



Le contenu de ce rapport n'engage que son auteur et la Commission européenne ne peut être tenue responsable de l'utilisation qui pourrait être faite des informations qu'il contient.

Parc naturel régional de
Camargue

marha
marine habitats



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE

Liberté
Égalité
Fraternité

Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement
Occitanie



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

Fondation
VEOLIA

Parc
naturel
régional
de Camargue

Le rôle des hippocampes comme espèces indicatrices de modification de l'habitat « banc de sable »

Sites Natura 2000 FR9102014 « Bancs
sableux de l'Espiguette » et FR9301592
« Camargue »

8 avril 2025

Rapport d'étude



biotope

Peau-Bleue
ASSOCIATION

eurofins

Hydrologie

SEAQUARIUM
INSTITUT MARIN
LE GRAU DU ROI



Information sur le document

Citation recommandée	Biotope, 2025 – Rapport d'étude - Le rôle des hippocampes comme espèces indicatrices de modification de l'habitat « banc de sable » - Sites Natura 2000 FR9102014 « Bacs sableux de l'Espiguette » et FR9301592 « Camargue » - Parc naturel régional de Camargue - 96 p.	
Nom de fichier ; version	Biotope2024_Hippocampe_indicateur_banc_sable_PNRC_V2.1 ; version 2.1 du 08/04/2025	
N° de contrat	2021311	
Date de démarrage de la mission	03/06/2021	
Maître d'ouvrage	Syndicat mixte de gestion du Parc naturel régional de Camargue Mas du Pont de Rousty 13200 ARLES	Delphine MAROBIN-LOUCHE Chargée de mission Littoral et milieu marin Standard : 04.90.97.10.40 / 19.26 Portable : 06 22 85 17 98 d.marobin@parc-camargue.fr
Biotope, mandataire	Biotope Occitanie-Méditerranée 24 Rue Paul Doumer 34140 MEZE	Lucas BERENGER Chef de projet – Milieux marins 07 63 09 17 39 lberenger@biotope.fr
Association Peau-Bleue & Dr. Patrick LOUISY, sous-traitant	Association Peau-Bleue 46 Rue des Escais 34300 AGDE	Dr. Patrick LOUISY, responsable scientifique 06 10 78 38 50 patrick.louisy@wanadoo.fr
Eurofins Hydrobiologie France, sous-traitant	Eurofins Hydrobiologie France Site Saint Jacques II Rue Lucien Cuénot 54 521 Maxéville	Rachel HERMAND-SALEN, Chef de service EUROFINS 25, rue de la petite Duranne, Le Calypso 13100 Aix en Provence 06 77 08 77 11 Rachel.HermandSalen@ETFR.eurofins.com
Seaquarium Institut Marin du Grau du Roi, sous-traitant	Seaquarium Institut Marin du Grau du Roi 675 Avenue du Palais de la Mer 30240 Le Grau du Roi	04 66 51 57 57 direction@seaquarium.fr institutmarin@gmail.com

Cette étude a bénéficié du soutien financier du programme Life dans le cadre du projet LIFE intégré Marha (LIFE 16 IPE FR/001).

Sommaire

1	Eléments préalables à la bonne compréhension de l'étude	5
1.1	Etude et suivi des hippocampes de la flèche de l'Espiguette : historique et problématique initiale	5
1.2	Connaissance sur les hippocampes du Golfe de Beauduc : historique et problématique initiale	6
1.3	Les hippocampes	6
1.3.1	Biologie et comportement d' <i>Hippocampus hippocampus</i>	6
1.3.2	Importance des hippocampes dans les écosystèmes marins	7
1.3.1	Facteurs biotiques et abiotiques influençant les populations d'hippocampes	7
1.3.2	Relation entre les modifications des habitats sableux et la présence d'hippocampes	7
1.4	L'habitat banc de sable	8
1.4.1	Description et importance écologique	8
1.4.2	Dynamique sédimentaire et facteurs influençant ces habitats	8
2	Introduction	10
2.1	Présentation des sites Natura 2000	10
2.1.1	ZSC FR9102014 « Bancs sableux de l'Espiguette »	10
2.1.2	ZSC FR9301592 « Camargue »	11
2.2	Objectifs de l'étude	12
3	Méthodologie de l'étude	13
3.1	Etudes de terrain	13
3.1.1	Stratégie spatio-temporelle	13
3.1.2	Recherche des hippocampes en plongée	13
3.1.3	Echantillonnage du sédiment et mesures de qualité de l'eau	14
3.2	Analyses en laboratoire	15
3.2.1	Etude de la faune endobenthique	15
3.2.2	Analyses physico-chimiques	16
3.3	Analyse des données	16
4	Résultats	17
4.1	Densité et distribution des hippocampes	17
4.1.1	Résultats des plongées d'inventaires de l'Espiguette	19
4.1.2	Résultats des plongées d'inventaire de Beauduc	22
4.2	Caractéristiques des habitats sédimentaires	24
4.2.1	Prélèvements de sédiments de l'Espiguette	24
4.2.1.3	Caractéristiques des sédiments en fonction des zones et saisons	30
4.2.2	Prélèvements de sédiments de Beauduc	34
4.2.2.2	Caractéristiques des sédiments en fonction des zones et saisons	37
4.2.3	Comparaison de la composition physico-chimiques des sédiments des deux sites	39
4.3	Analyse du benthos dans les prélèvements de sédiments de l'Espiguette	40
4.3.1	Prélèvements de benthos effectués et résultats	40
4.3.2	Analyse des correspondances	43
4.4	Analyse du benthos dans les prélèvements de sédiments de Beauduc	45
4.4.1	Prélèvements de benthos effectués et résultats	45
4.4.2	Analyse des correspondances	47

4.5	Caractérisation des sédiments et de la faune benthique dans la zone « intérieur banc » de l'Espiguette	50
4.5.1	Analyse physico-chimique des prélèvements de sédiments	50
4.5.2	Relation entre physico-chimie des sédiments et macro-méiofaune benthique	58
4.5.3	Distribution saisonnière des hippocampes et relation avec les caractéristiques sédimentaires	59
4.5.4	Paradoxes dans la relation entre hippocampes et caractéristiques sédimentaires	60
5	Conclusion	61
5.1	Synthèse des principaux résultats	61
5.1.1	Résumé des observations et conclusions principales	61
5.1.2	Résumé des conclusions sur la physico-chimie des sédiments	61
5.1.3	Résumé des conclusions sur la méiofaune et la macrofaune	62
5.2	A quel point l'état du sédiment affecte-t-il les hippocampes à museau court ?	63
5.2.1	Un gradient de qualité	63
5.2.2	Une distribution mosaïque et instable dans le temps	63
5.3	Hippocampus hippocampus : espèce indicatrice ?	64
5.3.1	Les hippocampes à museau court, indicateurs de quoi ?	64
5.3.2	Comment utiliser un indicateur Hippocampe pour les fonds de sable ?	64
6	Bibliographie	66
7	Annexes	68
	Annexe I : Site de l'Espiguette	68
I.1	Tableaux récapitulatifs de densité d'hippocampes par transect (détaillé)	68
I.2	Tableau de l'analyse GLM	73
I.3	Cartographie des prélèvements de sédiments et transects d'observations d'hippocampes	74
I.3.1	Prélèvements de sédiments et transects d'avril à juillet	74
I.3.2	Prélèvements de sédiments et transects d'août à décembre	75
I.3.3	Récapitulatif des stations de prélèvements de sédiments	76
I.3.4	Transects réalisés sans prélèvements	77
I.4	Analyses statistiques	78
I.4.1	Explication de la variance	78
I.4.2	Qualité de représentation des stations par rapport à la première Dimension	79
	Annexe II : Site de Beauduc	80
II.1	Tableaux récapitulatifs de densité d'hippocampes par transect (détaillé)	80
II.2	Cartographie des prélèvements de sédiments et transects d'observations d'hippocampes	84
II.2.1	Prélèvements de sédiments et transects de juin à novembre	84
II.2.2	Récapitulatif des stations de prélèvements de sédiments	85
II.2.3	Transects réalisés sans prélèvements de sédiments	86
II.3	Analyses statistiques	87
II.3.1	Explication de la variance	87
II.3.2	Qualité de représentation des stations par rapport à la première Dimension	88
	Annexe III : Comparaison du site de l'Espiguette et de Beauduc	89
III.1	Explication de la variance	89
III.2	Qualité de représentation des stations par rapport à la première Dimension	90
	Annexe IV : Analyse du benthos dans les prélèvements de sédiments	91
IV.1	Explication de la variance	91
IV.2	Qualité de représentation des stations par rapport aux premières Dimensions	92
IV.3	Qualité de représentation des catégories de benthos par rapport aux premières Dimensions	93
8	Index des tableaux, cartes et figures	94

1 Eléments préalables à la bonne compréhension de l'étude

1.1 Etude et suivi des hippocampes de la flèche de l'Espiguette : historique et problématique initiale

La population d'hippocampes à museau court (et autres Syngnathidés) de la flèche sableuse de l'Espiguette fait l'objet de divers suivis scientifiques depuis 2012 (*Louisy & Bérenger 2015a&b, Biotope 2021, Fondation Biotope 2021 & 2024*) :

- D'abord dans le cadre d'un partenariat bénévole des associations Peau-Bleue et Stellaris avec le Seaquarium du Grau-du-Roi (2012-2013) ;
- Puis lors d'un suivi commandité par l'Agence des aires marines protégées (et pour partie la Communauté d'Agglomération Thau Agglo) avant et après des travaux de dragage sur le site (2014-2015) ;
- Pour un suivi avant et après travaux de dragage sur le site réalisé par le bureau d'étude Biotope pour le compte de Sète Agglopôle Méditerranée dans le cadre du plan de rechargement des plages de Frontignan (2019-2021) ;
- Et enfin pour des suivis et monitorings des hippocampes par acoustique passive et active, sous l'égide de la Fondation Biotope pour la biodiversité avec le concours de Chorus/Sensea Fr, du Seaquarium et de l'association Peau-Bleue (2021 & 2023).

Les suivis réalisés en 2014 et 2015, notamment, ont montré que la population d'hippocampes à museau court qui résidait de façon permanente sur la face abritée (Est) du banc de sable, en disparaissait progressivement en saison chaude, tandis qu'un engorgement du sédiment s'étendait graduellement du creux du banc de sable vers l'extrémité de la flèche (Figure 1; *Louisy & Bérenger 2015*).

Le phénomène d'engorgement progressif était-il le facteur entraînant le déplacement des hippocampes ? Pour répondre à cette question, il fallait étudier la dynamique de ce processus d'engorgement et sa relation avec la présence / absence des hippocampes, en s'appuyant notamment sur une approche sédimentologique (granulométrie, physico-chimie, méio-macrobenthos, etc.).

Ainsi envisagé dès 2015, ce projet a été retardé par la crise Covid de 2019-2021, puis par des délais dans l'obtention de financements liés au programme Life MarHa. La concertation pour établir un plan d'action structuré n'a finalement abouti qu'en 2021. L'attribution du marché n'ayant pu être finalisée qu'au tout début de l'été 2021, les prospections de terrain (plongées et prélèvements) ont donc été pour la plupart repoussées en 2022.

Finalement, il se sera écoulé 6 ans entre la première proposition de ce projet et le début de sa mise en œuvre effective. Le problème est qu'entretemps, les conditions écologiques ont changé, les apports sédimentaires augmentant l'étendue du banc de sable, l'engorgement par confinement de sa face abritée qui n'était auparavant que saisonnier est devenu quasi-permanent. C'est pourquoi dans le même temps, les hippocampes ont presque totalement disparu de cette zone pour apparaître principalement le long de la face externe, exposée, du banc de sable (Figure 1; côté Ouest).

Là où le projet offrait à l'origine un système simple et prometteur pour tester une hypothèse raisonnable (déplacement des hippocampes côté intérieur du banc de sable en relation avec l'évolution d'un gradient d'engorgement unidirectionnel), nous nous sommes trouvés confrontés à un champ d'investigation beaucoup plus étendu, exposé au large, dans lequel la distribution des hippocampes comme celle des types d'habitats sédimentaires s'est révélée très variable dans l'espace autant que dans le temps.

1.2 Connaissance sur les hippocampes du Golfe de Beauduc : historique et problématique initiale

En 2014, lors de l'état initial réalisé dans le Golfe de Beauduc (par pêches scientifiques) à la création du cantonnement de pêche, les hippocampes étaient quasiment absents. Les mesures de gestion du site (interdiction de tous types de pêche, patrouilles nautiques par le Parc et les autorités maritimes, sensibilisation), ont contribué à la diminution drastique du chalutage illégal dans la bande des trois milles marins jusque-là quotidien. Ainsi, l'instauration du cantonnement en réduisant fortement cette pression sur les fonds semble avoir eu un impact direct sur la population d'hippocampes, participant à leur retour en nombre.

Les pêcheurs professionnels du secteur ont observé, au fil des années, une augmentation significative du nombre d'hippocampes accrochés sur leurs filets et leurs nasses, ce qui témoignerait de l'installation d'une population dans cette zone protégée.

Ces observations des professionnels de la pêche travaillant à Beauduc autour du cantonnement ont été confirmées par des études scientifiques, notamment les pêches scientifiques normées (au filet maillant et petit chalut à perche) réalisées en 2017 et 2018, qui ont recensé une population d'hippocampes bien plus importante, quatre années après la mise en place du cantonnement.

La similitude de configuration géomorphologique entre le Golfe de Beauduc et l'Espiguette, ainsi que les signalements d'hippocampes ont motivé l'extension à Beauduc de la présente étude. Les zones sont effectivement toutes deux en accrétion sédimentaire à des vitesses similaires, mais :

- La pointe de Beauduc est protégée, sauvage et peu fréquentée ;
- La flèche de l'Espiguette n'est pas protégée, aménagée (digue, marina) et très fréquentée (pêche de loisir, pêche professionnelle, plaisance, sports nautiques variés).

Cependant, une connaissance moindre de la population de Beauduc a orienté vers un effort d'échantillonnage moindre en lien avec des contraintes financières et logistiques notamment.

1.3 Les hippocampes

1.3.1 Biologie et comportement d'*Hippocampus hippocampus*

L'hippocampe à museau court se distingue par son corps armé de structures osseuses sous-cutanées organisées en anneaux, ce qui lui donne une apparence segmentée et robuste. Sa tête, rappelant celle d'un cheval (d'où son nom : cheval des mers), est reliée à son tronc par un cou distinctement incurvé. Il possède également une queue préhensile, qui lui permet de s'accrocher aux algues et autres substrats marins. La couleur de l'hippocampe à museau court peut varier, allant du beige au brun, avec parfois des motifs plus sombres, ce qui lui permet de se camoufler efficacement dans son environnement (*Lourie et al., 1999*).

Il atteint généralement une taille de 10 à 15 cm de longueur à l'âge adulte. La taille peut varier légèrement en fonction de l'âge et des conditions environnementales.

L'hippocampe à museau court préfère les habitats côtiers peu profonds, généralement entre 1 et 20 mètres de profondeur. On le trouve souvent dans les herbiers marins (*Posidonies*, *Cymodocées*, *Zostères*) et les fonds sableux ou vaseux.

L'espèce est carnivore et se nourrit principalement de petits crustacés comme les Mysidacés et les Copépodes. Elle utilise sa petite bouche au bout d'un museau tubulaire pour aspirer ses proies, capturant rapidement des organismes planctoniques et épibenthiques (*Foster & Vincent, 2004*).

L'hippocampe à museau court présente un comportement reproducteur unique où le mâle joue un rôle central dans la reproduction. Les femelles transfèrent leurs œufs dans la poche incubatrice située sous l'abdomen des mâles, à la base de la queue. Des danses nuptiales, qui incluent des mouvements synchronisés et des changements de couleur, précèdent cette phase de transfert. L'incubation dure généralement entre 2 à 4 semaines selon la température de l'eau (*Foster & Vincent, 2004*) avant que le mâle n'accouche de bébés immédiatement autonomes et capables de se nourrir. Dès le lendemain, mâle et femelle sont à nouveau prêts à s'engager dans une parade nuptiale et un nouveau cycle de gestation ; cela est permis par leur tendance monogame, qui induit des liens forts entre partenaires durant la période de reproduction. Ainsi, 2 voire 3 cycles de gestation peuvent se succéder pour un même couple pendant une même saison de reproduction.

1.3.2 Importance des hippocampes dans les écosystèmes marins

Les hippocampes sont des prédateurs, qui agissent notamment sur la dynamique des petits crustacés épibenthiques et du zooplancton, mais ils sont également des proies. Ils constituent une source de nourriture pour divers prédateurs marins. Leur présence dans cette chaîne alimentaire contribue à la dynamique de population de leurs prédateurs (*Foster & Vincent, 2004*). Les hippocampes interagissent avec une multitude d'autres espèces dans leur habitat, y compris les plantes marines, les invertébrés et les autres poissons. Ces interactions complexes soutiennent les réseaux trophiques et contribuent à la stabilité et à la productivité des écosystèmes marins.

En effet, les hippocampes vivent souvent en symbiose avec les herbiers marins. Ces plantes marines fournissent un habitat essentiel et une source de nourriture pour les hippocampes. En retour, les hippocampes contribuent à la pollinisation et à la dispersion des graines des herbiers marins, favorisant la santé et la croissance de ces écosystèmes (*Foster & Vincent, 2004*).

1.3.1 Facteurs biotiques et abiotiques influençant les populations d'hippocampes

La qualité de l'habitat sableux doit influencer la survie des hippocampes, notamment pour leur camouflage et leur alimentation. Les fonds sableux doivent offrir un environnement où les hippocampes peuvent se dissimuler des prédateurs grâce à leur capacité à changer de couleur pour se fondre dans le substrat. Les mégarides ou ridelles des fonds sableux permettent aux hippocampes de se déplacer facilement tout en profitant d'un abri minimaliste mais efficace (contre les courants notamment). Les zones avec une couverture végétale, comme les herbiers marins de Posidonie (*Posidonia oceanica*), de Cymodocée (*Cymodocea nodosa*) ou les Zostères (*Zostera marina*, *Z. noltei*), offrent à la fois nourriture et protection contre les prédateurs (*Foster & Vincent, 2004*). Parce que les hippocampes aiment pouvoir s'accrocher par leur queue, outre les herbiers, la présence des morceaux de bois ou autres débris posés sur les fonds meubles peuvent leur être très favorables. Les modifications de ces habitats, causées par les tempêtes ou les courants marins, peuvent avoir un impact direct sur la densité et la distribution des hippocampes.

Ces zones fournissent également un accès à une variété de proies, telles que de petits crustacés et autres invertébrés benthiques, qui constituent la principale source de nourriture des hippocampes (*Curtis & Vincent, 2005*). La disponibilité et l'abondance de ces ressources alimentaires sont cruciales pour leur survie et leur reproduction. Des variations saisonnières dans la productivité primaire, influencées par des facteurs comme la température de l'eau et la lumière, peuvent affecter la quantité de nourriture disponible pour les hippocampes.

Les hippocampes sont sensibles aux variations des paramètres physico-chimiques de leur environnement, tels que la température, la salinité, le pH et la concentration en oxygène dissous. Par exemple, des températures trop élevées ou trop basses peuvent affecter leur métabolisme et leur reproduction. De même, des niveaux de salinité inappropriés peuvent perturber leur équilibre osmotique (*Foster & Vincent, 2004*).

La pollution marine, incluant les rejets de produits chimiques, les plastiques, et les métaux lourds, a des effets délétères sur les hippocampes et leurs habitats. Les substances toxiques peuvent affecter leur santé, leur croissance et leur capacité de reproduction. Les microplastiques, en particulier, peuvent être ingérés par les hippocampes et causer des obstructions ou des intoxications (*Foster & Vincent, 2004*).

Les aménagements anthropiques côtiers, incluant la construction de ports, de digues et d'infrastructures touristiques, peut entraîner la destruction directe des habitats sableux ou leur modification substantielle. Les activités récréatives, comme la plongée sous-marine et le mouillage des bateaux, peuvent également perturber directement les hippocampes et endommager les herbiers marins dans lesquels ils trouvent refuge.

1.3.2 Relation entre les modifications des habitats sableux et la présence d'hippocampes

Les modifications des habitats sableux peuvent entraîner des conséquences profondes sur la présence et la distribution des hippocampes. En effet, ces derniers possèdent des cycles de reproduction sensibles aux conditions environnementales. Une dégradation des habitats de reproduction ou de nurserie, peut entraîner une baisse du taux de reproduction et un recrutement insuffisant des jeunes hippocampes, menaçant ainsi la pérennité des populations (*Foster & Vincent, 2004*).

Les changements dans la structure de l'habitat peuvent également influencer les comportements des hippocampes, notamment en ce qui concerne la recherche de nourriture, la sélection des partenaires de reproduction et la survie face aux prédateurs. Par exemple, la modification de la composition des sédiments sableux, comme une augmentation de la granulométrie, peut réduire les possibilités de camouflage pour les hippocampes, augmentant ainsi leur vulnérabilité aux prédateurs et influençant leur distribution spatiale (*McLachlan & Brown, 2006*).

La mise en place de zones marines protégées, la régulation des activités de pêche et le contrôle des ancrages de bateaux peuvent réduire les impacts humains sur les habitats sableux. Les politiques de gestion côtière doivent intégrer des mesures de protection des habitats des hippocampes, en minimisant les perturbations et en préservant la qualité de l'eau.

Comprendre la relation entre l'habitat et la distribution des hippocampes est essentiel pour évaluer l'impact des changements environnementaux et anthropiques sur ces espèces sensibles.

1.4 L'habitat banc de sable

1.4.1 Description et importance écologique

Les habitats sableux se composent principalement de particules de sable, qui peuvent varier en taille de très fines à plus grossières. La composition minéralogique du sable varie selon l'origine géologique et les processus de dépôt, incluant plusieurs minéraux et souvent des fragments de coquillages et des débris végétaux (*McLachlan & Brown, 2006*).

Les couches sableuses présentent une stratification qui peut être influencée par les courants marins, les vagues et les marées. Cette stratification affecte la répartition des organismes benthiques, les zones superficielles étant généralement plus riches en oxygène que les couches profondes.

Les habitats sableux abritent une diversité d'organismes endo- et épi-benthiques, incluant des vers, des crustacés, des mollusques et des échinodermes principalement. Ces organismes jouent des rôles essentiels dans la bioturbation et l'aération du sable, contribuant à la santé de l'écosystème (*Levinton, 2001*).

Bien que les habitats sableux soient souvent perçus comme des déserts biologiques, ils soutiennent une productivité primaire significative grâce à la présence de microalgues et de diatomées sur la surface du sable. Ces producteurs primaires constituent une source de nourriture pour de nombreux organismes. La présence de toutes ces espèces en abondance mène à de nombreuses interactions trophiques (*Hemminga & Duarte, 2000*).

Les bancs de sable jouent ainsi un rôle essentiel dans les écosystèmes marins côtiers, habitats porteurs de nombreuses fonctions écologiques et pourvoyeurs de nombreux services écosystémiques.

- Habitat pour la biodiversité marine

Les bancs de sable constituent des habitats complexes et dynamiques, abritant une grande variété d'organismes marins. Parmi ceux-ci, on trouve des invertébrés benthiques comme les bivalves, les gastéropodes, les annélides et les crustacés, qui forment la base de la chaîne alimentaire marine. Ces invertébrés sont une source de nourriture pour de nombreuses espèces de poissons, y compris les hippocampes.

Les bancs de sable sont également des zones de reproduction, de nourrissage et de croissance pour de nombreuses espèces. Les alevins de poissons et les juvéniles de divers crustacés trouvent refuge dans les creux des bancs sableux où ils peuvent passer inaperçus pour leurs prédateurs (*McLachlan & Brown, 2006*).

- Stabilisation des littoraux

Les bancs de sable jouent un rôle crucial dans la protection des côtes contre l'érosion. Ils agissent comme des barrières naturelles qui absorbent et dissipent l'énergie des vagues, réduisant ainsi l'impact de la houle sur le littoral. Cette fonction de stabilisation est essentielle pour prévenir l'érosion côtière particulièrement dans les zones vulnérables aux tempêtes et aux phénomènes climatiques extrêmes.

- Cycle des nutriments

Cet habitat participe activement au cycle des nutriments dans les écosystèmes marins. Les mouvements des sédiments et les activités des organismes benthiques contribuent à la redistribution des nutriments, enrichissant ainsi les eaux environnantes. Cette redistribution favorise la productivité primaire, soutenant la croissance des phytoplanctons et, par conséquent, toute la chaîne alimentaire marine.

- Filtration de l'eau

Les bancs de sable jouent également un rôle dans la filtration de l'eau. Les organismes qui vivent dans ces habitats, tels que les bivalves, filtrent de grandes quantités d'eau pour se nourrir, capturant ainsi des particules en suspension, des débris organiques et des micro-organismes (*Airoidi & Beck, 2007*). Ce processus de filtration améliore la qualité de l'eau, contribuant à la santé globale de l'écosystème marin.

- Régulation des polluants

Les bancs de sable peuvent également agir comme des zones de sédimentation pour les polluants. Les particules polluantes peuvent être adsorbées aux grains de sable et être enfouies dans les sédiments, réduisant leur concentration dans la colonne d'eau. Cela peut limiter l'exposition des organismes marins aux polluants et contribuer à la résilience de l'écosystème.

1.4.2 Dynamique sédimentaire et facteurs influençant ces habitats

Le transport sédimentaire dans les habitats sableux est principalement contrôlé par les courants marins, les vagues et les marées. Les particules de sable peuvent être déplacées sur de longues distances par les processus de suspension et de saltation (*Komar, 1998*). Le transport littoral, ou dérive littorale, est un mécanisme clé où les sédiments sont déplacés parallèlement au rivage en raison de l'action des vagues obliques.

La dynamique entre la déposition et l'érosion des sédiments façonne les habitats sableux. Les zones de déposition se caractérisent par l'accumulation de sable, formant des plages et des bancs sableux, tandis que les zones d'érosion se manifestent par la perte de sédiments, souvent exacerbée par les tempêtes et les courants forts. L'équilibre entre ces processus est essentiel pour maintenir la stabilité des habitats sableux.

Les courants marins influencent fortement la distribution et le mouvement des sédiments dans les habitats sableux. Les courants de marée, les courants de fond et les courants littoraux modifient constamment la topographie des fonds sableux, créant des structures telles que les rides de sable et les bancs sous-marins.

Les vagues et les tempêtes ont également un impact significatif sur les habitats sableux. Les vagues génèrent une action de brassage qui redistribue les sédiments, tandis que les tempêtes peuvent provoquer une érosion massive et une déposition rapide de sédiments, modifiant radicalement le paysage côtier en peu de temps.

Les marées influencent les processus de déposition et d'érosion en modifiant le niveau de la mer. Les cycles de marées créent des variations périodiques dans l'exposition des habitats sableux, affectant les communautés biologiques et la distribution des sédiments. Les marées de vives-eaux, en particulier, peuvent entraîner des mouvements sédimentaires considérables, bien que les marées soient de faibles amplitudes en Méditerranée.

L'activité biologique des organismes tels que les crustacés, les vers fouisseurs ou encore les mollusques influence le milieu par bioturbation.

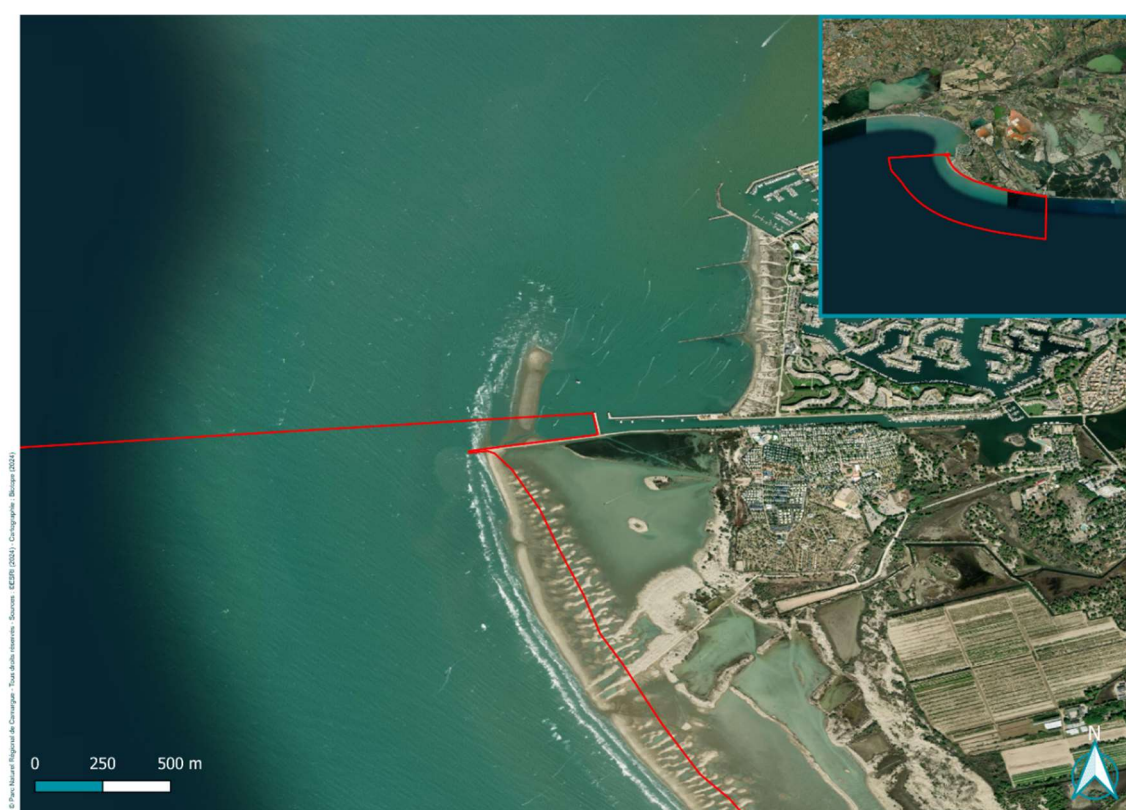
Les facteurs anthropiques affectent aussi cet habitat. Des aménagements comme des digues des ports peuvent bloquer le transport local de sédiment et créer des zones où les brassages sédimentaires ne se font plus (*Airolidi & Beck, 2007*). On obtient alors des zones où l'habitat est plus susceptible d'être eutrophe (s'eutrophiser) avec un possible envasement (dû à un manque d'hydrodynamisme du milieu). L'extraction de sable est aussi une pratique qui peut réduire significativement les dépôts sableux sur ces habitats et ainsi les dégrader (*Bouchard & Michaud, 2007*).

2 Introduction

2.1 Présentation des sites Natura 2000

2.1.1 ZSC FR9102014 « Bancs sableux de l'Espiguette »

La Zone Spéciale de Conservation FR9102014 « Bancs sableux de l'Espiguette » est située sur la côte ouest du département du Gard (30) en Méditerranée (Carte 1). Il s'étend sur une vaste zone côtière, caractérisée par des plages de sable fin et des dunes mobiles. Ces formations sableuses sous-marines sont influencées par les courants, les marées, les vents et les fleuves côtiers, ce qui crée un environnement dynamique en perpétuelle évolution.



Carte 1 : Périmètre du site Natura 2000 « Banc sableux de l'Espiguette »

Le site de l'Espiguette est notamment reconnu pour abriter l'une des populations les plus importantes d'Europe d'Hippocampes à museau court (*H. hippocampus* ; Figure 1). Les fonds sableux de l'Espiguette sont également des zones de nourrissage et de reproduction pour de nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs et résidents, d'autres espèces de poissons et de nombreuses espèces d'invertébrés marins (Delestrade & Turcotte, 2010).



Figure 1 : Hippocampe à museau court du site de l'Espiguette (*H. hippocampus*) en aquarium dans le cadre d'une étude scientifique (© P. LOUISY, 2021)

2.1.2 ZSC FR9301592 « Camargue »

La Zone Spéciale de Conservation FR9301592 « Camargue » est située dans le delta du Rhône, entre les communes des Saintes-Maries-de-la-Mer, Arles et Port-Saint-Louis-du-Rhône (13) (Carte 2). La Camargue est une vaste plaine alluviale caractérisée par un réseau complexe de marais, de lagunes, de salines et de bancs de sable. Cette mosaïque d'habitats est façonnée par les interactions entre l'eau douce du Rhône et l'eau salée de la mer Méditerranée. Les inondations saisonnières, les crues du Rhône jouent aussi un rôle clé dans la dynamique sédimentaire et la distribution des habitats sableux.



Carte 2 : Périmètre du site Natura 2000 « Camargue »

La Camargue est l'un des sites de biodiversité les plus importants d'Europe abritant une grande diversité de flore et de faune, avec des habitats allant des marais salants aux prairies humides, en passant par les dunes de sables. Dans les eaux côtières et les lagunes de la Camargue on retrouve notamment les deux espèces d'hippocampes : l'Hippocampe moucheté (*Hippocampus guttulatus*) et l'Hippocampe à museau court (*H. hippocampus*), qui trouvent refuge dans les herbiers marins et les zones de sable, où ils se nourrissent et se reproduisent. L'importance de ces populations, les zones occupées, les évolutions temporelles de celles-ci restent encore à ce jour mal connues.

Ces deux sites présentent une similitude de configuration géomorphologique : présence de dépôts de sable sous la forme d'une ou plusieurs flèches affleurantes.

2.2 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est de caractériser la relation entre nature du sédiment et variations observés dans la population d'hippocampes. Mais aussi, mieux appréhender dans quelle mesure les hippocampes peuvent témoigner de l'état de conservation de l'habitat « banc de sable » (rôle d'espèce indicatrice), et ce qu'ils permettent d'apprendre sur les fonctionnalités écologiques des flèches sableuses afin d'optimiser la prise en compte de cet habitat et de ses enjeux dans les projets écologiques comme économiques.

La présente étude prévoit donc d'évaluer l'attractivité de l'habitat banc de sable pour les hippocampes à museau court sur deux sites : la flèche de l'Espiouette et la pointe de Beauduc.

- Problématiques de l'étude :
 - Dans quelles conditions environnementales les hippocampes s'installent-ils ?
 - Quelles sont les modifications ou perturbations du substrat qui entraînent le déplacement ou la disparition des hippocampes ?
 - Les hippocampes peuvent-ils servir d'indicateurs de l'état de santé de ces habitats ?
- Etapes de l'étude :
 - Caractérisation des populations d'hippocampes à museau court présentes sur les deux sites, avec un suivi dans le temps.
 - Caractérisation biologique et physico-chimique des sédiments de chacun des deux sites, avec un suivi dans le temps.
 - Analyse des données afin d'étudier les relations entre hippocampes et sédiments.

3 Méthodologie de l'étude

3.1 Etudes de terrain

3.1.1 Stratégie spatio-temporelle

Dans le cadre de la présente étude, 11 journées de plongées ont été réalisées à l'Espiguette dont 8 avec prélèvements de sédiments pour étude des caractéristiques physico-chimiques et dont 4 avec également étude de la grosse méiofaune. 7 journées de plongées ont été réalisées à Beauduc dont 4 avec prélèvements de sédiments pour étude des caractéristiques physico-chimiques et dont 2 avec également étude de la grosse méiofaune.

Les journées de terrain sont espacées dans le temps avec, en moyenne, un écart d'1 mois entre chaque campagne, afin d'avoir un suivi temporel, prenant en compte la biologie des hippocampes, ainsi que les facteurs météorologiques et saisonniers.

Les saisons ont été déterminées par l'ensemble des variables observables et quantifiables *in situ*. La température de l'eau est la variable principale qui a permis de déterminer les saisons non calendaires suivantes pour la présente étude :

- hiver : de décembre à avril ;
- printemps : mai et juin ;
- été : juillet et août ;
- automne : septembre et octobre.

Pour l'Espiguette, aux 10 journées de plongées prévues initialement, une 11^{ème} a été réalisée. Elle a permis de mieux connaître l'état de présence de la population d'hippocampes au lancement de l'étude à proprement parler (suivis mensuels enchaînés).

3.1.2 Recherche des hippocampes en plongée

L'inventaire des hippocampes est réalisé en plongée en scaphandre autonome, le long de transects définis par un cap boussole, par binôme ou trinôme en parallèle. La longueur du transect à parcourir est déterminée en termes de temps (plongée de 20 min). Chaque plongeur observe autour de lui dans un rayon qui dépend de la visibilité. C'est pourquoi il est demandé aux plongeurs-observateurs d'estimer la visibilité moyenne durant chaque transect (ici, visibilité = estimation de la distance à laquelle un hippocampe serait visible). La visibilité pouvant parfois être très limitée, les plongeurs d'une même palanquée sont systématiquement reliés par une corde, d'une longueur d'environ 5 m entre plongeurs ce qui permet de maximiser l'effort de recherche sur les hippocampes sans risque de perdre son binôme faute d'une surveillance de chaque instant.

La localisation et le nombre de transects sont définis à l'avance au regard des observations précédentes et des conditions météorologiques. Au cours du transect, les observateurs doivent noter la nature du sédiment et la profondeur à plusieurs reprises, suivant le dénivelé et/ou les changements de conditions de substrat.

Lorsqu'un hippocampe est observé les paramètres suivants sont renseignés :

- la profondeur de l'observation ;
- la nature du substrat ;
- la situation ou comportement de l'hippocampe (accroché, posé sur le fond, en déplacement) ;
- la taille et le sexe de l'individu ;
- le temps de plongée au moment de l'observation (pour replacer approximativement la position de l'hippocampe sur le transect en fonction de la distance parcourue en 20 min).

Au niveau des points de prélèvement de sédiments, une recherche d'hippocampes a été menée dans un rayon de 10 mètres afin de disposer d'une information sur la présence / absence d'hippocampes autour de la station.



Figure 2 : Equipe de plongeurs avant immersion (© Parc naturel régional de Camargue (PNRC))

3.1.3 Echantillonnage du sédiment et mesures de qualité de l'eau

Le protocole d'échantillonnage du sédiment est le même sur les deux sites.

A chaque campagne de prélèvement, le sédiment est pris sur 3 stations (Tableau 3 et Tableau 7, partie 4.2.1 et 4.3.1. Ces stations sont différentes selon les dates et en fonction du site (Annexe I.3.1, I.3.2 et II.2.1). Le prélèvement est réalisé à la pelle à sédiments dans la couche superficielle (sur 3 à 5 cm de profondeur environ) sur quelques décimètres-carrés afin de collecter la quantité nécessaire et suffisante aux analyses en laboratoires.

Pour le site de l'Espiguette, l'intérieur du banc de sable, secteur autrefois riche en hippocampes (bien que ce ne soit plus le cas ces dernières années), sera systématiquement échantillonné en opposition avec l'extérieur du banc afin de pouvoir analyser les possibles différences.

In situ, à la sonde multiparamètres dans la colonne d'eau au plus proche du sédiment ou dans la couche superficielle du sédiment (si le sédiment est très meuble), sont mesurés :

- pH ;
 - taux d'oxygène dissous ;
 - pourcentage de saturation en oxygène ;
 - potentiel RedOx ;
 - conductivité ;
 - salinité ;
 - température.
- La turbidité verticale est également mesurée au disque de Secchi depuis le bateau.



Figure 3 : Mesure de la turbidité au disque de Secchi et matériel de prélèvement ; Matériel de prélèvement et de conditionnement des échantillons d'eaux et de sédiments prélevés sur le fond (© PNRC)



Figure 4 : Oxymètre et sonde multiparamètres pour mesures de la qualité d'eaux prélevés sur le fond (© PNRC)

3.2 Analyses en laboratoire

Les échantillons de sédiments prélevés sont envoyés dans différents laboratoires du groupe Eurofins ou de ses partenaires pour analyses de paramètres physico-chimiques et l'étude de la « grosse méiofaune » présente.

3.2.1 Etude de la faune endobenthique

Les échantillons de sédiments ont été tamisés afin d'étudier la grosse méiofaune présente. Des tamis de différentes tailles ont été utilisés pour obtenir une analyse du peuplement aussi précise que possible selon la nature du sédiment : 250 μm , 355 μm , 500 μm et 800 μm selon les échantillons (nature plus ou moins sableuse ou vaseuse, nécessitant pour des aspects pratiques, un ou plusieurs tamis en colonne).

Ce tamisage permet d'écarter les particules sédimentaires et la faune de trop petites tailles afin de rechercher, identifier et quantifier la méiofaune d'intérêt (proies potentielles des hippocampes, notamment). Ce protocole est mis en œuvre par des expertes benthologues, expérimentées dans la recherche et l'identification de cette faune particulière.

3.2.2 Analyses physico-chimiques

Une analyse de la distribution granulométrique du sédiment a été appliquée à chaque échantillon. Celle-ci permet de déterminer la nature du sédiment par plusieurs variables : taille des grains d'argile, de silts, de sables avec proportions de chaque classes granulométriques dans l'échantillon.

Ces variables permettent par la suite de déterminer si une station de prélèvement est plutôt sableuse, sablo-vaseuse ou vaseuse.

Des analyses de la composition chimique du sédiment sont réalisées sur chaque échantillon avec mesure des paramètres suivants :

- COT (pour Carbone Organique Total, une mesure du taux de matière organique) ;
- Azote global (NTK, NO₂, NO₃) ;
- Ammonium (NH₄, extrait au KCl) ;
- Phosphore et orthophosphate soluble (P, PO₄-P) ;
- Chlorophylle ;
- Phéopigments.

3.3 Analyse des données

Les données collectées sont notamment analysées sous le logiciel statistique R.

Les tests statistiques utilisés sont les suivants :

- Analyses multivariées ou analyse en composantes principales (ACP) : permet de discriminer les variables physico-chimiques qui semblent influencer la présence/absence d'hippocampes.
- Analyse des correspondances (AC) : permet de faire le lien entre la présence/abondance de la faune endobenthique et les paramètres physico-chimiques sur les différentes stations de prélèvements.
- Analyse d'un modèle linéaire généralisé (GLM) : permet de comparer la densité/abondance des hippocampes en fonction de différents facteurs (saisonnalité, paramètres abiotiques...)

Ces analyses rendent possible l'étude de l'influence des différentes variables environnementales sur la présence des hippocampes : il s'agit notamment de déterminer lesquelles jouent un rôle sur la distribution de cette espèce.

Pour l'analyse des densités d'hippocampes en lien avec les stations de prélèvement des sédiments, les choix méthodologiques suivants sont appliqués :

- Dans cercle de 500 m de rayon autour des stations de prélèvements de sédiments, les observations d'hippocampes réalisées lui sont rattachées.
- Puis calcul des densités d'hippocampes pour chaque station en ramenant le nombre d'hippocampes observés à l'aire d'échantillonnage déterminée pour chaque transect (longueur du transect x visibilité). Chaque transect étant lié à une station, les paramètres physico-chimiques de cette station lui sont alors attribués.

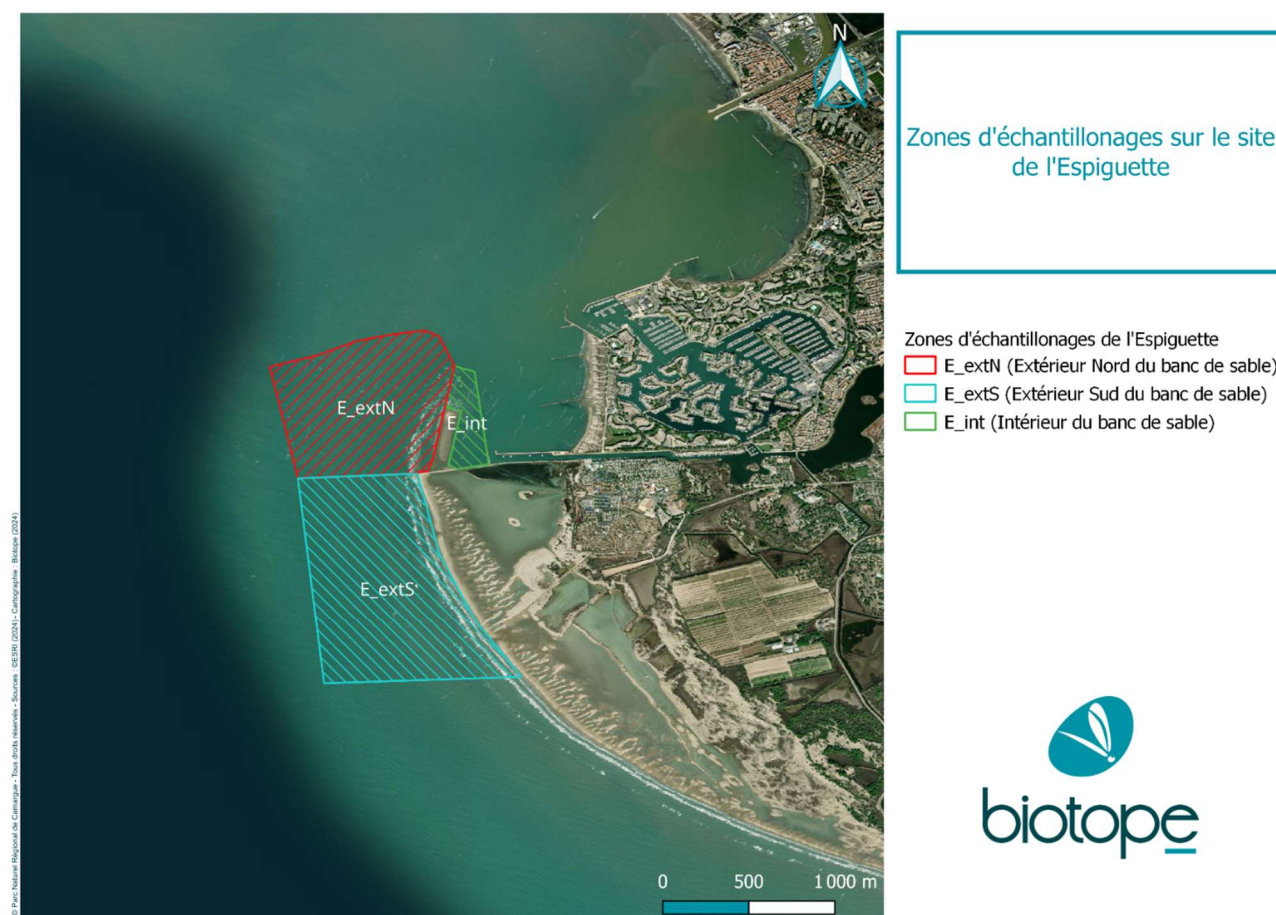
4 Résultats

4.1 Densité et distribution des hippocampes

A l'Espiguette comme à Beauduc, les plongées ont été organisées de manière à couvrir aux mieux les différentes zones des deux sites au cours du projet (voir cartes ci-dessous). La longueur des transects d'inventaire peut être mesurée sous SIG à partir des coordonnées des points de mise à l'eau et de sortie tandis que la largeur est variable car elle dépend des conditions de visibilité (qui sont notées par les observateurs). Les profondeurs d'exploration ont varié de 3 à 10 m et les conditions de visibilité allaient de 30 cm à 2,5 m (Espiguette) voire 4 m (Beauduc).

Au total, les observateurs en plongée ont réalisé 54 transects totalisant 10,2 km à l'Espiguette (pour une surface échantillonnée de ~3,5 ha), et 42 transects totalisant 9,2 km à Beauduc (surface échantillonnée : ~4 ha).

Pour l'analyse, les transects et les points de prélèvements ont été attribués à des zones de référence, plutôt abritées (E_int et B_Glf) ou plutôt exposées (E_extS, E_extN, B_Pte), tel qu'illustré ci-après.



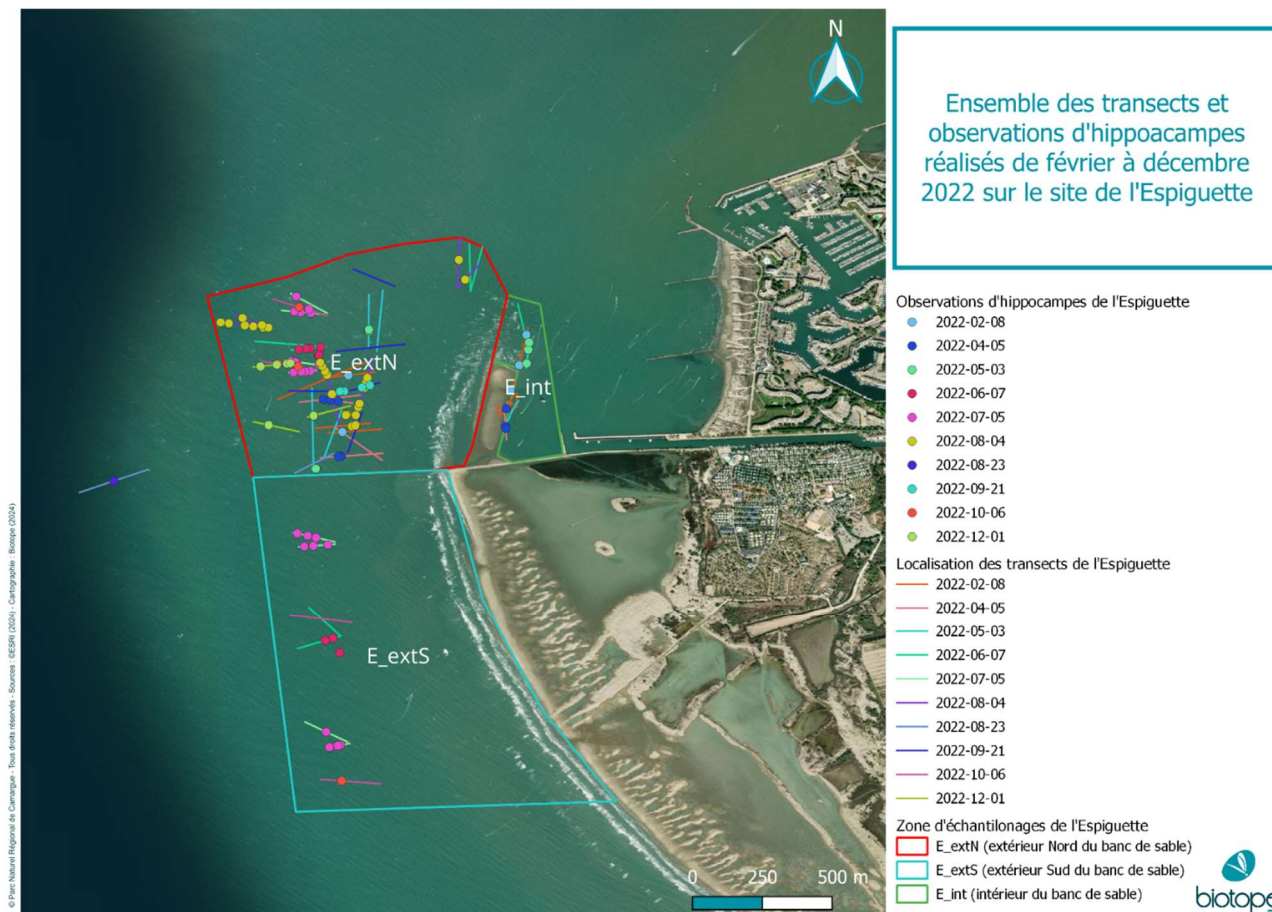
Carte 3 : Définition des zones de référence dans le secteur de la flèche de l'Espiguette



Carte 4 : Définition des zones de référence dans le secteur du golfe de Beauduc

4.1.1 Résultats des plongées d'inventaires de l'Espiguette

La carte ci-dessous illustre la répartition de tous les transects réalisés à l'Espiguette, ainsi que les points d'observation d'hippocampes. Voir également [Annexe I.1](#) pour des informations plus détaillées.



Carte 5 : Ensemble des transects et observations d'hippocampes réalisés sur le site de l'Espiguette

Les résultats sur les densités d'hippocampes observées par transects autour du banc de sable de l'Espiguette. Sont présentés par la Figure 5 ci-dessous. La figure suivante (Figure 6) indique le pourcentage de transects qui y ont été faits sans observation d'hippocampes

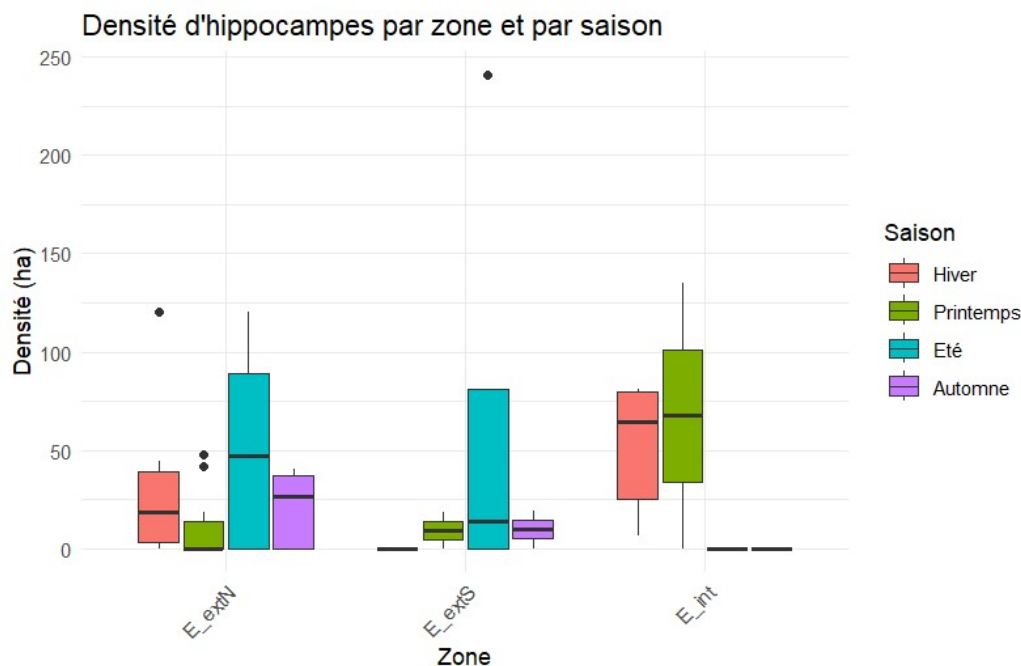


Figure 5 : Diagramme en boîtes (boxplot) permettant de comparer les résultats des transects de recensement des hippocampes sur le site de l'Espiguette, par zone et par saison. E_extN : zone extérieure nord ; E_extS : zone extérieure sud ; E_int : zone intérieure

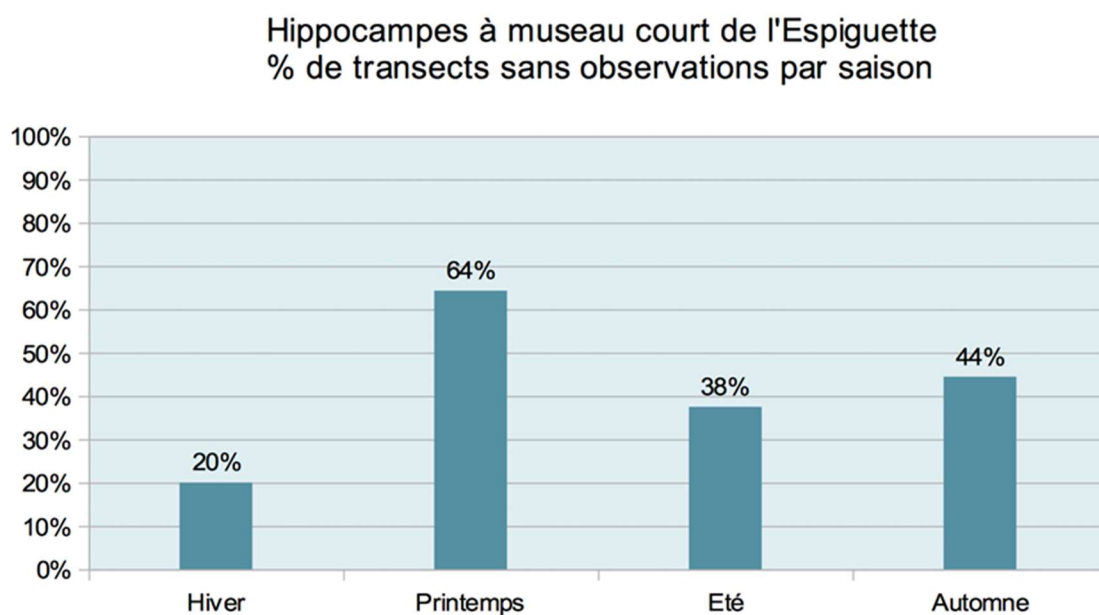


Figure 6 : Proportion des transects sans observation d'hippocampes sur le site de l'Espiguette

Le diagramme en boîtes (Figure 5) montre que les densités les plus élevées à l'Espiguette se rencontrent en été, du moins dans les zones à l'extérieur du banc de sable.

Dans la zone abritée « E_int », en revanche, les densités moyennes sont assez élevées en hiver et au printemps. L'information est malheureusement indisponible pour l'été et l'automne car l'envasement du secteur, entraînant alors une visibilité quasi nulle, a imposé d'y interrompre les transects. Il est extrêmement probable que les hippocampes aient disparu de la zone à cette époque, mais nous manquons de preuves formelles pour l'affirmer.

On peut également noter sur le boxplot de la Figure 5 que plusieurs boîtes sont au contact du zéro, ce qui signifie qu'il y a eu des transects avec zéro observation. Il existe en effet une proportion relativement importante de transects qui n'ont permis de détecter aucun hippocampe (plus nombreux au printemps, moins en hiver ; voir Figure 6). Ces transects sans hippocampes sont inclus dans les calculs de moyennes ou médianes.

Une analyse spécifique a été réalisée pour tester la significativité statistique des différences de densité constatées ci-dessus. Nous avons choisi d'utiliser un modèle linéaire généralisé (GLM), tout d'abord pour estimer le seul l'effet « zone », puis pour tester simultanément les effets « zone » et « saison », et leurs interactions.

Ces modèles GLM ont été appliqués aux données telles que présentées dans la Figure 7 ci-dessous (effectifs par transects et non densités).

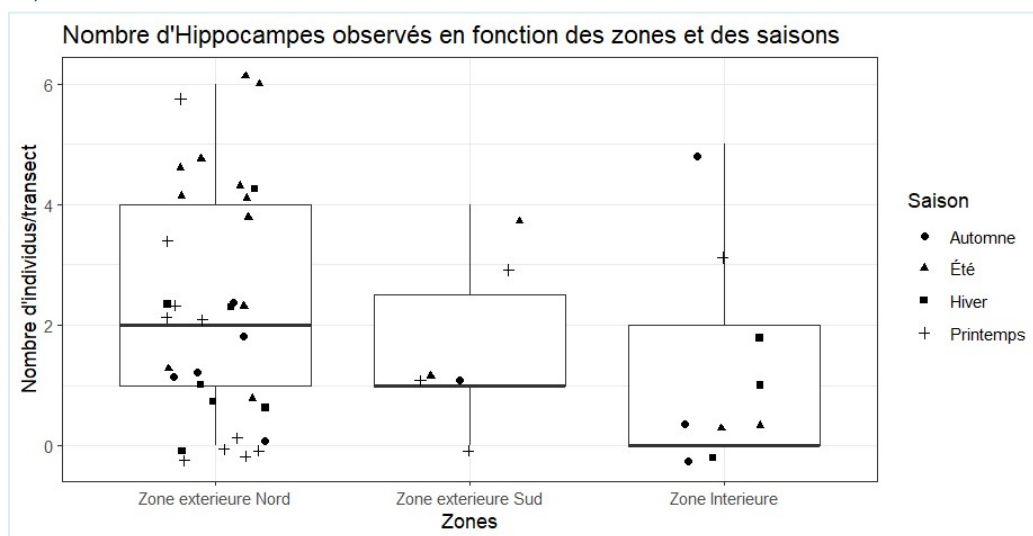


Figure 7 : Nombre d'hippocampes observés par dans les transects par zones et par saisons

● Résultats du modèle GLM « Zone »

Coefficients :

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	0.8076	0.1623	4.975	6.53e-07 ***
ZoneE_extS	-0.2967	0.4438	-0.669	0.504
ZoneE_int	-0.6069	0.4054	-1.497	0.134

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Compte tenu du niveau de variabilité des données, les différences d'abondance des hippocampes entre zones ne sont pas statistiquement significatives.

En revanche, le coefficient de l'Intercept (modalité qui sert de référence implicite, en l'occurrence, ZoneE_extN), est extrêmement significatif. Ce qui signifie simplement que la moyenne des effectifs attendus pour cette zone est bien différente de zéro.

● Résultats du modèle GLM « Zone » + « Saison »

Coefficients: (1 not defined because of singularities)

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	0.18232	0.42617	0.428	0.669
ZoneE_extS	-0.18232	1.12089	-0.163	0.871
ZoneE_int	0.32850	0.63761	0.515	0.606
SaisonÉté	1.15745	0.46069	2.512	0.012 *
SaisonHiver	0.26966	0.53218	0.507	0.612
SaisonPrintemps	0.22314	0.50573	0.441	0.659
ZoneE_extS:SaisonÉté	-0.24116	1.23467	-0.195	0.845
ZoneE_int:SaisonÉté	-19.97086	4042.90580	-0.005	0.996
ZoneE_extS:SaisonHiver	NA	NA	NA	NA
ZoneE_int:SaisonHiver	-0.78049	0.93081	-0.839	0.402
ZoneE_extS:SaisonPrintemps	0.06454	1.26707	0.051	0.959
ZoneE_int:SaisonPrintemps	0.36464	0.94277	0.387	0.699

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Dans ce modèle, un seul coefficient est significatif, celui de la modalité « saison été ». Ce coefficient étant positif, cela signifie que les effectifs attendus en été sont statistiquement plus élevés qu'aux autres saisons. Une confirmation statistique de ce que l'on pouvait voir sur la Figure 2.

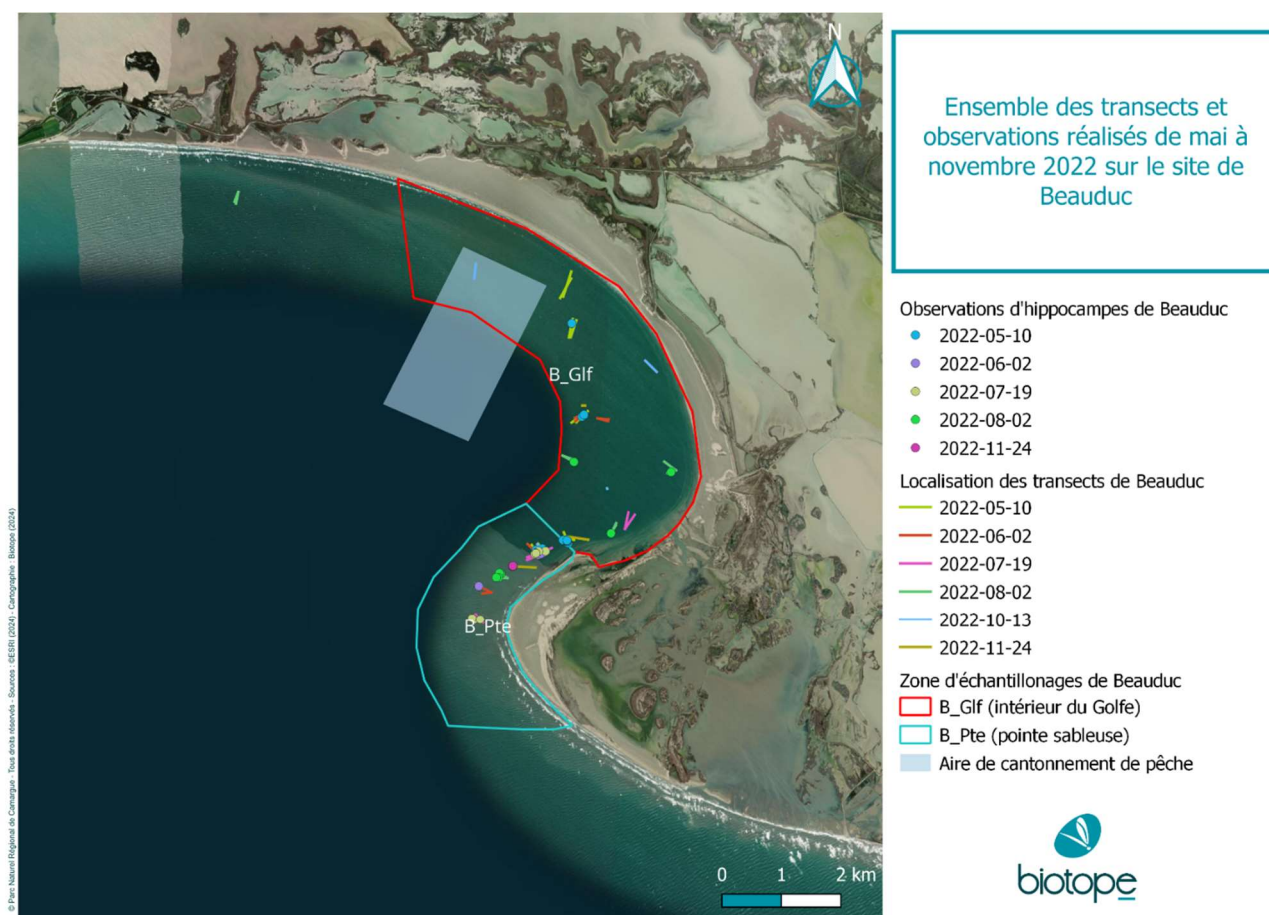
En examinant le tableau de données fourni en Annexe I.1, on peut appréhender plus précisément la variabilité des données de transects à l'Espiguette. Au fil des mois, les densités observées peuvent changer considérablement. Par ailleurs des transects réalisés un même jour, à quelques centaines de mètres tout au plus, peuvent donner des résultats très contrastés. Saisons, nature du sédiment et aléas climatiques dessinent sur les fonds sablo-vaseux des paysages variés dans l'espace comme dans le temps, qui induisent une forte hétérogénéité de la fréquentation des lieux par les hippocampes.

On peut cependant remarquer que, malgré la variabilité de leurs effectifs, des hippocampes sont présents à l'Espiguette toute l'année. Des mâles gravides (poche pleine) ont notamment été observés lors des transects de juin à août. La reproduction de l'hippocampe à museau court est donc attestée sur le site de l'Espiguette, pour cette période-là au moins.

Pour synthétiser, les hippocampes à museau court fréquentent l'Espiguette pour la reproduction et la gestation, mais aussi le recrutement post-larvaire (Louisy & Bérenger 2015) : l'espèce peut réaliser sur ce site la totalité de son cycle biologique (à l'exception de sa courte phase larvaire en pleine eau).

4.1.2 Résultats des plongées d'inventaire de Beauduc

La carte ci-dessous illustre la répartition de tous les transects réalisés à l'Espiguette, ainsi que les points d'observation d'hippocampes. Voir également Annexe II.2 pour des informations plus détaillées.



Carte 6 : Ensemble des transects et observations d'hippocampes réalisés sur le site de Beauduc

Les résultats sur les densités d'hippocampes observées par transects dans le golfe de Beauduc et sa pointe sableuse. Sont présentés dans la Figure 8 ci-dessous. La figure suivante (Figure 9) indique le pourcentage de transects qui y ont été faits sans observation d'hippocampes.

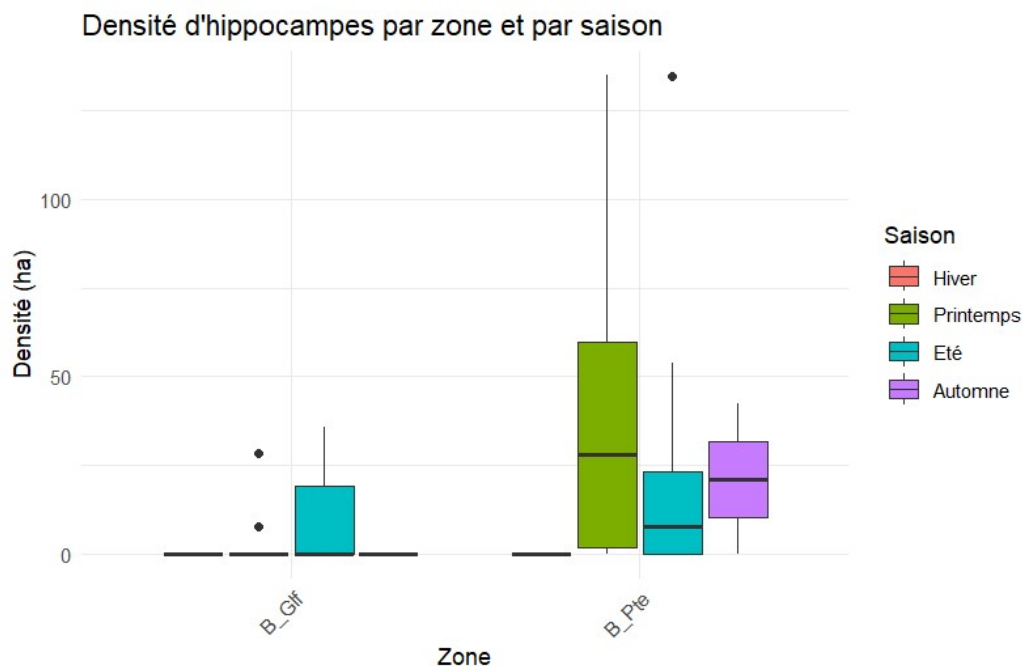


Figure 8 : Diagramme en boîtes (boxplot) permettant de comparer les résultats des transects de recensement des hippocampes sur le site de l'Espiguette, par zones et par saisons. B_Glf : zone intérieure du golfe ; B_Pte : pointe

Hippocampes à museau court du golfe de Beauduc % de transects sans observations par saisons

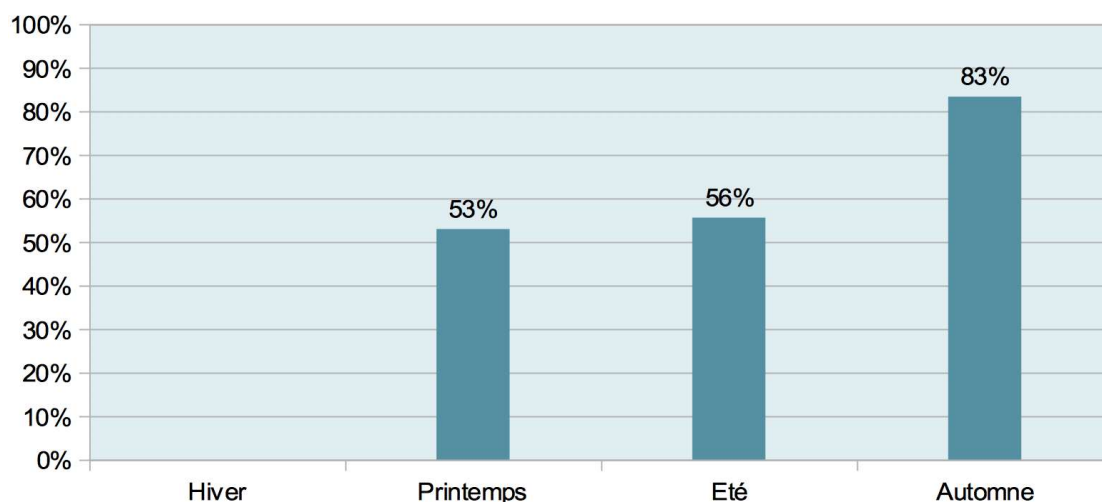


Figure 9 : Proportion des transects sans observation d'hippocampes sur le site de Beauduc

Le diagramme en boîtes (Figure 8) semble indiquer que les hippocampes préfèrent le secteur de la pointe sableuse plutôt que l'intérieur du golfe. On peut aussi constater que les densités d'hippocampes sont plus basses qu'à l'Espiguette et que la proportion de transects sans hippocampes est plus élevée. Mais compte tenu du faible nombre d'individus en jeu, ces interprétations sont impossibles à confirmer statistiquement.

La distribution spatiale et temporelle des hippocampes semble aussi variable qu'à l'Espiguette, en relation avec des conditions environnementales qui, en première analyse, semblent assez comparables.

Des mâles gravides ont été observés lors des transects à Beauduc de mai à juillet (Annexe II.1). C'est plus tôt que ce qui a été constaté à l'Espiguette, mais le nombre d'individus concernés étant très réduit, la réalité de cette différence n'est pas assurée.

4.2 Caractéristiques des habitats sédimentaires

4.2.1 Prélèvements de sédiments de l'Espiguette

Sur le site de l'Espiguette, 10 plongées ont été effectuées entre le 8 février et le 1er décembre 2022 dont 8 avec des prélèvements (Annexe I.3.3) de sédiments (Tableau 1).

Tableau 1 : Récapitulatif des sorties plongées sur le site de l'Espiguette

Date	Nombres de plongeurs mobilisés	Nombre de transects réalisés	Objectif principal des plongées
08/02/2022	4	6	Recherche d'hippocampes
05/04/2022	4	6	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments (avec étude du benthos)
03/05/2022	4	6	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments
07/06/2022	4	8	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments (avec étude du benthos)
05/07/2022	4	8	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments
04/08/2022	4	8	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments
23/08/2022	2	2	Recherche d'hippocampes
21/09/2022	3	5	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments
06/10/2022	3	4	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments (avec étude du benthos)
01/12/2022	4	3	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments (avec étude du benthos)
10 jours	36 plongeurs	56 transects	

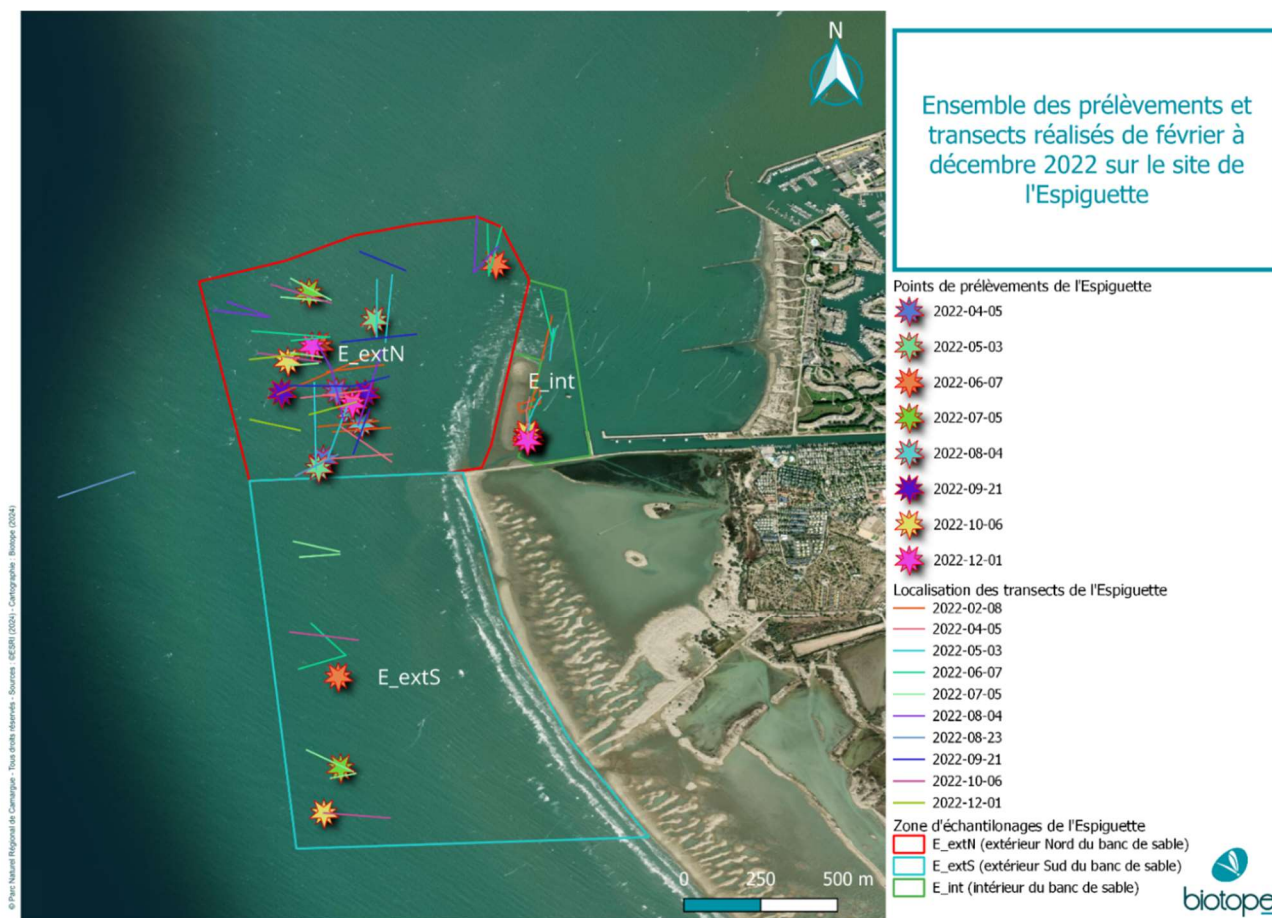
La localisation des stations a été décidée sur le terrain en fonction des densités d'observation ou des absences d'hippocampes, tout en s'efforçant d'échantillonner une grande part de nos zones d'étude. Seuls ceux effectués à l'intérieur de la flèche sableuse sont répétés dans le temps, car ils fournissent des données essentielles pour cette étude. Le nombre de transects varie également en fonction des conditions météorologiques, qui peuvent changer au cours d'une même journée.

Les résultats des analyses sédimentaires pour chaque station ont été centralisés sous forme de tableau (Tableau 2) et leurs localisations sont représentées géographiquement par des cartes récapitulatives journalières (Annexe I.3.1 et I.3.2).

Dans le Tableau 2, les analyses des paramètres suivants sont présentées :

- Distribution granulométrique par classes (argiles, silts, sables, graviers) ;
- Ammonium (NH₄) ;
- Nitrate (NO₃) ;
- Nitrite (NO₂) ;
- Orthophosphate (PO₄-P) ;
- Azote Kjeldahl (NTK) ;
- Azote total (NO₂ + NO₃ + NTK) ;
- Carbone organique total (COT) ;
- Phosphore (P) ;
- Chlorophylle ;
- Phéopigments.

Certaines valeurs sont indiquées avec le symbole « inférieur à » (<), correspondant à une valeur inférieure à la limite de quantification par le laboratoire. Dans les analyses statistiques, il a été convenu de considérer ces valeurs comme égales à zéro (quantités extrêmement faibles).



Carte 7 : Ensemble des prélèvements et transects réalisés sur le site de l'Espiguette

Tableau 2 : Données physico-chimiques par station du site de l'Espiguette (« < » signifie « valeur inférieure à la limite de quantification »)

Station	Date	Argiles	Silts	Sables	Graviers	Ammonium extrait au KCl (NH4)	Nitrate soluble (NO3)	Nitrite soluble (NO2)	Orthophosphate soluble (PO4-P)	Azote Kjeldahl (NTK)	Calcul de l'azote global (NO2+NO3+NTK)	COT (Sédiments) par combustion sèche	Phosphore (P)	Chlorophylle	Phéopigments
		(≤4 µm)	]4 - 63 µm]	]63 - 2000 µm]	(>2mm)	(mg NH4/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(g/kg M.S.)	(g/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(µg/g de sédiment sec)	(µg/g de sédiment sec)
E_extN_C1_1	05/04/2022	13,16	59,67	17,95	9,23	35,40	<20,0	<20,0	<20,0	1,70	1,70	15 800,00	567,00	3,83	6,27
E_extN_C1_2	05/04/2022	2,84	19,41	77,26	0,50	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	2 030,00	377,00	0,34	0,50
E_int_C1_3	05/04/2022	10,48	58,22	30,80	0,50	19,00	29,60	<20,0	<20,0	0,60	0,61	8 060,00	530,00	1,35	5,29
E_extN_C2_1	03/05/2022	2,99	20,36	74,36	2,29	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	1 420,00	351,00	0,91	0,84
E_extN_C2_2	03/05/2022	4,91	45,07	45,80	4,22	26,50	<20,0	<20,0	<20,0	0,60	0,60	3 140,00	471,00	1,65	3,41
E_extN_C2_3	03/05/2022	8,86	43,80	45,84	1,48	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	0,70	0,70	8 900,00	1 020,00	1,10	3,96
E_extS_C3_1	07/06/2022	2,60	12,13	84,76	0,50	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	1 840,00	389,00	0,94	0,92
E_extN_C3_2	07/06/2022	1,79	14,70	81,17	2,34	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	2 240,00	307,00	1,35	1,36
E_extN_C3_3	07/06/2022	2,46	9,61	86,87	1,04	25,10	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	1 780,00	426,00	1,06	0,97
E_int_C4_1	05/07/2022	5,67	24,97	48,76	20,60	61,60	<20,0	<20,0	<20,0	0,80	0,80	7 020,00	491,00	0,70	2,99
E_extN_C4_2	05/07/2022	4,84	39,77	54,88	0,50	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	0,50	0,50	2 360,00	379,00	0,92	1,28
E_extS_C4_3	05/07/2022	2,90	20,33	76,28	0,50	68,40	<20,0	<20,0	<20,0	0,50	0,50	1 420,00	359,00	0,63	0,74
E_int_C5_1	04/08/2022	3,87	19,28	17,05	59,80	33,70	<20,0	<20,0	<20,0	0,70	0,70	6 400,00	519,00	0,83	2,62
E_extN_C5_2	04/08/2022	3,89	32,81	24,41	38,90	186,00	<20,0	<20,0	<20,0	1,40	1,40	7 260,00	493,00	0,55	4,95
E_extN_C5_3	04/08/2022	2,95	16,93	74,12	6,00	23,90	196,00	<20,0	<20,0	0,50	<0,5	1 470,00	301,00	0,50	0,63
E_extN_C6_1	21/09/2022	6,60	48,14	42,30	2,96	21,10	<20,0	<20,0	<20,0	0,90	0,90	4 360,00	469,00	3,19	5,13
E_extN_C6_2	21/09/2022	2,96	17,25	77,36	2,96	21,10	<20,0	<20,0	<20,0	0,90	0,90	4 360,00	469,00	3,19	5,13
E_int_C6_3	21/09/2022	2,14	9,74	82,21	5,92	34,00	24,00	<20,0	<20,0	1,00	1,00	2 340,00	355,00	0,58	1,64
E_extS_C7_1	06/10/2022	3,78	27,08	68,01	1,14	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	1 920,00	436,00	0,46	0,95
E_extN_C7_2	06/10/2022	3,75	29,17	66,56	0,50	39,60	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	1 330,00	377,00	0,31	0,59
E_int_C7_3	06/10/2022	6,32	28,31	57,35	8,05	27,50	<20,0	<20,0	<20,0	0,60	0,60	4 520,00	467,00	0,59	1,51
E_int_C8_1	01/12/2022	9,45	46,27	28,89	15,40	19,00	<20,0	<20,0	<20,0	0,70	0,70	7 080,00	503,00	1,22	5,09
E_extN_C8_2	01/12/2022	8,80	52,89	21,63	16,70	58,90	<20,0	<20,0	<20,0	1,20	1,20	9 610,00	506,00	3,57	13,55
E_extN_C8_3	01/12/2022	2,85	15,23	79,96	1,95	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	<1000	393,00	0,34	0,61

Afin de rechercher la structuration sous-jacente à ces données, les valeurs des différents paramètres par stations ont été analysées par une approche multivariée : une analyse en composantes principales (ACP).

4.2.1.1 Analyse en composantes principales des données physico-chimiques du site de l'Espiguette

Présentation des résultats graphiques de l'ACP :

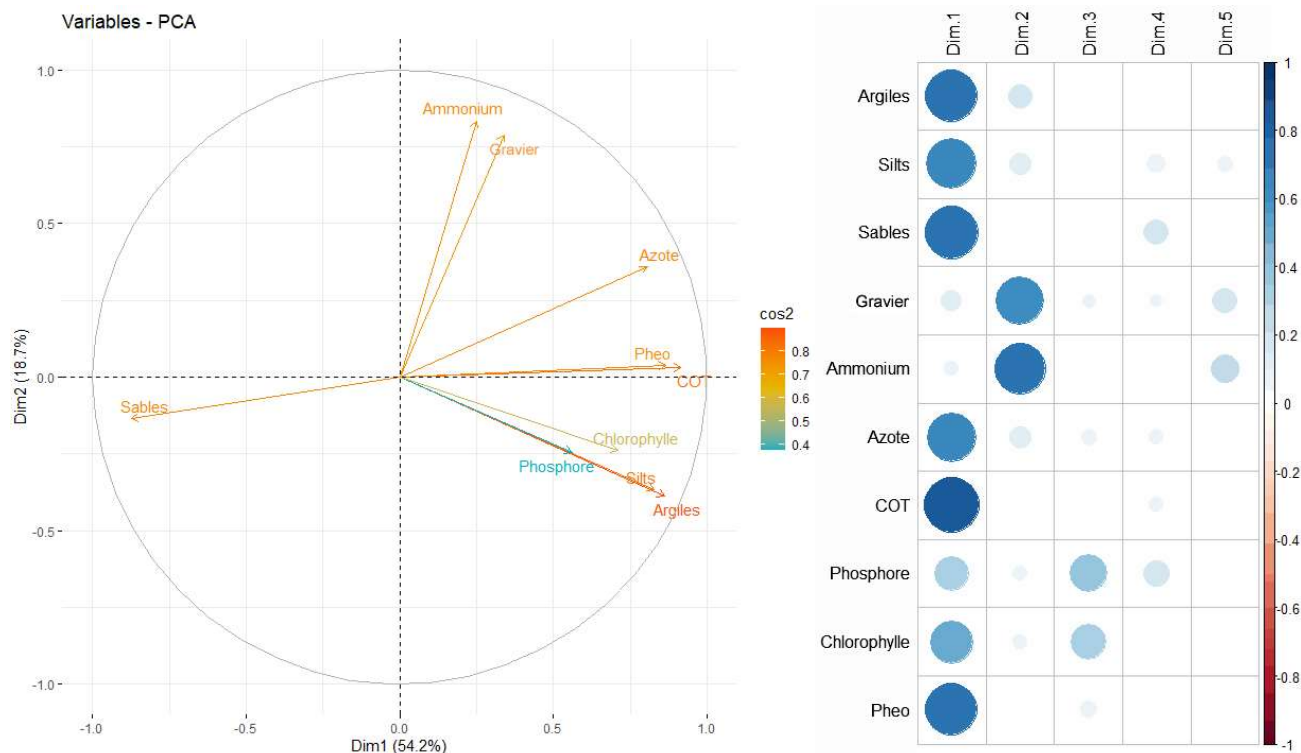


Figure 10, à gauche: Analyse en Composantes Principales (ACP) - Projection des variables et de leur contribution à la variabilité des données sur les deux premières Dimensions, Espiguette

Figure 11, à droite : Matrice de Corrélation des Composants de l'ACP aux cinq premières dimensions, Espiguette

- Signification des Dimensions de l'ACP (Figure 10).

À elle seule, la première Dimension rend compte de 54 % de la variance du jeu de données. Ce qui, dans un contexte de forte variabilité apparente des sédiments dans le secteur, est considérable.

D'après le graphique de représentation des variables, cette Dimension oppose les fortes proportions de sable (fin ou très fin : 0,063 à 2 mm) du côté négatif de la Dimension, à la richesse en particules fines à très fines (silts, argiles), en matière organique (carbone organique total COT), en biomasse végétale photosynthétique (phéopigments, chlorophylle) et en nutriments (azote total, phosphore).

- La seconde Dimension factorielle permet de déterminer les variables les plus significatives pour expliquer la variabilité résiduelle des données (soit moins de 50%) qui n'est pas expliquée par les variables de la Dimension 1. La Dimension 2, rend compte de 18,7 % de la variance totale des données, est déterminée du côté positif par deux variables, l'ammonium NH_4 et la part de « gravier » (grains > 2 mm) contenue dans le sédiment.

Compte tenu du pourcentage de variance pris en compte par les deux premières Dimensions (près de 73 %) et de la répartition des contributions des variables entre les premières Dimensions (Figure 11), nous nous en sommes tenus à l'interprétation des résultats sur les Dimensions 1 et 2.

Un histogramme expliquant la qualité de représentation des stations par rapport à la première dimension est disponible en Annexe I.4.2.

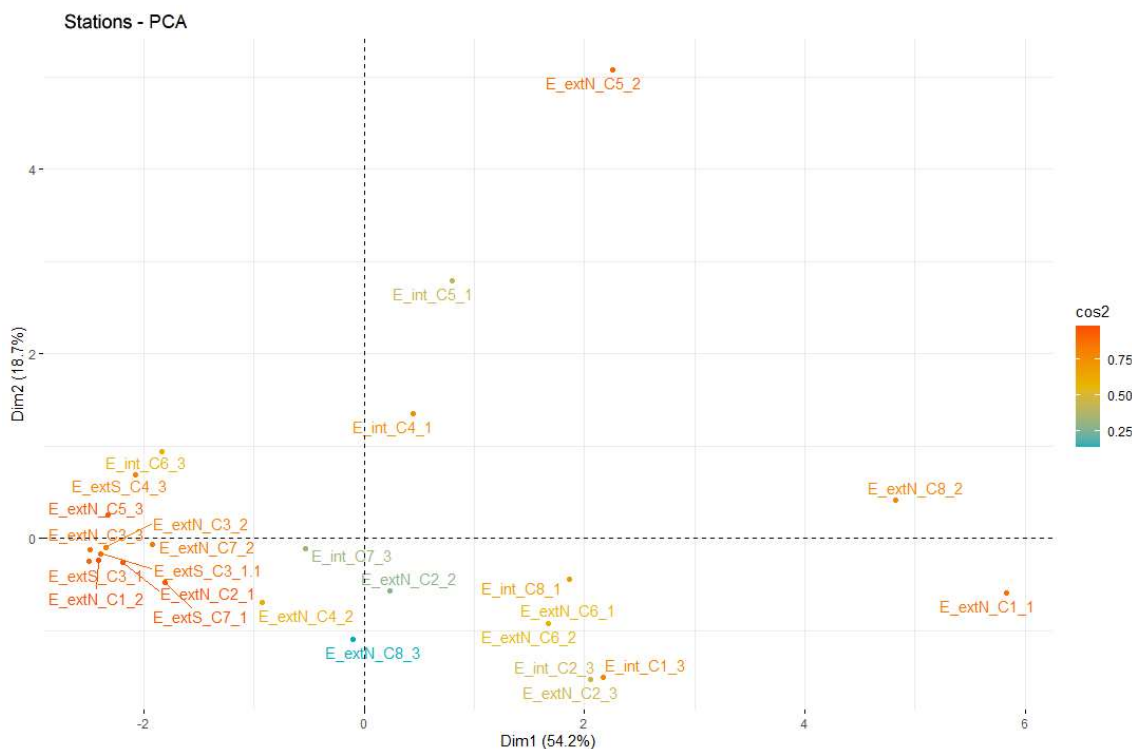


Figure 12 : Diagramme de Dispersion de l'Analyse en Composantes Principales avec Coloration par Cosinus Carré des stations, Espigette

- Répartition des stations (prélèvements) dans l'ACP (Figure 12).

Pour ce qui concerne les stations (= prélèvements de sédiments), la Dimension 1 de l'ACP est essentiellement déterminée, du côté négatif, par un groupe de 11 prélèvements ayant globalement des cos2 élevés à très élevés et qui, ensemble, représentent une grande part de l'inertie de la Dimension 1.

Pour la plupart de ces prélèvements où l'information est disponible, les observateurs avaient classé le sédiment comme sableux ou sablo-vaseux. Et de fait, c'est bien dans ces prélèvements que la part de sable est la plus élevée (66 à 82 % M.S.), et les niveaux de carbone organique, de nutriments et de pigments photosynthétiques les plus bas.

A l'opposé, côté positif, deux stations se situent loin sur la Dimension 1, mais avec des contributions (cos2) qui restent modérées (moins de 0,70).

Ces deux prélèvements, classés comme vaseux par les observateurs en plongée, se caractérisent effectivement par leurs particules fines avec notamment des proportions de silts parmi les plus fortes (53 et 60 %) et peu de sable (environ 20 %). Ces deux prélèvements présentent aussi les niveaux les plus hauts de carbone organique et de pigments photosynthétiques (mais aussi des niveaux élevés d'azote et de phosphore), qui témoignent d'une forte activité biologique.

- Le tableau qui suit (Tableau 3) liste les stations de prélèvement selon leur répartition le long de la Dimension 1 de l'ACP : (a) stations contribuant fortement au côté négatif de la Dimension, (b) stations contribuant peu à la Dimension (coordonnées proches de zéro), (c) stations ayant une coordonnée élevée (positive) sur la Dimension.

Tableau 3 : Répartition des stations sur la Dimension 1

(a) stations contribuant fortement au côté négatif de la Dimension 1	(b) stations contribuant peu à la Dimension 1	(c) stations ayant une coordonnée élevée (positive) sur la Dimension 1
E_extS_C3_1	E_extN_C5_2	E_extN_C1_1
E_extN_C3_3	E_int_C5_1	E_extN_C8_2
E_extN_C1_2	E_int_C4_1	
E_extS_C3_1.1	E_int_C7_3	
E_extN_C5_3	E_extN_C2_2	
E_extN_C3_2	E_int_C8_1	
E_extN_C2_1	E_extN_C4_2	
E_extS_C4_3	E_extN_C6_1	
E_extN_C7_2	E_extN_C6_2	
E_int_C6_3	E_extN_C8_3	
E_extN_C7_1	E_int_C1_3	
	E_extN_C2_3	

Parmi les stations contribuant peu à la Dimension 1 de l'ACP, trois se trouvent du côté positif de la Dimension 2 (dont nous avons vu qu'il est « tiré » par les variables ammonium et gravier).

Ces sites de prélèvement ont été classés comme vaseux ou très vaseux (avec une couche de vase molle atteignant environ 20 cm). A ces endroits, la fraction granulométrique nommée « gravier » (> 2 mm) correspond en fait à des débris de coquilles, qui persistent dans le sédiment quel que soit son taux d'envasement.

Ainsi, les stations E_extN_C5_2, E_int_C5_1, et E_int_C4_1 se distinguent par les plus forts taux de débris coquilliers de tous les prélèvements (variable « gravier » atteignant 20 à 60%), combinés à des niveaux importants d'ammonium (34 à 186 mg/Kg M.S.), les autres paramètres biochimiques étant plutôt moyens.

4.2.1.2 Interprétation et conclusions de l'analyse

Caractéristiques et variabilité des sédiments de la flèche sableuse de l'Espiguette

Les résultats des analyses physico-chimiques des sédiments montrent une forte structuration. Les stations se répartissent en effet le long de la Dimension 1 de l'ACP en un gradient (représentant plus de la moitié de la variance des données) qui va de sédiments que l'on peut qualifier de « sables propres » à des « vases à forte charge organique ».

Parmi les paramètres physico-chimiques mesurés dans les prélèvements, la Chlorophylle et les Phéopigments peuvent aider à cerner le niveau d'activité biologique dans le sédiment ou à sa surface. En effet, la Chlorophylle a est proportionnelle à la biomasse végétale chlorophyllienne vivante. Les phéopigments sont en revanche des produits de dégradation de la Chlorophylle a, qui permettent donc d'appréhender la biomasse végétale chlorophyllienne morte créée ou accumulée dans le sédiment ou à sa surface. Outre les valeurs absolues de ces deux paramètres, on peut aussi considérer la proportion de chlorophylle active : Chla / (Chla + Phéo).

Les 7 stations ayant les coordonnées négatives les plus fortes sur la Dimension 1 (« sable propre ») présentent les proportions de chlorophylle active les plus élevées (40 à 52 %). Pour les autres stations, le taux de chlorophylle active varie entre 19 et 42 %. Seule la station E_extN_C5_2, qui présente le plus de poids dans la définition de la Dimension 2 de l'ACP, se distingue par un taux de Chlorophylle active très bas (10%).

On obtient ainsi une image un peu plus précise des facteurs qui définissent la structuration des sédiments autour de la flèche de l'Espiguette :

- Un sable propre avec une biomasse végétale relativement faible, mais en grande partie vivante, pour 7-10 stations regroupées du côté négatif de la Dimension 1 de l'ACP.
- Des sédiments essentiellement vaseux avec une forte proportion de silts, de hauts niveaux de carbone organique (COT) et de biomasse végétale photosynthétique (en grande partie morte), ainsi que des niveaux élevés d'azote et de phosphore.

4.2.1.3 Caractéristiques des sédiments en fonction des zones et saisons

Au-delà de l'élucidation des principaux paramètres déterminant la variabilité des sédiments prélevés, il reste à examiner leur signification par rapport à des facteurs structurants du secteur et de l'échantillonnage mené :

- Quelle relation avec les zones plus ou moins exposées (extérieur banc, nord et sud) ou confinées (intérieur banc) ?
- Quelle variation en fonction des saisons ?

La Figure 13 ci-après permet de voir comment se répartissent les stations des trois zones définies autour du banc de sable de l'Espiguette (intérieur, extérieur nord, extérieur sud) dans le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP.

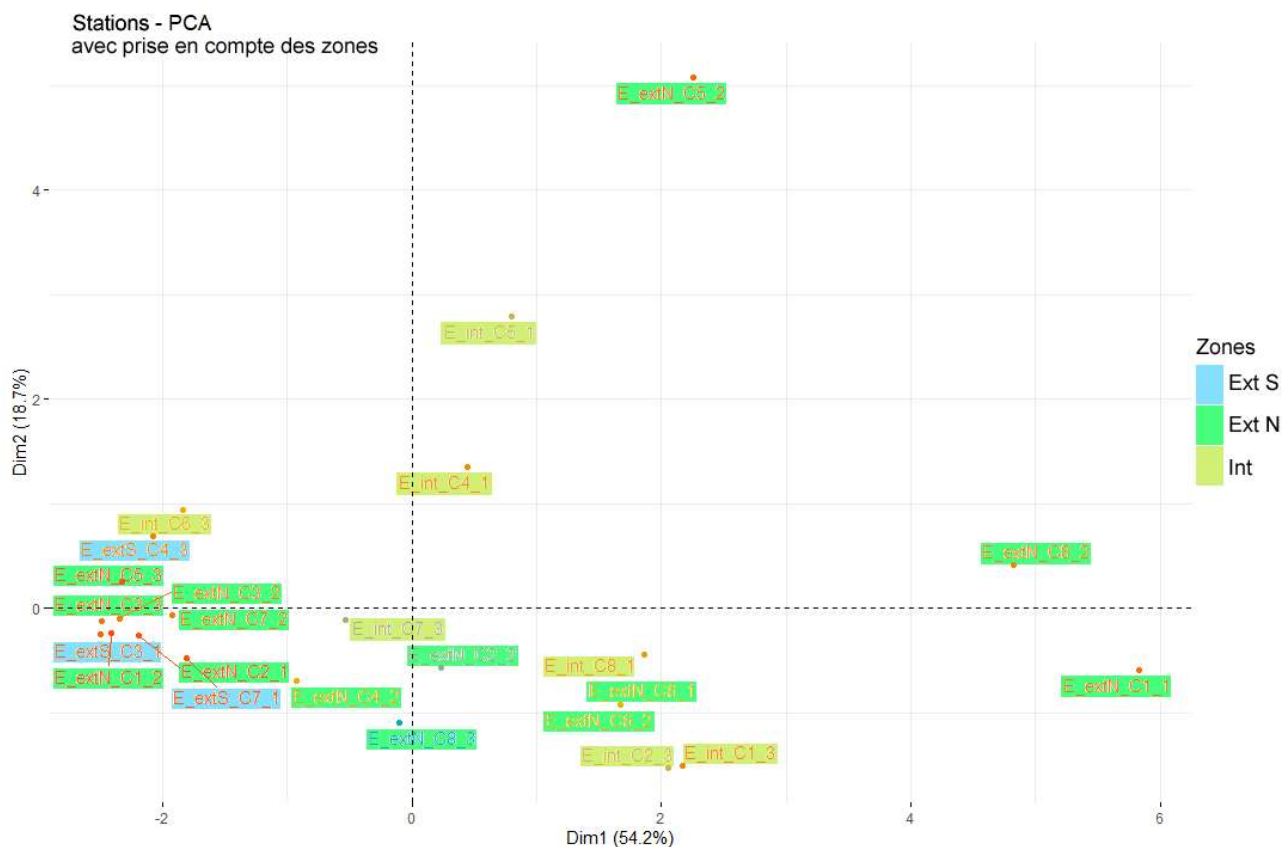


Figure 13 : Projection des stations de prélèvements et de leur répartition par zones sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP

On peut constater que les stations de prélèvement apportant les contributions les plus déterminantes à la Dimension 1 (côté négatif) sont toutes situées dans les zones extérieures (la station E_int_C6_3 a une contribution moindre). Ce groupe de stations comprend les trois prélèvements de la zone extérieure sud et plus de la moitié de ceux réalisés en zone extérieure nord.

On peut donc conclure que le pôle négatif de la Dimension 1 de l'ACP rend essentiellement compte de l'exposition marquée (ou très marquée : extérieur sud) à l'hydrodynamisme marin (vents, vagues, courants).

Les prélèvements réalisés côté intérieur ne se positionnent pas fortement sur la Dimension 1 (positions proches du barycentre, contributions faibles), à l'exception peut-être de E_int_C1_3 du côté positif (mois d'avril, pourcentage important de silts, charge organique élevée) et de E_int_C6_3 du côté négatif (septembre, très grosse proportion de sable et charge organique assez faible, probablement du fait d'un déversement de sable fin provenant du banc lors d'une tempête).

Concernant l'évolution saisonnière de l'état des sédiments, la Figure 14 montre la répartition, sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP, des stations échantillonnées au printemps (mai – juin), en été (juillet – août), en automne (septembre – octobre) et en hiver (de décembre à avril).

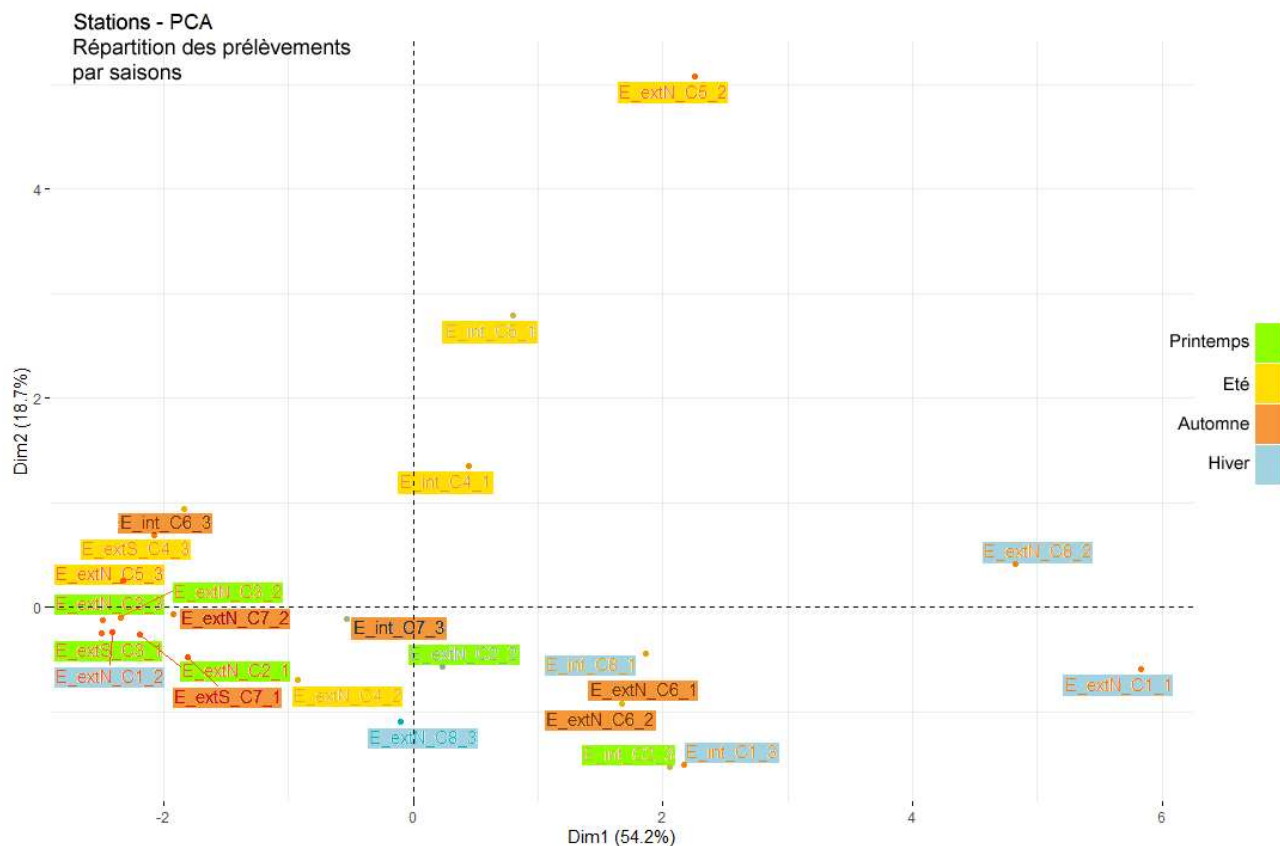


Figure 14 : Projection des stations de prélèvements classées par saisons sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP

La répartition saisonnière des prélèvements ne présente pas de tendance claire sur le plan des deux premières Dimensions de l'ACP. Il semble cependant apparaître une faible tendance le long de la Dimension 1, avec un peu plus de prélèvements vaseux en hiver et de sable propre au printemps et en été. Comme indiqué précédemment les prélèvements estivaux qui contribuent fortement au pôle positif de la Dimension 2 se caractérisent notamment par une proportion notable de débris coquilliers, facteur opérant à une échelle réduite, tant sur le plan temporel que spatial.

4.2.1.4 Caractéristiques des sédiments et présence d'hippocampes

La présence d'hippocampes est-elle liée à certaines caractéristiques des sédiments ?

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons associé une estimation d'abondance des hippocampes à chaque point de prélèvement (station) en nous basant sur la densité moyenne d'hippocampes dans les transects proches de chaque station (voir chapitre Méthodologie de l'étude). Le Tableau 4 indique les densités d'hippocampes associées aux différentes stations, présentées dans l'ordre de leurs coordonnées sur la Dimension 1 de l'ACP, comme dans le précédent tableau (Tableau 3).

Tableau 4 : Stations de prélèvement classées selon leur contribution à la Dimension 1 de l'ACP : densités d'hippocampes associées aux stations sur la base des transects de recensement proches

(a) stations contribuant fortement au côté négatif de la Dimension 1		(b) stations contribuant peu à la Dimension 1		(c) stations ayant une coordonnée élevée (positive) sur la Dimension 1	
	Hippocampes par ha		Hippocampes par ha		Hippocampes par ha
E_extS_C3_1	12,69	E_extN_C5_2	64,71	E_extN_C1_1	22,32
E_extN_C3_3	26,57	E_int_C5_1	-	E_extN_C8_2	14,79
E_extN_C1_2	11,06	E_int_C4_1	-		
E_extN_C5_3	-	E_int_C7_3	-		
E_extN_C3_2	-	E_extN_C2_2	12,76		
E_extN_C2_1	25,07	E_int_C8_1	64,30		
E_extS_C4_3	95,72	E_extN_C4_2	68,90		
E_extN_C7_2	34,18	E_extN_C6_1	7,75		
E_int_C6_3	-	E_extN_C6_2	33,88		
E_extN_C7_1	-	E_extN_C8_3	120,48		
		E_int_C1_3	80,65		
		E_int_C2_3	44,20		
Absence d'hippocampes	Densité faible < 40	Dens. moyenne 40-80	Densité forte > 80		

La Figure 15 (ci-après) montre, dans le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP, la répartition des stations et des niveaux de densité d'hippocampes qui leur sont associés.

Sur le plan des deux premières Dimensions de l'ACP, on peut constater que globalement, les densités d'hippocampes associées aux stations de « sable propre » sont faibles (ou nulles), à l'exception notable de la station E_extS_C4_3, qui est la plus profonde que nous ayons échantillonnée (8,5 m). Il en va de même pour l'extrémité positive de la Dimension 1.

En revanche, c'est vers le milieu du gradient de la Dimension 1, donc dans différentes nuances de sables vaseux, que l'on trouve la plupart des stations associées à des densités d'hippocampes moyennes ou fortes. Cette constatation conforte les conclusions des observateurs en plongée, qui relevaient des fréquences d'observation largement plus élevées sur fond sablo-vaseux.

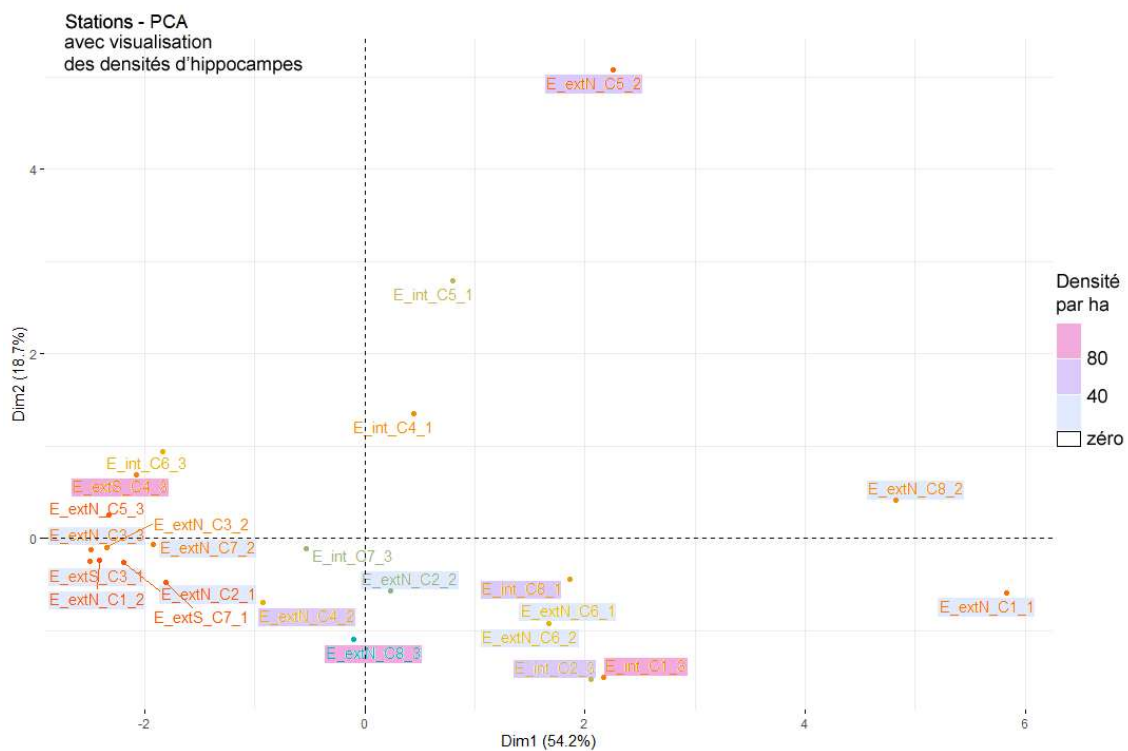


Figure 15 : Projection des stations de prélèvement sur le plan des deux premiers axes factoriels de l'ACP, classées par niveaux de densité des hippocampes environnants

4.2.2 Prélèvements de sédiments de Beauduc

Sur le site du Beauduc 6 plongées ont été effectuées entre 10 mai et le 24 novembre 2022 dont 4 avec des prélèvements de sédiments (Tableau 5).

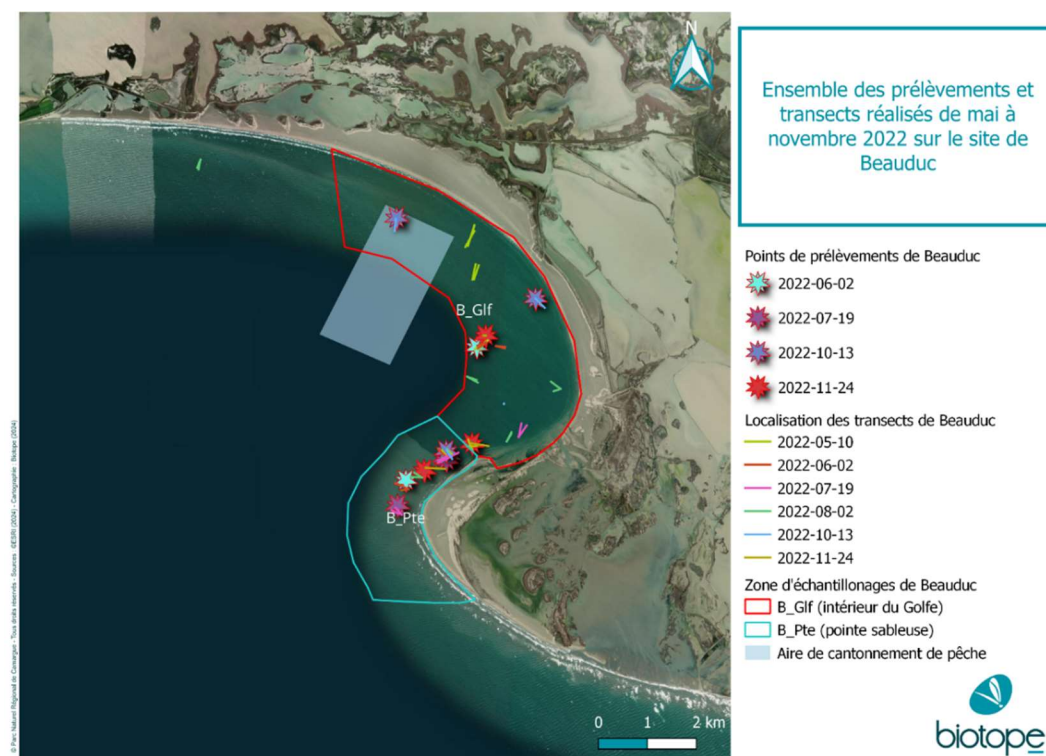
La 7^{ème} journée de plongées prévue dans le cadre de la présente étude avait été réalisée le

Tableau 5 : Récapitulatif des sorties plongées sur le site de Beauduc

Date	Nombres de plongeurs mobilisés	Nombre de transects réalisés	Objectif principal des plongées
10/05/2022	4	10	Recherche d'hippocampes
02/06/2022	4	8	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments (avec étude du benthos)
19/07/2022	4	8	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments
02/08/2022	4	8	Recherche d'hippocampes
13/10/2022	3	4	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments (avec étude du benthos)
24/11/2022	3	3	Recherche d'hippocampes et prélèvement de sédiments
6 jours	22 plongeurs	41 transects	

Tout comme pour l'Espiguette, la localisation des stations a été décidée sur le terrain en fonction des densités d'observation ou des absences d'hippocampes, tout en s'efforçant d'échantillonner une grande part de nos zones d'étude, d'autant plus ici où la population d'hippocampes est bien moins connue que celle de l'Espiguette.

Les résultats des analyses sédimentaires pour chaque station ont été centralisés sous forme de tableau (Tableau 6) et leurs localisations sont représentées géographiquement par des cartes récapitulatives journalières (Annexe II.2.1).



Carte 8 : Ensemble des prélèvements et transects réalisés sur le site de Beauduc

Tableau 6 : Données physico-chimiques par station du site de Beauduc (« < » signifie « valeur inférieure à la limite de quantification »)

Station	Date	Argiles	Silts	Sables	Graviers	Ammonium extrait au KCl (NH ₄)	Nitrate soluble (NO ₃)	Nitrite soluble (NO ₂)	Orthophosphate soluble (PO ₄ -P)	Azote Kjeldahl (NTK)	Calcul de l'azote global (NO ₂ +NO ₃ +NTK)	COT (Sédiments) par combustion sèche	Phosphore (P)	Chlorophylle	Phéopigments
		(≤4 µm)	[4 - 63 µm]	]63 - 2000 µm]	(>2mm)	(mg NH ₄ /kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(g/kg M.S.)	(g/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(mg/kg M.S.)	(µg/g de sédiment sec)	(µg/g de sédiment sec)
B_Glf_C1_1	02/06/2022	6,88	40,93	49,48	2,74	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	0,5	0,5	4160,00	480,00	0,70	2,10
B_Pte_C1_2	02/06/2022	2,75	14,83	78,08	4,35	26	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	2560,00	332,00	1,48	1,39
B_Pte_C1_3	02/06/2022	4,17	24,93	69,13	1,77	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	2470,00	374,00	0,96	1,00
B_Pte_C2_1	19/07/2022	3,47	25,42	70,62	0,5	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,5	1940,00	367,00	0,74	0,47
B_Pte_C2_2	19/07/2022	2,95	25,22	71,32	0,5	25,5	54,7	<20,0	<20,0	0,5	0,51	3200,00	371,00	0,71	1,22
B_Pte_C2_3	19/07/2022	2,96	23,85	72,70	0,5	32,6	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	1690,00	324,00	0,82	0,70
B_Pte_C3_1	13/10/2022	5,68	30,41	50,50	13,4	37,8	<20,0	<20,0	<20,0	0,6	0,6	3380,00	434,00	0,91	1,88
B_Glf_C3_2	13/10/2022	2,07	6,46	90,98	0,5	28,1	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	1320,00	316,00	0,83	0,47
B_Glf_C3_3	13/10/2022	3,25	6,43	89,81	0,5	20,8	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	1570,00	541,00	0,76	0,56
B_Pte_C4_1	24/11/2022	3,83	61,58	31,22	3,36	<20,1	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	2430,00	368,00	0,52	0,90
B_Glf_C4_2	24/11/2022	3,27	18,16	78,06	0,5	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<0,5	<0,50	2650,00	297,00	0,38	0,81
B_Glf_C4_3	24/11/2022	5,71	58,17	32,55	3,57	51,2	<20,0	<20,0	<20,0	0,7	0,7	4480,00	517,00	1,37	1,19

Afin de rechercher la structuration sous-jacente aux données de prélèvements de sédiments de Beauduc, nous avons réalisé une ACP sur les 12 stations disponibles.

Les graphiques de résultats de cette analyse sont présentés ci-après.

4.2.2.1 Analyse en composantes principales des données physico-chimiques du site de Beauduc

Présentation des résultats graphiques de l'ACP :

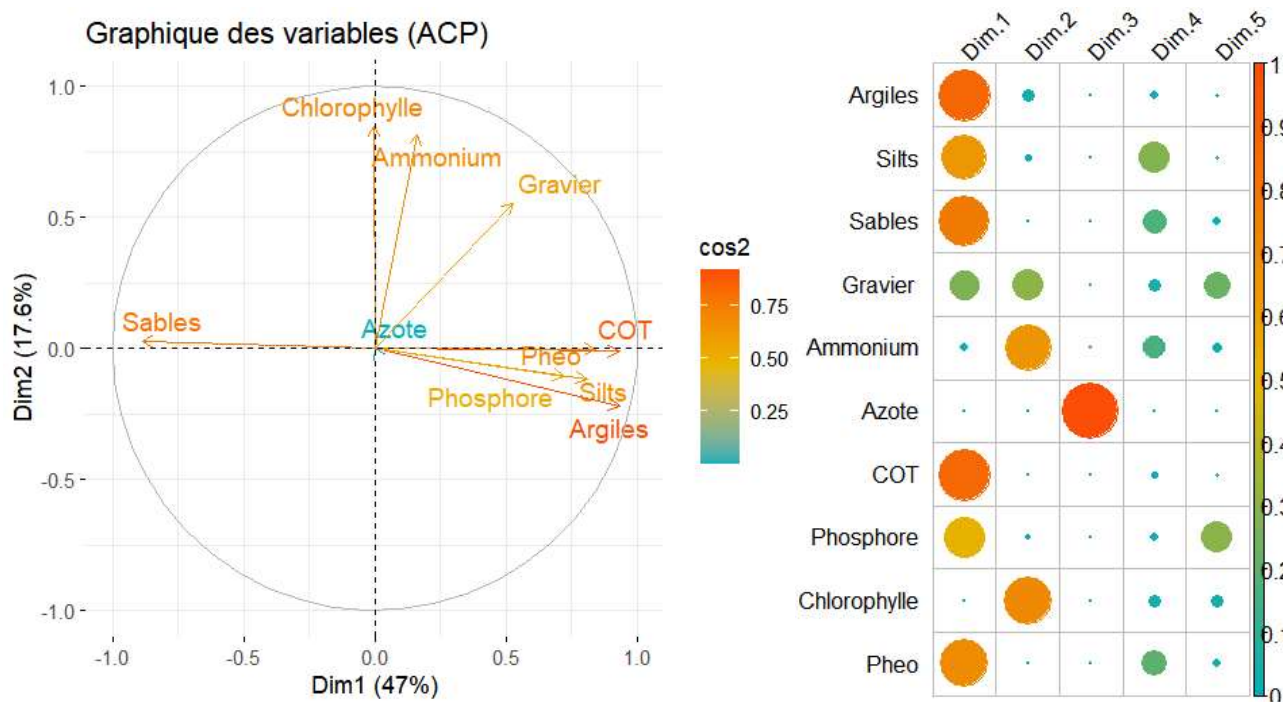


Figure 16, à droite : Analyse en Composantes Principale (ACP) - Projection des variables et de leur contribution à la variabilité des données sur les deux premières Dimensions, Beauduc

Figure 17, à droite : Matrice de Corrélation des Composants de l'ACP aux cinq premières dimensions, Beauduc

- Signification des Dimensions de l'ACP (Figure 16).

Avec une part de variance expliquée de 47 % et 17,6 % sur les deux premières Dimensions, l'ACP sur les prélèvements de sédiments de Beauduc présente une qualité de représentation qui reste proche de celle obtenue pour l'Espiguette.

Cependant, les variables ne se positionnent pas tout à fait de la même manière sur le plan des deux premières Dimensions. L'originalité la plus notable concerne la chlorophylle, dont la flèche est à peu près orthogonale au gradient qui oppose le sable à un groupe de variables de milieux vaseux et/ou chargés en matière organique. Autre particularité, la flèche représentant l'azote total est très courte, ce composant étant en effet absent (ou indétectable) dans la plupart des échantillons.

Compte tenu du pourcentage de variance pris en compte par les deux premières Dimensions (près de 65 %) et de la répartition des contributions des variables entre les premières Dimensions (Figure 17), nous nous en sommes tenus à l'interprétation des résultats sur les Dimensions 1 et 2.

Un histogramme expliquant la qualité de représentation des stations par rapport à la première dimension est disponible en Annexe II.3.2.

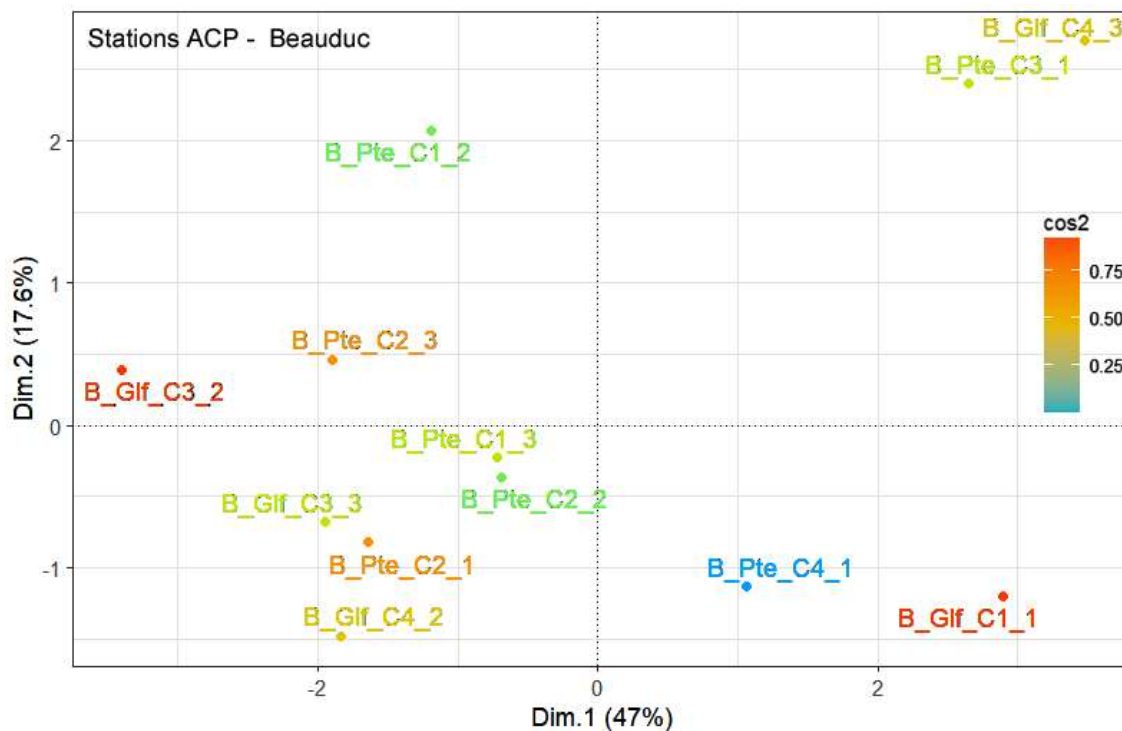


Figure 18 : Diagramme de Dispersion de l'Analyse en Composantes Principales avec Coloration par Cosinus Carré des stations, Beauduc

- Répartition des stations (prélèvements) dans l'ACP (Figure 18).

La station B_Glf_C3_2 est celle qui apporte, côté négatif, la plus forte contribution à la Dimension 1. Elle se caractérise par un sable très propre (91 % de particules sableuses), et des taux très bas de carbone organique, de chlorophylle et de phéopigments (par ailleurs, on y trouve le pourcentage de chlorophylle active le plus élevé de tous nos échantillons (64 %).

Le second prélèvement contribuant fortement à la Dimension 1, du côté positif cette fois-ci, correspond à la station B_Glf_C1_1. Inversement à la précédente, elle se caractérise par un pourcentage de particules fines (argiles et silts) équivalent au pourcentage de sable (granulométrie de 0,063 à 2 mm), ainsi que par des taux de carbone organique et de phéopigments très élevés pour Beauduc (et le pourcentage de chlorophylle active le plus bas pour le secteur).

Sur la base de la répartition des stations, la signification de la Dimension 2 de l'ACP est moins claire. Cependant, on constate bien que les stations placées à des coordonnées négatives sur cet axe ont des concentrations faibles de chlorophylle alors que celles placées vers le pôle positif ont des concentrations de chlorophylle élevées.

Ainsi, on retrouve à Beauduc une structuration des sédiments principalement organisée le long de la Dimension 1 de l'ACP, entre sables propres et substrats plus vaseux et chargés en matière organique, mais avec, pour ainsi dire, un taux de propreté globalement plus élevé qu'à l'Espiguette.

Au-delà des facteurs de variabilité évoqués ci-dessus, il faut noter que les sédiments de Beauduc sont globalement plus pauvres qu'à l'Espiguette. L'examen du tableau de données détaillé (Tableau 6) montre en effet que les échantillons analysés contenaient pour la plupart peu de nutriments, notamment azotés (seules trois stations avaient un taux d'azote total mesurable), et présentaient des charges organiques (carbone organique total, chlorophylle, phéopigments...) globalement plus faibles qu'à l'Espiguette.

4.2.2.2 Caractéristiques des sédiments en fonction des zones et saisons

L'examen visuel du plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP ne permet pas de déceler une quelconque particularité, les zones définies à Beauduc étant toutes deux représentées dans chaque cadran du graphique.

Pour ce qui concerne les saisons, le nombre d'échantillonnages (un au printemps, un en été, un en automne et un en hiver) est insuffisant pour tirer une quelconque conclusion.

4.2.2.3 Caractéristiques des sédiments et présence d'hippocampes

Tout comme à l'Espiguette, afin d'examiner si la présence des hippocampes peut être reliée à certaines caractéristiques des sédiments, nous avons associé une estimation d'abondance des hippocampes à chaque point de prélèvement (station) en nous basant sur la densité moyenne d'hippocampes dans les transects proches (voir chapitre Méthodologie de l'étude).

La Figure 19 indique, sur le plan des deux premières Dimensions de l'ACP, la répartition des stations et des niveaux de densité d'hippocampes qui leur sont associés.

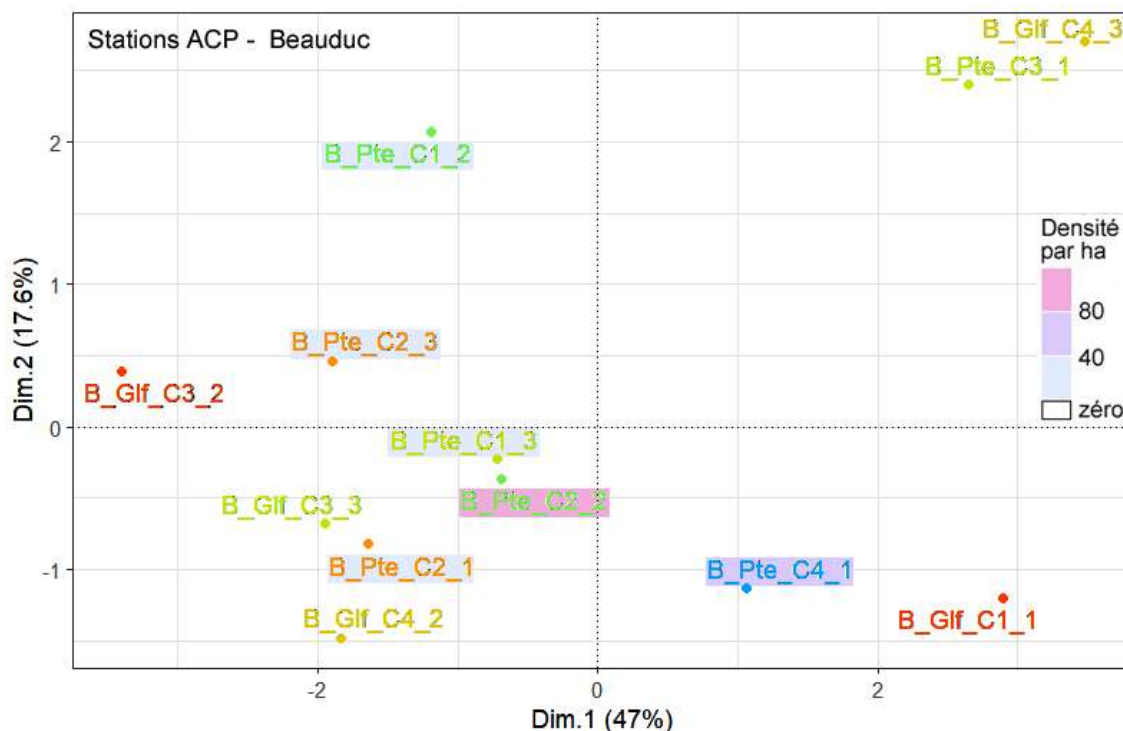


Figure 19 : Projection des stations de prélèvements et de leur densité d'hippocampes (par ha) sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP

Le long de la Dimension 1, les stations auxquelles des observations d'hippocampes étaient associées se trouvent toutes dans la partie centrale du gradient qui va des sables très propres aux substrats vaseux à forte charge organique. Comme à l'Espiguette, les hippocampes montrent une préférence pour les milieux sablo-vaseux et semblent éviter les sédiments les plus extrêmes, qu'ils soient trop chargés en vase ou matières organiques ou, au contraire, constitué de sable « trop propre ».

4.2.3 Comparaison de la composition physico-chimiques des sédiments des deux sites

Afin de vérifier s'il existait une certaine relation entre les sédiments prélevés à Beauduc et à l'Espiguette, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) conjointe de l'ensemble des prélèvements réalisés sur les deux sites.

Les résultats graphiques de cette analyse sont présentés ci-après.

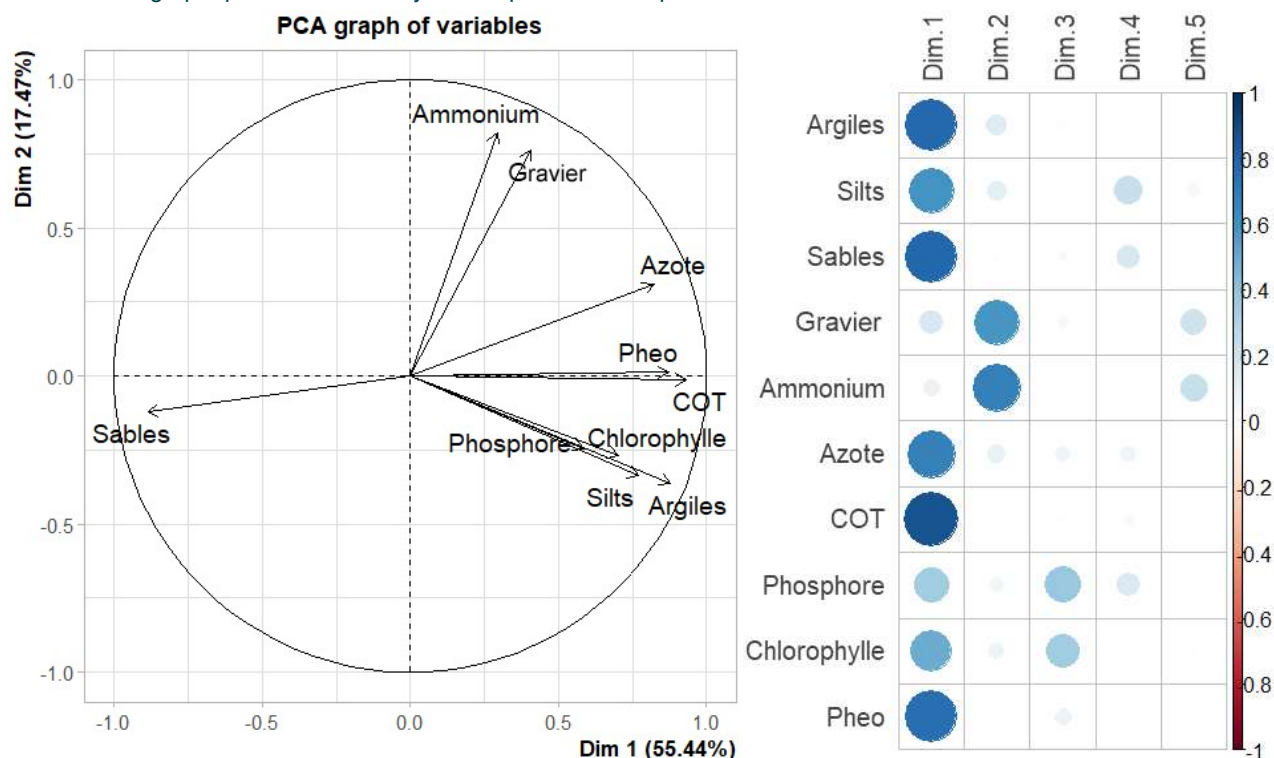


Figure 20, à gauche : Analyse en Composantes Principale (ACP) - Projection des variables et de leur contribution à la variabilité des données sur les deux premières Dimensions, Espiguette et Beauduc

Figure 21, à droite : Matrice de Corrélation des Composants de l'ACP aux cinq premières dimensions, Espiguette et Beauduc

- Signification des Dimensions de l'ACP (Figure 20).

Les Dimensions factorielles rendent compte, respectivement, de 55,4 % et 17,5 %. La représentation de la variabilité des données est donc aussi bonne que pour l'ACP sur les données de l'Espiguette seules. La position et les caractéristiques des variables sur la Figure 21 sont presque identiques à ce qui avait été obtenu pour les données Espiguette seules. Par ailleurs, dans l'histogramme représentant les contributions (Cos2) des stations sur la Dimension 1 (Annexe III.2), les stations de Beauduc et l'Espiguette sont mélangées sur tout le spectre avec une remarquable homogénéité de distribution. Ces éléments montrent une bonne cohérence entre les deux jeux de données.

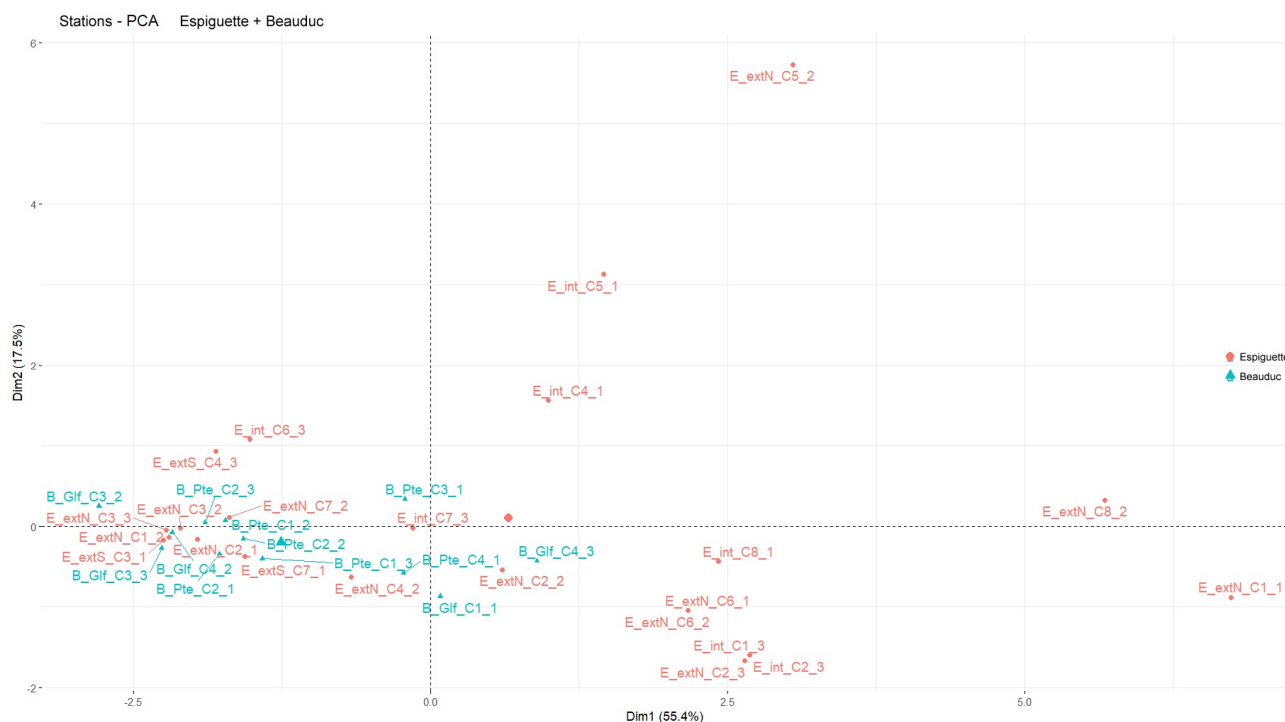


Figure 22 : Diagramme de Dispersion de l'Analyse en Composantes Principales avec Coloration par Cosinus Carré des stations, Espiguette et Beauduc

- Répartition des stations (prélèvements) dans l'ACP (Figure 22).

Lorsqu'on regarde comment les stations de prélèvement de Beauduc se répartissent sur le plan des deux premières Dimensions de l'ACP (Figure 22), on constate que les points correspondants se répartissent au cœur du gradient déjà observé pour la Dimension 1 sur les données Espiguette, mais sur une partie seulement de ce gradient.

Beaucoup se positionnent comme stations de sable propre vers le pôle négatif de la Dimension 1 tandis qu'une partie se trouve en milieu de gradient (à proximité du barycentre), ce qui correspond à des stations sablo-vaseuses ou peu vaseuses. Mais il n'y a pas à Beauduc, de prélèvements aussi « extrêmes » qu'à l'Espiguette, notamment sur la Dimension 2.

Ainsi, les paramètres qui structurent la composition des sédiments sont comparables dans les deux endroits. Cela conforte dans l'idée que l'on peut valablement comparer entre elles les situations sédimentaires autour de ces deux flèches sableuses.

4.3 Analyse du benthos dans les prélèvements de sédiments de l'Espiguette

4.3.1 Prélèvements de benthos effectués et résultats

Sur les 24 prélèvements de sédiments réalisés autour du banc de sable de l'Espiguette pour analyse physico-chimique, 12 ont inclus un échantillonnage spécifique pour étude du benthos (macrofaune et méiofaune). Ces échantillonnages ont été réalisés les 05/04/2022, 07/06/2022, 06/10/2022 et 01/12/2022. A chaque date, les trois stations de prélèvement du jour ont fait l'objet d'un échantillonnage benthos.

Les animaux benthiques, extraits des sédiments par le biais de tamis de maille de plus en plus fine, ont été identifiés à l'espèce (ou au niveau taxonomique le plus bas possible). Cependant, compte tenu de la richesse et de la diversité des échantillons, il a été choisi de présenter des résultats agrégés par classes ou autres divisions taxonomiques pertinentes.

C'est ce que nous faisons dans le tableau ci-après (Tableau 7) qui récapitule les résultats obtenus sur les 12 stations échantillonnées, pour la macrofaune (individus benthiques retenus par un filtre de 800 microns ; code **L**) et la méiofaune (individus retenus par des filtres successifs de 500 et 355 microns ; codes **M** et **S** respectivement).

Tableau 7 : Benthos dans les sédiments de l'Espiguette - Comptages par classes taxonomiques et classe de taille

Catégories de	E_extN C1_1	E_extN C1_2	E_int C1_3	E_extS C3_1	E_extN C3_2	E_extN C3_3	E_extS C7_1	E_extN C7_2	E_int C7_3	E_int C8_1	E_extN C8_2	E_extN C8_3	Total
benthos	05/04/22			07/06/22			06/10/22			01/12/22			
Amphipoda L	-	1	19	1	2	1	-	-	-	-	2	-	26
Amphipoda M	-	1	51	1	1	1	-	-	-	-	1	-	56
Amphipoda S	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Anthozoa L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Arachnides M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Asteroidea L	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1
Bivalvia L	7	12	18	3	7	11	4	4	-	-	8	2	76
Bivalvia M	-	13	3	-	-	13	7	1	-	-	13	18	68
Bivalvia S	-	1	3	6	-	2	-	-	-	2	5	13	32
Copepoda S	-	3	1	1	-	5	-	2	-	-	1	3	16
Diptères M	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Diptères S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5
Gastropoda L	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Gastropoda M	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	3	5
Gastropoda S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Holothurie L	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Malacostraca* L	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	3	-	5
Malacostraca* M	-	4	2	1	-	-	-	-	-	-	1	1	9
Malacostraca* S	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2
Nématodes L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Nématodes M	1	1	-	-	-	4	-	35	-	2	23	205	271
Nématodes S	10 000	1	5	3	4	36	34	358	3	36	135	975	11 590
Némertes L	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11
Némertes M	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
Némertes S	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Ophiurida L	-	13	7	1	7	2	1	-	-	-	-	-	31
Ophiurida M	-	-	-	-	-	3	1	-	-	-	-	-	4
Ostracodes L	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	3
Ostracodes M	-	2	2	1	-	2	-	-	-	1	1	55	64
Ostracodes S	-	-	1	-	-	4	-	-	-	1	1	-	7
Phoronidiens M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Polychaeta L	15	12	4	5	26	10	1	2	-	1	23	1	100
Polychaeta M	1	26	13	1	7	9	-	-	1	2	45	6	111
Polychaeta S	-	11	9	3	3	3	-	-	-	7	17	5	58
Siponcula L	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Siponcula M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Tanaidacea L	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Tanaidacea M	-	-	6	-	2	-	-	-	-	1	-	-	9
Tanaidacea S	-	-	6	-	12	-	-	-	-	-	-	-	18
Total général	10 041	104	157	29	73	107	49	402	4	55	280	1 297	12 598
Total sans nématodes	40	102	152	26	69	67	15	9	1	17	122	116	736

L : > 0,8 mm	M : 0,5-0,8 mm	S : 0,35-0,5 mm	Effectifs	≥ 5	≥ 10	≥ 20	≥ 40	≥ 100
Macrofaune	Méiofaune		(codes couleur)					

En **bleu** : crustacés susceptibles d'être consommés par les hippocampes à museau court

* Les Malacostraca identifiés étaient presque tous des Cumacea.

- Macrofaune, méiofaune et qualité des sédiments :

La macrofaune et la méiofaune témoignent-elles d'une bonne santé des sédiments ?

- La méiofaune (< 0,8 mm pour les tamis utilisés) est particulièrement abondante dans les échantillons, notamment à cause d'une forte présence de Nématodes (qui sont en général considérés comme « neutres » mais sont aussi capables de survivre dans des conditions dégradées d'anoxie).

Du fait de l'abondance des Nématodes, les indices de diversité sont – mécaniquement – assez faibles, et donc peu exploitables. Mais, hors Nématodes, la richesse taxonomique est tout de même correcte.

- Pour la macrofaune (> 0,8 mm dans cette étude), la diversité et la richesse spécifique sont bonnes, conformes à ce que l'on peut attendre dans des petits fonds sablo-vaseux.
- Les nombres assez élevés de polychètes tendent à indiquer que la matière organique qui leur sert de nourriture est assez abondante. Pour autant, les échantillons ne montrent pas d'espèces indicatrices d'enrichissement organique. La matière organique n'est donc pas en excès.

◦

- La présence de proies potentielles dans le sédiment a-t-elle un lien avec celle des hippocampes ?

Parmi les animaux identifiés dans les échantillons de sédiments, certains sont (en théorie au moins) susceptibles d'être des proies pour les hippocampes, en particulier les Crustacés.

Les groupes de Crustacés présents dans les échantillons (Tableau 7) sont les suivants :

- **Amphipoda** : Présents dans 6 prélèvements sur 12 ; tailles diverses. Localement abondants (station E_int_C1_3).
- **Copepoda** : Présents dans 7 prélèvements sur 12 ; taille S uniquement (350 à 500 microns).

NB Nous n'avons pas obtenu d'identification à la famille, qui aurait permis de déterminer s'il s'agissait de copépodes benthiques ou nageurs.

- **Malacostraca** (Cumacea principalement) : Présents dans 5 prélèvements sur 12 ; tailles diverses.
- **Ostracodes** : Présents dans 8 prélèvements sur 12 ; tailles diverses. Localement abondants (station E_extN_C8_3).
- **Tanaidacea** : Présents dans 3 prélèvements sur 12 ; tailles diverses.

◦

Si tous ces Crustacés sont susceptibles d'être consommés par les hippocampes à museau court, seuls les Amphipodes sont communs dans leur régime alimentaire (*Kitsos et al. 2008, Gurkan & al. 2011*). Cependant, une bonne part de l'alimentation de ces hippocampes est constituée de Crustacés nageurs tels que des Mysidacés et larves de décapodes.

Les classes Copepoda, Malacostraca et Tanaidacea sont relativement peu présents dans les échantillons et, les effectifs dénombrés restant faibles, il est peu probable qu'ils attirent spécifiquement les hippocampes.

Pour les Amphipodes, en revanche, 5 des 6 stations où ils sont présents sont associées à une présence proche d'hippocampes. Et la station E_int_C1_3, où plus de 70 Amphipodes ont été dénombrés est associée à une densité élevée d'hippocampes (~80/ha).

Pour les Ostracodes, on constate également que la station où ils sont les plus nombreux (55 Ostracodes dénombrés) est associée à une densité très élevée d'hippocampes (~120/ha).

L'hypothèse d'une relation entre la présence d'hippocampes et celle de proies potentielles n'est donc pas invraisemblable. Il faudrait cependant un protocole spécifique, qui prenne notamment en compte les Crustacés nageurs supra-benthiques, pour confirmer et préciser cette relation.

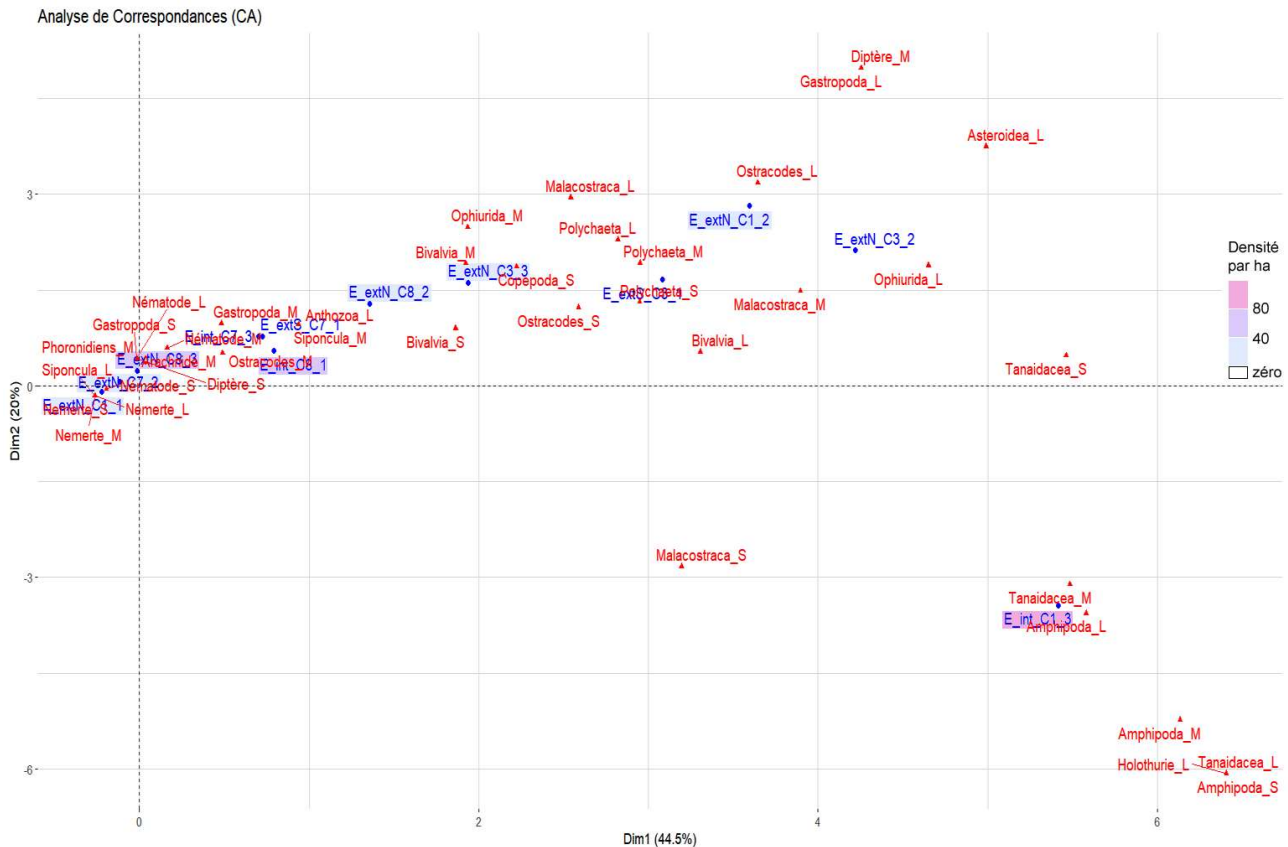


Figure 24 : Benthos dans les sédiments de l'Espiguette – Analyse des correspondances (AC) – Projection des variables (catégories de benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions, avec indication des densités d'hippocampes associées

On peut tout d'abord constater que les stations associées à différents niveaux de densité des hippocampes se trouvent réparties dans tout le graphique sans tendance claire. On trouve notamment des densités élevées aux deux extrémités du nuage de points : vers l'extrémité positive de la Dimension 1 (la station E_int_C1_3, qui est très particulière) comme au niveau du barycentre du nuage de points (= stations E_extN_C8_3).

La station E_int_C1_3, qui détermine près de la moitié de la structure des données sur le plan des deux premières dimensions de l'AC, présente des caractéristiques particulières en bien des points :

- Il s'agit d'un prélèvement de fin d'hiver (05/04/22), dans une eau froide (12 °C) et donc favorable à une bonne oxygénation à la surface du sédiment.
- On y a trouvé la grande majorité des Amphipodes recensés dans les échantillons et des effectifs élevés de Tanaïdaces, par ailleurs présents dans deux autres stations seulement.
- C'est un des deux prélèvements les plus vaseux de l'Espiguette (~68 % de particules fines et très fines), mais aussi les plus chargés en matière organique morte (carbone organique et phéopigments très élevés).
- C'est la troisième station en termes de densité associée d'hippocampes (~80 ind/ha).

Peut-être est-il intéressant de noter que la station E_extN_C8_3, également hivernale (01/12/22) et avec une forte densité d'hippocampes associée, ne contribue pratiquement pas au plan des Dimensions 1 et 2 de l'AC. Il est possible que cela puisse s'expliquer par l'opposition de ces deux stations sur le gradient « sable-vase », E_extN_C8_3 étant caractérisée par un sable peu vaseux avec la charge organique la plus faible de toutes les stations.

Ainsi, les deux stations de prélèvement associées aux plus fortes densités d'hippocampes correspondent à des contextes physico-chimiques et biologiques radicalement différents, même si elles sont toutes deux hivernales.

Si l'hypothèse d'une attraction des hippocampes vers les zones à forte concentration de proies potentielles (ou dont les caractéristiques sont favorables au développement de ces proies), que nous avons envisagée plus haut, peut paraître plausible pour la station E_int_C1_3, peut-elle également s'appliquer à E_extN_C8_3 ? Difficile à ce stade de déterminer si la présence de 55 Ostracodes dans ce prélèvement suffirait à valider cette hypothèse...

Rappelons également que les densités d'hippocampes associées aux stations sont calculées à une échelle qui dépasse l'environnement immédiat du point de prélèvement, d'où un possible décalage entre ces deux réalités de terrain.

- Interprétation et conclusions de l'analyse des correspondances

La structuration des données qui apparaît à l'analyse des correspondances met surtout en évidence les stations originales en termes de combinaison d'espèces benthiques.

Certains de ces paramètres sont interprétables du point de vue de l'étude des hippocampes, comme les Amphipodes et les Tanaïdacs qui pourraient être des proies potentielles, tandis que d'autres ne sont interprétables que dans une logique d'écologie globale des espèces endogées, indépendamment des problématiques de la présente étude.

Les groupes de macrofaune ou méiofaune ayant le plus d'importance dans la structuration des données sont les Amphipodes, les vers Polychètes et dans une moindre mesure les Tanaïdacs. On peut hypothétiser des interactions entre ces animaux et les hippocampes, mais c'est beaucoup moins évident pour des groupes tels que les Bivalves, les Ophiurides ou les Nématodes.

Pour ce qui est de la relation entre les caractéristiques de la macrofaune / méiofaune et la présence des hippocampes, quelques exemples évoquent une attraction des hippocampes vers des secteurs où des proies potentielles sont présentes dans le sédiment. Cependant, il est difficile de généraliser ces hypothèses ponctuelles en une règle partagée : une autre logique de protocole (incluant notamment les Crustacés nageurs supra-benthiques, Mysidacs, larves de Crustacés, Décapodes, Copépodes nageurs...) serait nécessaire pour répondre spécifiquement à cette question.

4.4 Analyse du benthos dans les prélèvements de sédiments de Beauduc

4.4.1 Prélèvements de benthos effectués et résultats

Sur les 12 prélèvements de sédiments réalisés autour du banc de sable de Beauduc pour analyse physico-chimique, 6 ont inclus un échantillonnage spécifique pour étude du benthos (macrofaune et méiofaune). Ces échantillonnages ont été réalisés les 02/06/2022 et 13/10/2022. A chaque date, les trois stations de prélèvement du jour ont fait l'objet d'un échantillonnage benthos.

Les animaux benthiques, extraits des sédiments par le biais de tamis de maille de plus en plus fine, ont été identifiés à l'espèce (ou au niveau taxonomique le plus bas possible). Cependant, compte tenu de la richesse et de la diversité des échantillons, il a été choisi de présenter des résultats agrégés par classes ou autres divisions taxonomiques pertinentes.

C'est ce que nous faisons dans le tableau ci-après (Tableau 8) qui récapitule les résultats obtenus sur les 6 stations échantillonnées, pour la macrofaune (individus benthiques retenus par un filtre de 800 microns ; code **L**) et la méiofaune (individus retenus par des filtres successifs de 500 et 355 microns ; codes **M** et **S** respectivement).

Tableau 8 : Benthos dans les sédiments de Beauduc - Comptages par classes taxonomiques et classe de taille

Catégories de benthos	B_Glf_C 1_1	B_Pte_C 1_2	B_Pte_C 1_3	B_Pte_ C3_1	B_Glf_ C3_2	B_Glf_ C3_3	Total
	02/06/22			13/10/22			
Amphipoda_L	-	1	-	1	2		4
Amphipoda_M	4	-	-	2	-	1	7
Amphipoda_S	3	1	-	-	-	-	4
Asteroidea_L		1	-	-	-	-	1
Asteroidea_M	-	-	-	-	-	12	12
Bivalvia_L	2	6	4	3	6	7	28
Bivalvia_M	5	1	2	-	3	29	40
Bivalvia_S	-	-	-	3	4	6	13
Copepoda_M	-	-	-	-	-	2	2
Copepoda_S	-	3	-	-	10	3	16
Decapoda_L	-	-	1	-	-	1	2
Gastropoda_L	1	1	1	1	2	3	9
Gastropoda_M	-	-	1	-	4	-	5
Gastropoda_S	-	-	-	-	1	1	2
Isopoda_S	-	-	-	-	1	-	1
Malacostraca_L	1	-	-	-		-	1
Malacostraca_M	9	-	1	1	1	-	12
Malacostraca_S	1	-	-	-	-	-	1
Nématode_L	-	1	-	1	-	-	2
Nématode_M	1	-	10	24	5	31	71
Nématode_S	62	109	15	294	71	68	619
Nemerte_M	-	1	-	-	1		2
Oligochaeta_M	-	-	-	-	-	4	4
Ophiurida_L	-	1	-	-	-	-	1
Ophiurida_M	-	-	-	-	1	-	1
Ostracodes_L	-	1	-	-	-	-	1
Ostracodes_M	1	3	2	1	6	53	66
Ostracodes_S	-	-	-	4	35	33	72
Phoronidiens_M	-	-	-	-	7	-	7
Phoronidiens_S	-	-	1	-	2	-	3
Polychaeta_L	11	3	6	16	8	-	44
Polychaeta_M	8	7	18	29	20	10	92
Polychaeta_S	5	2	3	30	17	21	78
Scaphopoda_L	-	-	-	-	-	1	1
Tanaidacea_L	1	-	-	-	-	-	1
Tanaidacea_M	-	-	-	-	-	-	0
Tanaidacea_S	1	3	-	19	-	-	23
Total général	116	145	65	429	207	286	1 248
Total sans nématodes	53	35	40	110	131	187	556

L : > 0,8 mm	M : 0,5-0,8 mm	S : 0,35-0,5 mm	Effectifs	5-9	10-19	20-39	40-99	≥ 100
Macrofaune	Méiofaune		(codes couleur)					

En bleu : crustacés susceptibles d'être consommés par les hippocampes à museau court

* Les Malacostraca identifiés étaient presque tous des Cumacea.

- Macrofaune, méiofaune et qualité des sédiments :

La macrofaune et la méiofaune témoignent-elles d'une bonne santé des sédiments ?

- Méiofaune (< 0,8 mm avec les tamis utilisés) est particulièrement abondante dans les échantillons, principalement en raison de la forte présence de nématodes (692 individus recensés). Ces organismes, bien que généralement considérés comme « neutres », sont aussi capables de survivre dans des conditions de stress environnemental, notamment en cas d'anoxie.

L'abondance des nématodes entraîne mécaniquement une diminution des indices de diversité, ce qui limite leur interprétation. Cependant, hors nématodes, la richesse taxonomique reste correcte, avec une présence notable d'ostracodes (139 individus), de polychètes (214 individus) et de tanaidacés (24 individus).

- Macrofaune (> 0,8 mm dans cette étude), la diversité et la richesse spécifique de la macrofaune sont bonnes et conformes à ce qui est attendu dans des petits fonds sablo-vaseux.

Les polychètes (214 individus) sont particulièrement bien représentés, ce qui suggère une disponibilité suffisante de matière organique pour leur alimentation. Toutefois, aucune espèce indicatrice d'un excès de matière organique n'a été observée, ce qui laisse penser que la quantité de matière organique est présente mais non excessive.

- La présence de proies potentielles dans le sédiment a-t-elle un lien avec celle des hippocampes ?

Parmi les animaux identifiés dans les échantillons de sédiments, certains sont (en théorie au moins) susceptibles d'être des proies pour les hippocampes, en particulier les Crustacés.

Les groupes de Crustacés présents dans les échantillons (Tableau 8) sont les suivants :

- **Amphipoda** : Présents dans 5 prélèvements sur 6 ; tailles diverses.
- **Copepoda** : Présents dans 3 prélèvements sur 6 ; taille S et M uniquement (350 à 800 microns).

NB : Nous n'avons pas obtenu d'identification à la famille, qui aurait permis de déterminer s'il s'agissait de copépodes benthiques ou nageurs.

- **Malacostraca** (Cumacea principalement) : Présents dans 4 prélèvements sur 6 ; tailles diverses mais une dominance de la taille M notamment en station B_Glf_C1_1.
- **Ostracodes** : Présents dans 6 prélèvements sur 6 ; dominance des tailles M et L. Localement abondants (station B_Glf_C3_3).
- **Tanaidacea** : Présents dans 3 prélèvements sur 6 ; très grande dominance de la taille S.

Si tous ces Crustacés sont susceptibles d'être consommés par les hippocampes à museau court, seuls les Amphipodes sont communs dans leur régime alimentaire (*Kitsos et al. 2008, Gurkan & al. 2011*). Cependant, une bonne part de l'alimentation de ces hippocampes est constituée de Crustacés nageurs tels que des Mysidacés et larves de décapodes.

Les classes Amphipoda, Copepoda, Malacostraca et Tanaidacea sont peu présents dans les échantillons et les effectifs dénombrés restant faibles, il est peu probable qu'ils attirent spécifiquement les hippocampes.

Les Ostracodes sont particulièrement abondants sur les stations B_Glf_C3_2 et B_Glf_C3_3 (41 à 86 individus). Bien qu'ils puissent constituer une source de nourriture pour les hippocampes à museau court, leur densité sur ces stations reste quasi nulle, ne permettant pas d'établir une relation proie-prédateur avec les hippocampes sur le site de Beauduc.

4.4.2 Analyse des correspondances

Pour établir dans quelle mesure il existe des similitudes entre stations en termes de macrofaune et méiofaune, une analyse des correspondances (AC) a été réalisée sur les données de comptage agrégées par classes ou familles et par catégories de taille (L, M, S).

Les résultats graphiques de cette analyse sont présentés ci-après.

L'AC permet de représenter variables de benthos et stations sur un même graphique ; la proximité spatiale entre un point station et des points variables correspond donc bien à une proximité (corrélation) réelle.

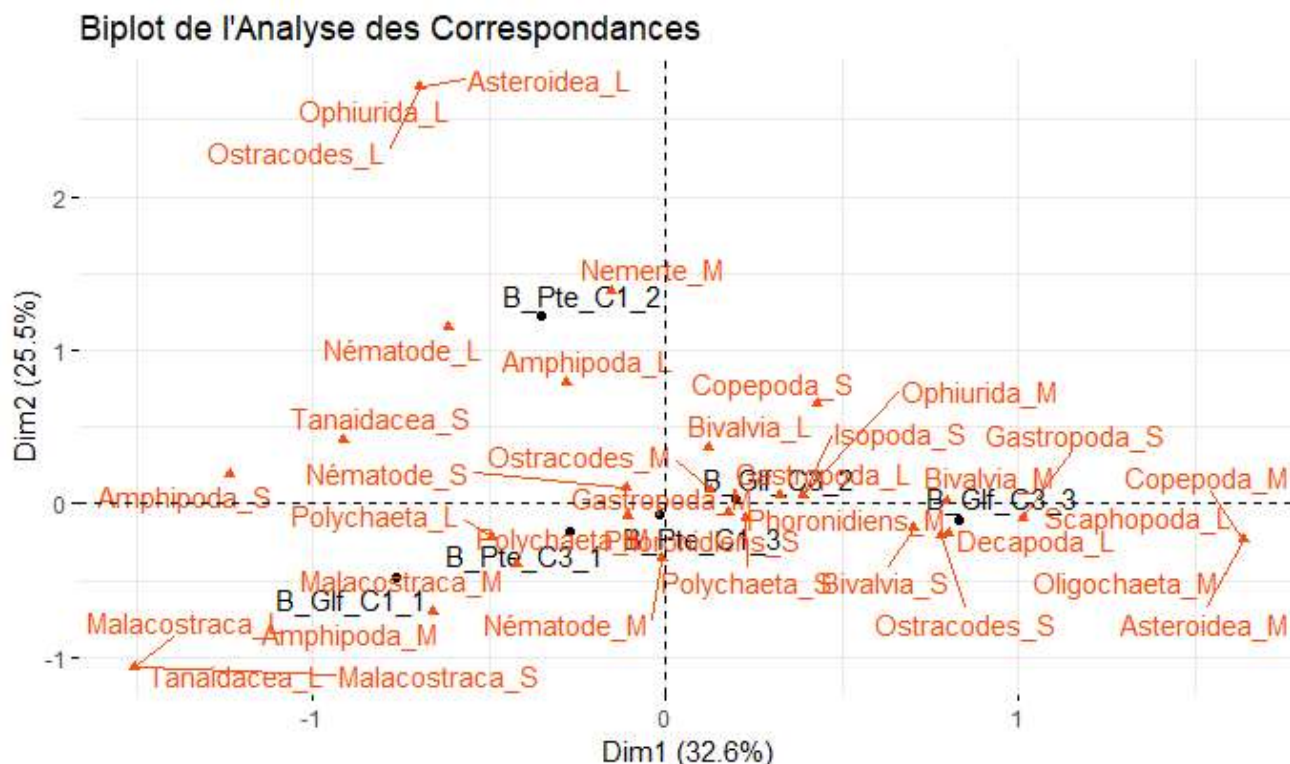


Figure 25 : Benthos dans les sédiments de Beauduc - Analyse des correspondances (AC) - Projection des variables (catégories benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions.

- Signification des Dimensions de l'AC (Figure 25)

Les deux premières Dimensions de l'Analyse des Correspondances (AC) expliquent respectivement **32,6 %** et **25,5 %** de la variance des données.

Les catégories de benthos qui contribuent le plus aux Dimensions factorielles sont les Ostracodes L, les Ophiurides L, les Nématodes S et L, ainsi que différentes tailles d'Amphipodes et de Malacostracés. Ces groupes semblent jouer un rôle structurant dans l'organisation des stations sur le plan factoriel.

La distribution des stations sur ce plan est fortement influencée par la répartition des Amphipodes, qui sont présents en abondance sur certaines stations spécifiques, notamment B_Glf_C1_1 et B_Pte_C1_2. À l'inverse, d'autres catégories, comme les Ostracodes et les Copépodes, apparaissent plus dispersées et moins discriminantes dans l'analyse.

Les Polychètes, bien que largement représentés dans l'ensemble des prélèvements, ont un impact plus modéré sur la structuration des stations. De même, les Nématodes, malgré leurs effectifs élevés, contribuent relativement peu aux axes factoriels.

- Macrofaune, méiofaune et présence d'hippocampes

Pour approfondir l'analyse du lien potentiel entre la structure des communautés benthiques et la présence d'hippocampes, cette étude met en évidence les principales associations entre les stations et les groupes taxonomiques. Cependant, compte tenu des effectifs recueillis tant pour les hippocampes que pour le benthos, aucune relation claire ne peut être établie entre la macro-méiofaune et la présence des hippocampes.

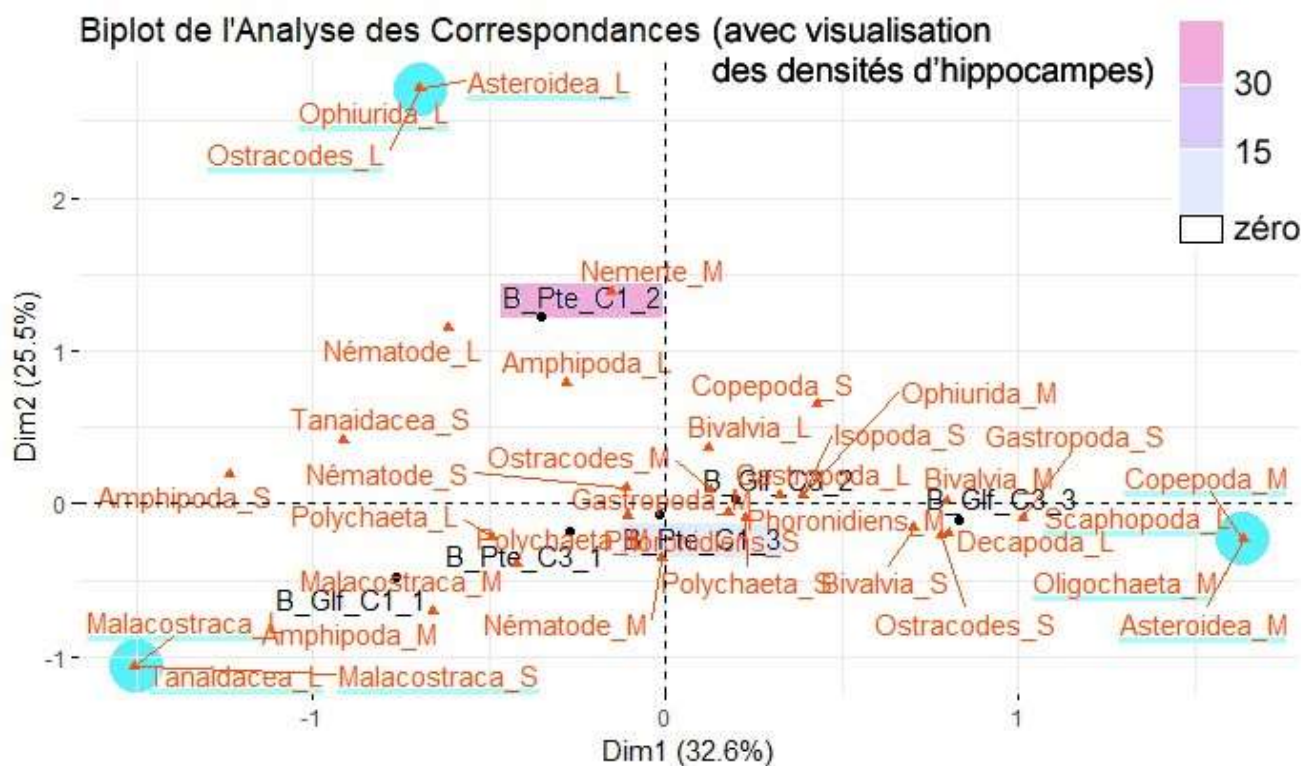


Figure 26 : Benthos dans les sédiments de Beauduc – Analyse des correspondances (AC) – Projection des variables (catégories de benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions, avec indication des densités d'hippocampes associées

Parmi les six prélèvements effectués, quatre proviennent de secteurs où aucun hippocampe n'a été observé. La station B_Pte_C1_2 est la seule où la densité moyenne d'hippocampes était relativement élevée (30,86 ind./ha). Ce prélèvement contient les trois catégories Asteroidea_L, Ophiurida_L et Ostracodes_L, qui influencent fortement la définition de l'axe 1, bien que chacune ne soit représentée que par un seul individu.

Cependant, cette station contribue peu à la dimension 2 de l'analyse, ne présentant pas de caractéristiques benthiques particulières. Elle affiche notamment la plus faible abondance de Polychètes, dont les trois catégories ont un impact limité sur la variabilité entre stations. Bien que plusieurs Crustacés considérés comme proies potentielles des hippocampes y soient présents — Amphipoda (3 individus), Copepoda (3 individus), Ostracodes (3 individus) et Tanaïdacs (3 individus) —, leurs abondances ici restent comparables à leurs abondances sur les autres stations.

La seconde station où des hippocampes ont été observés, B_Pte_C1_3 (densité moyenne : 2,84 ind./ha), se situe à proximité du barycentre sur le biplot (Figure 26). Cette position suggère que la structure de la faune benthique y est représentative de la moyenne des autres stations, avec des effectifs généralement faibles, voire nuls, pour les différentes catégories de Crustacés.

• Interprétation et conclusions de l'Analyse de Correspondances

Globalement, aucune différence majeure et constante n'est observée entre les macro-méiofaunes benthiques de Beauduc et de l'Espiguette, à l'exception d'une présence plus marquée d'ophiures dans la moitié des prélèvements réalisés à l'Espiguette.

Le nombre limité d'échantillons disponibles pour la macro-méiofaune benthique de Beauduc (six prélèvements) complique l'interprétation des résultats. De plus, la variabilité des données est principalement influencée par des catégories animales à très faible occurrence, présentes dans un seul prélèvement, notamment : (Tableau 8)

- B_Pte_C1_2 : Asteroidea_L, Ophiurida_L et Ostracodes_L
- B_Glf_C1_1 : Malacostraca_L, Malacostraca_S et Tanaïdacea_L
- B_Glf_C3_3 : Asteroidea_M, Copepoda_M, Oligochaeta_M et Scaphopoda_L

Sur le biplot de l'analyse des correspondances (Figure 26) ces catégories se regroupent logiquement au sein de chaque station correspondante, formant trois points distincts (marqués en bleu sur le graphique).

4.5 Caractérisation des sédiments et de la faune benthique dans la zone « intérieur banc » de l'Espiguette

Historiquement, la population d'hippocampes de la pointe sableuse de l'Espiguette a été caractérisée dans la zone intérieure de ce banc de sable. La présente étude vise également à comprendre les changements survenus dans cette zone après l'envasement et leur impact que cela a eu sur les hippocampes.

En 2022, sept prélèvements de sédiments ont été effectués dans la zone « intérieur banc » de l'Espiguette. Parmi les cinq prélèvements pour lesquels l'information a été recueillie, le sédiment a été qualifié de « vaseux » par les observateurs sous-marins. Trois de ces prélèvements ont également fait l'objet d'analyses portant sur la macro-méiofaune benthique.

Tableau 9 : Récapitulatif des données et analyses effectuées dans la zone « intérieur banc »

N° de prélèvement	Date	Nature du substrat (estimation en plongée)	Analyse macro-méiofaune	Hippocampes (densité associée à la station)
R_int_C1_3	05/04/2022	Vase	OUI	80,65 ind/ha
R_int_C2_3	03/05/2022	Non noté.	Non	44,2 ind/ha
R_int_C4_1	05/07/2022	Vase	Non	0
R_int_C5_1	04/08/2022	Vase (épaisseur 22 cm)	Non	0
R_int_C6_3	21/09/2022	Vase	Non	0
R_int_C7_3	06/10/2022	Non noté.	OUI	0
R_int_C8_1	01/12/2022	Vase	OUI	64,3 ind/ha

4.5.1 Analyse physico-chimique des prélèvements de sédiments

Les 7 prélèvements réalisés s'échelonnent entre la fin de l'hiver 2021-2022 (avril) et le début de l'hiver suivant (décembre).

L'étude sera séparée en 4 groupes d'analyses :

- La granulométrie ;
- La charge de matière organique morte ;
- Les composants azotés ;
- Le phosphore dans le sédiment.

4.5.1.1 La granulométrie

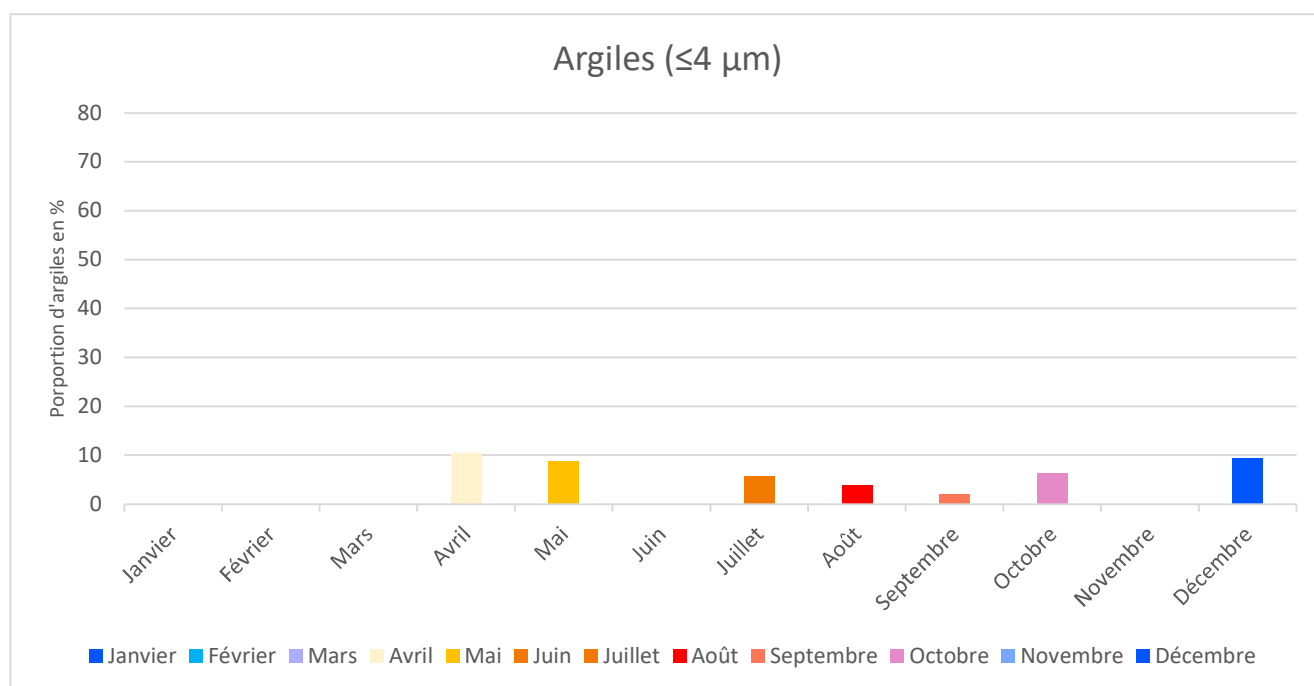


Figure 27 : Proportion d'argiles (particules $\leq 4 \mu\text{m}$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

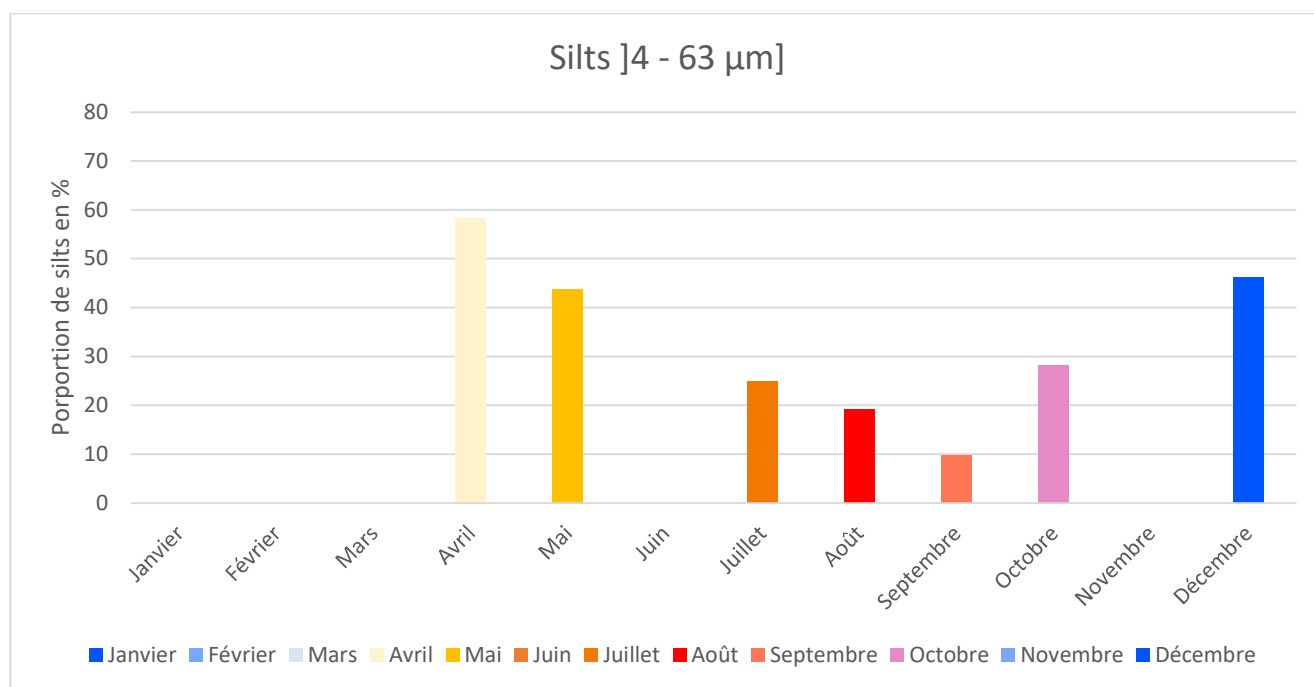


Figure 28 : Proportion de silts (particules $]4 - 63 \mu\text{m}]$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

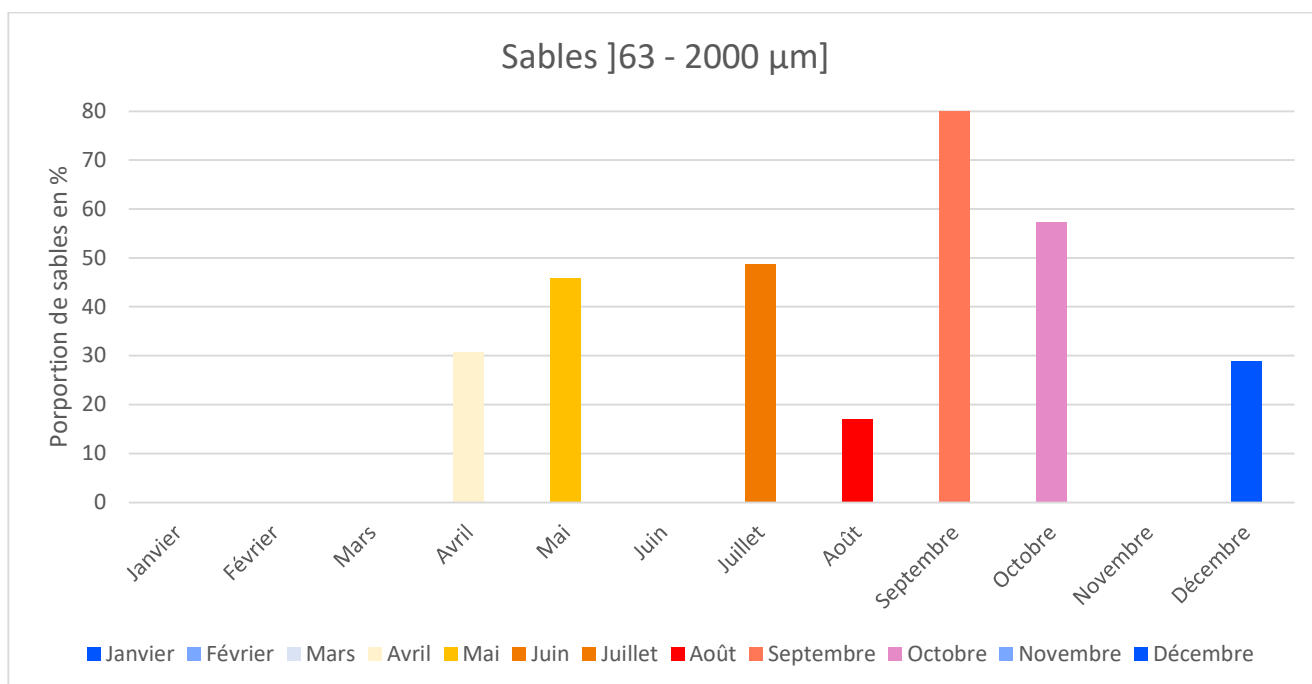


Figure 29 : Proportion de sables (particules [63 - 2000 µm]) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

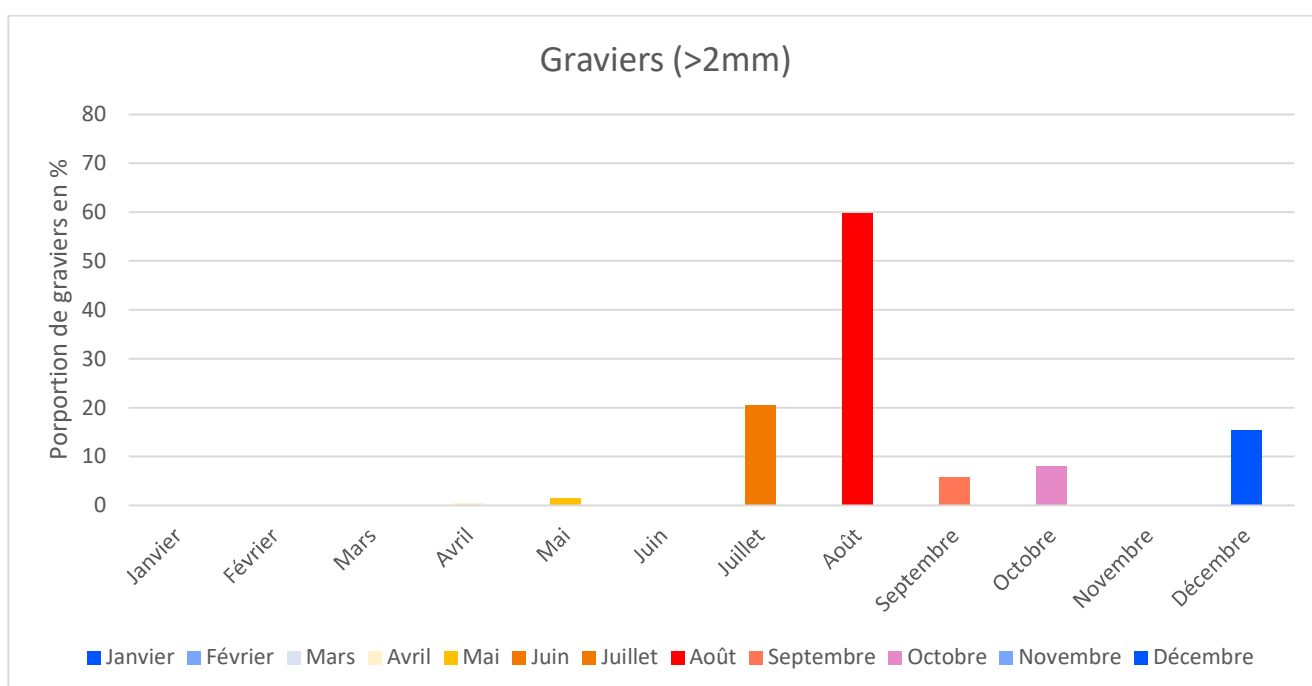


Figure 30 : Proportion de graviers (particules >2mm) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

En termes de granulométrie, les fractions sédimentaires les plus fines, constituées d'argiles et de silts (principaux composants des vases), représentent ensemble plus de 60 % du poids de sédiment sec en avril. Leur proportion diminue progressivement au cours des mois suivants pour atteindre moins de 12 % en septembre.

Comme attendu, la dynamique des sables suit une tendance inverse, bien que de manière plus irrégulière. La fraction « gravier », composée principalement de coquilles et de fragments de coquilles de Mollusques, demeure généralement faible, à l'exception d'un pic observé en août, pouvant traduire un épisode de mortalité accrue des Mollusques.

4.5.1.2 La charge de matière organique morte

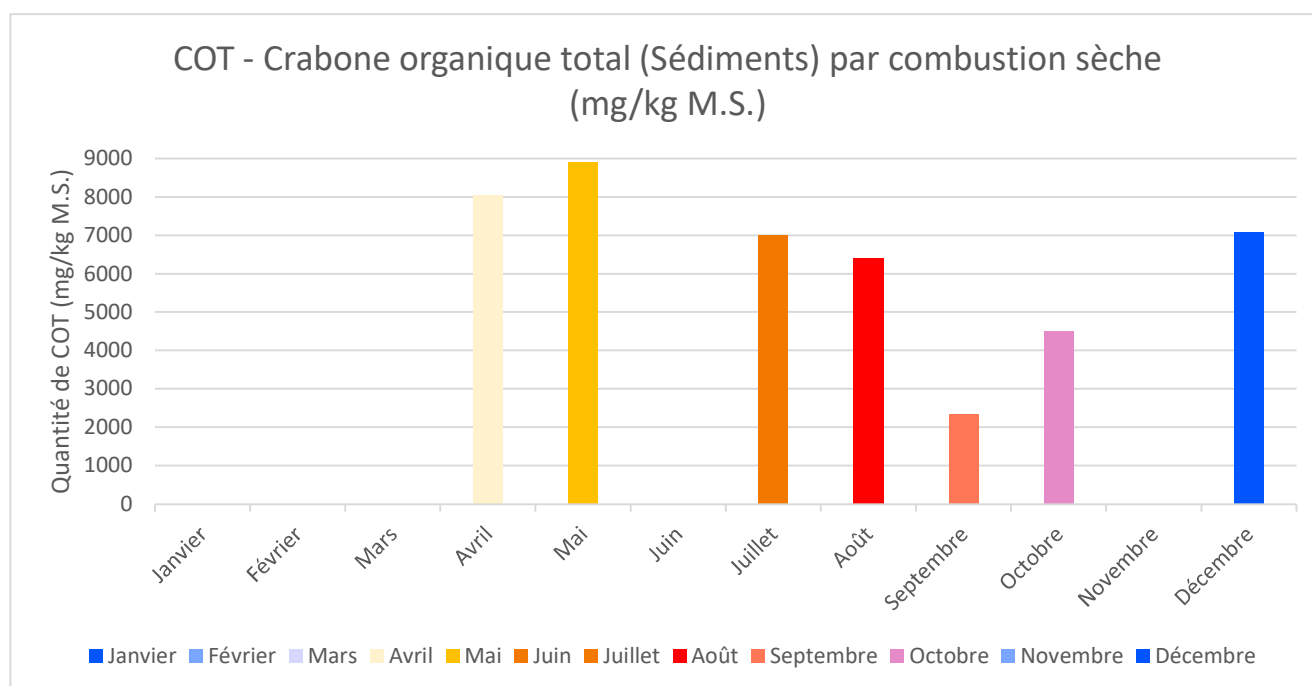


Figure 31 : Quantité de carbone organique total (COT) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

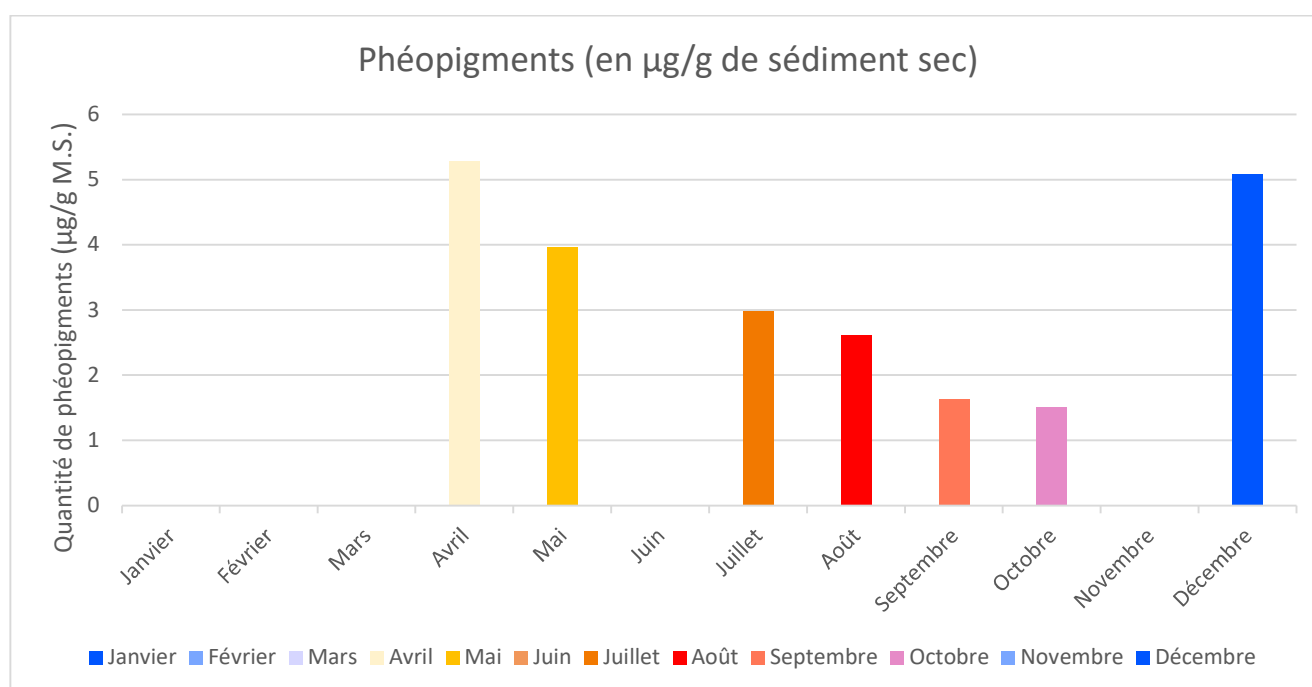


Figure 32 : Quantité de phéopigments du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

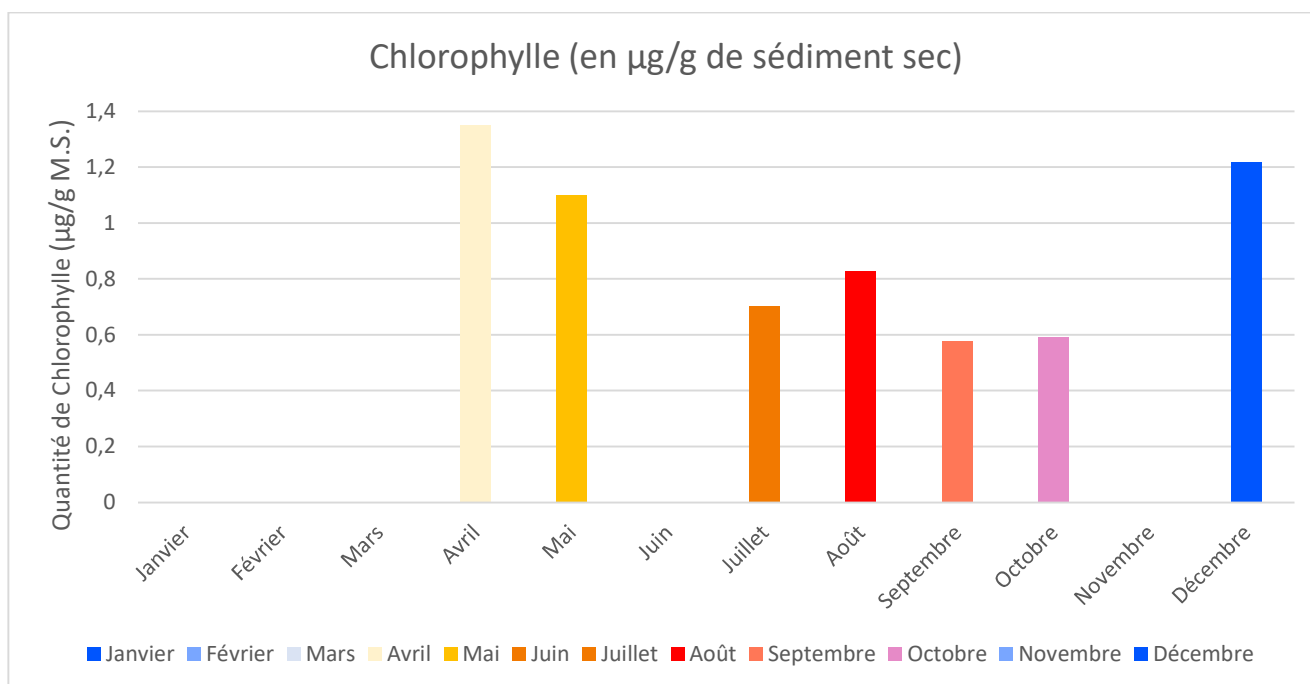


Figure 33 : Quantité de chlorophylle du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

La charge en matière organique morte (Carbone organique total + Phéopigments), généralement plus élevée dans les sédiments vaseux, suit une évolution similaire à celle des particules fines au fil des mois, atteignant un minimum en septembre ou octobre.

De même, la concentration en chlorophylle, indicatrice de la biomasse des microalgues vivantes présentes dans la vase, tend à diminuer légèrement durant l'été et l'automne.

4.5.1.3 Composants azotés du sédiment

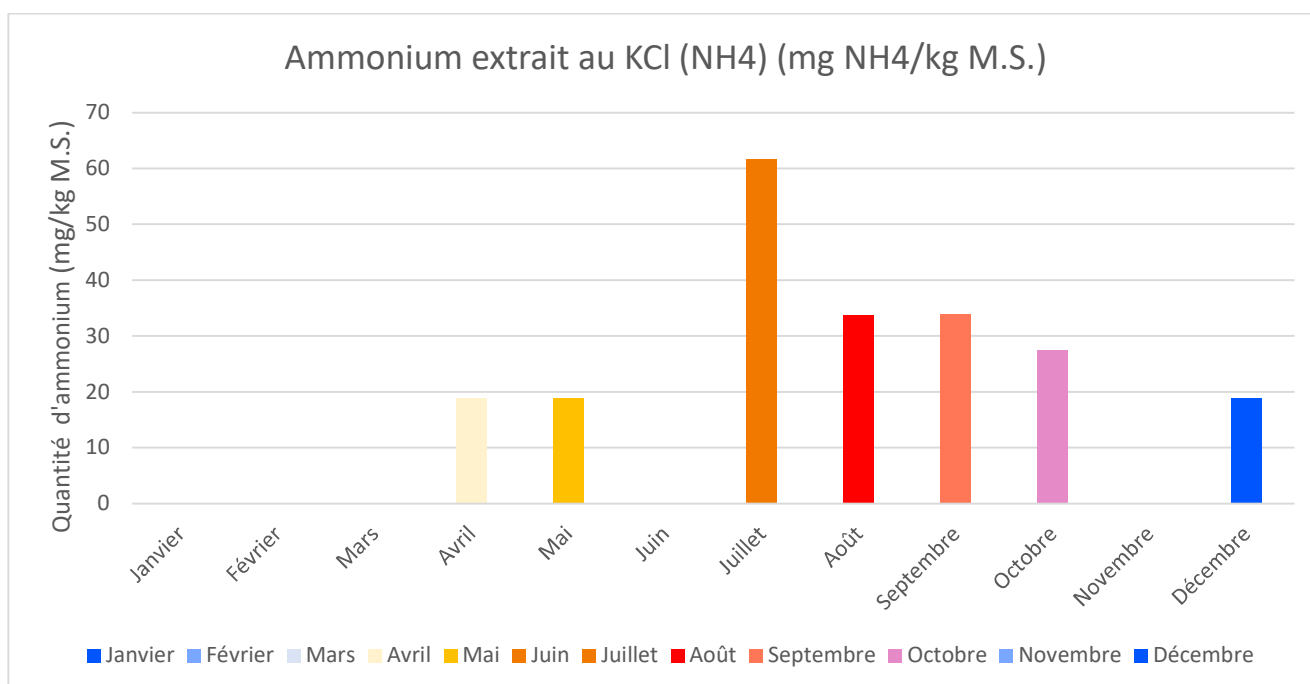


Figure 34 : Quantité d'ammonium extrait au KCl (NH_4) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

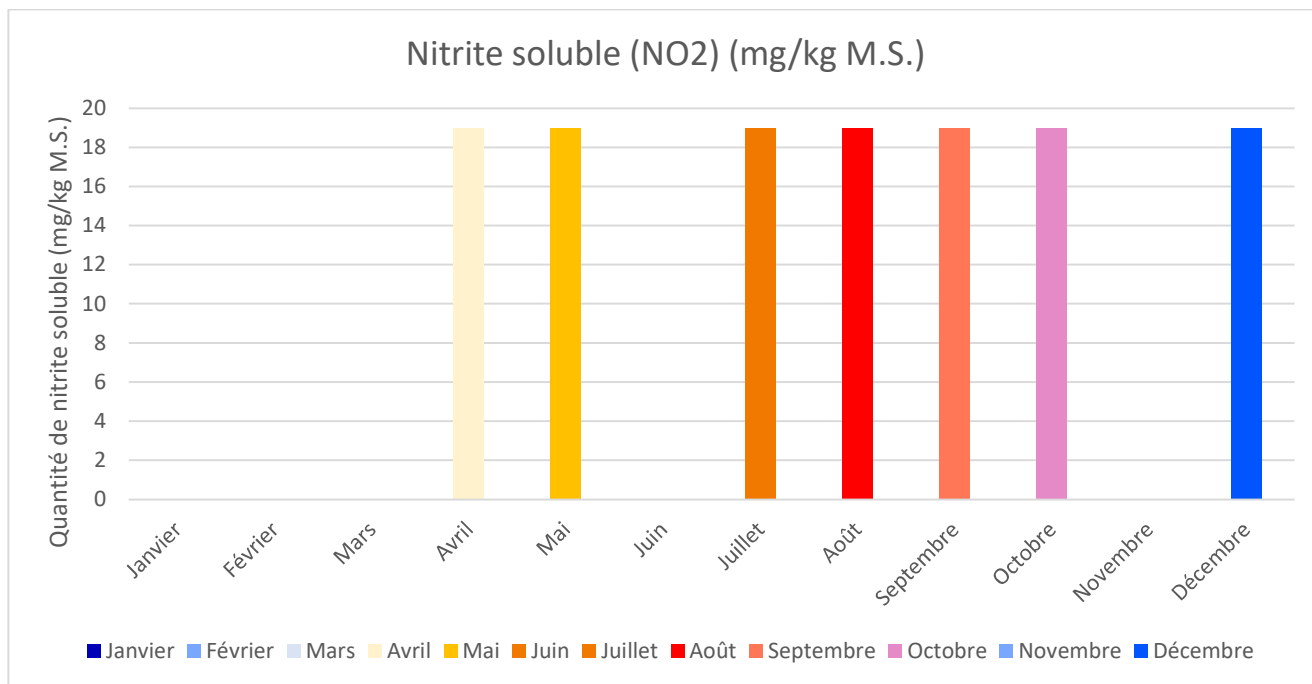


Figure 35 : Quantité de nitrite soluble (NO₂) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

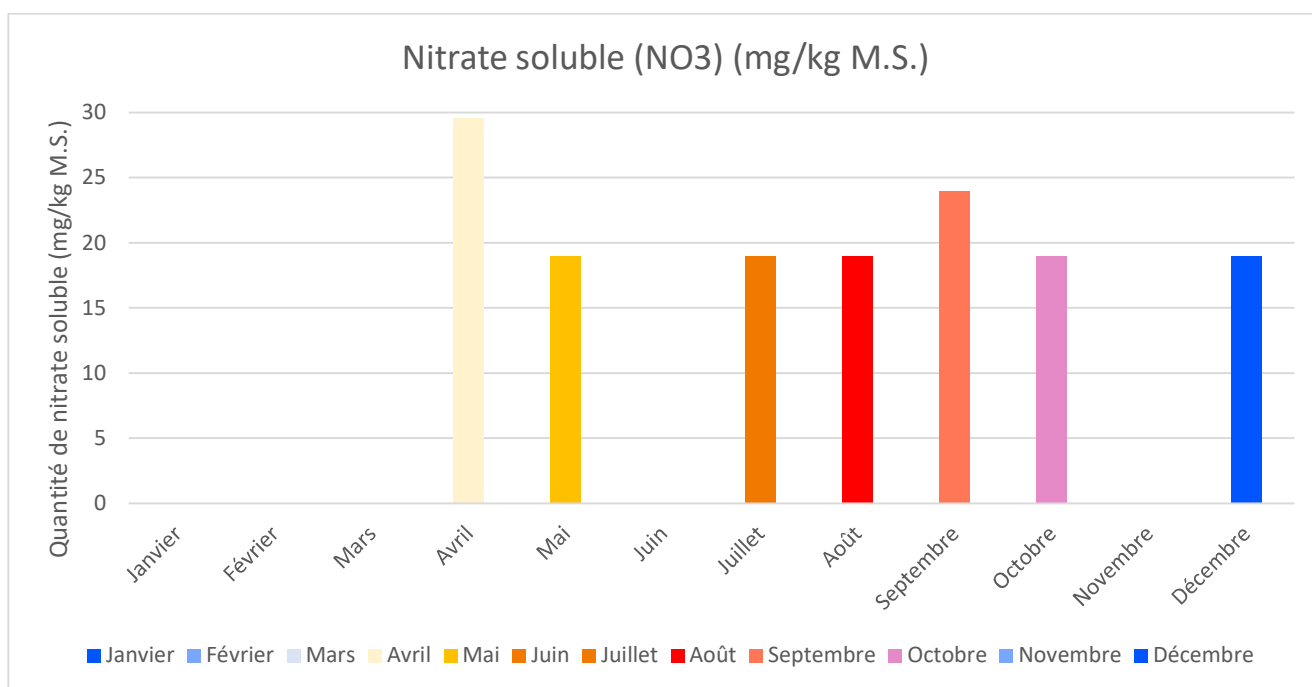


Figure 36 : Quantité de nitrate soluble (NO₃) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

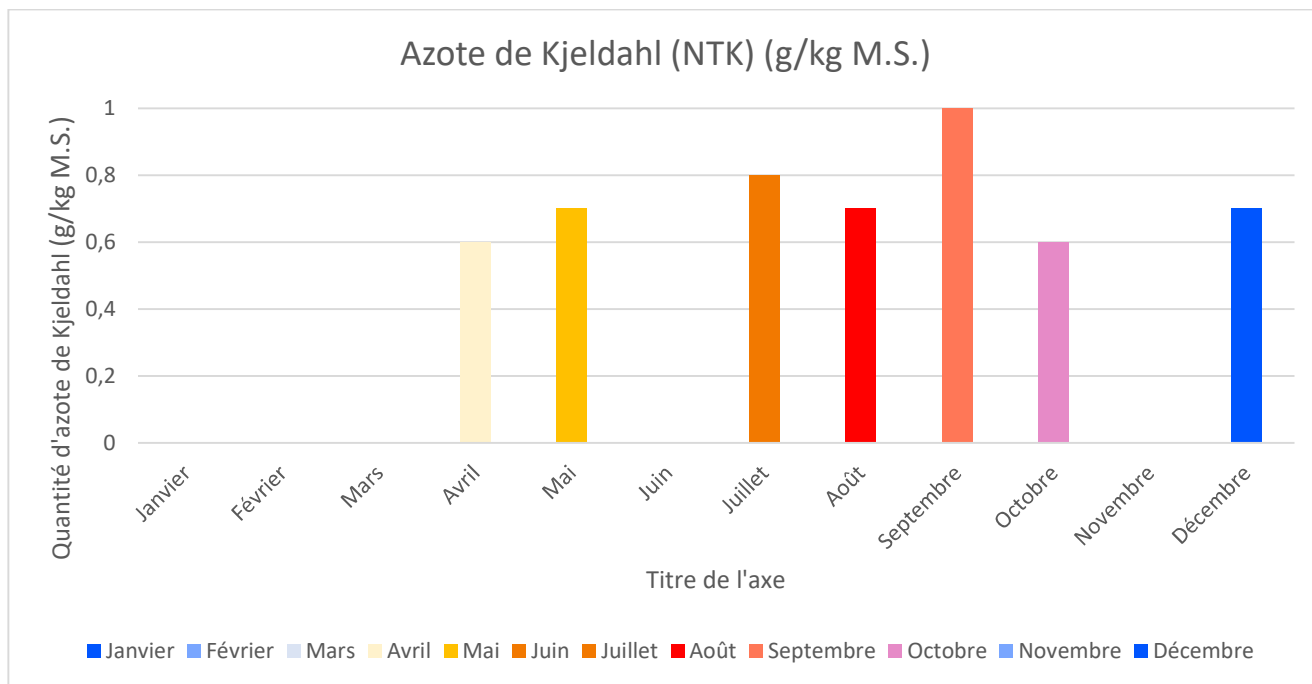


Figure 37 : Quantité d'azote de Kjeldahl (NTK) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

L'analyse des formes azotées dans les sédiments révèle des dynamiques saisonnières contrastées entre l'ammonium (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-), l'azote Kjeldahl et les nitrates (NO_3^-). L'ammonium extrait au KCl présente une forte augmentation en juillet, atteignant un pic maximal, avant de décroître progressivement jusqu'en décembre. Cette évolution pourrait être liée à une intensification de la minéralisation de la matière organique durant la période estivale, favorisant la libération d'ammonium.

En parallèle, la concentration en nitrites reste relativement stable tout au long de l'année, suggérant un équilibre dans les processus de nitrification et de dénitrification.

Les nitrates, quant à eux, affichent une concentration maximale en avril, suivie d'une diminution en mai avant d'atteindre des niveaux plus homogènes de juillet à décembre. Cette variation pourrait être associée à des fluctuations de l'activité microbienne et aux dynamiques hydrologiques influençant le brassage et l'accumulation des nitrates dans le sédiment.

La corrélation entre l'augmentation de l'ammonium et la baisse de la chlorophylle en été suggère une diminution de la production primaire benthique, ce qui peut impacter la chaîne trophique et influencer la distribution des hippocampes.

Cependant ces variations ne semblent pas déterminantes, sur un potentiel impact de la présence d'hippocampes à museau court.

4.5.1.4 Présence de phosphore dans le sédiment

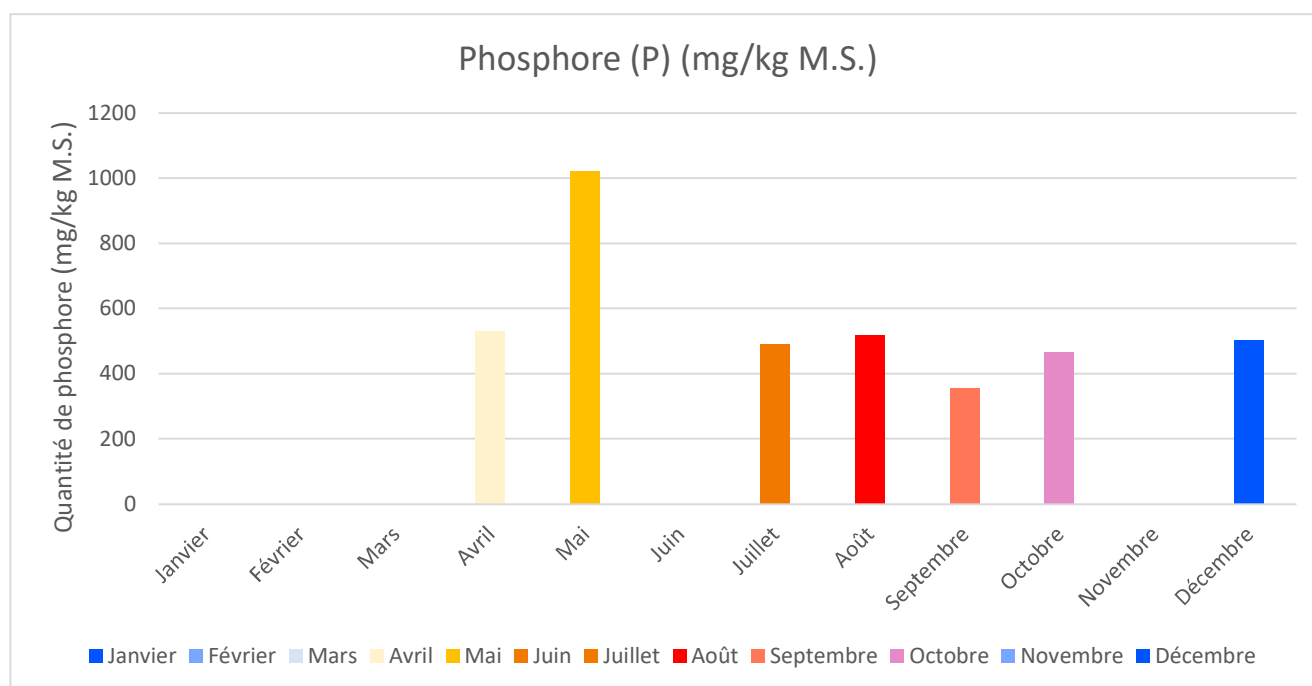


Figure 38 : Quantité de phosphore (P) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

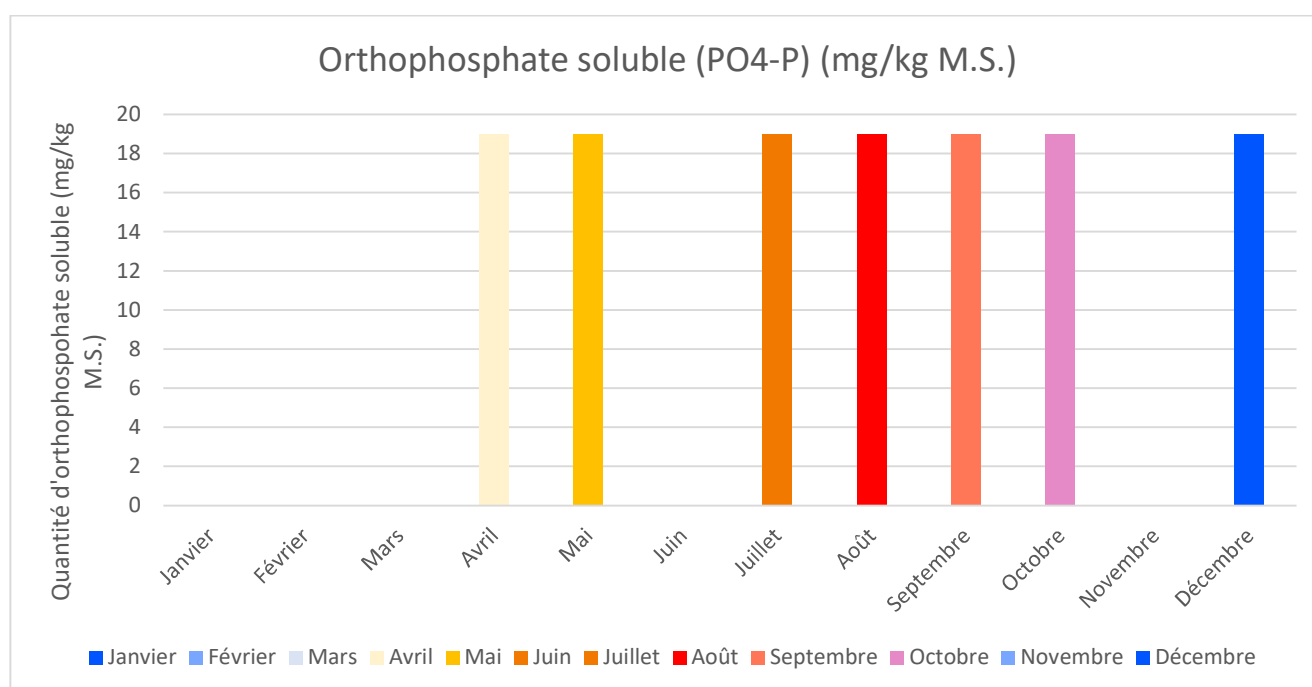


Figure 39 : Quantité d'orthophosphate soluble (PO4-P) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

Les variations des concentrations en phosphore et en orthophosphate observées au fil des mois suggèrent une dynamique sédimentologique influencée par des facteurs saisonniers. En effet, le phosphore total présente un pic marqué en mai, suivi de niveaux relativement élevés en juillet et août, avant une diminution progressive jusqu'en octobre. Cette fluctuation pourrait être liée à des apports externes, tels que le ruissellement agricole, les précipitations printanières ou encore des activités anthropiques impactant l'environnement sédimentaire. En revanche, les résultats de l'orthophosphate restent constants à une valeur de <20 (seuil de détection), ce qui indique que les concentrations sont en réalité très faibles. Cela suggère que l'orthophosphate n'est pas un facteur déterminant dans la dynamique des nutriments sédimentaires de la zone étudiée.

Ces variations peuvent avoir des incidences sur la présence d'hippocampes, notamment en influençant la qualité des habitats benthiques. Une forte concentration en phosphore, si elle entraîne un phénomène d'eutrophisation, peut favoriser la

prolifération d'algues, altérer la structure des herbiers et réduire l'oxygénation des eaux, ce qui aurait un impact négatif sur les hippocampes en dégradant leur habitat et en modifiant la disponibilité des proies. Toutefois, si ces apports restent modérés, ils peuvent au contraire stimuler la productivité primaire, favorisant la présence de zooplancton et de petits crustacés, qui constituent l'alimentation principale des hippocampes.

4.5.2 Relation entre physico-chimie des sédiments et macro-méiofaune benthique

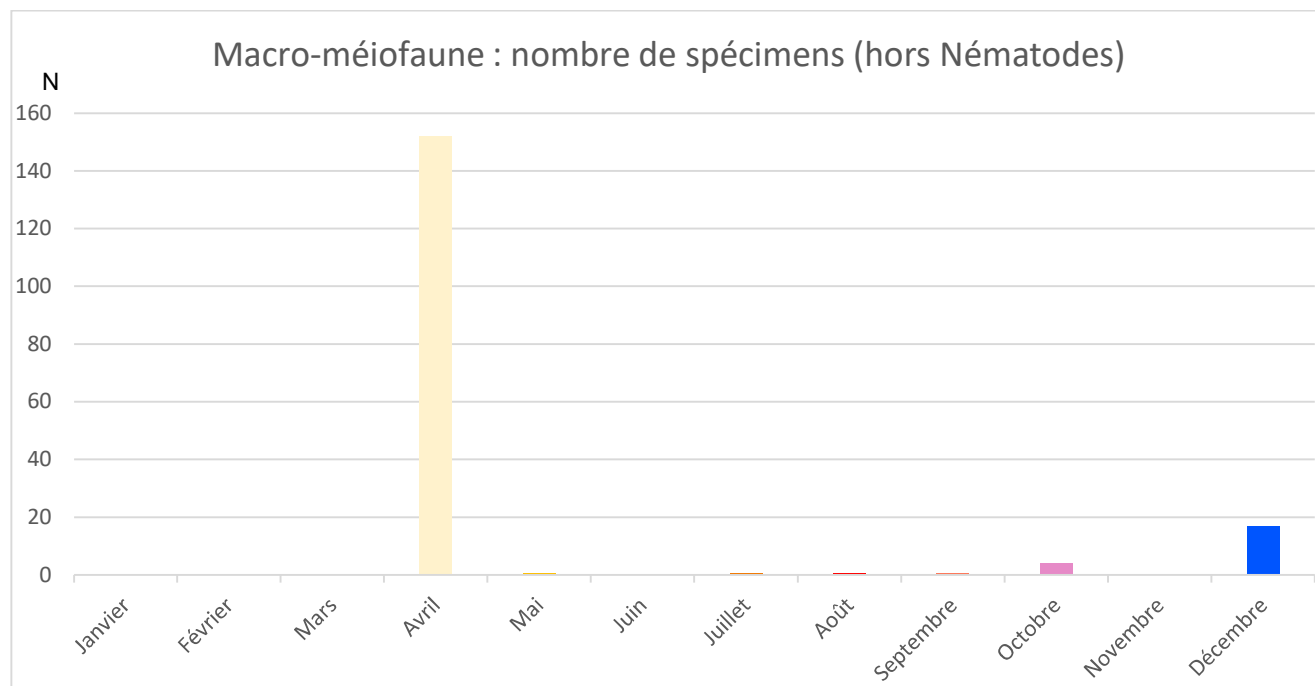


Figure 40 : Nombre de spécimens de la macro-méiofaune sur le site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

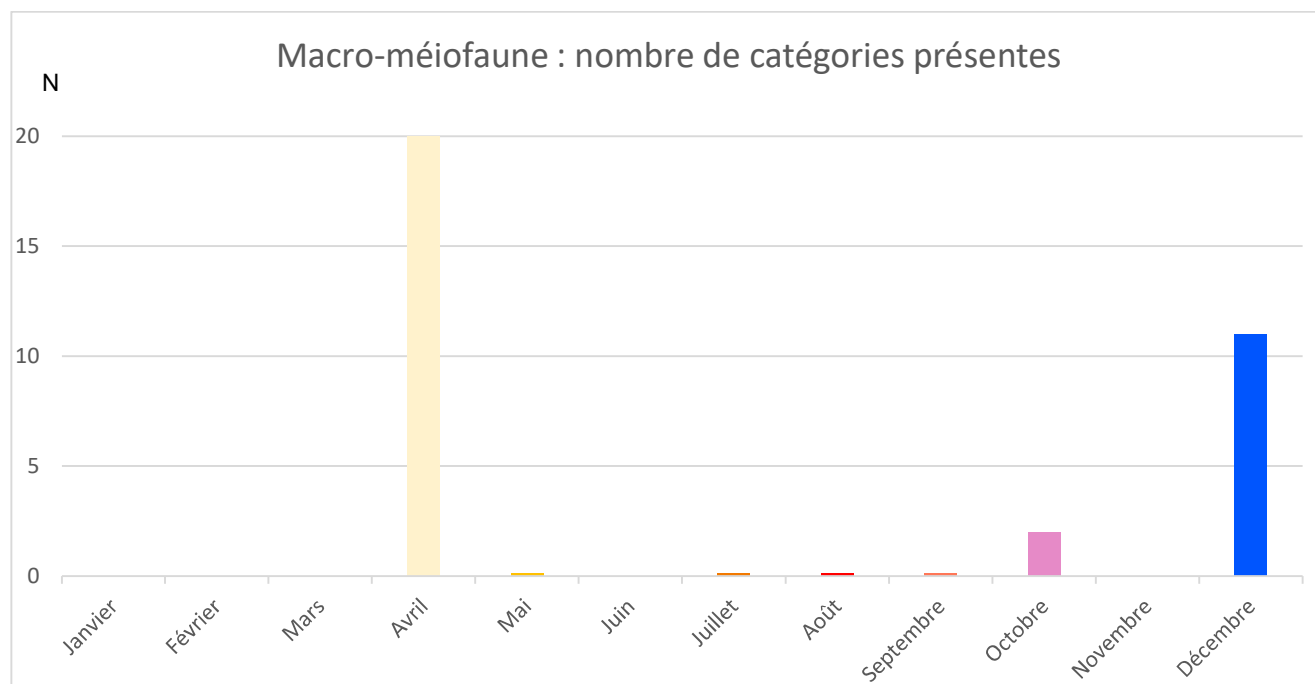


Figure 41 : Nombre de catégories de la macro-méiofaune sur le site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

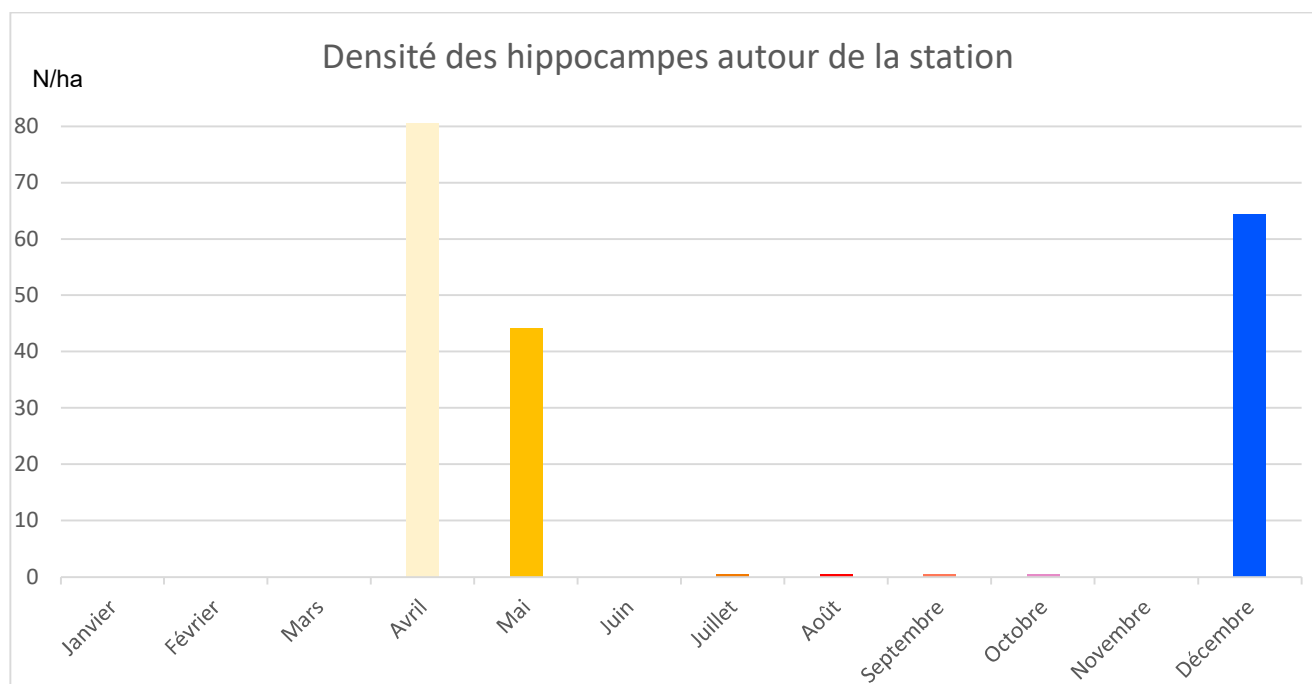


Figure 42 : Densité d'hippocampes à museau court autour des stations de prélèvement sur le site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».

Le prélèvement E_int_C1_3 (avril 2022) se distingue par une richesse importante en macro-méiofaune benthique (Tableau 7). Il représente l'échantillon le plus abondant en spécimens hors Nématodes parmi l'ensemble des stations de l'Espiguette et présente la plus grande diversité taxonomique, avec 20 catégories distinctes. Cette station affiche également les effectifs les plus élevés d'amphipodes et de Tanaïdés, suggérant des conditions environnementales particulièrement favorables à ces taxons.

À l'opposé, le prélèvement E_int_C8_1 (décembre 2022) révèle une biodiversité nettement plus faible, avec seulement 17 spécimens hors Nématodes et 11 catégories animales recensées. De même, la station E_int_C7_3 (octobre 2022) présente une quasi-absence de macro-méiofaune, avec uniquement 1 Polychète et 3 Nématodes détectés dans l'échantillon.

Ces résultats suggèrent un maximum d'abondance de la macro-méiofaune benthique en fin d'hiver 2022, en corrélation avec une prédominance de particules fines (argiles et silts) et une concentration élevée en matière organique morte (COT et phéopigments).

D'après les paramètres mesurés, E_int_C1_3 correspondrait ainsi à l'un des sédiments les plus vaseux de la zone intérieure du banc, et le second plus vaseux parmi toutes les stations échantillonnées à l'Espiguette. Ces observations soulignent l'importance des caractéristiques sédimentaires dans la structuration des communautés benthiques et la disponibilité des habitats favorables à la l'endofaune.

4.5.3 Distribution saisonnière des hippocampes et relation avec les caractéristiques sédimentaires

Des hippocampes ont été recensés dans la zone « intérieur banc » en avril et mai (fin d'hiver – début de printemps), ainsi qu'en décembre (début d'hiver) (voir Carte 5). En revanche, aucune observation n'a été réalisée en juillet, août, septembre et octobre, confirmant la dynamique saisonnière déjà constatée lors de précédentes études sur le site.

L'analyse spatiale des observations révèle que, lors de l'échantillonnage d'avril, les hippocampes étaient localisés à moins de 100 m du site de prélèvement, situé au creux du banc de sable. En mai et décembre, les individus ont été détectés plus loin, à des distances comprises entre 200 et 500 m de cette zone.

La plus forte densité d'hippocampes a été enregistrée en avril, période caractérisée par une proportion maximale de particules fines dans le sédiment et une concentration élevée en matières organiques mortes (COT et phéopigments). Cette période coïncide également avec le pic d'abondance et de diversité de la macro-méiofaune benthique, suggérant une forte interaction entre la disponibilité des ressources trophiques, la structure sédimentaire et la présence des hippocampes dans la zone étudiée.

4.5.4 Paradoxes dans la relation entre hippocampes et caractéristiques sédimentaires

Les estimations de densité moyenne d'hippocampes dans la zone « intérieur banc » sont conformes aux connaissances existantes : les individus sont présents en hiver et au début du printemps, mais absents des recensements en été et au début de l'automne.

L'analyse des caractéristiques sédimentaires révèle une corrélation positive entre l'abondance des hippocampes, celle de la macro-méiofaune benthique et la charge en sédiments fins et matières organiques mortes (COT, phéopigments). Ces éléments, indicateurs d'un envasement prononcé, sont généralement associés à une forte productivité benthique. À l'inverse, lorsque les sédiments sont plus pauvres en particules fines et en matières organiques, les hippocampes sont absents des recensements. Ces résultats vont à l'encontre de l'hypothèse initiale selon laquelle les hippocampes éviteraient les milieux trop vaseux.

Un autre paradoxe réside dans l'écart entre les analyses physico-chimiques des sédiments et les observations in situ des plongeurs. Ces derniers ont systématiquement décrit le substrat comme « vaseux », en particulier en juillet, août et septembre, alors même que ces périodes correspondent aux niveaux les plus faibles de particules fines dans le sédiment. Ce décalage est particulièrement marqué pour le prélèvement d'août, où une épaisseur de vase de 22 cm a été mesurée par observation directe.

Ces contradictions soulèvent des interrogations quant à la pertinence des paramètres physico-chimiques retenus pour caractériser l'envasement. Il est possible que certains composants, tels que les colloïdes, échappent aux analyses standards mais influencent fortement la perception de la texture vaseuse par les observateurs en plongée.

5 Conclusion

5.1 Synthèse des principaux résultats

5.1.1 Résumé des observations et conclusions principales

L'objectif de cette partie du travail était de documenter, sur un cycle annuel, l'abondance et la répartition des hippocampes autour de la flèche de l'Espiguette dans un contexte de transformation des équilibres du lieu et, de façon plus exploratoire, dans le golfe de Beauduc pour y combler un gros déficit de connaissance.

Au total, 96 transects de recensement d'hippocampes ont été réalisés durant ce projet, ce qui représente plus de 19 km parcourus en plongée pour une surface explorée de quelque 7,5 hectares. Cet effort d'observation s'est réparti de façon équilibrée entre le golfe de Beauduc et la flèche de l'Espiguette.

La première conclusion est qu'il y a bien des hippocampes sur les deux sites, leur présence étant avérée toute l'année à l'Espiguette et au moins du printemps à l'automne à Beauduc (où il n'a pas été possible de réaliser des plongées en plein hiver).

Sur les transects réalisés, une proportion non négligeable n'a pas permis d'observer d'hippocampes : 20 à 64 % selon la saison à l'Espiguette, 53 à 83 % à Beauduc. Dans ces conditions, les moyennes ou médianes de densité obtenues (incluant les transects à effectif nul) représentent des situations diversifiées qui combinent souvent secteurs sans hippocampes et secteurs plus ou moins fréquentés (jusqu'à 10 hippocampes dans un même transect).

Si l'on calcule les densités moyennes par saison, la valeur la plus élevée dépasse 50 individus par hectare (période d'été à l'Espiguette, du côté extérieur du banc de sable). A Beauduc, la densité moyenne la plus élevée dépasse tout juste 20 hippocampes par hectare (au printemps, dans la zone de la pointe).

Les tests statistiques faits sur les données de l'Espiguette montrent une augmentation significative des effectifs en été, et attestent une présence significative, à l'échelle de l'année, dans la zone extérieure banc nord

- Quelles différences ou similitudes entre l'Espiguette et Beauduc ?

Globalement, les densités d'observations d'hippocampes à Beauduc sont environ deux fois plus faibles qu'à l'Espiguette. Ces effectifs relativement réduits ne permettent pas d'envisager une comparaison statistique entre les deux sites.

La forte hétérogénéité des densités d'hippocampes, dans l'espace comme dans le temps, est une constante partagée par les deux endroits, qui complique également l'exploitation statistique des données.

On peut cependant constater, dans les deux sites, une présence d'hippocampes plus importante et plus constante au cours de l'année dans les secteurs exposés : extérieur banc à l'Espiguette, pointe sableuse à Beauduc.

- Y a-t-il des secteurs à hippocampes ?

Dans les conditions des bancs sableux littoraux « actifs » (en accrétion), quand un secteur est « à hippocampes », cela ne vaut que jusqu'à ce que les conditions environnementales changent...

Les données du projet en donnent un exemple concret en 2022 à l'Espiguette, dans la zone intérieure abritée : on y a en effet observé des densités d'hippocampes plus élevées qu'ailleurs durant l'hiver et jusqu'au milieu du printemps. Puis l'envasement des fonds a rendu l'eau très turbide, interdisant tout transect visuel et entraînant sans doute le déplacement des hippocampes qui étaient dans la zone.

Un secteur à hippocampes, ce n'est qu'un point dans l'espace-temps.

5.1.2 Résumé des conclusions sur la physico-chimie des sédiments

Aux profondeurs explorées et échantillonnées (4 à 10 m principalement), les plongeurs ont observé (et prélevé) des types de sédiments différents : fonds de sable bien calibré et très « propre », milieux sablo-vaseux avec une fraction fine (vaseuse) plus présente, et différents niveaux d'envasement, allant d'une fine couche superficielle jusqu'à plus de 20 cm d'épaisseur de vase molle. Certaines zones envasées provenaient très probablement du dépôt de limons ou vases terrigènes issus des crues du Vidourle (à l'Espiguette), d'autres semblaient être constituées de vase biogénique formée sur place. Le sédiment était parfaitement nu dans certains secteurs, tandis que d'autres endroits étaient le siège d'une sédimentation de débris de plantes, bois, branches ou déchets humains.

36 prélèvements de sédiments ont été réalisés au total : 24 autour du banc de sable de l'Espiguette et 12 à Beauduc.

L'analyse multivariée des données sur leur physico-chimie a mis en évidence un gradient structurant « sable - vase » très significatif dans chacun des sites, et par ailleurs homogène entre sites. Les deux extrêmes de ce gradient peuvent être décrits comme :

- D'un côté, les stations se caractérisent par une forte proportion de sable (granulométrie 0,063 à 2 mm), et souvent un pourcentage important de chlorophylle active (attestant la présence de végétaux photosynthétiques vivants).
- À l'autre extrémité du gradient, les stations sont plus vaseuses (forte proportion de particules fines à très fines, silts et argiles), plus riches en matière organique (carbone organique), en biomasse végétale photosynthétique (chlorophylle, phéopigments) et en nutriments (azote, phosphore).

On peut noter que les sédiments de Beauduc sont globalement plus pauvres que ceux de l'Espiguette en termes de charge organique, et qu'ils présentent des taux d'azote extrêmement faibles (en général inférieurs à la limite de quantification).

- Comment les types de sédiments sont-ils répartis ?

À l'Espiguette comme à Beauduc, il n'apparaît pas de structuration claire de la nature des sédiments en fonction des zones plus ou moins abritées. On décèle certes une tendance sous-jacente logique vers une fréquence plus importante des sédiments sableux dans les secteurs exposés à la mer et des sédiments vaseux en secteur abrité, mais elle est en partie masquée par une forte variabilité.

La répartition des types de sédiments échantillonnés, dans l'espace comme dans le temps, illustre l'une des caractéristiques majeures des milieux sablo-vaseux littoraux : ce sont des environnements essentiellement changeants. Sur les deux sites étudiés, exposés à des incidences diverses qui les affectent de manière variable et complexe (hydrodynamisme, apports de vases terrigènes par les crues, production de vase biogénique selon le confinement, dépôt de débris par les tempêtes...), il en résulte une mosaïque de types sédimentaires intrinsèquement variable dans le temps.

On mesure aujourd'hui à quel point l'installation « pérenne » d'une population d'hippocampes à museau court, telle qu'elle a pu être étudiée de 2012 à 2015 du côté intérieur du banc de sable de l'Espiguette, était en réalité liée à un équilibre transitoire, modifié depuis par la dynamique d'accrétion sédimentaire sur la zone.

- Peut-on lier la présence des hippocampes à la nature du sédiment ?

Pour cette question aussi, la caractéristique dominante des résultats est une forte variabilité spatio-temporelle.

Cependant, il apparaît à l'Espiguette comme à Beauduc que les stations se trouvant vers le milieu du gradient de variabilité sont plus souvent associées à une présence, voire une abondance d'hippocampes à proximité. Les sédiments sablo-vaseux, ni trop « propres », ni trop envasés, semblent être les plus favorables à l'installation des hippocampes.

Cette conclusion va dans le même sens que les observations de micro-habitat réalisées précédemment sur plusieurs centaines d'hippocampes autour de la flèche de l'Espiguette, où la majorité des individus avaient été rencontrés sur sable vaseux plutôt que sable seul ou vase (Louisy & Bérenger 2015).

5.1.3 Résumé des conclusions sur la méiofaune et la macrofaune

Sur les 24 prélèvements de sédiments réalisés autour du banc de sable de l'Espiguette pour analyse physico-chimique, 12 ont inclus un échantillonnage spécifique pour l'étude de la communauté benthique (macrofaune et méiofaune) de la couche supérieure du sédiment.

Une analyse qualitative sur la diversité et les effectifs des espèces et taxons identifiés a permis une évaluation globale de cette endofaune benthique. La macrofaune (taille > 0,8 mm dans cette étude) présente une bonne diversité et richesse spécifique. La méiofaune (< 0,8 mm) est particulièrement abondante dans les échantillons, notamment à cause de forts effectifs de Nématodes, qui « masquent » un peu la diversité globale. Cependant, la richesse taxonomique « hors Nématodes » est bonne. Quoique dans des proportions moindres, les vers polychètes sont également nombreux dans la plupart des échantillons.

Les données ont ensuite été agrégées par classes ou familles, avec prise en compte de la taille (L pour la macrofaune, M et S pour la méiofaune).

D'après l'analyse multivariée que nous avons pratiquée sur ces données agrégées, les groupes ayant le plus d'importance dans la structuration des données sont certains Crustacés (Amphipodes, et dans une moindre mesure Tanaïdés) et les vers Polychètes. Les Bivalves, les Ophiures ou les Nématodes sont aussi des composantes déterminantes de l'endofaune des sédiments de l'Espiguette.

Les stations de prélèvement mises en évidence par cette analyse sont celles qui présentent les faunes benthiques les plus originales (= abondance de certains organismes qui sont rares ou absents dans les autres stations).

- Quelle est la condition de la faune benthique des sédiments de l'Espiguette ?

La composition en espèces de la macrofaune et de la méiofaune dans les sédiments de l'Espiguette est globalement conforme à ce que l'on peut attendre dans les petits fonds sablo-vaseux du littoral méditerranéen.

Les effectifs élevés de Nématodes sont en général considérés comme « neutres » (même si ces animaux sont connus pour leur résistance à des conditions dégradées avec manque d'oxygène). Les nombres élevés de vers Polychètes indiquent en

général des sédiments chargés en matière organique, mais l'absence d'espèces indicatrices de déséquilibre permet de penser que cette matière organique n'est pas en excès.

- Peut-on lier la présence des hippocampes à la faune benthique du sédiment ?

Si la variabilité spatio-temporelle reste une caractéristique dominante des résultats, l'étude de la relation entre la faune benthique des stations de prélèvement et les abondances d'hippocampes qui leur sont associées fait ressortir quelques cas intéressants, évoquant une attraction des hippocampes vers des secteurs où des proies potentielles sont présentes dans le sédiment :

- Les Amphipodes comptent parmi les proies connues des hippocampes à museau court. Ces Crustacés ne sont présents que dans 6 stations de prélèvement (sur 12). Or, 5 de ces 6 stations sont associées à une présence proche d'hippocampes. De plus, la seule station avec un gros effectif d'Amphipodes est associée à une des densités d'hippocampes les plus élevées (~80/ha).
- Autres Crustacés, les Ostracodes sont considérés comme des proies occasionnelles pour les hippocampes. Le seul échantillon contenant un grand nombre d'Ostracodes provient de la station associée à la plus forte densité d'hippocampes (~120/ha).

Au vu de ces résultats, il ne paraît pas incohérent d'hypothétiser que les hippocampes soient attirés par la présence de leurs proies, ou pour le moins par des conditions d'environnement favorables au développement de ces proies.

Il convient cependant de rappeler que les proies principales des hippocampes à museau court sont des petits Crustacés nageurs ou supra-benthiques. L'hypothèse ci-dessus demanderait à être vérifiée en prenant en compte ces proies nageuses.

5.2 A quel point l'état du sédiment affecte-t-il les hippocampes à museau court ?

La genèse de la présente étude a commencé lorsque certains d'entre-nous ont constaté que l'envasement progressif de la face intérieure du banc de sable de l'Espiguette semblait entraîner un déplacement des hippocampes vers des secteurs moins confinés (Louisy & Bérenger 2015).

Dans quelle mesure la nature ou l'état des fonds pouvaient-ils affecter les hippocampes ? Pour répondre à cette question, il fallait analyser les sédiments, et donc les prélever pour pouvoir les caractériser. C'était là le cœur de notre projet.

5.2.1 Un gradient de qualité

Notre travail sur la physico-chimie des sédiments a notamment montré que la diversité des échantillons collectés se structurait fortement autour d'un gradient « sable - vase ».

Dans ce gradient, les hippocampes semblent éviter les conditions les plus extrêmes (vases à très forte charge organique ou, à l'inverse, sables très purs avec peu de fraction fine), s'épanouissant plus dans l'éventail de sédiments sablo-vaseux. Ce résultat est compatible avec ce que nous ont appris nos observations et notre expérience de terrain (quasi-absence d'hippocampes dans les bancs de sable superficiel très propre, disparition des hippocampes en cas d'envasement marqué).

5.2.2 Une distribution mosaïque et instable dans le temps

Malgré cette structuration très marquée en termes de nature de sédiments, il est difficile de relier cette information à des secteurs géographiques définis. En fait, il apparaît que différents types de sédiments peuvent se trouver juxtaposés à relativement petite échelle, dans une disposition en mosaïque. Une mosaïque d'ailleurs fort instable dans le temps, tant l'incidence des facteurs environnementaux (hydrodynamisme, dynamique de sédimentation, facteurs biologiques, impacts humains...) peut être puissante et soudaine.

L'abondance et la répartition des hippocampes sont tout aussi hétérogènes et variables dans le temps, mais les moyens attribués au projet n'ont pas permis d'obtenir un appariement suffisamment étroit entre données sédimentologiques et présence ou abondance des hippocampes. L'existence d'une relation de causalité entre la nature des sédiments et l'abondance des hippocampes est possible, voire probable, mais nous ne pouvons pas l'établir sur la base des données disponibles.

Ce qui paraît clair, en tout cas, c'est que la variabilité spatio-temporelle est une constante écologique majeure des habitats sablo-vaseux littoraux, en particulier dans les zones en accrétion.

5.3 Hippocampus hippocampus : espèce indicatrice ?

Les espèces indicatrices sont des organismes dont la présence, l'absence ou l'abondance reflètent des conditions environnementales spécifiques. Elles peuvent signaler la santé d'un écosystème, les niveaux de pollution, ou les impacts des changements climatiques (*Cairns et al., 1993*). Leur sensibilité aux variations environnementales les rend particulièrement utiles pour le suivi écologique.

Les hippocampes, membres de la famille des Syngnathidés, sont réputés particulièrement sensibles aux variations de leur environnement. En raison de leur dépendance aux habitats spécifiques et de leur vulnérabilité aux perturbations, les hippocampes seraient des indicateurs précieux de la santé des écosystèmes marins. Leur présence et leur densité peuvent fournir des informations sur la qualité de l'habitat, la disponibilité des ressources alimentaires et les impacts des activités anthropiques (*Curtis & Vincent, 2005*).

Reste à savoir si l'hippocampe à museau court pourrait être un bon indicateur de l'état de santé des bancs sableux de Méditerranée.

5.3.1 Les hippocampes à museau court, indicateurs de quoi ?

L'hippocampe à museau court est une espèce qui fréquente préférentiellement les fonds meubles, mais pas de manière systématique ni homogène. Sa présence témoigne-t-elle de certaines caractéristiques ou « qualités » de l'écosystème ?

Certaines données collectées lors du présent projet fournissent des indices (ou des pistes de travail) susceptibles d'éclairer ce sujet.

- Un milieu sain ?

Nous l'avons vu, les hippocampes à museau court semblent préférer les milieux sablo-vaseux (intermédiaires sur le gradient « sable - vase » qui structure la diversité des prélèvements de sédiments) à des environnements plus extrêmes.

A ce stade de nos études et connaissances, on peut donc considérer que la présence de nombreux hippocampes dans un secteur donné a toute chance d'indiquer un contexte sablo-vaseux, ni surchargé en matière organique, ni trop oligotrophe.

- Un sédiment riche ?

La constatation de densités d'hippocampes à Beauduc globalement deux fois plus faibles qu'à l'Espiguette n'est pas inintéressante. En effet, les analyses physico-chimiques des sédiments montrent – parallèlement – que les échantillons de sédiments de Beauduc sont nettement moins chargés en matière organique et nutriments que ceux de l'Espiguette.

Se pourrait-il que la richesse – et donc la productivité – d'un sédiment détermine à quelle densité une population d'hippocampes peut s'installer dans le secteur ?

- La présence de proies potentielles ?

Les analyses réalisées sur les petits animaux benthiques présents dans le sédiment (méiofaune et macrofaune) ont permis de déceler **quelques exemples de possible corrélation entre la présence d'hippocampes dans un secteur et celle de certaines de leurs proies potentielles dans un prélèvement de sédiments proche**.

C'est le cas pour le seul point de prélèvement riche en Crustacés Amphipodes (qui font couramment partie du régime alimentaire de l'hippocampe à museau court), à proximité duquel la densité des hippocampes s'est révélée très élevée.

De même la station où les Crustacés Ostracodes étaient les plus nombreux était associée à une densité très élevée d'hippocampes.

Ces exemples autorisent au moins à proposer l'hypothèse d'une attraction des hippocampes vers les endroits où leurs proies potentielles sont nombreuses, ou alors – plus probablement – où les conditions écologiques sont favorables au développement de ces proies.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les proies benthiques endogées ne sont pas les plus consommées par les hippocampes à museau court, qui préfèrent chasser des Crustacés qui nagent près du fond, comme des Mysidacés, des larves de Crustacés Décapodes, des Copépodes nageurs... Pour vérifier l'hypothèse d'une attraction des hippocampes vers les endroits où se trouvent leurs proies, il faudrait imaginer une autre logique de protocole, qui prenne spécifiquement en compte les Crustacés nageurs supra-benthiques.

5.3.2 Comment utiliser un indicateur Hippocampe pour les fonds de sable ?

En bien des endroits du monde, les hippocampes sont volontiers utilisés (ou considérés) comme indicateurs de la qualité ou de l'intégrité de leur environnement. Cela repose sur divers raisonnements ou postulats :

- Les hippocampes sont dépendants d'un habitat spécifique qui, s'il se dégrade, entraînera leur disparition.
- Les hippocampes sont particulièrement sensibles aux variations de leur environnement.
- Les hippocampes sont tributaires de ressources alimentaires particulières.
- Les hippocampes ont besoin de supports favorables pour s'accrocher avec la queue.

- Les hippocampes sont des animaux emblématiques bénéficiant d'un gros capital sympathie, ce qui est évidemment porteur en termes de communication et de sensibilisation du public (et le cas échéant, des financeurs).

Cela fonctionne relativement bien pour des espèces spécifiquement liées à un habitat récifal particulier ou à une espèce de phanérogame marine par exemple.

Mais dans le cas de l'hippocampe à museau court et des habitats sablo-vaseux littoraux, la situation n'est pas aussi claire.

Nous l'avons vu, son habitat est difficile à définir, ne serait-ce que parce qu'il est typiquement morcelé et instable dans le temps. S'il a peut-être une sensibilité particulière à l'apparition de vase molle sur le fond, il est peut-être extrêmement tolérant quant à la qualité ou la transparence de l'eau par exemple. En termes d'alimentation, d'après quelques publications, il semble pouvoir s'adapter à ce qui est disponible, selon les régions notamment. Et puis c'est un hippocampe qui peut très bien se passer de s'accrocher à un support, capable de nager ou se laisser dériver près du fond sur de longues distances.

6 Bibliographie

• Publications scientifiques et rapports d'études

- 🔍 Airoldi, L., & Beck, M. W. (2007). Loss, status and trends for coastal marine habitats of Europe. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 45, 345-405.
- 🔍 Biotope, 2021. Protection et mise en valeur du Lido de Frontignan, Tranche 2 des travaux. Bilan de la mesure de suivi S8 : Suivi des hippocampes de l'Espiguette
- 🔍 Bouchard, J., & Michaud, S. (2007). Impacts de l'extraction de granulats marins sur les habitats benthiques. *Le Naturaliste canadien*, 131(1), 76-84.
- 🔍 Cairns, J., McCormick, P. V., & Niederlehner, B. R. (1993). A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 263(1), 1-44.
- 🔍 Curtis, J.M.R. & Vincent, A.C.J. (2005). Distribution of sympatric seahorse species along a gradient of habitat types in an area of Southeast Asian marine protected areas. *Marine Ecology Progress Series*, 287, 233-243.
- 🔍 Delestrade, A., & Turcotte, Y. (2010). Conservation des habitats sableux en Languedoc-Roussillon. Actes du colloque.
- 🔍 Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 33, 245-303.
- 🔍 European Commission. (2013). Interpretation Manual of European Union Habitats - EUR28. European Commission.
- 🔍 Fondation Biotope pour la biodiversité, Biotope, Sensea Fr, Institut Marin & Seaquarium du Grau-du-Roi, Association Peau-Bleue, 2021. Etude de faisabilité d'un suivi par acoustique passive des hippocampes à museau court de l'Espiguette – connaissance et conservation d'*Hippocampus hippocampus*. Rapport de l'étude financée par la DREAL Occitanie. 48 pages.
- 🔍 Fondation Biotope pour la biodiversité, Biotope, Sensea Fr, Institut Marin & Seaquarium du Grau-du-Roi, Association Peau-Bleue, 2024. Monitoring par acoustique passive de la population d'hippocampes de l'Espiguette – Phase 2 : suivis acoustiques - Connaissance et conservation d'*Hippocampus hippocampus* (Hippocampe à museau court). Rapport de l'étude financée par la DREAL Occitanie. 33 pages.
- 🔍 Foster, S. J., & Vincent, A. C. J. (2004). Life history and ecology of seahorses: implications for conservation and management. *Journal of Fish Biology*, 65(1), 1-61.
- 🔍 Gunderson, A. R., Armstrong, E. J., & Stillman, J. H. (2016). Multiple stressors in a changing world: the need for an improved perspective on physiological responses to the dynamic marine environment. *Annual Review of Marine Science*, 8, 357-378.
- 🔍 Gurkan S., Taskavak E., Sever T.M. & Akalin S. (2011). Gut Contents of Two European Seahorses *Hippocampus hippocampus* and *Hippocampus guttulatus* in the Aegean Sea, Coasts of Turkey. *Pakistan J. Zool.*, *voaria*.
- 🔍 Hemminga, M. A., & Duarte, C. M. (2000). *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press.
- 🔍 Kitsos M.S., Tzomos T.H., Anagnostopoulou L. & Koukouras A. (2008). Diet composition of the seahorses, *Hippocampus guttulatus* Cuvier 1829 and *Hippocampus hippocampus* (L., 1758) (Teleostei, Syngnathidae) in the Aegean Sea. *J. Fish Biol.*, 72: 1259–1267.
- 🔍 Komar, P. D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall.
- 🔍 Levinton, J. S. (2001). *Marine Biology: Function, Biodiversity, Ecology*. Oxford University Press.
- 🔍 Lourie, S. A., Vincent, A. C. J., & Hall, H. J. (1999). *Seahorses: An Identification Guide to the World's Species and their Conservation*. Project Seahorse.
- 🔍 Louisy P. & Berenger L. (2015a), Hippocampes et Syngnathes du golfe du Lion: état des connaissances. Association Peau-Bleue – Agence des aires marines protégées, 94 p.
- 🔍 Louisy P. & Berenger L. (2015b), Suivi des hippocampes du banc de sable de l'Espiguette – année 2015. Association Peau-Bleue – Thau Agglo, 34 p.
- 🔍 McLachlan, A., & Brown, A. (2006). *The Ecology of Sandy Shores*. Academic Press.
- 🔍 Note du PNR de Camargue: synthèse des observations d'hippocampes dans le golfe de Beauduc.
- 🔍

• Sites internet

- 🔍 1110 - Bancs de sable à faible couverture permanente d'eau marine (Habitats d'intérêt communautaire (HIC)) - Description (mnhn.fr)
- 🔍 Benchmark modes de gestion du littoral_VF_WEB.pdf (obsnat.fr)

- 🔍 Documents d'objectifs Natura 2000 bancs sableux de l'Espiguette Tome1 Diagnostic, enjeux et objectifs de conservation (parc-camargue.fr)
- 🔍 Lettre.NATURA.2000_juillet_aout_2013.pdf (parc-camargue.fr)
- 🔍 Note du PNR de Camargue: synthèse des observations d'hippocampes dans le golfe de Beauduc (parc-camargue.fr)

7 Annexes

■ Annexe I : Site de l’Espiguette

I.1 Tableaux récapitulatifs de densité d’hippocampes par transect (détaillé)

Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juveniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	*	*	*	*	*	*	(m ²)	(ha)
08/02/2022	E_extN_S2T1 A	2	NC	NC	0,30	1,20	189	226,80	1	1	-	-	-	-	0,004	44,09
08/02/2022	E_extN_S2T1 B	2	NC	NC	0,50	2,00	198	396,00	-	-	-	-	-	-	-	-
08/02/2022	E_extN_S2T2 A	2	NC	NC	0,70	2,80	366	1024,80	-	-	-	-	-	-	-	-
08/02/2022	E_extN_S2T2 B	2	NC	NC	0,50	2,00	187	374,00	1	1	-				0,003	26,74
08/02/2022	E_int_S2T3A	2	NC	NC	1,00	4,00	199	796,00	2	-	-	-	-	2	0,003	25,13
08/02/2022	E_int_S2T3B	2	NC	NC	1,00	4,00	372	1488,00	1	-	-	-		1	0,001	6,72
05/04/2022	E_extN_S3T1 A	2	NC	NC	1,00	4,00	228	912,00	-	-	-	-	-	-	-	-
05/04/2022	E_extN_S3T1 B	2	NC	NC	1,00	4,00	224	896,00	2	1	-	1	-	-	0,002	22,32
05/04/2022	E_extN_S3T2 A	2	NC	NC	1,00	4,00	117	468,00	2	2	-	-	-	-	0,004	42,74
05/04/2022	E_extN_S3T2 B	2	NC	NC	1,00	4,00	219	876,00	1	1	-	-	-	-	0,001	11,42
05/04/2022	E_int_S3T3A	2	NC	NC	0,50	2,00	63	126,00	1	-	-	1	-	-	0,008	79,37
05/04/2022	E_int_S3T3B	2	NC	NC	0,50	2,00	123	246,00	2	-	-	2	-	-	0,008	81,30
03/05/2022	E_extN_S4T1 A	2	6,00	6,90	0,70	2,80	385	1078,00	2	2	-	-	-	-	0,002	18,55
03/05/2022	E_extN_S4T1 B	2	6,00	6,70	0,50	2,00	245	490,00	-	-	-	-	-	-	-	-
03/05/2022	E_extN_S4T2 A	2	NC	NC	0,70	2,80	256	716,80	3	2	-	1	-	-	0,004	41,85

Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juveniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	*	*	*	*	*	*	(m ²)	(ha)
03/05/2022	E_extN_S4T2B	2	5,40	6,50	0,40	1,60	300	480,00	-	-	-	-	-	-	-	-
03/05/2022	E_int_S4T3A	2	4,50	5,30	0,70	2,80	163	456,40	-	-	-	-	-	-	-	-
03/05/2022	E_int_S4T3B	2	4,00	4,50	0,40	1,60	139	222,40	3	1	-	2	-	-	0,013	134,89
07/06/2022	E_extS_S5T1A	2	5,50	6,40	2,50	10,00	164	1640,00	3	-	-	3	-	-	0,002	18,29
07/06/2022	E_extS_S5T1B	2	5,50	8,60	1,00	4,00	181	724,00	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06/2022	E_extN_S5T2A	2	2,20	5,60	1,50	6,00	229	1374,00	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06/2022	E_extN_S5T2B	2	2,10	5,30	0,70	2,80	221	618,80	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06/2022	E_extN_S5T3A	2	6,40	7,10	2,50	10,00	125	1250,00	6	2	2	2	-	-	0,005	48,00
07/06/2022	E_extN_S5T3B	2	6,10	7,20	1,00	4,00	252	1008,00	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06/2022	E_extN_S5T4A	2	4,50	5,30	1,50	6,00	233	1398,00	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06/2022	E_extN_S5T4B	2	4,40	4,90	0,30	1,20	56	67,20	-	-	-	-	-	-	-	-
05/07/2022	E_extN_S6T1A	2	7,20	7,90	1,00	4,00	150	600,00	4	1	2	1	-	-	0,007	66,67
05/07/2022	E_extN_S6T1B	2	7,20	8,00	1,00	4,00	161	644,00	1	-	-	1	-	-	0,002	15,53
05/07/2022	E_extN_S6T2A	2	6,60	7,00	1,00	4,00	93	372,00	4	1	-	2	1	-	0,011	107,53

Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juveniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	*	*	*	*	*	*	(m ²)	(ha)
05/07/2022	E_extN_S6T2B	2	6,40	7,20	1,00	4,00	104	416,00	5	1	3	-	1	-	0,012	120,19
05/07/2022	E_extS_S6T3A	2	4,40	6,90	1,20	4,80	130	624,00	-	-	-	-	-	-	-	-
05/07/2022	E_extS_S6T3B	2	4,80	7,10	1,50	6,00	155	930,00	-	-	-	-	-	-	-	-
05/07/2022	E_extS_S6T4A	2	8,40	8,60	0,50	2,00	83	166,00	4	-	3	1	-	-	0,024	240,96
05/07/2022	E_extS_S6T4B	2	7,70	9,70	0,50	2,00	179	358,00	1	-	-	1	-	-	0,003	27,93
04/08/2022	E_extN_S7T1A	2	7,20	7,90	0,50	2,00	250	500,00	-	-	-	-	-	-	-	-
04/08/2022	E_extN_S7T1B	2	2,70	6,00	0,40	1,60	142	227,20	-	-	-	-	-	-	-	-
04/08/2022	E_extN_S7T2A	2	5,80	6,30	0,65	2,60	235	611,00	6	3	-	2	1	-	0,010	98,20
04/08/2022	E_extN_S7T2B	2	5,40	6,80	1,30	5,20	152	790,40	5	1	-	1	3	-	0,006	63,26
04/08/2022	E_extN_S7T3A	2	5,80	6,20	1,50	6,00	116	696,00	6	3	1	2	-	-	0,007	86,21
04/08/2022	E_extN_S7T3B	2	6,40	6,80	1,30	5,20	191	993,20	3	1	1	1	1	-	0,003	30,21
04/08/2022	E_extN_S7T4A	2	7,90	8,80	0,55	2,20	184	404,80	-	-	-	-	-	-	-	-
04/08/2022	E_extN_S7T4B	2	7,90	8,90	0,50	2,00	153	306,00	-	-	-	-	-	-	-	-
21/09/2022	E_extN_S8T1	3	7,10	7,80	0,40	2,40	169	405,60	-	-	-	-	-	-	-	-

Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juveniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	*	*	*	*	*	*	(m ²)	(ha)
21/09/2022	E_extN_S8T2	3	4,20	6,40	0,80	4,80	246	1180,80	-	-	-	-	-	-	-	-
21/09/2022	E_extN_S8T3	3	5,20	6,60	0,40	2,40	123	295,20	1	1	-	-	-	-	0,003	33,88
21/09/2022	E_extN_S8T4	3	6,60	7,00	0,40	2,40	207	496,80	2	2	-	-	-	-	0,004	40,26
21/09/2022	E_extN_S8T5	3	NC	NC	0,40	2,40	207	496,80	-	-	-	-	-	-	-	-
06/10/2022	E_extS_S9T1	3	6,90	9,80	0,40	2,40	217	520,80	1	-	-	1		-	0,002	19,20
06/10/2022	E_extS_S9T2	3	4,50	8,20	0,40	2,40	223	535,20	-	-	-	-	-	-	-	-
06/10/2022	E_extN_S9T3	3	6,30	7,60	0,40	2,40	206	494,40	2	2	-	-	-	-	0,004	40,45
06/10/2022	E_extN_S9T4	3	7,00	7,90	0,30	1,80	213	383,40	1	1	-	-	-	-	0,003	26,08
01/12/2022	E_int_S10T1A	3	NC	NC	0,80	4,80	162	777,60	5	-	-	4	1	-	0,006	64,30
01/12/2022	E_extN_S10T2A	2	NC	NC	1,00	4,00	169	676,00	1	1	-	-	-	-	0,001	14,79
01/12/2022	E_extN_S10T3A	2	NC	NC	0,50	2,00	166	332,00	4	1	-	1	1	1	0,012	120,48

I.2 Tableau de l'analyse GLM

```
Call:
glm.nb(formula = Nombre ~ Zone, data = Tab5, na.action = na.exclude,
       link = log, init.theta = 2.360876709)

Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   0.8076      0.1623   4.975 6.53e-07 ***
ZoneE_extS   -0.2967      0.4438  -0.669   0.504
ZoneE_int    -0.6069      0.4054  -1.497   0.134
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(2.3609) family taken to be

Null deviance: 58.052  on 47  degrees of freedom
Residual deviance: 55.529  on 45  degrees of freedom
AIC: 185.25

Number of Fisher Scoring iterations: 1

              Theta:  2.36
            Std. Err.:  1.24

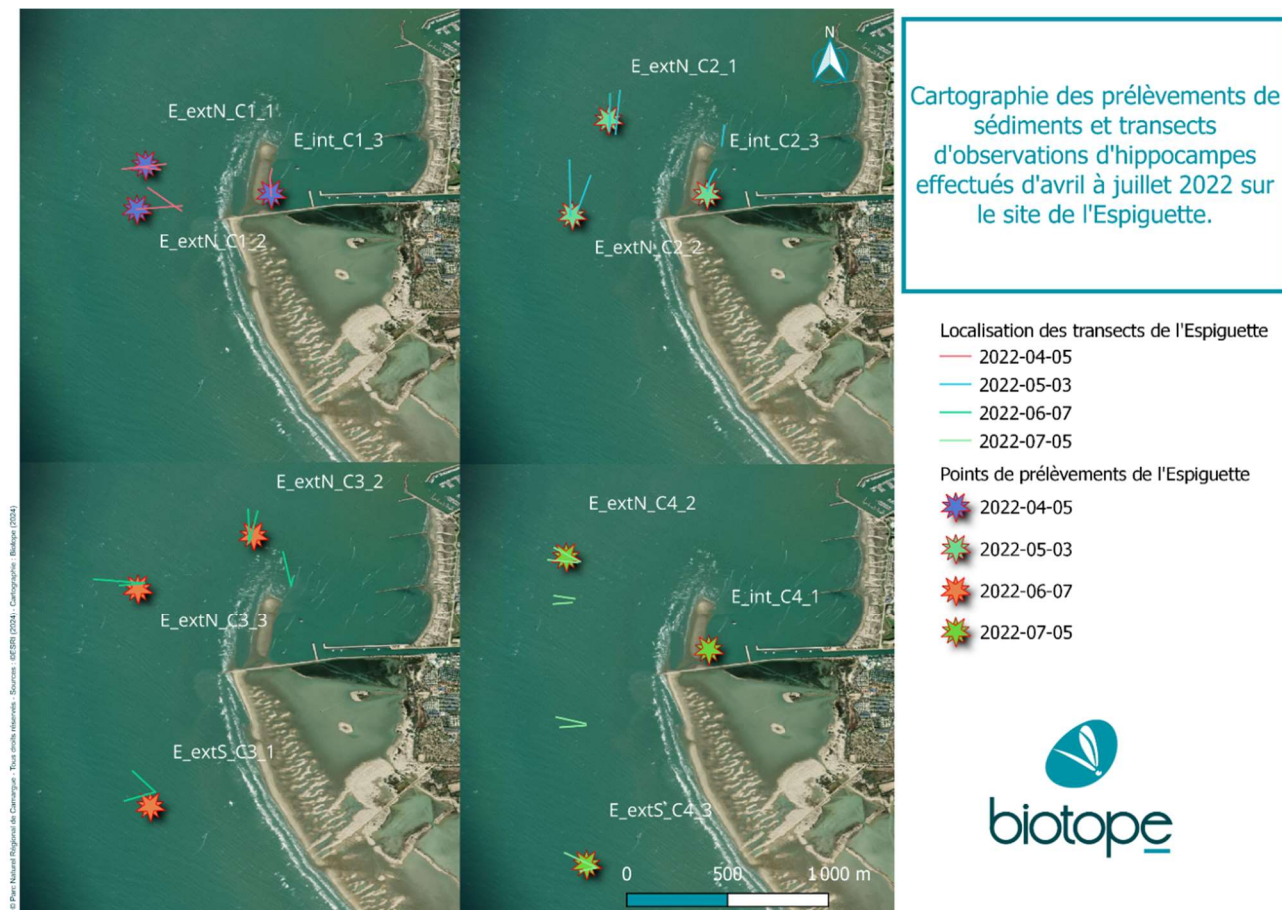
2 x log-likelihood:  -177.248
```

- **Significativité** : Seul l'intercept est statistiquement significatif. Les autres variables n'ont pas d'effet significatif sur la variable dépendante.
- **Ajustement du modèle** : Les valeurs de déviance et l'AIC suggèrent que le modèle s'ajuste raisonnablement bien aux données.

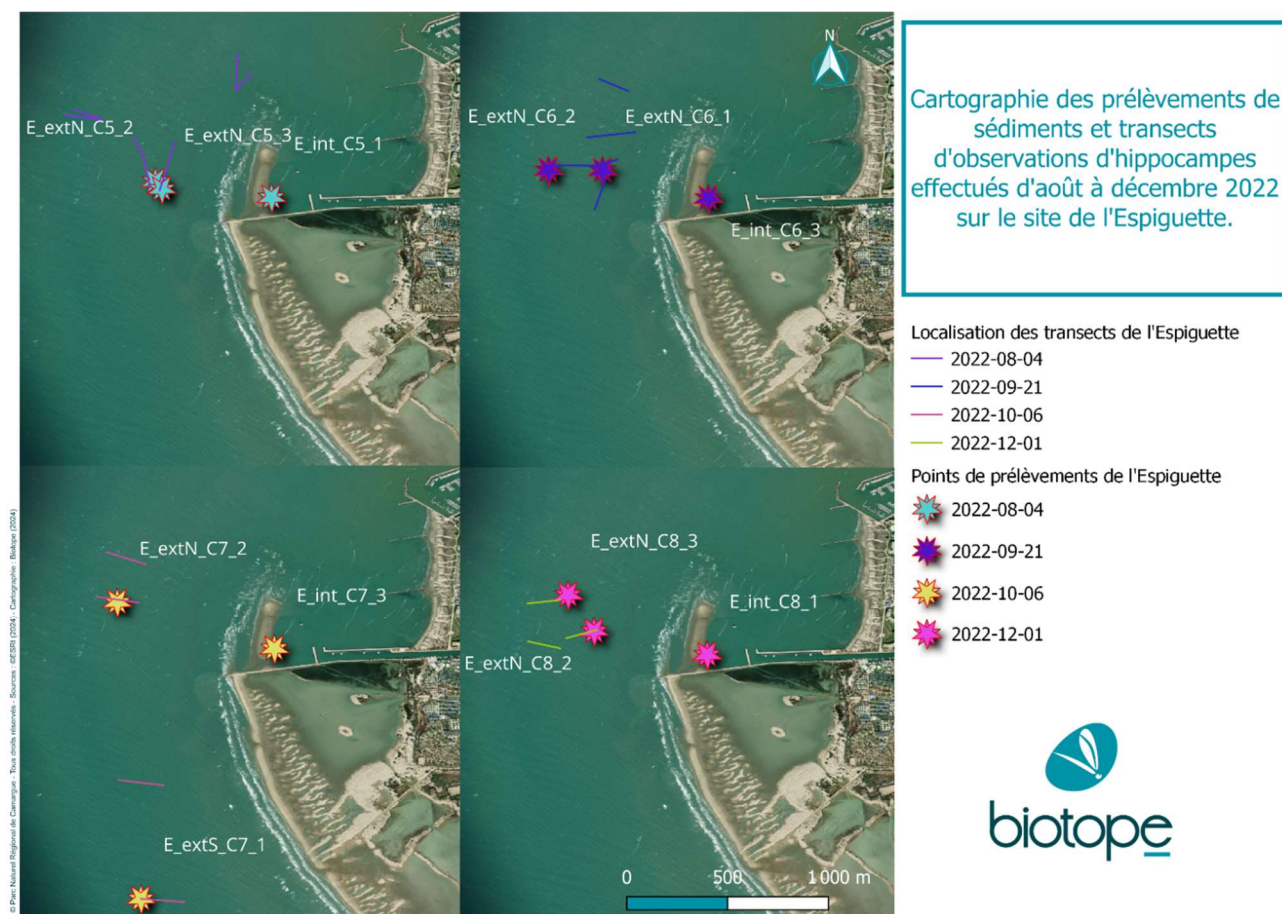
En résumé, le modèle montre que l'intercept (ZoneE_extN) a un effet significatif, mais les variables "ZoneE_extS" et "ZoneE_int" ne semblent pas avoir d'impact significatif.

I.3 Cartographie des prélèvements de sédiments et transects d'observations d'hippocampes

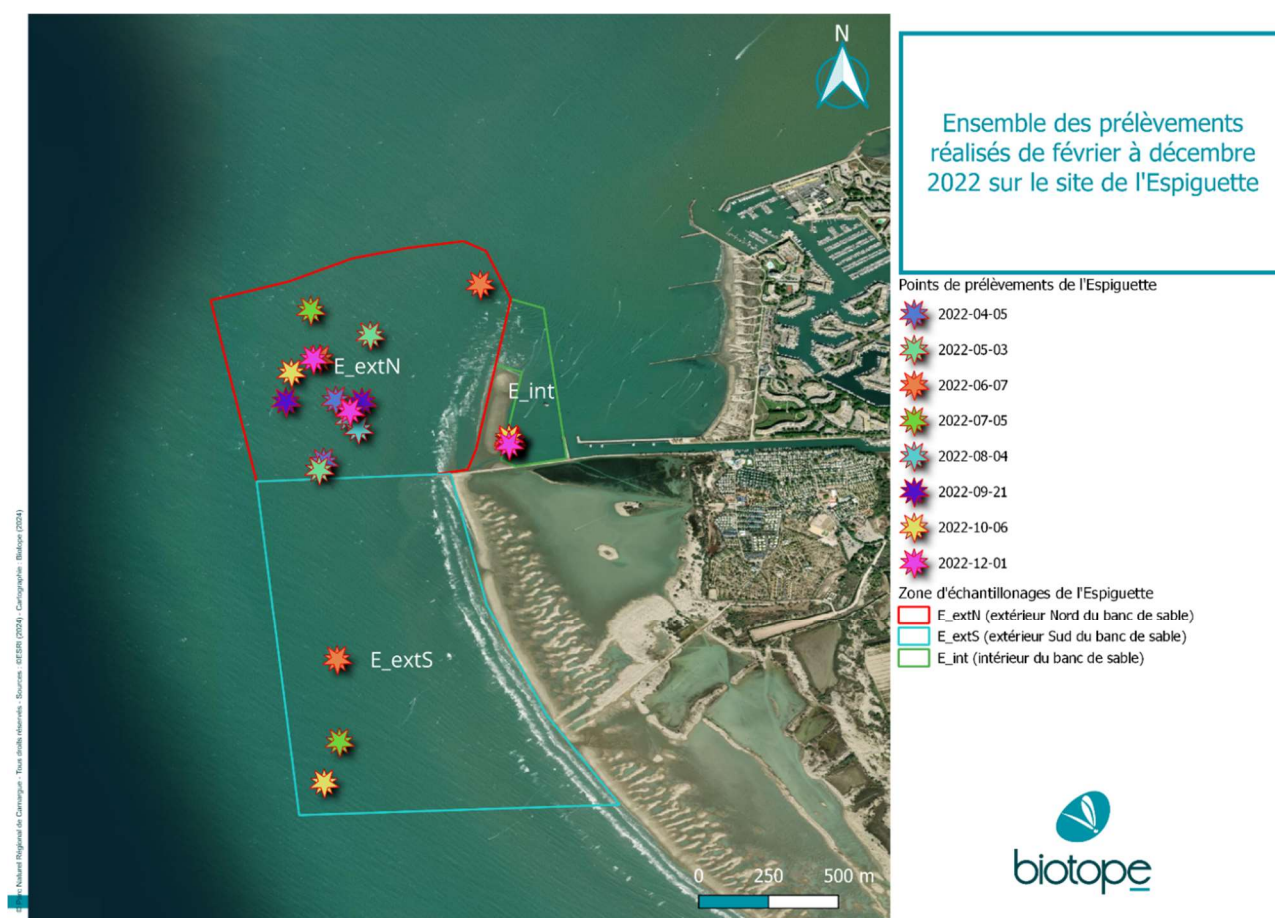
I.3.1 Prélèvements de sédiments et transects d'avril à juillet



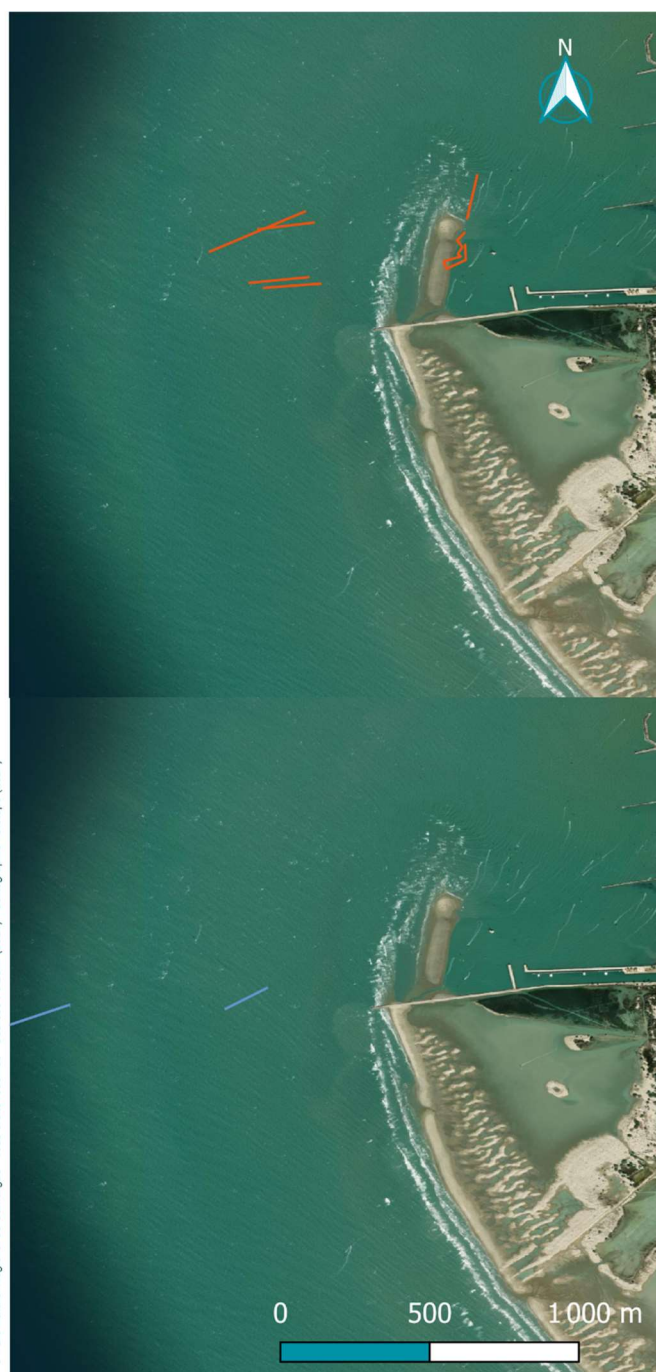
I.3.2 Prélèvements de sédiments et transects d'août à décembre



I.3.3 Récapitulatif des stations de prélèvements de sédiments



I.3.4 Transects réalisés sans prélèvements



Cartographie des transects
d'observations d'hippocampes
sans prélèvements effectués en
février et août 2022 sur le site de
l'Espiguette.

Localisation des transects de l'Espiguette

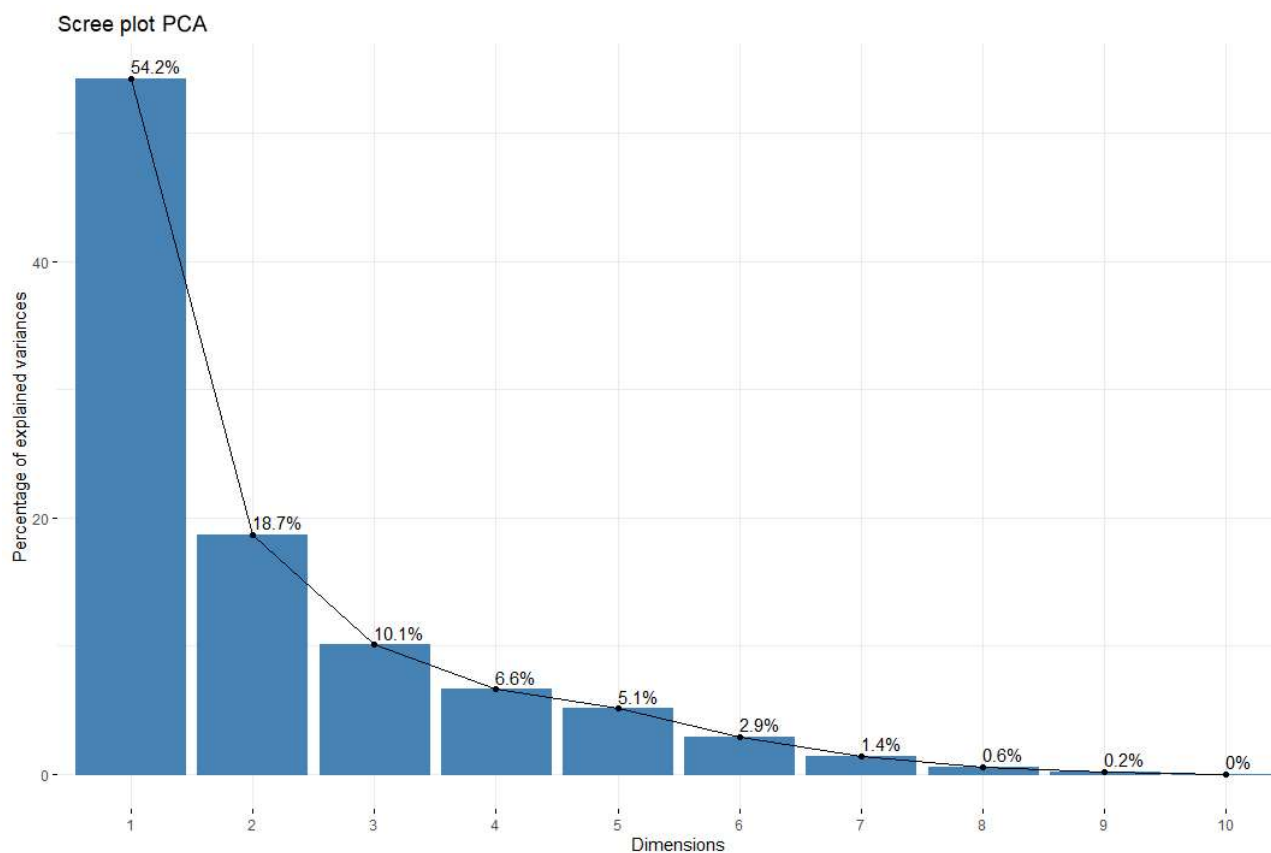
— 2022-02-08

— 2022-08-23



I.4 Analyses statistiques

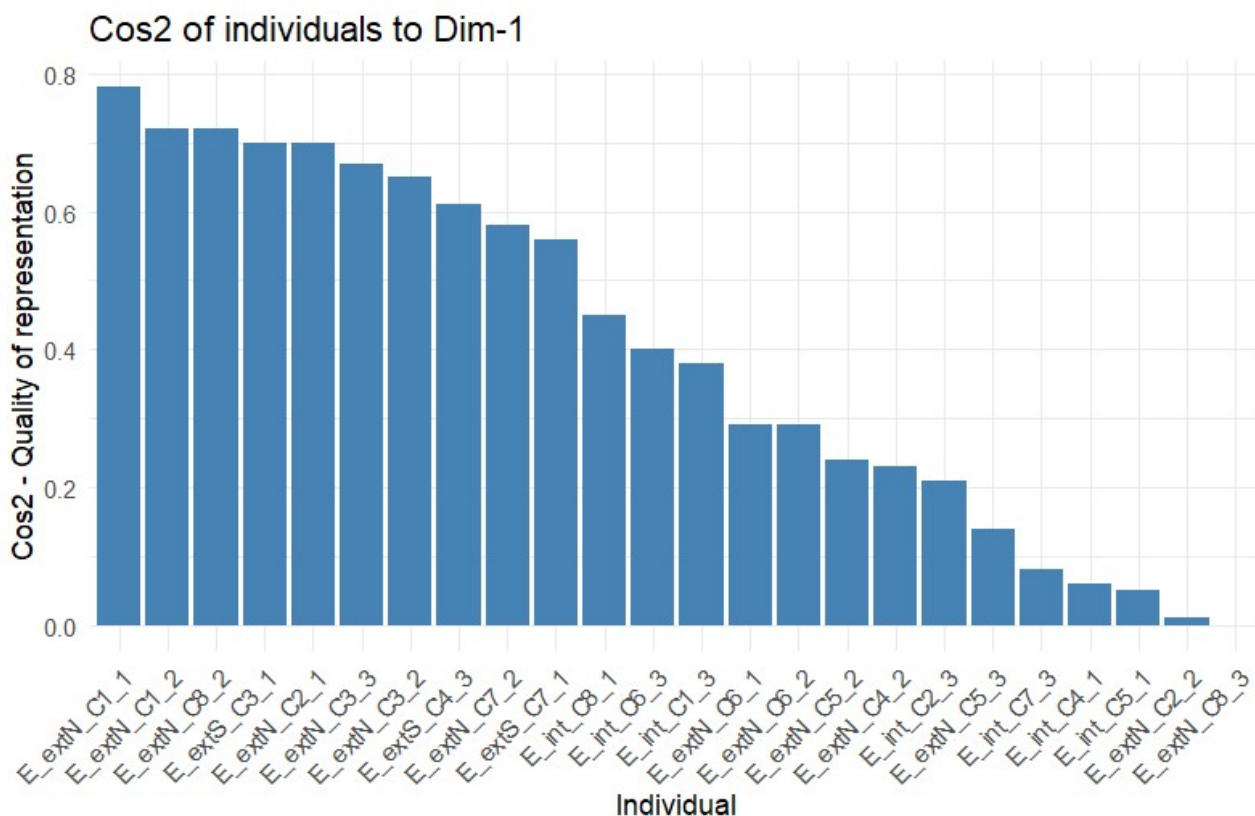
I.4.1 Explication de la variance



Ce graphique en barres, appelé “scree plot”, montre la proportion de variance expliquée par chaque composante principale dans une Analyse en Composantes Principales (ACP).

- **Première composante** : Explique environ 54,2% de la variance totale, ce qui signifie qu'elle capture la majorité de l'information présente dans les données.
- **Deuxième composante** : Explique environ 18,7% de la variance, ajoutant une part significative mais moindre d'information.
- **Troisième composante** : Explique environ 10,1% de la variance.

I.4.2 Qualité de représentation des stations par rapport à la première Dimension



L'histogramme "Cos2 of individuals to Dim-1" montre la qualité de représentation de différentes stations par rapport à la première Dimension (Dim-1). Voici quelques observations clés :

- **Individus avec une haute qualité de représentation** : Les premières stations, comme E_extN_C1_1 et E_extN_C1_2, ont des valeurs de Cos2 proches de 0.8, indiquant qu'elles sont très bien représentées par la première Dimension.
- **Tendance décroissante** : En avançant vers les dernières stations, comme E_extN_C8_3, les valeurs de Cos2 diminuent progressivement, atteignant des valeurs proches de 0.1. Cela signifie que ces stations sont moins bien représentées par la première Dimension.
- **Échelle de qualité** : L'axe vertical varie de 0.0 à 0.8, ce qui montre la variation de la qualité de représentation parmi les stations.

Annexe II : Site de Beauduc

II.1 Tableaux récapitulatifs de densité d'hippocampes par transect (détaillé)

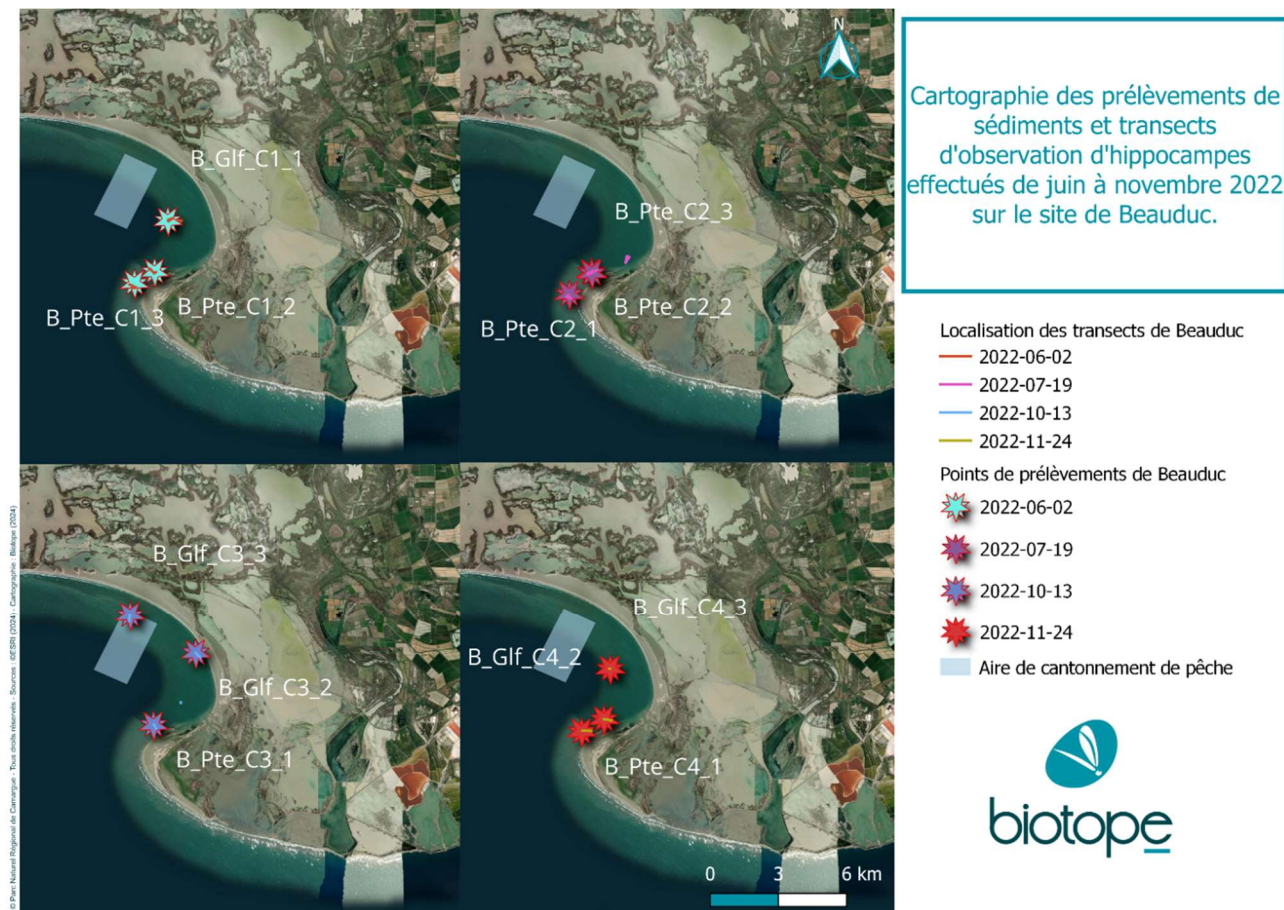
Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juveniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	*	*	*	*	*	*	(m ²)	(ha)
10/05/2022	B_Glf_S2T1A	2	9,7	10,2	1	4	329	1316	-	-	-	-	-	-	-	-
10/05/2022	B_Glf_S2T1B	2	9,5	10,1	1	4	264	1056	3	1	1	1	-	-	0,003	28,409
10/05/2022	B_Glf_S2T2A	2	NC	NC	1	4	372	1488	-	-	-	-	-	-	-	-
10/05/2022	B_Glf_S2T2B	2	2,5	7	1	4	441	1764	-	-	-	-	-	-	-	-
10/05/2022	B_Glf_S2T3A	2	NC	NC	1	4	314	1256	1	-	-	1	-	-	0,001	7,962
10/05/2022	B_Glf_S2T3B	2	8,3	9,3	NC	NC	297	NC	-	-	-	-	-	-	NC	NC
10/05/2022	B_Pte_S2T4A	2	NC	NC	1	4	212	848	5	1		3		1	0,006	58,962
10/05/2022	B_Pte_S2T4B	2	5,6	9,3	1	4	196	784	2	-	1	-	1	-	0,003	25,510
10/05/2022	B_Pte_S2T5A	2	7	8,8	1	4	199	796	5	1	1	2	-	1	0,006	62,814
10/05/2022	B_Pte_S2T5B	2	7,6	9,5	0,7	3	159	445	6	3	-	2	-	1	0,013	134,771
02/08/2022	B_Glf_S5T1A	2	5,7	6,8	1	4	177	708	-	-	-	-	-	-	-	-
02/08/2022	B_Glf_S5T1B	2	6,5	7,3	0,5	2	199	398	-	-	-	-	-	-	-	-
02/08/2022	B_Glf_S5T2A	2	10,5	10,5	0,4	2	200	320	-	-	-	-	-	-	-	-
02/08/2022	B_Glf_S5T2B	2	10,5	10,9	0,4	2	245	392	1	-	-	1	-	-	0,003	25,510
02/08/2022	B_Pte_S5T3A	2	4,3	9	1	4	186	744	4	3	-	1	-	-	0,005	53,763
02/08/2022	B_Pte_S5T3B	2	4,6	9,5	1,2	5	224	1075	-	-	-	-	-	-	-	-

Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juvéniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	*	*	*	*	*	*	(m ²)	(ha)
02/08/2022	B_Glf_S5T4A	2	4,7	6,9	1	4	245	980	-	-	-	-	-	-	-	-
02/08/2022	B_Glf_S5T4B	2	4,6	6,8	0,6	2	149	358	1	-	-	1	-	-	0,003	27,964
02/08/2022	B_Glf_S5T5A	2	3,4	7,6	0,5	2	209	418	-	-	-	-	-	-	-	-
02/08/2022	B_Glf_S5T5B	2	4,3	7,1	0,4	2	174	278	1	-	-	-	1	-	0,004	35,920
02/06/2022	B_Glf_S3T1A	2	9,4	9,7	0,5	2	178	356	-	-	-	-	-	-	-	-
02/06/2022	B_Glf_S3T1B	2	9,4	9,7	0,5	2	189	378	-	-	-	-	-	-	-	-
02/06/2022	B_Glf_S3T2A	2	10,2	10,4	0,5	2	185	370	-	-	-	-	-	-	-	-
02/06/2022	B_Glf_S3T2B	2	10,2	10,4	0,5	2	198	396	-	-	-	-	-	-	-	-
02/06/2022	B_Pte_S3T3A	2	5	8,7	4	16	81	1296	4	1	2	1	-	-	0,003	30,864
02/06/2022	B_Pte_S3T3B	2	5	8,7	4	16	261	4176	-	-	-	-	-	-	-	-
02/06/2022	B_Pte_S3T4A	2	5,4	8,1	3	12	293	3516	1	-	-	1	-	-	0,000	2,844
02/06/2022	B_Pte_S3T4B	2	5,8	9,4	3	12	153	1836	-	-	-	-	-	-	-	-
19/07/2022	B_Pte_S4T1A	2	7,6	8,4	1	4	126	504	-	-	-	-	-	-	-	-
19/07/2022	B_Pte_S4T1B	2	4,9	6,7	2	8	141	1128	1	-	-	-	-	1	0,001	8,865
19/07/2022	B_Pte_S4T2A	2	7,6	8,4	1	4	93	372	5	-	5	-	-	-	0,013	134,409
19/07/2022	B_Pte_S4T2B	2	4,9	6,7	1	4	319	1276	-	-	-	-	-	-	-	-

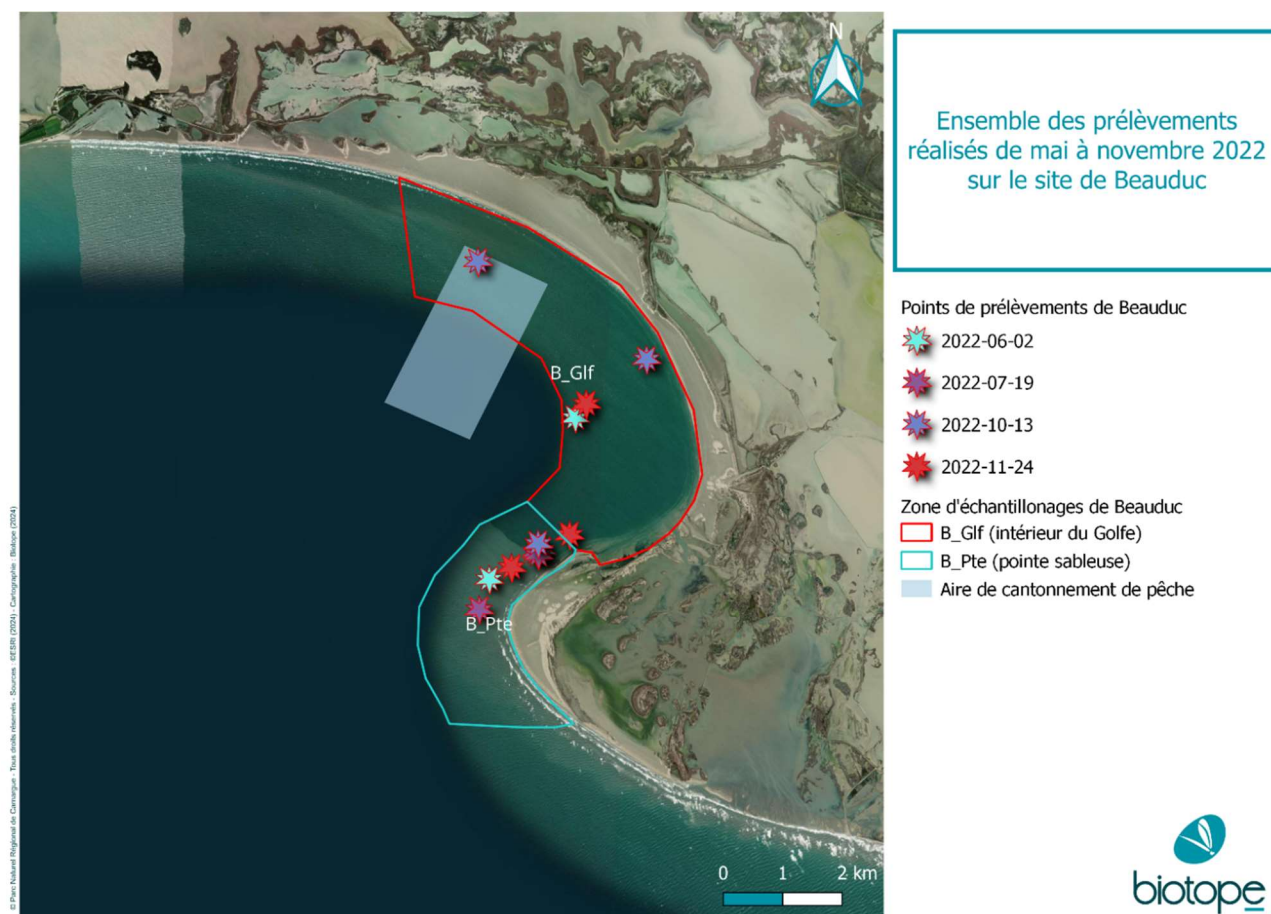
Date	Numéro transect	Nbr de plongeur	Prof min	Prof max	Visibilité	Largeur calculée	Longueur mesurée	Aire du transect	Nbr d'hippocampes	Mâles	Mâles gravides	Femelles	Juveniles	Indéterminés	Densité d'hippocampes	Densité d'hippocampes
19/07/2022	B_Pte_S4T3A	2	2,9	8,3	1	4	191	764	1	-	1	-	-	-	0,001	13,089
19/07/2022	B_Pte_S4T3B	2	2,8	9,75	1,5	6	231	1386	1	-	-	-	-	1	0,001	7,215
19/07/2022	B_Glf_S4T4A	2	4,2	7,1	0,4	2	287	459	-	-	-	-	-	-	-	-
19/07/2022	B_Glf_S4T4B	2	4,2	7,6	1	4	280	1120	-	-	-	-	-	-	-	-
13/10/2022	B_Pte_S6T1	3	3,2	9,9	0,3	2	214	385	-	-	-	-	-	-	-	-
13/10/2022	B_Glf_S6T3	3	4,6	9,5	1,2	7	266	1915	-	-	-	-	-	-	-	-
13/10/2022	B_Glf_S6T4	3	4,3	7,1	0,4	2	251	602	-	-	-	-	-	-	-	-
24/11/2022	B_Pte_S7T1	3	1,8	8,6	0,3	2	393	707	3	-	-	-	-	3	0,004	42,409
24/11/2022	B_Glf_S7T2	3	1,8	8,7	0,4	2	343	823	-	-	-	-	-	-	-	-
24/11/2022	B_Glf_S7T3	3	NC	NC	0,4	2	45	108	-	-	-	-	-	-	-	-

II.2 Cartographie des prélèvements de sédiments et transects d'observations d'hippocampes

II.2.1 Prélèvements de sédiments et transects de juin à novembre



II.2.2 Récapitulatif des stations de prélèvements de sédiments



II.2.3 Transects réalisés sans prélèvements de sédiments



Cartographie des transects
d'observation d'hippocampes sans
prélèvements effectués en mai et
août 2022 sur le site de Beauduc.

Localisation des transects de Beauduc

— 2022-05-10

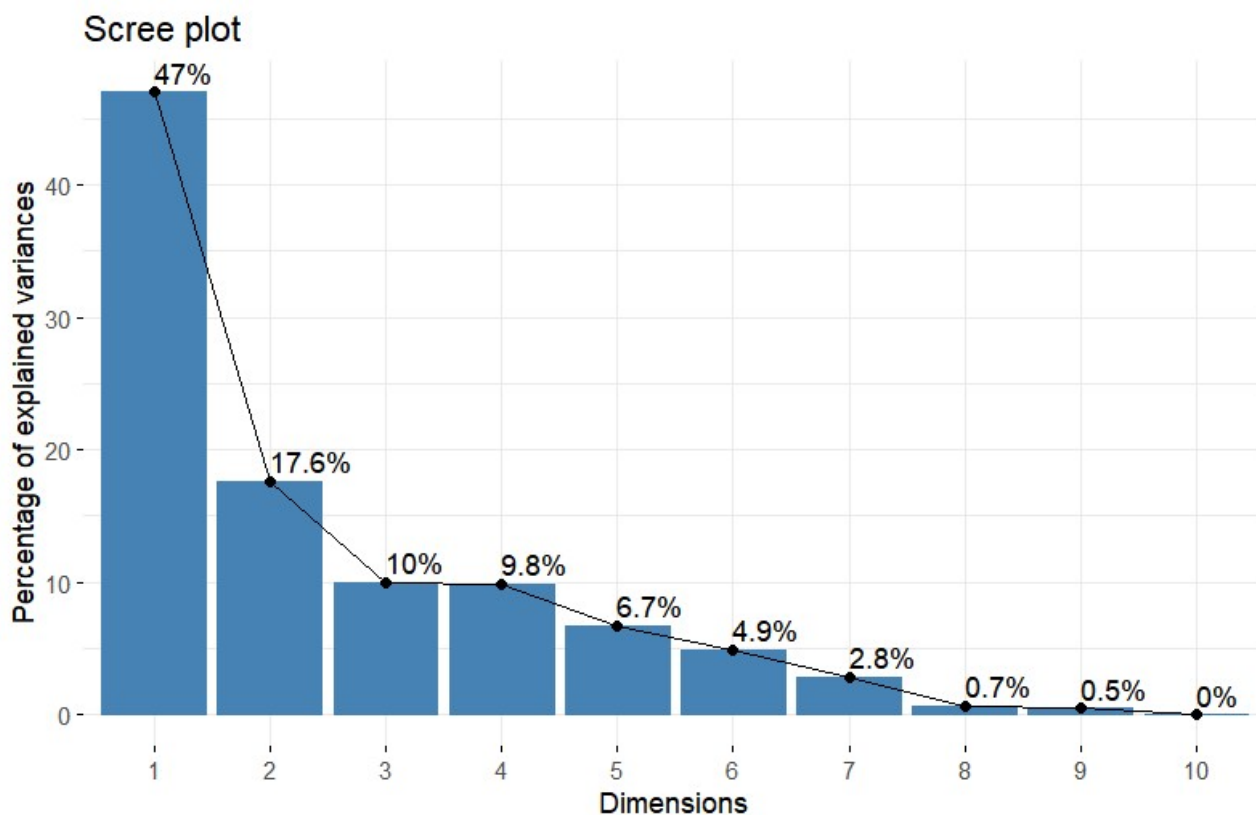
— 2022-08-02

■ Aire de cantonnement de pêche



II.3 Analyses statistiques

II.3.1 Explication de la variance

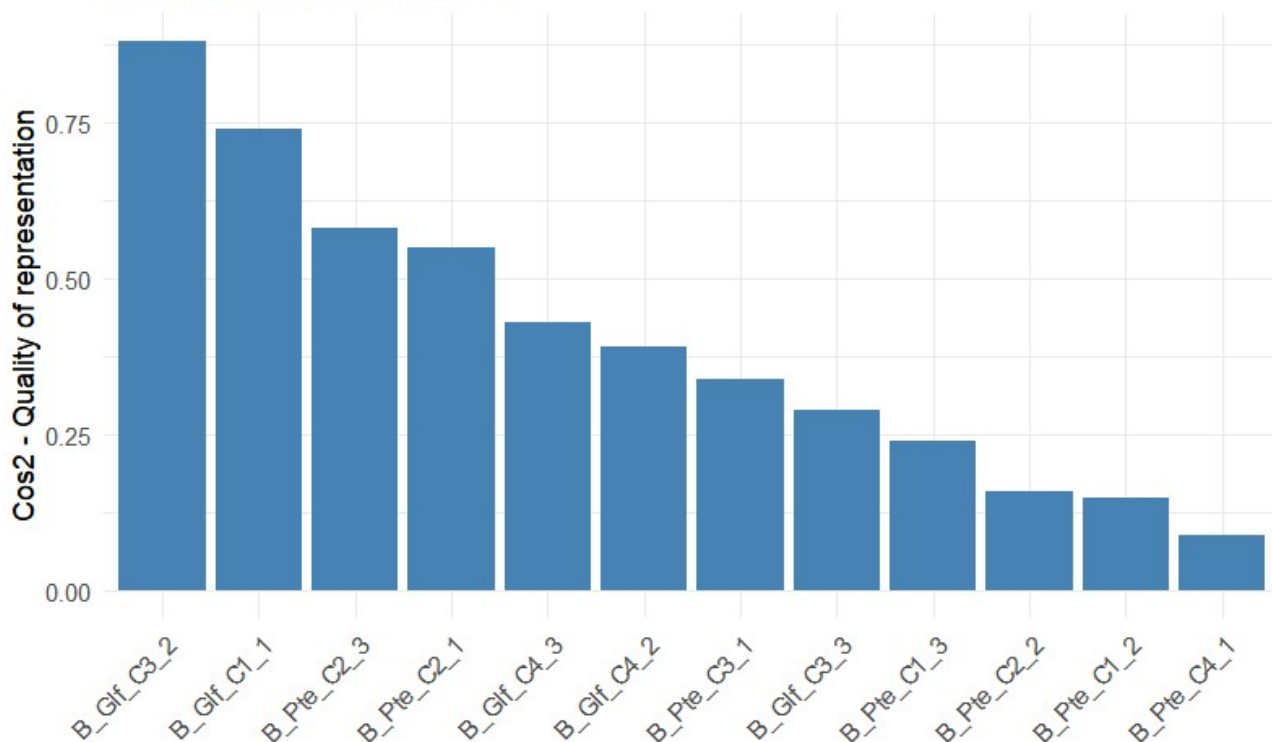


L'histogramme est un scree plot, utilisé en analyse en composantes principales (ACP) pour montrer la proportion de variance expliquée par chaque composante principale.

- **Première dimension** : La première dimension explique 47% de la variance totale, ce qui est une part significative.
- **Deuxième dimension** : La deuxième dimension explique 17.6% de la variance, ce qui est beaucoup moins que la première mais toujours notable.
- **Troisième dimension** : La troisième dimension explique 9.8% de la variance. Après cette dimension, la proportion de variance expliquée par chaque dimension diminue fortement.
- **Point d'inflexion** : Il y a un "coude" visible après la troisième dimension, indiquant que les trois premières dimensions capturent la majorité de la variance dans les données. Cela suggère que ces trois dimensions sont les plus importantes pour représenter les données.

II.3.2 Qualité de représentation des stations par rapport à la première Dimension

Cos2 of stations to Dim-1

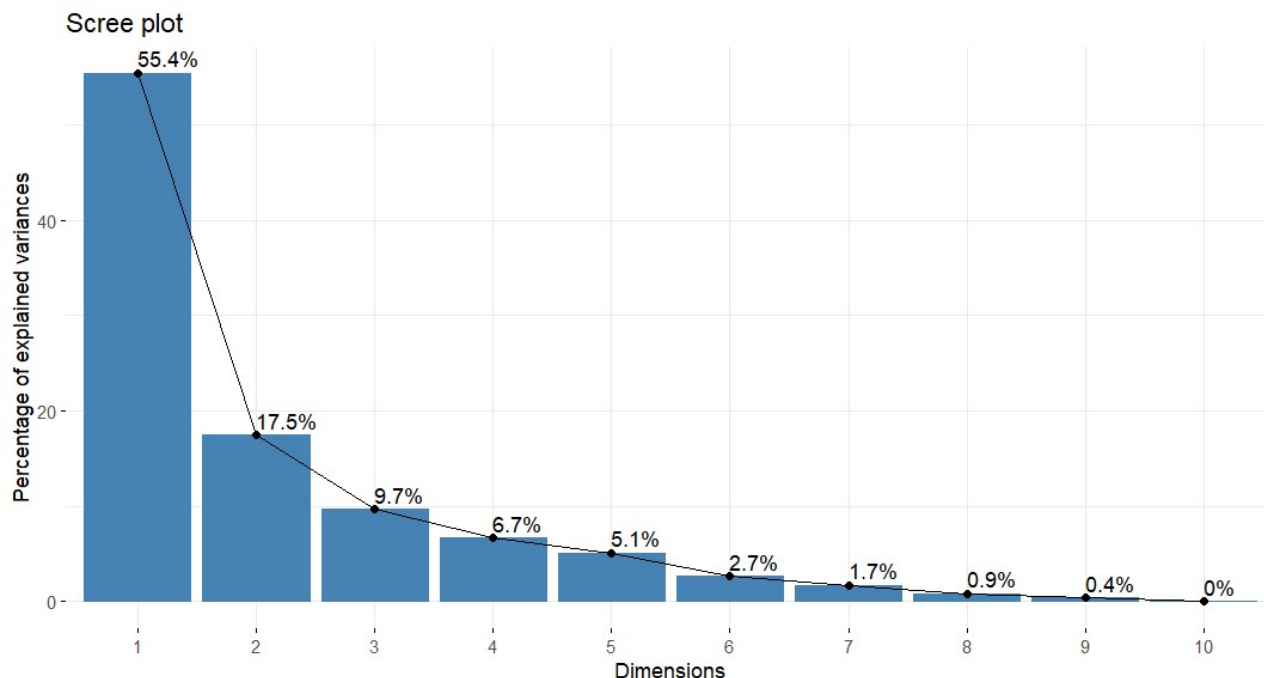


L'histogramme "Cos2 of stations to Dim-1" montre la qualité de représentation de différentes stations par rapport à la première dimension. Voici quelques observations clés :

- **Station B_Glf_C3_2** : Cette station a la valeur la plus élevée sur l'axe vertical, indiquant qu'elle est la mieux représentée par la première dimension.
- **Stations B_Glf_C1_1 et B_Glf_C2_3** : Ces stations ont également des valeurs relativement élevées, ce qui signifie qu'elles sont bien représentées par la première dimension.
- **Stations B_Pte_C4_1 et B_Pte_C1_2** : Ces stations ont les valeurs les plus basses, indiquant une moins bonne représentation par la première dimension.
- **Échelle de qualité** : L'axe vertical varie de 0.00 à 0.75, ce qui montre la variation de la qualité de représentation parmi les stations.

Annexe III : Comparaison du site de l'Espiguette et de Beauduc

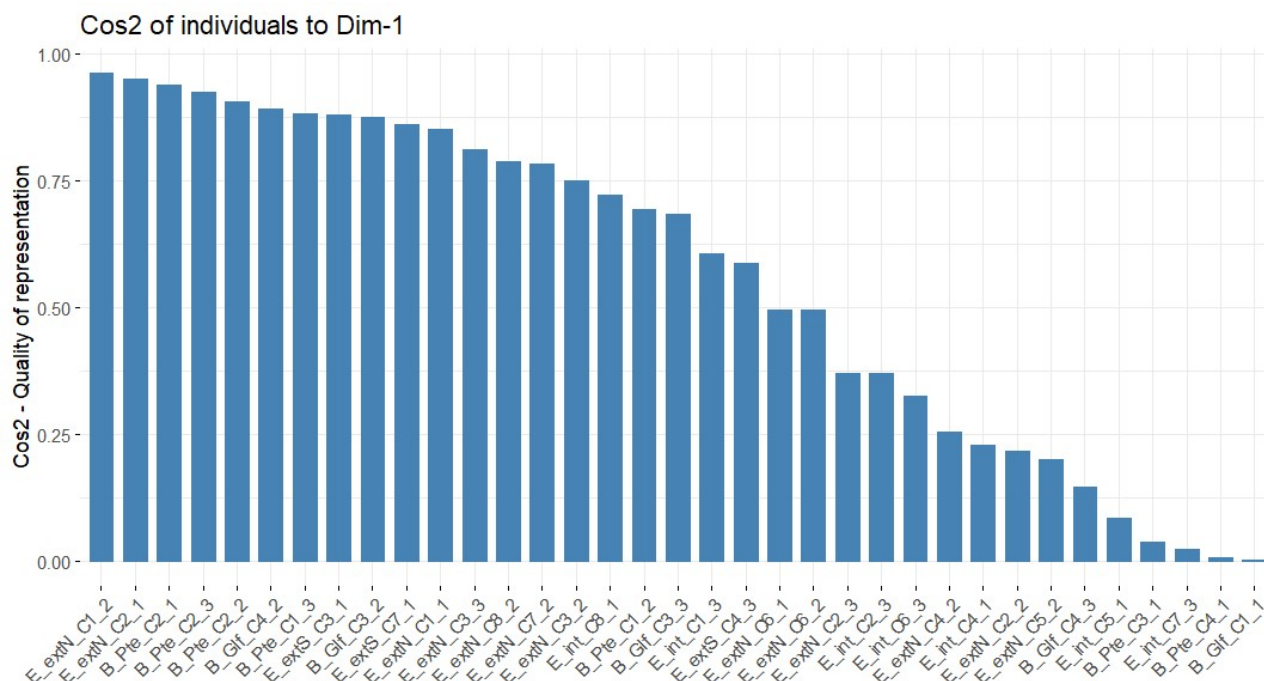
III.1 Explication de la variance



L'histogramme est un scree plot, utilisé en analyse en composantes principales (ACP) pour montrer la proportion de variance expliquée par chaque composante principale. Voici quelques points clés :

- **Première dimension** : La première dimension explique 55.4% de la variance totale, ce qui est une part significative.
- **Deuxième dimension** : La deuxième dimension explique 17.5% de la variance, ce qui est beaucoup moins que la première mais toujours notable.
- **Troisième dimension** : La troisième dimension explique 9.7% de la variance. Après cette dimension, la proportion de variance expliquée par chaque dimension diminue fortement.
- **Point d'inflexion** : Il y a un "coude" visible après la troisième dimension, indiquant que les trois premières dimensions capturent la majorité de la variance dans les données. Cela suggère que ces trois dimensions sont les plus importantes pour représenter les données.

III.2 Qualité de représentation des stations par rapport à la première Dimension

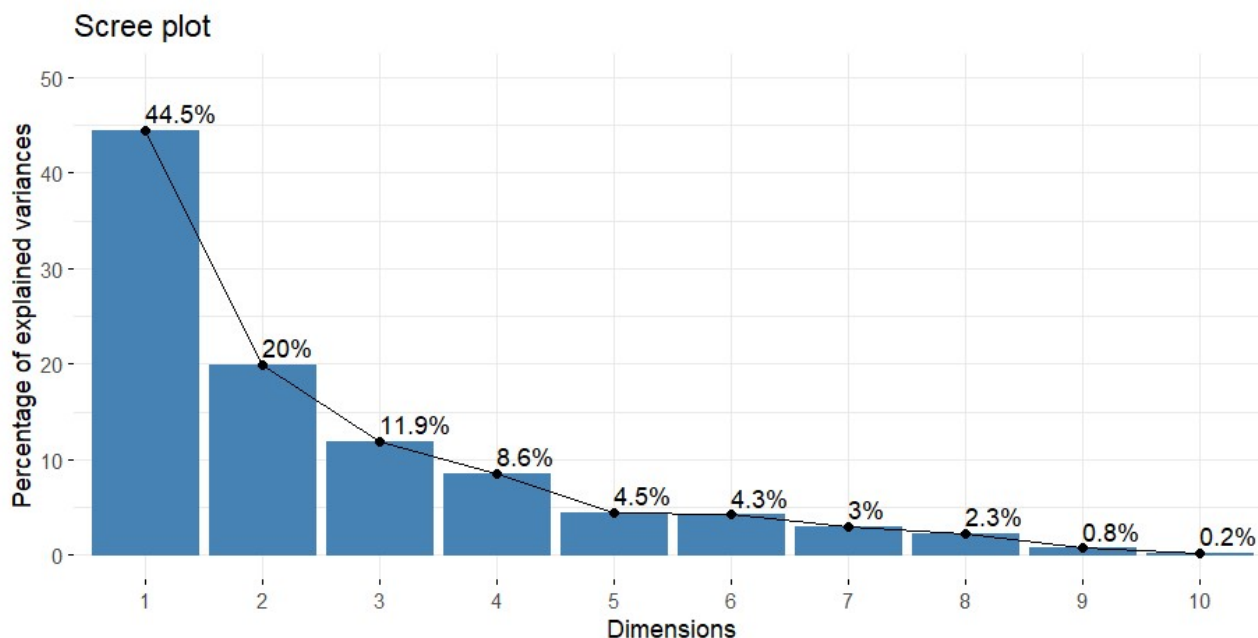


L'histogramme "Cos2 of individuals to Dim-1" montre la qualité de représentation de différentes stations par rapport à la première dimension (Dim-1). Voici quelques observations clés :

- **Individus avec une haute qualité de représentation** : Les premières stations, comme E_extN_C1_2, ont des valeurs de Cos2 proches de 1.00, indiquant qu'elles sont très bien représentées par la première dimension.
- **Tendance décroissante** : En avançant vers les dernières stations, comme E_int_C4_2, les valeurs de Cos2 diminuent progressivement, atteignant des valeurs proches de 0.00. Cela signifie que ces stations sont moins bien représentées par la première dimension.
- **Échelle de qualité** : L'axe vertical varie de 0.00 à 1.00, ce qui montre la variation de la qualité de représentation parmi les stations.

Annexe IV : Analyse du benthos dans les prélèvements de sédiments

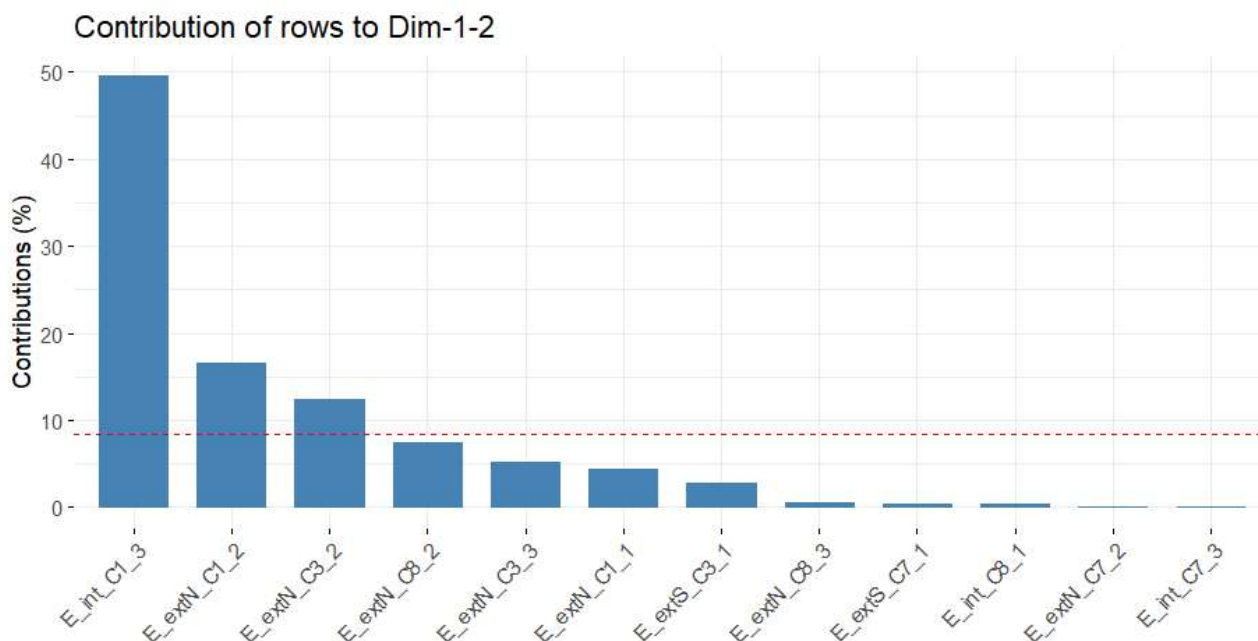
IV.1 Explication de la variance



L'histogramme est un scree plot, utilisé en analyse en composantes principales (ACP) pour montrer la proportion de variance expliquée par chaque composante principale. Voici quelques points clés :

- **Première Dimension** : Explique environ **44.5%** de la variance totale. Cela signifie que cette dimension capture presque la moitié de la variabilité des données, ce qui en fait le facteur le plus important.
- **Deuxième Dimension** : Explique environ **20%** de la variance. Bien que moins significative que la première, elle reste un facteur important.
- **Troisième Dimension** : Explique environ **11.9%** de la variance. Après cette dimension, la contribution des facteurs diminue considérablement.
- **Point d'inflexion** : Le coude observé dans ce plot indique généralement le point où les facteurs supplémentaires n'apportent plus de pouvoir explicatif substantiel. Dans ce cas, il semble que les trois premières dimensions soient les plus significatives pour expliquer la variance dans les données.

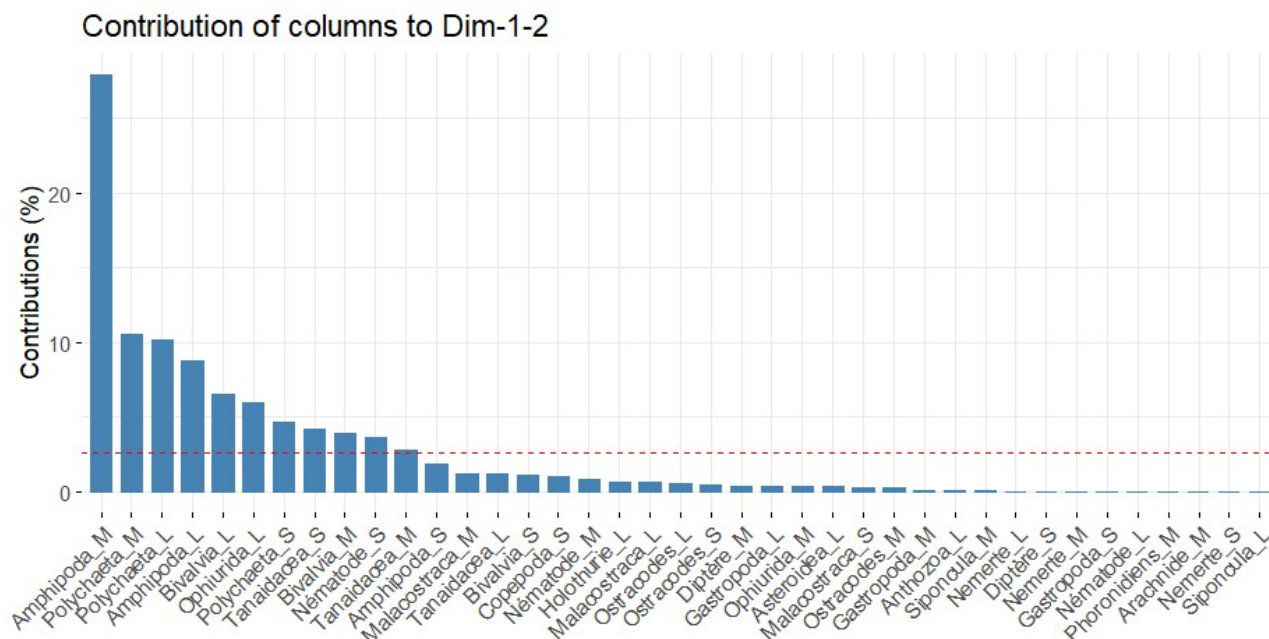
IV.2 Qualité de représentation des stations par rapport aux premières Dimensions



L'histogramme "Contribution of rows to Dim-1-2" montre la qualité de représentation de différentes stations par rapport aux deux premières dimension (Dim-1-2). Voici quelques observations clés :

- **Individus avec une haute qualité de représentation** : Les premières stations, comme E_int_C1_3, ont des contributions très élevées, indiquant qu'elles sont très bien représentées par les deux premières Dimensions. Cela signifie que ces stations capturent une grande partie de la variance expliquée par Dim-1 et Dim-2.
- **Tendance décroissante** : En avançant vers les dernières stations, comme E_int_C7-3, les contributions diminuent progressivement. Cela signifie que celles-ci sont moins bien représentées par les deux premières Dimensions, contribuant moins à la variance expliquée.
- **Échelle de qualité** : L'axe horizontal varie de 0% à 50%, montrant la variation de la contribution parmi les stations. Les stations avec des contributions proches de 50% sont les plus influentes, tandis que celles avec des contributions proches de 0% sont les moins influentes.

IV.3 Qualité de représentation des catégories de benthos par rapport aux premières Dimensions



L'histogramme "Contribution of columns to Dim-1-2" montre la qualité de représentation de différentes catégories de benthos par rapport aux deux premières dimension (Dim-1-2). Voici quelques observations clés :

- **Individus avec une haute qualité de représentation** : Les premières variables, comme Amphipoda_M, ont des contributions très élevées, proches de 35%. Cela indique qu'elles sont très bien représentées par les deux premières Dimensions.
- **Tendance décroissante** : En avançant vers les dernières catégories, les contributions diminuent progressivement. La plupart des catégories à droite du graphique contribuent moins de 2%. Cela signifie que ces catégories de benthos sont moins bien représentées par les Dimensions 1 et 2.
- **Échelle de qualité** : L'axe vertical varie de 0% à 35%, montrant la variation de la contribution parmi les variables. Les catégories avec des contributions proches de 35% sont les plus influentes, tandis que celles avec des contributions proches de 0% sont les moins influentes.

8 Index des tableaux, cartes et figures

Index des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des sorties plongées sur le site de l'Espiguette	24
Tableau 2 : Données physico-chimiques par station du site de l'Espiguette (« < » signifie « valeur inférieure à la limite de quantification »)	26
Tableau 3 : Répartition des stations sur la Dimension 1	29
Tableau 4 : Stations de prélèvement classées selon leur contribution à la Dimension 1 de l'ACP : densités d'hippocampes associées aux stations sur la base des transects de recensement proches	32
Tableau 5 : Récapitulatif des sorties plongées sur le site de Beauduc	34
Tableau 6 : Données physico-chimiques par station du site de Beauduc (« < » signifie « valeur inférieure à la limite de quantification »)	35
Tableau 7 : Benthos dans les sédiments de l'Espiguette - Comptages par classes taxonomiques et classe de taille	41
Tableau 8 : Benthos dans les sédiments de Beauduc - Comptages par classes taxonomiques et classe de taille	46
Tableau 9 : Récapitulatif des données et analyses effectuées dans la zone « intérieur banc »	50

Index des figures

Figure 1 : Hippocampe à museau court du site de l'Espiguette (H. hippocampus) en aquarium dans le cadre d'une étude scientifique (© P. LOUISY, 2021)	11
Figure 2 : Equipe de plongeurs avant immersion (© Parc naturel régional de Camargue (PNRC))	14
Figure 3 : Mesure de la turbidité au disque de Secchi et matériel de prélèvement ; Matériel de prélèvement et de conditionnement des échantillons d'eaux et de sédiments prélevés sur le fond (© PNRC)	15
Figure 4 : Oxymètre et sonde multiparamètres pour mesures de la qualité d'eaux prélevés sur le fond (© PNRC)	15
Figure 5 : Diagramme en boîtes (boxplot) permettant de comparer les résultats des transects de recensement des hippocampes sur le site de l'Espiguette, par zone et par saison. E_extN : zone extérieure nord ; E_extS : zone extérieure sud ; E_int : zone intérieure	20
Figure 6 : Proportion des transects sans observation d'hippocampes sur le site de l'Espiguette	20
Figure 7 : Nombre d'hippocampes observés par dans les transects par zones et par saisons	21
Figure 8 : Diagramme en boîtes (boxplot) permettant de comparer les résultats des transects de recensement des hippocampes sur le site de l'Espiguette, par zones et par saisons. B_Glf : zone intérieure du golfe ; B_Pte : pointe	23
Figure 9 : Proportion des transects sans observation d'hippocampes sur le site de Beauduc	23
Figure 10, à gauche: Analyse en Composantes Principale (ACP) - Projection des variables et de leur contribution à la variabilité des données sur les deux premières Dimensions, Espiguette	27
Figure 11, à droite : Matrice de Corrélation des Composants de l'ACP aux cinq premières dimensions, Espiguette	27
Figure 12 : Diagramme de Dispersion de l'Analyse en Composantes Principales avec Coloration par Cosinus Carré des stations, Espiguette	28

Figure 13 : Projection des stations de prélèvements et de leur répartition par zones sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP	30
Figure 14 : Projection des stations de prélèvements classées par saisons sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP	31
Figure 15 : Projection des stations de prélèvement sur le plan des deux premiers axes factoriels de l'ACP, classées par niveaux de densité des hippocampes environnants	33
Figure 16, à droite : Analyse en Composantes Principale (ACP) - Projection des variables et de leur contribution à la variabilité des données sur les deux premières Dimensions, Beauduc	36
Figure 17, à droite : Matrice de Corrélation des Composants de l'ACP aux cinq premières dimensions, Beauduc	36
Figure 18 : Diagramme de Dispersion de l'Analyse en Composantes Principales avec Coloration par Cosinus Carré des stations, Beauduc	37
Figure 19 : Projection des stations de prélèvements et de leur densité d'hippocampes (par ha) sur le plan des Dimensions 1 et 2 de l'ACP	38
Figure 20, à gauche : Analyse en Composantes Principale (ACP) - Projection des variables et de leur contribution à la variabilité des données sur les deux premières Dimensions, Espiguette et Beauduc	39
Figure 21, à droite : Matrice de Corrélation des Composants de l'ACP aux cinq premières dimensions, Espiguette et Beauduc	39
Figure 22 : Diagramme de Dispersion de l'Analyse en Composantes Principales avec Coloration par Cosinus Carré des stations, Espiguette et Beauduc	40
Figure 23 : Benthos dans les sédiments de l'Espiguette - Analyse des correspondances (AC) - Projection des variables (catégories benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions	43
Figure 24 : Benthos dans les sédiments de l'Espiguette – Analyse des correspondances (AC) – Projection des variables (catégories de benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions, avec indication des densités d'hippocampes associées	44
Figure 25 : Benthos dans les sédiments de Beauduc - Analyse des correspondances (AC) - Projection des variables (catégories benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions.	48
Figure 26 : Benthos dans les sédiments de Beauduc – Analyse des correspondances (AC) – Projection des variables (catégories de benthos) et des stations sur les deux premières Dimensions, avec indication des densités d'hippocampes associées	49
Figure 27 : Proportion d'argiles (particules $\leq 4 \mu\text{m}$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	51
Figure 28 : Proportion de silts (particules $]4 - 63 \mu\text{m}]$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	51
Figure 29 : Proportion de sables (particules $]63 - 2000 \mu\text{m}]$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	52
Figure 30 : Proportion de graviers (particules $>2\text{mm}$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	52
Figure 31 : Quantité de carbone organique total (COT) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	53
Figure 32 : Quantité de phéopigments du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	53
Figure 33 : Quantité de chlorophylle du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	54
Figure 34 : Quantité d'ammonium extrait au KCl (NH_4) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	54
Figure 35 : Quantité de nitrite soluble (NO_2) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	55
Figure 36 : Quantité de nitrate soluble (NO_3) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	55
Figure 37 : Quantité d'azote de Kjeldhal (NTK) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	56
Figure 38 : Quantité de phosphore (P) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	57
Figure 39 : Quantité d'orthophosphate soluble ($\text{PO}_4\text{-P}$) du site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	57
Figure 40 : Nombre de spécimens de la macro-méiofaune sur le site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	58
Figure 41 : Nombre de catégories de la macro-méiofaune sur le site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	58
Figure 42 : Densité d'hippocampes à museau court autour des stations de prélèvement sur le site de l'Espiguette en zone « intérieur banc ».	59

Index des cartes

Carte 1 : Périmètre du site Natura 2000 « Banc sableux de l'Espiguette »	10
Carte 2 : Périmètre du site Natura 2000 « Camargue »	11
Carte 3 : Définition des zones de référence dans le secteur de la flèche de l'Espiguette	17
Carte 4 : Définition des zones de référence dans le secteur du golfe de Beauduc	18
Carte 5 : Ensemble des transects et observations d'hippocampes réalisés sur le site de l'Espiguette	19
Carte 6 : Ensemble des transects et observations d'hippocampes réalisés sur le site de Beauduc	22
Carte 7 : Ensemble des prélèvements et transects réalisés sur le site de l'Espiguette	25
Carte 8 : Ensemble des prélèvements et transects réalisés sur le site de Beauduc	34