



IMPECAPE « Étude des pressions et impacts des activités humaines sur les habitats benthiques côtiers pour la mise au point d'indicateurs et de protocoles de surveillance de l'état écologique de ces habitats »

Cas de l'extraction de sables coquilliers fins à moyens dans le site Natura 2000 « Baie de Morlaix » (FR5300015 et FR5310073)

Rapport final – Juillet 2018

E. THIEBAUT, C. HOUBIN, C. BROUDIN, L. PERRIER

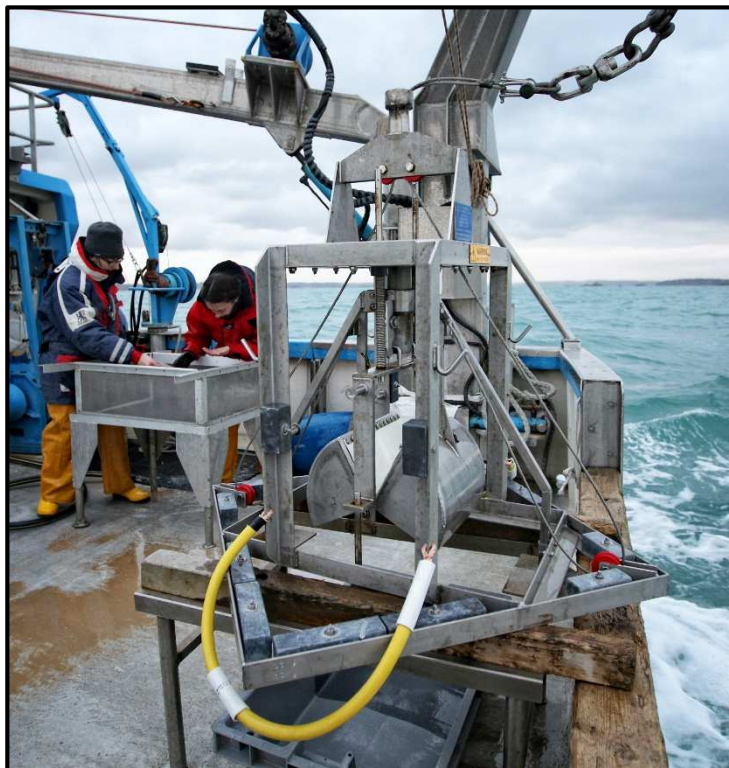


TABLE DES MATIERES

1	Présentation des acteurs.....	3
2	Introduction.....	3
2.1	Objectifs de la proposition IMPECAPE (AO AAMP)	3
2.2	Descriptif du site d'étude Baie de Morlaix	4
3	présentation de l'étude.....	7
3.1	Matériels et méthodes.....	7
3.1.1	Choix des stations échantillonnées	7
3.1.2	Stratégie d'échantillonnage.....	8
3.1.3	Moyens mis en œuvre	8
3.1.4	Traitement des échantillons.....	8
3.1.5	Analyses des données	9
4	Résultats.....	12
4.1	Propriétés du sédiment.....	12
4.2	Structure des peuplements macrobenthiques.....	16
4.2.1	Abondance et diversité	16
4.2.2	Analyses multivariées	22
4.2.3	Structure trophiques	27
5	Discussion et conclusion.....	27
6	Références bibliographiques.....	29
7	Annexes	30

1 PRESENTATION DES ACTEURS

Eric Thiébaud	Responsabilité scientifique
Céline Houbin, Caroline Broudin, Lucile Perrier, Gilles Maron, Noël Guidal, François Le Ven	Prélèvements terrain (N.O. Neomysis)
Céline Houbin, Lucile Perrier, Caroline Broudin	Traitements en laboratoire (sédiment et macrofaune)
Céline Houbin, Caroline Broudin	Expertise taxonomique
Céline Houbin, Eric Thiébaud	Analyses des données et rédaction
Camille Poitrimol	Stage de Master 1 – analyse des données de la première année de l'étude (2017)

2 INTRODUCTION

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre du projet IMPECAPE sur l'étude des pressions et impacts des activités humaines sur les habitats benthiques côtiers pour la mise au point d'indicateurs et de protocoles de surveillance de l'état écologique dans le cas spécifique de l'extraction minière sur les sables fins à moyens du site Natura 2000 « Baie de Morlaix » (FR5300015 et FR5310073).

Après un rappel des objectifs du projet, il présente la stratégie d'échantillonnage mise en œuvre, et les résultats obtenus sur les caractéristiques biocénotiques de la communauté étudiée. Le volet 'Développement et test d'indicateurs' sera traité à l'échelle de l'ensemble des acteurs du projet IMPECAPE et non pas sur l'exemple particulier de la baie de Morlaix.

2.1 OBJECTIFS DE LA PROPOSITION IMPECAPE (AO AAMP)

La mise au point d'indicateurs et de protocoles standardisés permettant de répondre aux objectifs des directives européennes, i.e. Directive Habitats Faune Flore (DHFF), Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et plus récemment Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM), représente un enjeu scientifique et sociétal majeur. Pour le moment, il n'existe pas d'indicateur biotique réellement fiable, capable de mettre directement en relation une pression quelconque mesurée et la réponse des biocénoses associées aux habitats benthiques.

L'objectif du projet de recherche IMPECAPE est de produire des indicateurs rendant compte de l'état écologique et de l'état de conservation des habitats benthiques côtiers face aux pressions physiques qui s'y exercent. Deux activités génératrices des principales pressions physiques s'exerçant sur les fonds marins ont été retenues : la pêche aux arts traînants et l'extraction de sédiments. Ces activités, sources d'abrasion, sont à même d'entraîner des dommages physiques qui se traduisent par des modifications de la nature du fond et de la turbidité, et des dommages biologiques, directement par mortalité, ou indirectement par modification des caractéristiques du milieu. Le choix des habitats est contraint par la disponibilité de données quantitatives des pressions exercées, la possibilité de réels accords de partenariat noués avec les acteurs à l'origine des pressions et la proximité de Zones Spéciales de Conservation (ZSC-N2000).

Trois couples habitat-pressions ont ainsi été retenus : (1) la pêche à la drague avec pour site atelier les bancs de maerl de la rade de Brest (site Natura 2000 FR5300046), (2) l'extraction de granulats calcaires sur les fonds de sables coquilliers fins à moyens de la concession des Duons (Baie de Morlaix,

sites Natura 2000 FR5300015 et FR5310073) et (3) l'extraction de sable fin des Orpellières (Hérault, site Natura 2000 FR9102013).

Cette étude est réalisée par 21 chercheurs et ingénieurs en écologie benthique faisant partie des UMRs et laboratoires du réseau des stations et observatoires marins RESOMAR. Elle met en œuvre un accord de partenariat avec quelques exploitants industriels. Elle mobilise les outils et les savoir-faire de spécialistes pour l'échantillonnage, le traitement des échantillons, la mise en œuvre de comparaisons inter-laboratoires sur l'exactitude des déterminations taxinomiques et le traitement statistique des résultats en s'appuyant sur la méthodologie initiée dans le cadre de l'ANR BenthVal.

Plus spécifiquement, les objectifs du projet IMPECAPE sont de :

- Collecter et analyser des données afin de mettre au point des indicateurs d'état écologique de l'habitat étudié, associés à des grilles de lecture et des seuils d'interprétation ; des recommandations pour l'extension des indicateurs proposés à d'autres sites (intercalibration, seuils adaptés...) ainsi qu'un protocole de surveillance standardisé (paramètres à suivre, stratégie d'échantillonnage, moyens humains et matériels...) sont attendus ;
- Élaborer des indicateurs à partir de l'interprétation des données biologiques et des données de pression, collectées *in situ* et auprès de la Compagnie Armoricaire de Navigation, dans le cas spécifique des données d'extraction des sédiments sur la concession des Duons ;
- Intégrer les indicateurs mis au point dans la panoplie des indicateurs DCSMM du bon état écologique relatifs aux habitats benthiques ;
- Favoriser l'utilisation des indicateurs dans le cadre de l'évaluation requise par la Directive Habitats Faune Flore et plus généralement l'évaluation des mesures de gestion des AMP ; pour ce faire, ils devront notamment répondre aux critères de pertinence d'un indicateur pour évaluer la gestion des AMP définis dans le cadre du projet de l'Agence « Catalogue des indicateurs ».

2.2 DESCRIPTIF DU SITE D'ETUDE BAIE DE MORLAIX

Le site atelier choisi est l'habitat des sables coquilliers fins de la Baie de Morlaix qui abrite la concession des Duons, site d'exploitation de granulats calcaires sur les fonds (sites Natura 2000 FR5300015 et FR5310073) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Pour ce site, une convention de partenariat a été signée entre l'Université qui représente la Station Biologique de Roscoff et la Compagnie Armoricaire de Navigation qui exploite la concession des Duons (Figure 1) et qui s'engage à fournir les données d'extraction à fréquence mensuelle (volume extrait, traces du navire) (Annexe A). L'activité d'extraction dans la baie initiée en 1965 a été réglementée par une succession d'arrêtés préfectoraux de 1989 à 2011, date à laquelle un titre minier a été accordé. Trois périmètres partiellement superposés ont été successivement exploités : avant 1999, entre 1999 et 2011, et depuis 2011. Le titre minier actuel court sur une période de 25 ans (2011-2036) pour un volume d'extraction maximal autorisé de 50 000 m³ par an sur une zone de 0,18 km².

L'entreprise extrait depuis 2012 environ 30 000 m³ par an avec deux pics saisonniers au printemps et en automne. La stratégie retenue vise ainsi à échantillonner les fonds avant les pics d'extraction (mars), au cours de ceux-ci (juin et octobre) puis après les pics d'extraction en période hivernale (janvier). Cette approche est rendue opérationnelle grâce à la présence du Navire Océanographique de l'INSU

Neomysis (Station Biologique de Roscoff) qui offre l'opportunité de réaliser en baie de Morlaix des échantillonnages de façon très réactive en fonction de l'activité d'extraction. La quantification de la pression est exprimée en termes de tonnage extraits, d'horaires d'extraction et de trajet réalisé par l'élingue sur le fond.

Situé dans le secteur est de la baie de Morlaix, l'habitat des sables très fins à fins occupe une grande partie de la baie (Figure 1). Ces sables bio-lithoclastiques sont particulièrement homogènes et bien triés. Ils sont riches en débris coquilliers avec une calcimétrie de plus de 80% (Ehrhold & al., 2011). Ces sédiments sont très mobiles en raison des conditions hydrodynamiques dans la baie et forment localement des bancs sous-marins. Dans la classification EUNIS revue en 2017, cet habitat est défini comme A5.233 - [Nephtys cirrosa] and [Bathyporeia] spp. in infralittoral sand.

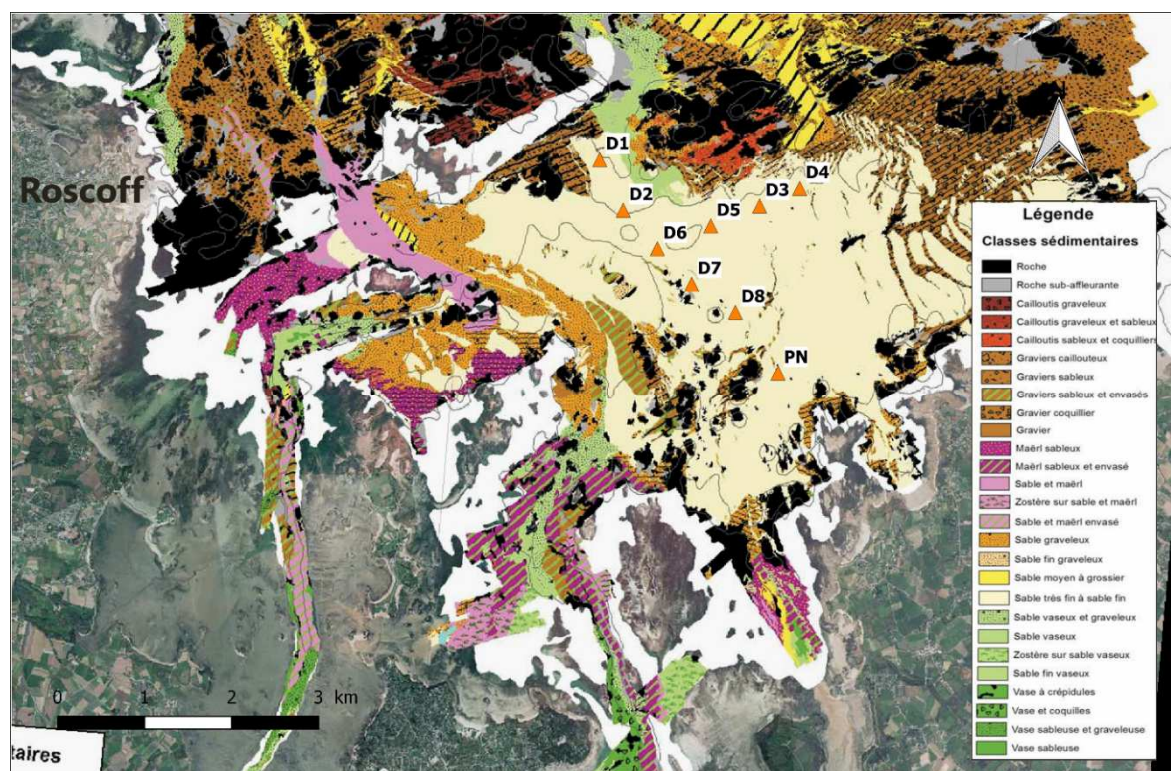


Figure 1: Carte de distribution de la nature des fonds de la baie de Morlaix (Ehrhold & al., 2011). Les stations échantillonnées lors du projet IMPECAPE sont figurées par des triangles orange.

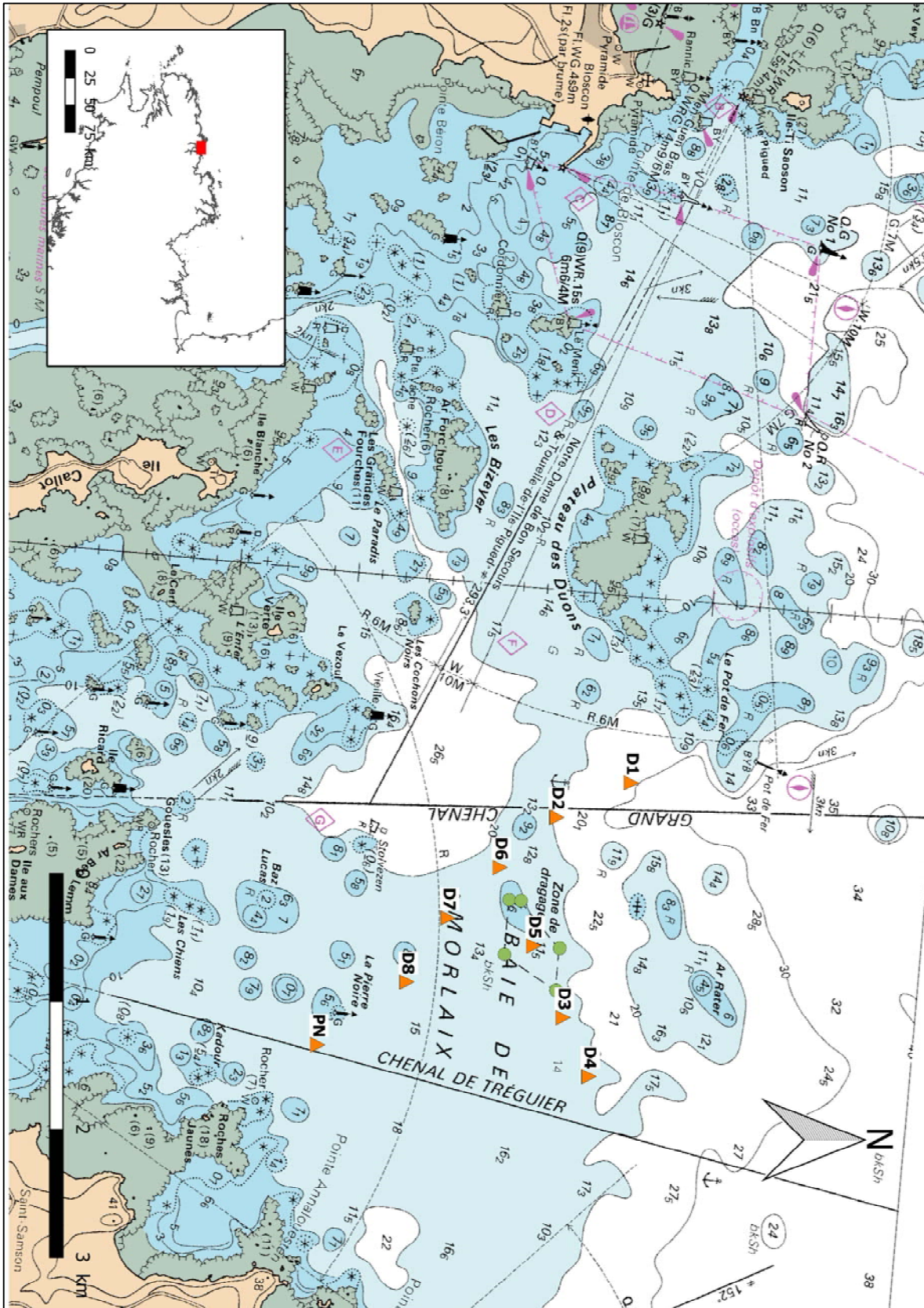


Figure 2: Carte de la zone d'étude. Les points verts délimitent la concession des Duons (source SHOM). Les stations échantillonnées sont figurées par des triangles orange.

3 PRESENTATION DE L'ETUDE

3.1 MATERIELS ET METHODES

3.1.1 Choix des stations échantillonnées

Un total de 8 stations a été choisi en s'appuyant sur (1) la carte de distribution des habitats sédimentaires de la baie, permettant de circonscrire le périmètre de l'étude à l'habitat ciblé (Ehrhold & al., 2011), et (2) un rapport du bureau d'étude 'Astérie' datant de 2009 et qui contenait des simulations de la distribution du panache turbide lors d'un événement d'extraction sous différents forçages météorologiques (Figure 2). Ces simulations indiquaient une orientation du panache turbide principalement le long d'un axe SE-NW. Deux stations sont considérées comme des stations de référence (stations D3 et D4), sélectionnées dans le même type sédimentaire mais à l'abri de l'influence directe du panache turbide. Six stations ont été positionnées selon un gradient de proximité avec la souille (station D5 dans la souille, station D6 dans l'ancienne zone d'exploitation, quatre à la périphérie : stations D1, D2, D7 et D8). Leurs coordonnées précises fixées à partir des données de synthèse des emprises du panache turbide sont fournies dans le tableau 1. Le calendrier d'échantillonnage a été adapté à l'activité d'extraction avec 4 dates de prélèvement annuel. A ces stations s'ajoute la station « Pierre Noire » qui fait l'objet d'un suivi à long terme par l'Observatoire de Roscoff depuis 1977, à raison d'un minimum de 2 dates d'échantillonnage par an (mars et octobre). Cette station permet de disposer d'une ligne de base de la dynamique à long terme de la communauté des sables fins.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques (WGS84) des stations étudiées

station	longitude	latitude
D1	-3°53,810'	48°43,720'
D2	-3°53,550'	48°43,420'
D3	-3°52,280'	48°43,520'
D4	-3°51,920'	48°43,650'
D5	-3°52,720'	48°43,370'
D6	-3°53,200'	48°43,200'
D7	-3°52,850'	48°43,000'
D8	-3°52,420'	48°42,850'
Pierre Noire	-3°51,972'	48°42,498'

L'étude par imagerie de profils sédimentaires (sediment profile imagery, SPI) prévu initialement dans le projet n'a pu être réalisée, le type de sédiment ne permettant pas la mise en œuvre du carottier.

3.1.2 Stratégie d'échantillonnage

A chaque station, les échantillons de macrofaune ont été prélevés à la benne Smith-McIntyre couvrant une surface de 0,1 m², à raison de cinq réplicats par station, tamisés sur une maille circulaire de 1mm et fixés au formaldéhyde dilué dans l'eau de mer et tamponné.

Des prélèvements complémentaires ont été effectués à chaque station afin de mesurer les caractéristiques granulométriques du sédiment (protocole sur série de tamis AFNOR) et le taux de matière organique du sédiment par la méthode de la perte au feu.

3.1.3 Moyens mis en œuvre

La mise en œuvre de ce projet a impliqué 8 campagnes en mer, à la demi-journée (Tableau 2). Les opérations en mer ont été assurées à bord du N.O. Neomysis de la Station Biologique de Roscoff. Le projet a impliqué sept personnes de la SBR.

Tableau 2 : Dates des campagnes d'échantillonnages

Campagnes	Dates d'échantillonnage
Campagne 1	04/03/2015
Campagne 2	26/06/2015
Campagne 3	03/10/2015
Campagne 4	20/01/2016
Campagne 5	27/04/2016
Campagne 6	11/07/2016
Campagne 7	21/11/2016
Campagne 8	18 et 25/01/2017

3.1.4 Traitement des échantillons

Les traitements des échantillons de macrofaune et de sédiment sont réalisés en suivant le protocole établi par Garcia et al. (2014) pour les suivis réalisés dans le cadre de la DCE.

3.1.4.1 Echantillons de sédiments

Le sédiment a été séché dans une étuve à 60°C pendant 48h puis pesé afin d'obtenir le poids sec avant lavage. Le sédiment est ensuite lavé à l'eau douce sur un tamis de maille 63µm, et à nouveau séché à l'étuve à 60°C pendant 48h. Après séchage, le poids sec a été de nouveau mesuré. La différence entre le poids sec avant lavage et le poids sec après lavage permet d'estimer le taux de pélites (particules de taille inférieure à 63µm).

Par la suite, le sédiment a été passé sur une colonne de tamis AFNOR comprenant les mailles suivantes (en µm) : 4000, 2000, 1600, 1250, 1000, 800, 630, 500, 400, 315, 250, 200, 160, 125, 100,

80 et 63. Chaque fraction granulométrique a été pesée avec une balance de précision à 0,01 g, les résultats bruts ont été exprimés en pourcentage pondéral de l'échantillon initial de sédiment.

Les mesures de la teneur en matière organique ont été réalisées selon la technique de la perte au feu (Buchanan, 1984). Le sédiment séché à l'étuve pendant 48h à 80°C est pesé puis passé au four à 520°C pendant 6h avant une nouvelle pesée. La différence entre les deux mesures obtenues (poids sec total – poids sec des résidus) permet d'estimer la fraction de matière organique présente dans l'échantillon de sédiment.

Les résultats ont été exprimés en pourcentage pondéral de l'échantillon de départ.

3.1.4.2 Echantillons de macrofaune

Au laboratoire, les échantillons ont été déformolés. Après coloration au rose Bengale, la macrofaune de chaque prélèvement est triée, puis identifiée jusqu'à l'espèce dans la mesure du possible.

Les experts du réseau des stations marines ont été sollicités pour assurer le contrôle qualité du traitement des échantillons. Un système d'échanges de spécimens a été mis en place, avec une centralisation par l'Université de La Rochelle. Le rendu de cet exercice a eu lieu lors de l'atelier taxonomique RESOMAR organisé en juin 2018 à Brest. Le travail en collaboration avec les experts du RESOMAR a permis de confirmer ou de corriger certaines identifications difficiles et d'homogénéiser la bibliographie taxonomique de références.

3.1.5 Analyses des données

3.1.5.1 Analyses sédimentaires

Les données de granulométrie ont été analysées avec le logiciel GRADISTAT (Blott et Pye, 2001) en utilisant la méthode de Folk et Ward (1954). Les paramètres suivants ont été calculés :

- le pourcentage de vase ;
- la médiane.

D'autre part la nature du sédiment a été définie par le diagramme de Folk (1954). En complément des histogrammes avec les différentes fractions qui composent les différents échantillons sédimentaires ont été construits grâce au package G2SD (Fournier et Gallon, 2014).

Une analyse de variance (ANOVA) à trois facteurs croisés sans réplicat a été réalisée sous le logiciel R afin de déterminer l'effet potentiel des facteurs 'Station', 'Année' et 'Saison' sur les variables sédimentaires.

3.1.5.2 Analyses des données de macrofaune

Après dépouillement des échantillons en laboratoire, les données brutes sur la macrofaune (espèces et abondances associées) ont été assemblées sous la forme d'une matrice stations/espèces (Tableau 3)

Tableau 3 : Matrice de N stations et S espèces en abondance pour une saison donnée.

Espèces	Station A					Station B				
	réplicat 1	réplicat 2	réplicat 3	réplicat 4	réplicat 5	réplicat 1	réplicat 2	réplicat 3	réplicat 4	réplicat 5
sp 1	N1.A1	N1.A2	N1.A3	N1.A4	N1.A5	N1.B1	N1.B2	N1.B3	N1.B4	N1.B5
...										
sp i	Ni.A1									
total	AXA1	AXA2	AXA3	AXA4	AXA5	AXB1	AXB2	AXB3	AXB4	AXB5

Les indices de diversité suivant ont été calculés sur les données brutes pour l'ensemble des échantillons :

- L'abondance (N) qui exprime le nombre d'individus par 0,5 m² ;
- La richesse spécifique (S) qui représente le nombre d'espèces par échantillon ;
- L'indice de diversité de Shannon-Wiener (H') : il a une valeur de 0 si une seule espèce est présente dans le peuplement et une valeur maximale si toutes les espèces ont les mêmes abondances relatives pour une richesse spécifique donnée ; il augmente par ailleurs avec la richesse spécifique ; cet indice est sensible aux variations d'abondances des espèces rares et donc à l'effort d'échantillonnage ;
- L'indice de diversité de Simpson (1-λ') : il varie entre 0 pour une diversité minimale et 1 pour une diversité maximale ; cet indice est sensible aux variations des abondances des espèces dominantes.
- L'indice d'équitabilité de Pielou (J') : il varie entre 0 lorsqu'une espèce est présente dans l'échantillon et 1 lorsque toutes les espèces sont réparties de manière équitable dans l'échantillon ; il est indépendant de la richesse spécifique.

A l'échelle de l'ensemble du jeu de données, une courbe d'accumulation du nombre d'espèces observées en fonction de l'effort d'échantillonnage a été tracée afin de décrire la diversité globale de la zone d'étude.

En complément, des analyses multivariées ont été réalisées afin de mettre en évidence la variabilité spatiale et saisonnière de la structure de la communauté. Le coefficient de similarité de Bray-Curtis a été retenu pour mesurer la similarité entre chaque paire de stations. Les données d'abondance ont été préalablement transformées en log (x+1) afin de minimiser le poids des espèces abondantes. Les analyses suivantes ont été réalisées à partir de la matrice de similarité :

- Un cadrage multidimensionnel non paramétrique (n-MDS) ;
- Un dendrogramme établi en utilisant comme méthode d'agrégation la méthode « Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean » (UPGMA) ;
- Une carte de chaleur associée au dendrogramme afin de visualiser l'abondance relative des espèces de chaque échantillon dans les différents assemblages identifiés ;

- Le calcul de la contribution moyenne de chaque espèce *i* à la dissimilarité entre les assemblages de stations identifiés sur le dendrogramme afin de discriminer les espèces responsables de la formation des différents assemblages faunistiques (SIMPER) ;
- Une analyse de variance multivariée par permutation (PERMANOVA) afin d'identifier les effets des facteurs 'Saison' et 'Station' sur la variabilité spatiale et temporelle de la structure de la communauté ;
- Une analyse de redondance basée sur la distance (dbRDA) pour quantifier le lien entre la structure de la communauté macrobenthique et les caractéristiques de l'environnement ; cette analyse permet également d'identifier les principales variables environnementales discriminantes. Les variables retenues sont :
 - Pourcentage de vase ;
 - Pourcentage de sable ;
 - Pourcentage de gravier ;
 - Pourcentage de MO ;
 - Médiane ;
 - Profondeur ;
 - Distance de la station au centre de la zone d'extraction (souille) ;

L'ensemble de ces analyses ont été réalisées grâce au logiciel Primer v7 (Clarke K.R., 1993).

De manière exploratoire, la structure trophique du peuplement a été établie en attribuant à chaque espèce un mode de nutrition défini à partir de six modes présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Définition des groupes trophiques (adapté de Pearson, 1971 et de Fauchald et Jumars, 1979)

code	Groupe trophique	Définition
S	Suspensivores	Espèces benthiques qui se nourrissent par filtration active ou passive de matière organique particulaire présente dans la colonne d'eau.
DS	Dépositivores de surface	Espèces sédentaires et semi-sédentaires qui se nourrissent à l'interface eau-sédiment en collectant des particules vivantes détritiques.
S/DS	Mixtes (suspensivores et dépositivores de surface)	Espèces qui peuvent se nourrir à la fois par filtration de matière organique particulaire et par collection de matériel détritique à l'interface eau sédiment.
DSS	Dépositivores de subsurface	Espèces qui se nourrissent en ingérant du sédiment et en absorbant la matière organique qu'il contient.
C/N	Carnivores et nécrophages	C : Espèces qui sont principalement mobiles et qui se nourrissent sur des proies vivantes - N : Espèces qui se nourrissent d'organismes morts.
O	Omnivores	Espèces qui se nourrissent à la fois de matériel détritique à l'interface eau-sédiment, de petites proies qu'elles chassent ou de charognes.

La fréquence relative basée sur les abondances dans les prélèvements de chacun des groupes au sein des peuplements permet d'estimer quels types de régimes dominent la chaîne alimentaire. Les résultats des groupes trophiques sont exprimés en pourcentage des abondances des groupes trophiques pour chaque prélèvement et sont représentés sous forme d'histogrammes empilés à 100%.

4 RESULTATS

4.1 PROPRIETES DU SEDIMENT

Selon la classification de Folk (1954), l'ensemble des stations se classent dans la catégorie « sable » et « sable légèrement graveleux » (Figure 3).

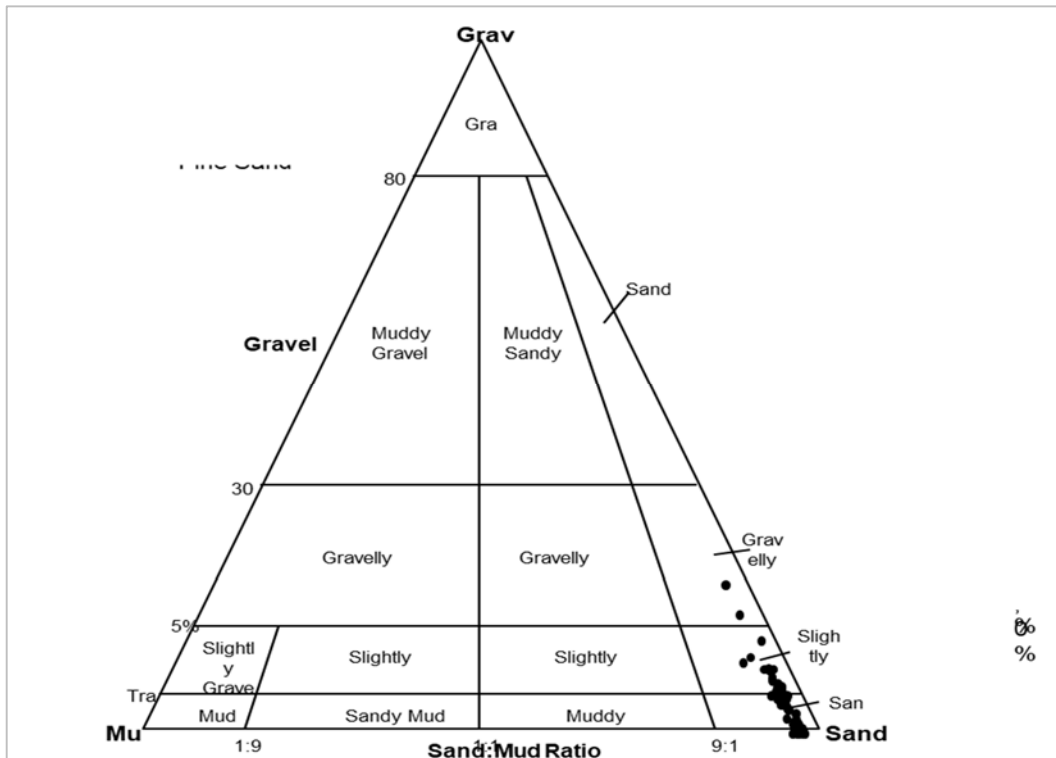


Figure 3 Caractérisation du type de sédiment échantillonné selon la classification sédimentaire de Folk (1954). Diagramme extrait du logiciel GRADISTAT.

Les histogrammes de distribution de fréquences relatives des classes de sédiment confirment les résultats du diagramme de Folk (Figure 4). Les stations D7, D8 et dans une moindre mesure D2 sont constituées en grande majorité de sable très fin et fin (63 à 250 μm). La station D5 contient majoritairement du sable moyen (fraction comprise entre 250 et 500 μm). Les autres stations sont composées de sable fin et moyen.

Les sédiments sont peu envasés avec des pourcentages de vase compris entre 1,67 % (D4 10.2015) et 4,81 % (D2 01.2017). (Figure 5 A et

Annexe B). Le sédiment des stations D1, D2, D7 et D8 possède quelques pourcents de particules grossières, essentiellement sous forme de débris coquillers de plus grande taille. L'importance de ces particules dans le sédiment varie en fonction des dates d'échantillonnage sans qu'un patron saisonnier clair puisse être mis en évidence (ex. maximum à la station D1 au printemps 2016, maximum à la station D7 en hiver 2016). Les fluctuations observées sont vraisemblablement à mettre en relation avec l'hétérogénéité à petite échelle spatiale de la texture du sédiment liée à la présence de ripple marks.

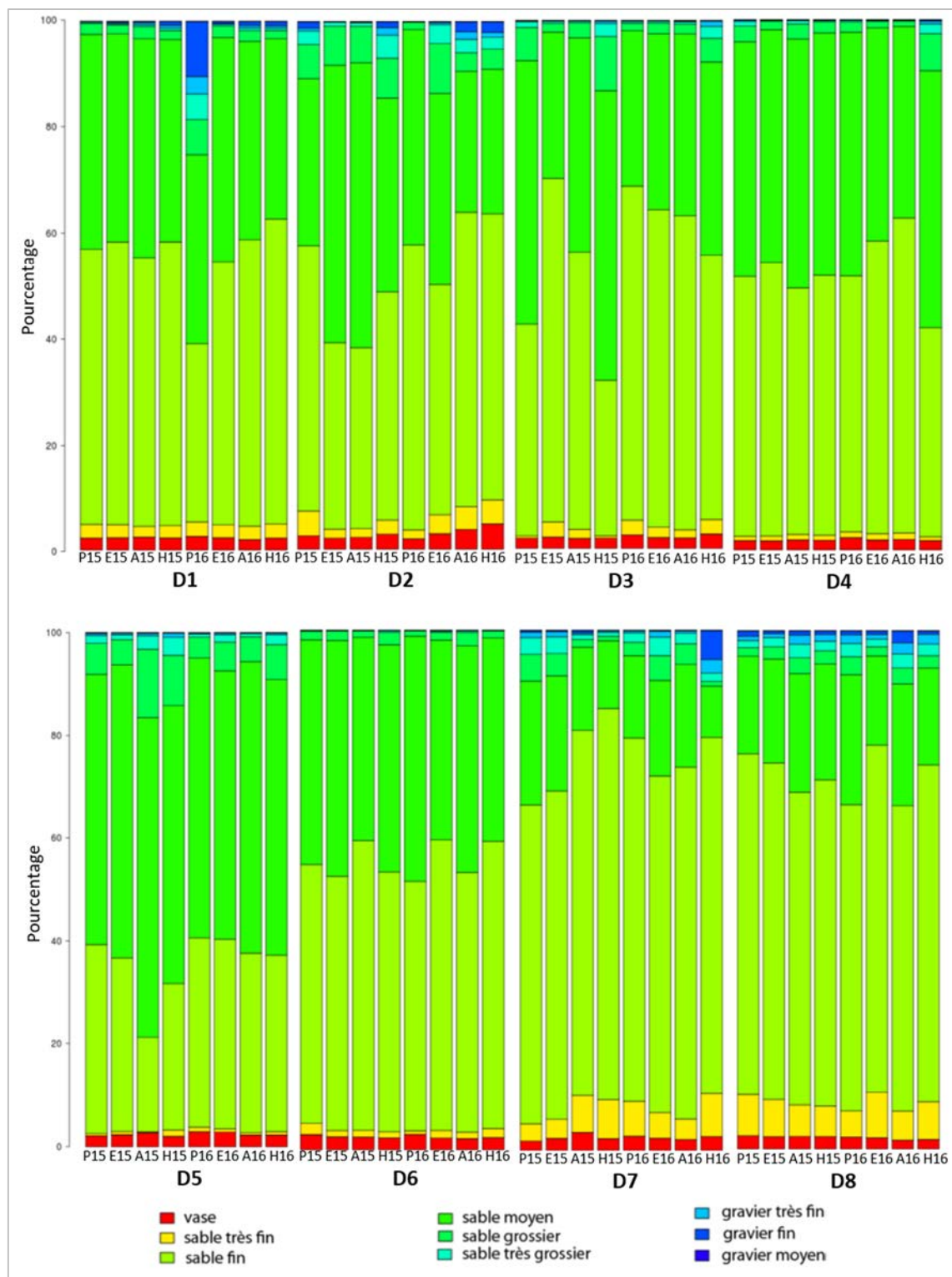


Figure 4 Histogramme de distribution de fréquences relatives des classes du sédiment.
 Echelle granulométrique utilisée (μm) : vase < 63, 63 < sable très fin < 125, 125 < sable fin < 250, 250 < sable moyen < 500, 500 < sable grossier < 1000, 1000 < sable très grossier < 2000, 2000 < gravier très fin < 4000, 4000 < gravier fin < 8000 < gravier moyen < 16000. P : printemps, E : été, A : automne, H : hiver, 15 : 2015, 16 : 2016

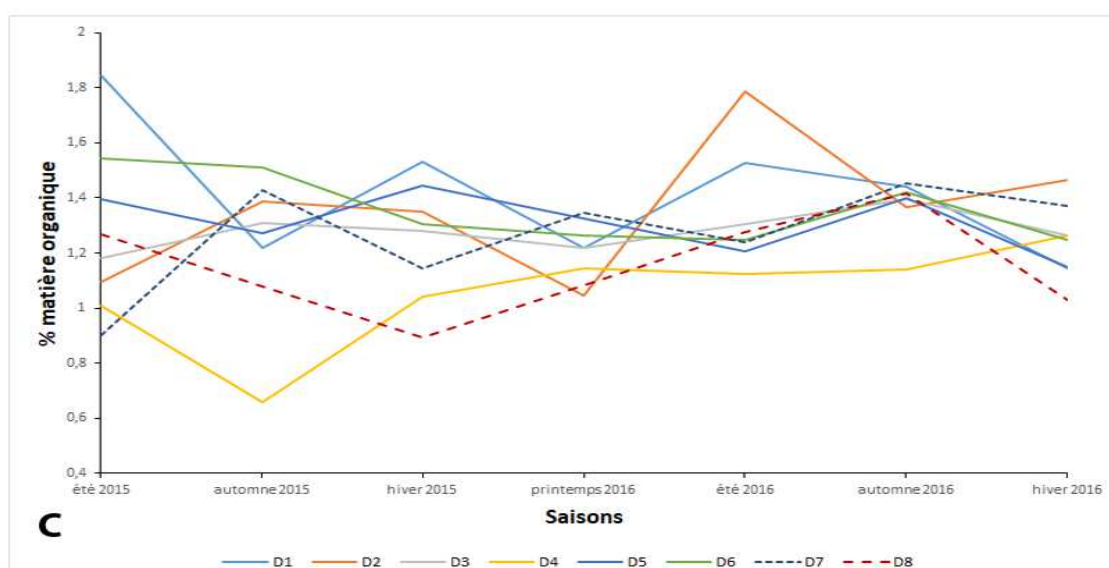
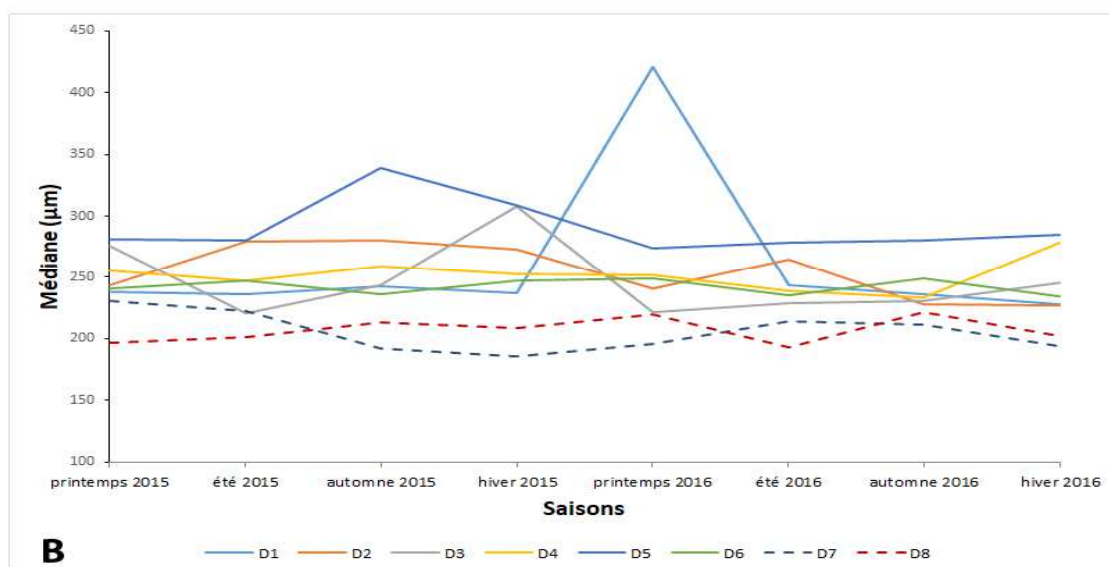
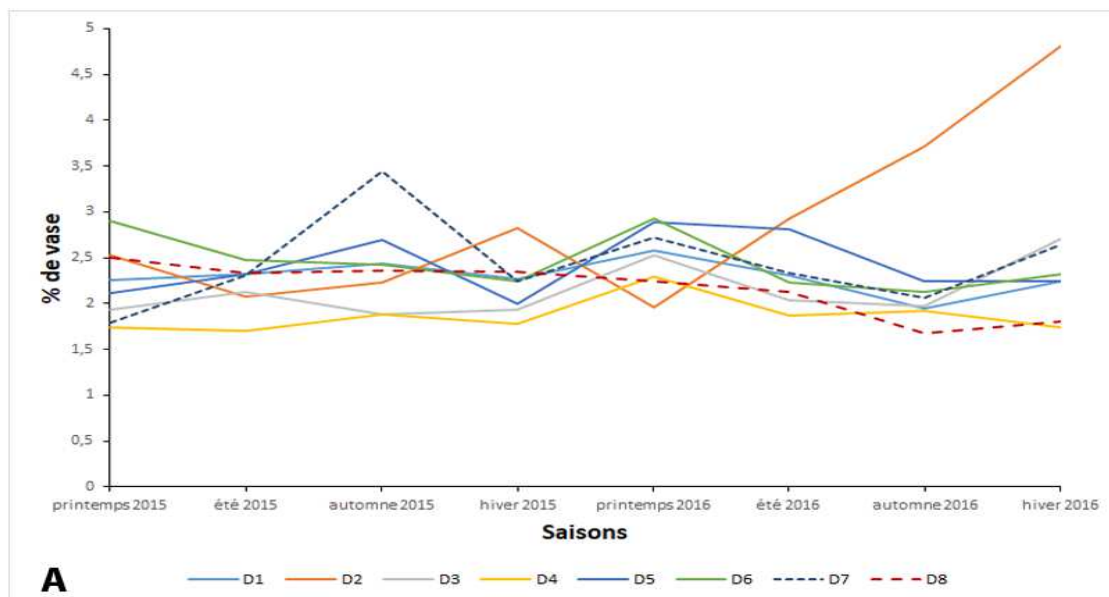


Figure 5 Evolution temporelle du pourcentage de vase (A), de la médiane (B), et du pourcentage de matière organique (C), pour chaque station d'échantillonnage au cours des deux années du projet.

La médiane varie entre 185,1 μm (D7 en hiver 2016) et 420,6 μm (D1 au printemps 2016) avec une différence saisonnière maximale intra-station pour la station D1 (de 228,2 μm au printemps 2016 à 420,6 μm en hiver 2016) (Figure 5 B). Le pourcentage de matière organique (MO) varie entre 0,66 % (D4 en automne 2015) et 1,85 % (D1 en été 2015) avec une différence saisonnière intra-station maximale pour la station D4 (de 1,66 % en automne 2015 à 1,26 % en hiver 2016) (Figure 5 C). Les analyses de variance effectuées ne montrent pas de différences significatives de la texture du sédiment (P-value > 0,05) pour les trois paramètres étudiés en fonction du facteur 'Saison' et du facteur 'Année'. *A contrario*, elle montre une différence significative pour le facteur 'Station' (P-value < 0,05) (Tableau 5). Il existe ainsi un gradient d'affinement du sédiment du nord vers le sud avec un sédiment plus fin aux stations D7 et D8.

Tableau 5 Résultats des analyses de variance à trois facteurs (année, saison, station) réalisées avec le logiciel R (en grisé les P-value significatives).

Paramètres	Vase			Matière organique			Médiane		
	année	station	saison	année	station	saison	année	station	saison
F-value	1.545	3.374	0.225	0.573	3.091	1.234	0.481	7.166	0.524
P-value	0.21944	0.00483 **	0.87869	0.45306	0.00974 **	0.30858	0.491	5.37e-06 ***	0.668

4.2 STRUCTURE DES PEUPELEMENTS MACROBENTHIQUES

4.2.1 Abondance et diversité

Les huit campagnes d'échantillonnage ont permis de récolter 12429 individus et 303 espèces.

La courbe d'accumulation des espèces montre une augmentation du nombre d'espèces en fonction du nombre d'échantillons presque linéaire suggérant que la richesse spécifique de la communauté n'a pas été atteinte (Figure 6)

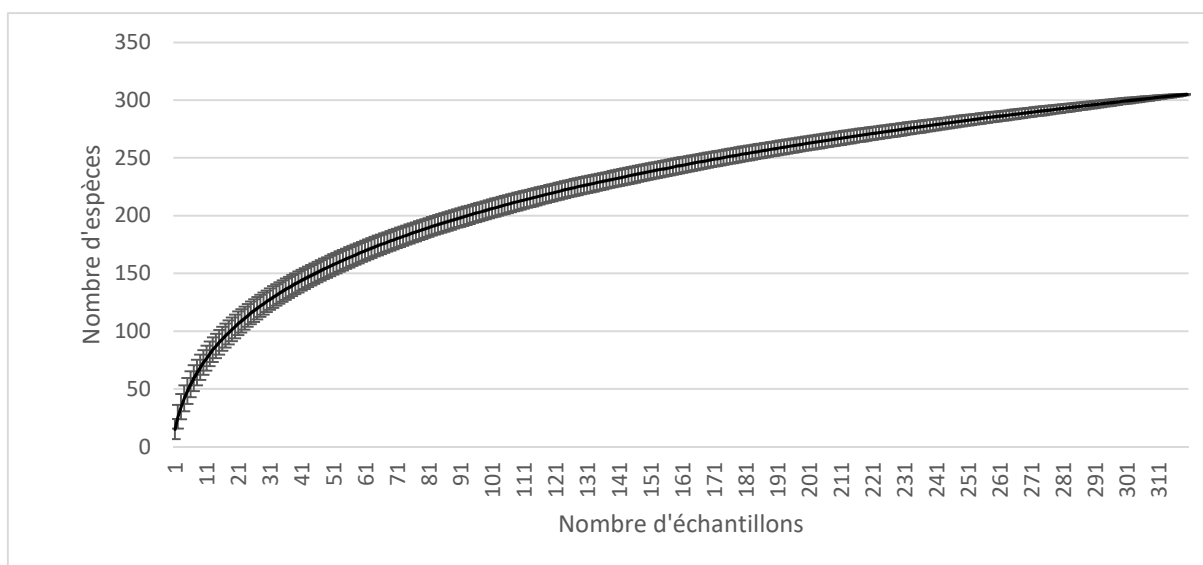


Figure 6. Courbe d'accumulation des espèces.

Sur l'ensemble des individus récoltés, plus de la moitié appartiennent à la classe des bivalves (50,9%), 31,1% à la classe des polychètes, 13,9 % au phylum des arthropodes et 1,2% à celui des échinodermes. Les autres groupes taxonomiques (némerthes, nématodes, chordés, cnidaires et sipuncles) sont présents à moins de 3% (Tableau 6).

Du point de vue de la richesse spécifique, presque la moitié des espèces appartiennent à la classe des polychètes, 32% au phylum des arthropodes, et 13,5% à celui des mollusques.

Tableau 6 Pourcentage d'abondance et de richesse des principaux taxons (*phylum, classe ou ordre*) présents sur l'ensemble des stations et des campagnes.

Phylum	Taxons	%Abondances	%Richesses
Annelida		31,09	47,52
	Polychaeta	31,09	47,52
Arthropoda		13,89	32,01
	Amphipoda	10,80	17,16
	Cumacea	0,62	4,29
	Decapoda	0,40	5,28
	Isopoda	0,67	1,98
	Leptostraca	0,06	0,99
	Mysida	0,49	0,99
	Tanaidacea	0,82	0,66
	Pycnogonida	0,02	0,66
Chordata		0,06	0,99
Cnidaria		0,02	0,66
Echinodermata		1,21	3,63
Mollusca		50,89	13,53
	Bivalvia	50,08	9,90
	Gastropoda	0,60	3,30
	Scaphopoda	0,22	0,33
Sipuncula		0,38	0,33
Nematoda		1,45	0,33
Nemertea		0,99	0,99

Les abondances varient entre 22 individus. 0,5 m⁻² à la station D5 hiver 2016 et 949 individus. 0,5 m⁻² à la station D2 été 2016 (

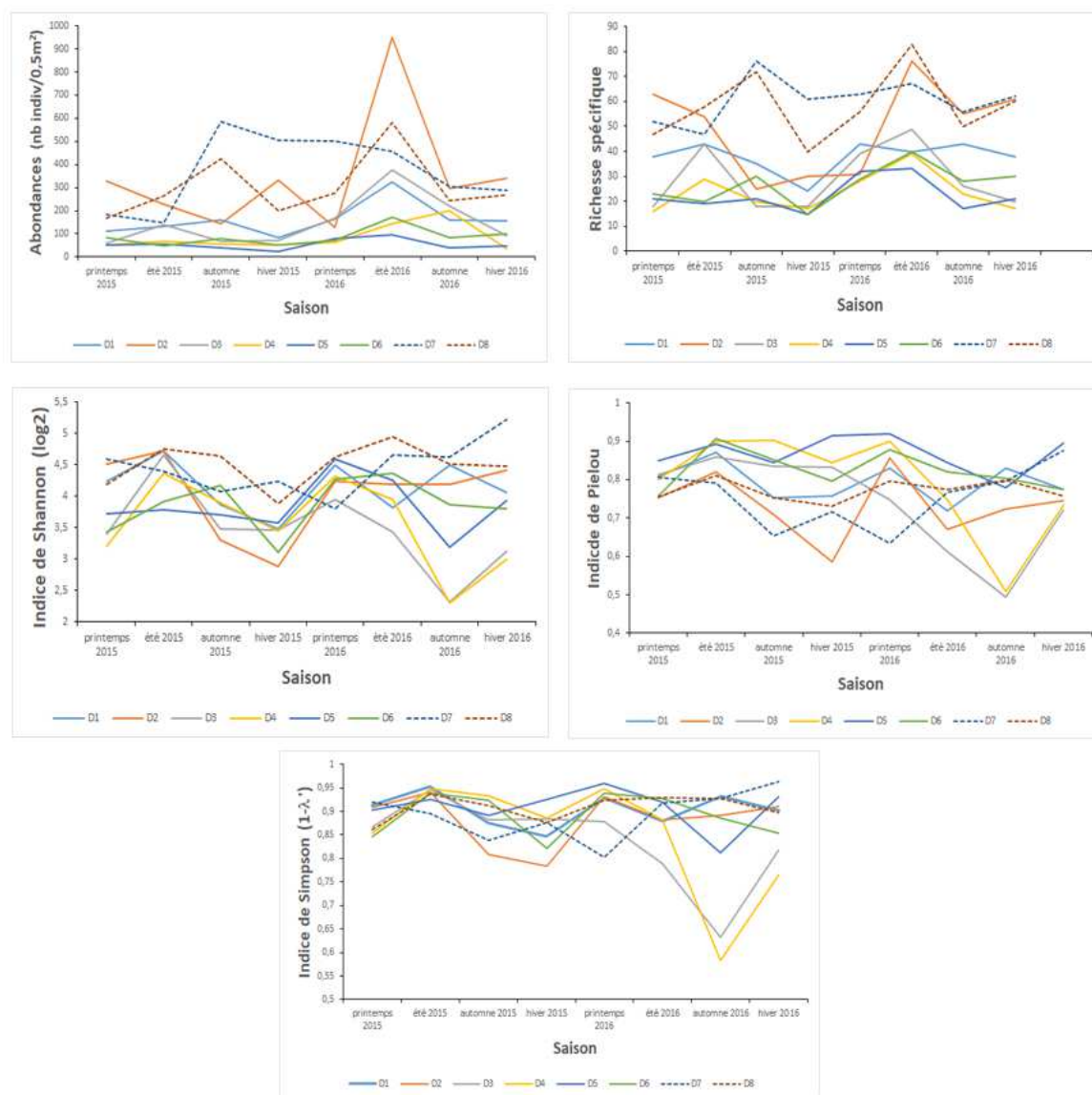


Figure 7 et Annexe C).

La richesse spécifique varie de 15 (D5 hiver 2016) à 83 espèces (D8 été 2016) .

L'ensemble des échantillons possède une diversité assez élevée avec des valeurs de l'indice de Shannon-Wiener généralement supérieures à 3 (

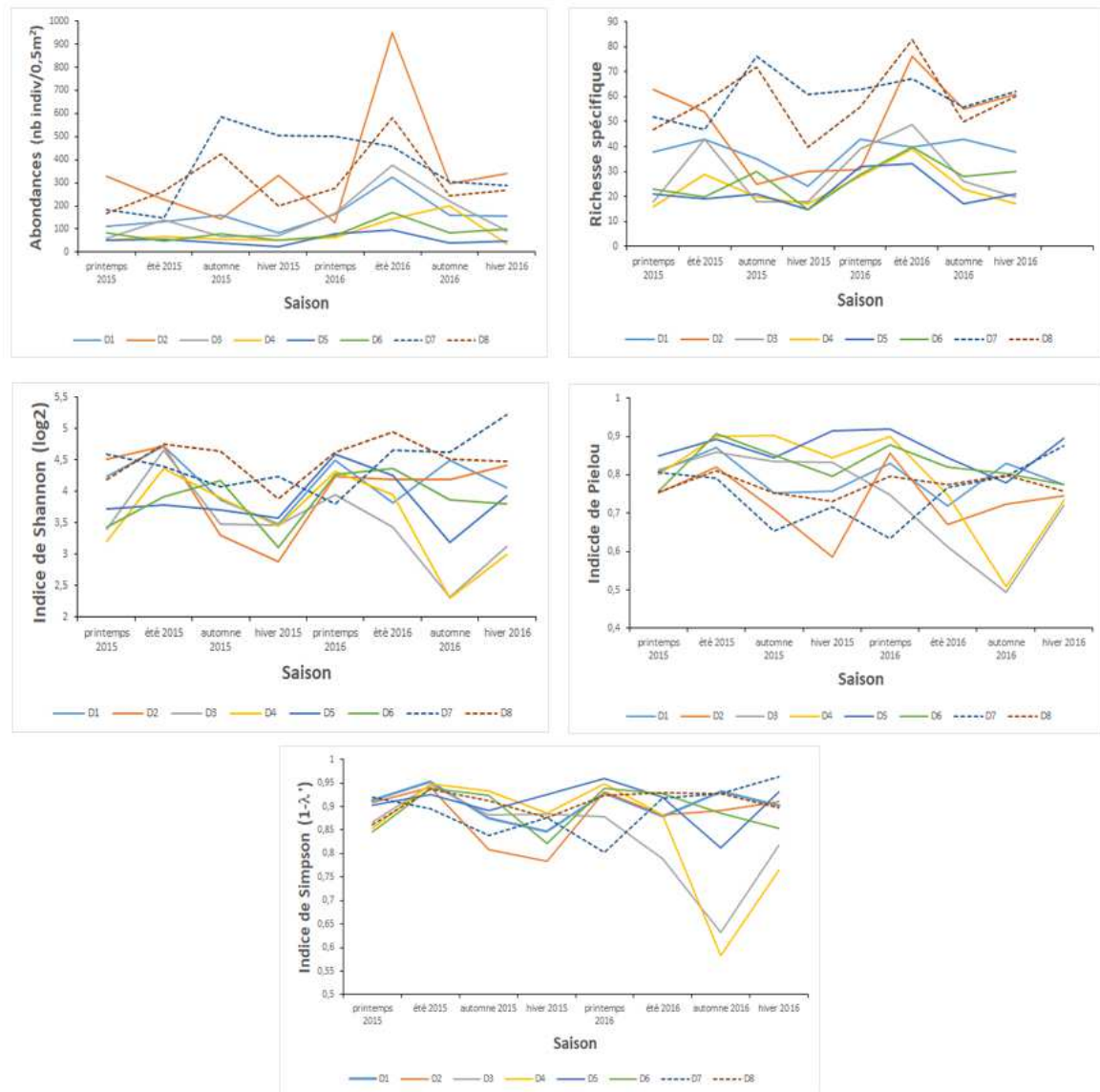


Figure 7). Les variations de l'indice de diversité de Shannon s'expliquent davantage par des fluctuations de la richesse spécifique et que par des variations de la régularité (Figure 8 et Figure 8 : Relation entre l'indice de diversité de Shannon et la richesse spécifique

9). Ainsi, près de 75% des échantillons ont un indice de Pielou élevé, compris entre 0,75 et 0,92, indiquant que ces échantillons présentent une distribution relativement équitable des abondances des différentes espèces. Seuls 8% des échantillons ont des valeurs de l'indice de Pielou inférieures à 0,65. Cela s'explique par la présence de quelques espèces de bivalves dominantes : *Timoclea ovata* pour les échantillons des stations D7 au printemps 2016, D3 en été 2016, D3 et D4 à l'automne 2016, D3 en été 2016, *Goudalia triangularis* pour les échantillons de la station D2 en hiver 2015, et dans une moindre mesure *Nucula hanleyi* pour les échantillons des stations D2 en hiver 2015 et D7 au printemps 2016 (Annexe C).

L'indice de Simpson ($1-\lambda'$) varie de 0,58 pour la station D4 à l'automne 2016 et 0,96 pour la station D7 en hiver 2016. Les variations de l'indice s'expliquent par l'influence des espèces à forte abondance.

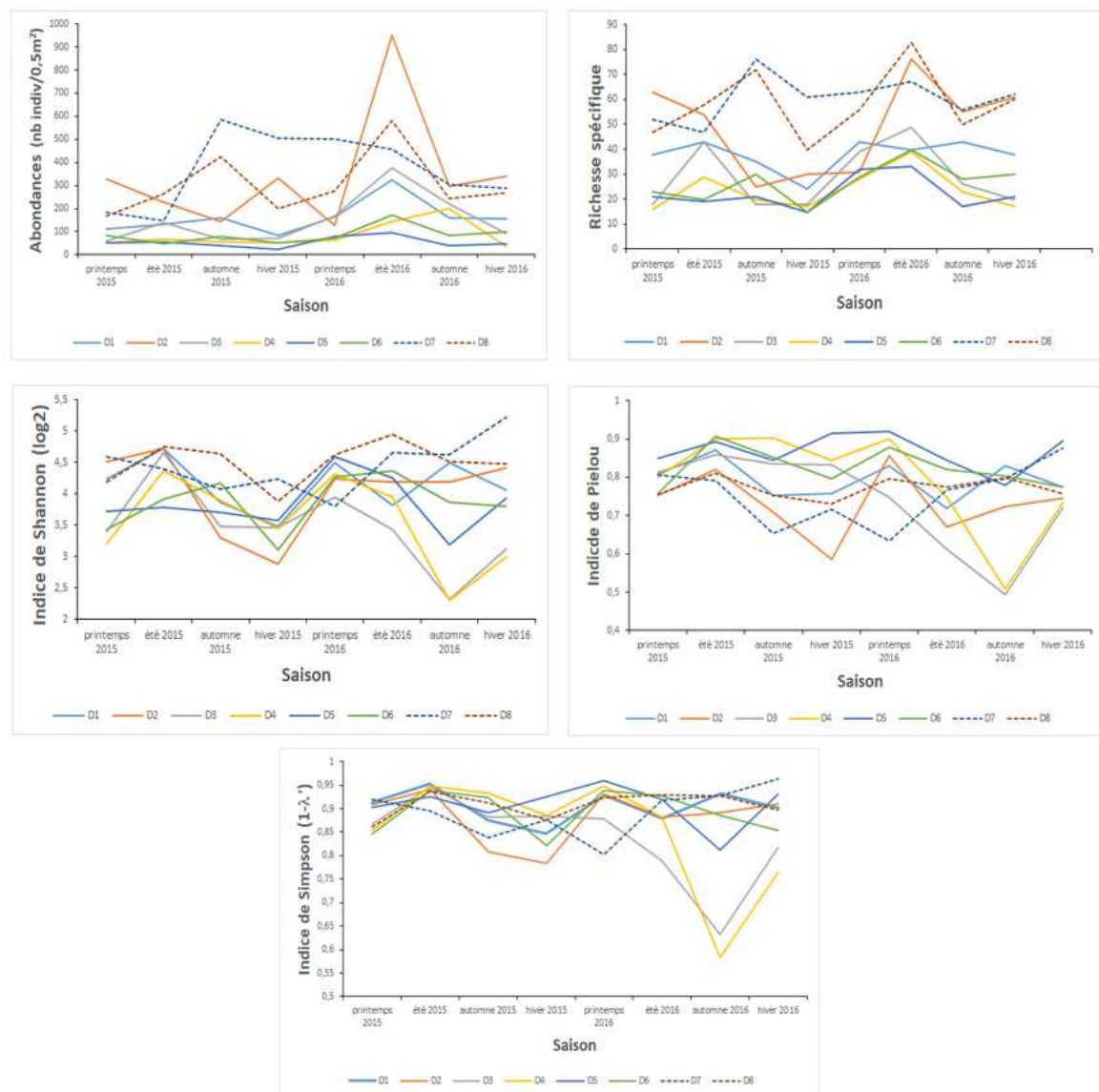


Figure 7 Graphes des indices de diversité par station en fonction des saisons et des années

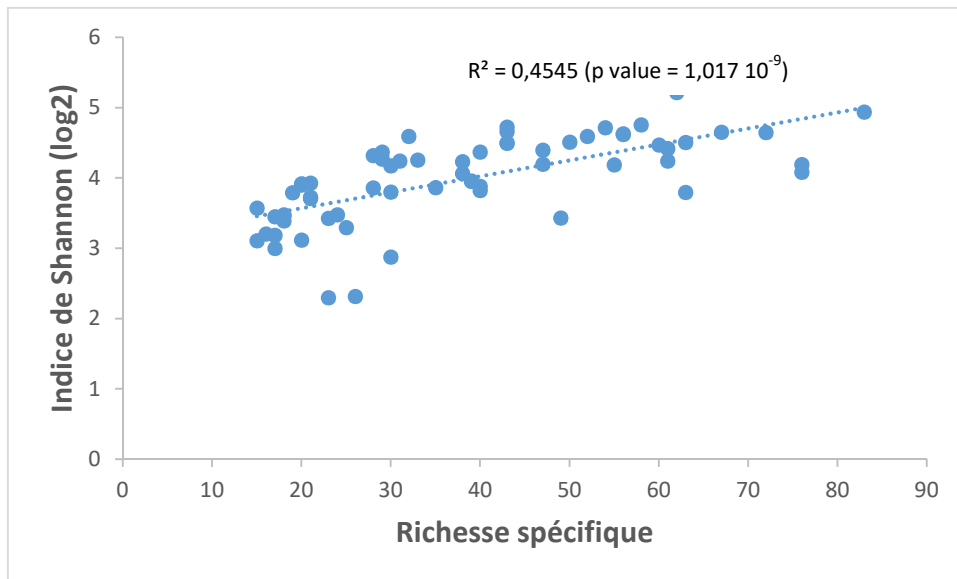


Figure 8 : Relation entre l'indice de diversité de Shannon et la richesse spécifique

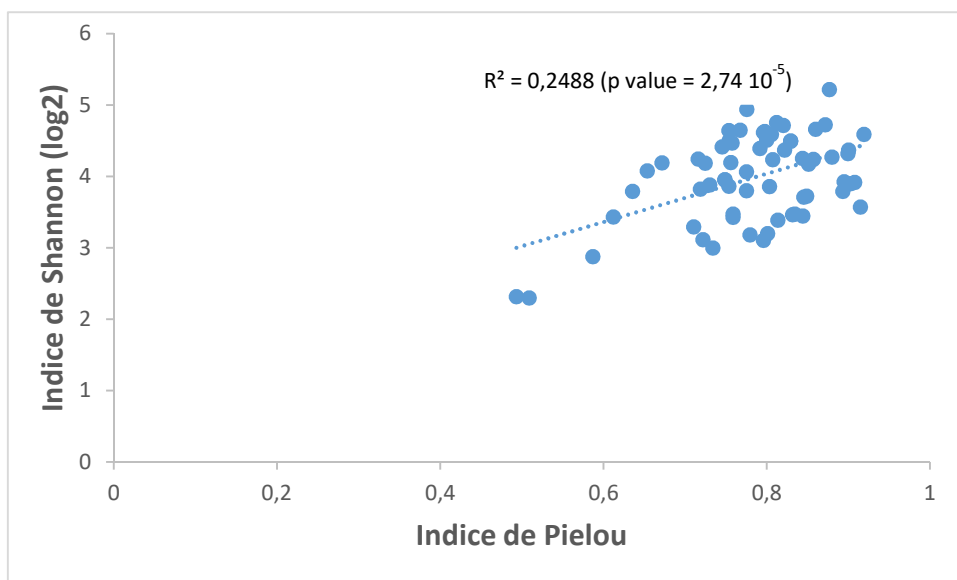


Figure 9 : Relation entre l'indice de diversité de Shannon et l'indice de régularité de Pielou..

Les tests d'analyse de variance multivariée par permutations (PERMANOVA) à trois facteurs réalisés sur les indices de diversité montrent des différences significatives dans la structure des peuplements pour la plupart des facteurs (stations, saisons et années) pris indépendamment ou des interactions croisées entre facteur. Seuls l'interaction « station x saison » pour la richesse spécifique et le facteur « années » pour l'indice de Pielou n'ont pas d'effets significatifs sur la variable analysée (Tableaux 7 et 8).

Tableaux 7 et 8 : Résultats de l'analyse de variance multivariée par permutation (PERMANOVA) sur les indices de diversité (en grisé les P value non significatives > 0,005)

Facteurs	Richesse			Abondance	
	df	Pseudo-F	P(perm)	Pseudo-F	P(perm)
Station	7	144,65	0,001	132,44	0,001
Saison	3	51,789	0,001	67,601	0,001
Année	1	82,722	0,001	148,56	0,001
St x Sa	21	6,4539	0,001	12,136	0,001
St x An	7	0,44498	0,888	8,1275	0,001
Sa x An	2	30,283	0,001	85,56	0,001
St x Sa x An	14	10,638	0,001	24,111	0,001

Facteurs	df	Indice de Shannon		Indice de Pielou		Indice de Simpson	
		Pseudo-F	P(perm)	Pseudo-F	P(perm)	Pseudo-F	P(perm)
St	7	132,44	0,001	14,585	0,001	3,9715	0,001
Sa	3	67,601	0,001	7,6293	0,002	6,8132	0,001
An	1	148,56	0,001	31,074	0,001	2,6472	0,091
St x Sa	21	12,136	0,001	3,5673	0,001	2,2706	0,003
St x An	7	8,1275	0,001	8,167	0,001	3,1653	0,004
Sa x An	2	85,56	0,001	18,041	0,001	9,0957	0,001
St x Sa x An	14	24,111	0,001	7,2606	0,001	4,3366	0,001

4.2.2 Analyses multivariées

La classification ascendante hiérarchique et le cadrage multidimensionnel non paramétrique réalisés en combinant le jeu de données « Pierre Noire » et le jeu de données « IMPECAPE » mettent en avant une forte variabilité spatiale et saisonnière dans la structure de la communauté (Figure 10 et Annexe D). Le dendrogramme permet ainsi d'identifier 3 assemblages majeurs et une station isolée :

- Assemblage 1 : la station Pierre Noire
- Assemblage 2 : la station D5 lors de l'hiver 2015
- Assemblage 3 : la station D2 au printemps 2015, à l'été, l'automne et l'hiver 2016, la station D3 à l'été 2016, et les stations D7 et D8 à toutes les dates
- Assemblage 4 : Les stations D1, D4, D6 à toutes les dates, D2 à l'été, l'automne, et l'hiver 2015 et au printemps 2016, la station D3 à toutes les dates de 2015 et au printemps, à l'automne et à l'hiver 2016, la station D5 à toutes les dates de 2015 et au printemps, à l'automne, et à l'hiver 2016.

La similarité inter-prélèvements au sein de chaque groupe est variable (comprise entre 75 et 45 %). Elle est la plus forte dans l'assemblage 1 (jeu de données Pierre Noire) et la plus faible dans l'assemblage 4. Ceci est à mettre en relation avec une forte hétérogénéité de la structure de la communauté au sein de chaque assemblage en raison des faibles abondances et de la forte richesse spécifique globale.

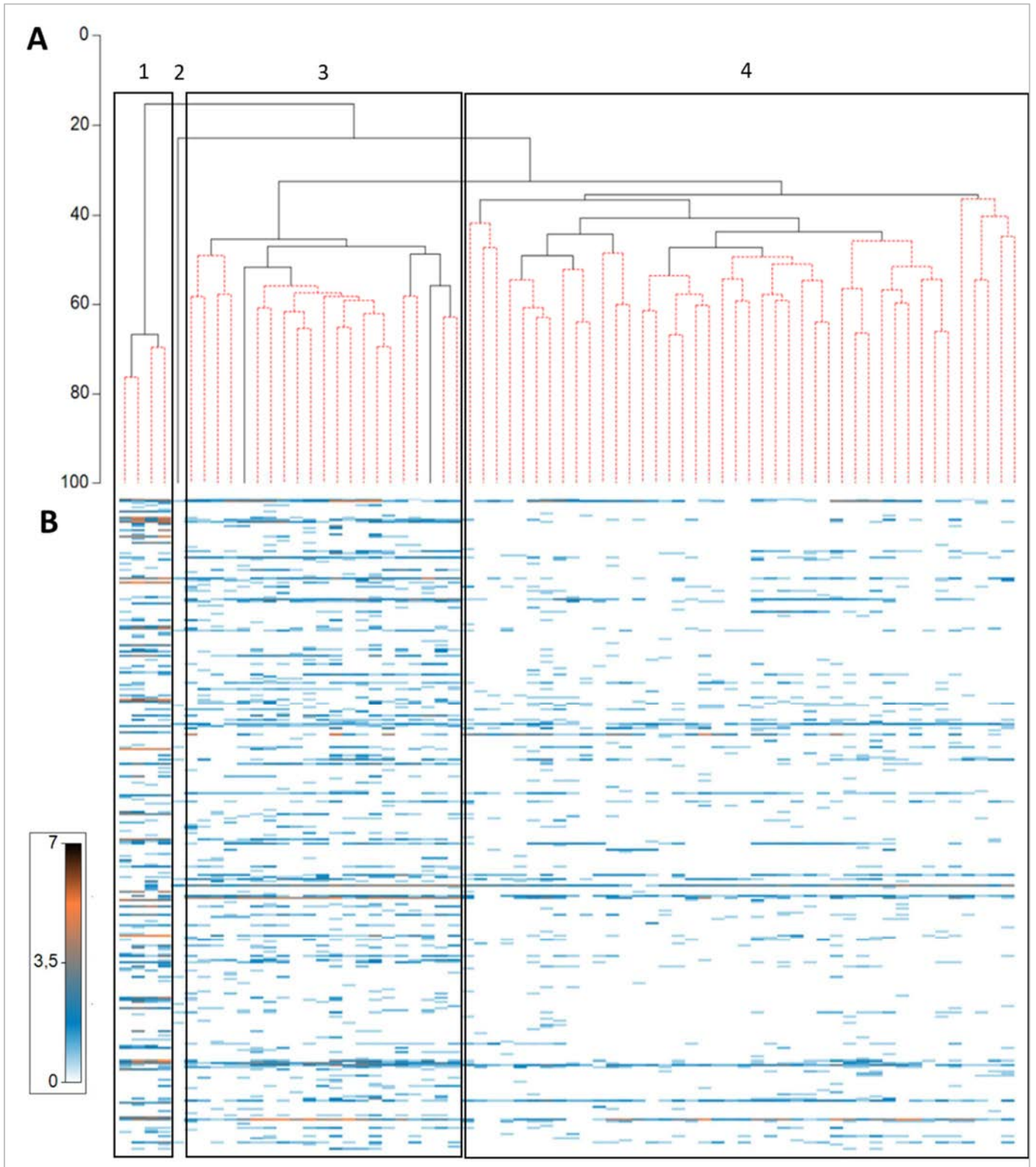


Figure 10 : Dendrogramme (A) et carte des chaleurs (B) réalisés à partir de la matrice de similarité (indice de Bray-Curtis) des données biologiques transformées (transformation $\log(X+1)$).

Les PERMANOVA à trois facteurs hiérarchisés réalisés sur les données d'abondance montrent l'existence de différences significatives dans la structure des peuplements à la fois entre les stations, les saisons et les années et au sein d'une même station (Tableau 9).

Tableau 9 Résultats de l'analyse de variance multivariée par permutation (PERMANOVA).

Facteur	df	SS	MS	Pseudo-F	P(perm)	perms
Station	7	1,72E+05	24523	13,306	0,001	998
Saison	3	58178	19393	10,523	0,001	996
Année	1	24496	24496	13,292	0,001	997
St x Sa	21	75550	3597,6	1,9521	0,001	993
St x An	7	23920	3417,2	1,8542	0,001	996
Sa x An	2	26639	13320	7,2274	0,001	999
St x Sa x An	14	56831	4059,4	2,2027	0,001	995

Tableau 10 Indices de diversité moyens calculés pour chaque groupe définis dans le dendrogramme (entre crochets min-max)..

Assemblage	Abondances	Richesses	Indice de Shannon (log2)	Indice de Pielou	Indice de Simpson (1-λ')
1	1919,25 ± 592,52 [1190-2595]	87,25 ± 13,79 [75-102]	4,67 ± 0,55 [3,84-5,03]	0,72 ± 0,08 [0,61-0,79]	0,91 ± 0,06 [0,81-0,95]
2	22,00	15,00	3,57	0,91	0,93
3	366,43 ± 185,89 [149-949]	58,90 ± 10,86 [39-82]	4,39 ± 0,4 [3,42-5,2]	0,75 ± 0,06 [0,61-0,88]	0,89 ± 0,04 [0,79-0,96]
4	112,02 ± 71,35 [37-332]	27,83 ± 9,62 [15-53]	3,77 ± 0,59 [2,3-4,7]	0,80 ± 0,1 [0,49-0,92]	0,88 ± 0,08 [0,58-0,96]

Les calculs des indices de diversité moyens pour chaque assemblage défini grâce au dendrogramme montrent que la station Pierre Noire est beaucoup plus riche et possède des abondances moyennes beaucoup plus élevées que les autres stations de l'étude (Tableau 10).

Si l'on s'attache maintenant aux seules stations suivies lors de cette étude, le dendrogramme a défini 3 assemblages. L'assemblage 1 ne comporte qu'une seule station à une seule date et sera donc laissé de côté. L'assemblage 3 incluant l'ensemble des échantillons des stations D7 et D8, une partie des échantillons de la station D2 et un échantillon de la station D3 est plus riche et présente des abondances plus importantes que l'assemblage 4 (Tableau 9). L'indice de Shannon tend également à être plus élevé dans l'assemblage 3 alors que les différences de valeur des indices de Simpson et de Pielou entre les deux assemblages sont anecdotiques. La carte des chaleurs permet également de mettre en évidence les fortes différences de richesse spécifique entre les assemblages 1, 3 et 4 (Figure 10).

Tableau 11 Pourcentages de dissimilarité moyens entre les quatre assemblages.

	Dissimilarité moyenne (%)
Assemblage 1 x Assemblage 2	99,32
Assemblage 1 x Assemblage 3	90,7
Assemblage 1 x Assemblage 4	97,27
Assemblage 2 x Assemblage 3	91,36
Assemblage 2 x Assemblage 4	79,25
Assemblage 3 x Assemblage 4	75,93

Les pourcentages de dissimilarité moyens entre les quatre assemblages (Tableau 11) sont très élevés et suggèrent des grandes disparités entre eux du point de vue de leurs compositions faunistiques. Les assemblages 3 et 4 semblent cependant les plus proches avec une dissimilarité moyenne de l'ordre de 75 %.

Tableau 12 Liste des 10 premières espèces contribuant le plus à la dissimilarité entre les assemblages 3 et 4.

Espèces	Abondances moyennes (ind.0,5m ²)		Contributions cumulées (%)
	Assemblage 3	Assemblage 4	
<i>Nucula hanleyi</i>	55,57	3,93	15,2
<i>Timoclea ovata</i>	54,38	23,07	28,91
<i>Abra prismatica</i>	26,52	7,19	35,51
<i>Goodallia triangularis</i>	18,52	9,55	40,81
<i>Nephtys cirrosa</i>	24,9	15	45,19
<i>Aricidea cerruti</i>	10,81	1,1	48,01
<i>Bathyporeia elegans</i>	10,33	2,31	50,74
<i>Spiophanes bombyx</i>	9,38	0,52	53,22
<i>Abra alba</i>	7,67	1	55,25
<i>Aphelochaeta sp.</i>	6,81	0,48	57,22

L'établissement de la liste des espèces contribuant le plus à la dissimilarité entre les assemblages 3 et 4 (Tableau 12) montre que les différences observées sont surtout dues à des abondances moyennes plus élevées dans l'assemblage 3. Cela confirme les résultats précédemment obtenus suite aux calculs des indices de diversité par station. Aucune espèce commune n'est présente à des abondances plus élevées dans l'assemblage 4.

L'analyse de redondance basée sur les distances (dBRDA) indique que les variables environnementales prises en considération (profondeur, distance à la souille, % de gravier, % de sable, % de vase, médiane et teneur en matière organique) n'expliquent que 18,27 % de la variabilité de la structure de la communauté. De cette partie expliquée, les axes 1 et 2 de la dBRDA expliquent respectivement 31,8 et 23,0 % de la variance (Figure 11). Le long de l'axe 1, les stations se distribuent en fonction de la profondeur alors que le long de l'axe 2, les échantillons se différencient en fonction

de la médiane du sédiment et du pourcentage de gravier. Il existe au regard de cet axe une forte hétérogénéité dans la distribution des échantillons (i.e. dates d'échantillonnage). Les variables environnementales retenues ne permettent pas de discriminer les assemblages identifiés précédemment par la classification ascendante hiérarchique.

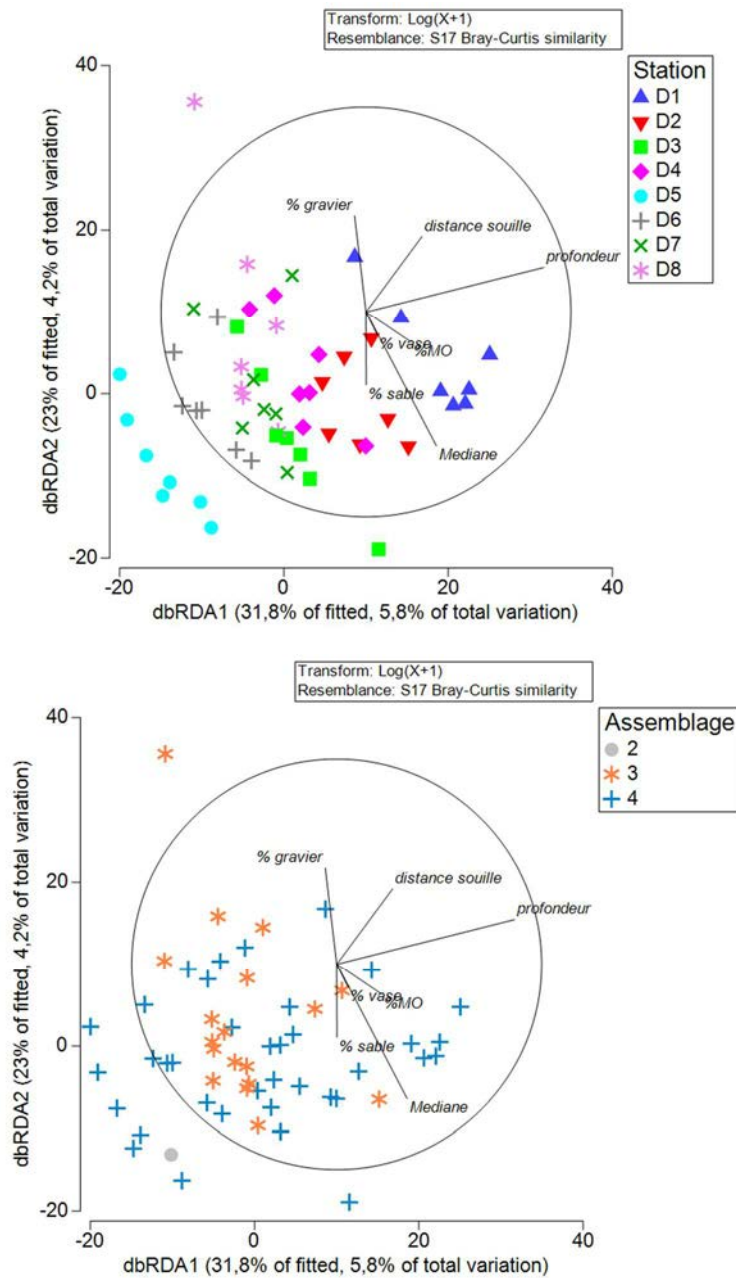


Figure 11. Résultats de l'analyse de redondance basée sur la distance (dbRDA) à partir de la matrice de similarité (distance de Bray-Curtis) et des 7 variables environnementales.

4.2.3 Structure trophiques

Les structures trophiques de chaque prélèvement sont représentées dans la Figure 12.

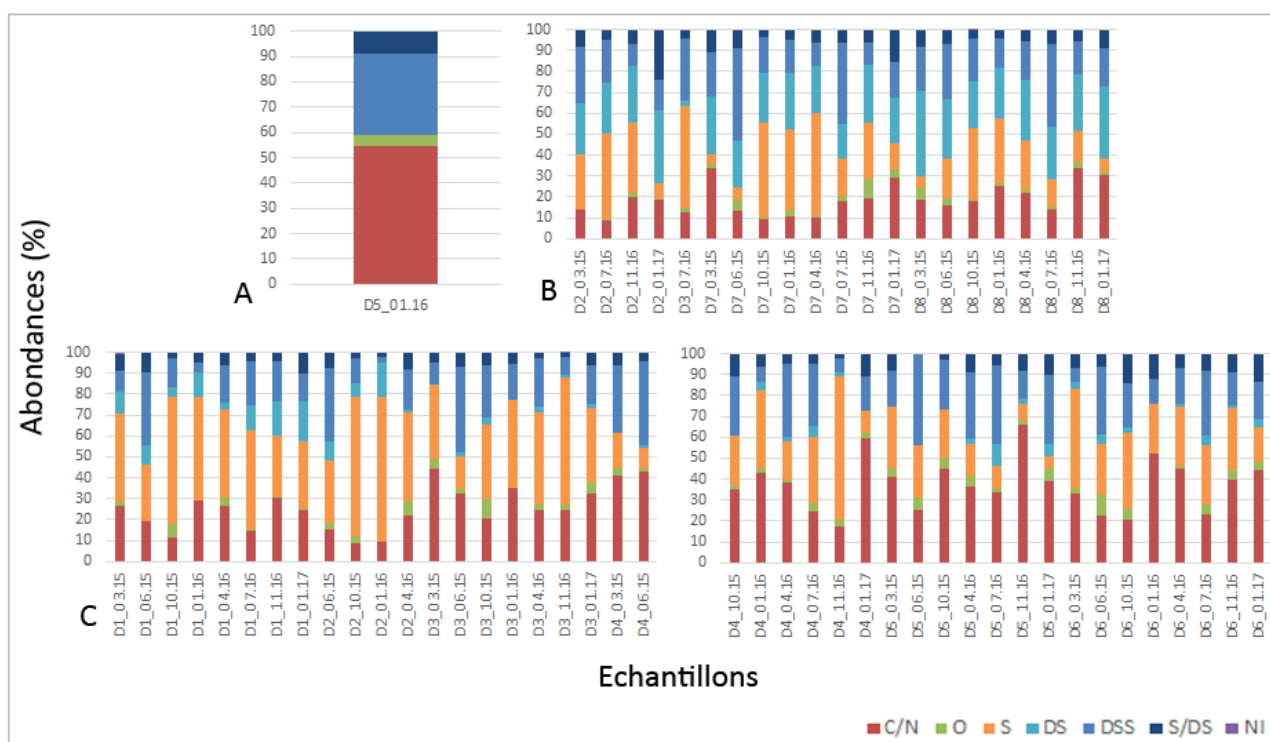


Figure 12 : Groupes écologiques pour l'ensemble des prélèvements regroupés par assemblages. A : assemblage 2, B : assemblage 3, C , assemblage 4. C/N : carnivore, prédateur ; O : omnivore ; S : suspensivore ; DS : déposivore de surface ; DSS : déposivore de sub-surface ; NC : non connu

L'assemblage 3 est surtout composé par des organismes déposivores (entre 38,6% et 75,7% des abondances), les suspensivores représentant entre 4,8% et 49,5% des abondances, les carnivores/prédateurs entre 8,7% et 34,1% des abondances et les omnivores entre 0 et 9,4% des abondances (Annexe D).

Dans l'assemblage 4, les organismes déposivores représentent entre 10,6% et 53,7% des abondances, les carnivores/prédateurs entre 8,6% et 65,8% des abondances, les suspensivores entre 5,9% et 69% des abondances et les omnivores entre 0 et 10,2% des abondances (Annexe D).

5 DISCUSSION ET CONCLUSION

Les analyses sédimentaires montrent une stabilité de la texture du sédiment au cours du temps, aussi bien entre les années qu'entre les saisons mais soulignent des différences de texture entre les stations avec un gradient d'affinement du sédiment du nord vers le sud. Cabioch (1968) avait décrit cette zone la présence d'un sédiment thixotropique au niveau des stations les plus au nord et un léger envasement vers le sud à partir de balise de la Pierre Noire.

En parallèle, les analyses effectuées sur la macrofaune mettent en avant trois assemblages faunistiques principaux avec des gradients d'abondance, de richesse spécifique et de diversité décroissants de

l'assemblage 4 vers l'assemblage 3 puis l'assemblage 2. En dépit de variations temporelles dans la structure des communautés dans le temps, entre les deux années de suivi et entre saisons au sein de chaque année, l'espace apparaît être le facteur clef pour expliquer la variabilité spatio-temporelle observée des communautés.

L'assemblage 3, principalement constitué des stations D7 et D8, et la station Pierre Noire (assemblage 1), est situé au sud de la zone d'étude dans les sédiments les plus fins (Figure 2). Cette zone étant décrite comme moins exposé au remaniement sédimentaire (Cabioch, 1968), la stabilité du sédiment jouerait un rôle sur la composition faunistique de cet assemblage et sa plus grande richesse. Un gradient d'appauvrissement faunistique du sud au nord dans les sables moyens à fins de la baie de Morlaix avait déjà été mis en évidence dans les années 60 par Cabioch (1968) donc avant que ne débute l'activité d'extractions dans la baie. Ce seul gradient de stabilité sédimentaire ne peut expliquer l'ensemble des résultats observés. Ainsi, quatre des huit échantillonnages réalisés à la station D2, située au nord de la zone d'extraction de granulats mais sous l'influence supposée du panache turbide, appartiennent également à l'assemblage le plus diversifié avec des abondances moyennes plus fortes (assemblage 3). Ainsi, les eaux turbides du panache turbide pourraient avoir un effet biostimulant sur les communautés benthiques en contribuant à fournir des apports nutritifs additionnels. La majorité des dates auxquelles les prélèvements à la station D2 se rattachent à l'assemblage 3 (été, automne et hiver 2016) se caractérise par des teneurs en vase plus élevées ce qui tendrait à confirmer cette hypothèse. Cette hypothèse est à rapprocher de l'hypothèse de perturbation intermédiaire (« intermediate disturbance hypothesis ») émise par Connell (1978) qui stipule que la diversité est maximale lorsque le milieu est soumis à un niveau intermédiaire de perturbation, ici l'enrichissement ponctuel en ressources nutritives dû aux eaux du panache turbide. Cet enrichissement en apports nutritifs pourrait se répercuter sur la structure fonctionnelle de la communauté avec des proportions en dépositivores plus élevées.

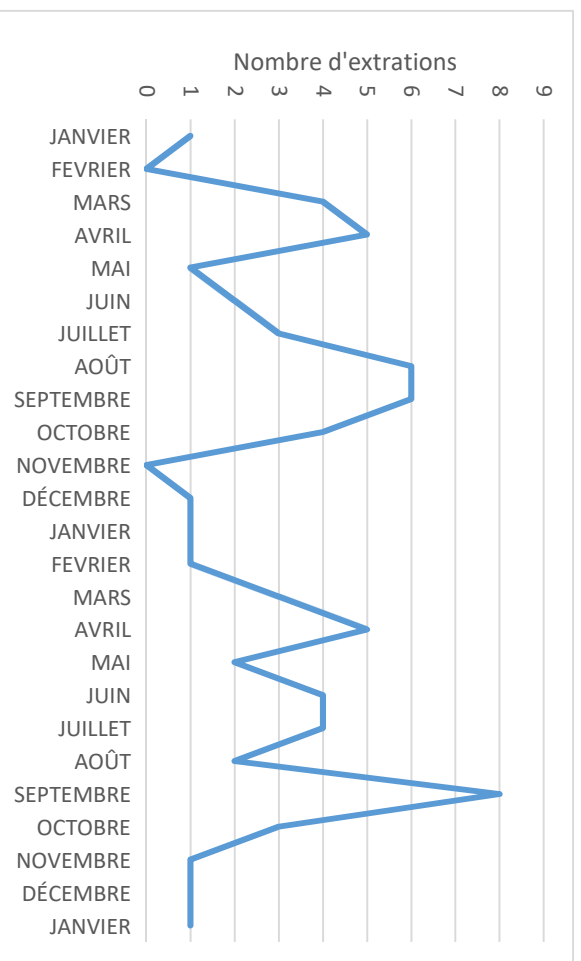
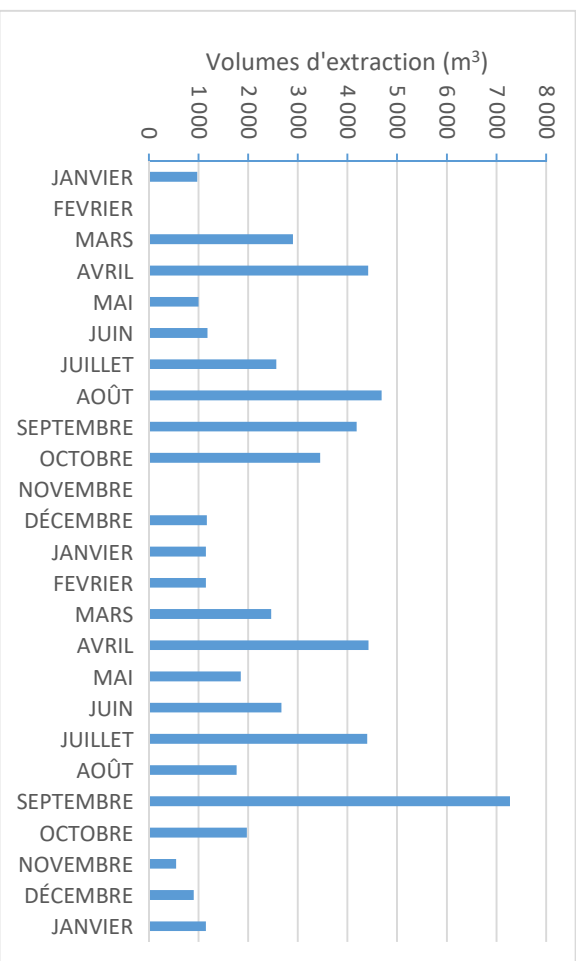
L'influence directe de l'extraction est difficile à mettre en évidence. En effet, la station D5 située au centre de la zone d'extraction ne montre pas de différences significatives dans la structure de la communauté avec les stations D3 et D4 choisies comme stations de référence hors de l'influence de l'extraction malgré néanmoins des abondances plus faibles. Cela pourrait s'expliquer par le fait que cette zone de la Baie de Morlaix est exposée à un stress permanent lié à un remaniement régulier du sédiment exercé par les courants marins entraînant une forte instabilité naturelle du sédiment. Le stress physique engendré par l'extraction de granulats qui se rajoute ainsi à un stress physique naturel ne serait pas d'une intensité suffisante pour avoir un effet significatif sur une communauté naturellement oligospécifique et adaptée à des perturbations. Ce résultat est à rapprocher d'études menées sur l'impact de la pêche par les arts traînants sur la macrofaune benthique, cette pratique se traduisant par des effets d'abrasion sur le sédiment superficiel. Ces études mettent en évidence une forte hétérogénéité de la réponse des communautés benthiques à la pression de pêche en fonction de l'intensité des perturbations naturelles auxquelles elles sont exposées (Kaiser & Spencer, 1996 ; Tillin et al., 2006).

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonyme, 2009. Etude hydrosédimentaire sur le site des Duons. Rapport du bureau d'étude Astérie, 129p.
- Blott, S.J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237-1248.
- Clarke K.R., Warwick R.M. (2001) A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Mar Ecol Prog Ser* 216, 265-278.
- Cabioch L., 1968. Contribution à la connaissance des peuplements benthiques de la Manche occidentale, thèse, Station biologique de Roscoff, Cahiers de biologie marine, tome IX, cahier 5 suppl., 493-720.
- Clarke, KR, 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology* 18: 117-143.
- Clarke, K.R., Gorley, R.N., 2015. PRIMER v7: User manual/tutorial. PRIMER-E, Plymouth, 296pp.
- Connell, J.H., 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* 199, 1302-1310.
- Ehrhold A., Hamon D., Chevalier C., Autret E., Houlgatte E., Gaffet J.D., Caisey X., Cordier C., Dutertre M., Alix A.S., Monpert C., Navon M., Kerdoncuff J., Gentil F., Thiébaud E., 2011. Réseau de surveillance benthique (REBENT) – Région Bretagne. Approche sectorielle subtidale : Identification et caractérisation des habitats benthiques du secteur Morlaix. RST/IFREMER/ODE/DYNECO/Ecologie benthique/11-03/REBENT, 129 p + 14 annexes (Volume séparé, 276 p).
- Folk, R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral Composition in sedimentary-rock nomenclature. *The Journal of Geology* 62, 344-359.
- Fournier J., Gallon R. (2014). "G2Sd: a new R package for the statistical analysis of unconsolidated sediments" *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.
- 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. Rapport AQUAREF 2014. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00269/38067/>
- Kaiser M.J., Spencer B.E., 1996. The effects of beam-trawl disturbance on infaunal communities in different habitats. *Journal of Animal Ecology* 65, 348-358.
- Tillin H.M., Hiddink J.G., Jennings S., Kaiser M.J., 2006. Chronic bottom trawling alters the functional composition of benthic invertebrate communities on a sea-basin scale. *Marine Ecology Progress Series* 318, 31-45.

7 ANNEXES

Annexe A : Volumes d'extraction et nombre d'extractions au cours des deux années du suivi : janvier 2015 à janvier 2017



Annexe B : Caractéristiques du sédiment de l'ensemble des échantillons du projet et de la Pierre Noire basées sur les classifications de GRADISTAT et calculées par la méthode de Folk et Ward.

Campagnes	Stations	Médiane	% vase	% MO	type de sédiment	indice de classement	Type de classement
printemps 2015	D1	238,223497	2,2512629		Sable fin	0,512548014	Relativement bien classé
été 2015	D1	235,749689	2,31842915	1,85	Sable fin	0,50126773	Relativement bien classé
automne 2015	D1	242,28262	2,43409983	1,22	Sable fin	0,523336977	Relativement bien classé
hiver 2015	D1	236,890034	2,27325627	1,53	Sable fin	0,520246449	Relativement bien classé
printemps 2016	D1	420,604219	2,57797581	1,21765601	Sable moyen	1,366212116	Mal classé
été 2016	D1	243,020545	2,31426004	1,52925532	Sable fin	0,52467208	Relativement bien classé
automne 2016	D1	235,940588	1,94735716	1,44014401	Sable fin	0,526570135	Relativement bien classé
hiver 2016	D1	228,25728	2,248394	1,14449213	Sable fin	0,499013675	Bien classé
printemps 2015	D2	243,197156	2,52501191		Sable fin	0,787773199	Moyennement classé
été 2015	D2	278,891371	2,07969851	1,09	Sable moyen	0,572185558	Relativement bien classé
automne 2015	D2	280,062272	2,22856617	1,39	Sable moyen	0,559376444	Relativement bien classé
hiver 2015	D2	272,741557	2,82768066	1,35	Sable moyen	0,883317789	Moyennement classé
printemps 2016	D2	240,469468	1,96176642	1,04399702	Sable fin	0,418233196	Bien classé
été 2016	D2	264,746211	2,92263185	1,78791615	Sable moyen	0,829910868	Moyennement classé
automne 2016	D2	228,202781	3,72128142	1,36789057	Sable fin	0,862200324	Moyennement classé
hiver 2016	D2	226,910431	4,80740219	1,46520147	Sable fin	0,898770383	Moyennement classé
printemps 2015	D3	275,493145	1,93737564		Sable moyen	0,515286673	Relativement bien classé
été 2015	D3	220,537181	2,12784743	1,18	Sable fin	0,458228285	Bien classé
automne 2015	D3	243,221441	1,88003581	1,31	Sable fin	0,478772844	Bien classé
hiver 2015	D3	307,436341	1,94008559	1,28	Sable moyen	0,619808592	Relativement bien classé
printemps 2016	D3	221,829996	2,5297876	1,21872996	Sable fin	0,467026927	Bien classé
été 2016	D3	229,205509	2,0335678	1,3050571	Sable fin	0,457522546	Bien classé
automne 2016	D3	230,892917	1,96836857	1,39458573	Sable fin	0,445598178	Bien classé
hiver 2016	D3	245,470471	2,71234061	1,26448894	Sable fin	0,659362951	Relativement bien classé
printemps 2015	D4	255,070932	1,74196627		Sable moyen	0,436796547	Bien classé
été 2015	D4	246,964222	1,70240103	1,01	Sable fin	0,398423703	Bien classé
automne 2015	D4	259,250468	1,87919463	0,66	Sable moyen	0,430003222	Bien classé
hiver 2015	D4	252,381857	1,77556197	1,04	Sable moyen	0,41323477	Bien classé
printemps 2016	D4	251,529331	2,29315153	1,14367405	Sable moyen	0,419130897	Bien classé
été 2016	D4	239,005148	1,86367118	1,12244898	Sable fin	0,406990905	Bien classé
automne 2016	D4	233,075618	1,92389006	1,13913751	Sable fin	0,409230309	Bien classé
hiver 2016	D4	278,712347	1,73668153	1,26459144	Sable moyen	0,56238608	Relativement bien classé
printemps 2015	D5	280,879847	2,1117297		Sable moyen	0,521929257	Relativement bien classé
été 2015	D5	280,514956	2,31702466	1,39	Sable moyen	0,489636174	Bien classé
automne 2015	D5	338,666964	2,69234046	1,27	Sable moyen	0,612664365	Relativement bien classé
hiver 2015	D5	308,664323	2,00273666	1,44	Sable moyen	0,677751259	Relativement bien classé
printemps 2016	D5	274,201133	2,89327632	1,32501949	Sable moyen	0,488536285	Bien classé
été 2016	D5	277,94219	2,81170122	1,20481928	Sable moyen	0,5184107	Relativement bien classé
automne 2016	D5	279,944123	2,24629418	1,39917695	Sable moyen	0,472898897	Bien classé
hiver 2016	D5	284,813202	2,25022502	1,14722753	Sable moyen	0,548815469	Relativement bien classé
printemps 2015	D6	241,102084	2,90344362		Sable fin	0,494926078	Bien classé

Campagnes	Stations	Médiane	% vase	% MO	type de sédiment	indice de classement	Type de classement
été 2015	D6	247,523697	2,47132553	1,55	Sable fin	0,468648023	Bien classé
automne 2015	D6	235,717342	2,42070117	1,51	Sable fin	0,435656458	Bien classé
hiver 2015	D6	246,952363	2,24445646	1,30	Sable fin	0,479692778	Bien classé
printemps 2016	D6	249,161487	2,93335865	1,26282557	Sable fin	0,409024576	Bien classé
été 2016	D6	235,41062	2,22565688	1,2482663	Sable fin	0,454640458	Bien classé
automne 2016	D6	248,559987	2,12614606	1,41843972	Sable fin	0,483851315	Bien classé
hiver 2016	D6	234,711566	2,32620321	1,24666073	Sable fin	0,449827334	Bien classé
printemps 2015	D7	230,359565	1,79342723		Sable fin	0,720327448	Moyennement classé
été 2015	D7	222,627537	2,30525324	0,90	Sable fin	0,703898695	Moyennement classé
automne 2015	D7	191,818145	3,4397616	1,43	Sable fin	0,553432113	Relativement bien classé
hiver 2015	D7	185,148754	2,24627876	1,15	Sable fin	0,469106837	Bien classé
printemps 2016	D7	195,620016	2,72059417	1,34428678	Sable fin	0,596715832	Relativement bien classé
été 2016	D7	214,19498	2,33523247	1,23734533	Sable fin	0,756181447	Moyennement classé
automne 2016	D7	211,167584	2,06224577	1,4527845	Sable fin	0,61866456	Relativement bien classé
hiver 2016	D7	194,034565	2,64789324	1,37103685	Sable fin	1,061790325	Mal classé
printemps 2015	D8	196,846599	2,50320376		Sable fin	0,626820159	Relativement bien classé
été 2015	D8	200,949781	2,34005764	1,27	Sable fin	0,644087185	Relativement bien classé
automne 2015	D8	213,232829	2,36326806	1,08	Sable fin	0,805813382	Moyennement classé
hiver 2015	D8	208,391465	2,35048491	0,89	Sable fin	0,689777304	Relativement bien classé
printemps 2016	D8	219,877839	2,24307986	1,08108108	Sable fin	0,7839556	Moyennement classé
été 2016	D8	192,962854	2,12529346	1,27750177	Sable fin	0,617839544	Relativement bien classé
automne 2016	D8	221,3839	1,67389957	1,4159292	Sable fin	0,914361377	Moyennement classé
hiver 2016	D8	202,111943	1,80367673	1,03092784	Sable fin	0,758912529	Moyennement classé

Annexe C : Indices de diversité de l'ensemble des échantillons du projet et de la Pierre Noire (PN)

Campagnes	Stations	Abondances	Richesses	Indice de Pielou	Indice de Shannon (log2)	Indice de Simpson (1-I')
printemps 2015	D1	113	38	0,80711392	4,235675354	0,912768647
printemps 2015	D2	329	63	0,75382203	4,505805309	0,908054711
printemps 2015	D3	61	18	0,81342406	3,391917314	0,866120219
printemps 2015	D4	50	16	0,80076855	3,203074189	0,853061224
printemps 2015	D5	52	21	0,84859491	3,7272982	0,902714932
printemps 2015	D6	85	23	0,75834567	3,430423623	0,845938375
printemps 2015	D7	184	52	0,80550714	4,591744901	0,919161321
printemps 2015	D8	168	47	0,75559059	4,196995073	0,861134873
printemps 2015	PN	1768	76	0,61542063	3,845103456	0,815302927
été 2015	D1	133	43	0,87123698	4,727562505	0,95215311
été 2015	D2	227	54	0,81993683	4,718644236	0,940548127
été 2015	D3	140	43	0,8594534	4,663621674	0,946865365
été 2015	D4	69	29	0,89975314	4,370983654	0,948849105
été 2015	D5	55	19	0,89298183	3,793322097	0,925925926
été 2015	D6	48	20	0,90713701	3,92058093	0,937943262
été 2015	D7	149	47	0,79144821	4,396169424	0,896154544
été 2015	D8	265	58	0,81180869	4,755559852	0,936906804
automne 2015	D1	159	35	0,75332299	3,864006821	0,875885678
automne 2015	D2	142	25	0,71004411	3,297342714	0,808310858
automne 2015	D3	68	18	0,83387824	3,477209725	0,882791923
automne 2015	D4	54	20	0,90230269	3,899687327	0,933612858
automne 2015	D5	39	21	0,84498709	3,711451501	0,892037787
automne 2015	D6	78	30	0,85092511	4,175396421	0,923409923
automne 2015	D7	584	76	0,65348459	4,082924362	0,839052844
automne 2015	D8	425	72	0,7530664	4,646363186	0,912253052
automne 2015	PN	2595	96	0,74304263	4,892907856	0,935867119
hiver 2015	D1	84	24	0,75841404	3,477299944	0,846815835
hiver 2015	D2	332	30	0,58667474	2,878748772	0,784224511
hiver 2015	D3	72	18	0,8313679	3,4667418	0,884194053
hiver 2015	D4	51	17	0,84396218	3,449664061	0,885490196
hiver 2015	D5	22	15	0,9144417	3,572623664	0,926406926
hiver 2015	D6	50	15	0,79546491	3,107794392	0,82122449
hiver 2015	D7	507	61	0,71570394	4,244652093	0,875724053
hiver 2015	D8	199	40	0,72981064	3,88399977	0,875793107
printemps 2016	D1	164	43	0,82890933	4,497881507	0,928624869
printemps 2016	D2	128	31	0,85663309	4,24392851	0,930733268
printemps 2016	D3	169	39	0,74840275	3,95560954	0,878486898
printemps 2016	D4	65	28	0,89918709	4,322711476	0,947596154
printemps 2016	D5	79	32	0,91854215	4,592710774	0,959753327
printemps 2016	D6	71	29	0,87951398	4,272662207	0,938430584
printemps 2016	D7	501	63	0,63508482	3,796079735	0,803377246

Campagnes	Stations	Abondances	Richesses	Indice de Pielou	Indice de Shannon (log2)	Indice de Simpson (1-1')
printemps 2016	D8	276	56	0,79571091	4,620975647	0,923530962
printemps 2016	PN	1190	75	0,7892278	4,915956887	0,947271558
été 2016	D1	324	40	0,71838392	3,823187564	0,879620074
été 2016	D2	949	76	0,67121409	4,193697011	0,882632396
été 2016	D3	376	49	0,61154901	3,433670258	0,788567376
été 2016	D4	143	39	0,74834755	3,955317822	0,881906826
été 2016	D5	96	33	0,84356791	4,255288996	0,919298246
été 2016	D6	171	40	0,82151295	4,372032861	0,928379773
été 2016	D7	458	67	0,76690937	4,652140631	0,917823665
été 2016	D8	583	83	0,77516725	4,941721796	0,929485479
automne 2016	D1	161	43	0,82879643	4,497268848	0,932220497
automne 2016	D2	298	55	0,72418877	4,186795763	0,890719273
automne 2016	D3	221	26	0,49299851	2,31730979	0,632702592
automne 2016	D4	200	23	0,50866852	2,300993585	0,583316583
automne 2016	D5	40	17	0,77915238	3,184756387	0,812820513
automne 2016	D6	82	28	0,80291607	3,859902541	0,886178862
automne 2016	D7	306	56	0,79733454	4,630404637	0,928211722
automne 2016	D8	243	50	0,79965233	4,513122773	0,927796483
automne 2016	PN	2124	102	0,75318143	5,025546853	0,949031014
hiver 2016	D1	155	38	0,77487631	4,066494684	0,902806871
hiver 2016	D2	341	61	0,74507161	4,418824008	0,910039676
hiver 2016	D3	93	20	0,72167051	3,119008031	0,817438055
hiver 2016	D4	37	17	0,73353001	2,998276676	0,764264264
hiver 2016	D5	49	21	0,89437977	3,928399834	0,931972789
hiver 2016	D6	99	30	0,77462434	3,800996868	0,853844568
hiver 2016	D7	287	62	0,87648539	5,218766055	0,963573012
hiver 2016	D8	270	60	0,75707626	4,471966644	0,897260085

Annexe D : Tableau des abondances (%) par groupe trophique pour l'ensemble des prélèvements C/N : carnivore, prédateur ; O : omnivore ; S : suspensivore ; DS : dépositivore de surface ; DSS : dépositivore de sub-surface ; NC : non connu

Prélèvement	C/N	O	S	DS	DSS	S/DS	NC
D1_03.15	26,79	1,79	41,96	9,82	8,04	10,71	0,89
D1_06.15	19,55	0,00	27,07	34,59	9,77	9,02	0,00
D1_10.15	11,32	6,29	61,01	13,84	3,14	4,40	0,00
D1_01.16	29,41	0,00	49,41	4,71	4,71	11,76	0,00
D1_04.16	26,38	4,29	41,72	17,79	6,13	3,68	0,00
D1_07.16	14,84	0,30	47,77	21,36	4,15	11,57	0,00
D1_11.16	30,30	0,61	29,09	18,79	4,24	16,97	0,00
D1_01.17	24,36	0,64	32,69	12,82	10,26	19,23	0,00
D2_03.15	13,81	0,00	26,73	27,33	8,11	24,02	0,00
D2_06.15	15,11	3,11	30,22	35,11	7,56	8,89	0,00
D2_10.15	8,57	3,57	66,43	12,14	2,86	6,43	0,00
D2_01.16	9,64	0,00	68,98	2,41	2,41	16,57	0,00
D2_04.16	22,05	6,30	43,31	19,69	7,87	0,79	0,00
D2_07.16	8,72	0,83	40,50	20,46	4,88	24,61	0,00
D2_11.16	20,13	1,68	33,56	10,40	7,05	27,18	0,00
D2_01.17	18,79	0,58	6,94	14,16	24,28	35,26	0,00
D3_03.15	44,07	5,08	35,59	10,17	5,08	0,00	0,00
D3_06.15	32,35	2,21	15,44	41,18	6,62	2,21	0,00
D3_10.15	20,90	8,96	35,82	25,37	5,97	2,99	0,00
D3_01.16	35,21	0,00	42,25	16,90	5,63	0,00	0,00
D3_04.16	24,85	2,37	44,38	23,08	2,96	2,37	0,00
D3_07.16	12,53	2,13	48,53	29,60	4,00	3,20	0,00
D3_11.16	24,55	2,73	60,91	8,18	1,82	1,36	0,45
D3_01.17	32,26	5,38	35,48	18,28	6,45	2,15	0,00
D4_03.15	40,82	4,08	16,33	32,65	6,12	0,00	0,00
D4_06.15	42,86	1,43	10,00	40,00	4,29	1,43	0,00
D4_10.15	35,19	1,85	24,07	27,78	11,11	0,00	0,00
D4_01.16	43,14	1,96	37,25	7,84	5,88	3,92	0,00
D4_04.16	38,46	1,54	18,46	35,38	4,62	1,54	0,00
D4_07.16	24,65	3,52	31,69	29,58	4,93	5,63	0,00
D4_11.16	17,09	3,52	68,84	6,53	2,01	2,01	0,00
D4_01.17	59,46	2,70	10,81	16,22	10,81	0,00	0,00
D5_03.15	41,18	3,92	29,41	17,65	7,84	0,00	0,00
D5_06.15	25,45	5,45	25,45	43,64	0,00	0,00	0,00
D5_10.15	44,74	5,26	23,68	23,68	2,63	0,00	0,00
D5_01.16	54,55	4,55	0,00	31,82	9,09	0,00	0,00
D5_04.16	36,71	5,06	15,19	31,65	8,86	2,53	0,00
D5_07.16	33,68	2,11	10,53	37,89	5,26	10,53	0,00
D5_11.16	65,79	2,63	7,89	13,16	7,89	2,63	0,00
D5_01.17	39,22	5,88	5,88	33,33	9,80	5,88	0,00
D6_03.15	33,33	2,38	47,62	5,95	7,14	3,57	0,00
D6_06.15	22,45	10,20	24,49	32,65	6,12	4,08	0,00

Prélèvement	C/N	O	S	DS	DSS	S/DS	NC
D6_10.15	20,78	5,19	36,36	20,78	14,29	2,60	0,00
D6_01.16	52,00	0,00	24,00	12,00	12,00	0,00	0,00
D6_04.16	45,07	1,41	28,17	16,90	7,04	1,41	0,00
D6_07.16	22,94	4,71	28,82	31,18	8,24	4,12	0,00
D6_11.16	39,51	4,94	29,63	16,05	8,64	1,23	0,00
D6_01.17	44,44	4,04	16,16	18,18	13,13	4,04	0,00
D7_03.15	34,07	1,65	4,95	20,88	10,99	27,47	0,00
D7_06.15	13,16	5,26	5,92	44,74	8,55	22,37	0,00
D7_10.15	9,64	0,52	45,09	17,04	3,44	24,27	0,00
D7_01.16	10,85	2,37	39,25	15,98	4,93	26,63	0,00
D7_04.16	10,14	0,80	49,50	10,93	6,36	22,27	0,00
D7_07.16	18,10	2,16	18,32	38,58	6,47	16,38	0,00
D7_11.16	19,16	9,42	26,95	11,04	5,84	27,60	0,00
D7_01.17	29,17	3,82	12,50	17,01	15,63	21,88	0,00
D8_03.15	18,79	6,06	4,85	21,21	7,88	41,21	0,00
D8_06.15	16,10	3,00	19,10	26,22	7,12	28,46	0,00
D8_10.15	17,66	0,95	34,37	20,29	3,82	22,67	0,24
D8_01.16	24,88	1,49	30,85	13,43	4,48	24,88	0,00
D8_04.16	21,66	1,44	23,83	18,41	5,78	28,88	0,00
D8_07.16	14,04	1,52	13,03	39,76	6,60	25,04	0,00
D8_11.16	33,74	2,85	15,04	16,26	5,28	26,83	0,00
D8_01.17	30,15	1,47	6,62	18,38	8,82	34,56	0,00

Annexe E : cadrage multidimensionnel non-paramétrique réalisé à partir de la matrice de similarité (indice de Bray-Curtis) des données biologiques transformées (transformation log (X+1)).

