



RAPPORT

Suivi biosédimentaire sur le site du parc pilote éolien offshore flottant Provence Grand Large – Etat de référence

220438M

Octobre 2022



PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE

PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE
SUIVI BIOSÉDIMENTAIRE SUR LE SITE DU PARC PILOTE EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT PROVENCE GRAND LARGE –
ETAT DE REFERENCE

CLIENT

RAISON SOCIALE	PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE
COORDONNÉES	Direction des Energies Marines Renouvelables Cœur Défense - Tour B 100, esplanade du Général de Gaulle 92932 Paris La Défense Cedex
INTERLOCUTEUR	Mme Emma GOUZE E.mail : emma.gouze@edf-re.fr Tél. +33 6 28 54 60 12

CREOCEAN

COORDONNÉES	Agence Occitanie Les Belvédères – Bâtiment B 128 avenue de Fès 34080 MONTPELLIER Tél. : 04.99.23.31.65 montpellier@creocean.fr
INTERLOCUTEUR	M. Sébastien THORIN Tél. : 06 12 24 77 51 thorin@creocean.fr

RAPPORT

TITRE	Suivi biosédimentaire sur le site du parc pilote éolien offshore flottant Provence Grand Large – Etat de référence
NOMBRE DE PAGES (hors annexes)	65
NOMBRE D'ANNEXES	1

VERSION

RÉFÉRENCE	VERSION	DATE	RÉDACTEUR
220438M	V1-draft	26.08.2022	STH/VRO/LPE
220438M	V2	16.09.2022	STH/VRO/LPE
220438M	V3	25.10.2022	STH/VRO

SOMMAIRE

1. Introduction	7
1.1. Le projet Provence Grand Large	7
1.2. Les objectifs de l'étude	8
2. Matériels et méthodes	9
2.1. Organisation et déroulement de la campagne d'échantillonnage	9
2.1.1. Déroulement de la campagne	9
2.1.2. Moyens nautiques	9
2.1.3. Personnel embarqué	12
2.1.4. Stratégie d'échantillonnage	12
2.2. Acquisition des données et traitement des résultats	15
2.2.1. Colonne d'eau	15
2.2.2. Matrice sédimentaire	15
2.2.3. Peuplements benthiques	25
3. Résultats et discussion	33
3.1. Profils CTD dans la colonne d'eau	33
3.2. Caractéristiques des sédiments	36
3.2.1. Etude de la structure du sédiment	36
3.2.2. Contaminants chimiques	40
3.2.3. Microbiologie : <i>Escherichia coli</i>	52
3.3. Caractéristiques du benthos	53
3.3.1. Aspect des échantillons	53
3.3.2. Structure du benthos	54
3.3.3. Composition de la communauté benthique	64
4. Synthèse et conclusions	69
4.1. Colonne d'eau	69
4.2. Sédiments	69
4.3. Peuplement benthique	70
5. Références	72

Figures

<i>Figure 1. Localisation du parcours du câble et de l'emplacement des trois éoliennes PGL</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2. Rapport de clôture de l'inspection IMCA du navire GGIX le 4/4/2022</i>	<i>11</i>
<i>Figure 3. Fiche technique du bateau utilisé pour la campagne, GGIX.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4. Localisation des stations d'échantillonnage biosédimentaire 2013 (Étude InVivo).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 5. Plan d'échantillonnage de la campagne de suivi biosédimentaire 2022.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 6. De gauche à droite, paramétrage, préparation et utilisation de la sonde.</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7. Opérations de prélèvement des sédiments</i>	<i>16</i>
<i>Figure 8. Méthodes de prélèvement du benthos de substrats meubles.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 9. Modèle des Indices Biotiques (Glémarec & Hily, 1981) montrant l'importance relative des différents groupes écologiques le long du gradient de perturbations croissantes</i>	<i>30</i>
<i>Figure 10. Profils de température et salinité mesurés sur les 6 stations (2022).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 11. Profils d'oxygène dissous, turbidité et pH mesurés sur les 6 stations (2022).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 12. Photographies des échantillons de sédiments prélevés dans les 6 stations (2022)</i>	<i>36</i>
<i>Figure 13. Distributions granulométriques des sédiments prélevés sur les 6 stations (2022)</i>	<i>37</i>
<i>Figure 14. IEO obtenus sur les 6 stations</i>	<i>39</i>
<i>Figure 15. Teneurs en aluminium sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 16. Teneurs en arsenic sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 17. Teneurs en cadmium sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 18. Teneurs en chrome sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 19. Teneurs en cuivre sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 20. Teneurs en mercure sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)</i>	<i>45</i>
<i>Figure 21. Teneurs en nickel sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)</i>	<i>46</i>
<i>Figure 22. Teneurs en plomb sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 23. Teneurs en zinc sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 24. Aperçu des refus de tamis sur les 6 stations (Juin 2022)</i>	<i>54</i>
<i>Figure 25. Variations de la richesse spécifique des 6 stations (Juin 2022)</i>	<i>56</i>
<i>Figure 26. Variation de la densité moyenne sur les 6 stations (Juin 2022).....</i>	<i>57</i>

<i>Figure 27. Variation de la biomasse moyenne sur les 6 stations (Juin 2022)</i>	<i>58</i>
<i>Figure 28. Variation des indices de Shannon et d'équitabilité du benthos sur les 6 stations (2022) ...</i>	<i>59</i>
<i>Figure 29. Variation de l'indice trophique dans les 6 stations (2022)</i>	<i>60</i>
<i>Figure 30. Répartition des groupes écologiques et variation de l'Ambi sur les 6 stations (2022)</i>	<i>61</i>
<i>Figure 31. Variation du M-Ambi dans les 6 stations (2022).....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 32. Répartition des groupes écologiques et variation du bentix dans les 6 stations (2022).....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 33. Planche photo illustrative de plusieurs espèces prélevées dans les 6 stations en 2022</i>	<i>66</i>

Tableaux

<i>Tableau 1. Déroulé de la campagne d'échantillonnage</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 2. Personnel embarqué</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 3. Position GPS des stations d'échantillonnage.</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 4. Limites de quantification (LQ) et de détection (LD) de LPL</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 5. Classification de la granulométrie des sédiments marins établie par Créocéan d'après Bellair et Pomerol (1977, modifié).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 6. Faciès sédimentaire d'après Ibouily (1981).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 7. Valeurs de références COT (modifié d'après Licari,1998)</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 8. Valeurs de références Azote Total (modifié d'après Licari,1998)</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 9. Valeurs de référence et classe d'enrichissement organique du sédiment (Alzieu, 2003) et échelle IEO</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 10. Valeurs de référence utilisées pour interpréter les concentrations en ETM dans les sédiments</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 11. Etats de référence pour les métaux traces applicables en Méditerranée (RLM, 2002)</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 12. Valeurs de référence utilisées pour interpréter les concentrations en HAP dans les sédiments</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 13. Etats de référence pour les HAP applicable en Méditerranée (RLM, 2002)</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 14. Niveaux de référence des PCBs (µg/kg MS)</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 15. Etats de référence pour les HAP applicable en Méditerranée (RLM, 2002)</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 16. Niveaux de référence du TBT (µg/kg MS)</i>	<i>24</i>

Tableau 17. Grille d'évaluation des résultats de l'AMBI.....	29
Tableau 18. Correspondances entre les valeurs du Bentix et les différents états écologiques définis par la Directive Cadre Eau (d'après SImboura et Zenetos, 2002)	31
Tableau 19. Synthèse des valeurs d'EcoQ des différents indices de Shannon (Molvær et al., 1997), l'indice trophique (Licari, 1998), l'AMBI (Borja et al., 2003) et le M-AMBI (Borja et al. 2007).....	31
Tableau 20. Résultats de l'étude InVivo 2013	32
Tableau 21. Caractéristiques des sédiments prélevés sur les 6 stations (juin 2022)	36
Tableau 22. Distributions granulométriques des 6 stations (2022).....	37
Tableau 23. Résultats des analyses des sédiments des 6 stations (2022) classés selon Licari, 1998	38
Tableau 24. Concentrations des éléments traces métalliques mesurées sur les 6 stations (2022)	49
Tableau 25. Teneurs des HAPs analysés sur les 6 stations (2022).....	50
Tableau 26. Résultats des PCB sur les 6 stations (2022).....	51
Tableau 27. Résultats des biocides sur les 6 stations (2022)	51
Tableau 28. Résultats des analyses bactériologiques sur les 6 stations (2022)	52
Tableau 29. Description des prélèvements de benthos sur les 6 stations (2022)	53
Tableau 30. Composantes principales du peuplement benthique des 6 stations (2022)	54
Tableau 31. Taxons identifiés sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022).....	55
Tableau 32. Indices biologiques calculés pour les 6 stations (Juin 2022)	58
Tableau 33. Répartition des groupes écologiques selon les stations et variation de l'Ambi	61
Tableau 34. Répartition des groupes écologiques et variation du bentix dans les 6 stations (2022) ..	62
Tableau 35. Espèces dominantes en termes d'abondance dans les 6 stations (2022)	64
Tableau 36. Espèces dominantes en termes d'abondance dans les stations échantillonnées en 2013	65

1. Introduction

La demande énergétique mondiale est l'un des grands enjeux posés par la lutte contre le changement climatique. D'après les prévisions de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) elle devrait augmenter d'un tiers à l'horizon 2035 et pourrait doubler en 2050. En complément de l'énergie fournie par les combustibles fossiles, une partie de la consommation d'énergie devra être couverte par les sources d'énergie renouvelable.

En cohérence avec la politique énergétique européenne, la France a engagé un programme de lutte contre le changement climatique et s'est fixé pour objectif de porter la part des énergies renouvelables à 40 % de la consommation électrique d'ici à 2030. Au sein de cet objectif, l'éolien en mer a été retenu par le Gouvernement français comme l'une des filières majeures pour sécuriser le futur mix énergétique du pays et ce, grâce au développement de projets éoliens posés et flottants au large des côtes françaises.

Dans ce contexte, le parc pilote d'éoliennes flottantes Provence Grand Large (PGL) est un projet innovant à l'échelle mondiale de par sa technologie et qui présente de nombreux atouts sur le plan environnemental.

1.1. Le projet Provence Grand Large

Le projet de parc pilote d'éoliennes flottantes Provence Grand Large (PGL) est porté par une société de projet dédiée, dénommée Parc Eolien Offshore de Provence Grand Large, détenue par EDF Renouvelables, filiale à 100 % du groupe EDF et Maple Power (une co-entreprise canadienne entre Enbridge et CCP Investment).

Cette société est le maître d'ouvrage du parc pilote jusqu'au connecteur sous-marin inclus, pour les phases de construction, d'exploitation et de démantèlement. La liaison de raccordement électrique depuis le connecteur sous-marin jusqu'au poste de livraison électrique à terre est de la compétence du gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE.

Le projet PGL est situé en Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), dans le département des Bouches-du-Rhône dans la zone de Faraman, à environ 17 km de la plage Napoléon à Port-Saint-Louis-du-Rhône où se situe le point d'atterrage du câble de raccordement maritime (sous tension de référence de 63 000 volts) au réseau public de transport d'électricité à terre.

Le parc est composé de trois éoliennes alignées et espacées de 920 m au sein de la zone de concession où les fonds marins sont compris entre 95,7 m et 101,7 m de profondeur (Figure 1).

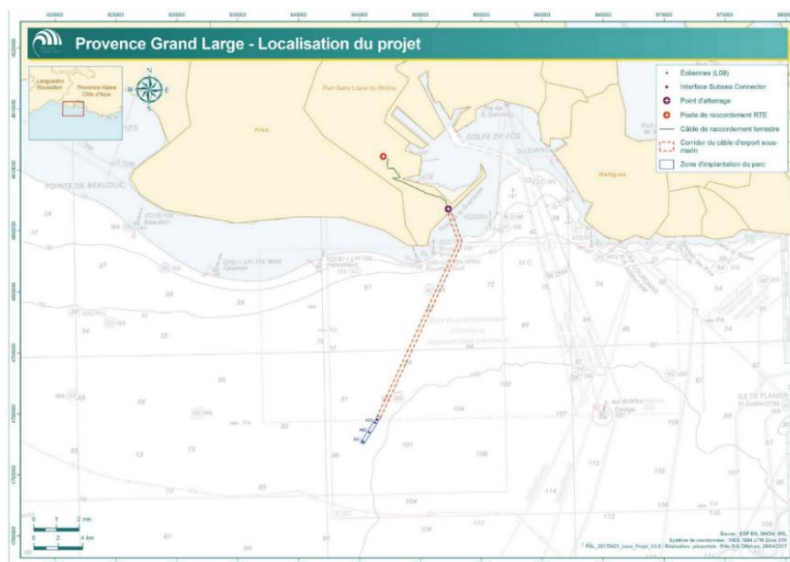


Figure 1. Localisation du parcours du câble et de l'emplacement des trois éoliennes PGL

Le design des éoliennes flottantes de PGL est unique : les flotteurs, dits "à lignes d'ancrage tendues" (ou TLP de l'anglais "Tension Leg Platform"), ont une largeur à la base d'environ 80 m et une hauteur d'environ 45 m. Ces fondations flottantes intègrent des principes conceptuels permettant d'éviter et réduire l'impact sur l'environnement et les usages (navigation, pêche...) : une excursion de l'éolienne flottante réduite en raison

d'un rayon d'ancrage limité et du système de lignes d'ancrages tendues ; une emprise limitée sur les habitats marins car les lignes d'ancrage ne reposent pas sur les fonds. Les lignes d'ancrage sont fixées au fond marin par le biais d'ancres à succion ou hybrides gravitaire/succion (3 ancres par éolienne, chaque ancre faisant environ 8 mètres de diamètre et étant enfouie sur une profondeur de 10 mètres de sédiment).

Les éoliennes sont raccordées entre elles par des câbles électriques inter-éoliennes dynamiques, formant un réseau électrique interne. Au sein même du parc, chaque liaison dynamique reliant deux éoliennes aura une longueur comprise entre 1 300 m et 1 500 m environ. Seule une partie de ce câble électrique repose sur le fond marin (sur une longueur totale cumulée d'environ 2,5 km). Cette partie du câble en contact du fond n'est pas enfouie : elle ne subit aucune traction/poussée et est immobile sur l'horizontale (les éoliennes étant ancrées en point fixe par le système à succion présenté ci-dessus). Le câble inter-éolienne est connecté au câble d'export par un joint usine (=connecteur sous-marin). Ce réseau interne est relié, en une seule grappe, à un câble électrique d'export transportant l'énergie vers la terre par un connecteur sous-marin. La distance totale du raccordement est de 28 km environ, dont 19 km en mer.

1.2. Les objectifs de l'étude

Le projet de parc pilote d'éoliennes flottantes est une innovation qui vise à mettre en œuvre une nouvelle source de production d'énergie renouvelable en conditions réelles, afin de pouvoir la déployer ensuite à plus grande échelle. Il s'agit à la fois de démontrer la faisabilité technique et économique de cette technologie et d'expérimenter des solutions innovantes de développement durable. Aussi, au regard des enjeux environnementaux notamment du milieu marin, l'éolien flottant est intrinsèquement une mesure d'évitement des impacts du projet par rapport à d'autres technologies d'éolien offshore posé. En effet, l'essence des technologies éoliennes flottantes est de :

- ▶ s'affranchir des contraintes de profondeur des fonds afin d'être déployées plus facilement dans des zones de moindre impact environnemental ;
- ▶ s'affranchir de travaux lourds en mer puisque les structures seront simplement ancrées au sol ;
- ▶ de raccourcir la durée des travaux d'installation en mer.

Par conséquent, la localisation de la zone d'implantation du projet (isobathe de 100 m), la faible emprise sur le domaine maritime autour de l'éolienne (quelques dizaines de mètres), les ancres sans frottement sur le fond marin et l'ensouillage du câble d'export représentent autant d'atouts de cette technologie innovante pour protéger la biodiversité.

Plus spécifiquement, afin d'évaluer l'impact du projet sur les communautés benthiques présentes au niveau du parc éolien, l'objectif de l'étude est de réaliser le suivi biosédimentaire, avant l'installation et au moment de la mise en service des équipements du parc, puis un an après. Ce suivi s'inscrit dans le cadre de l'autorisation au titre de la loi sur l'eau et doit permettre d'apprécier l'éventuelle évolution des peuplements benthiques dans la zone du parc et dans sa zone d'influence.

Ce premier rapport constitue l'état de référence avant travaux.

2. Matériels et méthodes

2.1. Organisation et déroulement de la campagne d'échantillonnage

2.1.1. Déroulement de la campagne

Le tableau ci-après décrit de manière synthétique le déroulement des opérations effectuées pour la réalisation de la campagne d'échantillonnage.

A noter que la mesure des paramètres environnementaux n'ayant pas pu être réalisée lors de la campagne d'échantillonnage des sédiments et du benthos, une deuxième campagne a été effectuée uniquement à cette fin.

Tableau 1. Déroulé de la campagne d'échantillonnage

#	Date	Activités
1	30/05/2022	Organisation du personnel Créocéan (agence de La Seyne s/mer), préparation matériel
2	31/05/2022	Organisation du personnel Créocéan, préparation matériel Lancement de la mobilisation du bateau GGIX par iXblue
3	01/06/2022	Mobilisation du personnel vers Port de Bouc Transit du bateau depuis le port de La Ciotat Formalités administratives, chargement bateau, embarquement du personnel, session HSE Transit vers zone de prélèvement (tracé du raccordement électrique du parc éolien) Prélèvement de sédiments et benthos des 9 stations RTE Préparation glacières et mise au frais des échantillons Transit vers le port, démobilisation, rédaction du DPR
4	02/06/2022	Embarquement du personnel, accueil du client EDF (Mme E. Gouze), session HSE Transit vers zone de prélèvement (parc éolien) Prélèvement de sédiments, benthos et eau des 6 stations EDF Transit vers le port, conditionnements échantillons Démobilisation, préparation glacières, transit vers agence d'expédition (Marignane) Trajet vers bureau (La Seyne s/Mer), rédaction du DPR, transit du bateau au port de la Ciotat
5	24/06/2022	Organisation du personnel Créocéan, préparation matériel et équipements, Organisation avec le pilote du bateau Gabriel II
6	27/06/2021	Mobilisation du personnel Créocéan (agence de Montpellier) vers Port-Saint-Louis-du-Rhône Préparation des équipements à bord du bateau, briefing technique et sécurité Transit vers point C7 (-6m), profil de sonde, vérification des données Transit vers zone du parc éolien, profils de sonde des 6 stations EDF Transit vers zone du raccordement électrique, profils de sonde des 9 stations RTE Transit vers le port, démobilisation des équipements et du personnel

2.1.2. Moyens nautiques

Le prestataire de services nautiques choisi pour la réalisation de la mission est la société iXblue :

iXblue
46, quai François Mitterand
13600 La Ciotat, France
T. 04 42 71 33 33 – www.ixblue.com

iXblue est une société française de techniques de pointe et des solutions innovantes à destination du secteur maritime civil et militaire ainsi que spatial. La société emploie environ 650 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 100 millions € dont 80 % à l'international. Elle dispose de dix établissements opérationnels en France dont un site naval à La Ciotat.

Le navire GGIX proposé pour la prestation, dont la fiche technique est illustrée dans la figure ci-dessous (Figure 3) répond à la réglementation nationale française de la Division 223 B. Il est sous pavillon français et inscrit au premier registre en navigation côtière (limité à 20 mN des côtes, extension possible sous dérogation). Il est donc armé au commerce et l'équipage classique est composé de deux marins professionnels.

Le navire est basé à La Ciotat, sa vitesse de croisière de 20 noeuds permet une arrivée rapide sur site. Le catamaran dispose d'un pont arrière de 21 m² et d'un laboratoire intérieur de même surface permettant la réalisation des opérations dans de bonnes conditions de qualité et sécurité. Le bateau est équipé d'un GPS RAY marin qui lui permet de se positionner au-dessus du point de prélèvement avec une précision de quelques mètres.

Dans le cadre de sa politique Santé, Sécurité et Environnement, la société iXblue Division Opérations Marines est certifiée MASE depuis 2019. En conformité avec les exigences HSE du cahier des charges, l'inspection de la *International Marine Contractors Association* (IMCA) pour petits navires, la première de ce type pour le navire utilisé, a été effectuée le 04/04/2022 par le Capitaine Raymond Gauvain de la société Navigau Consulting. Le rapport délivré à la clôture de la visite (Close-out meeting, Figure 2) indiquait les conditions satisfaisantes du navire et la suggestion d'implémenter le Document Unique de Prevention (DUP) par ailleurs imposé par la mise en conformité HSE du maître d'ouvrage. Le rapport d'inspection complet (Common Marine Inspection Document, CMID), délivré le 9 avril 2022 et téléchargeable à tout moment sur le site IMCA, détaille tous les points des 22 sections faisant l'objet de l'inspection.

CMID **IMCA**

CLOSE-OUT MEETING
Master's comments on the eCMID/eMSW vessel inspection

Vessel name: GGIX

Date and place of inspection: 4 April 2022 LACIOTAT B600

Name of vessel inspector and company: cdt Raymond GAUVAIN

Comments

- x Insurance for Hull & Machinery to be confirmed.
- x This is the 1st eMSW audit.
- x New formal procedure to be implemented.
- x Vessel operates daily from base.
- x Vessel in satisfactory condition.

ixblue
Master's signature and vessel's official stamp
ZONE NORD
Capitaine François Mitterrand
Grand La Ciotat
Apr 4 12 13 23
133 132 06 86 49
133 134 1552 Fax 09 433 185 429
www.ixbluecmid.com
133 185 121 00982
133 185 121 00982

Inspector's signature

Template updated October 2018

PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE
SUIVI BIOSEDIMENTAIRE SUR LE SITE DU PARC PILOTE EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT PROVENCE GRAND LARGE –
ETAT DE REFERENCE

Figure 2. Rapport de clôture de l'inspection IMCA du navire GGIX le 4/4/2022



GGIX

Workboat and Coastal survey vessel

As a ship-owner ixblue operates its own fleet and employs professional seamen and classified professional divers. The catamaran GGIX, an aluminium diving support vessel, was refitted to become a versatile multipurpose workboat. It offers large open deck space as well as a sheltered room for scientific equipment and computers. The GGIX is operated to support ixblue activities and is also proposed to support any client activities.

APPLICATIONS

- Survey vessel
- Shallow seismic
- Sonar deployment
- Bathymetry
- Sediment sampling
- Magnetometer deployment
- Workboat
- diving operations
- Cable layout
- Support vessel for ROV and AUV
- Moorings installation
- Bury installation
- ROV and AUV deployment
- Transport vessel
- People: 18 PAX + 2 crew
- Deck capacity max: 40sqm
- Open deck: 25sqm
- Sheltered deck: 15sqm

EQUIPMENT AVAILABLE

- Hydraulic Crane (CMU: 1t)
- Hydraulic capstan (CMU: 1t)
- Surface positioning: CNSS receiver + differential corrections (RTK or PPK)
- Underwater positioning
- ixblue USBL Gaps
- ixblue USBL Posidonia
- SBP
- ixblue Echoes 3,500 and 10,000
- MBES

matthieu.baudin@ixblue.com | www.ixblue.com
 EMCA +33 1 30 08 98 88 | Americas +1 781 937 8800 | ADAC +45 6747 4992

ixblue

General

Vessel Name	GGIX
Imat	TL790688 – 16/04/1991
Classification	3
Built	1991
Port / Flag	Toulon - FR

Dimensions

Length	14.7 m
Width	4.99 m
Draft	1.2 m
Deck Load	4 Tons 21m² work Deck – 20m² work room

Material of construction	Aluminium
--------------------------	-----------

Accommodation

Licensed for	18 Pax + 2 crew
Cabins	None
Electrical Systems	12 volt / 24 volt / 220 volt / 380 volts

Machinery

Main engines	2x425 CV Cumins
Cruising speed	20 kts
Maximum Speed	24 kts
Tank Capacity	800 ltr

Control and navigation

Radars	Yes
GPS Navigator	Yes
SBES	Yes
AIS	Yes

Communications

VHF	3
-----	---

Safety

Liferaft	1x20 pers – Class III
Safety jacket	22

Other

Crane	Crane FASSI F40 : 1T/4m, 835kg/4.85m
Overside Pole	3 poles (1 starboard side, 1 portside, 1 aft)

Figure 3. Fiche technique du bateau utilisé pour la campagne, GGIX

2.1.3. Personnel embarqué

Le tableau ci-après présente la liste du personnel embarqué pour cette campagne.

Tableau 2. Personnel embarqué

SOCIÉTÉ	NOM	ROLE	DATE
PERSONNEL SCIENTIFIQUE			
Créocéan	Claude Réveret	Expert environnement marin	1-2/06/2022
Créocéan	Lucie Malatrait	Chargée d'étude environnement marin	1-2/06/2022
Créocéan	Romain Le Gall	Ecologue marin	27/06/2022
EQUIPAGE DU NAVIRE			
IXBLUE	Ilios Papoulias	Responsable secteur maritime	1-2/06/2022
IXBLUE	Eric Chaumont	Marin de la navigation maritime	1-2/06/2022
IXBLUE	Stéphane Soler	Marin de la navigation maritime	1-2/06/2022
-	Anthony Faiges	Capitaine	27/06/2022
PERSONNEL MAITRE D'OUVRAGE			
EDF RENOUVELABLES	Emma Gouze	Chef de projet environnement	02/06/2022

Les deux équipes ont assuré au quotidien :

- ▶ le bon fonctionnement du navire,
- ▶ la bonne manipulation des équipements,
- ▶ l'acquisition des données,
- ▶ la traçabilité des échantillons,
- ▶ la constitution d'une base de données,
- ▶ la sauvegarde de l'ensemble des données (photos, suivi des activités, observations visuelles, etc.)

Le chef des opérations était en charge de coordonner les équipes présentes à bord et d'ajuster les opérations avec le capitaine du navire afin de prendre en compte les aléas du terrain.

A noter que tout le personnel embarqué a suivi la formation BOSIET en cours de validité au moment de la réalisation de la campagne en mer.

2.1.4. Stratégie d'échantillonnage

Le protocole de suivi biosédimentaire mis en œuvre est de type Before After Control Impact (BACI), comprenant :

- ▶ un état de référence avant travaux sur l'ensemble des stations ;
- ▶ une station de référence par grand type d'habitat (sur la base de la classification EUNIS).

Six stations ont été échantillonnées avec pour objectif :

- ▶ de rester dans le périmètre du parc, sauf pour la station de référence,
- ▶ de se situer au niveau de chacune de 3 éoliennes,
- ▶ de positionner deux stations à plus de 2 km des éoliennes pour suivre un gradient de distance aux structures,
- ▶ de conserver, dans la mesure du possible, des stations échantillonnées lors de l'étude d'état initial In Vivo (2013), afin de pouvoir étudier la dynamique des peuplements benthiques sur le long terme.
- ▶ de placer la station de référence, en dehors du périmètre du parc, sur un faciès sédimentaire et sur une ligne bathymétrique équivalents à ceux où est installée la ferme pilote.

La Figure 4 ci-dessous illustre le positionnement des stations d'échantillonnage pour l'ensemble du projet PGL (au niveau du parc éolien et de son raccordement électrique) de la campagne menée en 2013 dans le cadre de l'étude d'impact environnemental du projet sur les fonds marins.

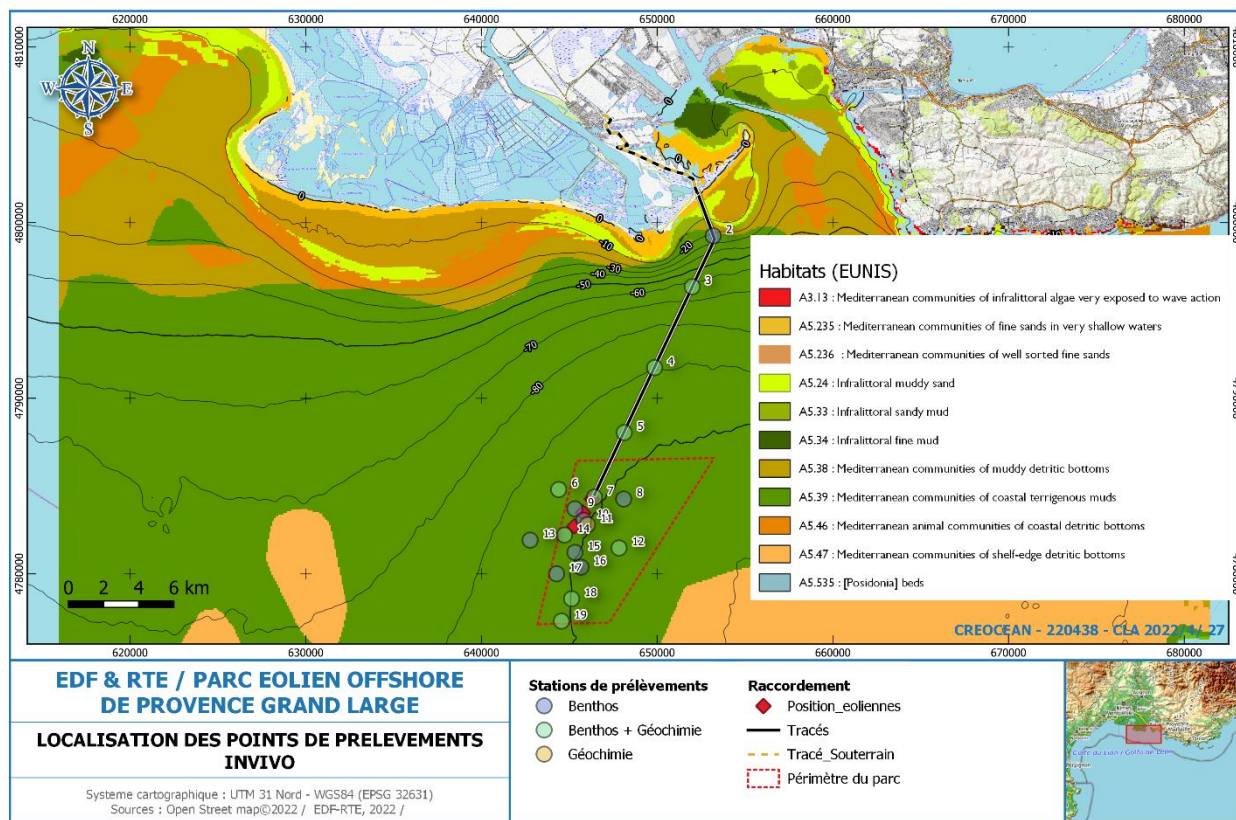


Figure 4. Localisation des stations d'échantillonnage biosédimentaire 2013 (Étude InVivo)

Toute la zone du parc éolien offshore est située sur la biocénose des vases terrigènes côtières (EUNIS A5.39). Une station de référence unique, caractéristique de ce faciès, est donc choisie.

Les stations d'échantillonnage ont été organisées comme suit :

- ▶ Stations 2, 3 et 4, situées à proximité de l'emplacement des trois éoliennes, toutefois avec un décalage vers l'ouest de 150 m afin de respecter la distance de sécurité par rapport aux ouvrages immergés et éviter tout risque de croche sur les structures immergées ;
- ▶ Stations 1 et 5, en dehors de l'emplacement immédiat des éoliennes, distantes d'environ 2 km de part et d'autre (à l'Est et à l'Ouest) de la zone du parc, et correspondantes aux stations 8 et 13 définies dans le plan d'échantillonnage de l'étude InVivo-2013 ;
- ▶ Station 6 de référence de l'habitat (EUNIS A5.39), localisée à environ 5 km au sud du parc, correspondante à la station 19 InVivo-2013.

Ces stations d'échantillonnage seront les mêmes pour l'établissement de l'état de référence (avant installation) et pour le suivi en phase d'exploitation (après installation).

Le tableau suivant présente les coordonnées des six stations et la figure illustre le plan d'échantillonnage tel que décrit ci-dessus.

PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE
SUIVI BIOSEDIMENTAIRE SUR LE SITE DU PARC PILOTE EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT PROVENCE GRAND LARGE –
ETAT DE REFERENCE

Tableau 3. Position GPS des stations d'échantillonnage.

STATION	UTM 31 Nord - WGS84		DMD (WGS 84)		Profondeur (m)
	X (m)	Y (m)	Longitude	Latitude	Z (m)
E01 (= station 8 InVivo-2013)	648090,9	4784263,6	4° 49.36100' E	43° 11.79800' N	-102
E02	646117,6	4784259,3	4° 47.90438' E	43° 11.81873' N	-99
E03	645621,6	4783473,8	4° 47.52590' E	43° 11.40030' N	-99
E04	645122,6	4782700,7	4° 47.14544' E	43° 10.98853' N	-99
E05 (= station 13 InVivo-2013)	642767,0	4781920,2	4° 45.39500' E	43° 10.59400' N	-95
E06-réf (= station 19 InVivo-2013)	644552,1	4777310,0	4° 46.64000' E	43° 8.08400' N	-99

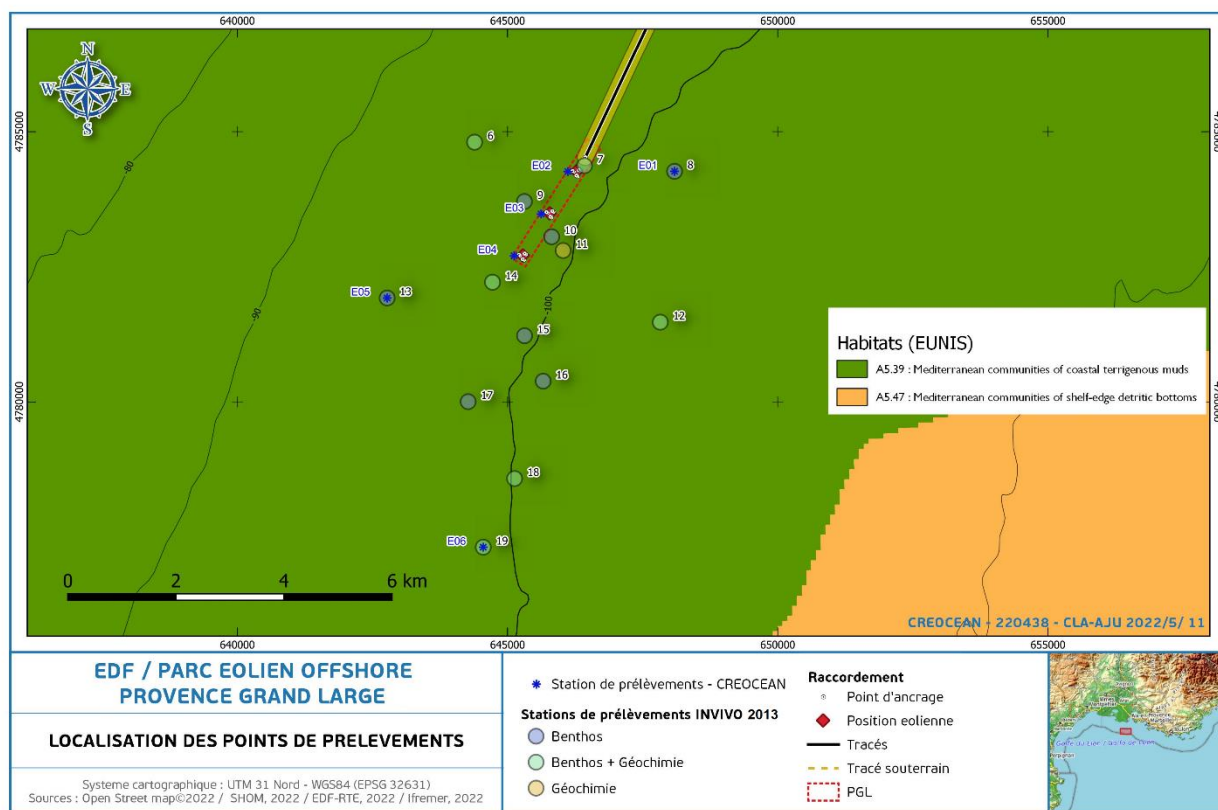


Figure 5. Plan d'échantillonnage de la campagne de suivi biosédimentaire 2022

A noter que les stations 8 (E01) et 13 (E05) de la campagne réalisée en 2013 par InVivo ont fait l'objet uniquement d'échantillonnage de benthos, tandis que pour la station 19 (E06) des prélèvements de sédiment avaient également été effectués.

2.2. Acquisition des données et traitement des résultats

2.2.1. Colonne d'eau

La mesure des paramètres environnementaux – température, salinité, pH, oxygène dissous et turbidité – a été effectuée avec une sonde RBR Maestro équipée de capteurs. La sonde, lestée et descendue (15-20 cm/sec) jusqu'au fond à l'aide d'un treuil, est paramétrée pour enregistrer les données tous les trois secondes, sur toute la colonne d'eau. Ces données sont enregistrées dans un fichier via le logiciel Ruskin et ensuite exportées dans le format souhaité pour leur exploitation. La figure 6 ci-dessous illustre différentes étapes de l'utilisation de l'équipement.

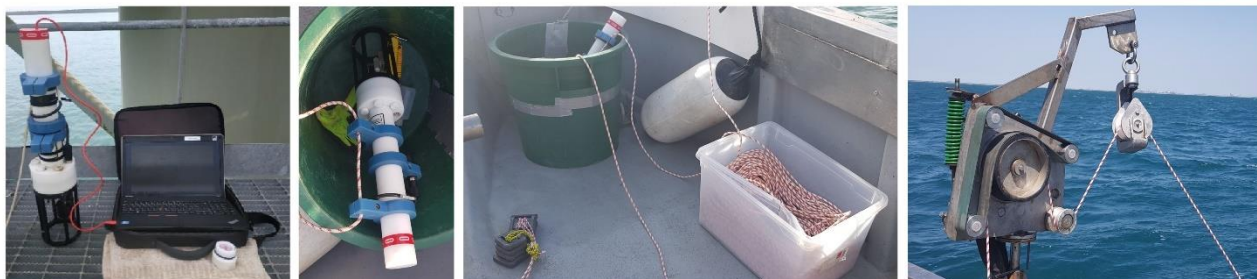


Figure 6. De gauche à droite, paramétrage, préparation et utilisation de la sonde.

Toutes les stations ont fait l'objet d'une acquisition de ces paramètres lors d'une campagne dédiée, qui a eu lieu trois semaines après la campagne de suivi biosédimentaire, n'ayant pu être réalisée lors de cette dernière.

2.2.2. Matrice sédimentaire

Les sédiments prélevés dans la zone d'étude ont fait l'objet d'une analyse physico-chimique, dans le but d'établir leur état initial avant travaux.

2.2.2.1. Mode opératoire du prélèvement

Les sédiments superficiels ont été échantillonnés avec une benne Van Veen en acier inoxydable d'une surface de prélèvement de 0,1 m². Pour chaque station un seul prélèvement est réalisé : l'outil est déployé une fois afin de collecter une quantité suffisante de sédiments pour effectuer des analyses physiques et chimiques. Une fois réalisées toutes les vérifications au niveau du treuil et de l'équipement, la benne est soulevée de son support et accompagnée jusqu'à ce qu'elle passe le franc-bord du bateau et ensuite descendue jusqu'au fond. Lorsque la benne atteint le sédiment, elle s'y enfonce (avec une pénétration de maximum 30 cm) et la fermeture des mâchoires est déclenchée automatiquement par la traction exercée par le câble. La benne est alors remontée sur le bateau et une fois à bord, son contenu est déversé dans un bac pour faciliter la manipulation du sédiment (Figure 7).

Les illustrations photographiques et les caractéristiques des échantillons prélevés dans chaque station sont reportées dans le chapitre 3. Résultats et discussion (cf. Figure 12 et Tableau 21).

Le sédiment pour les analyses physico-chimiques est recueilli dans les 5 cm supérieurs de la benne et conditionné dans des flacons en verre fournis par le laboratoire d'analyse. Chaque flacon est dûment identifié avec le nom de la station et la date d'échantillonnage. Les flacons sont ensuite stockés au frais.



Figure 7. Opérations de prélèvement des sédiments

2.2.2.2. Analyse des sédiments

Les échantillons sont stockés dans des boîtes isothermes avec des plaques eutectiques afin qu'ils restent à température jusqu'à leur arrivée au laboratoire. Lors de leur envoi au laboratoire, les échantillons sont accompagnés de bordereaux assurant la chaîne de traçabilité. Dès réception des échantillons, le laboratoire d'analyse appose sa signature sur le formulaire et envoie une copie numérisée par courrier électronique.

L'analyse des paramètres physico-chimiques des échantillons de sédiments a été réalisée par le Laboratoire des Pyrénées et des Landes (LPL) :

LPL
88 rues des écoles
64150 LAGOR, France

PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE
SUIVI BIOSEDIMENTAIRE SUR LE SITE DU PARC PILOTE EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT PROVENCE GRAND LARGE –
ETAT DE REFERENCE

Le laboratoire est certifié par le Comité Français d'Accréditation des laboratoires. L'accréditation COFRAC est conforme à la norme internationale ISO / IEC 17025 : 2005 qui démontre une compétence technique pour un domaine défini et le fonctionnement d'un système de gestion de la qualité de laboratoire (cf. communiqué conjoint IAF / ILAC / ISO de janvier 2009).

Ces analyses correspondent à la Circulaire 2000-62 du 14 juin 2000 relative aux conditions d'utilisation du référentiel de qualité des sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire :

- ▶ Granulométrie (laser à pas variable 0 à 2 000 micromètres)
- ▶ Paramètres physiques : matières sèches (%), densité, teneur en aluminium (sur la fraction inférieure à 2 mm), matière organique (exprimée sous forme de carbone organique total (COT) sur la fraction inférieure à 2 mm)
- ▶ Nutriments : Azote Total Kjeldahl (NTK), phosphore total (PT)
- ▶ Métaux lourds : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, fer, mercure, nickel, plomb, zinc
- ▶ 16 HAPs prioritaires et HAP totaux
- ▶ Organochlorés : PCB totaux et ses congénères 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180
- ▶ Organostanniques : tributylétain (TBT), DBT, MBT.

Les Limites de Quantification (LQ) et de Détection (LD) du laboratoire LPL sont données dans le tableau suivant :

Tableau 4. Limites de quantification (LQ) et de détection (LD) de LPL

Paramètre	Unité	Norme	LQ	LD
Aluminium	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	1	0,333
Arsenic	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	0,5	0,167
Cadmium	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	0,2	0,067
Chrome	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	0,5	0,167
Cuivre	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	0,5	0,167
Fer	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	1	0,333
Mercure	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO04	0,05	0,017
Nickel	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	1	0,333
Plomb	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	0,5	0,167
Zinc	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	1	0,333
HAP	µg/kg MS	MI : MAO/MO43 en GC-MS	10	3,333
Carbone organique total	g/kg MS	NF EN 13137	0,2	0,067
Matière sèche totale	% de M.B.	NF EN 12880	0,1	0,033
Azote total	g/kg MS	MI : CHR/MO13	0,05	0,017
Phosphore total	mg/kg MS	MI : MAM/MO03 et MAM/MO01	20	6,667
Tributylétain (TBT), DBT, MBT	µg Sn/kg MS	XP T 90-250	2	
PCB 28, 52	µg/kg MS	MI : MAO/MO43 en GC-MS	5	1,667
PCB 101, 118, 138, 153, 180	µg/kg MS	MI : MAO/MO43 en GC-MS	10	3,333
Granulométrie laser		ISO 13320		

2.2.2.3. Exploitation et interprétation des résultats

Structure physique du sédiment

La distribution granulométrique permet de déterminer la capacité du sédiment :

- à accueillir des espèces benthiques (fluidité et compacité du sédiment),
- à accumuler des contaminants chimiques (métaux lourds) potentiellement toxiques pour la faune et la flore marines.

L'analyse de la courbe granulométrique (répartition des différentes classes granulométriques) et des paramètres granulométriques permet de mettre en évidence la dominance (ou non) d'une classe granulométrique, pour comprendre la mise en place du sédiment (envasement superficiel ou dans la masse du sédiment, etc.). Les analyses effectuées en laboratoire ont été réalisées par granulométrie laser sur la fraction entre 0 et 2 mm permettant de définir la granulométrie et la composition du sédiment.

La classification de la granulométrie des sédiments marins par Créocéan se base sur la classification de Bellair et Pomerol (1977) telle que :

Tableau 5. Classification de la granulométrie des sédiments marins établie par Créocéan d'après Bellair et Pomerol (1977, modifié)

(mm)	
20	Galet Bloc
2	Gravier
0,5	Sable grossier
0,250	Sable moyen
0,063	Sable fin
0,002	Lutites
	Argile

Fraction Fine

La granulométrie permet d'expliquer la variabilité naturelle des éléments traces dans les sédiments. Plus le pourcentage de la fraction fine (particules inférieures à 63 µm) est important, plus la capacité du sédiment à absorber les éléments hydrophobes (dont contaminants) est forte.

Afin d'évaluer le pourcentage d'envasement d'une zone, Ibouily (1981) a proposé une classification des sédiments basée sur le pourcentage de particules fines, c'est-à-dire de particules dont la taille est inférieure à 63 µm :

Tableau 6. Faciès sédimentaire d'après Ibouily (1981)

Fraction fine < 10%	Sables purs
10% ≤ fraction fine < 20%	Sables peu envasés
20% ≤ fraction fine < 40%	Sables moyennement envasés
40% ≤ fraction fine < 60%	Sédiment très envasé à dominante de sables
60% ≤ fraction fine < 80%	Sédiment très envasé à dominante de vases
Fraction fine ≥ 80%	Vases pures

Eléments nutritifs et matière organique

► **Analyse du Carbone Organique Total (COT)**

Le COT provient d'apports continentaux et / ou de décomposition d'animaux et de végétaux morts. Cette matière organique est généralement associée aux particules fines en suspension qui se déposent sur les fonds. La dégradation bactérienne consomme de l'oxygène : elle peut être incomplète lorsque les apports en matière organique sont trop importants par rapport à l'oxygène disponible. Ainsi, un fort taux en matière organique ou en carbone est le signe d'une minéralisation incomplète, liée à un déficit en oxygène par rapport à la quantité de matière à dégrader.

Les teneurs en COT mesurées sont comparées aux valeurs seuils de COT pour les sédiments marins (Licari, 1998) présentées dans le tableau suivant.

Tableau 7. Valeurs de références COT (modifié d'après Licari, 1998)

	Carbone Organique Total (g(C)/kg MS)	
	Taux de fraction fine	
	(< 63 µm) < 60%	≥ 60%
Faible enrichissement organique	< 4,4	< 7,5
Enrichissement organique moyen	4,4 – 7,5	7,5 8 – 13,3
Fort enrichissement organique	7,5 – 15,2	13,3 – 50
Très fort enrichissement organique	> 15,2	≤ 50

► **Analyse de l'azote**

L'azote provient principalement d'apports continentaux issus des bassins versants. Les différentes formes d'azote rejetées sont généralement dissoutes dans l'eau de mer. Leur répartition n'est pas directement liée aux sources d'apport, mais au taux de renouvellement des eaux. Ainsi, les concentrations les plus élevées dans les sédiments sont principalement enregistrées dans les secteurs à faible circulation d'eau ou dans les zones profondes où les processus de sédimentation sont élevés. L'azote mesuré dans les sédiments est principalement organique et provient en grande partie de la sédimentation et de la biomasse morte.

L'azote total regroupe l'azote organique et l'azote minéral, constitué de formes réduites (azote ammoniacal) et de formes oxydées (nitrates et nitrites). Les sédiments naturellement riches en matière organique sont le plus souvent à l'état réduit ; de ce fait, les formes oxydées sont pratiquement inexistantes. L'analyse de l'Azote Total revient donc à mesurer l'azote ammoniacal plus l'azote organique. Cela correspond à la mesure de l'Azote Kjeldahl (NTK) dans le sédiment.

Ainsi, les teneurs en Azote Kjeldahl (NTK) mesurées dans les sédiments collectés lors de la campagne sont comparées aux valeurs seuils relatives à l'azote total pour les sédiments marins (d'après Licari, 1998). Ces valeurs de références sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 8. Valeurs de références Azote Total (modifié d'après Licari, 1998)

	Azote Total (g/kg MS)
Faible enrichissement organique	< 0,4
Enrichissement organique moyen	0,4 – 0,9
Fort enrichissement organique	0,9 – 1,8
Très fort enrichissement organique	> 1,8

► **Analyse du phosphore**

Le **phosphore** (P total) provient aussi principalement des déchets urbains domestiques et des activités agricoles des bassins versants en amont. Sa présence est essentiellement due au rejet de fertilisants (engrais) en mer et des effets du lessivage des sols (pluies). Le Phosphore a un rôle essentiel dans le développement des algues. Contrairement à l'azote, les valeurs sont généralement plus élevées dans les secteurs recevant ces apports, en raison du processus d'absorption sur les matières en suspension et des hydroxydes de fer, ainsi que du processus de précipitation du phosphate avec du calcium. Ainsi, le phosphore se présente généralement sous forme de particules décantées. Ses formes assimilables peuvent être relarguées du sédiment et contribuer ainsi aux efflorescences végétales.

D'après le document « Système d'Aide à l'Interprétation des Données benthiques en milieu marin et lagunaire » (Licari, 1998), aucune valeur seuil d'enrichissement en phosphore de sédiments marins n'a été retenue. Seul l'enrichissement organique sera décrit pour ce paramètre.

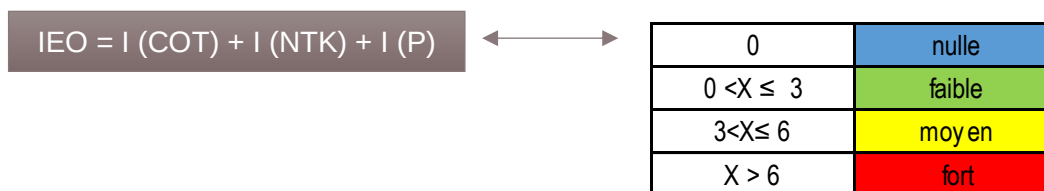
► **Calcul de l'Indice d'Enrichissement Organique (IEO)**

L'**enrichissement organique** est la proportion de matériel organique en décomposition dans le sédiment. Il peut être calculé à partir de classes d'enrichissement pour le Carbone Organique Total, l'azote Kjeldahl et le phosphore, définies par rapport à des valeurs de référence. Les notes relatives à chaque paramètre sont ensuite sommées pour obtenir un IEO synthétique (Alzieu, 2003).

Tableau 9. Valeurs de référence et classe d'enrichissement organique du sédiment (Alzieu, 2003) et échelle IEO

IEO	Carbone Organique Total (g(C)/kg MS)	Azote Kjeldahl (g/kg MS)	Phosphore (g/kg MS)
0	< 6	< 0,6	< 0,5
1	6 – 23	0,6 – 1,2	0,5 – 0,8
2	24 – 40	1,2 – 2,4	0,8 – 1,2
3	41 – 58	2,4 – 3,6	> 1,2
4	> 58	> 3,6	

Sur la base des travaux susmentionnés (Alzieu, 2003), Créocéan a défini quatre classes de valeur pour l'Indice d'Enrichissement Organique (X), chacune identifiée par un code couleur selon le tableau ci-dessous. Il s'agit donc d'un indice indicatif qui a le but de faciliter la lecture des résultats et en aucun cas d'un référentiel réglementaire.



Contaminants chimiques

Les concentrations en contaminants mesurées dans les sédiments ont été comparées aux (i) niveaux de référence de la réglementation française (Arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de [...] sédiments marins modifié par Arrêté du 30 juin 2020) et (ii) bruit de fond géochimique (BFG) mesuré par diverses méthodes.

À noter que les niveaux de référence N1 et N2 ont été créés par le groupe GEODE pour (i) arrêter des seuils réglementaires, (ii) établir, sur la base de l'analyses de bruits de fonds régionaux, des niveaux de qualité des sédiments portuaires et pas des sédiments naturels en mer, c'est pourquoi la comparaison aux bruits de fond naturels est intéressante même si ces BFG varient en fonction des endroits de la planète, ce qui explique que certains seuils N1 sont en deçà des bruits de fond de certaines régions. Ces seuils sont utilisés dans la présente étude à titre comparatif uniquement et parce que, excepté pour les métaux (en cours de révisions au niveau européen), ils sont alignés sur des critères écotoxicologiques définies pour les sédiments au niveau européen et international (les travaux de la Commission OSPAR, la directive européenne 2000/60/CE dite Cadre sur l'Eau et ses directives filles 2013/39/CE et l'Agence de protection de l'environnement américaine (US EPA) (Ifremer 2009, OSPAR 2010).

Ces concentrations « seuils » sont ainsi déterminées par le biais de tests écotoxicologiques en laboratoire permettant de déterminer les concentrations maximums au-dessus desquelles les substances chimiques vont provoquer un effet toxique néfaste sur les organismes marins. Ainsi :

	Concentration < N1 : « sédiment non toxique pour les organismes marins » ;
	N1 < Concentration < N2 : « sédiment potentiellement toxique et nécessitant des investigations complémentaires d'un point de vue écotoxicologique » ;
	Concentration > N2 : « sédiment toxique pour les organismes marins ».

Lorsque pertinent, nous reportons également les valeurs de bruit de fond nationaux établis par le Groupe d'Etudes et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement (GEODE). Le bruit de fond est la "teneur naturelle sans apports anthropiques identifiables" concernant les métaux, établi à partir de mesures réalisées sur l'ensemble des ports français.

A l'échelle de la Méditerranée française, le Réseau Littoral Méditerranéen (RLM) a défini des "états de référence" relatifs au niveau de concentration de certains métaux lourds et HAP par rapport aux valeurs de bruit de fond (Guide méthodologique pour l'évaluation de la contamination chimique et radiologique du sédiment). Trois états descriptifs de la qualité chimique des sédiments sont ainsi définis par le RLM :

État 1 : concentration ≤ bruit de fond

État 2 : bruit de fond < concentration ≤ seuil de contamination avérée

État 3 : concentration > seuil de contamination avérée.

► Eléments Trace Métalliques (ETM)

Certains métaux sont des substances dangereuses, que l'on retrouve dans les sédiments marins. Par exemple, le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) sont les métaux lourds les plus toxiques pour l'homme et les animaux, et sont tous présents à l'état naturel dans l'environnement.

Le mercure et le cadmium s'accumulent dans la chaîne trophique alors que le plomb ne s'accumule pas par l'intermédiaire de la chaîne trophique. Ces métaux pénètrent le milieu marin par l'intermédiaire d'un certain nombre de processus naturels, agricoles et industriels, tels que les émissions provenant de centrales électriques au charbon, du transport ATM à longue distance, des apports fluviaux ou des eaux de ruissellement à terre (évaluation de l'indicateur des apports de métaux lourds).

Certains métaux sont utilisés en tant que produits chimiques antisalissures (cuivre essentiellement) et sont laissés intentionnellement dans le milieu marin, étant utilisés sur la coque des navires ou par des installations marines et sont la cause de points chauds des teneurs en ces métaux dans les ports et à proximité.

Les métaux lourds ne disparaissent pas au fil du temps et peuvent être piégés dans les niveaux plus profonds des

sédiments jusqu'à ce que des processus miniers, géologiques ou biologiques les libèrent et ils peuvent alors affecter le milieu vivant. Il est donc essentiel de les mesurer dans le milieu naturel.

Les tableaux suivants montrent les valeurs de référence des éléments trace métalliques utilisées dans le cadre de la présente étude pour interpréter les concentrations des métaux dans les sédiments.

Tableau 10. Valeurs de référence utilisées pour interpréter les concentrations en ETM dans les sédiments

Métaux	Niveaux de référence ¹ (mg/kg MS)		Bruits de fond (mg/kg MS)	
	N1	N2	GEODE ²	RLM ³
Arsenic	25	50	4,4	
Cadmium	1,2	2,4	0,5	0,15
Chrome	90	180	45	
Cuivre	45	90	35	15
Mercure	0,4	0,8	0,2	0,05
Nickel	37	74	20	
Plomb	100	200	47	25
Zinc	276	552	115	90

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020) :
 Concentration < N1 : sédiment non toxique
 Concentration > N1 : sédiment nécessitant des investigations écotoxicologiques
 Concentration > N2 : sédiment toxique

(2) Bruit de fond nationaux établis par Geode (2009)
 (3) Seuils établis par le Réseau Littoral Méditerranéen (RLM, 2002)

Tableau 11. Etats de référence pour les métaux traces applicables en Méditerranée (RLM, 2002)

	Valeurs de références en Méditerranée (mg/Kg MS)				
	Cadmium	Cuivre	Mercure	Plomb	Zinc
Etat 1	≤ 0,15	≤ 15	≤ 0,05	≤ 25	≤ 90
Etat 2	0,15 < ≤ 0,6	15 < ≤ 60	0,05 < ≤ 0,4	25 < ≤ 50	90 < ≤ 200
Etat 3	> 0,6	> 60	> 0,4	> 50	> 200

► Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs)

Les HAPs présents dans l'environnement marin résultent de différents processus, mais la combustion des charbons et pétroles constitue la principale voie d'introduction des HAP dans l'environnement. Les activités industrielles telles que les usines de production d'aluminium, les raffineries de pétrole ou les rejets urbains contribuent également de manière importante aux apports notamment aquatiques (Alzieu, 1999).

Les référentiels des 16 molécules de HAPs soumis aux niveaux de référence N1 et N2, par l'Arrêté du 30 juin 2020, ainsi que les états de référence définis par le RLM pour certains HAP figurent dans les tableaux suivants :

Tableau 12. Valeurs de référence utilisées pour interpréter les concentrations en HAP dans les sédiments

HAP	Niveaux de référence ¹ (µg/kg MS)		Bruits de fond (µg/kg MS)	
	N1	N2	RLM ²	OSPAR ³
Naphtalène	160	1130		5
Acénaphthène	15	260		-
Acenaphtylène	40	340		-
Fluorène	20	280		85
Anthracène	85	590		3
Phénanthrène	240	870		17
Fluoranthène	600	2 850	40	20
Pyrène	500	1 500		13
Benzo(a)anthracène	260	930		9
Chrysène	380	1 590		11
Benzo(b)fluoranthène	400	900	200	-
Benzo(k)fluoranthène	200	400	100	-
Benzo(a)pyrène	430	1 015	100	15
Dibenzo(ah) anthracène	60	160		
Benzo(ghi)perylène	1 700	5 650	100	45
Indeno(1,2,3cd) pyrène	1 700	5 650	100	50

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020) :
 Concentration < N1 : sédiment non toxique
 Concentration > N1 : sédiment nécessitant des investigations écotoxicologiques
 Concentration > N2 : sédiment toxique

(2) Seuils établis par le Réseau Littoral Méditerranéen (RLM, 2002)
 (3) Ospar (2009)

Tableau 13. Etats de référence pour les HAP applicable en Méditerranée (RLM, 2002)

	Valeurs de références en Méditerranée (µg/kg MS)					
	Fluoranthène	Benzo(a)pyrène	Benzo(b)fluoranthène	Benzo(ghi)perylène	Benzo(k)fluoranthène	Indeno(1,2,3cd)pyrène
Etat 1	≤ 40	≤ 100	≤ 200	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Etat 2	40 < ≤ 200	100 < ≤ 500	200 < ≤ 500	100 < ≤ 250	100 < ≤ 250	100 < ≤ 250
Etat 3	> 200	> 500	> 500	> 250	> 250	> 250

► Polychlorobiphényles (PCBs)

Les PCBs constituent des témoins particulièrement spécifiques de la pollution contemporaine des milieux aquatiques, car contrairement aux métaux et aux hydrocarbures, ils ne sont pas présents naturellement dans le milieu. Leur origine est donc exclusivement anthropique. Actuellement, ils sont encore utilisés en France dans les transformateurs et les condensateurs électriques.

Les référentiels des 7 PCBs soumis aux niveaux de référence N1 et N2, par l'Arrêté du 30 juin 2020, figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14. Niveaux de référence des PCBs (µg/kg MS)

PCB	Niveaux de référence ¹ (µg/kg MS)		Bruits de fond (µg/kg MS)	
	N1	N2	RLM ²	OSPAR ³
PCB 28	5	10		0/0,5
PCB 52	5	10		
PCB 101	10	20		
PCB 118	10	20	0,5	
PCB 138	20	40	0,5	
PCB 153	20	40	0,2	
PCB 180	10	20		

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020) :
 Concentration < N1 : sédiment non toxique
 Concentration > N1 : sédiment nécessitant des investigations écotoxicologiques
 Concentration > N2 : sédiment toxique

(2) Seuils établis par le Réseau Littoral Méditerranéen (RLM, 2002)
 (3) Ospar (2009)

Tableau 15. Etats de référence pour les HAP applicable en Méditerranée (RLM, 2002)

	Valeurs de références en Méditerranée (µg/kg MS)					
	Fluoranthène	Benzo(a)pyrène	Benzo(b)fluoranthène	Benzo(ghi)perylène	Benzo(k)fluoranthène	Indeno(1,2,3cd)pyrène
Etat 1	≤ 40	≤ 100	≤ 200	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Etat 2	40 < ≤ 200	100 < ≤ 500	200 < ≤ 500	100 < ≤ 250	100 < ≤ 250	100 < ≤ 250
Etat 3	> 200	> 500	> 500	> 250	> 250	> 250

► Organochlorés (TBT)

Le tributylétain (TBT) et ses métabolites sont des composés (biocide) qui étaient utilisés dans les peintures antisalissures des coques de navires pour empêcher la fixation des algues et des mollusques sur les coques des bateaux. Ils sont interdits depuis 2003 en France. Il est aussi intéressant de connaître les teneurs en Dibutylétain (DBT) et Monobutylétain (MBT), qui sont des sous-produits de transformation, pour avoir une idée de l'ancienneté de la présence du TBT. Les teneurs en TBT dans les sédiments sont encore aujourd'hui quantifiables dans tous les ports. Ces concentrations témoignent de leur utilisation certainement par méconnaissance de l'impact de ces composés sur les milieux et de la législation. Suivant les usages, les teneurs en TBT en zones portuaires vont de quelques mg/kg poids sec à des concentrations inférieures à la limite de quantification des laboratoires (GEODE, 2014).

Le tributylétain (TBT) est l'unique organochloré pour lequel ont été fixé des niveaux de référence (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm). Ces teneurs réglementaires N1 et N2 sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau 16. Niveaux de référence du TBT (µg/kg MS)

Niveau de référence ¹ (µg/kg MS)	N1	N2	Bruit de fond RLM
TBT	100	400	40

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020).

2.2.3. Peuplements benthiques

2.2.3.1. Mode opératoire

Le benthos a été échantillonné avec la même benne Van Veen utilisée pour l'échantillonnage des sédiments. Selon la procédure standard, trois coups de benne par station ont été effectués pour l'étude du benthos.

Le contenu de chaque benne est déversé dans un fût et malaxé jusqu'à obtention d'une suspension la plus homogène possible. Le contenu du fût est ensuite déversé sur un tamis en acier inoxydable de 1 mm de vide de maille de manière à éliminer le matériau sédimentaire fin pour ne recueillir que le refus, constitué des organismes vivants mélangés aux débris grossiers. Le refus de tamis est photographié et décrit (volume, nature, espèce particulière ...). Le tamis est rincé et le refus obtenu prélevé et mis en flacon plastique après avoir pris la précaution de prélever tous les organismes restant fixés au tamis.

Un mélange d'eau de mer et de formaldéhyde (concentration finale en formaldéhyde de 4 %) est ajouté au refus de manière que celui-ci baigne entièrement dans le mélange afin de garantir la préservation de l'échantillon. Une pincée de Rose Bengale (colorant des protéines animales) est ajoutée à l'échantillon afin de faciliter le tri de la faune par sa coloration. Puis le flacon plastique est fermé et identifié avec l'identifiant de la station. L'échantillon ainsi conditionné est conservé jusqu'à son arrivée au laboratoire d'analyse à température ambiante dans un contenant à fond étanche, maintenu fermé pour limiter les dégagements de vapeurs de formol.

Lors de leur envoi au laboratoire, les échantillons sont accompagnés de bordereaux assurant la chaîne de traçabilité. Dès réception des échantillons, le laboratoire appose sa signature sur le formulaire et envoie une copie numérisée par courrier électronique.

Les caractéristiques et les illustrations photographiques des échantillons prélevés dans chaque station sont présentées dans le chapitre 3. Résultats et discussion (cf. Tableau 29 et Figure 24).

La figure ci-après illustre les principales étapes du mode opératoire susmentionné.



Figure 8. Méthodes de prélèvement du benthos de substrats meubles

2.2.3.2. Analyse du benthos

Les échantillons de la faune macrobenthique ont été analysés par le CEAB-CSIC (Centre d'Estudis Avancats de Blanes, Spain – Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique)

CEAB-CSIC
Carrer Accés Cala Sant Francesc, 14
17300 Blanes
Girona, Espagne

La première étape de ce travail consiste à faire un tri de tous les organismes récoltés puis les taxonomistes dénombrent et identifient les organismes à la loupe binoculaire jusqu'à l'espèce lorsque cela est possible. La biomasse par groupe taxonomique homogène (e.g. espèce, genre) et réplicat est également mesurée (poids sec). Le groupe trophique de chaque espèce a aussi été déterminé.

2.2.3.3. Traitement des résultats

Les composantes principales du peuplement benthique obtenues à partir du travail du CEAB sont les suivantes :

- ▶ La richesse spécifique, *i.e.* le nombre d'espèces présentes dans chaque station (3 réplicats confondus),
- ▶ La densité, *i.e.* le nombre d'individus par espèce et par m²,
- ▶ La biomasse, *i.e.* le poids en matière sèche prélevée par espèce et par m²,

À partir de ces données, plusieurs indices sont calculés.

L'indice de Shannon-Weaver (Shannon, 1948) est un indice de diversité qui prend en compte à la fois la richesse spécifique et l'abondance relative de chaque espèce, permettant de caractériser l'équilibre écologique du peuplement d'un écosystème.

$$H' = - \sum \left[\frac{N_i}{N} \times \log_2 \frac{N_i}{N} \right] \quad \begin{array}{l} N_i = \text{abondance de l'espèce } i \\ N = \text{abondance totale des espèces} \end{array}$$

Cet indice est maximal ($H'_{\max}$) quand les espèces ont des abondances identiques et il tend vers 0 quand une espèce domine le peuplement au détriment des autres espèces.

Cet indice permet de caractériser l'équilibre structurel du peuplement : H' sera le plus élevé pour des peuplements caractérisés par une richesse spécifique importante avec une répartition équitable des espèces. Les valeurs les plus basses apparaissent pour les peuplements qui sont dominés par une seule espèce ou par un petit nombre d'espèces.

L'indice d'équitabilité (J) permet de mieux appréhender les résultats de l'indice de Shannon-Weaver. Il indique sous forme de pourcentage, le rapport entre l'indice trouvé (H') et l'indice maximal théorique du peuplement ($H'_{\max}$).

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \times 100 \quad \begin{array}{l} H' = \text{indice de Shannon-Weaver} \\ S = \text{richesse spécifique} \end{array}$$

De la même manière, $J = 0\%$ représente la dominance du peuplement par une seule espèce, un $J = 100\%$ représente un peuplement composé d'espèces à l'abondance identique.

Indice trophique (Word, 1990) : Ensuite, les espèces sont classées selon leur mode d'alimentation et de leur régime alimentaire (carnivore, dépositivores, suspensivores...), afin de comprendre les interactions trophiques

inter- et intra-spécifiques (e.g. compétition, prédation) et les relations entre les caractéristiques du sédiment et la macrofaune benthique.

Cette classification permet le calcul d'un autre indice appelé indice trophique (Word 1990). Le groupe trophique des espèces est déterminé en fonction du :

- ▶ type de nourriture consommé par les animaux (débris, cadavres...),
- ▶ compartiment où cette nourriture est recherchée (colonne d'eau, au-dessus ou à l'intérieur du sédiment...),
- ▶ mode de capture de la nourriture (filtration, capture active ou passive, activité nécrophage...)

L'indice trophique TI (exprimé en %) est donc un indicateur d'une perturbation organique du milieu. Il se calcule comme suit :

$$IT = 100 - \left[33,33 \sum \frac{(n1 + 1n2 + 2n3 + 3n4)}{(n1 + n2 + n3 + n4)} \right]$$

où n1, n2, n3 et n4 sont les densités des différents groupes trophiques 1, 2, 3 et 4 avec:

- ▶ Groupe 1 = consommateur de microparticules en suspension dans la colonne d'eau
- ▶ Groupe 2 = consommateur de micro-détritus associés au sédiment
- ▶ Groupe 3 = consommateur de macro-détritus associés au sédiment
- ▶ Groupe 4 = organismes se nourrissant de sédiments eutrophes

Dans les milieux marins en bon état écologique, l'indice trophique se situe entre 60 % et 100 %. Une légère perturbation de la communauté benthique due à un léger enrichissement en matière organique des sédiments fait baisser l'indice entre 30 à 60 %, et un fort enrichissement le fait descendre à des valeurs inférieures à 30 %. Un indice trophique très bas peut être trouvé dans des zones fortement enrichies en nutriments à cause de pollution par les eaux usées domestiques.

L'AMBI (AZTI Marine Biotic Index) (Borja *et al.*, 2000), appelé aussi coefficient benthique (CB) est basé sur les successions écologiques (Pearson & Rosenberg, 1978). Les groupes écologiques (Tableau 17) au nombre de 5 (GI, GII, GIII, GIV et GV), sont basés sur la polluosensibilité des espèces. Le groupe I comprend les espèces les plus sensibles à l'hypertrophisation jusqu'au groupe V qui englobe les espèces opportunistes des sédiments réduits :

- ▶ Groupe 1 : espèces sensibles à une hypertrophisation. Elles disparaissent les premières lorsqu'il y a un enrichissement du milieu. Ce sont des suspensivores, des carnivores sélectifs et quelques dépositivores de subsurface tubicoles.
- ▶ Groupe 2 : espèces indifférentes à une hypertrophisation du milieu. Ces espèces sont peu influencées par une augmentation de la quantité de la matière organique (espèces carnivores et nécrophages peu sélectives).
- ▶ Groupe 3 : espèces tolérantes à une hypertrophisation du milieu. Ces espèces sont naturellement présentes dans les vases, mais comme leurs proliférations sont stimulées par l'enrichissement du milieu, elles sont un signe du déséquilibre du système. Ce sont des espèces dépositivores de surface, profitant du film superficiel chargé de matière organique.
- ▶ Groupe 4 : espèces opportunistes de second ordre. Ce sont des petites espèces à cycle court (< 1 an) abondantes dans les sédiments réduits des zones polluées. Ce sont des dépositivores de subsurface.
- ▶ Groupe 5 : espèces opportunistes de premier ordre. Ce sont des dépositivores, proliférant dans les sédiments réduits sur l'ensemble de leur épaisseur jusqu'à la surface.

Le calcul est effectué grâce à un logiciel développé par AZTI. Il permet d'obtenir des valeurs pour l'AMBI, le M-AMBI (M-AMBI, dérivé, par analyse factorielle, de l'AMBI, de la richesse spécifique S et de l'indice de diversité H' (Muxika *et al.* 2007)) et le BI (Indice Biotique).

Tableau 17. Grille d'évaluation des résultats de l'AMBI

Coefficient benthique (AMBI)	Groupe écologique dominant	Etat du site	Etat de santé des communautés
0,0 < AMBI ≤ 0,2	I	Non pollué	Normal
0,2 < AMBI ≤ 1,2		Non pollué	Appauvri
1,2 < AMBI ≤ 3,3	III	Pollution légère	Déséquilibré
3,3 < AMBI ≤ 4,5		Moyennement pollué	Etape de transition vers la pollution
4,5 < AMBI ≤ 5,0	IV (V)	Moyennement pollué	Pollué
5,0 < AMBI ≤ 5,5		Fortement pollué	Etape de transition vers la pollution
5,5 < AMBI ≤ 6,0	V	Fortement pollué	Forte pollution
azoïque	azoïque	Pollution majeure	Azoïque

Le modèle des Indices Biotiques (IB) mis en place par Glémarec et Hily (1981) permet de distinguer 4 grandes étapes en fonction des espèces observées :

- ▶ Indice Biotique = 0. Il constitue l'état normal d'un peuplement avec une dominance des espèces sensibles (Groupe écologique 1), les premières à disparaître en cas de pollution. Ce sont généralement des suspensivores, dépositivores de surface ou carnivores.
- ▶ Indice Biotique = 2. Les espèces tolérantes (Groupe 3) sont stimulées et sont beaucoup plus abondantes. Ce sont des dépositivores de surface comme les mollusques bivalves (*Abra*, *Tellina*...), des polychètes Ampharetidés ou des pionidés. Apparaissent aussi les premiers détritivores, consommateurs de matière végétale figurée (Crustacé, Tanaidacé), c'est le cas des Nereidés ou d'amphipodes Talidridés, Dexaminidés, Gammaridés, Melitidés... Ces espèces tolérantes, dominant les espèces sensibles, définissent cette première étape du déséquilibre.
- ▶ Indice Biotique = 4. C'est la première étape de pollution. Le milieu se caractérise par des espèces opportunistes de second ordre (groupe IV) susceptibles de proliférer. Ces espèces sont des dépositivores de surface ou de subsurface (limivores) qui appartiennent à des familles de polychètes spécialisées parmi lesquelles les Cirratulidés, les Spionidés du genre *Polydora* avec de nombreuses espèces, les Nereidés du genre *Neanthes*, des Eunicien de la famille des Dorvilleidés et des Capitellidés.
- ▶ Indice Biotique = 6. C'est l'étape de pollution maximale, caractérisée par quelques espèces opportunistes de 1er ordre, qui atteignent des densités exceptionnelles (100 000 ind.m⁻²) à la surface des sédiments réduits. Ces espèces très peu nombreuses sont : le Capitellidé *Capitella capitata* (complexe d'espèces), le Spionidé *Malacoceros fuliginosus*, le Leptostracé *Nebalia bipes*. Ces espèces cohabitent avec de nombreux Oligochètes (*Clitellata*) et nématodes.

Entre ces quatre grandes étapes existent des étapes de transition 1, 3 et 5, définies en premier lieu par l'effondrement des paramètres de Richesse Spécifique et d'Abondance ou au contraire, par l'explosion d'une espèce indifférente (groupe II), favorisée par le manque de compétition. Ces espèces sont généralement carnivores (ex. : *Nephtys hombergii*) ou nécrophages (ex. : *Pagurus*). L'étape 7 correspond au milieu azoïque puisqu'aucun invertébré n'y survit.

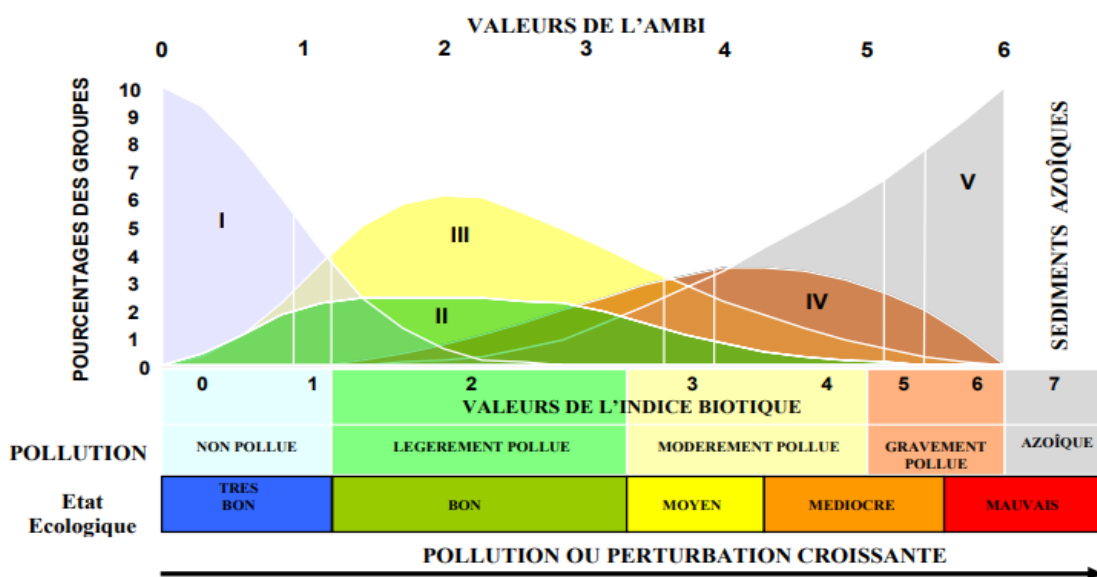


Figure 9. Modèle des Indices Biotiques (Glémarec & Hily, 1981) montrant l'importance relative des différents groupes écologiques le long du gradient de perturbations croissantes

Le calcul du M-AMBI, également mis au point par l'équipe de l'AZTI, est basé sur une analyse factorielle de l'AMBI, de la richesse spécifique et de l'indice de diversité H' (indice de Shannon-Weaver) (Muxika et al., 2007). Il permet donc de prendre en compte ces 3 facteurs à la fois.

Notons que le choix des valeurs maximales utilisées pour la richesse spécifique et l'indice de diversité de Shannon peuvent influencer sur les résultats.

Deux résultats de M-AMBI ont donc été générés en prenant les valeurs maximales proposées par le logiciel Ambi mais également en prenant les bornes issues de la Directive Cadre Eau résultats de 2009 : AMBI=1,11, richesse = 109 espèces, Indice diversité = 5,83.

Le Bentix est une version simplifiée de l'AMBI, qui ne prend en compte que 3 groupes d'espèces :

Trois groupes ont été créés, reprenant les espèces des cinq groupes écologiques développés dans les indices précédents, mais auxquels on a attribué le même poids :

- ▶ Groupe 1 (G1) : espèces sensibles, souvent de stratégie k, et espèces indifférentes ;
- ▶ Groupe 2 (GII) : espèces tolérantes répondant aux perturbations par une densité croissante. Les opportunistes de second ordre et espèces de stratégie r sont incluses dans ce groupe ;
- ▶ Groupe 3 (GIII) : espèces opportunistes de premier ordre, espèces colonisatrices, ou tolérantes à l'hypoxie.

Les 2 derniers groupes (GII et GIII) sont ensuite regroupés dans la formule de calcul du Bentix :

$$\text{BENTIX} = \frac{6 \times \%G1 + 2 \times (\%G2 + \%G3)}{100}$$

Le BENTIX peut donc prendre des valeurs continues entre 2 et 6, ainsi que 0 lorsque le sédiment est azoïque (l'échelle est donc inversée par rapport à l'AMBI).

Les tableaux suivants synthétisent les valeurs de seuils pour les différents indices :

Tableau 18. Correspondances entre les valeurs du Bentix et les différents états écologiques définis par la Directive Cadre Eau (d'après Simbouda et Zenetos, 2002)

Etat écologique	BENTIX		Classification de la pollution
	Cas général	Milieu vaseux	
Mauvais	0	0	Azoïque
Médiocre	$2,0 \leq \text{BENTIX} \leq 2,5$	$2,0 \leq \text{BENTIX} \leq 2,5$	Gravement pollué
Moyen	$2,5 \leq \text{BENTIX} \leq 3,5$	$2,5 \leq \text{BENTIX} \leq 3,0$	Modérément pollué
Bon	$3,5 \leq \text{BENTIX} \leq 4,5$	$3,0 \leq \text{BENTIX} \leq 4,0$	Légèrement pollué, état transitoire
Très bon	$4,5 \leq \text{BENTIX} \leq 6,0$	$4,0 \leq \text{BENTIX} \leq 6,0$	Normal

Tableau 19. Synthèse des valeurs d'EcoQ des différents indices de Shannon (Molvær et al., 1997), l'indice trophique (Licari, 1998), l'AMBI (Borja et al., 2003) et le M-AMBI (Borja et al. 2007)

EcoQ	H'	AMBI	M-AMBI	IT	BENTHIX (milieu vaseux)
Très bon	$H' > 4$	$\text{AMBI} \leq 1,2$	$\text{M-AMBI} > 0,85$	$\text{IT} > 80$	$4,0 \leq \text{BENTIX} \leq 6,0$
Bon	$3 < H' \leq 4$	$1,2 < \text{AMBI} \leq 3,3$	$0,55 < \text{M-AMBI} \leq 0,85$	$60 < \text{IT} \leq 80$	$3,0 \leq \text{BENTIX} \leq 4,0$
Moyen	$2 < H' \leq 3$	$3,3 < \text{AMBI} \leq 4,3$	$0,4 < \text{M-AMBI} \leq 0,55$	$60 < \text{IT} \leq 50$	$2,5 \leq \text{BENTIX} \leq 3,0$
Pauvre	$1 < H' \leq 2$	$4,3 < \text{AMBI} \leq 5,5$	$0,2 < \text{M-AMBI} \leq 0,4$	$50 < \text{IT} \leq 30$	$2,0 \leq \text{BENTIX} \leq 2,5$
Mauvais	$H' \leq 1$	$5,5 < \text{AMBI} \leq 7$	$\text{M-AMBI} \leq 0,2$	$\text{IT} \leq 30$	0

Composition :

Une analyse de la composition spécifique des peuplements est également réalisée, notamment :

- ▶ Une description des espèces dominantes ;
- ▶ La recherche d'espèces non indigènes éventuelles ;
- ▶ Une description des assemblages benthiques / Habitats (EUNIS + HABREF, OFB, CBRS MNHN 2021).

La **typologie EUNIS** (European Nature Information System) constitue la référence européenne en matière de classification des habitats terrestres, dulçaquicoles et marins. Elle repose sur un classement hiérarchique des habitats permettant, pour le domaine marin, d'accéder à des niveaux de précision allant de la simple distinction entre les types rocheux ou meuble (niveau 2), intégrant d'une part, le mode d'exposition et le type de substrat (niveau 3), puis, d'autre part, la notion de groupement fonctionnel d'habitats (niveau 4) jusqu'à l'identification précise des peuplements benthiques définis par la présence d'espèces dominantes ou de groupes d'espèces caractéristiques (niveaux 5 et 6).

La **typologie des biocénoses benthiques de Méditerranée** a récemment été actualisée, homogénéisée et harmonisée dans un document rédigé par l'OFB, le CNRS et le MNHN en 2021. Elle est classée en fonction de l'étagement et de la nature granulométrique du sédiment. Cela a abouti à la création d'une liste de référence française des biocénoses, faciès et associations présents en Méditerranée. Elle est structurée en quatre niveaux. Le premier niveau correspond à l'étagement et le deuxième aux substrats. Le troisième niveau fait apparaître les biocénoses, le niveau quatre les faciès et associations de ces biocénoses.

Le tableau suivant résume les principaux résultats obtenus par InVivo en 2013 sur les stations comprises entre 90 et 100 m de profondeur.

Tableau 20. Résultats de l'étude InVivo 2013

	Stations échantillonnées en 2013 (InVivo)													
	5	6	7	8*	9	10	12	13*	14	15	16	17	18	19*
Descripteur	Profondeur 90 - 100 m													
Richesse spécifique (nb.sp./station)	7	11	7	6	16	10	21	13	20	12	11	8	13	8
Densité tot (nb.ind./m²)	33	60	37	50	83	47	130	83	147	70	63	87	77	57
Indice Je Shannon (bit)	2,6	3,2	2,7	2,0	3,5	3,2	4,0	3,4	4,0	3,3	3,2	2,6	3,3	2,7
Indice d'équitabilité (%)	0,94	0,94	0,95	0,79	0,87	0,96	0,90	0,91	0,93	0,91	0,93	0,87	0,89	0,90
AMBI [0-6]	1,50	1,25	1,64	1,10	1,50	1,61	1,31	1,92	1,36	1,57	1,18	0,87	1,50	1,88
Bentix [0-6]	5,20	5,11	4,91	4,93	5,04	5,14	5,08	4,56	4,79	4,48	5,37	5,38	5,09	4,51

NB : Les stations 8, 13 et 19 correspondent respectivement aux stations E01, E05 et E06 échantillonnées en 2022.

3. Résultats et discussion

3.1. Profils CTD dans la colonne d'eau

Les profils des mesures issues de la sonde multiparamètres, réalisées lors de la campagne du 27 juin 2022, sont illustrés dans les figures ci-après.

- ▶ **Température** : De manière générale, les 6 stations présentent des profils de température très similaires avec une thermocline qui se situe entre 12 et 16 m de profondeur. La température de surface de 23,5°C est presque constante jusqu'à 9,3 à 11,6 m ; elle perd 5°C entre 12 et 16 m de profondeur, puis diminue plus progressivement jusqu'à atteindre la température de 14°C presque constante entre 50 m et 95 m de profondeur, avec une température minimale de 13,8°C.
- ▶ **Salinité** : On observe des profils de salinité très similaires entre les 6 stations avec une valeur de 38,0 ‰ qui diminue faiblement jusqu'à un minimum de 37,5‰ autour de 12 m de profondeur et ensuite augmente légèrement pour atteindre une salinité constante maximale de 38,2‰ à 38,3‰ à partir de 50 m de profondeur.
- ▶ **Oxygène** : Pour l'ensemble des stations on observe un profil d'oxygène très similaire. La teneur en oxygène dissous (mesurée en % de saturation) en surface (premiers 10 m) se situe entre 100,5 et 104,3%, sauf pour les stations E01 et la station E06 de référence la plus éloignée, avec des valeurs respectivement de 93,2 et 94,4%. Entre 14 m et 22 m de profondeur les valeurs augmentent légèrement, sans jamais atteindre la valeur de 110%, et ensuite diminuent de manière constante et régulière jusqu'au fond où l'on observe les valeurs d'oxygène minimales se situant entre 76, 5 et 89,7% de saturation.
- ▶ **Turbidité** : Pour l'ensemble des stations, la turbidité est toujours faible avec une valeur constante de 0,9 NTU sur toute la colonne d'eau. On note toutefois une légère oscillation autour de la valeur de 1,1 NTU en surface dans les premiers 10 m de profondeur, ainsi qu'à l'approche du fond avec faible augmentation de la turbidité qui reste toujours inférieur à 3 NTU.
- ▶ **pH** : On observe des profils de pH très similaires entre les 8 stations avec un pH qui oscille entre 8,1 et 8,3 sur toute la colonne d'eau.

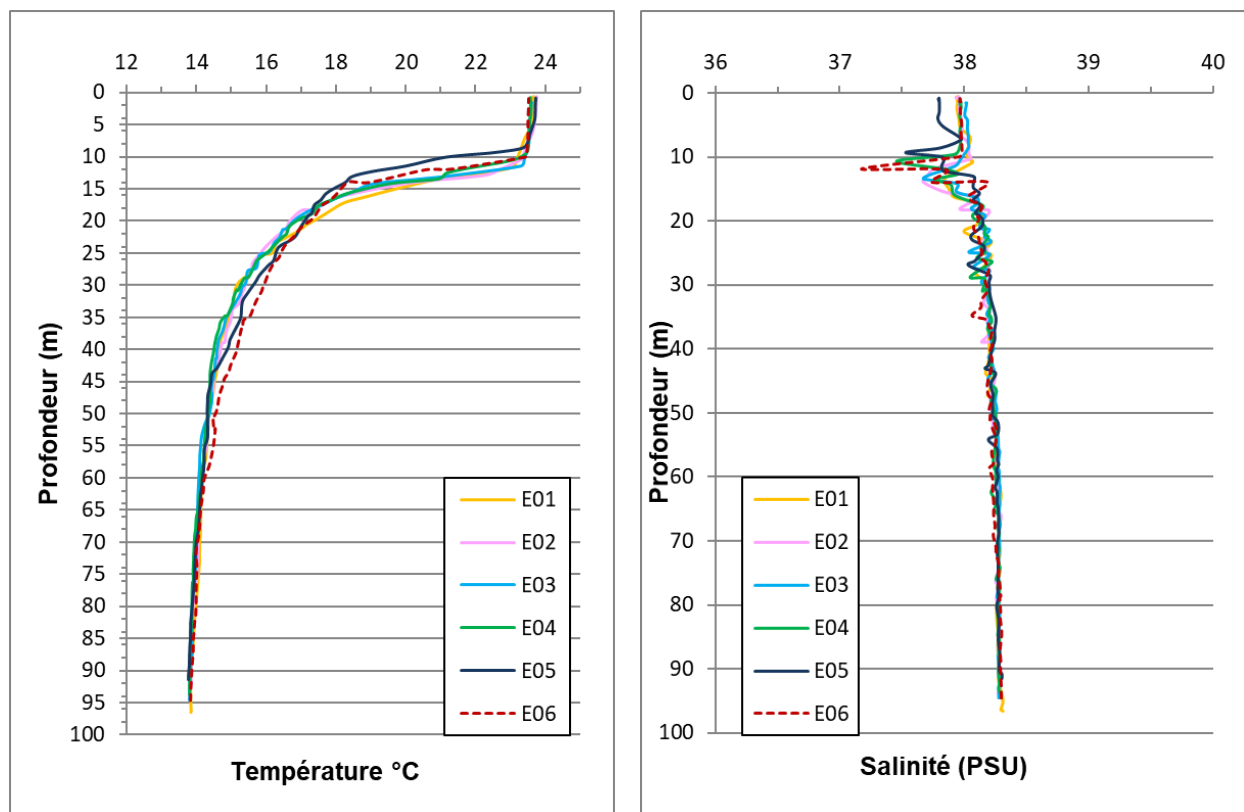


Figure 10. Profils de température et salinité mesurés sur le 6 stations (2022)

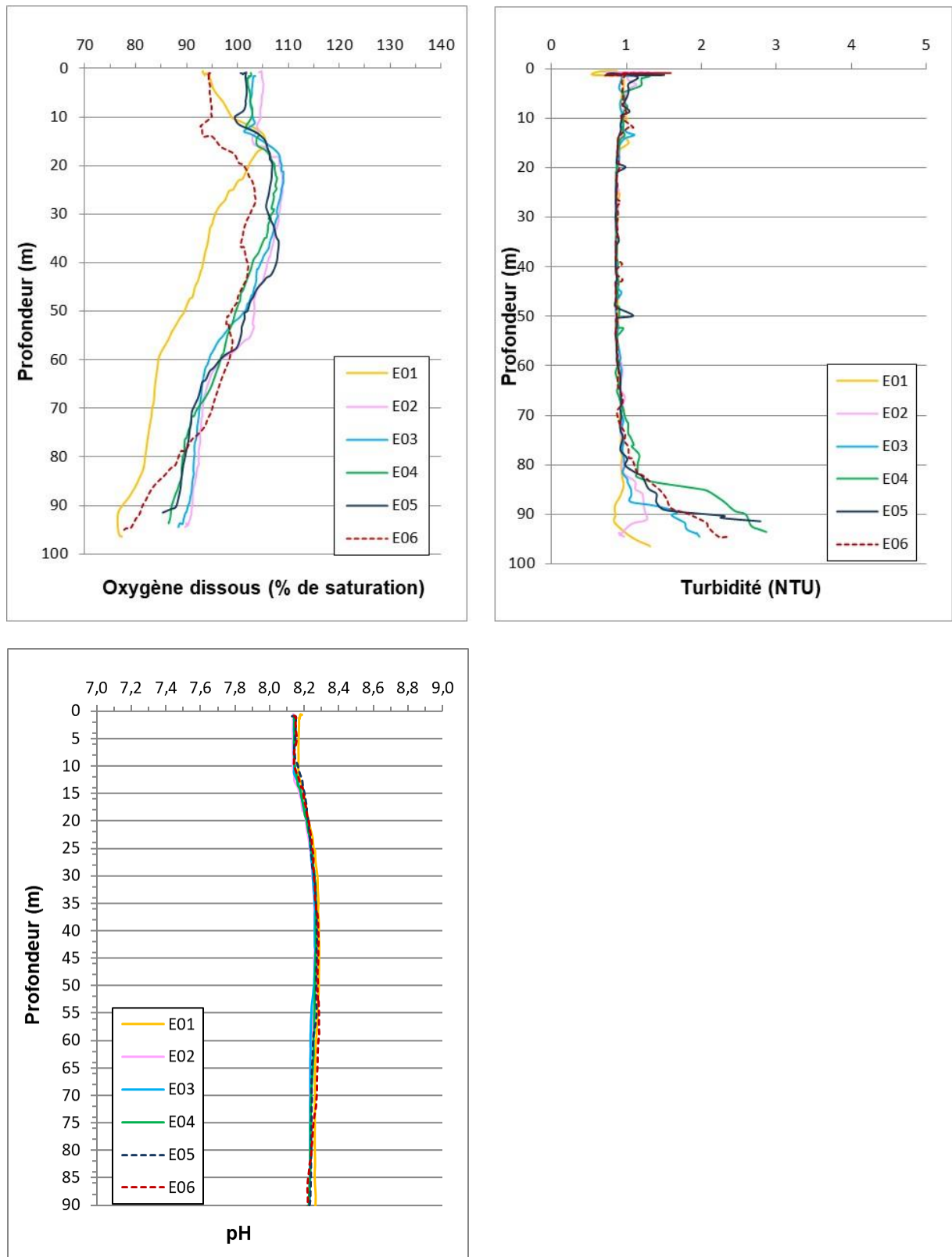


Figure 11. Profils d'oxygène dissous, turbidité et pH mesurés sur les 6 stations (2022)

3.2. Caractéristiques des sédiments

3.2.1. Etude de la structure du sédiment

3.2.1.1. Caractéristiques des échantillons et illustrations photographiques

Le 2 juin 2022, les sédiments ont été prélevés à l'aide d'une Benne Van Veen. Dans le tableau et la figure ci-après sont présentées les caractéristiques et les photographies des échantillons prélevés :

Tableau 21. Caractéristiques des sédiments prélevés sur les 6 stations (juin 2022)

Station	Profondeur (m)	Conditionnement	Homogénéité	Texture	Fluidité	Odeur	Couleur	Remarques
E01	102	3 bocaux en verre brun de 0,6L + 2 flacons de 0,5 L plastique + 1 flacon plastique stérile : 200 g	non	vase fluide surface 3 cm puis plus compact	oui surface	non	marron gris surface puis gris foncé avec marbrures	bicouche, remplissage 100%
E02	98			vase fluide surface 6cm puis plus compacte			marron gris surface puis gris foncé	
E03	98,5			vase fluide surface 6cm puis plus compacte			marron gris surface puis gris foncé	
E04	98,5			vase fluide surface 6cm puis plus compacte			marron gris surface puis gris foncé	
E05	95			vase fluide surface 3cm puis plus compacte			marron gris surface puis gris foncé	
E06-réf	99			vase fluide surface 3cm puis plus compact			marron gris homogène	



Figure 12. Photographies des échantillons de sédiments prélevés dans les 6 stations (2022)

3.2.1.2. Granulométrie

La taille des grains constituant un sédiment varie selon les conditions dynamiques régnant dans le milieu de dépôt. Les résultats issus de la campagne de juin 2022 sont présentés ci-dessous :

Tableau 22. Distributions granulométriques des 6 stations (2022)

Stations		E01	E02	E03	E04	E05	E06-réf
Fractions (% du volume)	< 2 µm (Argiles)	11,2	7,7	8,8	9,6	10,0	12,2
	2 - 20 µm (Limons fins)	77,4	79,6	82,2	80,6	80,3	79,1
	20 - 63 µm (Limons grossiers)	9,6	9,7	7,3	7,7	8,3	6,9
	63 - 250 µm (Sables fins)	1,8	2,9	1,7	2,1	1,4	1,8
	250 – 2000 µm (Sables grossiers)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	Diamètre médian (microns)	6,4	7,4	6,8	6,6	6,6	6,0

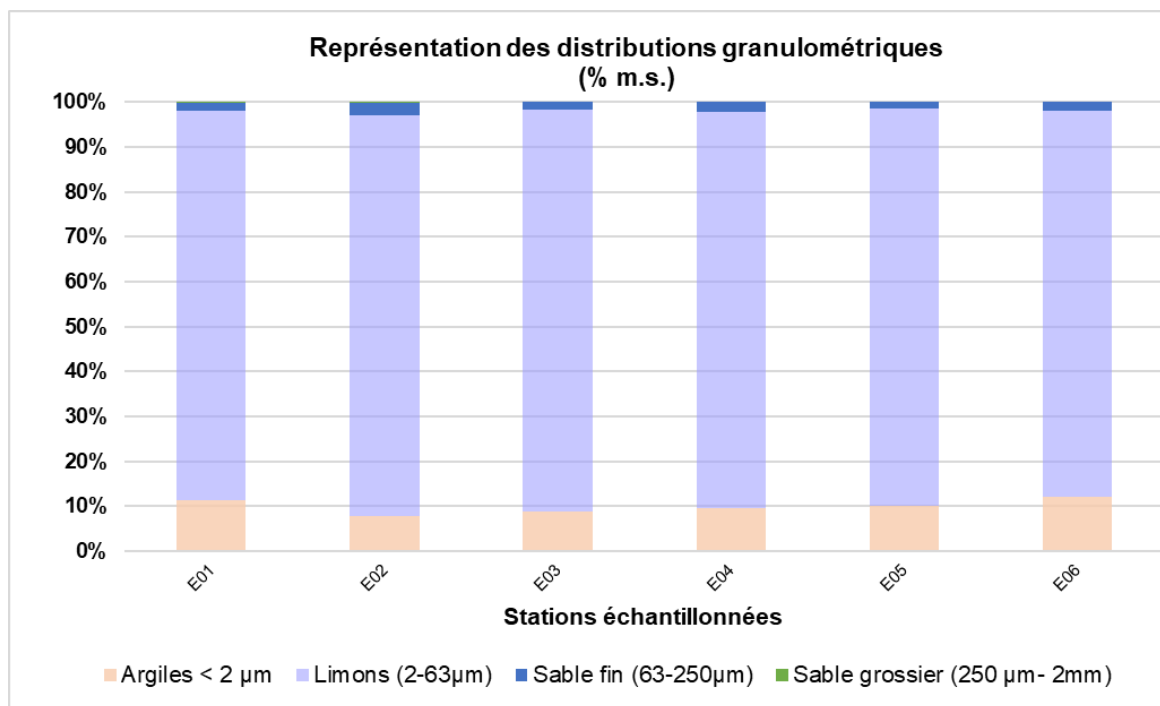


Figure 13. Distributions granulométriques des sédiments prélevés sur les 6 stations (2022)

Les sédiments de la zone d'étude sont essentiellement constitués de vases pures, dont principalement une fraction forte de limons (entre 77 à 82% selon les stations). Les diamètres médians des échantillons varient entre 6,0 et 7,4 µm. Sur l'ensemble des six stations les distributions granulométriques des différentes fractions de sédiment sont essentiellement équivalentes.

L'interprétation de ces résultats est similaire à celle de l'expertise menée par InVivo en 2013 sur site : le sédiment prélevé sur les stations pour l'établissement de l'état initial était également essentiellement composé de vases, sous les mêmes proportionnalités. Les analyses sont cohérentes avec les observations et planches photographiques réalisées lors de la mission.

► Fraction Fine

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation du taux d'envasement des sédiments a été réalisée à partir de la classification proposée par Ibouily en 1981, basée sur le pourcentage de particules fines (fraction inférieure à 63 µm).

Le taux de fraction fine varie entre 97 et 98,6% selon les stations, correspondant à de la vase pure (> 80%). Il n'y a pas de différence significative entre ces stations (cf. Tableau 23).

Cette analyse correspond aux observations réalisées lors de l'expertise biosédimentaire Invivo-2013 : « Les sédiments de la zone d'étude sont essentiellement constitués de vases (fraction < 63µm). [...] ».

3.2.1.3. Enrichissement organique

Les teneurs en nutriments obtenues sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Tableau 23. Résultats des analyses des sédiments des 6 stations (2022) classés selon Licari, 1998

STATIONS	Granulométrie (%)		Résultats nutriments (g/kg MS)		
	Teneur en eau	Fraction Fine < 63µm	Azote Kjeldahl	COT	P total
E01	46,1	98,1	1,10	9,54	0,47
E02	48,5	97,0	1,14	10,06	0,47
E03	46,2	98,3	1,12	10,40	0,50
E04	47,1	97,9	1,12	9,37	0,57
E05	46,5	98,6	1,13	9,30	0,56
E06-réf	46,6	98,17	1,08	9,27	0,55

Niveau d'enrichissement organique (détails cf. § 2.2.2.3.) : ■ Faible ■ Moyen ■ Fort ■ Très fort

NB : Pour rappel, il n'existe pas de valeurs seuils provenant des travaux de Licari pour le Phosphore Total.

La comparaison avec les résultats de l'étude InVivo-2013 tient compte des stations d'échantillonnage PGL6 à PGL19 situées à des profondeurs équivalentes à celles de la présente étude, entre l'isobathe de 90 et 100 m.

► Carbone Organique Total (COT)

La teneur en carbone organique total (COT) est un indice de contamination des sédiments. Les sédiments fins et riches en COT ont une forte capacité d'adsorption des contaminants organiques. Dans le cadre de cette étude, les teneurs en COT obtenues varient entre 9,27 et 10,40 g(C)/kg **caractéristique d'un enrichissement organique moyen en COT** (compris entre 7,5 et 13,3 g/kg MS) d'après les référentiels de Licari (1998), pour une fraction fine > 60%.

Lors de l'expertise Invivo-2013, les valeurs en COT obtenues sur les stations plus profondes sont essentiellement équivalentes à celle mesurées en 2022 : elles variaient entre 7,4 (PGL14) et 9,65 g(C)/kg (PGL7), correspondant également à un enrichissement organique moyen (sauf pour la station PGL14 où la valeur est juste au-dessous de la limite supérieure de l'enrichissement faible).

► Azote Kjeldahl (NTK)

Comme expliqué dans le paragraphe 2.2.2, l'origine de l'azote organique peut être la décomposition des déchets organiques, les rejets organiques humains ou animaux (urée), des adjuvants de certains détergents. La présence d'azote organique est donc souvent un signe de pollution par les eaux usées.

En 2022, les teneurs en NTK analysées varient entre 1,08 (E06-réf) et 1,14 g/kg MS (E02). La distribution en azote est homogène, sans différence significative entre les stations. **L'enrichissement est classé comme fort en NTK** d'après les référentiels de Licari (1998).

L'expertise InVivo-2013 est basée sur les classes de référence établies par Romont (1996) et Pruvot (1999) pour le calcul de l'Indice de Contamination Organique. Ainsi, d'après cette étude, la quasi-totalité des échantillons des stations plus profondes (PGL6 à PGL19) présente une concentration en azote de 1 g/kg MS, et de 1,2 g/kg pour les stations PGL6 et PGL12 ; ces valeurs correspondent au deuxième niveau de référence

de l'indice susmentionné (< 1,2 g/kg MS), soit un niveau de contamination faible, tandis que ce niveau d'enrichissement est qualifié de fort selon le référentiel Licari, 1998.

Les niveaux d'enrichissement organique en NTK mesurés en 2013 et 2022 sont donc équivalents.

► Phosphore total

En 2013, les concentrations en phosphore analysées étaient élevées dans les échantillons prélevés sur la zone d'étude. Selon les classes définies par Romont (1996) et Pruvot (1999) pour le calcul de l'Indice de Contamination Organique utilisées pour cette étude, ces teneurs se situaient à des niveaux de contamination moyens à forts. Ainsi, les teneurs en phosphore dans les stations plus profondes (PGL6 à PGL 19) étaient comprises entre 1,15 (PGL19) et 1,24 g/kg (PGL18).

A contrario, les teneurs en phosphore analysées en 2022 varient entre 0,47 (E01 et E02) et 0,57 g/kg (E04), soient des valeurs 2 à 3 fois plus faibles que celles observées en 2013.

► L'IEO

La matière organique et les nutriments viennent enrichir en partie le sédiment. Un indice synthétique de pollution organique peut être calculé à partir de teneurs en carbone organique total, azote et phosphore (Alzieu, 2003). Pour chacune des stations, l'IEO calculé est le suivant :

Nom station	E01	E02	E03	E04	E05	E06-réf
IEO obtenu (X)	2	2	2	3	3	3

Niveau IEO (détails cf. § 2.2.2.3.) : ■ Null=0 ■ Faible 0 < X ≤ 3 ■ Moyen 3 < X ≤ 6 ■ Fort X > 6

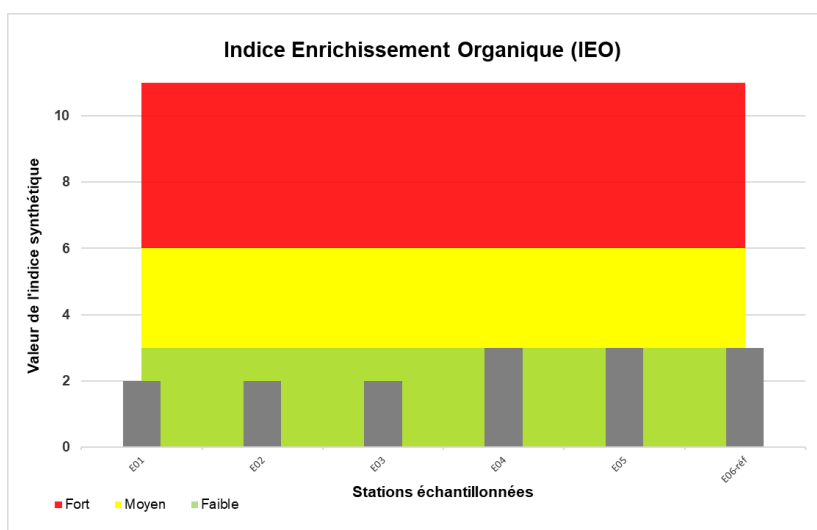


Figure 14. IEO obtenus sur les 6 stations

L'enrichissement organique global obtenu est qualifié de « faible » et montre une certaine homogénéité entre les stations échantillonnées.

3.2.2. Contaminants chimiques

3.2.2.1. Métaux (Eléments Traces Métalliques, ETM)

A titre comparatif avec les résultats obtenus lors de la campagne InVivo-2013 concernant les ETM, seules les stations comprises entre 90 et 100 m de profondeur et qui ont fait l'objet de prélèvement de sédiments ont été considérées, à savoir les stations PGL 5, 6, 7, 11, 12, 14, 18 et 19. Pour ces stations nous avons également calculé la valeur moyenne des teneurs en ETM.

Les résultats totaux des analyses de sédiments relatifs à la campagne InVivo-2013 sont présentés en Annexe.

3.2.2.1.1. Aluminium

L'aluminium se trouve rarement sous sa forme pure car il est principalement extrait d'un minerai appelé bauxite où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Ce métal est ainsi employé dans de nombreuses industries diverses : les composants structuraux faits à partir d'aluminium sont essentiels à l'industrie aéronautique et sont très importants dans d'autres secteurs du transport et de la construction notamment maritime. Par ailleurs, l'aluminium est généralement considéré comme un constituant des argiles. Il est donc représentatif des sédiments fins. (InVivo 2013)

Le graphique ci-après représente les différentes teneurs en aluminium des 6 stations échantillonnées :

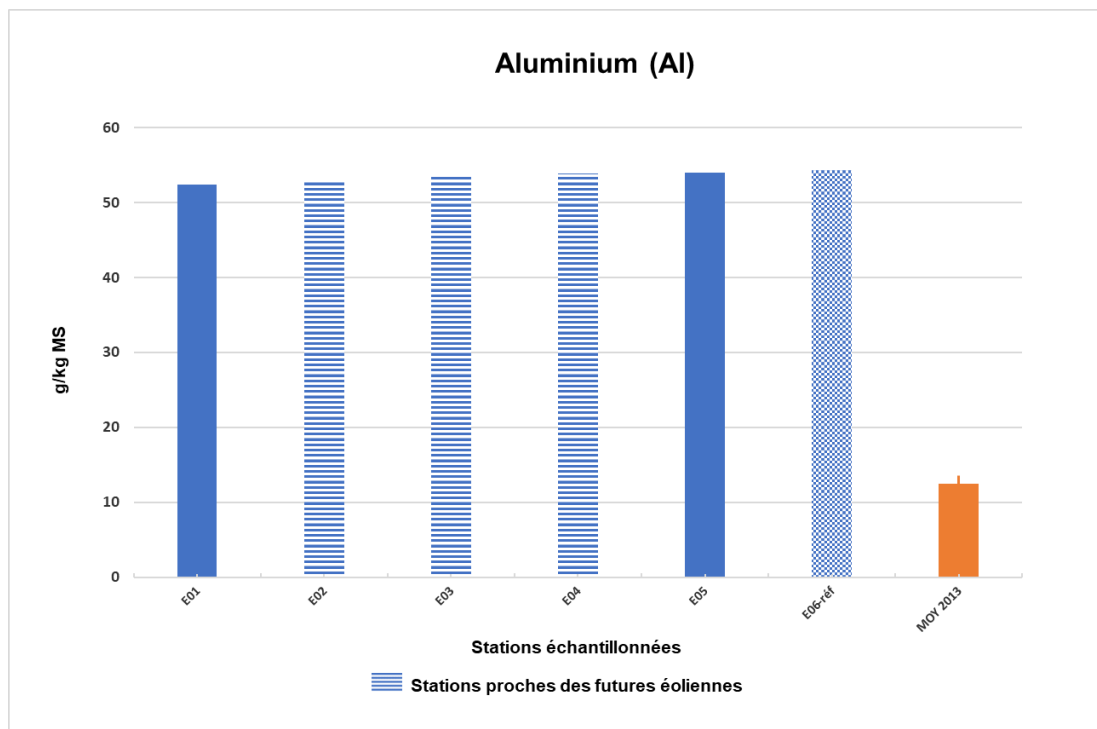


Figure 15. Teneurs en aluminium sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

Les teneurs en aluminium en 2022 varient entre 52,4 (en E01) et 54,4 mg/kg MS (E06-réf).

En 2013, dans les stations échantillonnées à profondeur équivalente (entre 90 et 100 m), les concentrations en aluminium se situaient entre 11 g/kg (PGL12) et 14,2 g/kg (PGL14), avec une valeur moyenne de 12,46 g/kg. Ces teneurs sont 4 fois plus faibles que lors du suivi effectué en 2022.

Il est possible que les éléments traces en aluminium soient véhiculés par le courant liguro-provençal : la concentration en aluminium est légèrement plus importante au large (E06-réf) qu'en se rapprochant de la côte. La présence à l'ouest du site d'étude, au niveau de la fosse de la Cassidaigne, de l'ancien rejet de l'usine de bauxite Aluminium Pechiney, pourrait être la cause d'une contamination globale des vases de la zone du golfe de Fos. Notons que les rejets industriels du golfe de Fos pourraient également être la cause de telles concentrations dans les sédiments des stations situées dans cette zone d'étude.

3.2.2.1.2. Arsenic

L'arsenic est un composé naturellement présent dans les sols à l'état de traces, il est cependant associé sous forme de sulfures à de nombreux minerais dont l'extraction, le transport et le traitement métallurgique contribuent à sa dissémination dans le milieu environnant. L'arsenic devient alors un sous-produit peu valorisable que l'on retrouve dans les rejets liquides ou solides et dans les émissions atmosphériques. Il est utilisé principalement dans des préparations phytosanitaires et l'industrie du verre. La combustion du charbon représente également une source majeure d'apport. (InVivo 2013)

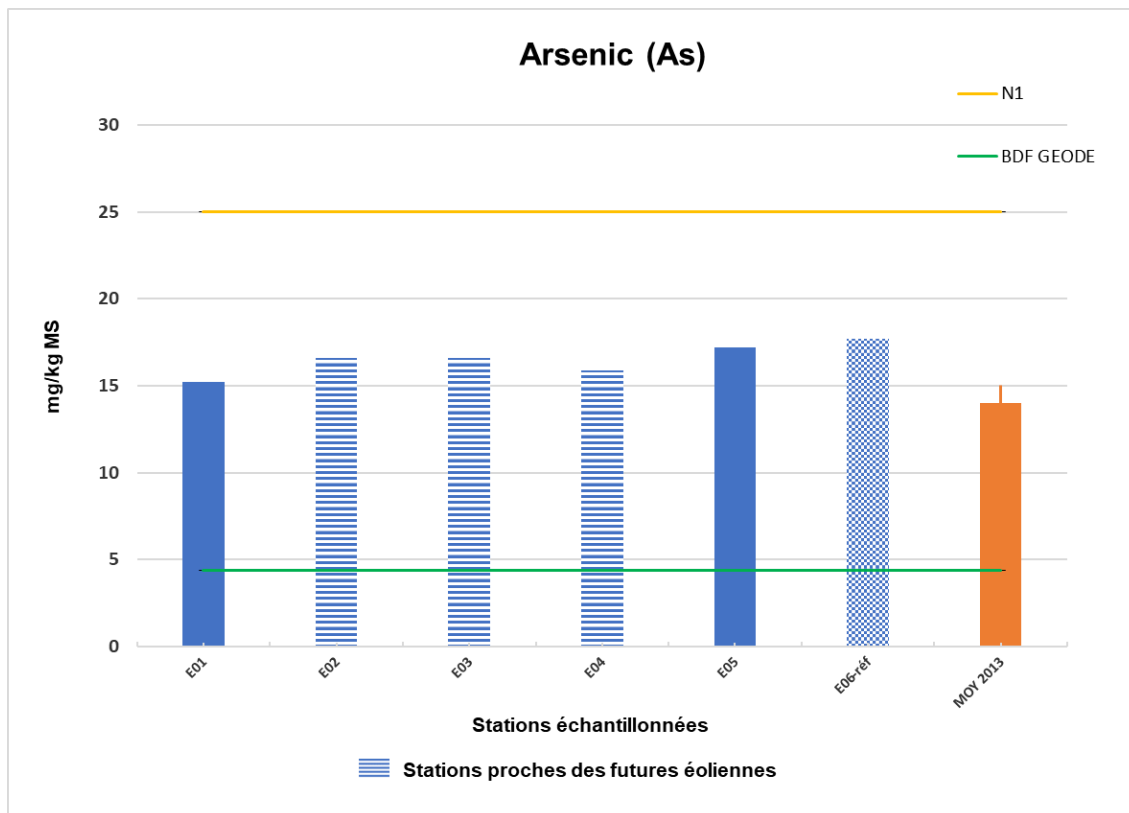


Figure 16. Teneurs en arsenic sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les teneurs en arsenic obtenues sont, homogènes entre elles et comprises entre 15,2 (E01) et 17,7 mg/kg (E06-réf), sous le seuil réglementaire N1.

En 2013, les concentrations en arsenic étaient comprises entre 12,9 mg/kg (PGL14) et 15,5 mg/kg (PGL19), avec une valeur moyenne de 14,0 mg/kg.

Les concentrations relevées en 2022 sont donc légèrement supérieures à celles relevées en 2013, et dans les deux suivis toutes au-dessus du seuil GEODE (4,4 mg/kg).

3.2.2.1.3. Cadmium

Le cadmium n'existe pas à l'état natif, il est exploité industriellement comme un sous-produit de la métallurgie du zinc. Il est principalement utilisé pour la fabrication de batteries, le traitement de surface (cadmiage) des aciers (revêtement anticorrosion), les industries électriques et électroniques, et la production de pigments colorés destinés principalement aux matières plastiques. Dans l'environnement, les autres sources de cadmium sont la combustion du pétrole ainsi que l'utilisation de certains engrais chimiques où il est présent à l'état d'impureté. (InVivo 2013)

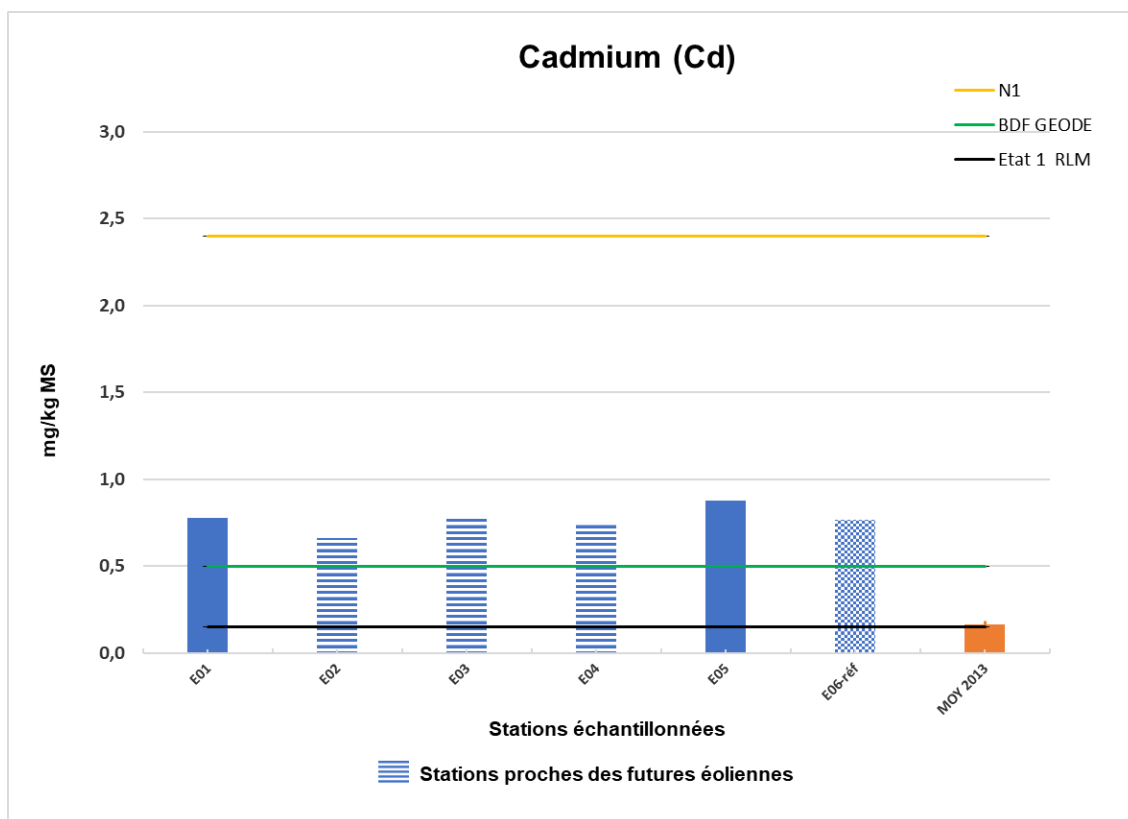


Figure 17. Teneurs en cadmium sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les teneurs en cadmium sont comprises entre 0,66 (E02) et 0,88 mg/kg MS (E05) et dépassent les seuils GEODE et de l'Etat 1 RLM, tout en restant sous le seuil réglementaire N1.

En 2013, l'ensemble des concentrations en cadmium était légèrement supérieur ou équivalent au seuil haut de l'Etat 1 RLM (0,15 mg/kg MS). Il est dit que "les prélèvements de la campagne 1994 du RNO montrent également une contamination ancienne de la zone d'étude par le cadmium. Depuis le renforcement des réglementations de l'usage de cet élément et l'arrêt de certaines activités polluantes, les niveaux de concentration de cadmium ont tendance à baisser (Ifremer, 2013), ce qui pourrait expliquer les concentrations légèrement plus faibles observées au niveau du site PGL en 2013."

Les concentrations en cadmium minimale, maximale et moyenne sur les stations PGL5 à PGL19 sont respectivement de 0,14, 0,20 et 0,16, mg/kg MS.

Les concentrations relevées en 2022 sont ainsi 4 fois plus élevées que lors du suivi réalisé en 2013.

3.2.2.1.4. Chrome

Le chrome est un des métaux les plus utilisés et peut donc être rejeté en quantités significatives dans l'air et les milieux aquatiques. La majeure partie de chrome parvenant à la mer depuis le continent provient des fleuves, l'atmosphère constituant une source beaucoup moins importante. Sa toxicité dépend de sa forme chimique. Sa forme réduite (chrome III) fait partie des éléments essentiels dans la vie animale. Sa forme oxydée (chrome VI) est toxique, cancérigène à forte dose pour l'être humain, et elle provoque des anomalies dans le développement larvaire des bivalves. (InVivo 2013)

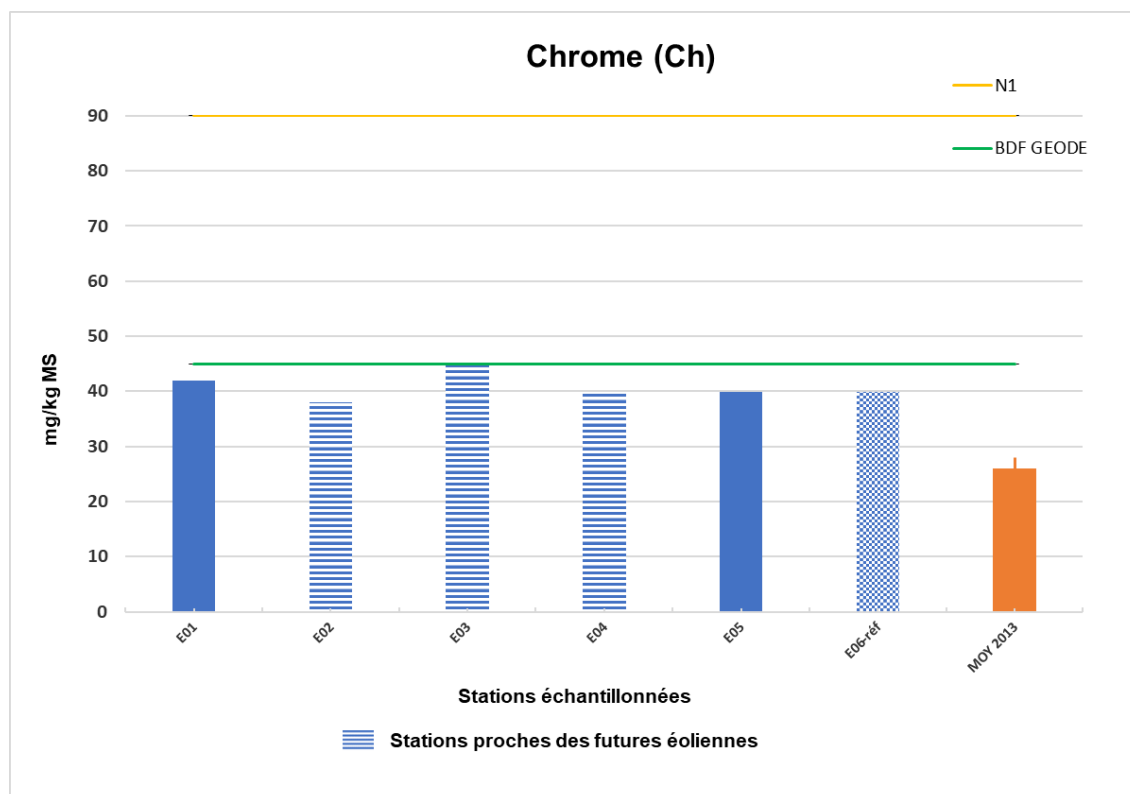


Figure 18. Teneurs en chrome sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les teneurs en chrome sont comprises entre 38,0 (E02) et 45,4 mg/kg MS (E03), cette dernière située juste au-dessus du seuil GEODE. Dans l'ensemble les concentrations restent inférieures au seuil réglementaire N1.

En 2013, la teneur en chrome moyenne sur les huit stations plus profondes était de 25,95 mg/kg MS. D'après cette étude : « On observe une augmentation graduelle de la concentration du chrome dans les sédiments depuis cette station jusqu'aux stations PGL6 et PGL7. Les valeurs sont par la suite relativement équivalentes et se situent autour de 25 mg/kg de MS. Ce gradient pourrait être expliqué par la distance séparant les stations au panache turbide du Rhône ou à l'augmentation de la profondeur, celle-ci faisant chuter les constantes hydrodynamiques et favorisant ainsi la sédimentation. »

Les concentrations relevées en 2022 sont ainsi sensiblement plus élevées que celles mesurées en 2013.

3.2.2.1.5. Cuivre

L'emploi du cuivre est extrêmement diversifié (ex : algicides et les peintures antisalissures des navires). Le cuivre est le matériau de base de l'industrie électrique et de la construction et ses qualités mécaniques rendent possibles de nombreux procédés d'usinage. Il est aussi utilisé dans le traitement de la vigne et des arbres fruitiers, ainsi que dans les peintures antisalissure. (InVivo 2013)

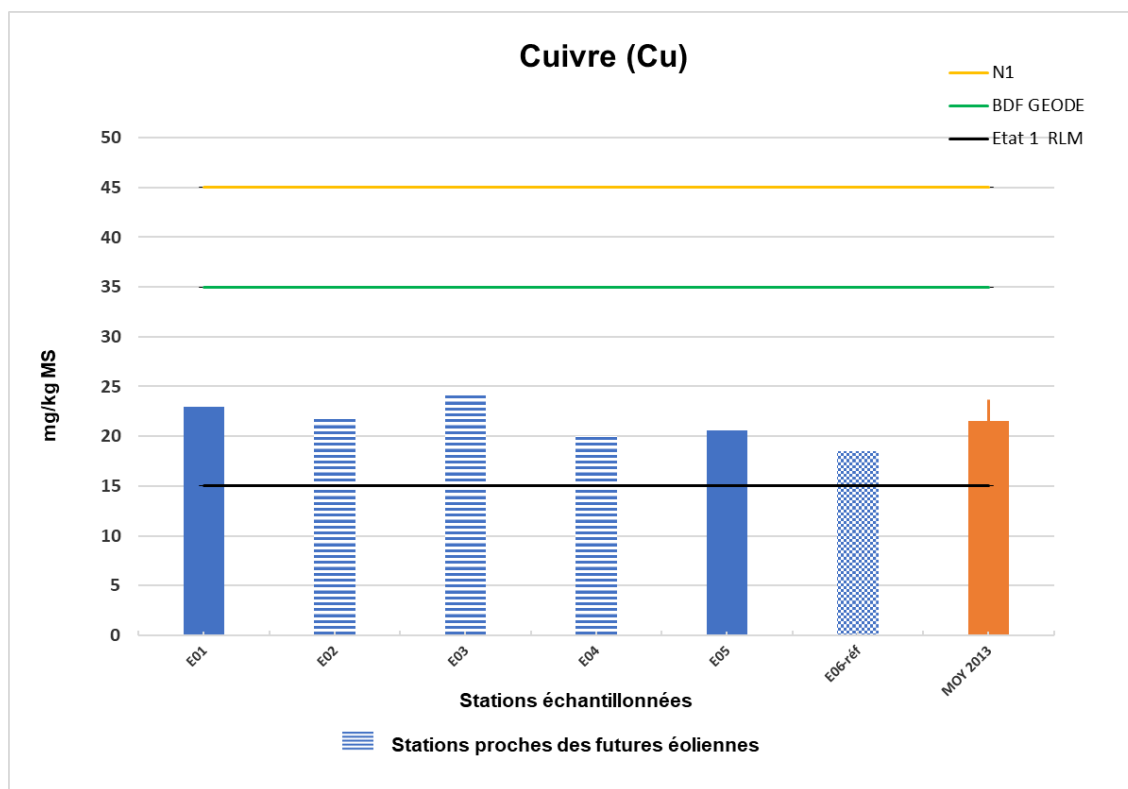


Figure 19. Teneurs en cuivre sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les teneurs en cuivre présentent des valeurs comprises entre 18,5 (E06-réf) et 24,1 mg/kg (E03), et légèrement plus faible dans les stations plus éloignées de la côte. Toutes les valeurs se situent sous le seuil réglementaire N1 et GEODE, et dans l'Etat 2 RLM.

En 2013, les teneurs en cuivre des sédiments prélevés sur les stations comprises entre 90 et 100 m variaient entre 18,7 mg/kg, sur la station PGL19 la plus éloignée de la côte, et 24,7 mg/kg sur PGL5, la station la plus proche de

la côte. Ce gradient de concentration pourrait être expliqué par l'éloignement du débouché du Rhône. Ces valeurs étaient supérieures au seuil haut de l'Etat 1 RLM (15 mg/kg) et correspondaient donc à l'état 2 de ce référentiel.

Les concentrations relevées lors des campagnes de suivi 2013 et 2022 présentent donc des valeurs globalement équivalentes.

3.2.2.1.6. Mercure

Seul métal volatil, le mercure, naturel ou anthropique, peut être transporté en grandes quantités par l'atmosphère. Les sources naturelles en sont le dégazage de l'écorce terrestre, les feux de forêt, le volcanisme et le lessivage des sols. Il est le plus toxique des métaux traces, et plus particulièrement ses formes organiques. Les sources anthropiques sont constituées par les processus de combustion (charbon, pétrole, ordures ménagères, etc.), de la fabrication de la soude et du chlore ainsi que l'orpaillage. Le mercure est également employé en agriculture (fongicide), pour le traitement du bois, en tant qu'explosif d'amorçage, dans les peintures, piles ou batteries, plastiques et caoutchoucs.

Sur le pourtour méditerranéen, une partie du mercure provient du lessivage de mines de cinabre et des massifs volcaniques et métamorphiques.

La dose létale du mercure est fortement influencée par sa forme chimique qu'il est difficile de connaître dans le milieu naturel. (InVivo 2013)

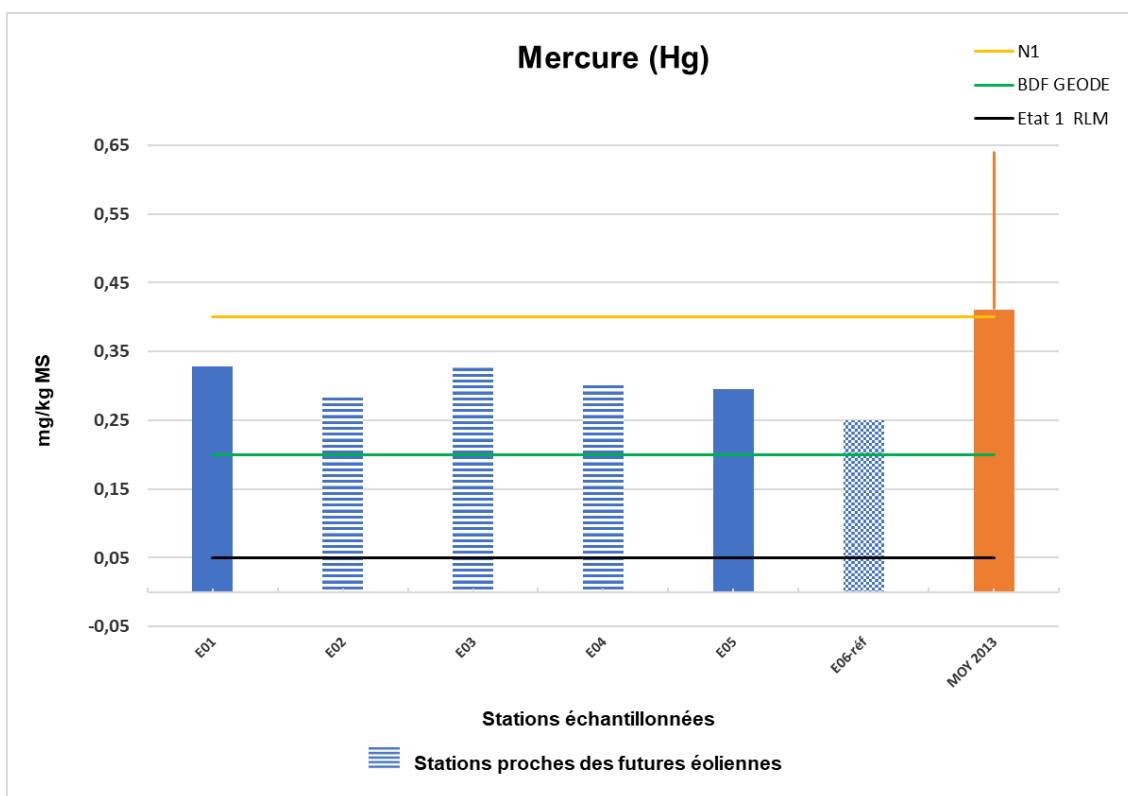


Figure 20. Teneurs en mercure sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les teneurs en mercure sont relativement homogènes entre les stations, comprises entre 0,25 (E06-réf) et 0,33 mg/kg (E03). Ces valeurs sont inférieures au seuil réglementaire N1 mais supérieures aux seuils GEODE et Etat 3 RLM.

En 2013, les teneurs analysées étaient relativement fortes, avec une valeur minimale de 0,20 mg/kg (PGL18) et une valeur maximale de 0,93 mg/kg (PGL11), sur l'ensemble des huit stations plus profondes. La concentration moyenne calculée sur ces stations est de 0,41 mg/kg, influencée par les valeurs extrêmes des trois stations PGL5, 6 et 11 ; ces valeurs dépassaient le seuil réglementaire N1 ainsi que les seuils GEODE (0,2 mg/kg) et de l'Etat 3 RLM (> 0,4 mg/kg). Toutes les autres stations présentaient néanmoins des valeurs élevées (comprises entre 0,2 et 0,35 mg/kg) correspondant à l'Etat 2 RLM ($0,05 < x \leq 0,4$ mg/kg).

Les valeurs relevées en 2022 sont donc globalement équivalentes à celles de 2013, hormis les pics de concentration susmentionnés sur trois stations PGL.

3.2.2.1.7. Nickel

Le nickel est un métal bien répandu sur la croûte terrestre. Les apports fluviaux en milieu marin sont estimés à 1,5 million de tonnes par an essentiellement sous forme particulaire. Le nickel entre dans la fabrication d'acier inoxydable, comme catalyseur dans l'industrie chimique et dans certains pigments. Cependant, l'introduction du nickel d'origine anthropique dans les milieux aquatiques provient principalement des eaux usées domestiques et des boues de station d'épuration. L'utilisation des combustibles fossiles, la production de métaux non-ferreux, l'activité volcanique et l'érosion éolienne constituent l'essentiel des flux vers l'atmosphère. Le nickel est toxique pour les algues et les poissons pour des doses de 1 mg/l. (InVivo 2013)

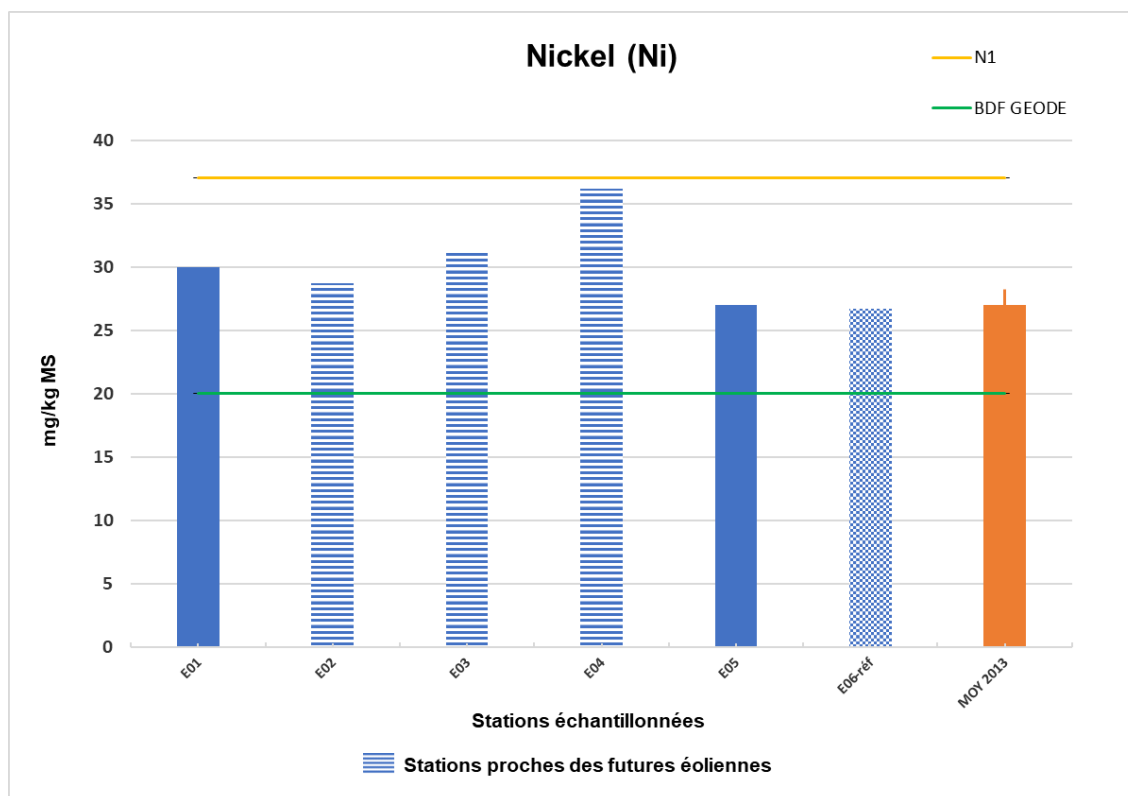


Figure 21. Teneurs en nickel sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les teneurs en nickel fluctuent entre 26,7 (E06-réf) et 36,2 mg/kg (E04). Elles restent inférieures au seuil réglementaire N1 bien que la concentration de la station E04 (36,2 mg/kg) se trouve à la limite de ce seuil.

En 2013, l'ensemble des échantillons prélevés présentait des concentrations en nickel plutôt homogènes comprises entre 25,5 (PGL6) et 29,5 mg/kg (PGL12). Ces concentrations dépassaient la valeur de bruit de fond GEODE (20 mg/kg), mais restaient inférieures au seuil réglementaire N1. La teneur moyenne calculée sur les huit stations plus profondes est de 27,0 mg/kg.

Les concentrations de nickel relevées lors des suivis 2013 et 2022 sont dans l'ensemble relativement équivalentes, cependant légèrement plus élevées en 2022 sur les stations E01 à E04.

3.2.2.1.8. Plomb

Comme le mercure, le plomb a aussi une origine naturelle due à l'activité volcanique ou au lessivage de massifs granitiques ou aux feux de forêt. Son cycle atmosphérique est très important et constitue une source majeure d'apport à l'environnement. Ce métal est présent dans de nombreux minerais, notamment le galène, mais il est rarement disponible à l'état natif. Les usages principaux de ce métal restent la fabrication d'accumulateur et l'industrie chimique. Il est également issu de l'activité des fonderies et des incinérateurs d'ordures ménagères, de certaines peintures, d'insecticides, de gaines de câbles. (InVivo 2013)

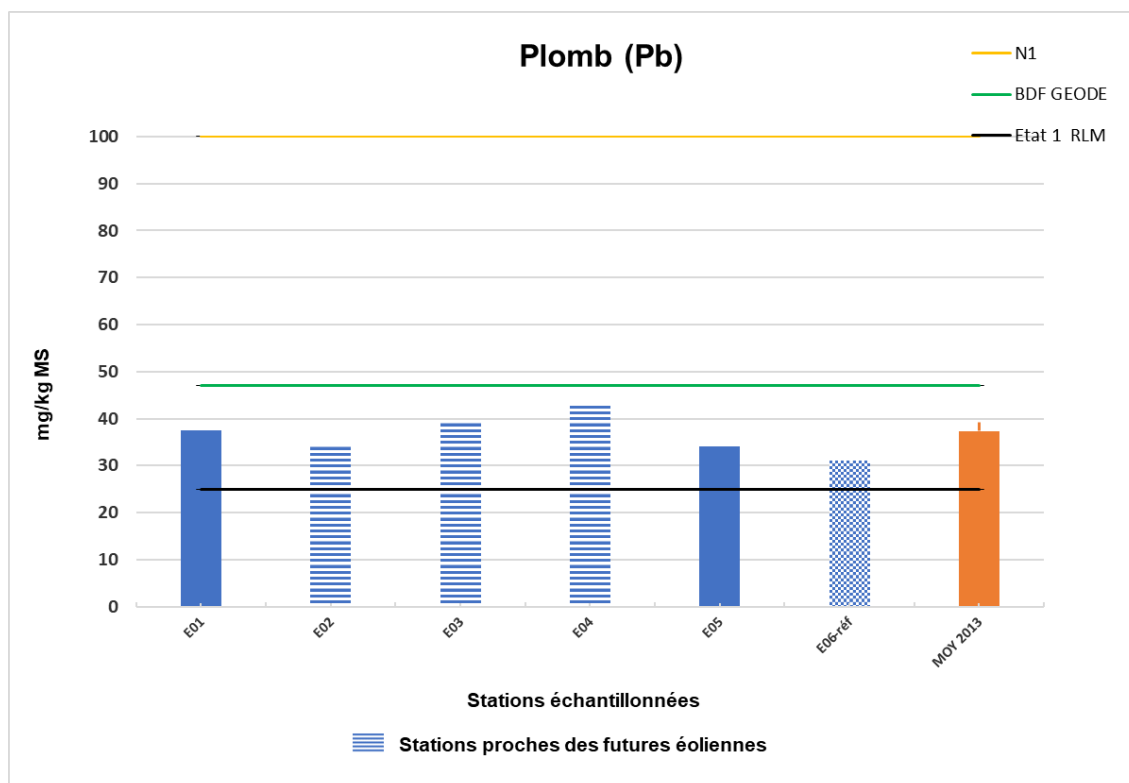


Figure 22. Teneurs en plomb sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les sédiments analysés présentent des concentrations situées entre 31 (E06-réf) et 42,9 mg/kg (E04). Ces valeurs sont comprises dans l'Etat 2 RLM ($25 < x \leq 50$ mg/kg) et restent sous les seuils GEODE et N1.

En 2013, les concentrations en plomb relevées dans les huit stations plus profondes étaient relativement équivalentes, situées entre 34,8 (PGL12) et 40 mg/kg (PGL6). Pour l'ensemble de ces stations, les valeurs mesurées correspondaient à l'Etat 2 RLM, avec une valeur moyenne calculée de 27,0 mg/kg.

Dans l'ensemble, les teneurs en plomb mesurés en 2013 et en 2022 sont sensiblement équivalentes.

3.2.2.1.10. Zinc

Les sources de zinc dans les milieux aquatiques peuvent être industrielles et domestiques, mais également agricoles (présence significative dans certains engrais phosphatés). La forme la plus courante et la plus mobile du zinc dans les sols est Zn^{2+} qui est facilement adsorbé sur les composants minéraux (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium) et organiques, ce qui conduit à une accumulation dans les horizons superficiels. Le zinc est considéré comme facilement soluble par rapport aux autres éléments trace métalliques. (InVivo 2013)

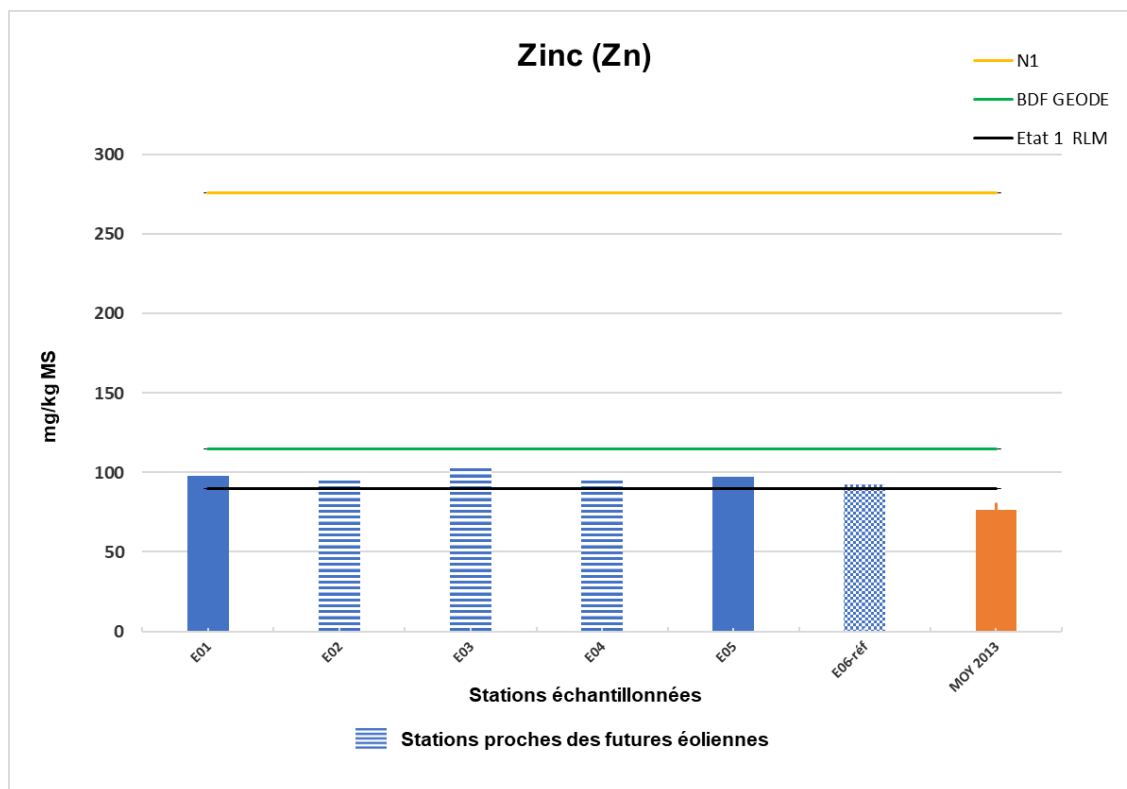


Figure 23. Teneurs en zinc sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

En 2022, les concentrations en zinc varient entre 92,5 (E06-réf) et 104 mg/kg (E03), valeurs toutes supérieures au bruit de fond méditerranéen, situées dans l'Etat 2 RLM pour ce métal ($90 < x \leq 200$ mg/kg), mais inférieures aux seuils GEODE et N1.

En 2013, la totalité des échantillons prélevés sur les huit stations plus profondes présentait des teneurs en zinc comprises entre 70,7 (PGL14) et 81 mg/kg (PGL6), correspondant à l'état 1 RLM (< 90 mg/kg) et inférieures aux seuils GEODE et N1.

Les valeurs relevées en 2022 sont donc sensiblement plus élevées que celles relevées en 2013.

3.2.2.1.11. Tableau récapitulatif des analyses des ETM 2022

Tableau 24. Concentrations des éléments traces métalliques mesurées sur les 6 stations (2022)

ETM (mg/kg MS)	Stations d'échantillonnage						Seuils de référence			
	E01	E02	E03	E04	E05	E06-réf	N1 ¹	N2 ¹	BDF GEODE ²	BDF RLM ³
Aluminium	52400	52900	53400	53900	54000	54400	-	-	-	-
Arsenic	15,2	16,6	16,6	15,9	17,2	17,7	25	50	4,4	
Cadmium	0,78	0,66	0,77	0,75	0,88	0,77	1,2	2,4	0,5	0,15
Chrome	42	38	45,4	39,5	39,9	39,8	90	180	45	
Cuivre	23	21,8	24,1	20	20,6	18,5	45	90	35	15
Mercure	0,33	0,28	0,33	0,30	0,29	0,25	0,4	0,8	0,2	0,05
Nickel	30	28,7	31,3	36,2	27	26,7	37	74	20	
Plomb	37,5	34,2	39,8	42,9	34	31	100	200	47	25
Zinc	97,6	95,2	104	95,4	97,1	92,5	276	552	115	90

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020) :
 Concentration < N1 : sédiment non toxique
 Concentration > N1 : sédiment nécessitant des investigations écotoxicologiques
 Concentration > N2 : sédiment toxique

(2) Bruit de fond nationaux établis par Geode (2009)
 (3) Seuils établis par le Réseau Littoral Méditerranéen (RLM, 2002)

An synthèse, les concentrations en ETM dans les sédiments de 2022 sont toutes inférieures au seuil de référence N1 caractérisant les sédiments non toxiques. Ces teneurs sont en revanche supérieures aux bruits de fond définis par GEODE ou aux états de référence établis par le RLM, caractérisant ainsi l'empreinte anthropique et la proximité des apports de la côte et du Rhône.

Les concentrations en ETM sont dans les mêmes ordres de grandeur que celles observées lors de la campagne de suivi de l'état initial réalisée en 2013 par InVivo, à l'exception de l'aluminium et du cadmium dont les concentrations en 2022 sont respectivement 5 et 4 fois plus élevées qu'en 2013.

3.2.2.2. HAP

Les HAP présents dans l'environnement marin résultent de différents processus, mais la combustion des charbons et pétroles constitue la principale voie d'introduction des HAP dans l'environnement. Les activités industrielles telles que les usines de production d'aluminium, les raffineries de pétrole ou les rejets urbains contribuent également de manière importante aux apports notamment aquatiques (Alzieu, 1999).

Les résultats 2022 des 16 HAP (reconnus toxiques pour l'environnement) analysés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 25. Teneurs des HAPs analysés sur les 6 stations (2022)

HAP (µg/kg MS)	Stations échantillonnées						Niveaux de référence ¹ (µg/kg MS)		Bruits de fond (µg/kg MS)	
	E01	E02	E03	E04	E05	E06-réf	N1	N2	RLM ²	OSPAR ³
Acénaphène	<10	<10	<10	<10	<10	<10	15	260		-
Acénaphthylène	<10	<10	<10	<10	<10	<10	40	340		-
Anthracène	14	19	20	15	18	11	85	590		3
Benzo(a)anthracène	71	82	87	63	75	51	260	930		9
Benzo(a)pyrène	67	78	85	67	75	49	430	1 015	100	15
Benzo(b)fluoranthène	132	165	186	145	169	98	400	900	200	-
Benzo(g,h,i)pérylène	54	73	74	65	74	37	1 700	5 650	100	45
Benzo(k)fluoranthène	43	52	60	42	50	32	200	400	100	-
Chrysène	88	126	133	105	118	66	380	1 590		11
Dibenzo(a,h)anthracène	16	131	10	67	11	64	60	160		
Fluoranthène	18	145	18	62	45	113	600	2 850	40	20
Fluorène	22	171	16	76	35	112	20	280		85
Indéno(1,2,3)c,d-pyrène	18	126	15	60	37	96	1 700	5 650	100	50
Naphtalène	19	158	16	66	34	104	160	1130		5
Phénanthrène	11	90	10	47	10	47	240	870		17
Pyrène	98	110	127	98	118	73	500	1 500		13

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020) :
 Concentration < N1 : sédiment non toxique (code vert)
 Concentration > N1 : sédiment nécessitant des investigations écotoxicologiques (code jaune)
 Concentration > N2 : sédiment toxique (code rouge)

(2) Seuils établis par le Réseau Littoral Méditerranéen (RLM, 2002)
 (3) Ospar (2009)

En 2022, aucun HAP ne dépasse le seuil réglementaire N1 à l'exception des deux HAP : le fluorène et le le dibenzo(a,h)anthracène. Le fluorène dépasse le seuil de 20 µg/kg MS sur toutes les stations sauf la E03 et avec des valeurs très variables comprises entre 22 et 171 µg/kg MS. Le dibenzo(a,h)anthracène dépasse légèrement le seuil de 60 µg/kg MS sur les stations E04 et E06-réf, avec des valeurs respectivement de 67 et 64 µg/kg, et de façon plus importante sur la station E02 avec une valeur de 131 µg/kg.

Dans l'ensemble la répartition des différents HAP est relativement homogène entre les stations, hormis les valeurs particulièrement élevées mentionnées ci-dessus, ainsi que les proportions de fluoranthène dans les stations E02 et E06-réf.

En 2013, les HAP détectés sur l'ensemble des stations plus profondes (PGL5 à PGL19) présentaient également des proportions relativement faibles dans les sédiments analysés, avec une répartition des différents HAP globalement homogène entre les stations. A noter les concentrations en fluoranthène dans toutes les stations et en benzo(a)pyrène dans la station PGL6 correspondant à l'Etat 2 RLM.

3.2.2.3. PCB

Les PCBs constituent des témoins particulièrement spécifiques de la pollution contemporaine des milieux aquatiques, car contrairement aux métaux et aux hydrocarbures, ils ne sont pas présents naturellement dans le milieu. Leur origine est donc exclusivement anthropique. Actuellement, ils sont encore utilisés en France dans les transformateurs et les condensateurs électriques.

Les résultats des différents PCB suivis sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 26. Résultats des PCB sur les 6 stations (2022)

STATIONS	PCB 101	PCB 118	PCB 138	PCB 153	PCB 180	PCB 28	PCB 52
	µg/kg MS						
E01	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5
E02	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5
E03	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5
E04	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5
E05	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
E06-réf	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5

En 2022, tous les dosages des six stations montrent que les concentrations en PCB sont inférieures aux limites de quantification (LQ) établies à 10 µg/kg MS pour la plupart des composés. Ce résultat est identique aux observations des teneurs en PCB de 2013.

3.2.2.4. Biocides (organoétains)

Certains biocides sont délibérément introduits dans le milieu aquatique afin de protéger les navires ou les installations portuaires ou maritimes (Oehlmann et al., 1998). Dans le milieu marin, la présence de pesticides organochlorés et de tributylétain (TBT) a attiré l'attention des chercheurs du monde entier et est à l'origine de nombreux travaux de recherche en raison de leur persistance et des dangers qu'ils représentent pour la vie marine et la santé humaine. Le tributylétain et ses composés appartiennent à la famille des produits organostanniques ou étains organiques (MBT, DBT, TBT). Il s'agit d'une molécule complexe utilisée pour ses propriétés biocides (toxiques).

Les teneurs des biocides analysés se trouvent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 27. Résultats des biocides sur les 6 stations (2022)

Stations	Dibutylétain cation (DBT)	Monobutylétain cation (MBT)	Tributylétain cation (TBT)	Niveaux de référence du TBT ¹ (µg/kg MS)	
	µg/kg MS			N1	N2
E01	3,4	4,5	2,8	100	400
E02	3,5	4,6	2,8		
E03	3,3	4,4	2,7		
E04	3,4	4,5	2,7		
E05	3,4	4,5	2,7		
E06-réf	3,2	4,3	2,6		

(1) Niveaux de référence (Arrêté du 30/06/2020).

En 2022 les concentrations sont largement inférieures au seuil N1 pour le TBT (100 µg/kg). Elles sont quasi équivalentes entre les stations, avec une valeur moyenne de 3,4 µg/kg, de 4,5 µg/kg pour le DBT et de 2,7 µg/kg pour le TBT.

En 2013, les mesures de concentration en organoétains réalisées sur les stations plus profondes (PGL5 à PGL19) montraient des valeurs peu élevées, dans l'ensemble inférieures à la valeur minimale de 0,414 µg/kg (DBT en PGL5) et maximale de 1,08 µg/kg (TBT et MBT en PGL7).

Ainsi, les concentrations en 2022 montrent des valeurs 3 à 6 fois plus élevées qu'en 2013.

3.2.3. Microbiologie : *Escherichia coli*

Les concentrations en *E. coli* des sédiments sont variables au cours de l'année (en fonction de la température, salinité, des apports ponctuels des bassins versants, etc.) (IFREMER, Derrien A, 2004)

Il n'existe, à ce jour, aucune directive officielle permettant d'évaluer le risque sanitaire microbiologique des sédiments marins. A titre indicatif, le Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement (GEODRISK) recommande cependant des seuils que les sédiments de dragage ne doivent pas dépasser (DEAL Réunion, 2017) :

- Pour *E. coli* : 10 000 *E. coli* / 100 g de sédiment sec ;
- Pour les Entérocoques intestinaux : 4 000 Entérocoques / 100 g de sédiment sec.

Les résultats des analyses bactériologiques sur les stations sédimentaires échantillonnées sont les suivants :

Tableau 28. Résultats des analyses bactériologiques sur les 6 stations (2022)

Stations	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g MB)
E01	<1
E02	<1
E03	<1
E04	<1
E05	<1
E06-réf	<1

L'ensemble des analyses sur les teneurs en *E.Coli* indiquent des valeurs inférieures au seuil de détection du laboratoire d'analyse.

Les sédiments prélevés sur la zone d'étude PGL ne présentent donc aucune contamination bactériologique fécale.

3.3. Caractéristiques du benthos

3.3.1. Aspect des échantillons

Le tableau suivant récapitule les observations faites sur le benthos lors des prélèvements à la benne Van Veen.

On note que le taux de remplissage de la benne est de 100 %, ce qui est lié à la nature du sédiment très envasé et facilement pénétrable par la benne.

Les volumes du refus de tamis (tout ce qui ne passe pas à travers les 1 mm de vide de maille des tamis) sont tous très faibles, ce qui est fréquent dans ce type de sédiment profond, habituellement colonisés par une faune benthique de petite taille.

La faune identifiée visuellement dans les tamis est constituée essentiellement d'annélides (animaux et tubes), de gastéropodes (type turritelles) et de petits crustacés.

Tableau 29. Description des prélèvements de benthos sur les 6 stations (2022)

Stations	Réplicats	% de remplissage	Volume refus de tamis	Déchets	Faune/Flore
E01	A	100%	très faible	non	turitelles, crabes, crevettes, quelques annélides, peu de coquilles, peu de vie
	B				
	C				
E02	A	100%	très faible	non	crabes, quelques annélides, quelques coquilles, turitelles
	B				
	C				
E03	A	100%	très faible	non	crabes, crevettes, turritelles, feuilles
	B				
	C				
E04	A	100%	très faible	non	turitelles, coquilles, annélides
	B				
	C				
E05	A	100%	très faible	non	turitelles, coquilles, gros annélides
	B				
	C				
E06-réf	A	100%	très faible	non	turitelles, oursin des sables, coquilles
	B				
	C				

La planche suivante donne des illustrations de l'aspect et du volume des refus de tamis.



Figure 24. Aperçu des refus de tamis sur les 6 stations (Juin 2022)

3.3.2. Structure du benthos

3.3.2.1. Composantes principales du benthos

La richesse des espèces, la densité et la biomasse moyenne ont toutes été calculées sur la base de la liste des espèces identifiées. La richesse des espèces est calculée par station (0,3 m²), tandis que tous les autres descripteurs sont moyennés sur les 3 bennes et ramenés à une surface standard de 1 m² (Tableau suivant).

Tableau 30. Composantes principales du peuplement benthique des 6 stations (2022)

Descripteur	E01	E02	E03	E04	E05	E06-réf
Richesse spécifique (nb.sp./station)	20	20	22	20	32	24
Densité tot (nb.ind./m ²)	167	120	117	113	170	120
Biomasse (mg/m ²)	1,13	0,98	0,91	0,44	0,51	0,68

3.3.2.1.1. Richesse spécifique

Un total de 242 individus a été dénombré, appartenant à 64 taxons différents (Tableau 31), qui ont été triés, dénombrés et identifiés au niveau taxonomique le plus bas possible.

La richesse spécifique varie entre 20 (station E01 et E02) et 32 (station E05). Le nombre moyen d'espèces est de 23 ± 5 espèces par station, ce qui peut être considéré comme relativement faible pour un environnement benthique de cette profondeur (de l'ordre de 100 m de fond).

On observe sur la figure suivante que la richesse spécifique varie peu entre les stations ce qui est cohérent au regard de la faible différence bathymétrique existante entre les stations : elles sont toutes situées dans des fonds de l'ordre de 100 m de profondeur.

Tableau 31. Taxons identifiés sur les 6 stations échantillonnées (Juin 2022)

ANNELIDA		POLYCHAETA
Famille		Espèces
1	Ampharetidae	<i>Anobothrus gracilis</i>
2	Ampharetidae	<i>Melinna palmata</i>
3	Capitellidae	<i>Leiocapitella dollfusi</i>
4	Capitellidae	<i>Notomastus latericeus</i>
5	Chaetopteridae	<i>Spiochaetopterus costarum</i>
6	Cirratulidae	<i>Aphelochoeta</i> sp.
7	Cirratulidae	<i>Chaetozone</i> cf. <i>corona</i>
8	Cirratulidae	<i>Kirkegaardia</i> sp.1
9	Eunicidae	<i>Paucibranchia kinbergi</i>
10	Glyceridae	<i>Glycera unicornis</i>
11	Goniadidae	<i>Goniada maculata</i>
12	Hesionidae	<i>Oxydromus flexuosus</i>
13	Lumbrineridae	<i>Ninoe armoricana</i>
14	Maldanidae	<i>Praxillella gracilis</i>
15	Nephtyidae	<i>Nephtys incisa</i>
16	Onuphidae	<i>Paradiopatra calliopae</i>
17	Oweniidae	<i>Galathowenia</i> cf. <i>oculata</i>
18	Paraonidae	<i>Levinsenia</i> sp.
19	Polynoidae	<i>Harmothoe antilopes</i>
20	Polynoidae	<i>Malmgrenia louiseae</i>
21	Sigalionidae	<i>Labioleanira yhleni</i>
22	Spionidae	<i>Prionospio ehlersi</i>
23	Spionidae	<i>Pseudopolydora</i> cf. <i>paucibranchiata</i>
24	Sternaspidae	<i>Sternaspis scutata</i>
25	Terebellidae	<i>Lysilla</i> sp.
26	Terebellidae	<i>Pista lornensis</i>
27	Terebellidae	<i>Polycirrus</i> sp.
28	Trichobranchidae	<i>Terebellides mediterranea</i>
29	Trichobranchidae	<i>Terebellides stroemii</i>
CNIDARIA		ACTINARIA
Famille		Espèces
30	Actinidae	<i>Actinia</i> sp.
CRUSTACEA		AMPHIPODA
Famille		Espèces
31	Ampeliscidae	<i>Ampelisca spinipes</i>
32	Leucothidae	<i>Leucothoe liljeborgi</i>
33	Leucothidae	<i>Leucothoe pachycera</i>
34	Liljeborgidae	<i>Liljeborgia psaltrica</i>
35	Maeridae	<i>Hamimaera hamigera</i>
36	Maeridae	<i>Maera grossimana</i>
37	Photidae	<i>Photis longicaudata</i>
38	Phoxocephalidae	<i>Harpinia antennaria</i>
39	Phoxocephalidae	<i>Harpinia crenulata</i>
40	Phoxocephalidae	Unidentified sp. (broken)
41	Tryphosidae	<i>Tryphosella simillina</i>
CRUSTACEA		DECAPODA
Famille		Espèces
42	Alpheidae	<i>Alpheus glaber</i>
43	Callianassidae	<i>Callianassa</i> spp.
44	Callianassidae	Unidentified sp.
45	Crangonidae	<i>Crangon crangon</i>
46	Goneplacidae	<i>Goneplax rhomboides</i>
ECHINODERMATA		HOLOTHUROIDEA
Famille		Espèces
47	Synaptidae	<i>Oostergrenia</i> cf. <i>digitata</i>
48	Synaptidae	Unidentified sp.

PARC EOLIEN OFFSHORE DE PROVENCE GRAND LARGE
SUIVI BIOSEDIMENTAIRE SUR LE SITE DU PARC PILOTE EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT PROVENCE GRAND LARGE –
ETAT DE REFERENCE

MOLLUSCA		BIVALVIA
Famille		Espèces
49	Corbulidae	<i>Varicorbula gibba</i>
50	Nuculidae	<i>Nucula hanleyi</i>
51	Nuculidae	<i>Nucula sulcata</i>
52	Pandoridae	<i>Pandora inaequalis</i>
53	Semelidae	<i>Abra nitida</i>
54	Thyasiridae	<i>Thyasira flexuosa</i>
55	Veneridae	<i>Dosinia lupinus</i>
Mollusca		GASTROPODA
Famille		Espèces
56	Aclidae	<i>Aclis ascaris</i>
57	Eulimidae	<i>Eulimia bilineata</i>
58	Iravadiidae	<i>Hyala vitrea</i>
59	Mangeliidae	<i>Bela brachystoma</i>
60	Pyramidellidae	<i>Megastomia conoidea</i>
61	Pyramidellidae	<i>Pyrgiscus rufus</i>
MOLLUSCA		OPISTHOBANCHIA
Famille		Espèces
62	Nudibranchia	<i>Nudibranchia</i> sp.
NEMERTEA		NEMERTEA
Famille		Espèces
63	Nemertea	Unidentified sp.
SIPUNCULA		SIPUNCULA
Famille		Espèces
64	Sipuncula	Unidentified sp.

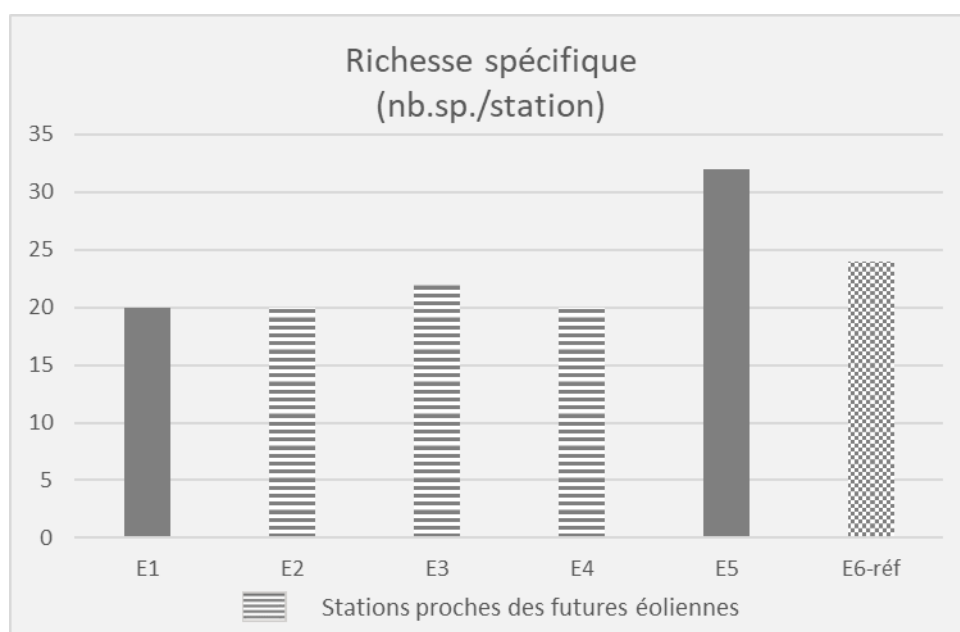


Figure 25. Variations de la richesse spécifique des 6 stations (Juin 2022)

Comparaison avec les résultats InVivo de 2013

Les valeurs sont supérieures en 2022 à celles de 2013 (x2 : moyenne de 12 espèces en 2013 pour les stations à profondeur équivalente).

3.3.2.1.2. Densité

La densité moyenne est de 134 ± 26 ind./m², ce qui peut être considérée comme faible¹. On constate relativement peu de variation entre les stations ce qui est dû à une forte homogénéité des fonds en termes de granulométrie et d'enrichissement organique.

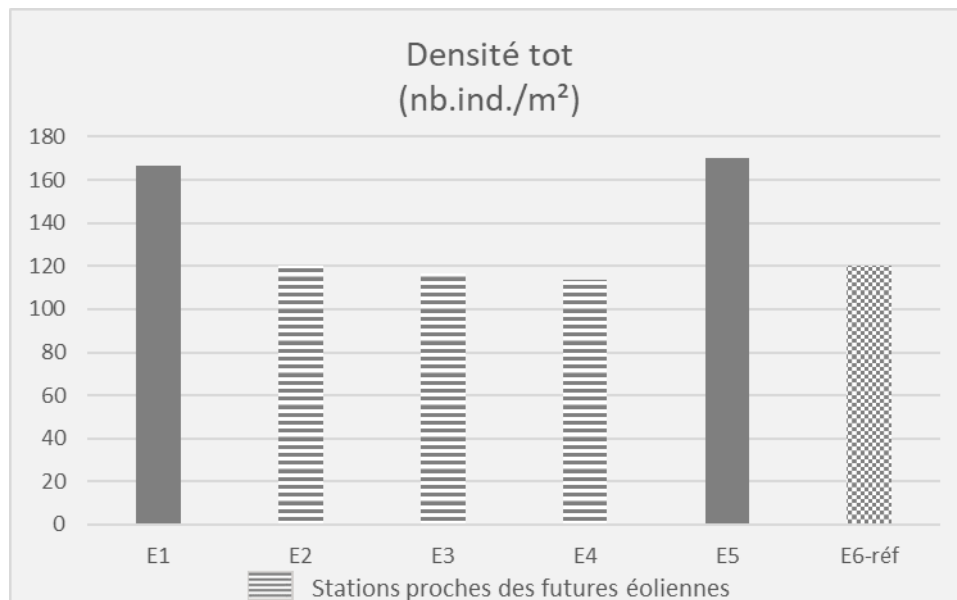


Figure 26. Variation de la densité moyenne sur les 6 stations (Juin 2022)

Comparaison avec les résultats de 2013

Les valeurs sont très légèrement plus élevées en 2022 que celles de 2013 (moyenne de 98 ind./m² sur les stations de profondeur équivalente). Il faut préciser que la campagne In Vivo a été réalisée en septembre 2013 alors que celle de Créocéan a été menée en juin 2022. Un biais de saisonnalité peut donc être évoqué. Toutefois, ce biais s'il existe devrait aboutir à un effet inverse à celui observé dans cette étude, à savoir des densités plus importantes en septembre qu'en juin, puisque la reproduction de nombreuses espèces se fait en fin de printemps/début d'été et produit normalement une densification des populations par des abondances fortes de juvéniles à la fin de l'été/début de l'automne. C'est d'ailleurs pour éviter ce type de biais qu'il est communément convenu de réaliser les prélèvements avant l'été afin d'éviter un effet possible de la reproduction et du recrutement des espèces.

3.3.2.1.3. Biomasse

La biomasse moyenne est de $0,8 \pm 0,3$ g /m² de poids sec, ce qui est faible mais normal pour ce type de sédiment profond habituellement colonisé par des espèces de petite taille et ne produisant donc pas de biomasse importante.

On note que les valeurs sont légèrement plus élevées sur les stations plus proches de la côte (E01 à E03) par rapport aux stations E04 à E06-réf, plus éloignées.

¹ D'après les 20 ans d'expérience de Créocéan sur des études benthiques en méditerranée et plus particulièrement lors de grandes campagnes d'intercalibration réalisées lors de la mise en place de la DCE dans les années 2006-2007 en collaboration avec l'Ifremer et l'Agence de l'Eau RMC sur l'ensemble de la façade méditerranéenne.

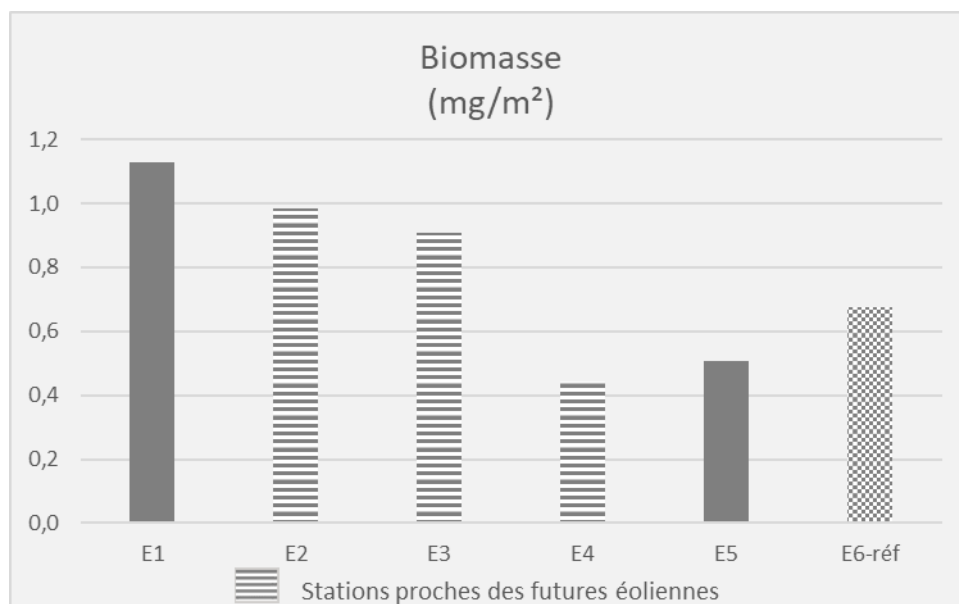


Figure 27. Variation de la biomasse moyenne sur les 6 stations (Juin 2022)

La biomasse n'a pas été analysée en 2013.

3.3.2.2. Indices biologiques

La diversité de Shannon et l'indice d'équitabilité ont tous été calculés sur la base de la liste des espèces identifiées en combinaison avec leur densité par station, comme illustré dans le tableau suivant :

Tableau 32. Indices biologiques calculés pour les 6 stations (Juin 2022)

Descripteur	E01	E02	E03	E04	E05	E06-réf
Indice de Shannon (bit)	4,0	4,0	4,2	4,1	4,7	4,3
Indice d'équitabilité (%)	91,5	91,5	95,1	95,2	94,0	94,6
Indice trophique (%)	56,0	52,8	56,2	53,9	56,9	63,0
AMBI [0-6]	1,78	2,40	1,86	2,18	1,53	1,84
M-AMBI [0-1]	0,52	0,50	0,55	0,52	0,62	0,56
Bentix [0-6]	4,22	3,44	4,25	3,94	4,40	4,17

Les codes couleurs se rapportent aux valeurs EcoQ de référence (cf. Tableau 19 et Tableau 18 (cas général))

3.3.2.2.1. Diversité (indices de Shannon et d'équitabilité)

L'indice de diversité de Shannon a une valeur moyenne élevée ($4,2 \pm 0,3$ bits). Les valeurs sont très stables entre les stations. Ce résultat indique un bon équilibre des espèces en termes d'abondance, marqué par l'absence de population en surabondance ou proliférante.

L'indice d'équitabilité donne des résultats très similaires à l'indice de Shannon avec une moyenne de $93,7 \pm 1,7 \%$.

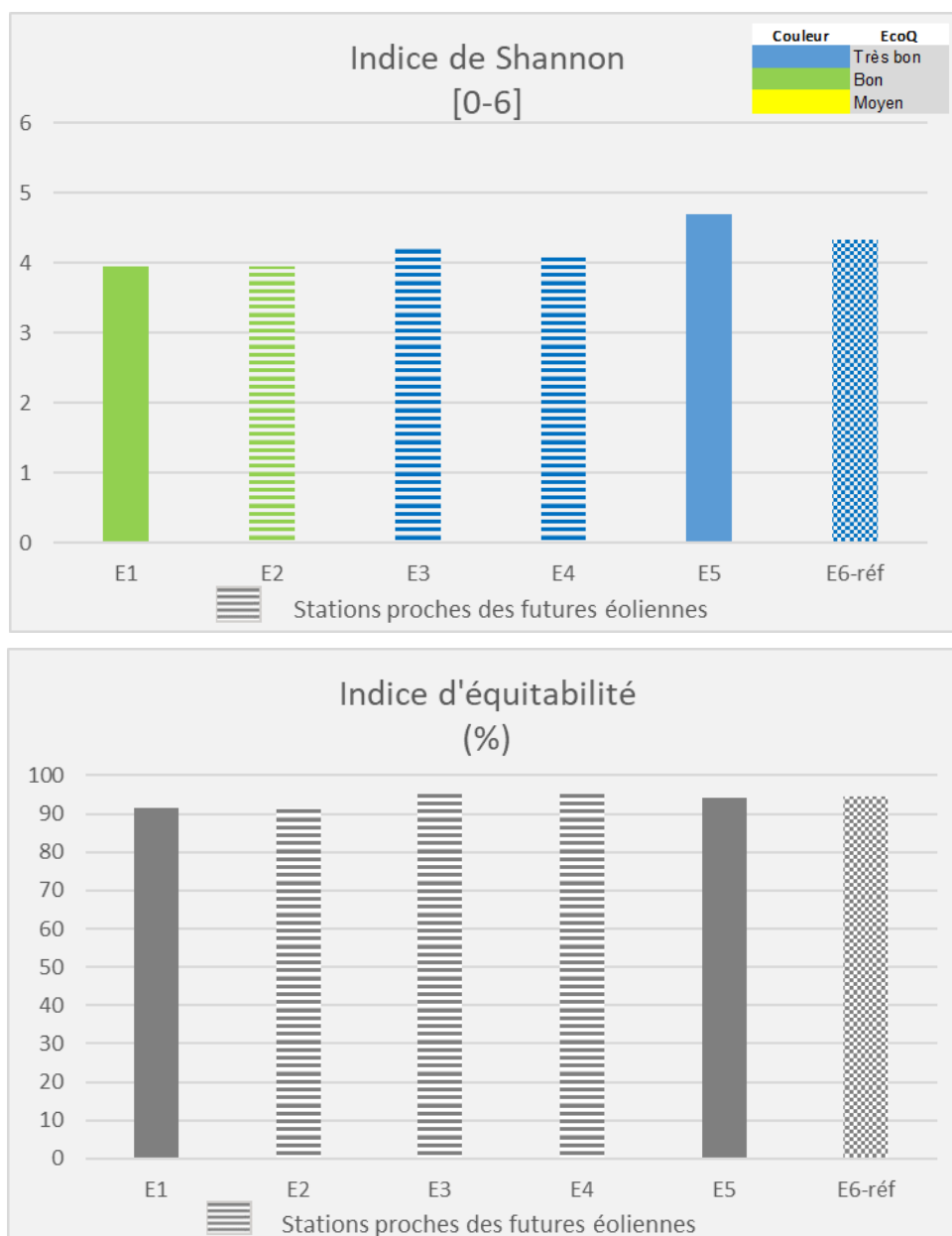


Figure 28. Variation des indices de Shannon et d'équitabilité du benthos sur les 6 stations (2022)

Comparaison avec les résultats de 2013

Les valeurs des indices de Shannon et d'équitabilité sont sensiblement équivalentes entre 2022 et 2013 avec des moyennes respectives à $3,13 \pm 0,54$ bit et $89,3 \pm 5,4 \%$ en 2013.

3.3.2.2.2. Indice trophique

L'indice trophique moyen est de $56,5 \pm 3,5 \%$. Les valeurs sont donc majoritairement inférieures au seuil des 60 %, mais toujours proches de ce seuil.

Dans les milieux marins en bon état écologique, l'indice trophique se situe entre 60 % et 100 %. Une légère perturbation de la communauté benthique due à un léger enrichissement en matière organique des sédiments

fait baisser l'indice entre 30 à 60 %, et un fort enrichissement le fait descendre à des valeurs inférieures à 30 %. Un indice trophique très bas peut être trouvé dans des zones fortement enrichies en nutriments à cause de pollution par les eaux usées domestiques.

Toutefois, dans les sédiments profonds et naturellement envasés, il est normal que l'indice trophique soit plus faible et ce résultat n'indique pas un déséquilibre trophique du milieu mais plutôt un état naturel adapté à la profondeur. En effet, les fonds profonds ne sont pas ou peu influencés par l'agitation marine en surface (vagues, houles, courants forts) et sont donc propices à la sédimentation de particules fines et à l'envasement du substrat. Ce sont donc des milieux où l'enrichissement en carbone organique est souvent élevé, ce qui explique les valeurs plus faibles de l'indice trophique.

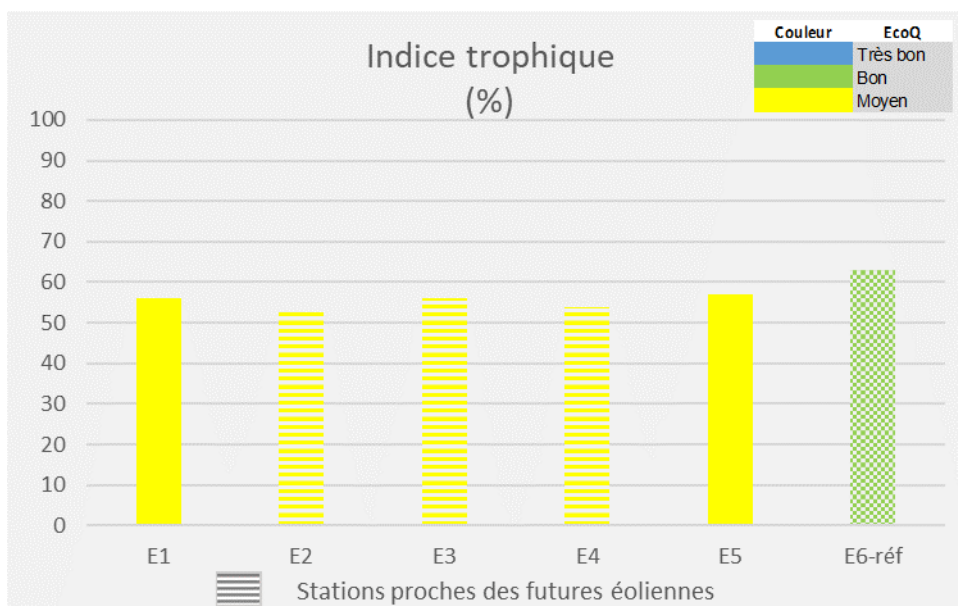


Figure 29. Variation de l'indice trophique dans les 6 stations (2022)

L'indice trophique n'a pas été calculé en 2013.

3.3.2.2.3. Indices de polluosensibilité (Ambi, M-Ambi et Bentix)

► Ambi

Les valeurs de l'indice Ambi et de la répartition des différents groupes écologiques sont présentées dans le tableau et la figure suivants.

Sur l'ensemble des stations, les espèces des groupes I (groupe I), II (espèces indifférentes à une hypertrophisation) et III (espèces tolérantes à une hypertrophisation) sont prédominantes avec des variations internes entre les stations. Les espèces du groupe IV sont peu représentées (autour de 10 % ou moins sur la station C6).

A noter la présence du groupe V sur la station C6.

Les valeurs d'Ambi obtiennent toute un score vert, correspondant à une communauté légèrement perturbée et un état écologique considéré comme bon.

Tableau 33. Répartition des groupes écologiques selon les stations et variation de l'Ambi

Stations	I(%)	II(%)	III(%)	IV(%)	V(%)	AMBI	Classification des perturbations
E01	36,1	19,4	33,3	11,1	0,0	1,78	Légèrement perturbé
E02	16,7	19,4	50,0	13,9	0,0	2,40	Légèrement perturbé
E03	31,3	25,0	34,4	9,4	0,0	1,86	Légèrement perturbé
E04	12,1	36,4	42,4	9,1	0,0	2,18	Légèrement perturbé
E05	46,0	14,0	30,0	10,0	0,0	1,53	Légèrement perturbé
E06-réf	31,4	22,9	40,0	2,9	2,9	1,84	Légèrement perturbé

Les codes couleurs se rapportent aux valeurs de référence (cf. Tableau 17Tableau 19).

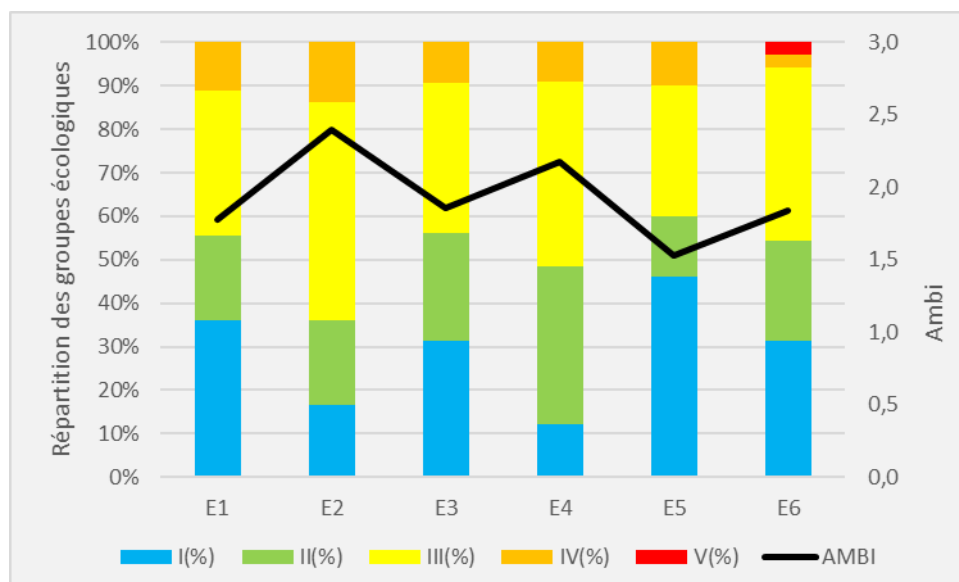


Figure 30. Répartition des groupes écologiques et variation de l'Ambi sur les 6 stations (2022)

► M-Ambi

Le M-Ambi varie entre des valeurs bonnes (code vert sur les stations E01, E02 et E04) à légèrement moins bonnes (code jaune sur les stations E03, E05 et E06-réf).

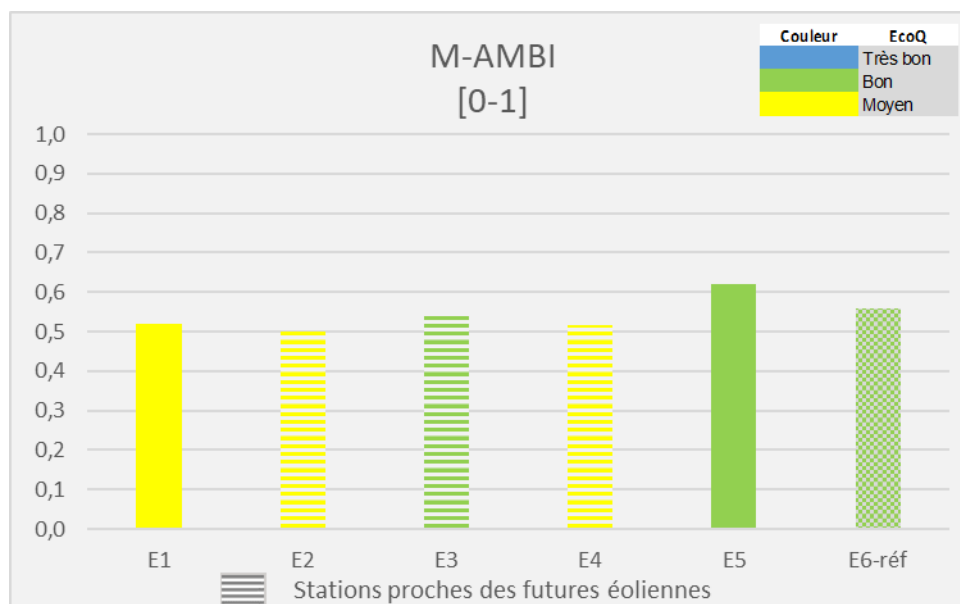


Figure 31. Variation du M-Ambi dans les 6 stations (2022)

► **Bentix**

Les valeurs du Bentix et de la répartition des différents groupes écologiques sont présentées dans le tableau et la figure suivants.

On observe une répartition assez équitable entre le groupe I (espèces sensibles) et les groupes II (espèces tolérantes) et III (espèces opportunistes).

Le bentix obtient des valeurs indiquant des communautés non perturbées à faiblement perturbées (état transitoire, légèrement pollué), témoignant d'un état écologique bon à très bon.

Tableau 34. Répartition des groupes écologiques et variation du bentix dans les 6 stations (2022)

Stations	GI (%)	GII & GIII (%)	Bentix (%)	Classification des perturbations
E01	55,5	44,4	4,2	Normal
E02	36,1	63,9	3,4	Légèrement pollué
E03	56,3	43,8	4,3	Normal
E04	48,5	51,5	3,9	Légèrement pollué
E05	60,0	40,0	4,4	Normal
E06-réf	54,3	45,8	4,2	Normal

Les codes couleurs se rapportent aux valeurs de référence des faciès sédimentaires (cf. Tableau 18).

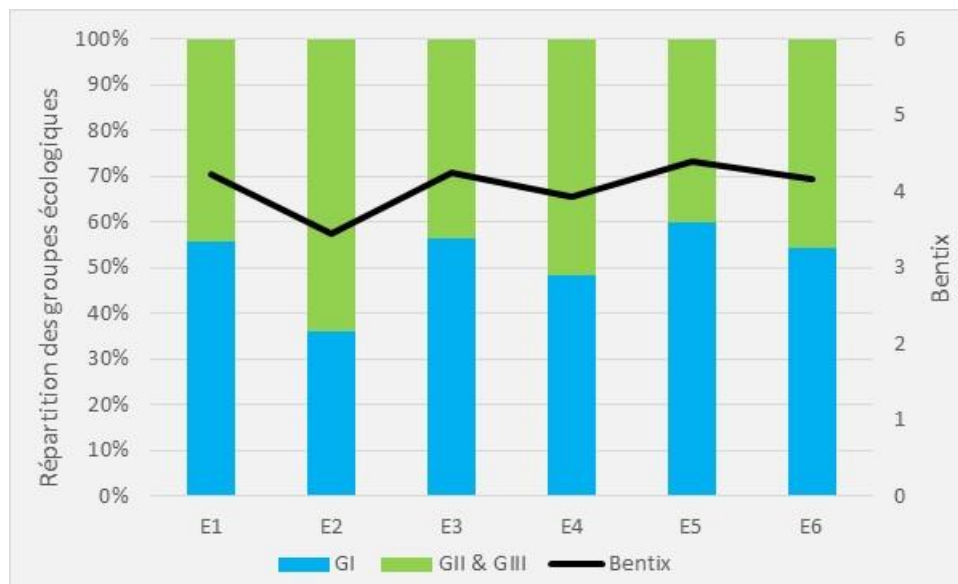


Figure 32. Répartition des groupes écologiques et variation du bentix dans les 6 stations (2022)

Comparaison avec les résultats de 2013

Sur les stations à des profondeurs similaires, les résultats de l'Ambi en 2013 indiquent des communautés non perturbées à faiblement perturbées, donc sont sensiblement similaires à ceux de 2022.

Le bentix est très légèrement plus élevé en 2013 avec une moyenne de 4,8 sur les 16 stations profondes échantillonnées, contre une moyenne d 4,1 en 2022.

Les différences de résultats entre les deux années de suivi sont donc faibles.

3.3.3. Composition de la communauté benthique

3.3.3.1. Espèces dominantes

Le tableau suivant liste les 23 espèces qui contribuent à au moins 1 % de la densité totale et forment des populations de plus de 1,5 ind./m² en moyenne.

Tableau 35. Espèces dominantes en termes d'abondance dans les 6 stations (2022)

Groupe	Famille	Espèce	E01	E02	E03	E04	E05	E06	Moyenne (ind./m ²)	Moyenne (% de la densité totale)
Décapode	Callinassidae	<i>Callianassa</i> spp.	6,7	20,0	13,3	6,7	3,3	13,3	10,6	7,9
Décapode	Goneplacidae	<i>Goneplax rhomboides</i>	20,0	10,0	10,0	3,3	3,3	6,7	8,9	6,6
Polychète	Spionidae	<i>Prionospio ehlersi</i>	10,0	6,7	10,0	10,0	10,0	3,3	8,3	6,2
Bivalve	Semelidae	<i>Abra nitida</i>	6,7	20,0	0,0	13,3	6,7	3,3	8,3	6,2
Bivalve	Thyasiridae	<i>Thyasira flexuosa</i>	10,0	3,3	6,7	3,3	10,0	13,3	7,8	5,8
Polychète	Nephtyidae	<i>Nephtys incisa</i>	20,0	3,3	3,3	3,3	3,3	6,7	6,7	5,0
Polychète	Sternaspidae	<i>Sternaspis scutata</i>	3,3	3,3	10,0	0,0	16,7	3,3	6,1	4,5
Polychète	Eunicidae	<i>Paucibranchia kinbergi</i>	3,3	6,7	3,3	10,0	3,3	6,7	5,6	4,1
Polychète	Lumbrineridae	<i>Ninoe armoricana</i>	0,0	3,3	3,3	10,0	6,7	3,3	4,4	3,3
Gastropode	Acididae	<i>Aclis ascaris</i>	16,7	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	4,4	3,3
Bivalve	Nuculidae	<i>Nucula sulcata</i>	0,0	0,0	6,7	3,3	0,0	13,3	3,9	2,9
Nudibranche	Nudibranchia	<i>Nudibranchia</i> sp.	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	2,9
Polychète	Cirratulidae	<i>Chaetozone</i> cf. <i>corona</i>	3,3	3,3	0,0	10,0	0,0	3,3	3,3	2,5
Polychète	Oweniidae	<i>Galathowenia</i> cf. <i>oculata</i>	6,7	3,3	3,3	3,3	0,0	3,3	3,3	2,5
Gastropode	Pyramidellidae	<i>Megastomia conoidea</i>	0,0	6,7	3,3	6,7	0,0	3,3	3,3	2,5
Polychète	Ampharetidae	<i>Anobothrus gracilis</i>	3,3	3,3	0,0	3,3	3,3	3,3	2,8	2,1
Polychète	Glyceridae	<i>Glycera unicornis</i>	0,0	0,0	3,3	6,7	3,3	3,3	2,8	2,1
Gastropode	Pyramidellidae	<i>Pyrgiscus rufus</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	2,8	2,1
Holothurie	Synaptidae	<i>Oostergrenia</i> cf. <i>digitata</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	13,3	0,0	2,2	1,7
Polychète	Trichobranchidae	<i>Terebellides mediterranea</i>	0,0	6,7	3,3	0,0	0,0	0,0	1,7	1,2
Actiniaire	Actinidae	<i>Actinia</i> sp.	6,7	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	1,7	1,2
Amphipode	Tryphosidae	<i>Tryphosella simillina</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	1,7	1,2
Bivalve	Nuculidae	<i>Nucula hanleyi</i>	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	1,2

Le taxon le plus abondant est représenté par une crevette *Callianassa* sp., qui ne développe pas des populations très denses mais qui a une fréquence importante dans les stations : elle est capturée dans une majorité de bennes et sa densité moyenne à l'échelle de la zone d'étude est la plus élevée.

Cette espèce est accompagnée par 2 autres crustacés : le crabe (*Goneplax rhomboides*) et le petit amphipode (*Tryphosella simillina*, uniquement présent et abondant dans sur la station E05).

Les autres espèces dominantes sont majoritairement des annélides polychètes (10 espèces), des bivalves (4 espèces), des gastéropodes (3 espèces).

On note la surprenante abondance de nudibranches à la station E01, ainsi que la présence d'anémones (*Actinia* sp.) aux stations E01 et E05 qui suggèrent la présence d'éléments grossiers (cailloutis ou débris coquilles sur le fond, parce que ces groupes taxonomiques sont habituellement inféodés aux substrats durs.

Comparaison avec les résultats de 2013

Le tableau suivant liste les espèces dominantes en 2013 (> 1 % de la densité totale).

On observe qu'il y a peu d'espèces communes aux deux matrices 2022 et 2013 : sur les 23 espèces dominantes de 2022, seules les 6 polychètes (surlignés en bleu dans le tableau suivant) sont présentes les deux années :

- *Ninoe* sp. qui apparait en 2013 et qui pourrait correspondre à *Ninoe armoricana* en 2022 ;

- *Nephtys hystricis* qui pourrait correspondre à *Nephtys incisa* en 2022 ;
- *Prionospio* sp. qui apparait en 2013 et qui pourrait correspondre à *Prionospio ehlersi* ;
- *Sternaspis scutata*, *Glycera unicornis* et *Thyasira flexuosa* qui sont abondantes les deux années.

Abra nitida, *Nucula sulcata*, *Goneplax rhomboides*, une espèce du genre *Chaetozone* sp.. et un crustacé de la famille des *Callianassidae* (*Necallianassa truncata*), une polychète du genre *Terebellides* (*T. stroemii*), ainsi que anémone de mer (*Actinaria* spp.) sont abondants en 2013 et sont présentes en 2022 mais ne font pas partie des espèces dominantes.

Par ailleurs, les 4 espèces les plus abondantes en 2013 n'apparaissent pas dans l'inventaire de 2022. Il est possible toutefois qu'il y ait une confusion entre *Turritella communis* (2013) et *Aclis ascaris* (2022).

La composition des peuplements de 2013 et 2022 diffère donc notablement. Il existe des évolutions des communautés benthiques dans le moyen et long termes qui peuvent être naturelles ou pas, mais c'est un sujet qui est très peu abordé dans la littérature scientifique.

Tableau 36. Espèces dominantes en termes d'abondance dans les stations échantillonnées en 2013

Taxons		2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	Moyenne (ind./m²)	Moyenne (% densité totale)
Mollusques	<i>Turritella communis</i>	2					3		8	2	7	5	4	2	5	2	6	2	9,4	9,1
Polychètes	<i>Laonice cirrata</i>		45	1															9,0	8,7
Polychètes	<i>Lumbrineris</i> sp.	13	12		2		1				1	3	4						7,1	6,8
Polychètes	<i>Paradiopatra</i> sp.						1			1	7		5	6	2	10	3		6,9	6,7
Polychètes	<i>Sternaspis scutata</i>	3	5	9		2		2	3	2	1	5	2	1					6,9	6,7
Echinoderme	<i>Labidoplax digitata</i>		20			2			1		2		5			1	1		6,3	6,1
Polychètes	<i>Ampharete acutifrons</i>		3			4	1	8	1		2	1	3	2	1	4			5,9	5,7
Polychètes	<i>Ninoe</i> sp.	1	2	1	3	3		2	1	1	2	1	1	2	1		1		4,3	4,2
Polychètes	<i>Glycera unicornis</i>	1	4	1	1		2			3	1	1	2				1		3,3	3,2
Mollusques	<i>Thyasira flexuosa</i>		3				2		1		1	1	2	1	2	1	1	1	3,1	3,0
Polychètes	<i>Marphysa bellii</i>								1	1					1	3	4	5	2,9	2,9
Polychètes	<i>Spio multioculata</i>			1	1			1	1		2		5	1			1		2,5	2,5
Polychètes	<i>Nephtys hystricis</i>	4	1			1		1		1		1	1		1				2,2	2,1
Polychètes	<i>Aphelochaeta</i> sp.		9										1						2,0	1,9
Némertes	<i>Nemertea</i>	4	3													3			2,0	1,9
Polychètes	<i>Monticellina</i> sp.	5	4																1,8	1,7
Polychètes	<i>Praxillella gracilis</i>				1	1	1				1			1				4	1,8	1,7
Polychètes	<i>Prionospio</i> sp.		5			1					1				1		1		1,8	1,7
Crustacés	<i>Apseudes</i> sp.	5									1	2							1,6	1,5
Polychètes	<i>Heteromastus filiformis</i>	3	3																1,2	1,1
Polychètes	<i>Malmgreniella lunulata</i>		6																1,2	1,1

Les planches suivantes présentent des photos de plusieurs espèces prélevées sur la zone d'étude en 2022.

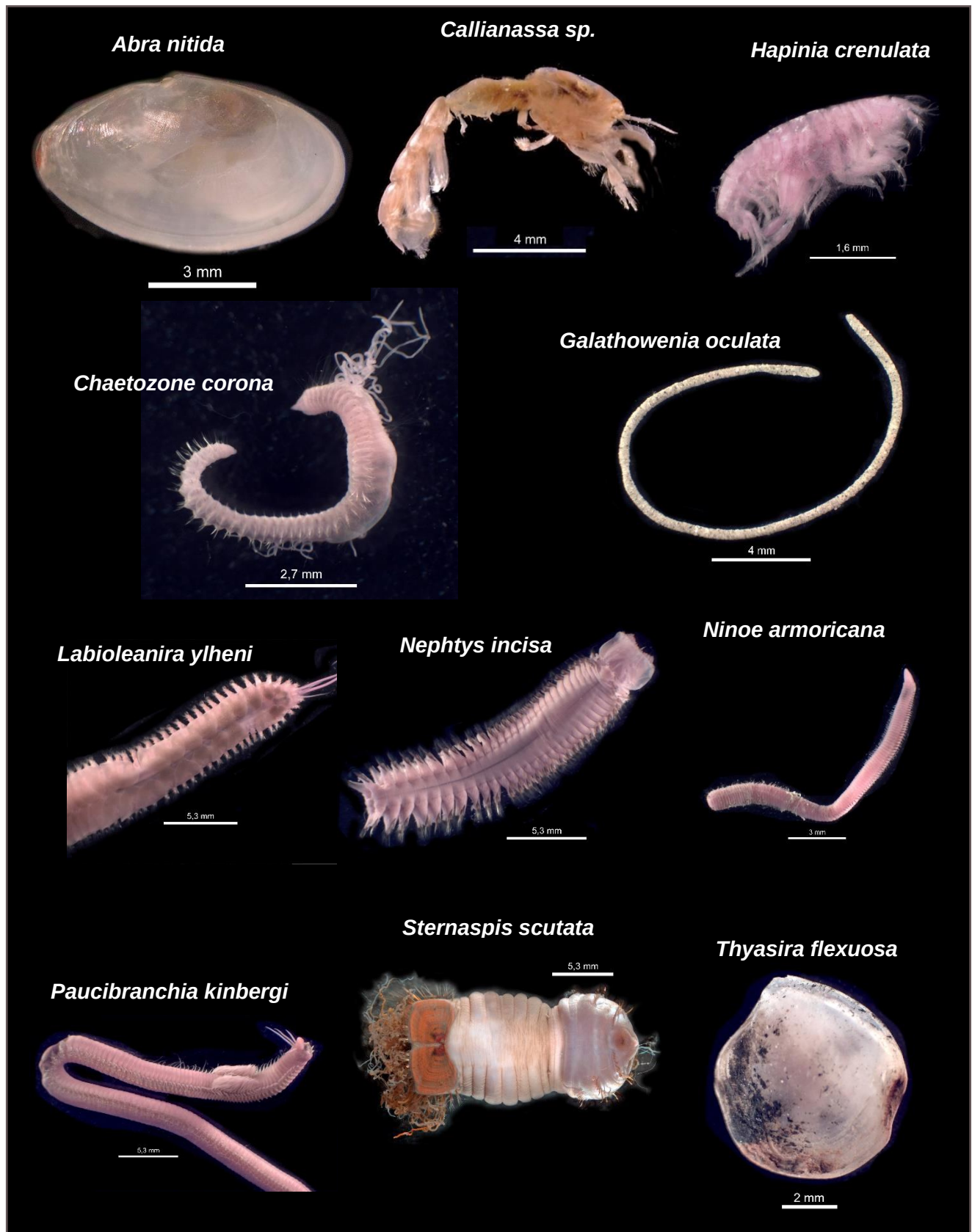


Figure 33. Planche photo illustrative de plusieurs espèces prélevées dans les 6 stations en 2022

3.3.3.2. Espèces introduites

Il n'y a pas des espèces introduites parmi celles que nous avons identifiées. Seulement *Pseudopolydora cf. paucibranchiata*, rencontrée sur E02, est décrite comme introduite par certaines sources, mais nos experts benthologues du CEAB estiment que ces affirmations sont fausses et que l'espèce est native de la Méditerranée.

3.3.3.3. Biocénoses

3.3.3.3.1. Référentiel HABREF (2021, OFB, CNRS, Museum)

Les stations ont toutes été échantillonnées dans des profondeurs de l'ordre de 100 m de profondeur, donc dans l'étage circalittoral. Le substrat est essentiellement constitué de vases pures avec une fraction forte de limons (entre 77 à 82% selon les stations). On est donc en présence d'une biocénose des vases terrigènes côtières :

- ▶ Niveaux Circalittoral IV.
- ▶ Vases IV.1.
- ▶ Biocénose des vases terrigènes côtières (VTC) IV.1.1.

Cette biocénose est caractérisée par un hydrodynamisme faible à très faible lié à des profondeurs de plus de 35 m (voire 25 m) de profondeur jusqu'à 90 m environ et une sédimentation fine, rapide et abondante. Les sédiments sont vaseux, à forte charge en pélites, de 50 à 90%. Le sédiment est une vase fluide, riche en eau, parfois thixotropique, dont le taux de pélites est toujours supérieur à 50% dans les peuplements de la biocénose des vases terrigènes côtières. Dans des aires particulières tel le golfe de Fos, la biocénose VTC peut être présente dès 10 m de profondeur.

Les espèces caractéristiques sont :

- ▶ Les échinodermes : ***Oostergrenia digitata***, *Labidoplax digitata*, *Leptopentacta tergestina*,
- ▶ Les mollusques : *Thyasira croulinensis*, ***Abra nitida***, *Mysella bidentata*, *Axinulus croulinensis*, *Turritella turbona f. communis*,
- ▶ Les annélides polychètes : *Nephtys hystrix*, *Ninoe kinbergi*, ***Sternaspis scutata***, *Lepidasthenia maculata*, *Eunereis longissima*, ***Prionospio ehlersi***, *Prionospio steenstrupi*, *Paraprionospio pinnata*, *Poecilochaetus serpens*, *Magelona allenii*, *Pectinaria belgica*, *Ampharete acutifrons*,
- ▶ Les crustacés : *Leptocheirus pectinatus*, *Medorippe lanata*, ***Goneplax rhomboides***.

Elles sont accompagnées d'autres espèces, notamment de vasicoles, espèces communes à l'ensemble des biocénoses circalittorales de substrat meuble, notamment dans la biocénose du détritique envasé (Picard, 1965). Parmi ces espèces, on notera ***Glycera unicornis***, ***Goniada maculata***, *Lumbrineris fragilis*, ***Praxillella gracilis***, ***Thyasira flexuosa***, *Tuberapseudes echinatus*, ***Alpheus glaber***.

Les espèces en gras font effectivement parties des taxons rencontrés.

3.3.3.3.2. Typologie EUNIS

Il existe plusieurs typologies EUNIS correspondant aux vases du circalittoral :

- ▶ A5.35 Vase sableuse circalittorale

Description EUNIS « Vase sableuse cohésive circalittorale, contenant typiquement plus de 20 % de limon et d'argile, à des profondeurs supérieures à 10 m, avec des courants de marée faibles ou très faibles. Cet habitat est généralement situé dans les parties les plus profondes de baies et de bras de mer ou au large de côtes peu exposées aux vagues. Des pennatulacés tels que *Virgularia mirabilis* et des ophiures telles que *Amphiura* spp. sont particulièrement caractéristiques de cet habitat, alors que l'endofaune comprend les polychètes tubicoles *Lagis koreni* et *Owenia fusiformis*, et des bivalves dépositivores tels que *Kurtiella bidentata* et *Abra* spp., qui se nourrissent de dépôts. »

Toutefois ces habitats sont habituellement moins profonds et moins envasés avec une fraction de sable plus importante et les espèces citées ne sont pas présentes à l'exception de *Abra nitida*.

► A5.36 Vase fine circalittorale

*Description EUNIS : « Vase subtidale, à des profondeurs de plus de 15 à 20 m, en milieu ouvert ou dans des bras de mer. Les pennatulacés *Virgularia mirabilis* et *Pennatula phosphorea* sont caractéristiques de cet habitat, de même que l'anémone fousseuse *Cerianthus lloydii* et les ophiures *Amphiura* spp. Les conditions relativement stables de ce milieu permettent souvent l'établissement d'une biocénose à mégafaune fousseuse, par exemple *Nephrops norvegicus*. »*

Toutefois, les espèces citées ne sont pas présentes.

► A5.37 Vase circalittorale profonde

*Description EUNIS : « Vase et vase sableuse cohésive circalittorale au large des côtes, à une profondeur d'au moins 50 à 70 m, hébergeant une faune dépendant de la quantité de limon, d'argile et de matière organique dans les sédiments. La biocénose hébergée est généralement dominée par des polychètes, mais souvent avec une importante population de bivalves tels que *Thyasira* spp., d'échinodermes et de foraminifères. »*

Ce descriptif avec une abondance de polychète et surtout l'évocation de *Thyasira* spp. correspond bien à la communauté observée sur la zone d'étude, puisque *Thyasira flexuosa* fait partie des espèces dominantes.

► A5.38 Biocénoses méditerranéennes des fonds détritiques envasés, notamment au faciès à *Ophiothrix quinquemaculata*

Description EUNIS : « Ces biocénoses se développent dans des zones où les fonds détritiques sont recouverts par de la vase d'origine terrigène (dépôts des fleuves). Le sédiment est constitué de vase sableuse ou de sable vaseux, et parfois de vase indurée, riche en débris coquilliers ou en fragments volcaniques (scories) ; la sédimentation est suffisamment lente pour permettre le développement de l'épifaune sessile. Gravier, sable et vase sont mélangés dans des quantités variables mais la proportion de vase est toujours dominante. »

Toutefois, cette espèce n'est pas recensée dans les prélèvements et la fraction déritique n'est pas présente : les sédiments sont constitués de vases pures sans débris grossier. D'ailleurs, les refus de tamis sont extrêmement faibles.

► A5.39 Biocénoses méditerranéennes des vases terrigènes côtières, notamment au faciès des vases molles à *Turitella communis*.

Description EUNIS : « Le sédiment est toujours constitué de vase pure, plus ou moins argileux, ayant la plupart du temps une origine fluviale. De gros débris peuvent se déposer mais sont vite recouverts, de sorte qu'aucune épifaune ne peut se développer. »

Toutefois les turitelles ne sont pas présentes dans les prélèvements.

Les peuplements sont donc apparentées à la biocénose suivante :

► A5.37 Vase circalittorale profonde

4. Synthèse et conclusions

4.1. Colonne d'eau

Les profils CTD dans la colonne d'eau sont très similaires d'une station à l'autre. Ils indiquent une thermocline marquée entre 12 et 16 m de profondeur, une très légère dessalure en surface puis des salinités stables autour de 38‰, des eaux bien oxygénées (valeurs supérieures ou proches de 90% de saturation), un pH stable sur toute la colonne d'eau (entre 8,1 et 8,3) et des eaux claires (valeurs proches de 1 NTU) le long de la colonne d'eau avec des légères augmentations (< 3 NTU) parfois en surface ou à l'approche du fond. En ce début du mois de juin 2022, le panache du Rhône n'est donc pas présent sur le site de PGL. La colonne d'eau ne présente pas de stratification haline. En revanche, le réchauffement marqué printanier est bien visible et les températures de surface atteignent déjà presque 24°C sur les 10 premiers mètres.

4.2. Sédiments

Granulométrie

Les sédiments des stations E01 à E06-réf sont essentiellement constitués de vases pures, dont principalement une fraction forte de limons (entre 77 à 82 % selon les stations). La fraction sableuse est toujours très faible (< 3%).

Enrichissement

Les teneurs en COT obtenues varient entre 9,27 et 10,40 g(C)/kg correspondant à un enrichissement organique moyen d'après les référentiels de Licari (1998), pour une fraction fine > 60%.

Les teneurs en NTK varient entre 1,08 (E06-réf) et 1,14 (E02) g/kg MS, correspondant à un enrichissement fort en NTK d'après les référentiels de Licari (1998).

Ces résultats concordent avec ceux de 2013.

Les teneurs en phosphore en 2022 varient entre 0,47 (E01 et E02) et 0,57 mg/kg (E04).

L'indice IEO aboutit à un enrichissement « faible » pour toutes les stations, les résultats étant très homogène sur la zone d'étude pour tous les paramètres.

Métaux

En 2022, les teneurs en arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc sont assez homogènes entre les 6 stations et se situent toutes sous le seuil réglementaire N1. A noter cependant une concentration en nickel sur la station E04 de 37 mg/kg très proche du seuil N1 pour ce métal (37 mg/kg).

Bien que les valeurs de bruit de fond aient été définies par GEODE et RLM sur les milieux portuaires, on note que les concentrations en mercure et cadmium dépassent ces deux seuils ; celles en cuivre, plomb et zinc sont supérieures uniquement au niveau RLM (plus contraignant que les seuils GEODE) ; les teneurs en arsenic dépassent largement le seuil GEODE et celles en chrome restent juste en dessous de ce seuil, hormis la station E04 où le seuil est dépassé de 0,4 mg/kg.

Les concentrations en aluminium aussi varient peu entre les stations (52,4 à 54,4 mg/kg MS) mais elles sont 4 fois plus élevées qu'en 2013, tout comme les teneurs en cadmium. Dans l'ensemble les concentrations en arsenic, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc sont équivalentes à celles mesurées en 2013.

HAP

En 2022, seuls deux HAP dépassent le seuil réglementaire N1 :

- le fluorène sur toutes les stations sauf la E03 et avec des valeurs très variables comprises entre 22 et 171 µg/kg MS ;
- le dibenzo(a,h)anthracène sur les stations E04 et E06-réf avec des valeurs similaires (respectivement 67 et 64 µg/kg), et sur la station E02 avec une valeur 2 fois supérieure (131 µg/kg).

En revanche, en 2022 les concentrations en fluoranthène et en benzo(a)pyrène ne dépassent aucun seuil de référence, en comparaison avec les résultats obtenus en 2013 où les concentrations de ces deux HAP correspondaient à l'Etat 2 RLM dans toutes les stations pour le premier et dans la station PG6 pour le second.

Comme en 2013, la répartition des différents HAP est globalement homogène entre les 6 stations échantillonnées en 2022, hormis les valeurs particulièrement élevées susmentionnées, ainsi que les proportions de fluoranthène dans les stations E02 et E06-réf.

PCB

Les teneurs des 7 PCB sont toutes inférieures aux limite de quantification du laboratoire (10 µg/kg MS) sur l'ensemble des 6 stations.

Organoétains

Les concentrations en biocides sont très homogènes entre les stations et toutes très faibles par rapport au seuil N1 établi pour le TBT (100 µg/kg), avec une valeur minimale de 2,6 µg/kg pour le TBT et maximale de 4,6 µg/kg pour le MBT. Ces valeurs sont toutefois sensiblement plus élevées qu'en 2013 où les concentrations ne dépassaient pas la valeur de 1,08 µg/kg pour l'ensemble des organoétains sur la globalité des stations profondes.

Ces résultats traduisent l'absence de contamination en biocides sur la zone d'étude.

4.3. Peuplement benthique

Structure du peuplement

La richesse spécifique est relativement faible² : elle varie entre 20 (station E01 et E02) et 32 (station E05), mais reste plus élevée qu'en 2013.

La densité moyenne est également relativement faible³ : en moyenne de 134 ± 26 ind./m². On constate relativement peu de variation entre les stations ce qui est dû à une forte homogénéité des fonds en termes de granulométrie et d'enrichissement organique.

La biomasse moyenne est de $0,8 \pm 0,3$ g /m² de poids sec, ce qui est faible mais normal pour ce type de sédiment profond habituellement colonisé par des espèces de petite taille. Les valeurs sont légèrement plus élevées sur les stations plus proches de la côte (E01 à E03) par rapport aux stations C4 à C6, plus éloignées.

L'indice de diversité de Shannon a une valeur moyenne élevée ($4,2 \pm 0,3$ bits), indiquant un bon équilibre des espèces en termes d'abondance, marqué par l'absence de population en surabondance ou proliférante.

L'indice trophique moyen est de $56,5 \pm 3,5$ %. Les valeurs sont donc majoritairement inférieures au seuil des 60 %, mais toujours proches de ce seuil de bonne qualité trophique.

Les indices de polluosensibilité (Ambi, M-Ambi et Bentix) indiquent des valeurs globalement bonnes à très bonnes (pas de perturbation environnementale), avec toutefois des indices plus faibles du M-Ambi sur les stations E01, E02 et E04 qui suggèrent une légère perturbation des peuplements.

Globalement les résultats indiquent un peuplement assez homogène entre les stations avec naturellement peu de diversité et d'abondances d'espèces, mais pas de perturbation forte du milieu.

Composition taxonomique

Le peuplement est dominés par les crustacés : la crevette *Callinassa* sp., le crabe (*Goneplax rhomboides*) et le petit amphipode (*Tryphosella similina*, uniquement présent et abondant dans sur la station E05). La crevette *Callinassa* sp doit son statut d'espèce la plus abondante sur l'ensemble de la zone non pas à cause de ses populations très denses mais parce qu'elle est présente sur un grand nombre de stations (densité moyenne mais fréquence élevée).

² D'après les 20 ans d'expérience de Créocéan sur des études benthiques en méditerranée et plus particulièrement lors de grandes campagnes d'intercalibration réalisées lors de la mise en place de la DCE dans les années 2006-2007 en collaboration avec l'Ifremer et l'Agence de l'Eau RMC sur l'ensemble de la façade méditerranéenne.

³ D'après les 20 ans d'expérience de Créocéan sur des études benthiques en méditerranée et plus particulièrement lors de grandes campagnes d'intercalibration réalisées lors de la mise en place de la DCE dans les années 2006-2007 en collaboration avec l'Ifremer et l'Agence de l'Eau RMC sur l'ensemble de la façade méditerranéenne.

Les autres espèces dominantes sont majoritairement des annélides polychètes (10 espèces), des bivalves (4 espèces), des gastéropodes (3 espèces).

Il n'y a pas d'espèce introduite avérée parmi les 64 taxons identifiés sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les stations sont apparentées à la biocénose A5.37 « Vase circalittorale profonde » (typologie EUNIS) et à la biocénose des vases terrigènes côtières (VTC) IV.1.1. Référentiel HABREF.

5. Références

- Alzieu, 2003. Bioévaluation de la qualité environnementale des sédiments portuaires et des zones d'immersion. *Ed. Ifremer*, 248 p.
- Bellair P. et Pomerol C., 1977. Éléments de géologie. *Armand colin, Paris*, 528 p.
- Borja A., Daeur D., Diaz R., Llanos R.J., Muxika I., 2007. Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: A comparison of three indices, *Ecol. Indic.*, doi:10.1016/j.ecolind.2007.05.003
- Borja A., Franco J. & Perez V., 2000. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos within European Estuarine and Coastal Environments. *Marine Pollution Bulletin* 40: 1100-1114.
- Borja A., Muxika I., Franco J., 2003. The application of a Marine Biotic Index to different impact sources affecting soft-bottom benthic communities along European coasts. *Marine Pollution Bulletin* 40 : 835-845.
- Glémarec M. & Hily C., 1981. Perturbations apportées à la macrofaune benthique de la baie de Concarneau par les effluents urbains et portuaires. *Acta Oecologica Applicata*, 2, 139-150.
- Ibouily G., 1981. Étude sédimentologique de la rade de Marseille (Bouches du Rhône). *Thèse 3ème Cycle Aix-Marseille II* : 130 p.
- In Vivo Environnement & Méditerranée, 2013. Expertise biosédimentaire du site d'implantation du projet Provence Grand Large EDF Énergie Nouvelles Au Large Du Golfe De Fos, Bouches du-Rhone. *Rapport EDF Energie Nouvelles*, 120 pp.
- Licari M. L., 1998. Système d'aide à l'interprétation des données benthiques en milieu marin et lagunaire. *IARE, Agence de l'Eau RMC et Région PACA*, 316 p.
- Muxika I., Borja A. & Bald J., 2007. "Using historical data, expert judgement and multivariate analyses in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive". *Marine Pollution Bulletin* 55: 16-26
- OSPAR, 2009. Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. Biodiversity Series, 133pp.
- Pearson T. H. & Rosenberg R., 1978. "Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment". *Oceanography Marine Biology Annual Review*, 16: 229-311
- Shannon C.E., 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27:379-423
- Word J.Q., 1990. The infaunal trophic index, a functional approach to benthic community analyses. *PhD Thesis. University of Washington*, 297p.

ANNEXES



EXPERTISE BIOSÉDIMENTAIRE DU SITE D'IMPLANTATION DU PROJET PLAN GRAND LARGE EDF
RÉCAPITULATIF DES ANALYSES ET DES RÉFÉRENTIELS UTILISABLES (CAMPAGNE IN VIVO, 2013)



Paramètres	Echantillon											RLM état 1	RLM état 2	RLM état 3	RNO 98						RNO Séd, 98Med	Bruit de fond "Geode"
	MIS07	PGL3	PGL4	PGL5	PGL6	PGL7	PGL11	PGL12	PGL14	PGL18	PGL19				94-10	94-13	94-08	94-14	94-11	94-21		
Phase 1: Propriétés physiques																						
Matières sèches %	72,3	60,3	60,5	63,4	60,2	55,3	61,8	54,8	61,2	56,2	59,6											
Densité g/cm³	1,8	1,76	1,63	1,61	1,54	1,46	2,18	1,59	1,6	1,6	1,58											
Al g/kg	4,59	12,3	11,5	13,1	12,9	12,5	11,3	11	14,2	11,7	13											
COT g/kg	5,48	12,2	9,7	8,13	8,54	9,65	7,84	8,9	7,4	8,74	7,58				14,2	20,4	13,5	8	15,5	15,44		
Phase 2: Propriétés chimiques: substances polluantes																						
As mg/kg	7,73	15,3	14,1	13,9	12,9	13,1	14,8	15	12,9	13,9	15,5											4,4
Cd mg/kg	<0,40	0,18	0,2	0,2	0,15	0,14	0,16	0,17	0,16	0,17	0,16	<0,15	<0,6	>0,6	0,21	0,59	0,19	0,14	0,24	0,22	0,15	0,5
Cr mg/kg	13,8	20,8	22,6	25,2	29,8	27,9	24,7	25,3	23,2	25,8	25,7											45
Cu mg/kg	6,31	23,5	25,3	24,7	23,9	22,4	22,4	19	20	20,9	18,7	<15	<60	>60	29	43	24	12	32	34,73	30	35
Hg mg/kg	<0,1	0,14	0,25	0,49	0,42	0,35	0,93	0,3	0,28	0,2	0,32	<0,05	<0,4	>0,4	0,33	0,27	0,3	0,13	0,49	0,5	0,1	0,2
Ni mg/kg	13,9	26,3	25,9	26,7	25,5	25,7	27,2	29,5	27,1	27,2	27,1											20
Pb mg/kg	8,94	22,3	27,7	38	40	38,5	39,1	34,8	35,7	37,5	35,4	<25	<50	>50	48	64	51	27	54	52,93	30	47
Zn mg/kg	31,4	68,5	73,1	80,3	81	78,6	74,9	73,3	70,7	80,8	71,6	<90	<200	>200	112	140	113	73	118	127,27	90	115
PCB 28 mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,0006	0,0006	0,0005	0,0004	0,0028	0,00229		
PCB 52 mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,0004	0,0008	0,0001	0,00025	0,001	0,00087		
PCB 101 mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,0009	0,0011	0,0009	0,0006	0,002	0,00175		
PCB 118 mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,001	0,0011	0,0007	0,0005	0,0037	0,00293		
PCB 138 mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,0019	0,002	0,0017	0,0011	0,005	0,00371		
PCB 153 mg/kg	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,002	0,0023	0,0016	0,0013	0,0053	0,00409		
PCB 180 mg/kg	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01				0,0021	0,0021	0,0014	0,0009	0,0044	0,00316		
Somme des 7 PCB mg/kg	<0,07	0,04-x<0,09	<0,07	<0,07	<0,07	0,06-x<0,11	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07											
Fluoranthène	0,025	0,059	0,096	0,176	0,16	0,131	0,13	0,127	0,083	0,145	0,074	<0,04	<0,2	>0,2	0,207	0,5	0,183	0,047	0,207	0,34		
Benzo(k)fluoranthène	<0,012	0,015	0,026	0,049	0,05	0,034	0,035	0,037	0,026	0,059	0,027	<0,1	<0,25	>0,25	0,16	0,143	0,0456	0,014	0,082	0,11		
Benzo(b)fluoranthène	0,012	0,079	0,103	0,183	0,198	0,165	0,158	0,109	0,104	0,13	0,095	<0,2	<0,5	>0,5	0,143	0,316	0,102	0,032	0,184	0,197		
Benzo(a)pyrène	<0,012	0,03	0,058	0,093	0,105	0,072	0,085	0,064	0,047	0,081	0,05	<0,1	<0,5	>0,5	0,116	0,29	0,079	0,025	0,16	0,157		
Indénopyrène	<0,012	0,025	0,043	0,061	0,065	0,036	0,04	0,064	0,028	0,075	0,033				0,105	0,188	0,71	0,0176	0,125	0,125		
Benzo(g,h,i)perylène	<0,012	0,026	0,037	0,048	0,067	0,04	0,044	0,044	0,023	0,078	0,027				0,114	0,238	0,07	0,027	0,16	0,151		
Naphtalène	<0,012	0,019	0,015	0,025	0,021	0,015	0,016	0,017	0,015	0,016	0,014	<0,1	<0,25	>0,25								
Acénaphthylène	<0,012	<0,012	0,012	0,023	0,022	0,018	0,018	0,014	<0,012	<0,012	<0,012											
Acénaphthène	<0,012	<0,012	<0,012	0,013	0,017	<0,012	0,012	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012											
Fluorène	<0,012	0,015	0,013	0,021	0,024	0,014	0,02	0,016	0,021	0,014	<0,012											
Phénanthrène	0,028	0,039	0,048	0,091	0,093	0,067	0,076	0,069	0,067	0,06	0,045											
Anthracène	<0,012	0,013	0,022	0,042	0,041	0,031	0,032	0,023	0,023	0,03	0,018											
Pyrène	0,017	0,052	0,078	0,157	0,141	0,099	0,11	0,093	0,066	0,113	0,063											
Benzo(a)anthracène	0,013	0,034	0,052	0,121	0,102	0,104	0,058	0,1	0,055	0,062	0,045											
Chrysène	<0,012	0,045	0,055	0,111	0,113	0,077	0,068	0,062	0,053	0,062	0,051											
Dibenzo(a,h)anthracène	<0,012	<0,012	0,017	0,03	<0,012	0,015	0,024	0,048	<0,012	0,038	0,017											
Somme 16 HAP mg/kg	0,09-cx<0,23	0,45-x<0,49	0,68-x<0,69	1,24	1,22-cx<1,23	0,92-cx<0,93	0,93	0,89-cx<0,9	0,61-cx<0,65	0,96-cx<0,99	0,56-cx<0,59											
TBT µg/kg	<1,04	<0,908	1,53	<0,812	<0,850	<1,08	<0,728	<0,873	<0,755	<0,769	<0,787	<40	<100	>100								
DBT µg/kg	1,09	<0,463	0,749	<0,414	<0,433	<0,551	<0,728	<0,873	<0,755	<0,769	<0,787											
MBT µg/kg	1,22	<0,908	<0,726	<0,812	<0,850	<1,08	<0,728	<0,873	<0,755	<0,769	<0,787											
Phase 2: Indice de contamination organique												Seuil de l'Indice de Contamination Organique										
												Nul = 0	Faible = 1	Moyen = 2	Fort = 3	Très fort = 4						
COT % de MS	2,27	7,34	7,23	5,9	6,81	8,13	6,05	7,53	5,95	8,61	5,08	<0,6	<2,3	<4	<5,8	>5,8						
Azote Kjeldahl g/kg	1,5	1,4	1,1	0,9	1,2	1	1	1,2	1	1,1	1	<0,6	<1,2	<2,4	<3,6	>3,6						
Phosphore total mg/kg	1500	1390	1300	1160	1200	1220	1160	1190	1160	1240	1150	<500	500 - 800	<1200	>1200							
ICO	6	9	8	7	7	8	7	7	7	8	6	0	0-2,75	<5,5	<8,25	>8,25						



creocean

Environnement & océanographie

www.creocean.fr