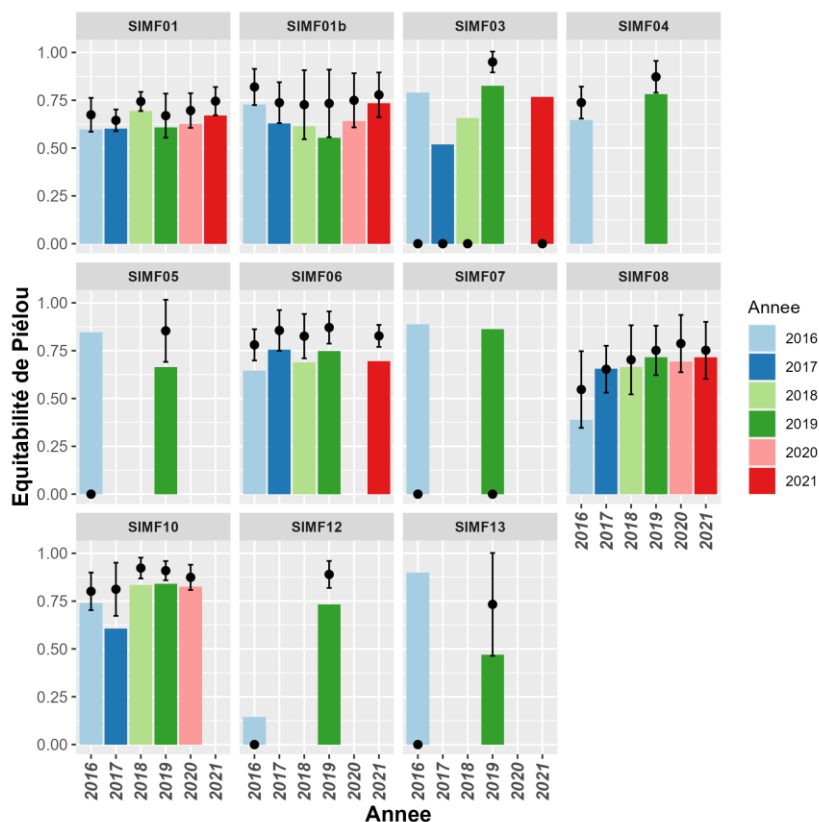
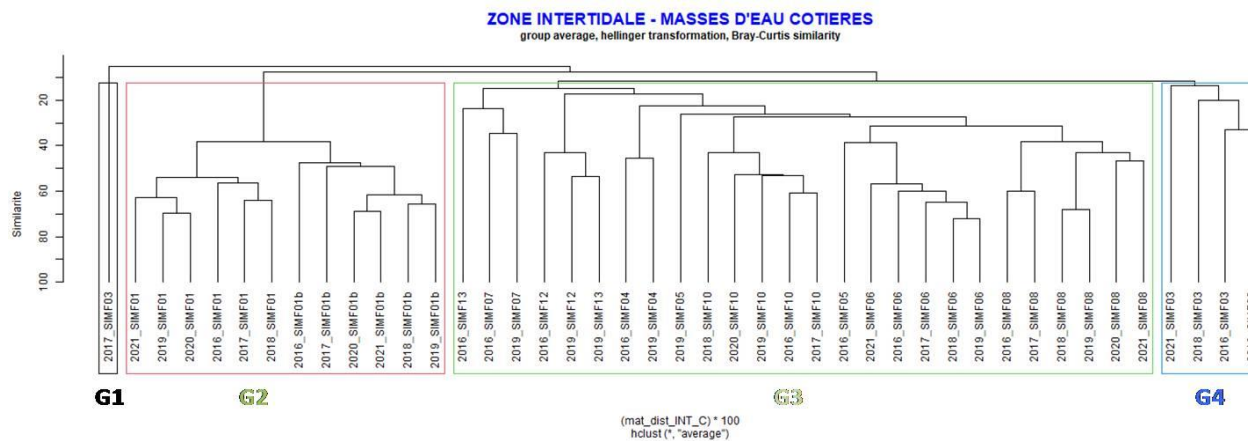


Figure 11 : Indice de Piélou (J') - sites côtiers en domaine intertidal - 2016-2021 (barres colorées : indice de Piélou maximal, points noirs : indice de Piélou moyen et écart-type).

## Détermination des communautés

Les groupes déterminés *a priori* grâce à la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de similarité (distance de Bray-Curtis) entre les sites en domaine intertidal des masses d'eau côtières sont significativement différents (PermAnova : p-value < 0,001 ; Figure 12).



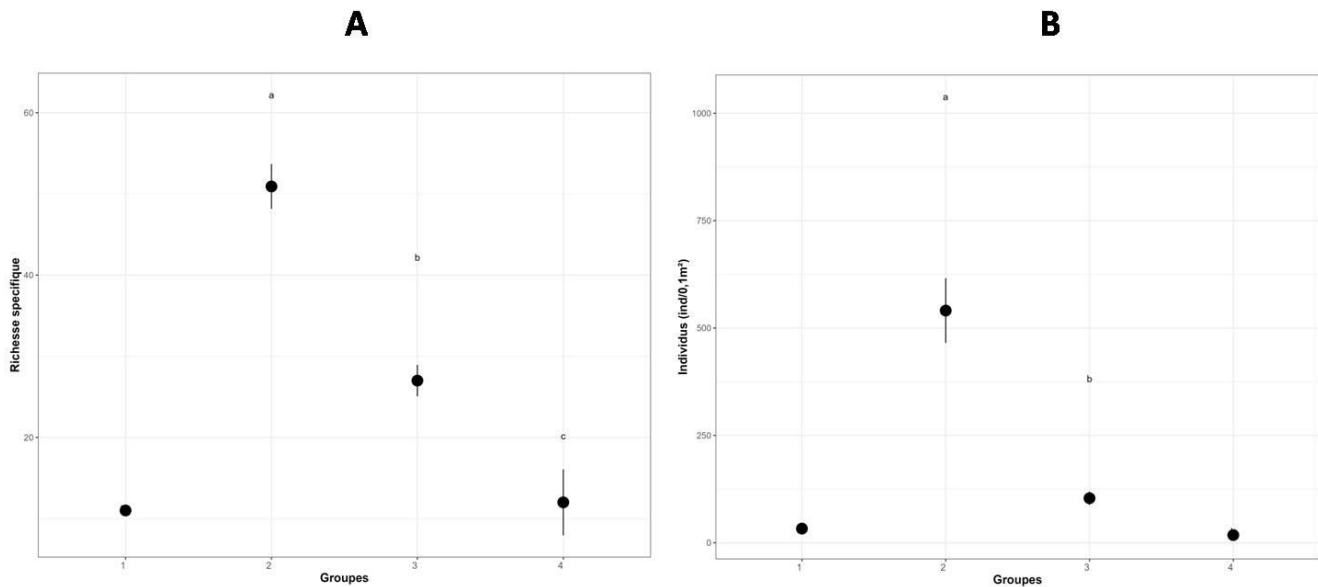
**Figure 12 : Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de similarité entre les sites côtiers en domaine intertidal côtier.**

Le premier groupe (G1, n=1 ; Figure 12) est constitué de l'année 2017 de suivi du site de Saint-Jean (SIMF03). Les annélides polychètes *Goniadella bobrezkii* et les Maldanidae sont les espèces les plus caractéristiques du premier groupe (IndVal ; p-value = 0,0099). Ce groupe présente la richesse taxonomique la plus faible (S = 11 taxa) et une abondance moyenne (N = 33 ind.0,1m<sup>-2</sup>) (test de Tukey, p-value < 0,001 ; Figure 13).

Le deuxième groupe (G2, n=12 ; Figure 12) est constitué l'ensemble des années de suivi des sites de l'archipel de Chausey. Ce groupe se distingue des autres groupes par son abondance (541 ± 261 ind.0,1m<sup>-2</sup>) et sa richesse (S = 51 ± 10 taxa) significativement plus élevées (test de Tukey, p-value < 0,001 ; Figure 13). Les annélides polychètes *Arenicola marina*, *Cirriformia tentaculata*, *Caulerliella bioculata* et *Notomastus latericeus*, le crustacé *Cyathura carinata*, le bivalve *Abra tenuis* et les oligochètes sont les espèces caractéristiques de ce second groupe (IndVal ; p-value = 0,0099). Ces espèces sont inféodées des milieux hétérogènes envasées et certaines en sont même caractéristiques (par exemple, l'annélide polychète *Cirriformia tentaculata*, Bajjouk *et al.*, 2015).

Le troisième groupe (G3, n=26 ; Figure 12) est constitué de l'ensemble des couple sites/années restants. Il comprend notamment l'intégralité des passages des sites SIMF04, SIMF05, SIMF06, SIMF07, SIMF08, SIMF10 et SIMF12. Il présente une richesse moyenne de 27 ± 10 taxa et une abondance moyenne de 104 ± 79 ind.0,1m<sup>-2</sup>. L'espèce caractéristique est l'amphipode *Urothoe poseidonis* (IndVal ; p-value = 0,0099).

Le dernier groupe (G4, n=5 ; Figure 12) est constitué des autres années de suivi de la station SIMF03. Ce groupe présente la seconde plus faible richesse spécifique (12 ± 18 taxa) et la plus faible abondance moyenne (N = 8 ± 10 ind.0,1m<sup>-2</sup>). Aucune espèce ne caractérise ce groupe (Figure 13).



**Figure 13 : Richesse spécifique (A) et Abondance (B) des assemblages intertidaux côtiers déterminés par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Les groupes (a, b, c et bc) ont été définis par un test post-hoc de Tukey HSD au seuil de 0,05.**

Une grande majorité des communautés du domaine intertidal côtier sont dominées par des taxa appartenant aux groupes écologiques G1 et G2 caractéristiques du bon état écologique (Figure 14). Toutefois, les communautés intertidales de l'archipel de Chausey sont dominées par des taxa appartenant aux groupes écologiques G2, G3 et G4, voire G5 en raison de la présence de Cirratulidae, nématodes et d'oligochètes, considérées comme des taxa opportunistes dans la liste de l'AMBI.

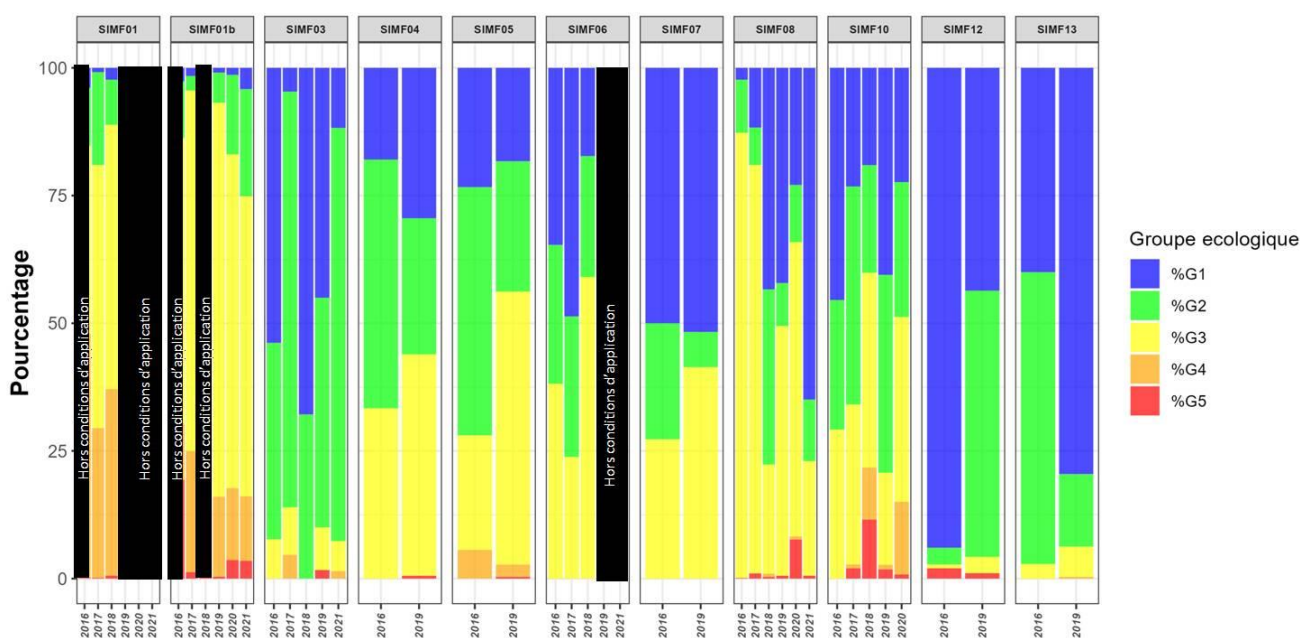
En 2021, les proportions des espèces du groupe écologique G5 (espèces opportunistes de premier ordre) sont en diminution. Les sites SIMF04, SIMF07, SIMF08 et SIMF13 voient une augmentation des groupes écologiques G1 et/ou G2 (espèces sensibles et tolérantes à une hypertrophisation). La proportion du groupe écologique G4 (espèces opportunistes de second ordre) augmente au site SIMF10. La proportion du groupe G3 (espèce indifférente à une hypertrophisation) reste variable. Globalement, sur la période 2016-2021, les proportions des différents groupes écologiques sont variables.

Pour huit couples année/station (encadrés noirs ; Figure 14), les proportions des cinq groupes écologiques calculées, doivent être considérées avec précaution (Tableau 7). Certains descripteurs (richesse spécifique : S, abondance : N et pourcentage d'espèces Non-Assignées à un groupe écologique : %NA) ne respectent pas les conditions d'application permettant une représentation robuste de la structure écologique.



**Tableau 7 : Résumé des descripteurs (S : richesse taxonomique, N : abondance moyenne (ind.0,1m<sup>-2</sup>) et %NA : pourcentage d'espèces Non-Assignées à un groupe écologique) ne respectant pas les conditions d'application permettant une représentation robuste de la structure écologique des stations côtières du domaine intertidal.**

Sites	Année	S	N	%NA
SIMF01	2016	46	374	21,49
SIMF01	2019	44	1038	38,01
SIMF01	2020	49	387	42,77
SIMF01	2021	43	1016	38,21
SIMF01b	2016	58	179	26,92
SIMF01b	2018	56	587	22,93
SIMF06	2019	28	94	22,36
SIMF06	2021	34	140	22,95



**Figure 14 : Répartition des différents groupes écologiques au sein des communautés du domaine intertidal côtier (encadrés noirs : ne respectent pas les conditions d'application).**

## 3.2. Masses d'eau côtières en domaine subtidal

### 3.2.1. Caractéristiques sédimentaires

Plus hétérogènes qu'en domaine intertidal, les sédiments des sites subtidaux restent caractérisés par des sables plus ou moins envasés, sauf les sites de la baie de Seine (SSMF09 et SSMF10), du pays de Caux (SSMF13 et SSMF14) et le site de Chausey qui concerne le maërl (SSRF01 ; Figure 15). Ces derniers sites sont marqués par une présence plus notable de particules de type « graviers » : ce qui les classent en « sables légèrement graveleux », « sables graveleux », voire « graviers ensablés ». L'indice de Trask (So ; Figure 16B) illustre cette hétérogénéité (valeurs supérieures à 2,5).

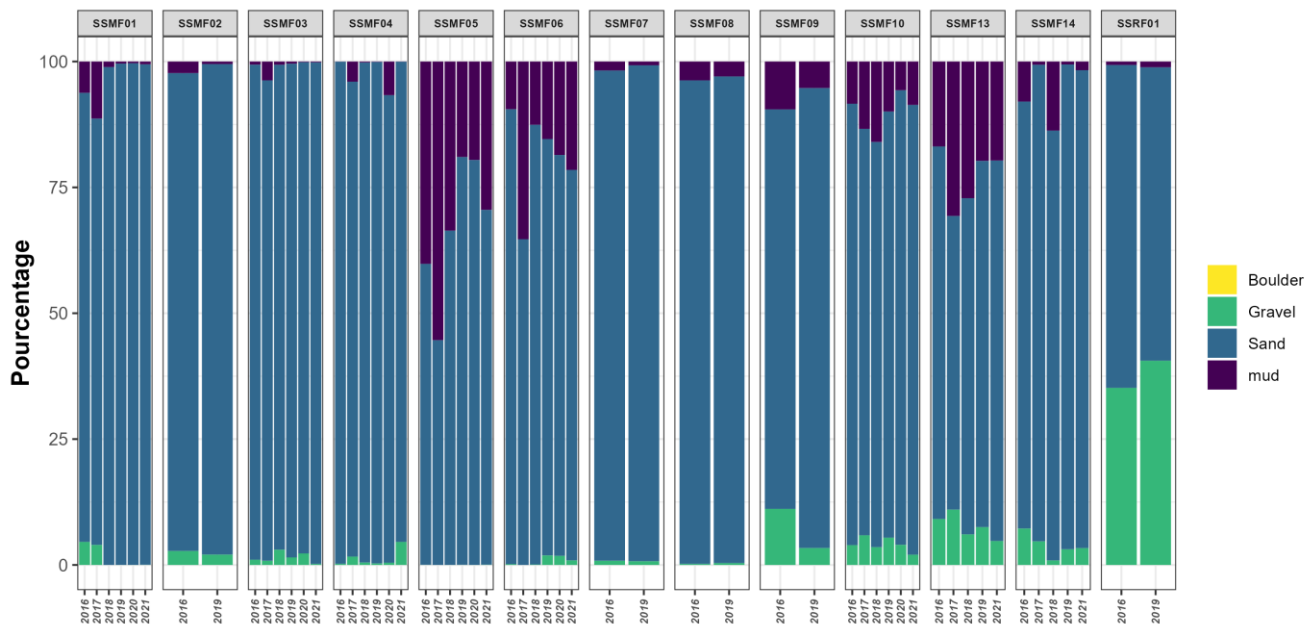


Figure 15 : Histogramme de distribution des fréquences de classes granulométriques caractérisant les sites côtiers en domaine subtidal - 2016-2021.

Le sédiment des sites localisés sur la côte Ouest Cotentin (SSMF03 et SSMF04) présente une forte variation de la médiane (D50) sur la période 2016-2021 (Figure 16A).

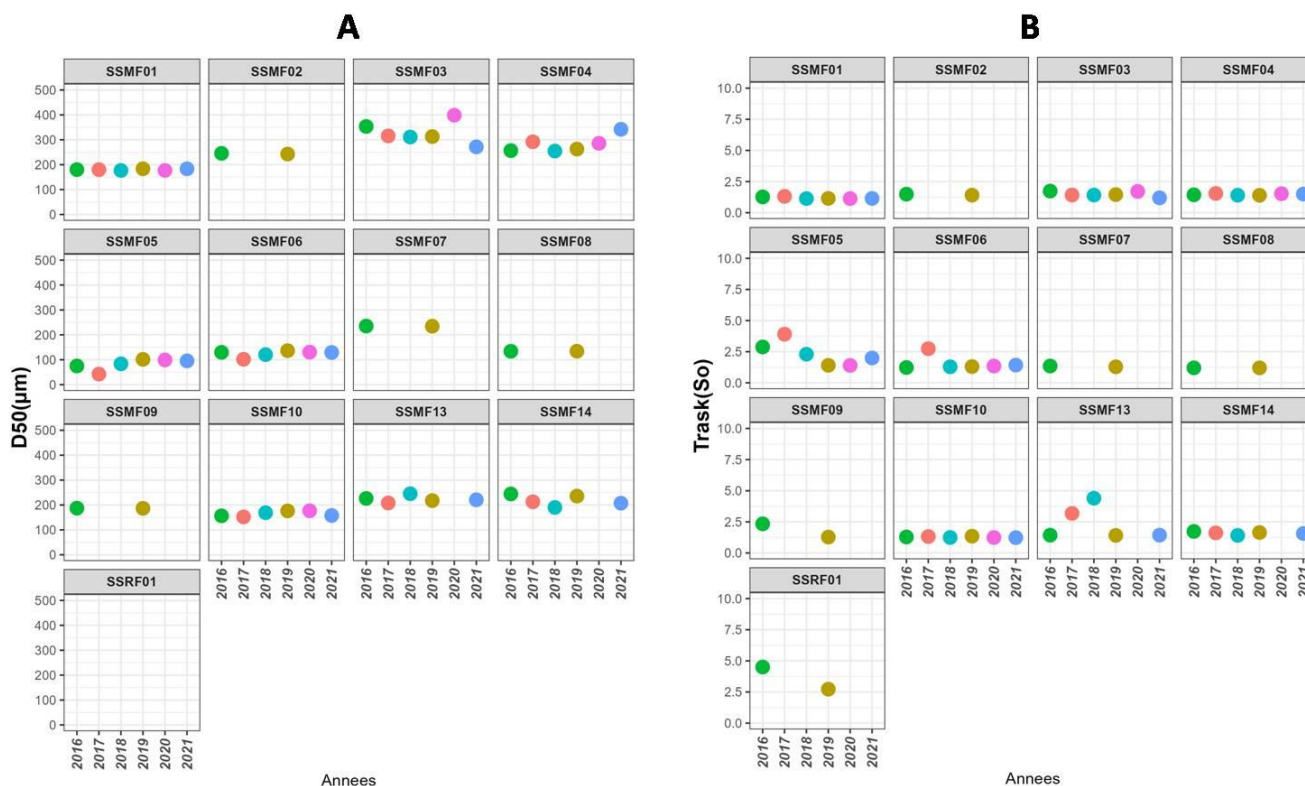


Figure 16 : Évolution des paramètres sédimentologiques des sites côtiers en domaine subtidal, 2016-2021. A : médiane granulométrique (D50,  $\mu\text{m}$ ), B : indice de Trask (So).

Dans le sédiment total, les sites SSMF03, SSMF05, SSMF13 et SSMF14 ont présenté des pourcentages de MO élevés. Cependant, depuis 2017, ces taux de MO ont tendance à diminuer (Figure 17).

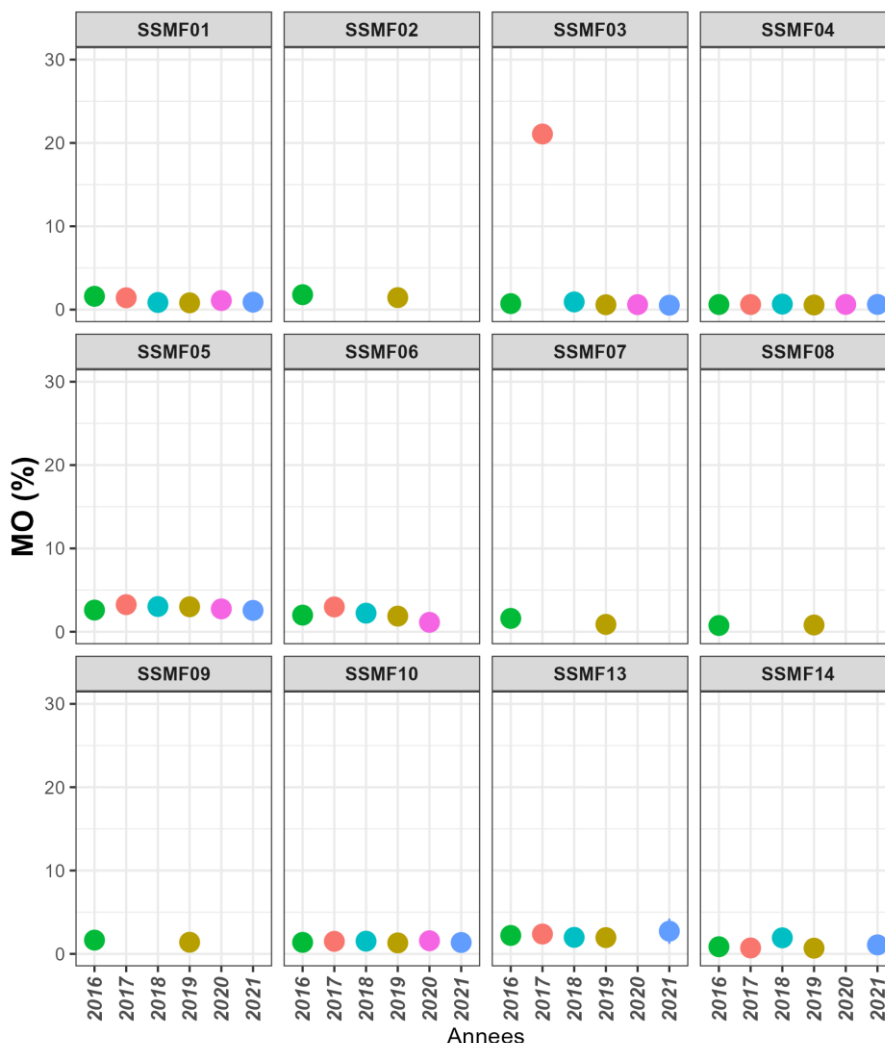
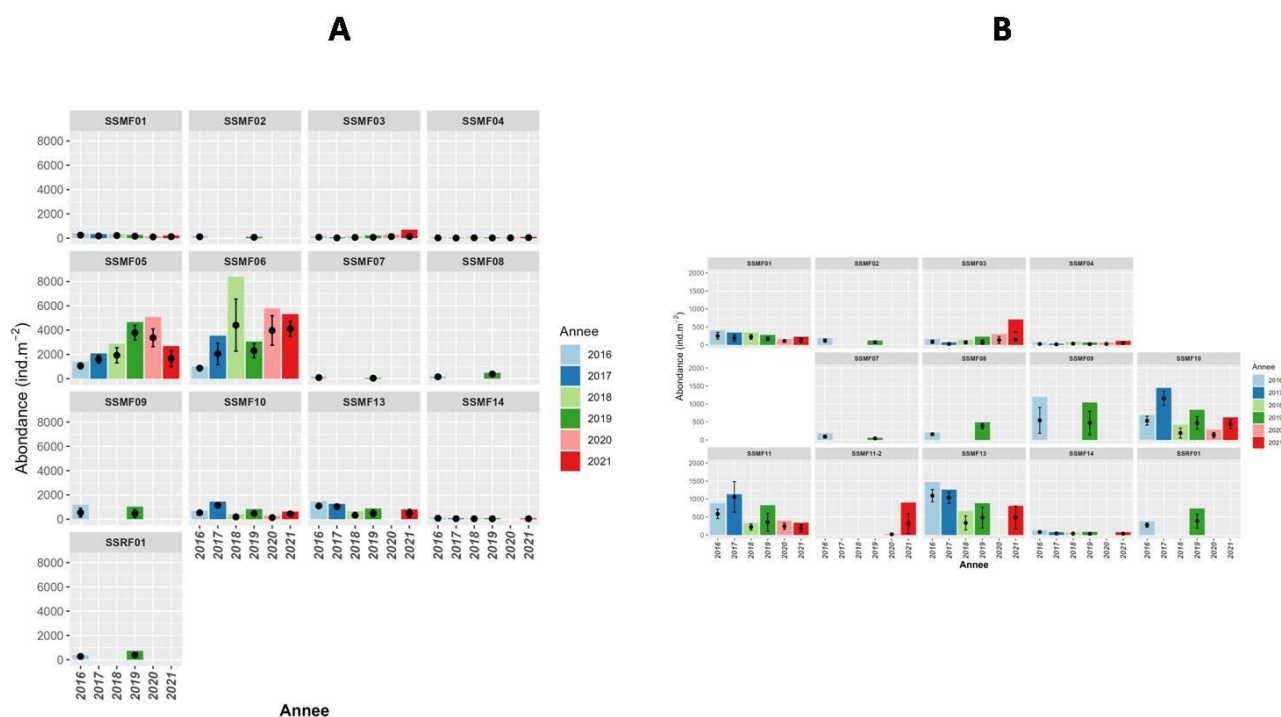


Figure 17 : Évolution de la teneur en matière organique des sédiments subtidaux situés en domaine côtier entre 2016 et 2021.

### 3.2.2. Caractéristiques faunistiques

#### Abondance

Sur l'ensemble des 13 sites du domaine subtidal côtier, l'abondance moyenne<sub>2016-2021</sub> est de  $750 \pm 233 \text{ ind.}0,1\text{m}^{-2}$ . L'abondance moyenne<sub>2016-2021</sub> maximale a été atteinte sur le site à proximité de la rade de Cherbourg (SSMF06) en 2018 ( $4410 \pm 2143 \text{ ind.}0,1\text{m}^{-2}$ ; Figure 18). L'abondance moyenne<sub>2016-2021</sub> la plus faible a été observée à Diélette (SSMF04) en 2017 ( $15 \pm 7 \text{ ind.}0,1\text{m}^{-2}$ ; Figure 18). En 2021, c'est sur le site de Dieppe (SSMF14) que les abondances moyennes les plus faibles ( $36 \pm 23 \text{ ind.}0,1\text{m}^{-2}$ ) sont observées.



**Figure 18 : Abondance moyenne (ind.0,1m<sup>-2</sup> ± écart-type). Sites subtidaux côtiers pour la période 2016-2021. (barres colorées : abondance maximale, points noirs : abondance moyenne et écart-type). A : 11 stations intertidales côtières ; B : zoom sur les stations avec des abondances plus faibles.**

### Indices de diversité : Richesse taxinomique (S) et équitabilité (J')

Un total de 868 taxa a été identifié sur l'ensemble des 13 sites du domaine subtidal côtier entre 2016 et 2021. La richesse (S ; Figure 19) moyenne<sub>2016-2021</sub> sur l'ensemble des sites est de 33±7 taxa, avec un maximum atteint en 2017 sur le site de Villers-sur-Mer (SSMF10, 67 taxa) et un minimum de 9 taxa à Diélette en 2020 (SSMF04, Cap de la Hague).

La structuration des communautés en termes d'abondance est bien équilibrée. Sur l'ensemble des années de suivi, 88% des indices de Pielou (J' ; Figure 20) sont supérieurs à 0,6 et 7% sont compris entre 0,4 et 0,6. Les valeurs calculées au site SSMF06 sont systématiquement les plus faibles et illustrent la dominance de l'amphipode *Ampelisca brevicornis*.

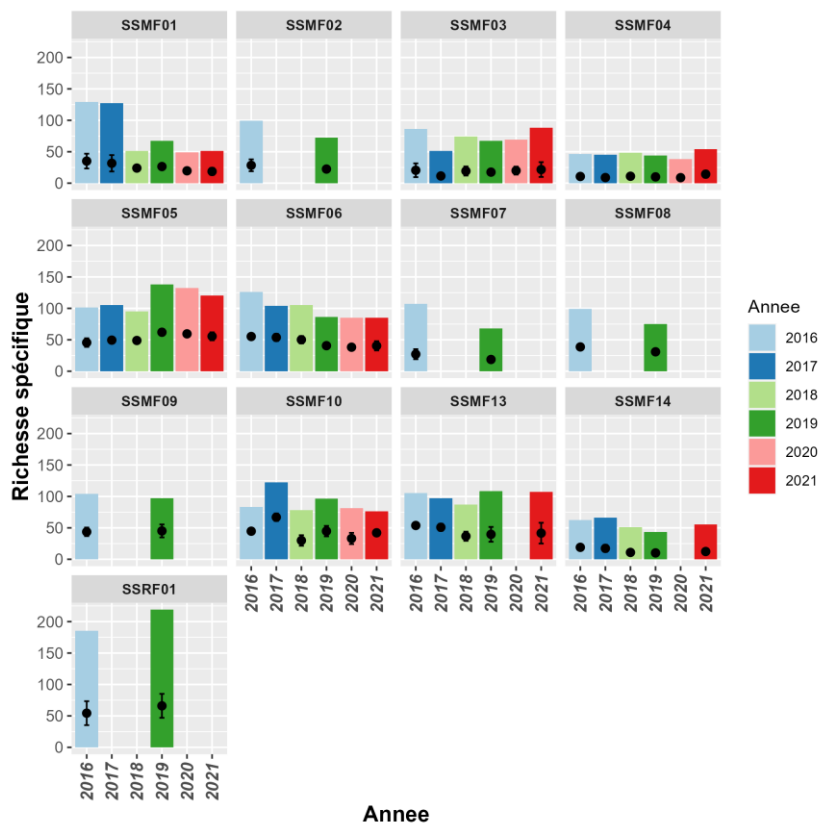


Figure 19 : Richesse taxinomique (S). Sites en domaine subtidal côtier - 2016-2021 (barres colorées : richesse totale, points noirs : richesse moyenne et écart-type).

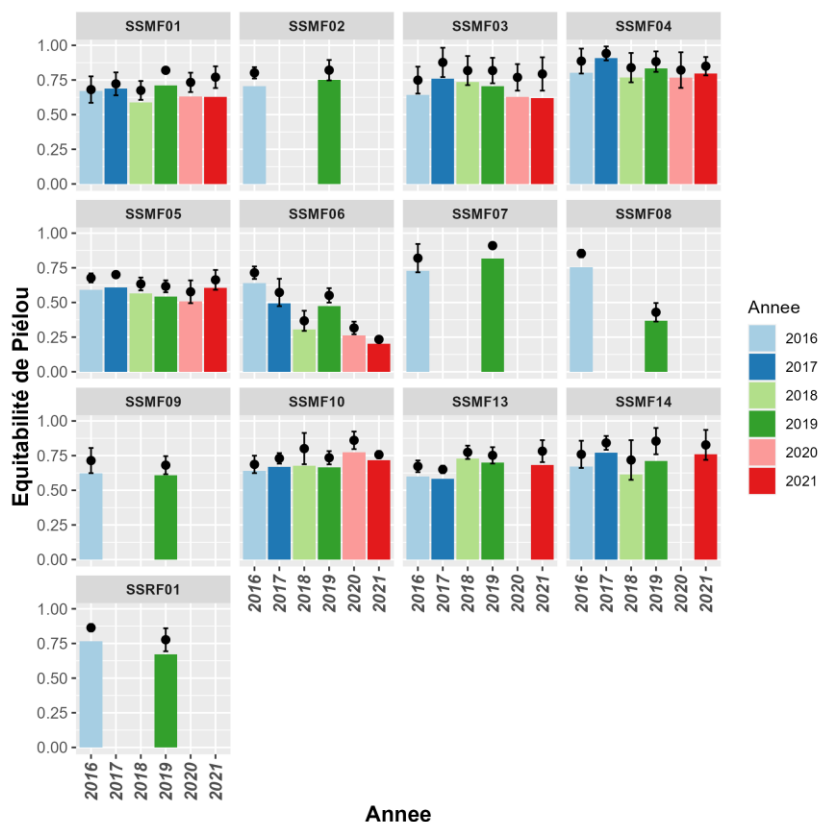
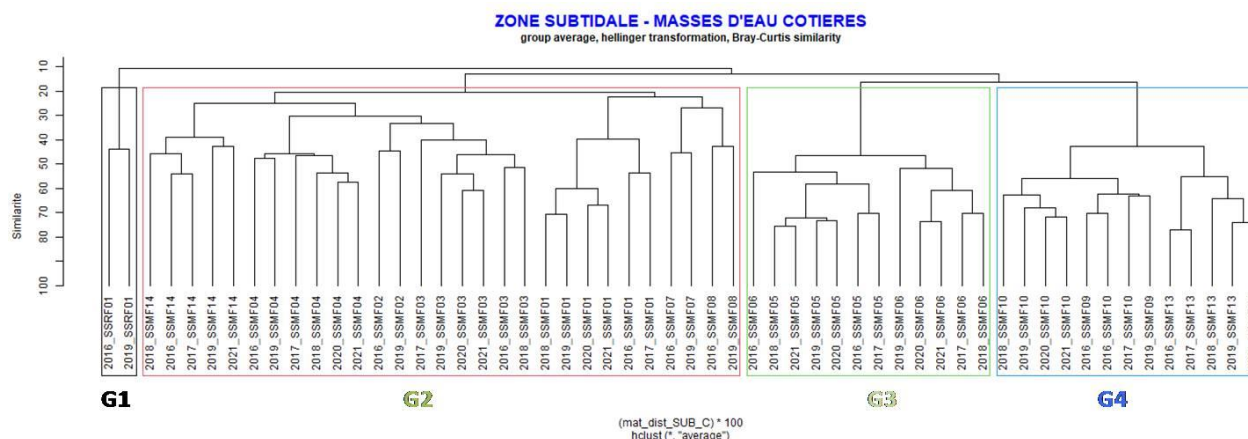


Figure 20 : Indice de Piérou (J'). Sites en domaine subtidal côtier - 2016-2021 (barres colorées : indice de Piérou total, points noirs : indice de Piérou moyen et écart-type).

## Détermination des communautés

Les groupes déterminés *a priori* grâce à la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de similarité (distance de Bray-Curtis) entre les sites en domaine subtidal des masses d'eau côtières sont significativement différents (PermAnova, p-value < 0,001 ; Figure 21).



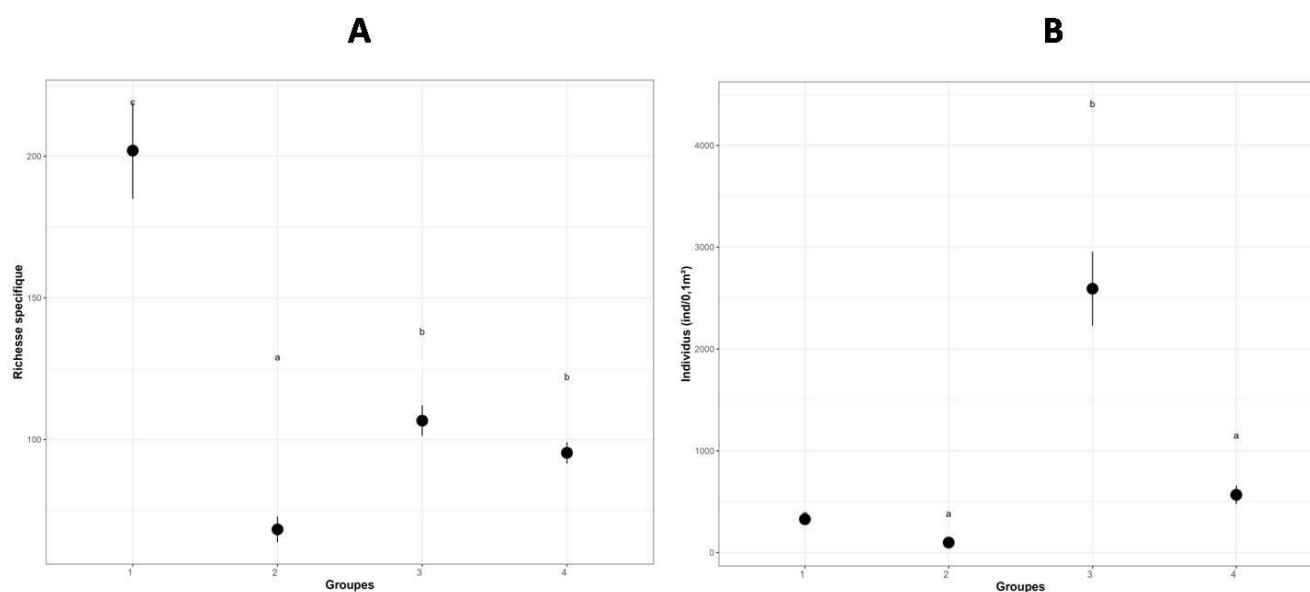
**Figure 21 : Classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisée à partir de la matrice de similarité (Distance de Bray-Curtis) entre les sites du domaine subtidal côtier.**

Le site de maërl de Chausey, échantillonné en 2016 et 2019, forme un groupe à lui seul (G1, n=2 ; Figure 21). Il est principalement caractérisé par une richesse taxonomique élevée ( $202 \pm 24$  taxa ; Figure 22A). 216 taxa, déterminés par la méthode de l'IndVal (p-value = 0,0099), sont caractéristiques de ce groupe, parmi lesquels nous pouvons citer l'amphipode *Animocera docus semiserratus*, les annélides polychètes *Eunice vittata*, *Eurysyllis tuberculata*, *Haplosyllis spongicola*, *Lumbrineriopsis paradoxa*, *Odontosyllis gibba*, *Opisthodonta serratisetosa*, le genre *Dipolydora* et le gastéropode *Jujubinus exasperatus*.

Le groupe 2 (n= 29 ; Figure 21) est constitué de la totalité des années de suivi des sites de l'Ouest Cotentin (SSMF01, SSMF02, SSMF03 et SSMF04), des sites de l'est Cotentin (SSMF07 et SSMF08), et de l'ensemble des années de suivi du site au large du pays de Caux (SSMF14). L'abondance moyenne de ce groupe est la plus faible ( $99 \pm 84$  ind.0,1m<sup>-2</sup> ; Figure 22B) tout comme sa richesse taxonomique totale moyenne ( $68 \pm 25$  taxa ; Figure 22A). Ce groupe est caractérisé par trois espèces : les amphipodes *Bathyporeia elegans* et *Bathyporeia guilliamsoniana* et l'annélide *Streptosyllis websteri*.

Le groupe 3 (n=12 ; Figure 21) se compose de toutes les années de suivi des sites de la rade de Cherbourg (SSMF05 et SSMF06). Ce groupe présente la plus forte valeur d'abondance moyenne  $2592 \pm 1261$  ind.0,1m<sup>-2</sup> (Figure 22A) et la deuxième richesse totale la plus importante, avec  $107 \pm 19$  taxa. 36 espèces, déterminées par la méthode de l'IndVal, sont caractéristiques de ce groupe. Plusieurs de ces espèces appartiennent aux annélides polychètes de la famille des Maldanidae (*Praxillella affinis*, *Euclymene oerstedii*, *Leiochone leiopygos*). Un bivalve caractéristique des sédiments plus envasés (*Lucinoma borealis*) est également présent dans les espèces spécifiques à cet assemblage.

Le groupe 4 (n=13 ; Figure 21) est composé de toutes les années de suivi des sites de la baie de Seine et de son proche extérieur (SSMF09, SSMF10, SSMF13). Il présente une abondance moyenne de  $568 \pm 325$  ind.0,1m<sup>-2</sup> et une richesse totale moyenne de  $95 \pm 14$  taxa. Les espèces caractéristiques de ce groupe sont affines des sédiments sableux plus ou moins envasés, comme par exemple l'échinoderme *Acrocnida brachiata*, le bivalve *Kurtiella bidentata* ou les annélides polychètes *Lagis koreni* et *Owenia fusiformis*.



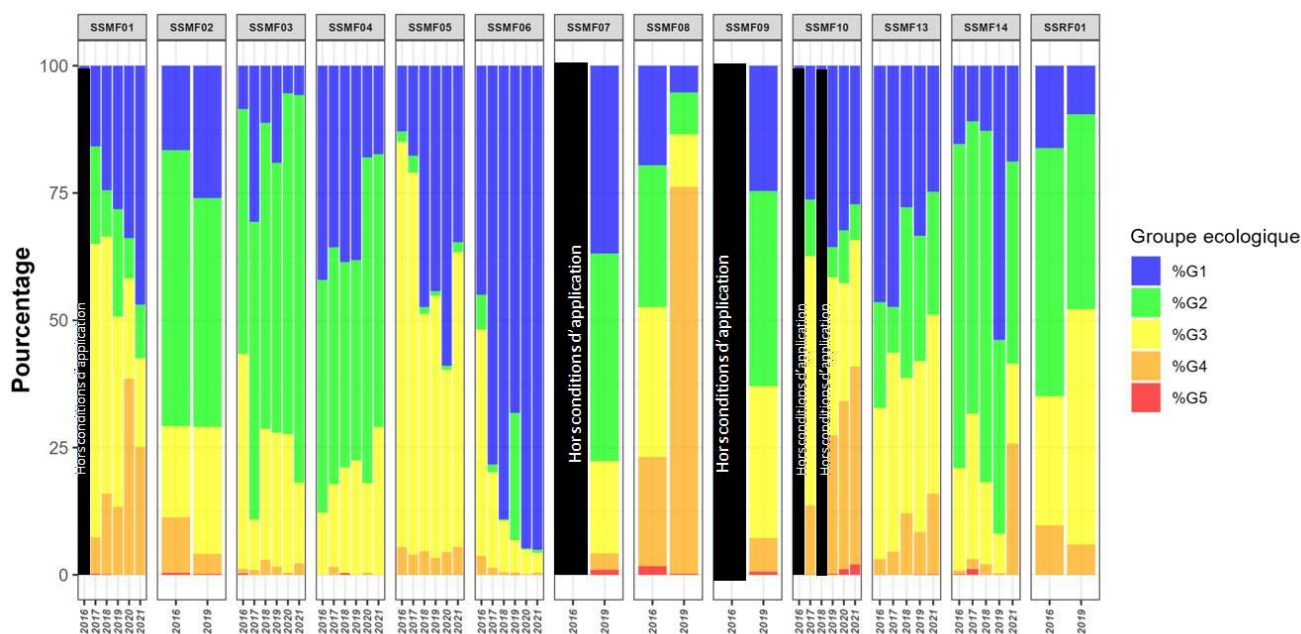
**Figure 22 : Richesse spécifique (A) et Abondance (B) des assemblages subtidaux côtiers déterminés par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Les groupes (a, b, c) ont été définis par un test post-hoc de Tukey HSD au seuil de 0,05.**

Une grande majorité des sites du domaine subtidal côtier est dominée par des taxa appartenant aux groupes écologiques G1 et G2 (Figure 23). Certains sites (SSMF01, SSMF08, SSMF10, SSMF13) présentent des proportions élevées d'espèces opportunistes de second ordre (G4), notamment des annélides polychètes appartenant aux familles des Cirratulidae et des Spionidae. Ces proportions sont variables au cours des années. En 2021, les proportions des différents groupes écologiques restent similaires pour les différents sites. A noter que la proportion des espèces du groupe G1 (espèces sensibles à une hypertrophisation) au site SSMF06 reste élevée.

Pour cinq couples année/station (encadrés noirs ; Figure 23), les proportions des cinq groupes écologiques calculées, doivent être considérées avec précaution (Tableau 8). Certains descripteurs (S : richesse spécifique, N : abondance moyenne (ind.0,1m<sup>-2</sup>) et %NA : pourcentage d'espèces Non-Assignées à un groupe écologique) ne respectent pas les conditions d'application permettant une représentation robuste de la structure écologique.

**Tableau 8 : Résumé des descripteurs (S : richesse spécifique, N : abondance moyenne (ind.0,1m<sup>-2</sup>) et %NA : pourcentage d'espèces Non-Assignées à un groupe écologique) ne respectant pas les conditions d'application permettant une représentation robuste de la structure écologique des stations côtières du domaine subtidal.**

Sites	Années	S	N	%NA
SSMF01	2016	129	251	21,7
SSMF07	2016	107	92	28,6
SSMF09	2016	104	543	30,1
SSMF10	2016	83	535	40,9
SSMF10	2018	78	192	21,8



**Figure 23 : Répartition des différents groupes écologiques au sein des communautés du domaine subtidal côtier (encadrés noirs : ne respectent pas les conditions d'application).**

### 3.3. Masses d'eau de transition en domaine intertidal

#### 3.3.1. Caractéristiques sédimentaires

Pour rappel, depuis 2020, s'applique dans les masses d'eaux de transition la nouvelle stratégie d'échantillonnage de la DCE-Benthos. A l'exception de la Baie de Seine, considérée comme un grand estuaire (type D), les autres estuaires sont considérés en type E (petits à moyens estuaires avec plus de 50 % de surface intertidale). L'échantillonnage à mettre en place est donc de six stations intertidales, ce qui explique que de nouveaux noms de stations apparaissent dans les graphiques.

En 2021, seuls les sites d'appui en masses d'eaux de transition ont été échantillonnés : SIMF09, SSMF11.

##### *Site intertidal de transition*

Le site SIMF09 montre peu d'évolution dans sa formulation sédimentologique (une légère augmentation dans la proportion de graviers est notable). Il n'y a pas d'évolution en termes de médiane, d'indice de Trask ou de pourcentage de matière organique.

En 2021, la richesse spécifique est stable (19 taxa). Par contre, l'abondance augmente (de 56 à 503 individus au total pour les 9 répliqués).



### *Site subtidal de transition*

Le site SSMF11 ne montre pas d'évolution dans sa formulation sédimentologique. Il n'y a pas d'évolution en termes de médiane, d'indice de Trask ou de pourcentage de matière organique.

En 2021, la richesse spécifique augmente légèrement (de 93 à 100 taxa). Par contre, une diminution de l'abondance est observable (de 243 à 185 individus au total pour les 9 réplicats).

Les espèces caractéristiques de cette station, correspondant à un groupe ne contenant que ce site sur les différentes années de la période 2016-2021, sont marqueurs de cette partie de l'estuaire de Seine (par exemple, les annélides *Melinna palmata*, *Galathowenia oculata*, *Acidostomia oxycephala*, *Notomastus latericeus*, *Caulleriella alata* et *Glycinde nordmanni* ; les amphipodes *Abludomelita obtusata* ou *Acidostoma obesum* ; les échinodermes *Thyone fusus* ou *Acrocnida brachiata* et le bivalve *Phaxas pellucidus*).

Les groupes écologiques sont marqués par une augmentation des taxa des groupes G1 et G2 et une diminution des taxa du groupe G4.

## 4. Synthèse 2021 des indices benthiques

Depuis la mise en place de la surveillance en 2007, les paramètres biologiques benthiques pour la classification de l'état écologique des masses d'eau côtières et de transitions ont été suivis *a minima* aux fréquences recommandées par l'article 1.3.4 de l'annexe V de la DCE.

L'Agence de l'Eau Seine-Normandie a souhaité renforcer ces fréquences d'observation sur les éléments invertébrés benthiques depuis 2010 (14 sites d'appui suivis annuellement sur 46 stations suivies tous les trois ans) et angiospermes depuis 2012 (trois stations à herbiers à *Zosteramarina*).

Comme préconisé par l'article 1.4.1 de l'annexe V de la DCE, les résultats sont exprimés comme des Ratio de Qualité Ecologique (EQR) allant de zéro à un. Ils sont divisés en cinq classes dont les bornes sont spécifiques à chaque paramètre. Les valeurs proches de zéro représentent le « mauvais » état écologique et les valeurs proches de un le « très bon » état écologique.

La classification de l'état écologique d'une masse d'eau se fait par le plus déclassant des résultats du contrôle biologique et physico-chimique. Le classement de la masse d'eau est représenté par un code couleur (Tableau 9). Si c'est une masse d'eau fortement modifiée, le classement est illustré par le même code couleur avec des hachures égales de gris.

**Tableau 9 : Grilles d'évaluations de la qualité écologique des masses d'eau des paramètres benthiques : faune invertébré benthique (FAU), angiospermes (ANG).**

	Mauvais	Médiocre	Moyen	Bon	Très bon	
<b>FAU (M-AMBI)</b>	[0;0,2]	[0,21;0,39]	[0,4;0,53]	[0,54;0,77]	[0,78;1]	<b>Borjaet al. (2012) Carletti&amp;Heiskanen (2009)</b>
<b>ANG (EQR)</b>	[0;0,19]	[0,2;0,39]	[0,4;0,59]	[0,6;0,79]	[0,8;1]	

Le Tableau 10 synthétise les derniers résultats disponibles du contrôle biologique benthique. Ce dernier a été calculé en 2020 pour la période 2013-2018. Malgré les absences de prélèvements liés à la pandémie mondiale du coronavirus (SARS-CoV-2), il avait été évalué par les experts statisticiens que l'impact de l'annulation des stations devrait être faible sur le calcul de l'indicateur. Ces résultats sont fournis à titre indicatif car actuellement, tous les indices utilisés en France ne sont pas intercalibrés au niveau européen. Un indicateur (BEQI-FR) a été choisi et intercalibré pour les masses d'eaux de transition pour les macro-invertébrés benthiques. Cependant, à la date de rédaction de ce manuscrit, son calcul n'a pas encore été mis en œuvre. Il est donc très important de ne pas réduire l'évaluation de la qualité écologique des masses d'eau à une couleur, les valeurs des indices et la classification qui en découle ne devant être utilisées qu'avec l'appui des spécialistes.

**Tableau 10 : Synthèse 2021 des derniers résultats du contrôle biologique des éléments de qualité benthique : faune invertébré benthique (FAU), angiospermes (ANG).**

<b>Masses d'eau</b>	<b>FAU (2013-2018)</b>	<b>ANG (2021)</b>
HC01	0,78	0,85
HC02	0,78	
HC03	0,92	0,59
HC04	0,87	
HC60	0,98	
HC61M	0,88	
HC07		
HC08		
HC09	0,92	0,44
HC10	0,73	
HC11		
HC12		
HC13	0,89	
HC14	0,82	
HC15	0,86	
HC16M	0,93	
HC17		
HC18	0,91	
HT03M		
HT04M		
HT05M		
HT06M		0,76

## 5. Opérations programmées en 2022 et 2023

Pour l'année 2022, le volet benthique comprend les éléments de qualité suivants :

- Le suivi stationnel des macroinvertébrés de substrats meubles des sites côtiers et des sites d'appui dans les masses d'eau côtières et de transition.
- Le suivi surfacique et stationnel des herbiers à angiospermes marins :
  - Herbiers à Zostères marines :
    - Stationnel : les cinq herbiers à *Zostera marina* seront échantillonnés.
  - - Herbiers à Zostères naines :
    - Stationnel : 2 herbiers à *Zostera noltei* seront échantillonnés

Pour l'année 2023, le volet benthique comprendra les éléments de qualité suivants :

- Le suivi stationnel des macroinvertébrés de substrats meubles des sites de transition et des sites d'appui dans les masses d'eau côtières et de transition.
- Le suivi surfacique et stationnel des herbiers à angiospermes marins :
  - Herbiers à Zostères marines :
    - Stationnel : les cinq herbiers à *Zostera marina* seront échantillonnés.
  - - Herbiers à Zostères naines :
    - Stationnel : 2 herbiers à *Zostera noltei* seront échantillonnés

## 6. Références bibliographiques

- Anderson M.J. (2005). PERMANOVA: a FORTRAN computer program for permutational multivariate analysis of variance. Department of Statistics, University of Auckland, New Zealand.
- Anderson M.J., Legendre P. (1999). An empirical comparison of permutation methods for tests of partial regression coefficients in a linear model. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 62: 271–303.
- Bajjouk T., Guillaumont B., Michez N., Thouin B., Croguennec C., Populus J., Louvel-Glaser J., Gaudillat V., Chevalier C., Tourolle J., Hamon D. (2015). Classification EUNIS, Système d'information européen sur la nature : Traduction française des habitats benthiques des Régions Atlantique et Méditerranée. Vol. 1. Habitats Littoraux. 231 pp. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00271/38222/>
- Bald J., Borja A., Muxika I., Franco J., Valencia V. (2005). Assessing reference conditions and physico-chemical status according to the European Water Framework Directive: a case-study from the Basque Country (Northern Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 50: 1508–1522.
- Blanchet Hugues, Fouet Marie (2019). Synthèse méthodologique pour la surveillance de l'élément de qualité biologique "Faune invertébrée benthique dans les masses d'eau de transition (estuaires) de la façade Manche-Atlantique". 14 p.
- Blott S.J. & Pye K. (2001) GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237–1248.
- Borja A. (2013). Ecological indices based on macrobenthos: the case of AMBI and M-AMBI in assessing seafloor integrity status, PERSEUS Summer School "The contribution of environmental indices in meeting objectives and principles of Marine Strategy Framework Directive. 3-7 June 2013, Costanta, Romania.
- Borja A., Franco J., Pérez V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin*, 40: 1100–1114.
- Borja A., Muxika I. (2005). Guidelines for the use of AMBI (AZTI's Marine Biotic Index) in the assessment of the benthic ecological quality. *Marine Pollution Bulletin*, 50: 787–789.
- Borja A., Elliott M., Henriksen P., Marbà N. (2012). Transitional and coastal waters ecological status assessment: advances and challenges resulting from implementing the European Water Framework Directive. *Hydrobiologia*, 704: 213–229.
- Carletti A., Heiskanen A.S. (2009). Water Framework Directive intercalibration technical report. Part 3: Coastal and Transitional waters. JRC-IES EUR 23838 EN/3.244 pp.
- Clarke K.R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18: 117–143.
- Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel des Communautés européennes, FR, 22.12.2000, L 327/1.
- Dufrène M., Legendre P. (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological monographs*, 67: 345–366.
- Friedman G. M., Sanders J. E. (1978). Principles of Sedimentology. Wiley, New-York.
- Fournier J., Bonnot-Courtois C., Paris R., Voldoire O., Le Vot M. (2012). Analyses granulométriques, principes et méthodes. CNRS, Dinard, 99 pp.
- Fournier J., Gallon R.K., Paris R. (2014). G2Sd: a new R package for the statistical analysis of unconsolidated sediments. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1/2014 | 2014, 73–78.

- Garcia A., Desroy N., Le Mao P., Miossec L. (2014). Protocole de suivi stationnel des macroinvertébrés benthiques de substrats meubles subtidaux et intertidaux dans le cadre de la DCE. Façades Manche et Atlantique - Rapport AQUAREF 2014 - 13 p. + Annexes.
- Goyot L., Desroy N., Garcia A., Le Mao P. (2016). Etude des communautés benthiques des sites d'appui des façades Manche et Atlantique (2007-2013) - Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE). 20 pp.
- Guérin L., Desroy N. (2008). Protocole d'observation pour le suivi de la macrofaune benthique subtidale et intertidale des sédiments meubles côtiers dans le cadre DCE. 3 p.
- Guillaumont B., Gauthier E. (2005). Recommandations pour un programme de surveillance adapté aux objectifs de la DCE - Recommandations concernant le benthos marin. 152 pp.
- Hily C. (1984). Variabilité de la macrofaune benthique dans les milieux hypertrophiques de la Rade de Brest. Doctorat d'Etat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 696 p.
- ISO/FDIS 16665, 2005. Qualité de l'eau — Lignes directrices pour l'échantillonnage quantitatif et le traitement d'échantillons de la macrofaune marine des fonds meubles.
- Muxika I., Ibaibarriaga L., Sáiz J.I., Borja Á. (2007). Minimal sampling requirements for a precise assessment of soft-bottom macrobenthic communities, using AMBI. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 349: 323-333.
- Thorne R.S.J., Williams P., Cao Y. (1999). The influence of the data transformations on biological monitoring studies using macroinvertebrates. *Water Research*, 33: 343-350.
- Udden J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25: 655-744.
- Wentworth C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30: 377-392.