

# ETUDE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES ET PLANCTONIQUES DE LA COLONNE D'EAU DU FRONT LIGURO-PROVENÇAL ET DES DYNAMIQUES CÔTE-LARGE AU COURS DE L'EXPÉDITION PELAGOS DU PROJET WE ARE MÉDITERRANÉE



**ETUDE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES ET  
PLANCTONIQUES DE LA COLONNE D'EAU  
DU FRONT LIGURO-PROVENÇAL ET DES DYNAMIQUES CÔTE-  
LARGE AU COURS DE L'EXPÉDITION PELAGOS DU PROJET  
WE ARE MEDITERRANÉE**



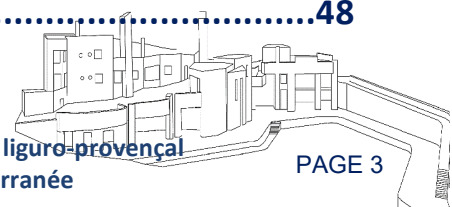
**Ce document doit être cité dans la littérature de la manière suivante :**

FULLGRABE L., WOEHREL A., FONTAINE Q., LECOEUR G., CHABRIER N., CHAPAT, M., JEGLOT S. & MARENGO M. (2023). Etude des paramètres physico-chimiques et planctoniques de la colonne d'eau du front liguro-provençal et des dynamiques côte-large au cours de l'Expédition Pelagos du projet We Are Méditerranée. E10-23 : 52 pages

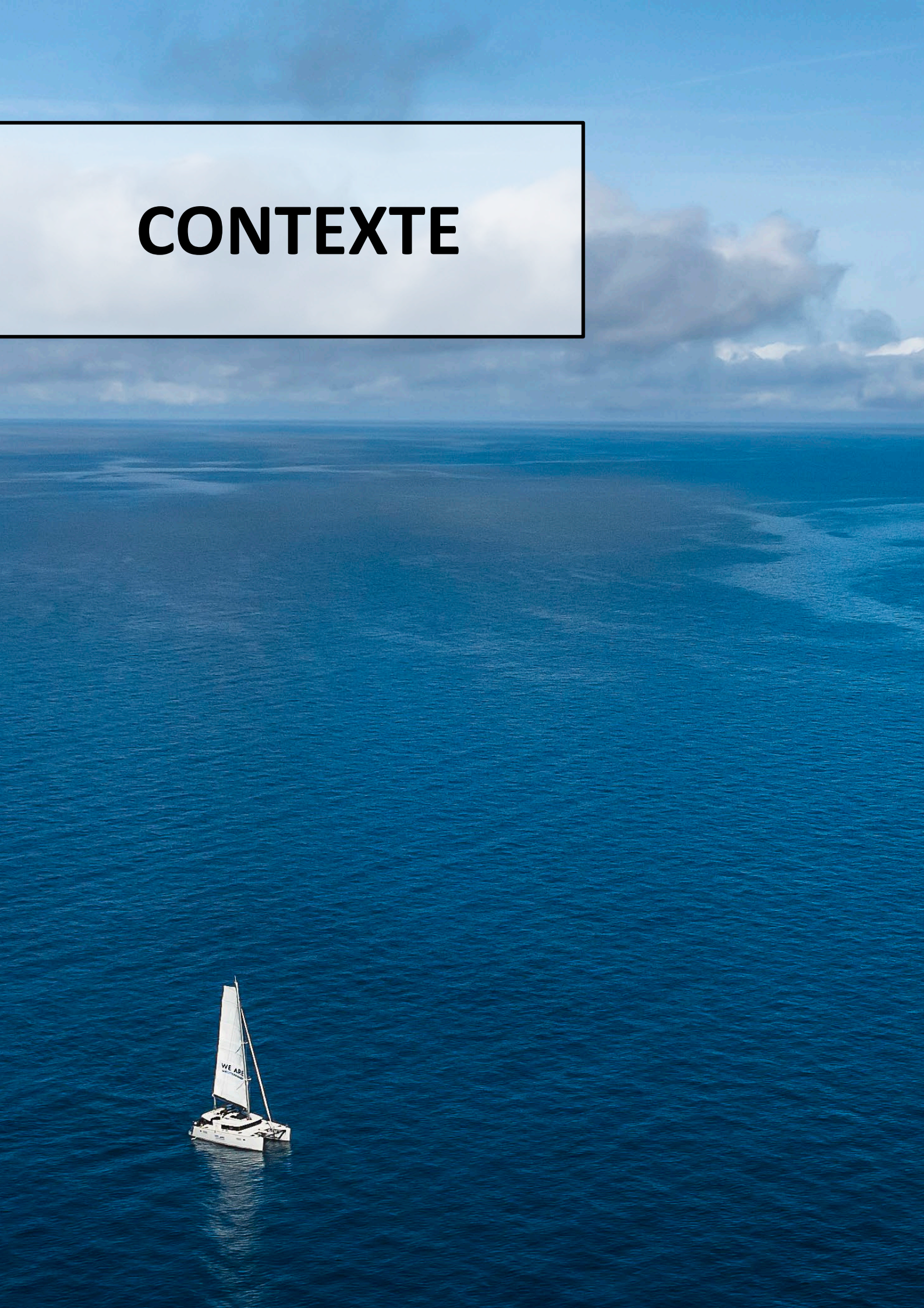
# Table des matières



<b>I. Contexte de l'étude.....</b>	<b>4</b>
I.1 La colonne d'eau .....	5
I.2 Le nord-ouest méditerranéen .....	5
I.3 Le Sanctuaire Pelagos .....	5
I.4 Les interfaces côte-large .....	6
I.5 Une topographie complexe .....	7
I.5 Les circulations et zones hydrographiques .....	8
<b>II. Objectif de l'étude.....</b>	<b>10</b>
<b>III. Méthodologie.....</b>	<b>13</b>
III.1 Logistique générale .....	14
III.2 Profils de sonde multiparamétrique.....	15
III.3 Déterminations des biomasses phytoplanctoniques.....	15
III.4 Déterminations des concentrations en sels nutritifs.....	16
III.5 Prélèvements et analyse de zooplancton.....	16
III.6 Observations de la faune marine.....	18
III.7 Analyse de la donnée.....	18
<b>IV. Résultats.....</b>	<b>19</b>
IV. 1. Caractérisation physico-chimique et phytoplanctonique du cadre hydrographique .....	20
IV.1.A Identification des zones périphériques, frontales et centrales .....	25
IV.1.B Des zones de productivité localisées.....	26
IV.1.C Pourquoi les zones frontales ne sont-elles ici pas les plus productives ?.....	27
IV.1.D Une production primaire impactant d'autres paramètres physico-chimiques.....	28
IV.2 Caractérisations des prélèvements zooplanctoniques.....	30
IV.2.A Abondances absolues.....	30
IV.2.B Assemblages de communauté.....	32
IV.2.C Biovolumes individuels ellipsoïdes.....	34
IV.2.D Indices de diversité.....	35
IV.2.E Spectre de taille.....	36
IV.3 Un sanctuaire peuplé de mégafaune.....	37
IV.3.A Observations de cétacés.....	37
IV.3.B Autres espèces potentiellement bio-indicatrices de forte productivité.....	39
IV.3.C Observations d'avifaune.....	40
IV.3.D Distribution de la richesse spécifique.....	40
<b>V. Synthèse.....</b>	<b>42</b>
<b>VI. Bibliographie.....</b>	<b>48</b>



# CONTEXTE



## I.1 La colonne d'eau

Véritable colonne vertébrale de tout milieu marin interconnectant les dynamiques pélagiques et benthiques, la colonne d'eau, ce volume d'eau compris entre la surface et le fond, joue un rôle déterminant sur le maintien de la biodiversité et de la qualité des milieux. La compréhension du cadre hydrographique apparaît ainsi comme primordiale à une interprétation efficace des phénomènes observés au sein du règne animal. Or, lorsque la prise photo ou vidéo est mise en relation avec l'environnement du sujet, elle est généralement associée à un habitat benthique, c'est à dire du fond, mais rarement aux caractéristiques physico-chimiques et planctoniques de la masse d'eau occupée. De façon générale, la connaissance du grand public concernant la diversité des masses d'eau du large, de ces processus physico-chimiques et planctoniques et de la richesse de la mégafaune pélagique en Méditerranée comparée au domaine côtier semble particulièrement restreinte.

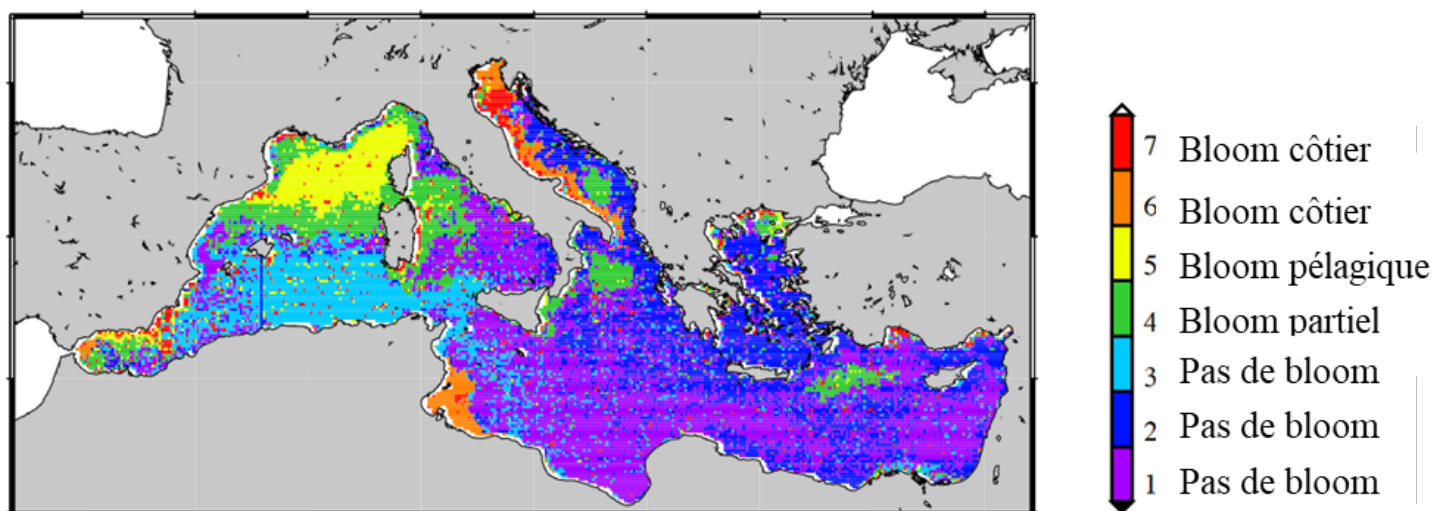
## I.2 Le nord-ouest méditerranéen

Les masses d'eaux françaises méditerranéennes sont pourtant remarquables comparées au reste du bassin méditerranéen. En effet, parmi

la diversité des dynamiques courantologiques présente dans les eaux du large, celle caractérisant le nord-ouest méditerranéen donne lieu à une grande productivité primaire, en d'autres termes, de plancton. Cette zone présente, contrairement au reste de la Méditerranée, l'occurrence d'un développement massif de phytoplancton printannier au large, appelé bloom, s'étalant de l'ouest de l'Italie jusqu'aux eaux catalanes (d'Ortenzio & d'Alcalà, 2009) (Figure 1). Cette abondance de plancton, à la base de la chaîne alimentaire, forme ainsi un habitat pélagique propice pour un grand nombre d'espèces et notamment de cétacés. C'est d'ailleurs de l'observation d'une telle richesse biologique qu'est né le sanctuaire Pelagos.

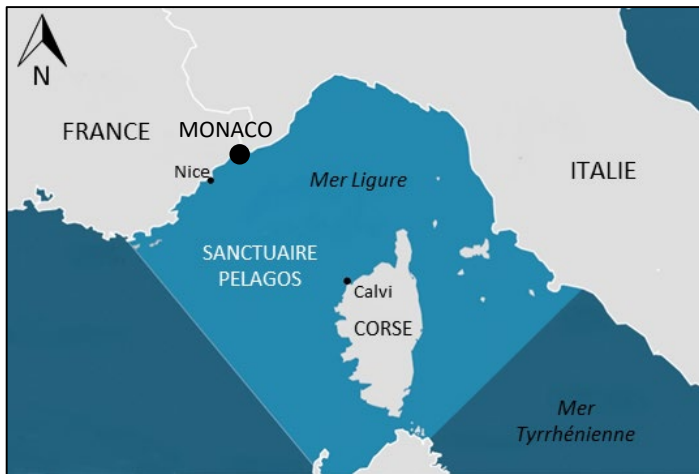
## I.3 Le Sanctuaire Pelagos

Le constat d'une importante abondance de mammifères marins a donné lieu en 1999 à la création du Sanctuaire Pelagos dont le but est de promouvoir des actions et des mesures de gestion harmonisées en faveur de la protection des cétacés et de leurs habitats (Figure 2). Ce sanctuaire de 87 500 km<sup>2</sup> faisant l'objet d'un accord entre l'Italie, la principauté de Monaco et la France est l'un des environnements



**1** Répartition des dynamiques phytoplanctoniques annuelles, appelées blooms (efflorescences intenses de micro-algues), selon l'analyse de 10 années de données satellitaires de concentration surfaciques de chlorophylle (SeaWiFS 1997-2007) réalisée et publiée par d'Ortenzio & d'Alcala, 2009.

pélagiques les plus productifs de la mer Méditerranée mais aussi l'un de ceux qui subit la plus forte pression anthropique notamment avec le trafic maritime (pollution sonore et risque de collision), la pêche et la pollution.

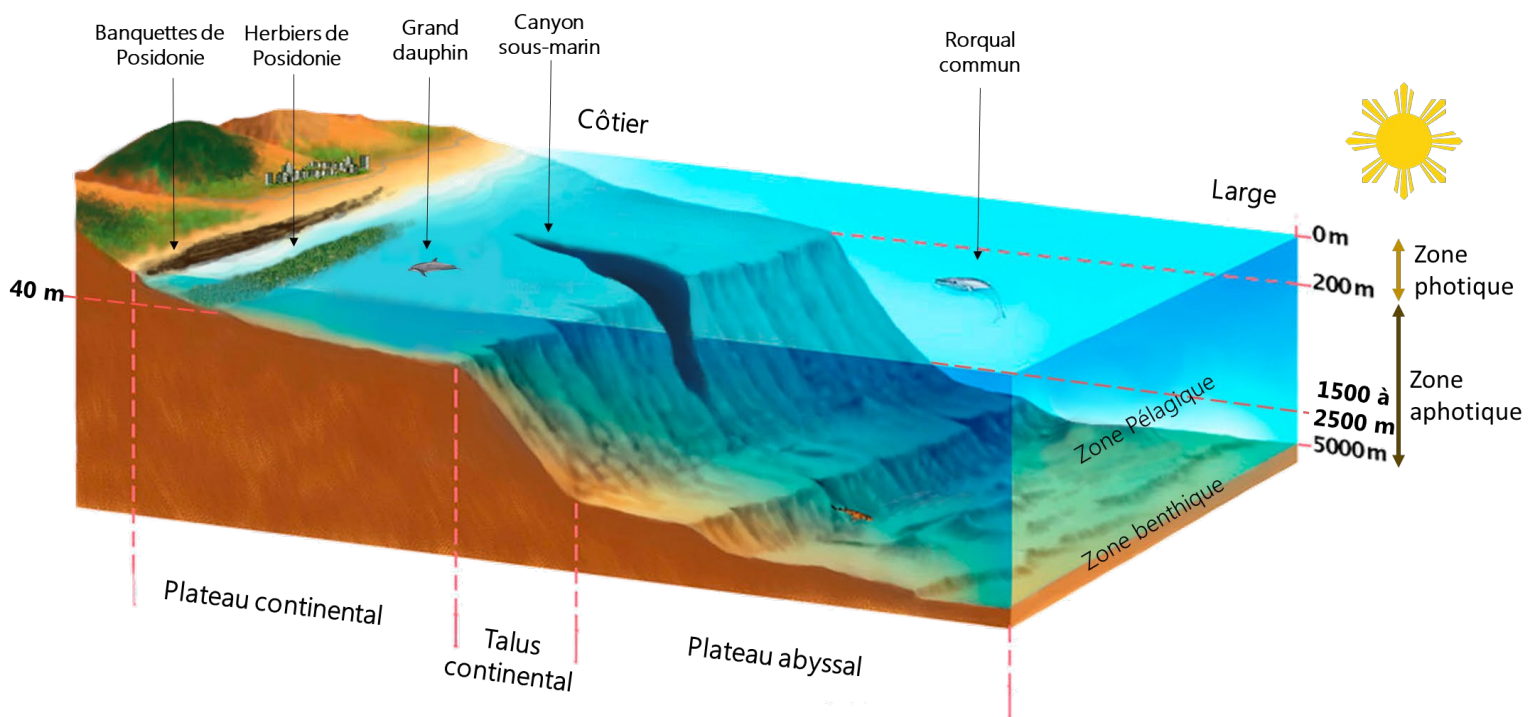


## 2 Délimitation du Sanctuaire Pelagos.

### 1.4 Les interfaces côte-large

De manière générale, les fonds marins méditerranéens depuis la côte vers le large se composent de différentes grandes divisions selon la profondeur des fonds, c'est à dire de la

bathymétrie (Figure 3). La zone émergée se décline en différents étages comprenant l'étage supralittoral (mouillé par les embruns et vagues) et médiolittoral (immergé par hautes eaux et mouillé par les vagues à basses eaux) où l'on peut notamment retrouver la présence de banquettes de posidonie faisant partie intégrante d'une plage typique méditerranéenne. Les parties immergées de 0 à plus ou moins 200 m forme ensuite le plateau continental. Ce plateau plus ou moins large et présente également différents étages dont l'étage infralittoral (0 à 40 m) abritant notamment les herbiers de posidonie. La pente du plateau continental est faible mais s'accroît brusquement lorsque débute le talus continental. Celui-ci plonge alors généralement à 2500 m mais peut s'enfoncer à des profondeurs records de plus de 5000 m dans la Mer Ionienne. Chacune de ces divisions hébergent des peuplements benthiques (vivant dans ou sur le fond) mais aussi pélagiques (vivant dans la colonne d'eau) qui leur sont spécifiques. Le rorqual, par exemple, est généralement inféodé à des eaux surplombant 2500 m de fond alors que le grand dauphin



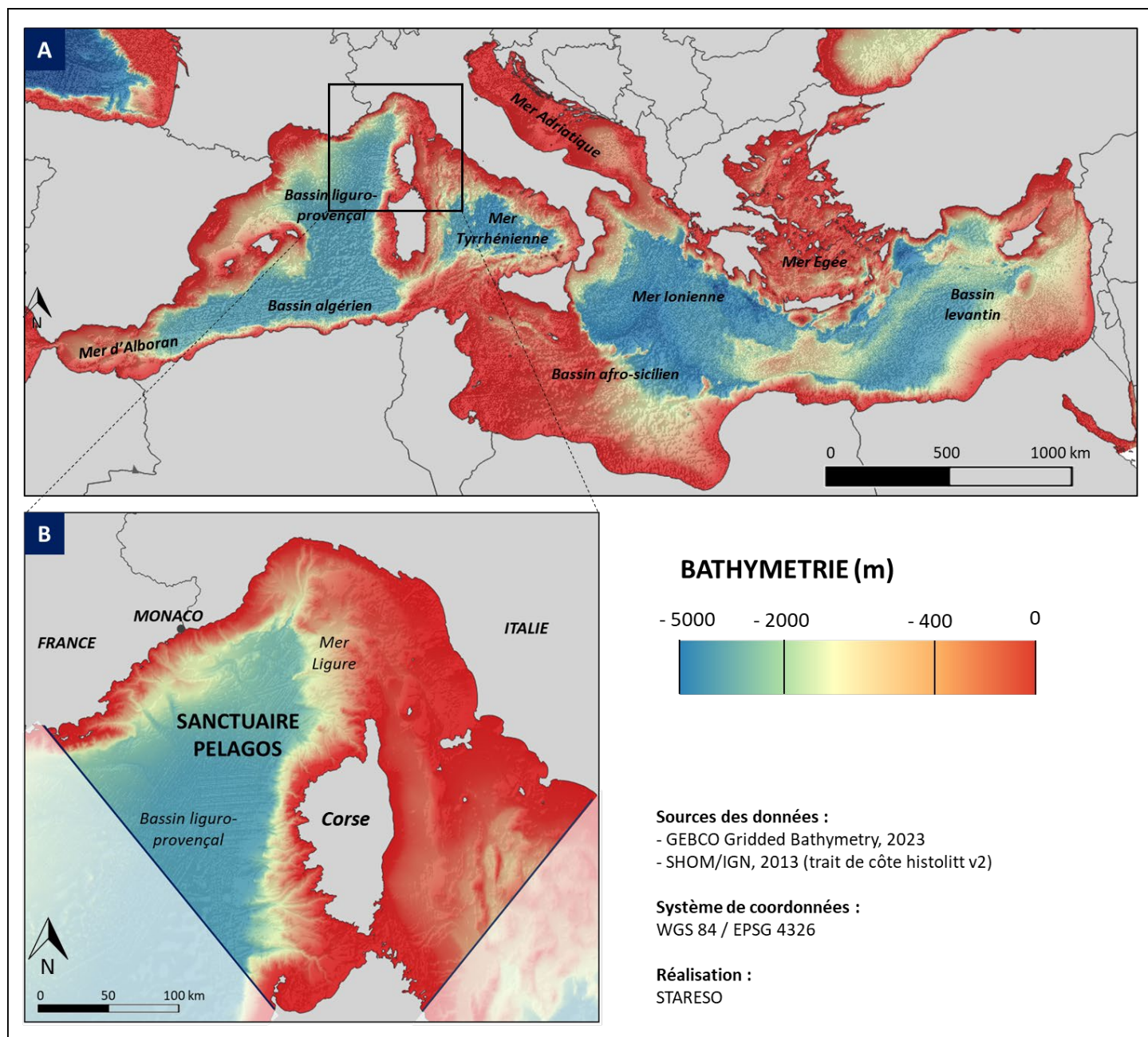
## 3 Représentation 3D schématique d'un exemple d'interface côte-large du nord-ouest méditerranéen avec la présence de certains écosystèmes emblématiques (herbiers et banquettes de Posidonie), de topographies sous-marines (canyons sous-marins) ou cétacés (rorqual commun) remarquables.

évolue dans les eaux côtières au-dessus du plateau continental. Outre ces différences sur l'axe « côtier-large », les peuplements varient également selon des couches d'eau qui la composent verticalement. Les premiers 200 m, par exemple, se distinguent du reste en formant une zone de surface où la lumière pénètre suffisamment dans l'eau pour permettre la photosynthèse des plantes, algues et microalgues telles que le phytoplancton. C'est donc dans cette zone, appelée zone photique, qu'a lieu la quasi totalité de la productivité primaire,

c'est à dire la production de biomasse végétale, processus constituant la base du cycle carbone organique.

### I.5 Une topographie complexe

Le sanctuaire Pelagos recouvre l'extrémité nord-ouest de la Mer Tyrrhénienne, une partie du bassin liguro-provençal à l'Ouest et comprend toute la Mer Ligure (Figure 4). Le Sanctuaire comprend des espaces au contexte bathymétrique hétérogène, avec, sur toute la



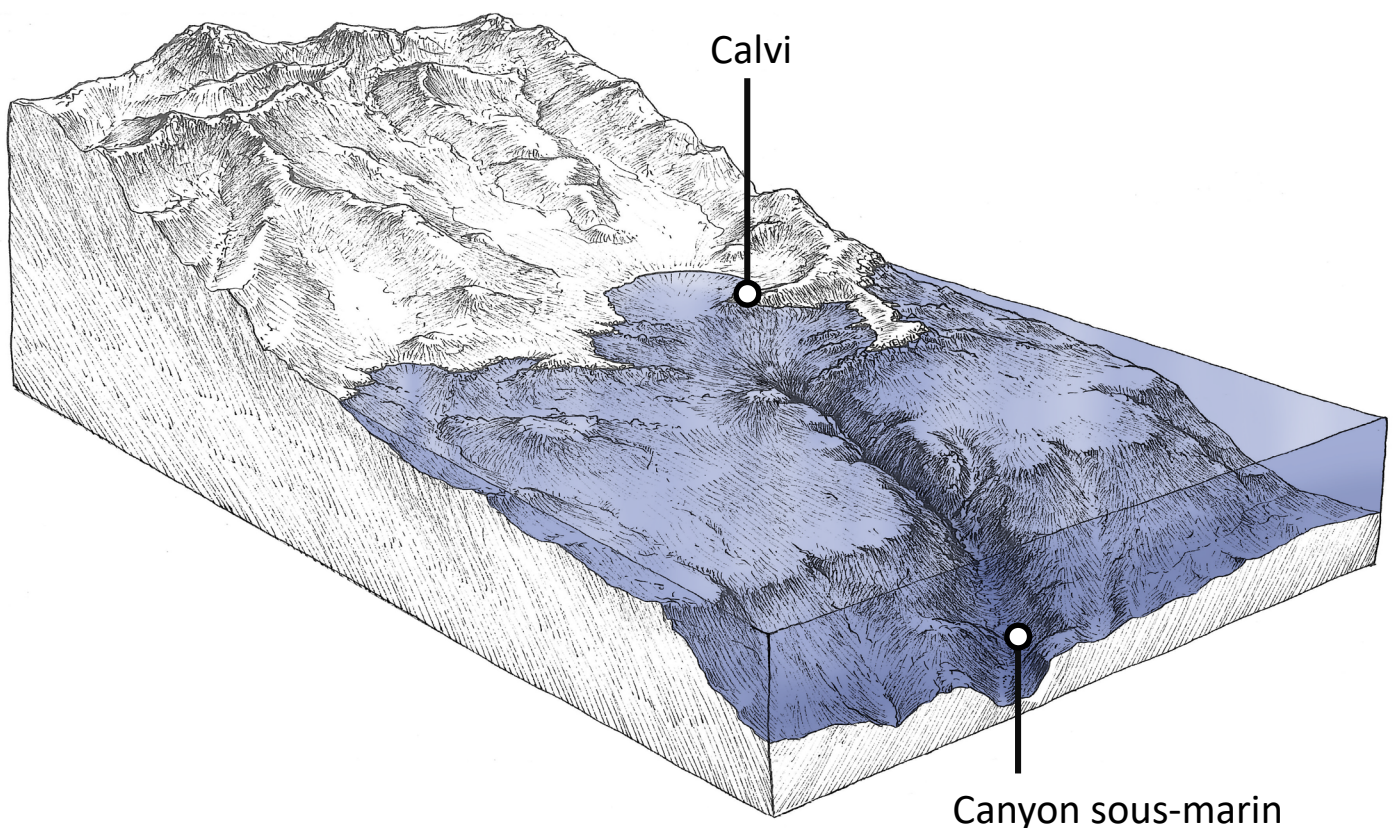
**4** Bathymétrie de (A) la mer Méditerranée et (B) de l'espace occupé par le Sanctuaire Pelagos (délimité en noir).

moitié Est, un plateau continental d'une profondeur moyenne de 400 m contrastant avec la partie Ouest, caractérisée par une plaine abyssale atteignant les 2700 m au nord-ouest de la Corse. Par ailleurs, la partie Ouest du Sanctuaire se distingue par la présence de canyons sous-marins, vallées sous-marines étroites et pentues creusées dans le plateau et talus continental (Figure 5). La présence d'un tel relief sous-marin peut favoriser la productivité planctonique sur la frange côtière (Fullgrabe et al., 2020; Goffart et al., 2015), via la remontée de masses d'eau profondes et riches en nutriments par la tête de canyon au sein des eaux côtières.

### I.5 Circulations et zones hydrographiques

Une grande partie du Sanctuaire Pélagos est occupée, au nord, par la mer Ligure. Outre une importante hétérogénéité de la bathymétrie sur

cet espace, cette mer est également caractérisée par différentes masses d'eau appelées zones hydrographiques (Figure 5), à savoir : i) des zones périphériques (PZ) gouvernées par le courant ligurien et dont les eaux sont les moins salines, ii) des zones frontales (ZF) caractérisées par un brusque changement horizontal de salinité et de densité, iii) une zone centrale (ZC) présentant, de façon homogène, la plus forte salinité et densité, et au sein de laquelle surviennent des remontées hivernales de masses d'eaux froides situées en été en-dessous de 250 m de profondeur. Il est d'ailleurs à souligner que le Golfe du Lion et, dans une moindre mesure, la zone centrale de la mer Ligure, constituent l'une des quatre grandes régions du globe pouvant être le siège de convections profondes entraînant la formation d'eau profonde participant à la circulation thermohaline en Méditerranée (Damien, 2015; Somot et al., 2018)

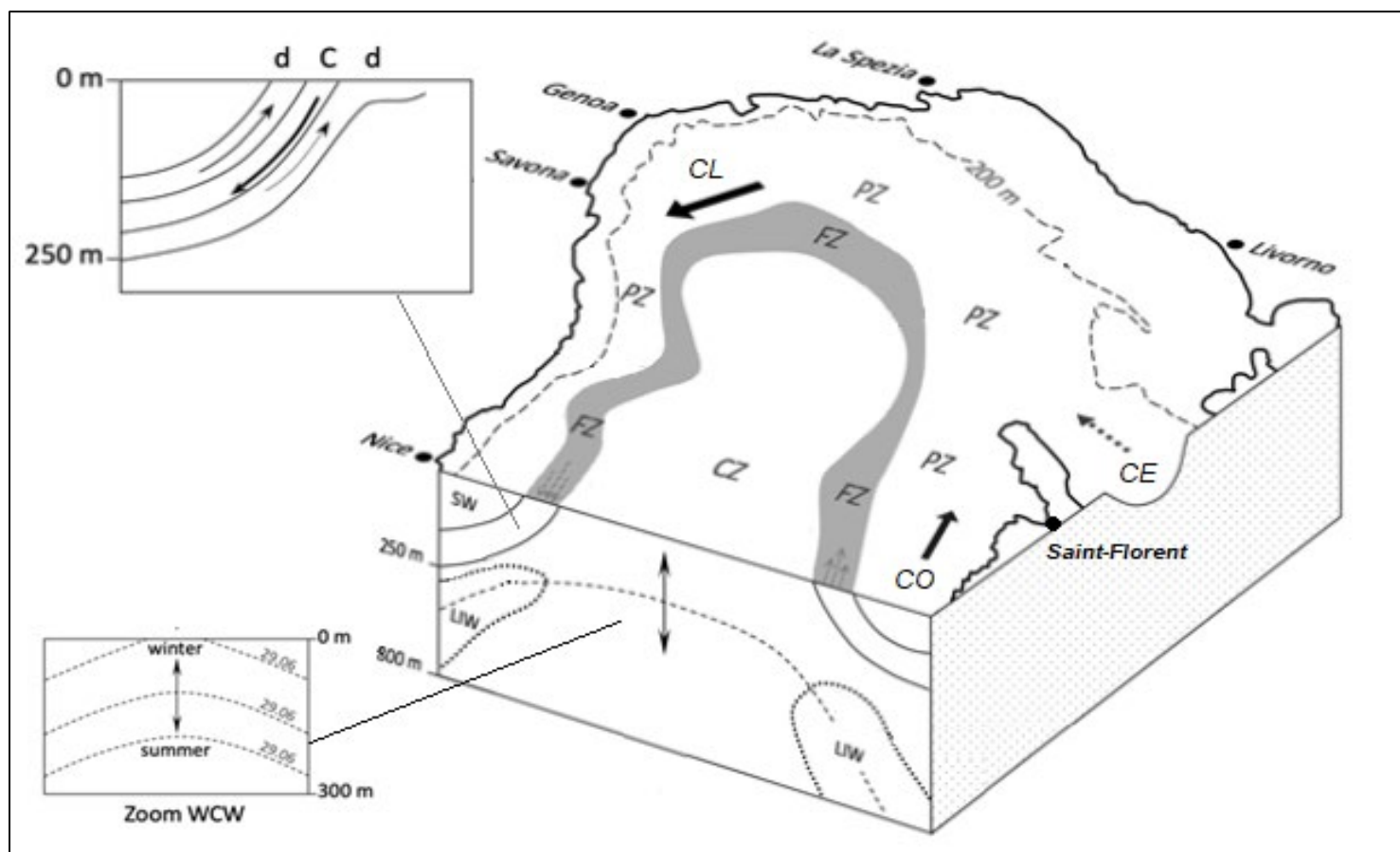


5

Représentation schématique du canyon sous-marin de Calvi. La tête de canyon débouche au large de la baie de Calvi engendrant une topographie plongeant à une profondeur de 1 km à seulement 7 km de distances des côtes.

Les zones frontales sont des structures existantes dans les océans et mers du monde et au niveau desquelles des brassages profonds via des circulations secondaires quasi verticales de convergences (vers le bas) et de divergences (vers le haut) peuvent subvenir. Ces zones frontales sont considérées comme des zones d'importance écologique pour les vertébrés marins (Scales et al., 2018), pouvant héberger une forte productivité en fonction de la saison (Prieur et al., 2020). Ces zones hydrographiques sont également associées à une courantologie de surface particulière où le courant ouest-corse et le courant est-corse se rejoignent au large du Cap Corse pour former le courant liguro-provençal. Celui-ci, de sens cyclonique (ici

anti-horaire), régit les eaux de surface de la zone périphérique. Outre une compartimentation en zones hydrographiques, la mer Ligure, d'une profondeur maximale de 2700 m peut également être caractérisée de par les couches d'eau qui la composent verticalement: sous les eaux superficielles, entre 100 et 200 m, se situe la couche d'eau hivernale (WCW) caractérisée par un minimum de température. En-deça, on retrouve les eaux intermédiaires Levantines (LIW) allant de 300-700 m et contenant les eaux les plus salines, et enfin, la couche la plus profonde, appelée eaux profondes (DW), occupe les parties abyssales jusqu'au plancher océanique.



6

Représentation 3D schématique de la circulation et des zones hydrographiques en mer Ligure et d'une coupe transversale de la radiale Calvi-Nice adaptée de Prieur et al., 2020. CZ : zone centrale; FZ : zone frontale; ZP: zone périphérique; SW: eaux superficielles; LIW: Eau Levantine Intermédiaire; WC: convection hivernale; CE : courant Est corse ; CO : courant Ouest corse ; CL : courant ligurien ; d : divergence (upwelling) ; C : convergence (downwelling). Zoom WCW : la remontée en hiver des eaux froides profondes délimitées par l'isopycne  $\sigma=29.06$ . La zone frontale est en effet sujette à une importante convergence vers la profondeur, compensée par des remontées (upwelling) de part et d'autre de celle-ci.

# OBJECTIFS DE L'ETUDE



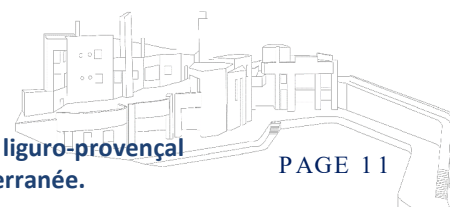
Le but général d'associer une expédition imagée menée par un photographe mondialement reconnu à une intervention scientifique de la part de STARESO est :

- De proposer un déploiement relativement simple et financièrement raisonnable (comparé aux campagnes océanographiques « classiques ») permettant de générer une information pertinente et utile à l'amélioration des connaissances scientifiques concernant les processus océanographiques (physico-chimiques et planctoniques de la colonne d'eau) du large jusqu'à l'interface côte-large au sein du Sanctuaire Pelagos ;
- D'offrir un vecteur de vulgarisation attrayant concernant les dynamiques méconnues du large en associant les images de faune observée aux propriétés physico-chimiques et planctoniques de la colonne d'eau. Cette approche alliant science et art permet de contextualiser les observations faites le long d'un fil conducteur au profit d'un support de compréhension scientifique et vulgarisé de la complexité des processus hydrographiques destiné du grand public.

Afin d'atteindre ces objectifs, il est réalisé une radiale Calvi-Nice, longue de 173 km et traversant les eaux françaises de la mer de Ligurie, secteur du Sanctuaire Pélagos remarquablement riche hydrographiquement et biologiquement parlant. Le choix de cette radiale particulièrement empruntée par les navigateurs pour rejoindre la Corse depuis la France continentale permet ainsi au public français de potentiellement s'identifier à la zone d'étude. Plus concrètement, 20 sites répartis de façon équidistante le long de cette radiale sont considérés afin d'y réaliser :

- des profils de sonde multiparamétrique et des prélèvements d'eau afin de décrire les dynamiques spatiales des caractéristiques physiques (température, salinité, densité, turbidité), chimiques (oxygène dissous, sels nutritifs) et phytoplanctoniques au moment de la traversée.
- des prélèvements de zooplancton sont également effectués afin d'illustrer la diversité du zooplancton tout en caractérisant la différence des communautés selon les sites et types de prélèvements.
- des observations de faunes marines remarquables depuis l'embarcation relevées et géoréférencées par l'équipe de We Are Méditerranée, afin de les contextualiser avec les caractéristiques physico-chimiques et planctoniques mesurées.

Cette étude propose ainsi une symbiose matérialisée par une expédition en mer alliant art d'éveiller à la beauté de la biodiversité pélagique méditerranéenne, via la photographie, ainsi que l'apport de connaissance scientifique, via l'association de prélèvements et de mesures. Ces travaux permettent notamment de constituer un outil de prise de conscience auprès du grand public de la richesse des processus marins hauturiers animant la Méditerranée nord-occidentale et des interfaces côte-large. Les résultats pourront en effet être partagés notamment lors des campagnes de restitution du projet We Are Méditerranée auprès du grand public.



# MÉTHODOLOGIE



### III.1 Logistique générale

L'expédition se déroule à bord d'un catamaran (Figure 8) en mai 2023 et consiste à traverser la mer Ligure le long d'une radiale constituée de 20 sites de mesures et de prélèvements (Figure 7). L'ensemble des manipulations en mer comprend :

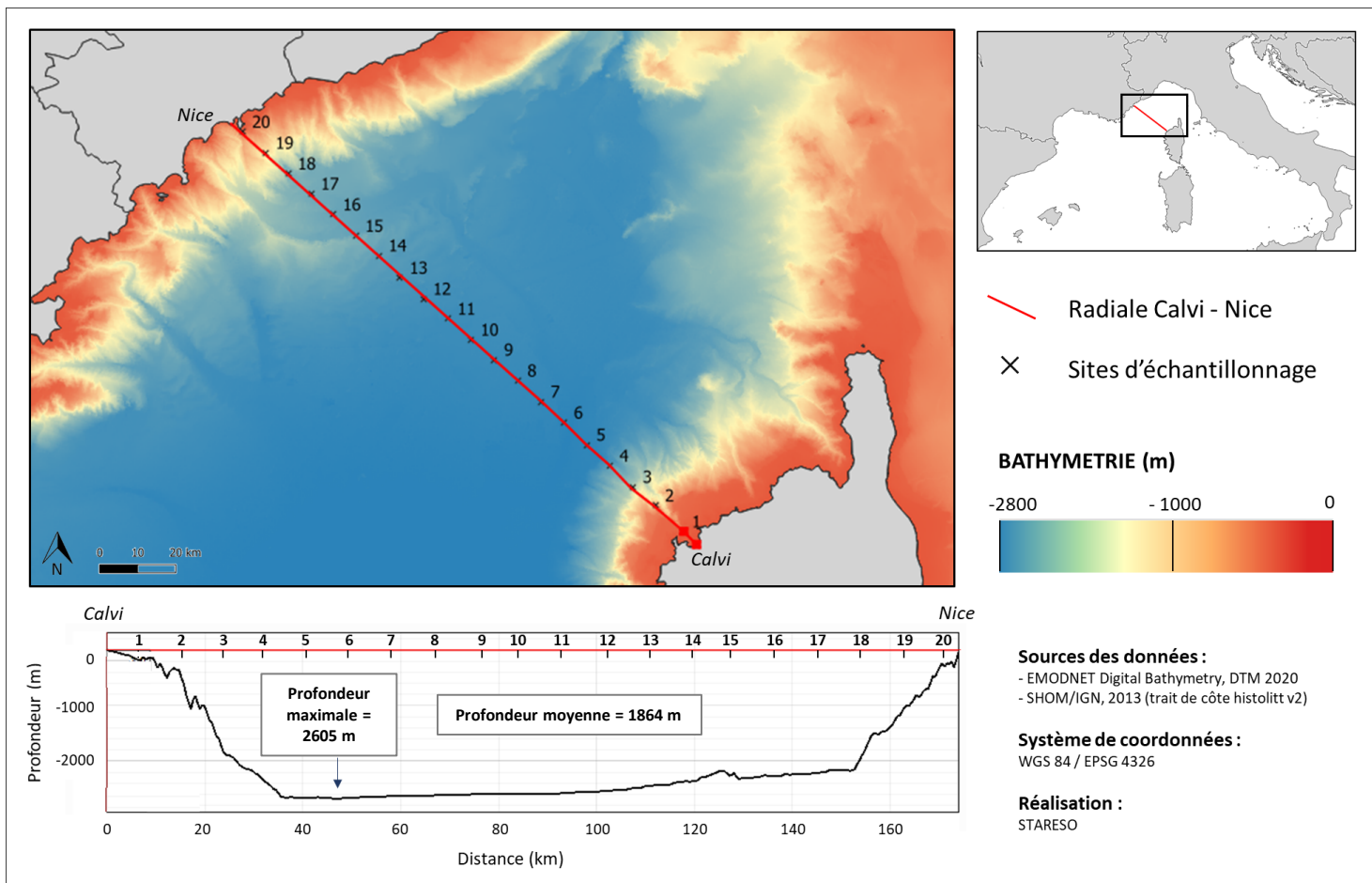
- Profils de sonde multiparamétrique;
- Prélèvements d'eau à des fins de dosages des biomasses phytoplanctoniques
- Prélèvements d'eau à des fins de dosages de concentrations en sels nutritifs;
- Prélèvements de zooplancton;
- Observations géoréférencées de faune marine.

L'ensemble des prélèvements est ensuite traité en laboratoire à STARESO afin d'analyser et

représenter la donnée obtenue via de multiples outils informatiques.



**8** Embarcation de l'expédition.



**7** Sites de mesures le long de la radiale Calvi – Nice et profil bathymétrique de la radiale. La profondeur maximale atteinte le long de cette radiale est 2605m alors que la profondeur moyenne est de 1864m.

### III.2 Profils de sonde multiparamétrique

Un profil vertical est réalisé à chacun des 20 sites au moyen d'une sonde multiparamétrique YSI Exo2 (Figure 9) sur une profondeur de 200 m. Ces profils permettent de mesurer les paramètres suivants à raison de l'enregistrement d'une donnée par seconde :

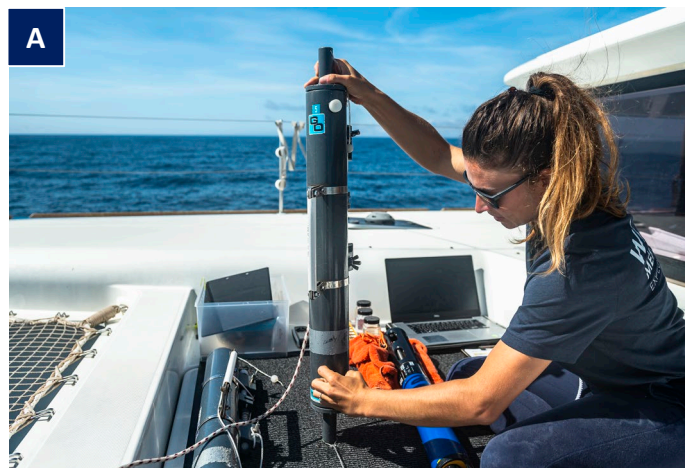
- Densité ( $\sigma$ )
- Température de l'eau ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Salinité
- Oxygène dissous ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
- Turbidité (FNU)
- Concentration en chlorophylle a ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )



9 Déploiement de la sonde multiparamétrique.

### III.3 Déterminations des biomasses phytoplanctoniques

En supplément des mesures de chlorophylle  $a$  (chl  $a$ ) enregistrées par les capteurs de la sonde multiparamétrique, des prélèvements d'eau sont effectués à l'aide de bouteilles Niskin (Figure 10A) en subsurface et à la profondeur de concentration maximale en chl  $a$ , cette profondeur étant déterminée au préalable grâce au profil de fluorescence enregistrée avec la sonde multiparamétrique. Ces prélèvements d'eau sont ensuite filtrés (1L) sur place à l'aide de filtres en fibre de verre (type Whatman GF/F) (Figure 10B) via une rampe de filtration protégée de la lumière (Figure 10C).



10 A: bouteille Niskin; B: filtre; C: rampe de filtration.

Ces filtres sont congelés puis, en laboratoire, extraits à l'acétone afin de procéder à un dosage de la concentration en chl  $a$  par fluorométrie (Welschmeyer, 1994) (Trilogy Turner) (Figure 11). La précision moyenne de l'analyse de la chl  $a$  est de l'ordre de  $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Ces dosages permettent de valider ou de corriger les données de concentration en chl  $a$  enregistrées par la sonde.



### 11 Fluoromètre permettant de doser les concentrations en chlorophylle a .

#### III.4 Détermination des concentrations en sels nutritifs

Des dosages en sels nutritifs sont effectués à partir des mêmes prélèvements d'eau servant au dosage de chl *a* (Figure 12A). Une partie de ces prélèvements est répartie en 2 répliquats via l'emploi de fioles à scintillation (Figure 12B) puis est congelée jusqu'au moment du dosage. Les échantillons sont finalement analysés avec un analyseur en flux continu (San ++ Skalar) (Figure 12C) afin de doser les concentrations des nutriments suivants : nitrite, nitrate, ammonium, orthophosphate et silicate. Ces données permettent ainsi d'identifier les dynamiques d'enrichissement en nutriments, ces dernières étant un facteur limitant de la production primaire (Behrenfeld et al., 2006).



### 12 A: prélèvement d'eau via l'utilisation de seringues depuis la bouteille Niskin; B: conditionnement des prélèvements dans des fioles de scintillation; C: analyseur en flux.

#### III.5 Prélèvements et analyse de zooplancton

Au total, 4 prélèvements de zooplancton sont réalisés à l'aide d'un filet à plancton WP2 (200  $\mu\text{m}$ ) (Figure 13A) associé à un débitmètre digital (Figure 13B). Les prélèvements, réalisés à l'aube (entre 6h30 et 8h30) ou à la tombée de la nuit, sont constitués de types de prélèvements complémentaires :

- deux traits verticaux de 100 m à 0 m de profondeurs.
- deux traits horizontaux réalisés en tractant le filet derrière le bateau pendant 20 min à 2 noeuds et à une profondeur comprise entre 1 et 4m (Figure 13A).

Alors que les prélèvements verticaux permettent de mieux refléter la diversité des assemblages zooplanctoniques car ils permettent de s'affranchir en partie de l'hétérogénéité de la distribution verticale ainsi que des dynamiques de migrations nyctémérales (montée et descente au sein de la colonne d'eau du zooplancton selon le cycle jour/nuit), les traits horizontaux, quant à eux, permettent de prélever une abondance d'individus bien plus importante que via un trait vertical. Cet avantage permet finalement d'augmenter la probabilité de prélever des organismes de grandes tailles, généralement plus rares dans les communautés, ainsi que du méroplancton, soit l'ensemble des larves d'espèces benthiques ou nectoniques qui passent uniquement le début de leur vie sous forme planctonique.

Après le prélèvement au filet, les échantillons sont concentrés à l'aide d'un concentrateur puis conditionnés dans des flacons de 200 ml, fixés au formol (3%) pour assurer leur conservation (Figure 13D). Les données quantitatives nécessaires aux analyses des communautés sont obtenues en traitant les échantillons à l'aide du Zooscan, un système d'imagerie permettant la mesure et la classification des organismes zooplanctoniques. Un protocole spécifique permet l'obtention du jeu de données analysable (Figure 14). En laboratoire, les échantillons sont filtrés sur des tamis de mailles différentes (respectivement 1 mm, 450 µm et 200 µm) afin de séparer les organismes selon leur taille. Chaque phase est diluée par séparateur Motoda (Motoda, 1959) si nécessaire afin d'obtenir une abondance d'organismes comprise entre 1000 et 2000 individus au maximum. Chacune des phases est ensuite scannée à l'aide du Zooscan. L'image de résolution 2400 dpi obtenue pour chaque phase est ensuite segmentée afin de séparer numériquement les organismes à l'aide du logiciel Zooprocess associé au Zooscan. En cas de contact entre plusieurs individus, une

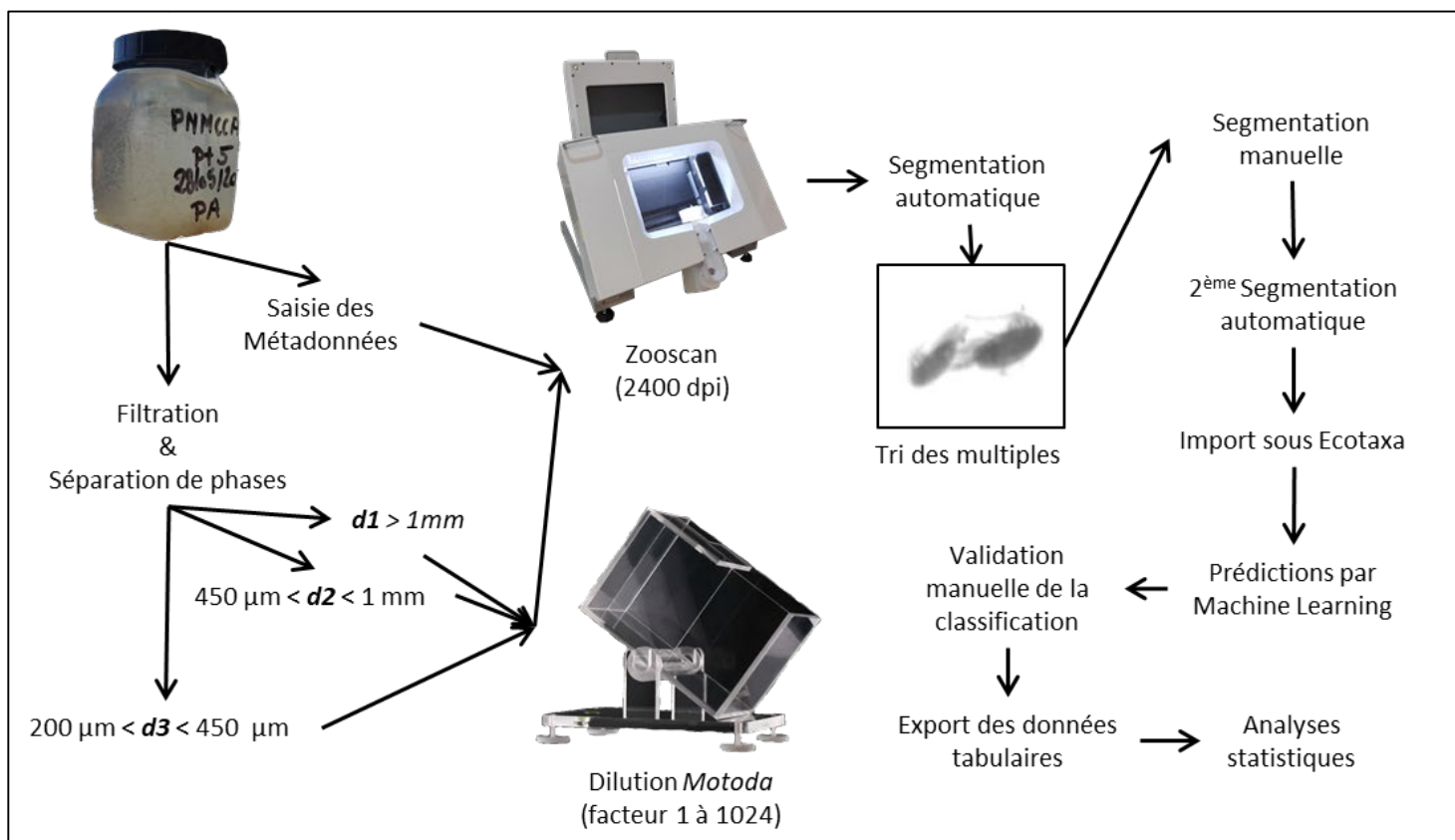


13 A: trait horizontal; B: débitmètre; C: concentration d'un échantillon; D: échantillon formolé.

inspection visuelle est suivie par une segmentation manuelle. La donnée est finalement importée sous Ecotaxa, une plateforme de classification semi-automatique d'images planctoniques. L'appartenance à une catégorie taxonomique donnée est d'abord initiée par une prédiction reposant sur une succession d'outils d'apprentissage automatique (succession de réseaux de neurones et arbres de régression). La classification sous Ecotaxa implique 68 catégories taxonomiques. Cependant, étant donné que certaines catégories très similaires peuvent être regroupées en entités comparables, ces catégories sont finalement regroupées en 43 catégories finales définies par expertise. Après prédiction, les images sont validées manuellement par inspection visuelle et les données sont finalement exportées sous format tabulaire pour analyse numérique. Les données issues de la classification sous Ecotaxa permettent d'étudier les communautés

zooplanctoniques sous plusieurs prismes d'étude :

- Les abondances totales et relatives de chaque catégorie taxonomique caractérisent la composition des communautés aux zones de prélèvements;
- Le calcul de plusieurs indices de diversité permettent la comparaison spatiale de la diversité des communautés;
- Les biovolumes ellipsoïdes allongés de chaque organisme calculés à partir des paramètres inhérents aux images acquises par le Zooscan caractérisent la distribution des volumes de l'ensemble des organismes composant les communautés et de chaque catégorie taxonomique. Ces volumes sont des proxys de multiples informations des communautés telles que leur fonctionnalité.



14 Etapes de traitement en laboratoire des échantillons de zooplancton via l'emploi d'un Zooscan.

- Ces biovolumes permettent par ailleurs de calculer les spectres de taille de biovolumes normalisés (NBSS) (Platt & Denman, 1977; Silvert & Platt, 1978) pour chaque site. Cette méthode permet de synthétiser l'information contenue dans la structure de taille en reflétant les dynamiques liées aux flux d'énergie entre les organismes, sans tenir compte de la composition taxonomique.

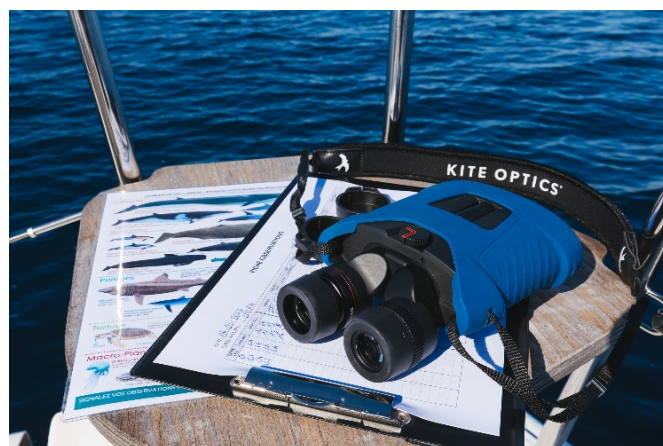
De plus, dans le but d'illustrer une part de la diversité zooplanctonique des prélèvements, certains individus sont isolés afin de réaliser des images de plancton. Un protocole de *focus stacking* spécifique au plancton a été conçu en utilisant une loupe binoculaire Nikon SMZ1270 couplé à un appareil de photographie hybride Nikon 1-V/.

### III.5 Observations de la faune marine

Au cours des sorties, toutes les observations de faune marine (tortue, cétacé, poisson lune, etc.), et d'avifaune sont « géoréférencées » par l'équipage We Are Méditerranée via l'application OBSenMER (Figure 15). Il est à noter qu'uniquement les observations réalisées durant la traversée ont été considérées afin de ne pas biaiser l'effort d'observation le long de la radiale. Les observations faites lors d'une journée exclusivement dédiée à l'observation (le 7 mai 2023) au large de Monaco et de Nice, n'ont, par conséquent, pas été pris en compte dans cette étude.

A défaut de pouvoir établir, sur base d'une seule campagne, des corrélations scientifiquement robustes entre l'ensemble des paramètres physico-chimiques et planctoniques et les observations de mégafaune, une contextualisation spatiale de ces observations est cependant réalisée tout en argumentant,

lorsque pertinent, sur les potentiels liens de causalité entre celles-ci et les paramètres physico-chimiques et planctoniques relevés.



15 Matériels d'observation de la faune pélagique.

### III.6 Analyse de la donnée

L'ensemble des données a été compilé et traité sous R (version 4.2.1) associé à l'environnement de développement intégré Rstudio version 2023.08.01. Les données concernant spécifiquement le zooplancton ont été traitées via Zooprocess, Ecotaxa et GIMP puis analysées sous R. L'ensemble des résultats obtenus est représenté graphiquement et/ou cartographié sous R, QGIS et/ou Ocean Data View (ODV), ce dernier permettant l'interpolation des données via la méthode DIVA (Data-Interpolating Variational Analysis) (Watelet et al., 2016) afin de représenter des processus océanographiques au sein de la colonne d'eau.

# RESULTATS



WE ARE  
MÉDITERRANÉE  
EXPÉDITION PELAGOS

asics

L'Expédition Pélagos s'est déroulé en mai 2023. L'ensemble des prélèvements d'eau et profils de sonde ont été réalisés le 4 (Points 1 à 5), 5 (Points 6 à 13) et 6 (Points 14 à 20) mai. Les prélèvements de zooplancton ont été réalisés le 4, 5, 6 et 9 mai (Tableau 1 & 2). De plus, 56 observations marines incluant cétacés, téléostéens, tortues et avifaune ont pu être faites entre le 4 et 13 mai.

#### IV.1 Caractérisation physico-chimique et phytoplanctonique du cadre hydrographique

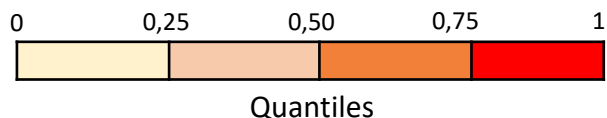
Les profils verticaux de sonde ont permis, via interpolation, de reconstituer des coupes transversales de la colonne d'eau le long de la radiale Calvi-Nice (Figure 16 & 17). Ces coupes illustrent la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques et planctoniques de 0 à 200 m et permettent ainsi de définir différentes zones hydrographiques sur 170 km de distance. De façon générale, les résultats soulignent une hétérogénéité dans la distribution spatiale à la

fois horizontale et verticale des paramètres étudiés. Certains paramètres, tels que la salinité et la densité, sont intimement liés et présentent par conséquent des patterns de distribution similaires. La densité est également dépendante (et donc corrélée) à la température et présente des pycnoclines (zone de transition rapide de densité entre deux masses d'eau) et des thermoclines (zone de transition thermique rapide entre les eaux superficielles et les eaux profondes) aux patterns similaires (Figure 16), de profondeurs allant de 12 m à 63 m et de 4 m à 61 m, respectivement. D'autres paramètres, au contraire, tels que la turbidité, ne semblent a priori pas corrélée à un autre paramètre. Et pourtant, l'analyse qui va suivre permet de mettre en lumière les liens existants entre tout les paramètres dans le but d'illustrer en partie le fonctionnement de cet espace de Méditerranée. Rappelons enfin que les données de nutriments ne sont composées que de 2 mesures par profil et les résultats, bien que pertinents, sont donc à interpréter de façon précautionneuse.

#### 1 Récapitulatif de l'ensemble des données récoltées

PARAMETRES	MANIPULATIONS TERRAIN	QUANTITÉ RÉALISÉE ET ANALYSEE	DESRIPTIF
Densité, température de l'eau, salinité, turbidité, concentration en oxygène dissous et en chlorophylle <i>a</i>	Profils verticaux de 0 à 200m	20 profils	Profils verticaux via sonde YSI-Exo2 avec une fréquence d'enregistrement de 1 donnée par seconde
Dosage de biomasse phytoplanctonique	Prélèvements Niskin en subsurface et à la DCM	40 échantillons	Dosages des filtres ( la concentration Chl <i>a</i> par fluorométrie selon la méthode Welschmeyer (1994).
Dosage des concentrations en sels nutritifs	Prélèvements Niskin en subsurface et à la DCM	40 échantillons (80 répliqués)	Echantillons analysés par fluorimétrie en flux SKALAR ++ pour doser les concentrations en ammonium, phosphate, silicate, nitrate et nitrite
Abondance et biovolume zooplanctonique (>200µm)	Traits verticaux de 0 à 100m & traits horizontaux de 20 min	4 échantillons (2 horizontaux, 2 verticaux)	Traits réalisés avec un filet WP2 (>200µm); échantillons analysés via Zooscan afin de considérer l'abondance et le biovolume de 30 catégories zooplanctoniques
Observations de mégafaune	Prises de points GPS de faune marine via l'application OBSenMER	56 observations	Observations de 14 espèces différentes comprenant cétacés, avifaunes, tortues et téléostéens

**2** Récapitulatif de l'ensemble des données physico-chimiques récoltées à chacun des 20 points de prélèvements.

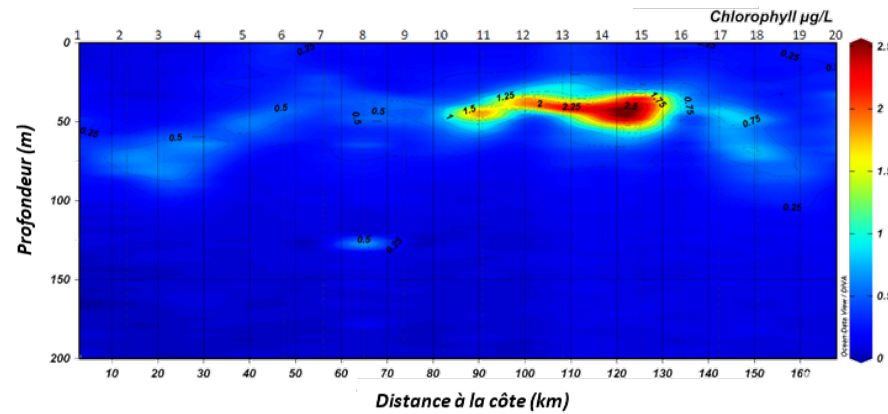
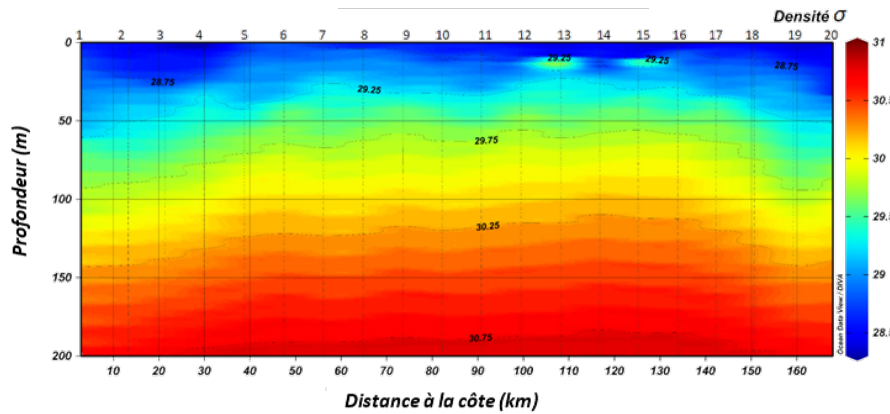
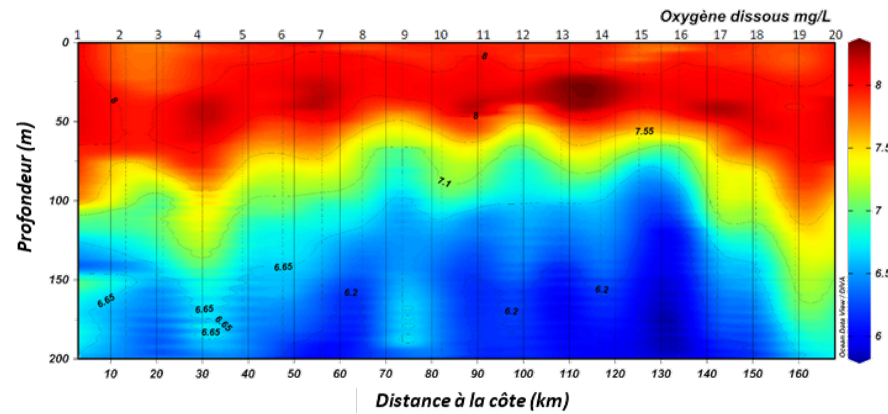
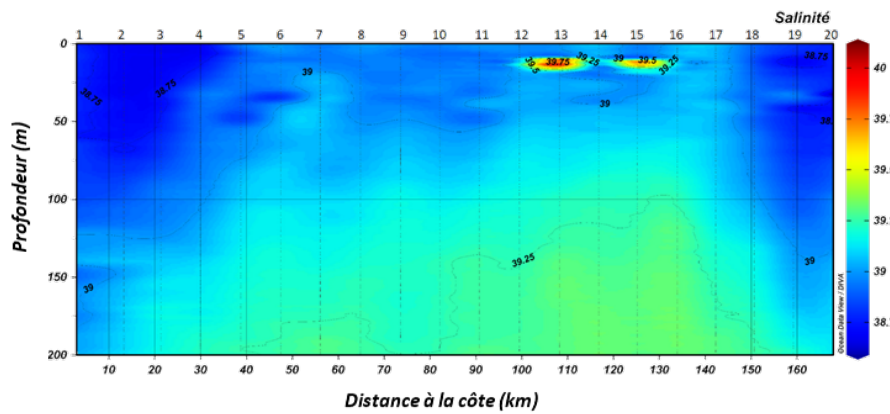
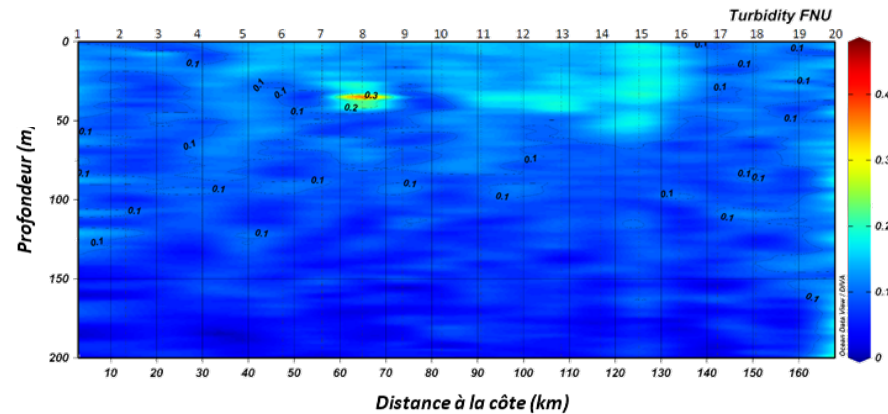
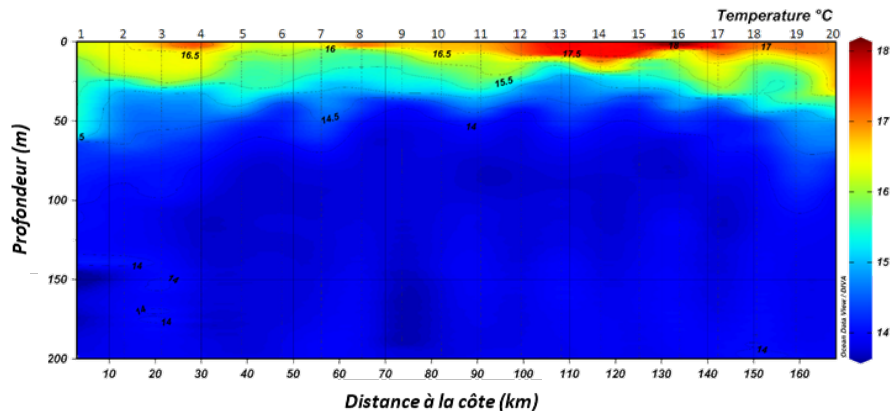


Dates	Station	Densité			Température (°C)			Salinité (psu)			Oxygène dissous (mgL <sup>-1</sup> )			Turbidité (FNU)			Chlorophylle a (µg <sup>-1</sup> )		
		Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
04/05/2023	Point 1 (100m)	28,60	29,30	29,80	14,07	14,92	16,26	38,75	38,81	38,86	7,63	7,96	8,14	0,06	0,10	0,13	0,06	0,21	0,35
04/05/2023	Point 2	28,50	29,74	30,70	13,79	14,36	16,49	38,68	38,88	39,11	6,45	7,23	8,00	0,02	0,07	0,12	0,01	0,16	0,63
04/05/2023	Point 3	28,40	29,54	30,70	13,83	14,75	16,86	38,67	38,88	39,19	6,27	7,35	8,03	0,03	0,07	0,14	0,02	0,17	0,65
04/05/2023	Point 4	28,30	29,71	30,80	13,71	14,51	17,29	38,69	38,97	39,22	6,52	7,60	8,25	0,00	0,08	0,13	0,03	0,22	0,67
04/05/2023	Point 5	28,70	29,77	30,80	13,73	14,46	16,32	38,80	39,04	39,25	6,43	7,35	8,07	0,00	0,09	0,15	0,01	0,19	0,62
05/05/2023	Point 6	28,80	29,98	30,80	13,73	14,16	16,34	38,80	39,11	39,26	6,22	7,19	8,13	0,03	0,07	0,14	0,03	0,18	0,56
05/05/2023	Point 7	28,70	29,89	30,80	13,74	14,38	16,53	38,93	39,11	39,29	6,02	7,22	8,24	0,01	0,08	0,15	0,03	0,18	0,46
05/05/2023	Point 8	28,60	29,75	30,80	13,78	14,48	17,03	38,95	39,08	39,27	6,14	7,20	8,05	0,01	0,09	0,47	0,05	0,22	0,74
05/05/2023	Point 9	28,60	29,95	30,80	13,63	14,05	16,71	38,93	39,11	39,22	6,49	7,02	8,06	0,00	0,07	0,16	0,03	0,17	0,55
05/05/2023	Point 10	28,60	30,13	30,80	13,77	14,12	16,79	38,92	39,14	39,25	6,33	6,92	8,08	0,00	0,07	0,15	0,02	0,16	0,73
05/05/2023	Point 11	28,60	29,93	30,80	13,70	14,41	16,82	38,91	39,14	39,30	6,12	6,95	8,25	0,03	0,09	0,17	0,05	0,23	1,96
05/05/2023	Point 12	28,50	30,01	30,80	13,72	14,23	17,19	38,97	39,16	39,29	6,16	6,90	8,16	0,02	0,08	0,17	0,03	0,24	1,93
05/05/2023	Point 13	28,40	29,96	30,80	13,75	14,32	17,62	38,89	39,19	40,12	5,94	7,06	8,32	0,02	0,09	0,19	0,07	0,42	2,29
06/05/2023	Point 14	28,50	29,90	30,80	13,74	14,45	17,53	38,85	39,17	39,33	5,99	7,10	8,34	0,01	0,08	0,16	0,09	0,42	2,31
06/05/2023	Point 15	28,40	29,97	30,80	13,75	14,29	17,76	38,91	39,19	40,01	5,94	6,84	8,14	0,04	0,11	0,19	0,07	0,49	2,53
06/05/2023	Point 16	28,40	29,87	30,80	13,71	14,54	18,13	39,03	39,19	39,34	5,82	6,90	8,12	0,00	0,08	0,16	0,06	0,25	0,89
06/05/2023	Point 17	28,50	29,97	30,80	13,70	14,37	17,46	39,02	39,15	39,30	6,09	7,16	8,26	0,00	0,07	0,12	0,07	0,28	0,88
06/05/2023	Point 18	28,50	29,83	30,80	13,83	14,47	17,07	38,86	39,05	39,27	6,17	7,28	8,15	0,03	0,08	0,12	0,06	0,28	0,77
06/05/2023	Point 19	28,40	29,54	30,70	13,85	14,85	17,12	38,70	38,90	39,21	6,63	7,66	8,05	0,02	0,08	0,13	0,07	0,24	0,52
06/05/2023	Point 20	28,40	29,66	30,70	13,86	14,64	16,94	38,59	38,90	39,14	6,76	7,64	8,20	0,07	0,13	0,19	0,08	0,26	0,52

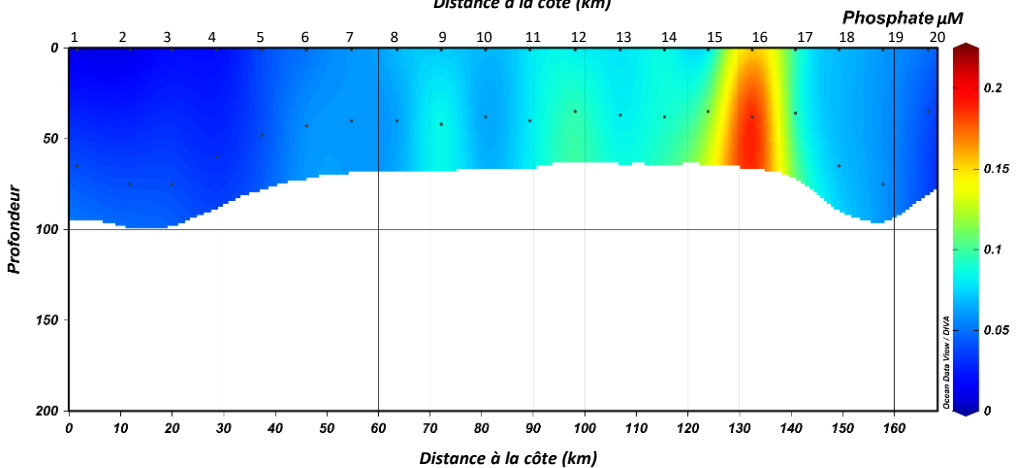
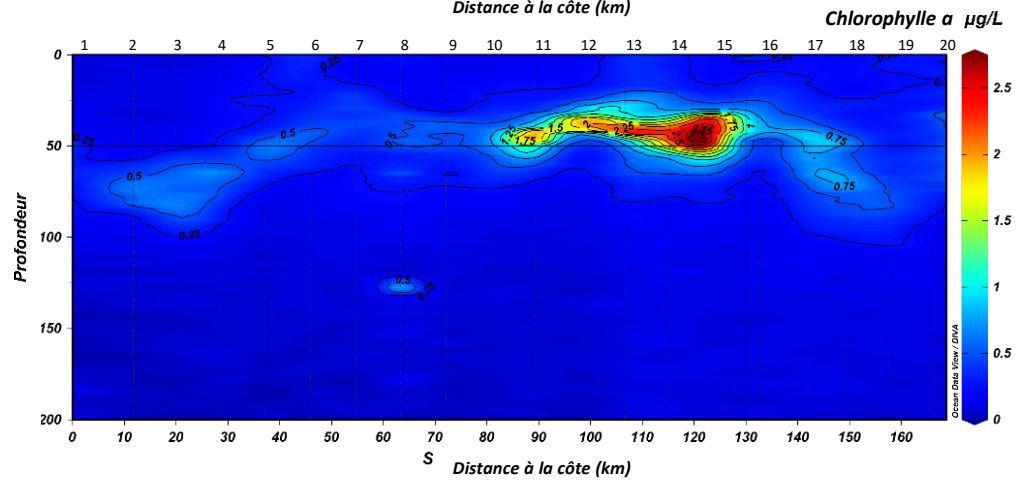
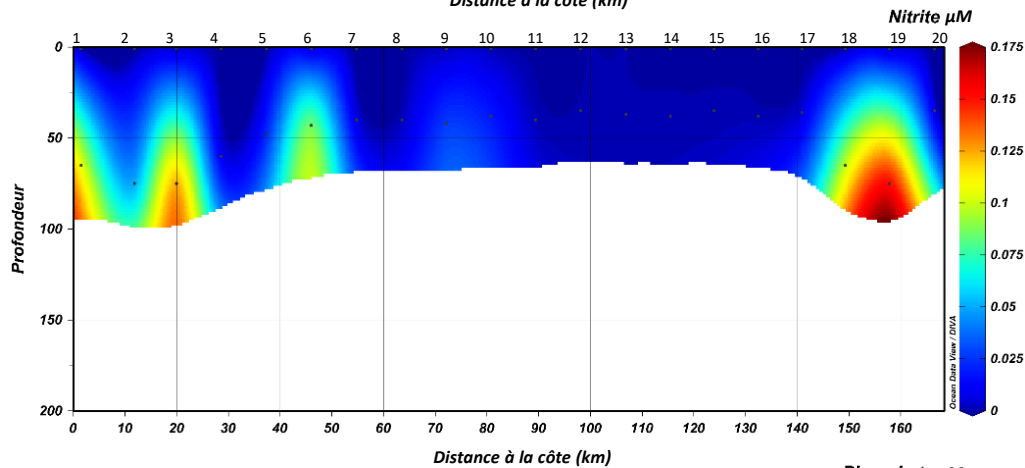
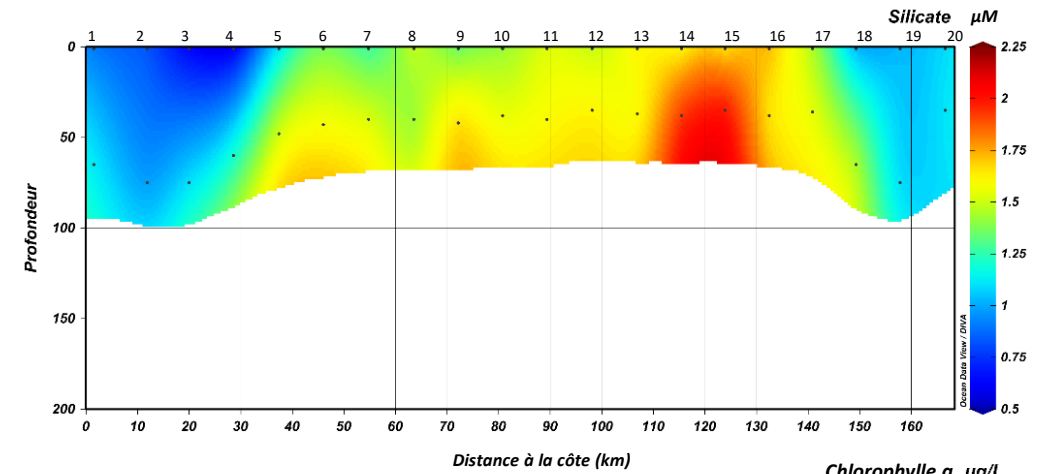
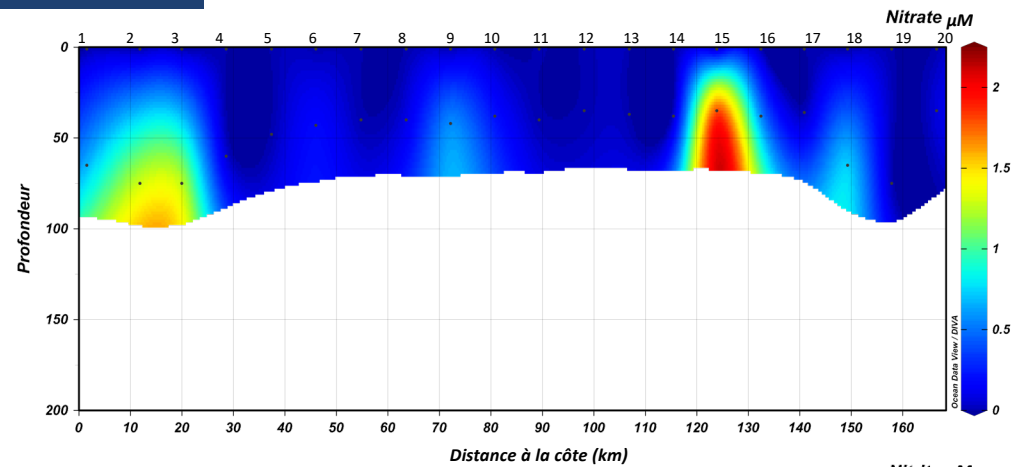
Dates	Station	Nitrate (µM)		Nitrite (µM)		Ammonium (µM)		Phosphate (µM)		Silicate (µM)		Profondeur de DCM (m)
		Surf	DCM	Surf	DCM	Surf	DCM	Surf	DCM	Surf	DCM	
04/05/2023	Point 1	0,007	0,670	0,000	0,110	0,069	0,069	0,010	0,040	0,910	1,130	65
04/05/2023	Point 2	0,007	1,300	0,000	0,040	0,069	0,069	0,010	0,040	0,840	0,970	75
04/05/2023	Point 3	0,007	1,270	0,000	0,140	0,069	0,069	0,020	0,040	0,650	1,110	75
04/05/2023	Point 4	0,007	0,050	0,000	0,000	0,069	0,069	0,020	0,030	0,620	1,210	60
04/05/2023	Point 5	0,007	0,007	0,000	0,020	0,069	0,069	0,040	0,040	1,120	1,530	48
05/05/2023	Point 6	0,007	0,180	0,000	0,100	0,069	0,069	0,050	0,060	1,380	1,580	43
05/05/2023	Point 7	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,060	0,060	1,270	1,550	40
05/05/2023	Point 8	0,007	0,090	0,000	0,000	0,069	0,069	0,070	0,060	1,510	1,390	40
05/05/2023	Point 9	0,007	2,140	0,000	0,030	0,069	0,069	0,070	0,090	1,340	1,700	42
05/05/2023	Point 10	0,007	0,240	0,000	0,020	0,069	0,069	0,070	0,060	1,430	1,550	38
05/05/2023	Point 11	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,080	0,080	1,540	1,600	40
05/05/2023	Point 12	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,080	0,100	1,490	1,640	35
05/05/2023	Point 13	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,080	0,080	1,650	1,570	37
06/05/2023	Point 14	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,090	0,090	1,610	1,960	38
06/05/2023	Point 15	0,007	0,740	0,000	0,000	0,069	0,069	0,080	0,110	1,650	2,030	35
06/05/2023	Point 16	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,150	0,200	1,750	1,620	38
06/05/2023	Point 17	0,007	0,007	0,000	0,000	0,069	0,069	0,100	0,090	1,460	1,550	36
06/05/2023	Point 18	0,007	0,750	0,000	0,100	0,069	0,069	0,070	0,070	1,020	1,480	65
06/05/2023	Point 19	0,007	0,007	0,000	0,160	0,069	0,069	0,060	0,060	1,040	1,080	75
06/05/2023	Point 20	0,007	0,080	0,000	0,000	0,069	0,069	0,050	0,040	1,090	1,120	35

16

Distributions verticales des paramètres physico-chimiques et phytoplanktoniques générées via interpolations spatiales des 20 profils de sonde le long de la radiale de Calvi (gauche, point 1) à Nice (droite, point 20).

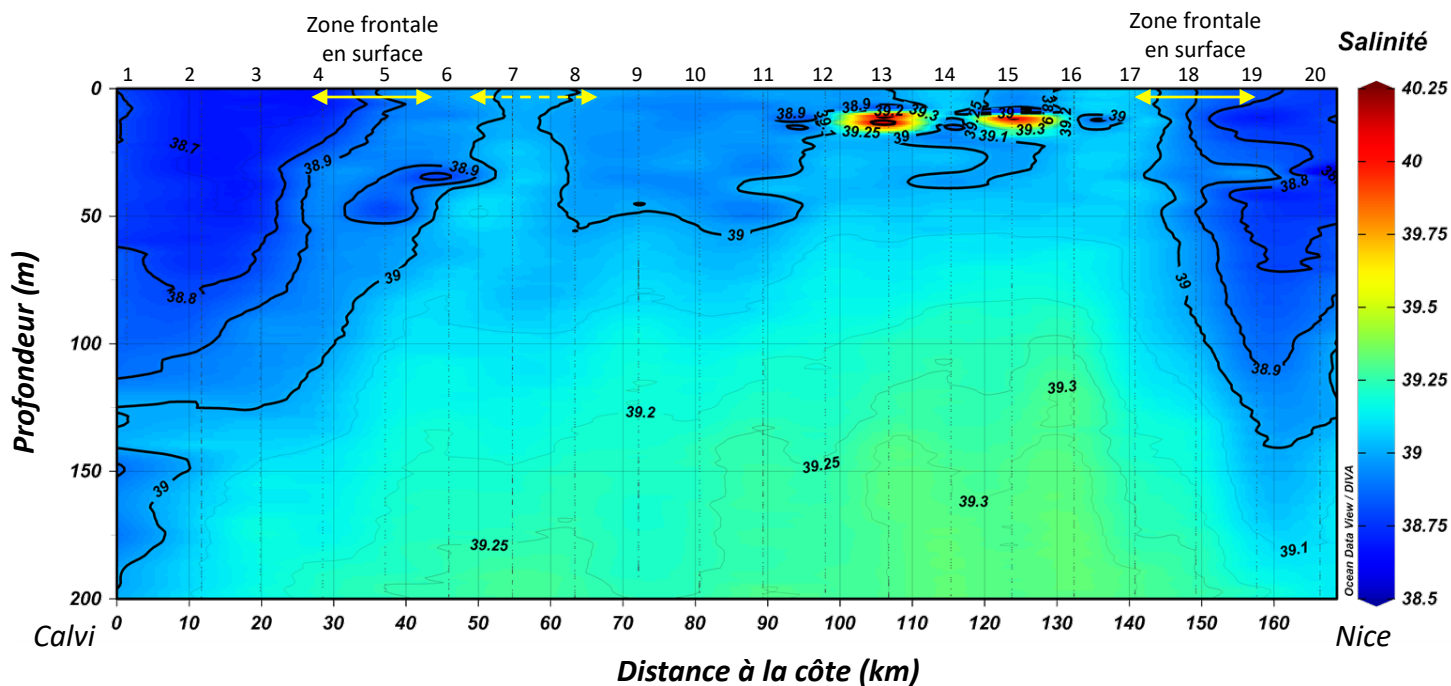


# IV - RÉSULTATS



17

Distributions verticales des concentrations en sels nutritifs et des concentrations en chlorophylle *a* générées via interpolations spatiales de 20 sites de 2 prélèvements (un prélèvement en surface et un à la profondeur de biomasse phytoplanctonique maximale) et des 20 profils de sonde le long de la radiale de Calvi (gauche, point 1) à Nice (droite, point 20).



**18** Variabilité spatiale de la salinité avec les isohalines générée via interpolation spatiale des 20 profils de sonde. Les flèches jaunes indiquent les zones de transition primaires (solides) et secondaires (pointillées) de salinité matérialisés par le resserrement des isohalines.

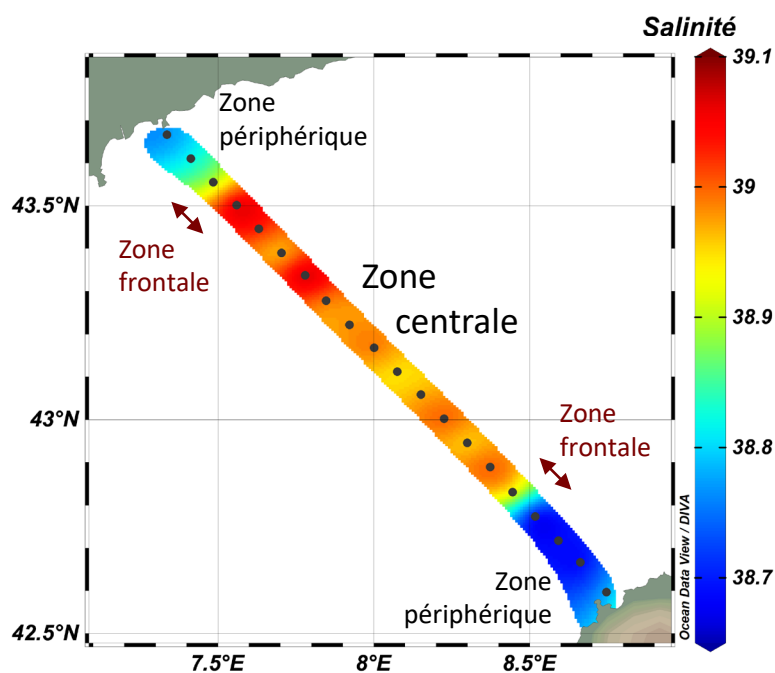
#### IV.1.A Identification des zones périphériques, frontales et centrales

De façon générale, les eaux situées aux extrémités de la radiale sont caractérisées par une salinité et une densité plus faibles que dans la partie centrale (Figure 16 & 18). Ce pattern est le témoin d'une structure générale des masses d'eau disposées en forme de dôme en mer Ligure (Figure 6), ce qui est en accord avec les résultats rapportés dans d'autres travaux par Prieur et al. (2020).

Par ailleurs, des gradients halins verticaux remontant jusqu'à la surface sont visibles entre le point 4 et 5 (soit entre 30 et 40 km de Calvi) et entre le point 17 et 19 (soit entre 15 et 30 km de Nice) (Figure 19). Ces zones de transition de la salinité différencient les eaux côtières, correspondant à la zone périphérique, peu denses, plus saturées en oxygène dissous et en moyenne plus chaudes (Tableau 2), des eaux du large, plus denses (salinité > 39) et correspondant à la zone centrale. Ces gradients halins de surface matérialisent en somme des zones frontales. Bien que les limites et donc l'étendue des 2 zones frontales ne soient pas

marquées de façon évidente pour cause de gradients relativement faibles, les fronts au large des côtes corses (entre 30 et 40 km de côtes) semblent être plus éloignées des côtes que ceux au large du continent français, le front liguro-provençal (entre 15 et 30 km des côtes). Ce constat est en accord avec de précédentes campagnes (Warren et al., 2004), qui, à titre d'exemple, situent une zone frontale (sur base du gradient halin de surface) entre 22 km et 32 km des côtes de Cannes en période printanière (Molinero et al., 2008). En revanche, la distance à la côte du gradient halin de surface au large de Calvi contraste avec les résultats de radiales effectuées également en mai dans les années 80 au large de Calvi en direction de Nice, situant le gradient halin de surface, associé au gradient de densité, entre 16 km et 32 km de la côte (Goffart et al., 1995). Il peut donc être suspecté une forte variabilité interannuelle ou bien un changement sur le long terme des processus hydrographiques sous-jacents à ces zones de transition. Quoiqu'il en soit, les zones frontales constituent des zones d'importance écologique pour les vertébrés marins (Scales et al., 2018), pouvant héberger une forte productivité en fonction de la saison (Prieur et

al., 2020) et une telle différence de distance à la côte peut avoir des conséquences sur la répartition de la productivité primaire et de la mégafaune.



**19** Variation spatiale horizontale de la salinité en surface (1m). Les flèches indiquent les zones frontales présentant un fort gradient halin.

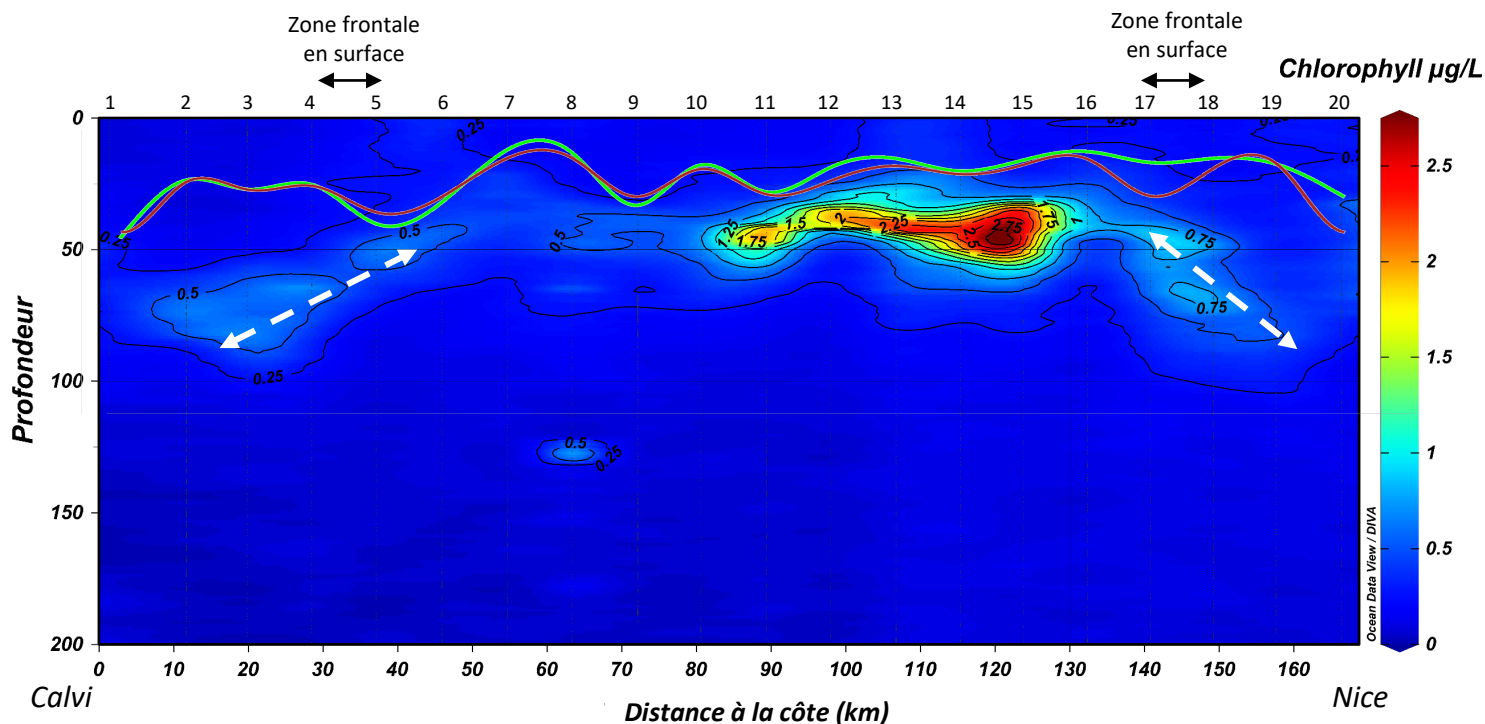
Finalement, la dissociation de masses d'eaux en zones hydrographiques n'est autre que le résultat de processus courantologiques générant notamment une circulation anti-horaire en mer Ligurie ainsi que des mouvements obliques voire verticaux des masses d'eau permettant ainsi la remontée d'eaux profondes ou bien la chute d'eau de surface. Ces processus sont cependant sujets à une saisonnalité. En effet, en période hivernale, la zone centrale est le siège de remontée de masses d'eaux profondes froides, salées et riches en nutriments dans la couche euphotique (zone de surface marine où l'intensité lumineuse résiduelle rend l'activité de photosynthèse possible) via le brassage hivernale et la convection profonde engendrant finalement l'approfondissement de la couche de mélange (Marty & Chiavérini, 2010). Les concentrations en sels nutritifs particulièrement élevées en hiver discriminent ainsi aisément la zone centrale des autres zones. Cet

enrichissement localisé des eaux en surface permet alors, lorsque les conditions lumineuses le permettent, d'alimenter l'activité photosynthétique, principalement printanière, du phytoplancton. Cette consommation de nutriments, en particulier en nitrate et phosphate, engendrent avec le temps une diminution de leurs concentrations, qui deviennent finalement minimales en été, à l'exception de celles des silicates (Marty, 2002; Pasqueron De Fommervault, 2015), tels qu'observés dans les résultats. Cette différence est expliquée par le lent recyclage des silicates, dépendant essentiellement de la dissolution d'une partie de la paroi cellulaire des diatomées (Katamani, 1982; Suroy, 2013), les diatomées étant un groupe de microalgues appartenant au phytoplancton et ayant la capacité de former d'importante efflorescence.

En d'autres termes, au moment de l'expédition, l'enrichissement hivernal avait alors été déjà plus (nitrate) ou moins (phosphate) fortement consommé en zone centrale (Figure 17) et l'importante concentration en silicate encore présente en zone centrale (du point 5 à 17) témoigne d'un bloom phytoplanctonique printanier formé notamment de diatomées.

#### IV.1.B Des zones de productivité localisées

La distribution des concentrations en chlorophylle *a*, paramètre valant de proxy des biomasses zooplanctoniques, montre une couche de concentrations plus importantes allant de 35 m à 75 m situées sous la pycnocline et la thermocline (Figure 20). Plus remarquable, cette répartition le long de la radiale longe parfaitement l'isopycne (la ligne de densité) 29,25, cette dernière correspondant donc à une profondeur où un équilibre vertueux pour l'activité photosynthétique est atteint entre quantité suffisante de nutriments amenés par les eaux profondes plus denses et quantité suffisante de lumière pénétrant depuis la surface. De plus, une zone de concentration



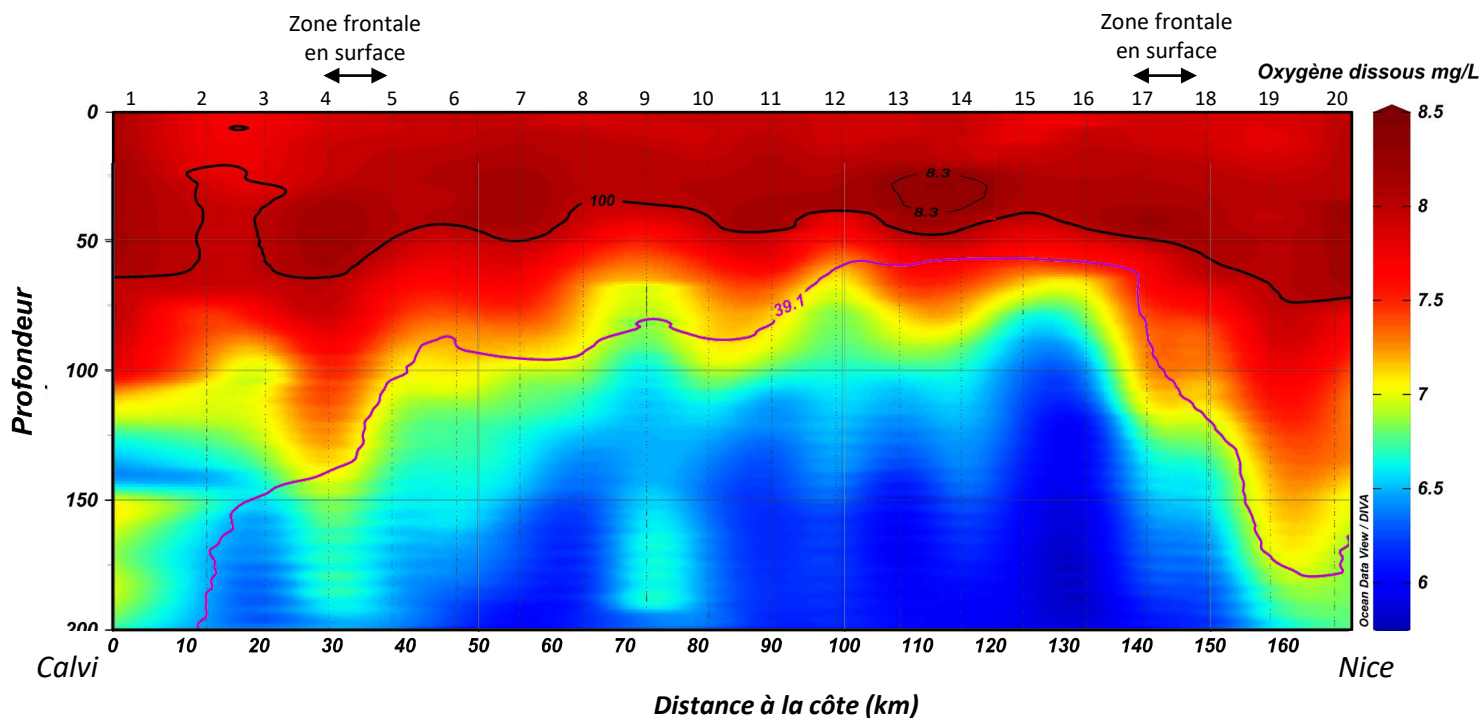
20

Variabilité spatiale de la concentration en chlorophyll *a*. La ligne verte correspond à l'isopycne et la ligne rouge à la thermocline. Les flèches blanches en pointillées soulignent les étendues obliques de productivités au niveau des zones frontales.

maximale se démarque à environ 50 m de profondeur entre le point 11 et 16. Cette zone correspond également à une augmentation localisée des concentrations en nitrates, en phosphates et en silicates (Figure 17 & Tableau 2). Ces coïncidences dans les répartitions spatiales soulignent le lien de causalité entre disponibilité en nutriments et productivité primaire. Les faibles concentrations au niveau des points 2 et 3 au large de Calvi coïncident d'ailleurs avec des concentrations en chl *a* plus élevées. Par ailleurs, les variations de températures de l'eau montrent des couches superficielles plus chaudes que d'autres, notamment entre le point 3 et 4 ainsi qu'entre le point 11 et 18. Or ces portions le long de la radiale correspondent également à des points présentant, plus en profondeurs, une concentration en chl *a* plus importante. Cette hétérogénéité spatiale de la température des eaux de surface peut correspondre à une différence d'ensoleillement engendrant non seulement une hétérogénéité dans le réchauffement des eaux mais aussi dans la quantité de lumière pénétrant la colonne d'eau et permettant d'activer la photosynthèse du phytoplancton.

### IV.1.C Pourquoi les zones frontales ne sont-elles ici pas les plus productives ?

Les zones frontales, zones via de complexes mouvements de masses d'eau, hébergent généralement des anomalies positives de biomasse et production biologique. Bien que la productivité primaire soit maximale dans la partie nord de la zone centrale, des zones de productivité moindres sont bien présentes au niveau de zones frontales (flèches blanches en pointillées). Celles-ci semblent s'enfoncer en profondeur en direction des côtes. Il s'agit bien de témoins d'advections (remontées & descentes) obliques des masses d'eau régnant au sein des zones frontales. Ces mouvements jouent en effet un rôle essentiel dans la distribution du matériel particulaire, favorisant ainsi les interactions trophiques et l'enrichissement de la colonne d'eau. Ainsi, en fonction de la saison dans l'année, des conditions d'ensoleillement mais aussi de l'intensité du brassage des masses d'eau, les zones frontales peuvent être plus ou moins productives comparées à la zone centrale tout en jouant un rôle essentiel de distribution vers la côte de la productivité primaire et de fertilisation de la couche photique (Figure 3).



21

Variabilité spatiale des concentrations en oxygène dissous. La ligne noire épaisse correspond à l'isoplèthe de saturation de 100% de l'oxygène dissous, la ligne noire fine correspond à l'isoplèthe 8,3 mg.L<sup>-1</sup> d'oxygène dissous et la ligne violette correspond à l'isohaline 39,1.

### 1.D. Une production primaire impactant d'autres paramètres physico-chimiques

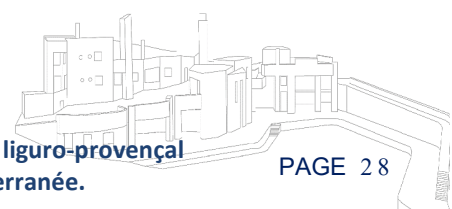
Cette activité primaire localisée affecte d'autres paramètres physico-chimiques tels que l'oxygène dissous et la turbidité (Figure 16 & 21).

Les eaux de surface sont caractérisées par une couche de concentration élevée en oxygène dissous (> 7,6 mg.L<sup>-1</sup>) et sur-saturée (> 100%) dont l'épaisseur diminue avec la distance à la côte (Figure 21). Cette couche suit un pattern similaire à celui de la salinité, celle-ci étant formée au-dessus de l'isohaline 39,10. Cette répartition est directement liée aux propriétés chimiques de la solubilité de l'oxygène dissous étant définie par la salinité et la température. Cependant une zone de concentration maximale (> 8,3 mg.L<sup>-1</sup>) est présente juste au-dessus du maximum en chlorophylle *a*). Elle résulte directement de l'activité photosynthétique (Estrada, 1999; Segura i Noguera et al., 2016) et témoigne d'une importante oxygénation de la colonne d'eau superficielle, nécessaire au maintien de la vie dans l'eau. En fonction de leur profondeur, les zones de production d'oxygène peuvent

également être des zones propices à la respiration (production de CO<sub>2</sub> par la consommation d'oxygène), de par la disponibilité en oxygène produit. Ainsi, l'isoplèthe de saturation à 100 % indique en l'occurrence la limite où la production d'oxygène par la photosynthèse équivaut à la consommation d'oxygène par la respiration réalisée principalement par les communautés microbiennes (Robinson, 2019). A noter que les mesures d'oxygène dissous enregistrées au point DYFAMED, situé à 52 km au sud du Cap Ferrat (façade continentale) et correspondant environ au point 15 de la radiale montrent que l'isoplèthe de saturation à 100 % avoisine les 40 m de profondeur d'avril à octobre (Coppola et al., 2018), ce qui correspond parfaitement aux résultats obtenus lors de cette expédition.

La Méditerranée, connue pour ses eaux transparentes, se démarque en effet du reste des mers et océans de par sa turbidité particulièrement faible. Bien que certaines régions du bassin nord-ouest méditerranéen telles que le Golfe du Lion ou le sud-est du Golfe de Gênes puissent présenter des turbidités plus élevées avoisinant les 8 FNU

(Gohin et al., 2010), la région traversée lors de cette expédition présente une turbidité particulièrement faible, dépourvue de tout apport de matières en suspension d'origine terrigène. Cette turbidité est si faible qu'elle permet même de témoigner de zones de productivité primaire importante. En effet, une zone de turbidité légèrement plus élevée s'étalant environ du point 11 au point 16 sur des profondeurs allant de la surface à 60 m de fond coïncide avec la zone de forte productivité primaire. Une forte productivité peut en effet générer une quantité de matière organique (phytoplancton, zooplancton, excréments) telle qu'elle peut même impactée la transparence de l'eau.



## IV.2 Caractérisations des prélèvements zooplanctoniques

Au total, quatre prélèvements de zooplancton ont été réalisés à raison (Figure 22) de :

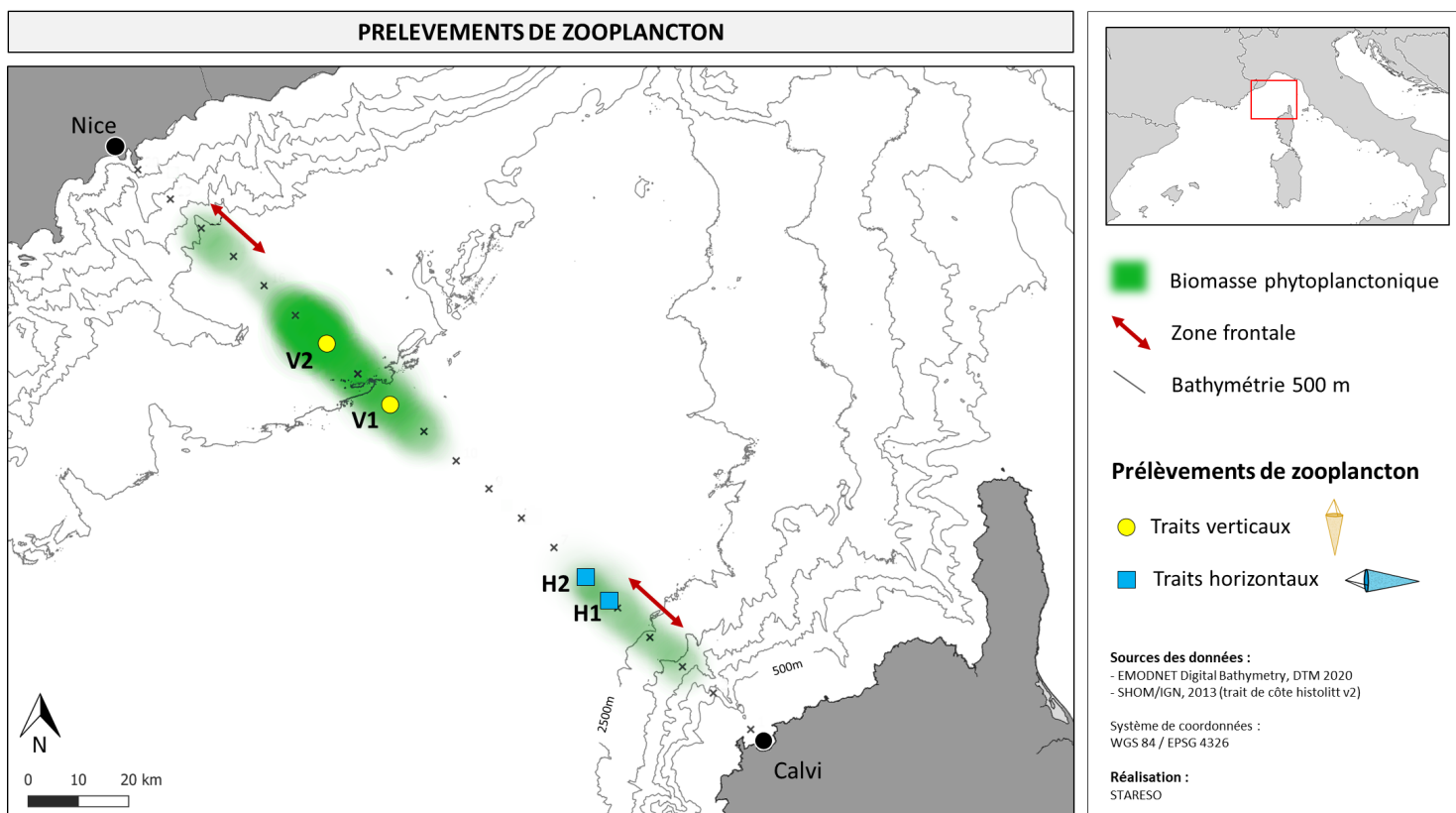
- deux traits verticaux de 100 m à 0 m de profondeur : V1 le 9 mai 2023 à 7h15 et V2 le 6 mai à 7h15;
- deux traits horizontaux réalisés en tractant le filet derrière le bateau pendant 20 min à 2 noeuds et à une profondeur comprise entre 1 et 4m : H1 le 4 mai à 20h40 & H2 le 5 mai à 6h30.

Ces traits ont été réalisés lorsque les conditions météorologiques le permettaient et selon la position du navire. L'analyse des paramètres physico-chimiques et phytoplanctoniques ont permis de délimiter les différentes zones hydrographiques et d'en conclure que l'ensemble des prélèvements ont été réalisés dans la zone centrale, plus (H1 & H2) ou moins (V1 & V2) proche de la zone frontale. A noter de plus que V1 et surtout V2 ont été prélevés au niveau de

zones de forte productivité primaire mais dont les conditions physico-chimiques sont finalement relativement similaires à l'exception d'une concentration plus importante en nitrate et de biomasse phytoplanctonique maximale à V2 (Tableau 2 & Figure 20).

### IV.2.A Abondances absolues

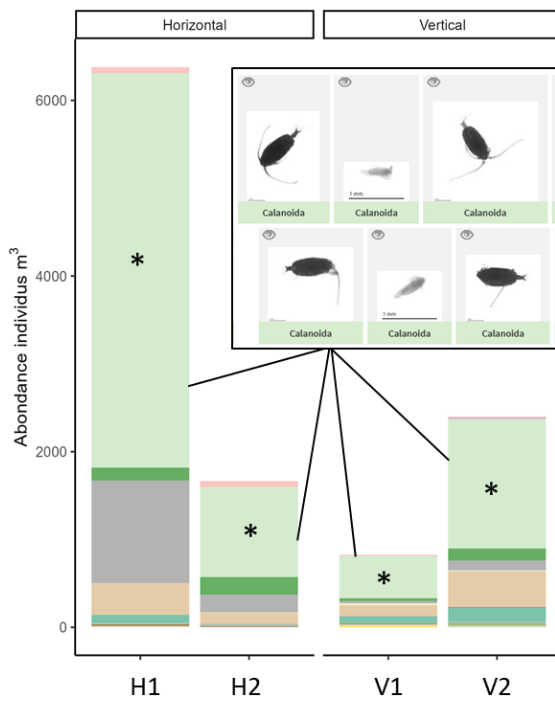
Un premier paramètre issu des analyses de zooplancton est celui des abondances absolues par catégorie (43) et par site (4) (Figure 23). D'importantes hétérogénéités en terme d'abondance absolue sont notables au sein des mêmes types de prélèvement, à savoir verticaux et horizontaux. Dans les deux cas, les sites les plus proches de la côte présentent une concentration totale plus importante : la concentration en zooplancton au niveau du site H1 est en effet plus de trois fois plus importante qu'au niveau de H2, et, de façon similaire, V2 présente une concentration environ 3 fois plus importante qu'au site V1. De manière générale l'échantillon H1, prélevé au niveau de la zone frontale, est le plus abondant des 4 avec plus de 6 000 individus au m<sup>3</sup>.



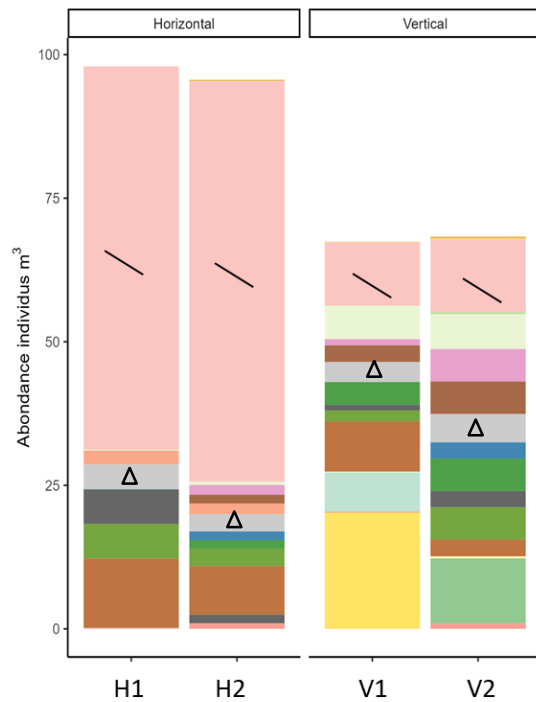
22

Sites de prélèvements de zooplancton réalisés à l'aide d'un filet WP2 via des traits verticaux (V1 & V2) et horizontaux (H1 & H2).

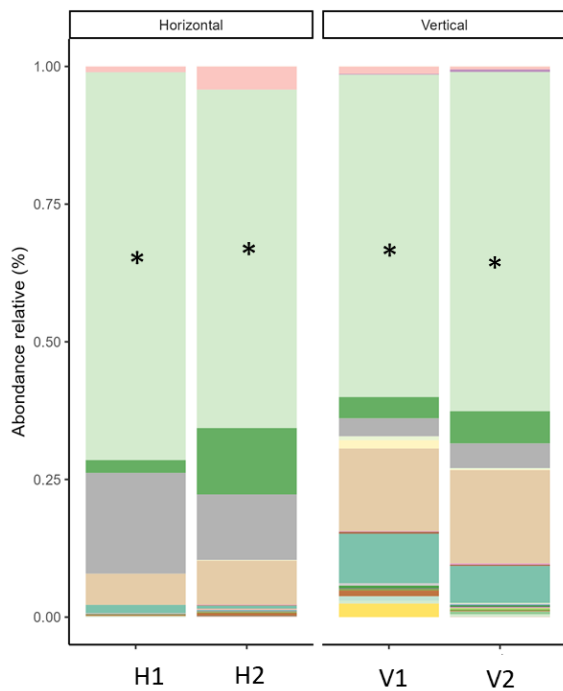
**A** Abondances des groupes de zooplancton



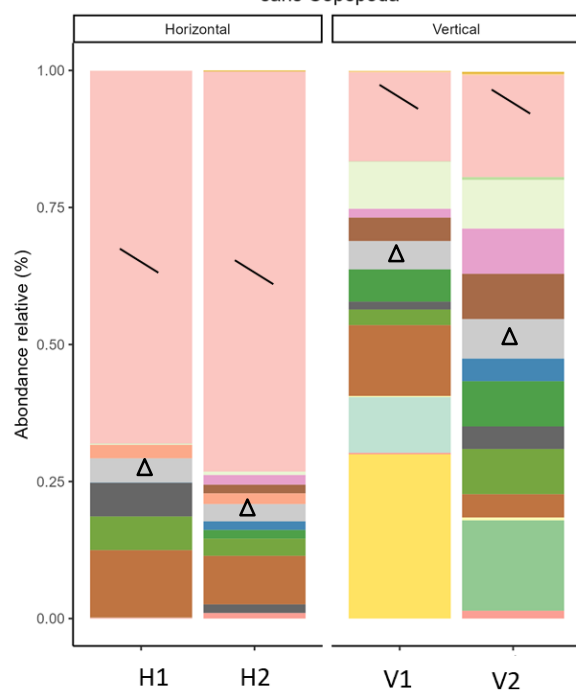
**B** Abondances des groupes de zooplancton sans Copepoda



**C** Abondances relatives des groupes de zooplancton



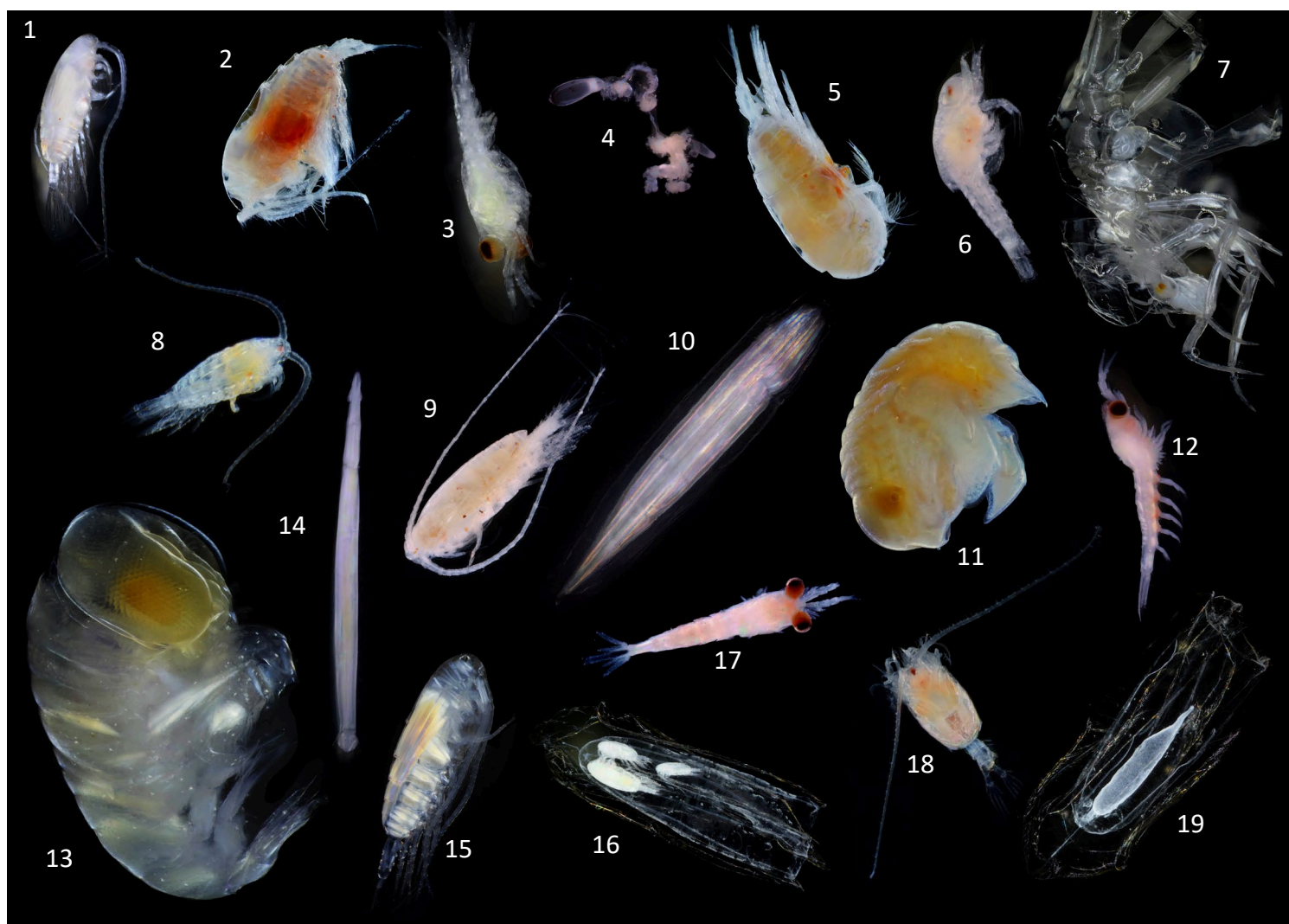
**D** Abondances relatives des groupes de zooplancton sans Copepoda



- |                |                         |                          |                |                   |
|----------------|-------------------------|--------------------------|----------------|-------------------|
| Actinopterygii | Chaetognatha            | Cyclopoida               | Fritillariidae | other>egg         |
| Amphipoda      | Clausocalanidae         | Eucalanidae              | Harosa         | Penilia           |
| Annelida       | Cnidaria                | Euchaetidae              | Harpacticoida  | Podon             |
| Appendicularia | Copepoda>multiple       | Euchirella               | Metridinidae   | Poecilostomatoida |
| Calanidae      | Copepoda>non_identifiés | Eumalacostraca           | Mollusca       | Pontellidae       |
| Calanoida      | Crustacea>metanauplii   | Euphausiacea>calyptopsis | Oikopleuridae  | Siphonophorae     |
| Centropagidae  | Crustacea>nauplii       | Evadne                   | Ostracoda      | Velella           |
- Catégories de copépodes      Catégories d'appendiculaires

Bien que cette différence en abondance absolue puisse être due à une variabilité spatiale, avec des concentrations plus importantes proches ou au sein des zones frontales, la distance de séparation entre les 2 prélèvements horizontaux reste tout de même relativement faible. En termes de variabilité temporelle, alors que V1 et V2 ont été réalisés à la même heure mais à 3 jours d'intervalle, H1 a été réalisé au coucher de soleil et H2 à l'aube, le lendemain. Or, la migration nyctémérale (migration verticale diurne) engendre des assemblages de communautés très différents en surface au cours

d'une même journée. Bien que l'on ne puisse déduire sur base de ces résultats, si les différences sont finalement imputables à une variabilité spatiale, journalière (au cours d'une même journée) ou bien temporelle (au cours de la même semaine), l'ensemble de ces cas de figure souligne *in fine* l'importante diversité et dynamique qui animent le zooplancton, rendant l'analyse de ce compartiment particulièrement complexe. Afin d'illustrer en partie cette diversité, des images d'une sélection d'organismes issus des prélèvements horizontaux ont été réalisées (Figure 24).



**24** Sélection d'organismes isolés des prélèvements horizontaux et macrophotographiés via un protocole de focus stacking spécifique au plancton. A noter que les individus ne respectent pas la même échelle de taille.

1: Copépode calanoïde; 2: Copépode calanoïde; 3: *Euphausiacea*; 4: *Siphonophorae* (pneumatophore de physonecte) ; 5: Copépode calanoïde (*Euchirella rostrata*); 6: *Calyptopsis Euphausiacea*; 7: *Phronima phronima*; 8: Copépode calanoïde; 9: Copépode calanoïde; 10: Appendiculaire (queue d'*Oikopleuridae*); 11: *Amphipoda*; 12: *Euphausiacea*; 13: *Amphipoda*; 14: *Chaetognatha*; 15: Copépode calanoïde; 16: *Siphonophorae* (gonophore de *Diphyidae*) ; 17: *Euphausiacea*; 18: Copépode calanoïde; 19: *Siphonophorae* (gonophore de *Diphyidae*)

En termes d'assemblage de communauté, certains patterns sont communs à l'ensemble des échantillons prélevés. En effet, les copépodes, mais plus exactement les *Calanoida*, représentent systématiquement la catégorie dominante en abondance de zooplancton (Figure 23A). Cette catégorie regroupe tout les copépodes calanoides qui n'appartiennent pas aux familles/catégories plus précises de *Calanoida* (soit au niveau taxonomique inférieur) suivantes : *Centropagidae*, *Clausocalanidae*, *Eucalanidae*, *Euchaetidae*, *Euchirella*, *Metrinidae* et *Pontellidae*. Ce pattern de différence en termes d'abondance absolue entre les sites évoqués précédemment, semble présent même sans la catégorie *Calanoida*. En revanche, en écartant l'ensemble des organismes appartenant aux *Copepoda*, c'est à dire aux copépodes (Figure 23B), on remarque alors des abondances totales très similaires entre les sites pour chaque type de prélèvement, avec environ 100 individus au m<sup>3</sup> pour les traits horizontaux contre 65 individus au m<sup>3</sup> pour les traits verticaux.

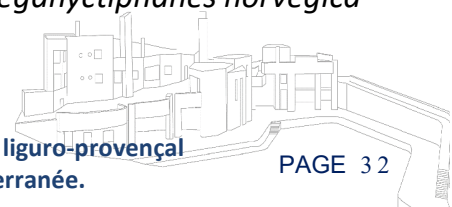
Ainsi des différences spatiales en termes d'abondances totales zooplanctoniques sont marquées par des abondances plus importantes en copépodes près des zones frontales. Ces différences peuvent être imputables à une variation spatiale, certes, ou bien à des variations temporelles au cours d'une journée (due à la migration nyctémérale) ou bien au cours du temps (sein d'une même semaine).

#### IV.2.B Abondances relatives

Les abondances relatives permettent de caractériser plus finement les contributions des abondances de chaque catégorie à la structure des communautés. En considérant toutes les catégories (Figure 23C), les *Calanoida* correspondent bien à la catégorie dominante, représentant entre 2/3 et 3/4 des individus. La

2<sup>ème</sup> catégorie contribuant le plus à chacune des communautés correspond également à des copépodes mais diffère selon les types de profils: *Copepoda* pour les profils verticaux et *Clausocalanidae* pour les profils horizontaux. En omettant toutes les catégories de copépodes (Figure 23D), une forte différence d'abondances relatives des catégories les moins abondantes est alors constatée entre les prélèvements horizontaux et verticaux, principalement à cause de la concentration en appendiculaires (*Appendicularia*, *Fritillariidae* & *Oikopleuridae*). En effet, ces organismes filtreurs représentent plus de la moitié de la communauté des prélèvements horizontaux et semblent donc être particulièrement abondants en surface. A l'inverse, les prélèvements verticaux présentent un meilleur équilibre des proportions des différentes catégories taxonomiques, avec alors l'observation de divers organismes tels que des formes de méduses juvéniles de vélèlles, quelques mollusques planctoniques, *Harosa* (groupe de microzooplancton), oeufs planctoniques non déterminés, *nauplii* et *metanauplii* de crustacés, *Cnidaria*, etc. Ces résultats soulignent ainsi notamment comment des prélèvements verticaux permettent de mieux représenter l'ensemble de la communauté zooplanctonique présente dans la colonne d'eau en s'affranchissant en partie de l'hétérogénéité de la distribution verticale des différents organismes.

Par ailleurs, il est intéressant de souligner que les calytopsis, phases larvaires des *Euphausiacea*, sont présentes sur l'ensemble des sites en proportions relativement stables de quelques individus (Figure 25). Bien que l'identification spécifique ne puisse être définie à ce stade de vie et à la résolution du Zooscan, la présence de ces phases larvaires a une importance trophique à l'échelle de l'ensemble de l'écosystème hauturier. En effet, une grande proportion des euphausiacées en mer Ligure correspond au krill *Meganyctiphanes norvegica*



qui présente une importance maintes fois confirmées pour l'alimentation des céphalopodes et cétacés. Ce krill est retrouvé par exemple dans les contenus digestifs des encornets (Sanchez, 1982) des thons rouges *Thunnus thynnus* (Quynh, 1978) et du roqual commun *Balaneoptera physalus* (Viale, 1985 ; Orsi Relini, 1992 ; Orsi Relini & Relini, 1993). *M. norvegica* serait, par ailleurs, présent en forte abondance au niveau du front Liguro-provençal et que, de manière générale, les abondances d'euphausiacés pouvaient être positivement corrélées à la biomasse phytoplanctonique (Silva et al., 2014). Bien que les abondances totales (Figures 23C), montrent en effet une densité légèrement plus importante de cette catégorie en proximité des zones frontales et plus exactement sur la zone de plus forte productivité primaire ( $V2 > H1 > H2 > V1$ ), plus de prélèvements seraient nécessaires afin de conclure sur les facteurs affectant les densités du krill et, de façon générale, ceux modulant l'assemblage des communautés zooplanctoniques.

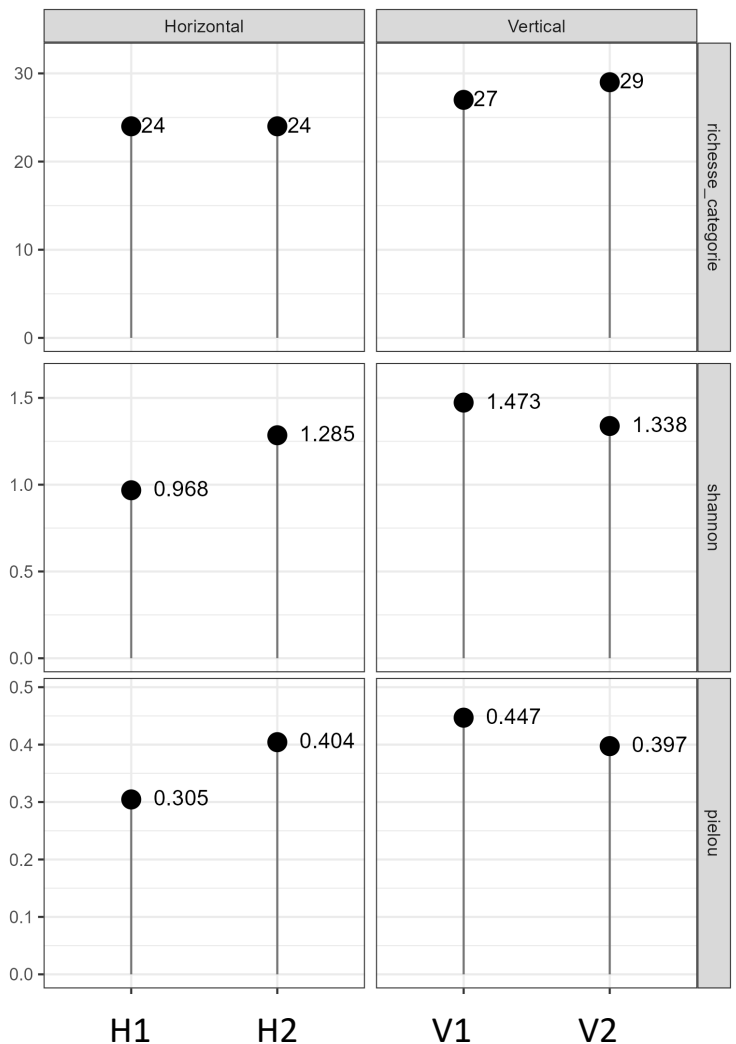


**25** Photographie d'un crustacé de l'ordre des euphausiacés (correspondant au « krill ») en phase larvaire appelé « calytopsis ».

### IV.2.C Indices de diversité

La considération de quelques indices de diversité calculés à partir des concentrations permet d'approfondir l'analyse de la diversité des sites étudiés (Figure 26). La richesse en catégories correspond au nombre total de catégories de classification présentes à chaque

site. Bien qu'il soit délicat de calculer des indices de diversités (Shannon, l'équitabilité de Pielou) avec de telles catégories puisqu'elles présentent des niveaux taxonomiques très différents, ces indices permettent néanmoins d'informer sur la distribution des individus (leur abondance) de chaque catégorie, composant une communauté. La diversité peut refléter des capacités essentielles d'un écosystème telles que celle d'assurer une fonctionnalité malgré une détérioration (Barnett et al., 2007).



**26** Quelques indices de diversités des sites échantillonnés calculés à partir des concentrations de chaque catégorie.

Les traits verticaux présentent le plus grand nombre de catégorie, reflétant donc, sur base des catégories considérées, un meilleur équilibre de leur communauté. De plus, alors que le nombre total de catégories est identique entre sites dans le cas des traits horizontaux (24) il diffère (uniquement) de deux catégories

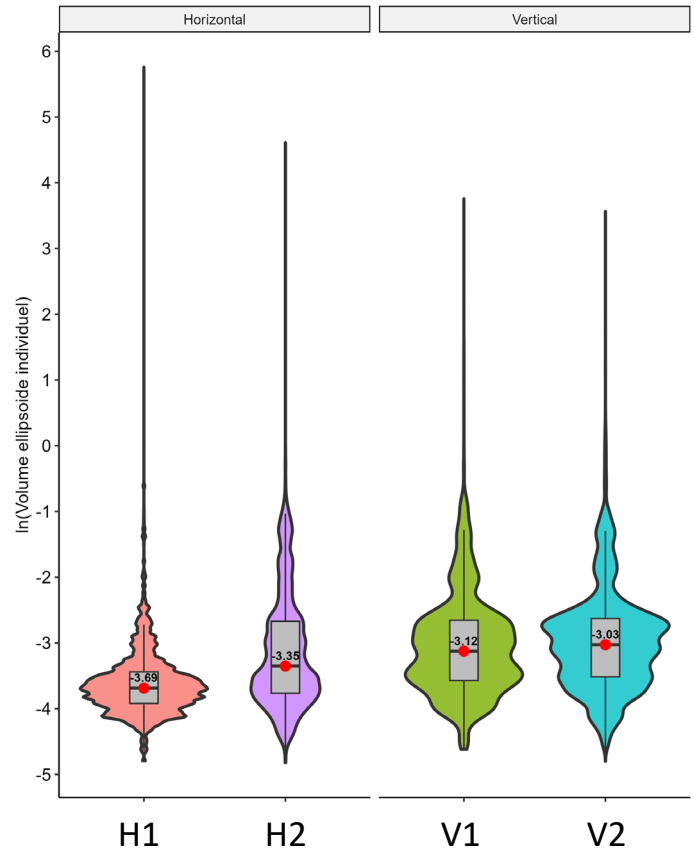
(24) il diffère (uniquement) de deux catégories dans le cas des traits verticaux (27 vs 29). Ainsi, les différences entre valeurs des autres indices de diversités sont principalement dues à un déséquilibre des abondances entre catégories, visibles sur les graphes d'abondances relatives (Figure 24 C & D). Les indices calculés, ont des patterns similaires entre sites. Contrairement au cas des traits verticaux, pour lesquels les indices sont relativement similaires, pour les traits horizontaux, tout les indices de diversité de H1 sont plus faibles qu'à H2. Cela traduit un moins bon équilibre des abondances au niveau du site H1 qu'au site H2, et ce, en plus d'une abondance absolue plus importante à H1.

#### IV.2.D Biovolumes individuels ellipsoïdes

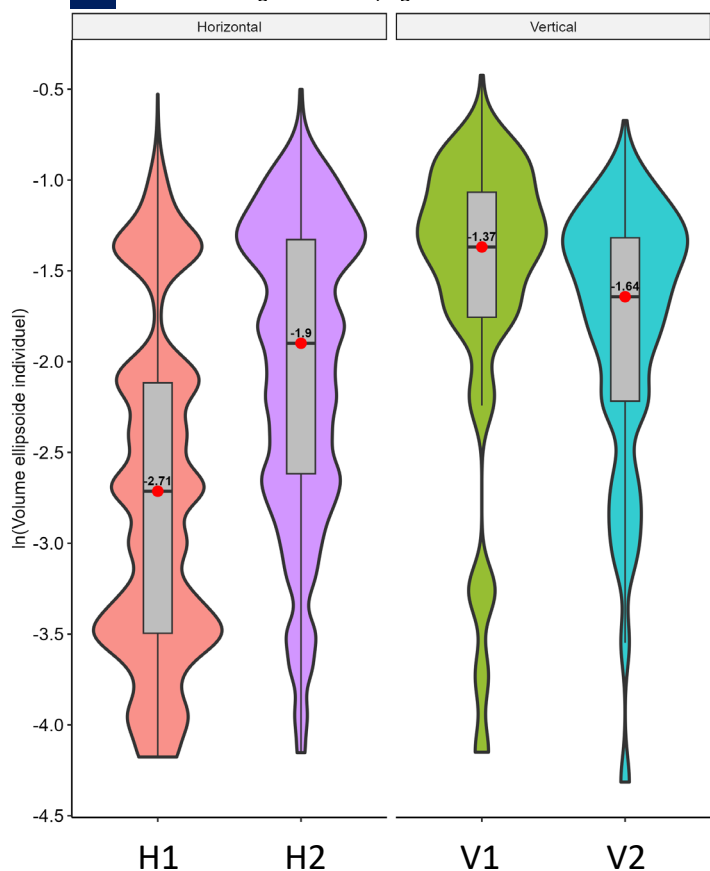
Les biovolumes individuels ellipsoïdes calculés à partir des caractéristiques des images scannées de chaque individu permettent de représenter les distributions des tailles sous forme de volume de chaque catégorie taxonomique ou de plusieurs catégories regroupées. L'analyse des volumes permet d'apporter une dimension supplémentaire à la compréhension des écosystèmes pélagiques du large. En effet, l'abondance seule de chaque catégorie taxonomique ne permet pas nécessairement de comprendre les structures détaillées des communautés ou d'inférer des fonctionnalités de celles-ci.

En considérant l'ensemble des organismes représentation des volumes ellipsoïdes de 1 826 416 individus (Figure 27A), la distribution des volumes ellipsoïdes individuels à H1 est plus importante pour des petits volumes et est moins étalée que pour les autres sites. Tandis que les différences entre V2 et V1 sont moins marquées et que H2 présente le meilleur équilibre de variété de volumes, H1 se distingue du reste avec une plus haute proportion d'individus de petits volumes. La distribution des biovolumes de tous les groupes confondus est principalement influencée par celle des copépodes *Calanoida*, catégorie majoritaire,

**A** Distribution des volumes ellipsoïdes individuels tous groupes confondus ajustés au ratio de dilution



**B** Distribution des volumes ellipsoïdes individuels de la catégorie Centropagidae



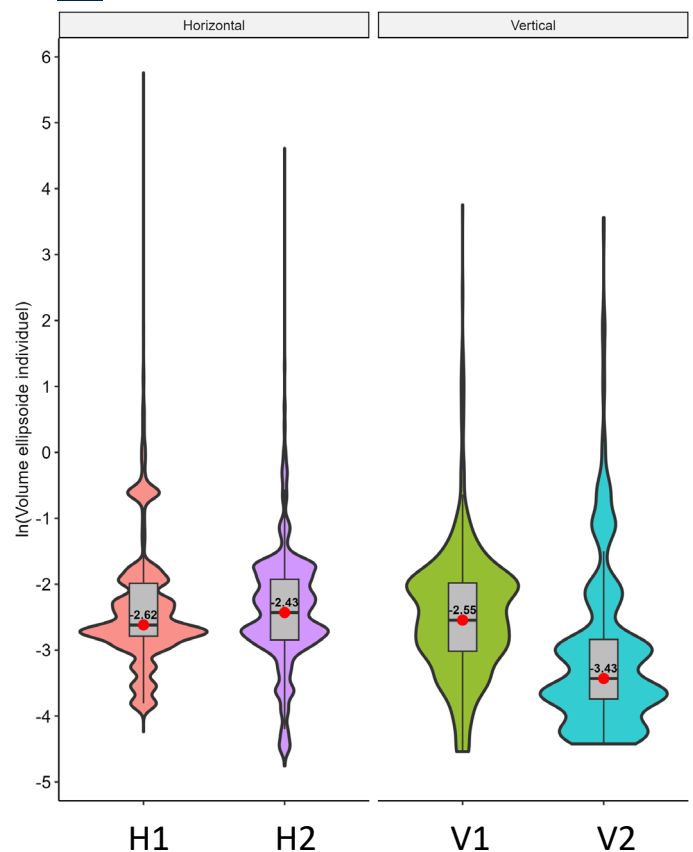
**27**

Distributions en diagramme en violon, en boîte et valeur de la médiane des biovolumes ellipsoïdes individuels regroupant (A) l'ensemble ou (B) une partie des catégories zooplanctoniques. Une transformation de type logarithme népérien est appliquée.

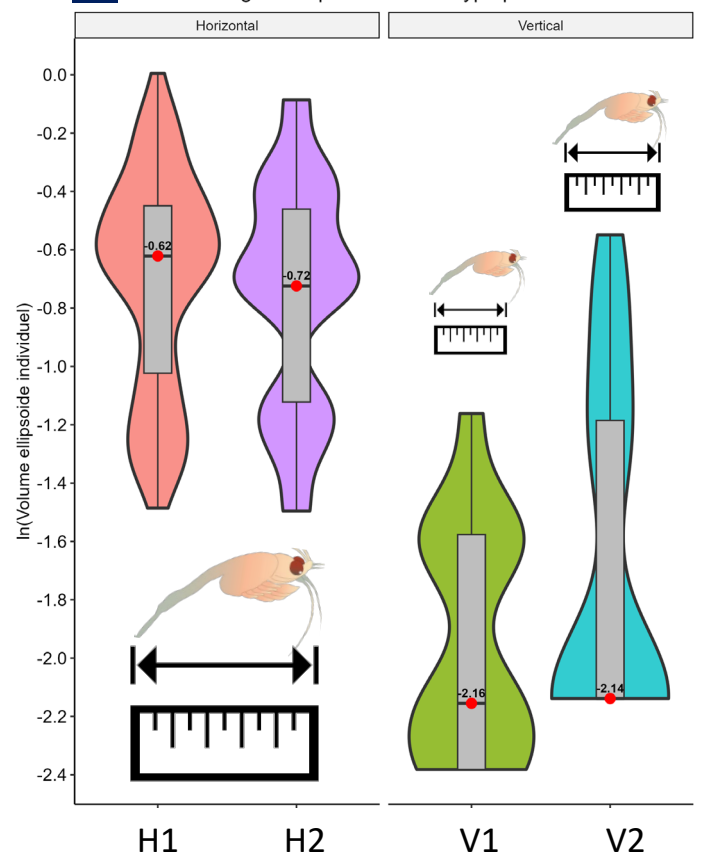
dont la représentation présenterait donc les mêmes patterns que la Figure 27A. Il est alors intéressant de souligner que pour une catégorie de copépodes présente en abondance (non-négligeable) relativement similaire au sein des 4 échantillons telle que *Centropagidae* (Figure 23A), les distributions des biovolumes présentent pourtant des différences notables. Ici encore, H1 présente une distribution avec de plus petits individus de *Centropagidae* que le reste des échantillons. Il en est de même, dans une moindre mesure, pour V2 comparé à V1, ce dernier étant situé plus au large dans une zone légèrement moins productive. Ces différences, certainement due à la composition d'espèces copépodites différentes (en l'occurrence de tailles plus petites pour H1, site le plus proche de la zone frontale) entraînent très probablement des fonctionnalités écologiques différentes.

Les distributions de volumes ellipsoïdes individuels de l'ensemble des organismes sauf tous ceux appartenant aux copépodes (Figure 28A) ne présentent pas le même pattern que les distributions globales. Alors que pour les traits horizontaux, les distributions sont relativement similaires malgré quelques différences aux extrémités des distribution, les différences de distribution sont par contre bien plus marquées pour les filets verticaux. En effet, le site V1 a une distribution présentant des individus assez abondants de grande taille mais un bon équilibre entre les différentes tailles entre -1.8 et -3.3  $\ln(\text{mm}^3)$ . A l'inverse, le V2 présente une distribution tirant vers des volumes ellipsoïdes bien plus faibles. Ces différences de distributions sont en grande partie influencées par la catégorie majoritaire après les copépodes c'est à dire celle des appendiculaires (qui n'ont pas pu être classés parmi les *Fritillariidae* et *Oikopleuridae*). Les individus les plus nombreux présentent en effet un volume en moyenne plus petit à V2, malgré des abondances similaires (Figure 23B). A défaut d'être des prédateurs, les appendiculaires sont des filtreurs pouvant être d'importants producteurs d'agrégats macroscopiques en fonction des espèces et dans des zones de fortes productivité (Sato et al.,2003).

**A** Distribution des volumes ellipsoïdes individuels ajustés au ratio de dilution tous organismes sauf copépodes



**B** Distribution des volumes ellipsoïdes individuels de la catégorie Euphausiacea>calyptopsis



**28** Distributions en diagramme en violon, en boîte et valeur de la médiane des biovolumes ellipsoïdes individuels regroupant une partie des catégories zooplanctoniques. Une transformation de type logarithme népérien est appliquée.

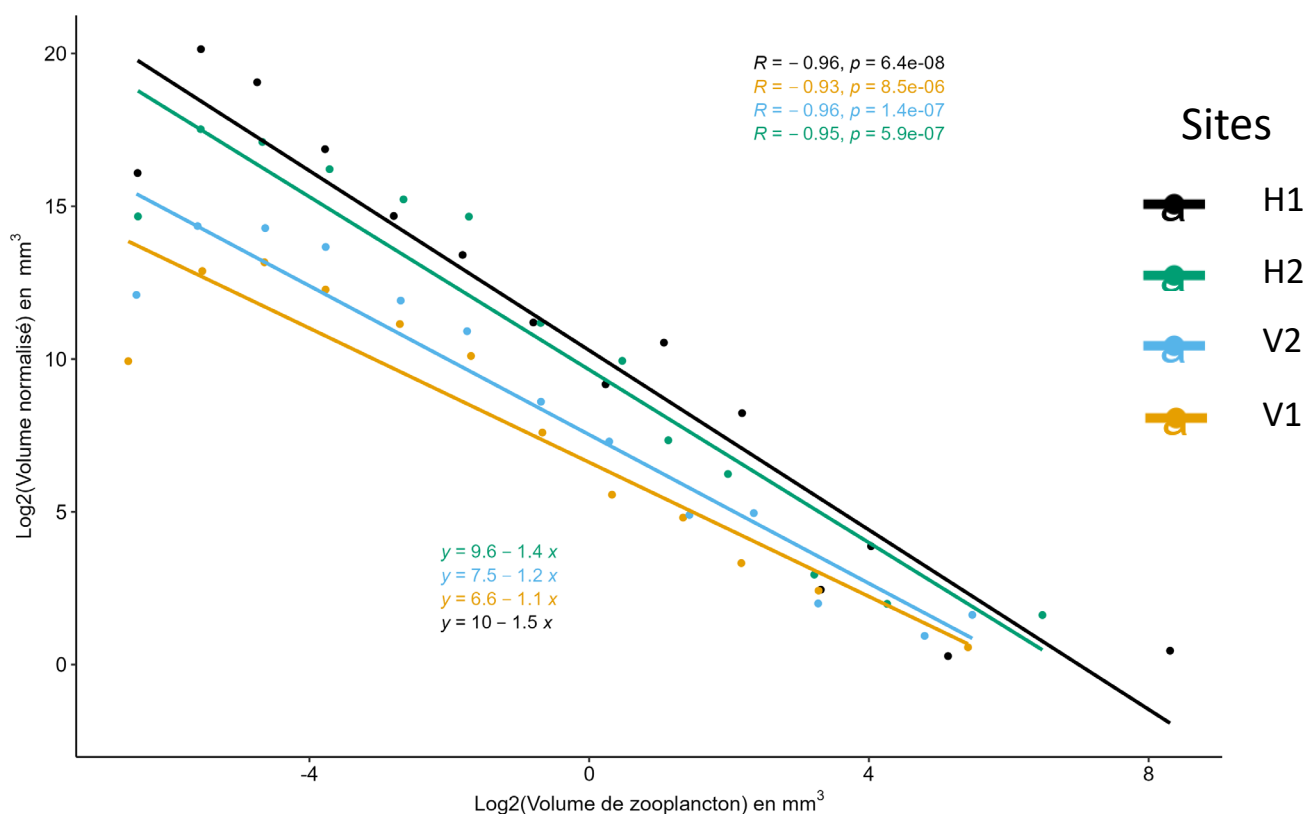
Enfin, les traits verticaux montrent également différents patterns concernant les distributions des volumes ellipsoïdes individuels des calytopsids (larves) d'*Euphausiacea* (Figure 28B). En effet, ces volumes traduisent des abondances principalement composées d'individus plus petits pour les traits verticaux, en particulier pour V1. Or, au vu de l'importance écologique de cette catégorie, une analyse plus poussée pourrait investiguer les raisons et les conséquences de telles différences.

#### IV.2.D Spectres de taille

L'obtention des biovolumes ellipsoïdes individuels permet d'obtenir les spectres de taille de biovolumes normalisés (NBSS). Ces spectres de taille quantifiés sous forme de pentes (Figure 29) permettent d'apporter des informations supplémentaires sur la structuration des communautés, en décrivant les équilibres des abondances d'organismes ayant des volumes distincts. Ces pentes reflètent les dynamiques liées aux flux d'énergie entre les organismes basée sur base de relations trophiques entre

proies (généralement des organismes plus petits) et prédateurs (généralement plus grands). Ainsi, de façon grossière, les pentes spectrales plus pentues traduisent une diminution de la pression de prédation au fur et à mesure que la taille augmente (Zhou, 2006). Un tel système serait moins efficace dans le transfert de la biomasse des petits organismes, base des réseaux trophiques vers les prédateurs planctoniques, et plutôt l'inverse quand la pente spectrale est plate (Zhou et al., 2009).

Au sein de chaque type de filet, aucune différence significative de pente n'est exposée par analyse d'interaction de variance (seuil  $p > 0.05$ ). Il existe néanmoins une légère différence entre les types de prélèvements avec des régressions plus pentues pour les prélèvements horizontaux que verticaux. Toutefois, celle-ci n'est pas particulièrement interprétable au vu de la différenciation d'échantillonnage, des abondances et caractéristiques des catégories d'organismes prélevés. Ainsi à l'échelle des communautés globales, il ne semble pas y avoir de fonctionnement drastiquement différent au sein de la chaîne trophique entre les sites.



29

**Spectres de taille de biovolumes normalisés (NBSS) obtenus sur la base des volumes ellipsoïdes individuels. L'ensemble des modèles linéaires appliqués aux données de classes de tailles sont significatifs.**

### IV.3 La mégafaune rencontrée

Au total, 56 observations ont été réalisées entre le 4 et le 13 mai 2023, ce qui représente un total de 140 à 218 individus, sans compter une chasse de thons dont la détermination du nombre d'individus n'était pas possible (Tableau 3). Afin d'éviter les biais et d'exercer un effort d'observation homogène sur l'ensemble de la radiale, les observations faites en dehors de la radiale (le 13 et 11 mai) ou lors d'une journée exclusivement dédiée à l'observation (le 7 mai 2023) au large de Monaco et de Nice n'ont, par conséquent, pas été prises en compte dans cette étude. Ainsi, 45 observations ont finalement été considérées dans cette étude. Ces observations ont été répertoriées par l'équipage de We Are Méditerranée via l'application OBSenMER permettant d'associer à chaque observation, une espèce avec un certain degré de certitude, un nombre ou bien une fourchette de dénombrement d'individus, le tout associé à un point GPS (Figure 32).

#### IV.3.A Observations de cétacés

Parmi l'ensemble de la macrofaune observée, la plus abondamment rencontrée (hors chasse de thon) est, sans surprise, le dauphin bleu et blanc, *Stenella coeruleoalba* (Figure 30), espèce de cétacé la plus abondante du Sanctuaire Pélagos (Laran et al., 2012). Une étude géospatiale portant sur la distribution des six espèces les plus fréquentes dans le Sanctuaire Pelagos décrit l'habitat le plus propice à l'observation de ce dauphin comme un milieu



30

Banc de dauphins bleu et blanc (crédit photo: Greg Lecoeur).

### 3 Récapitulatif des observations de macrofaune

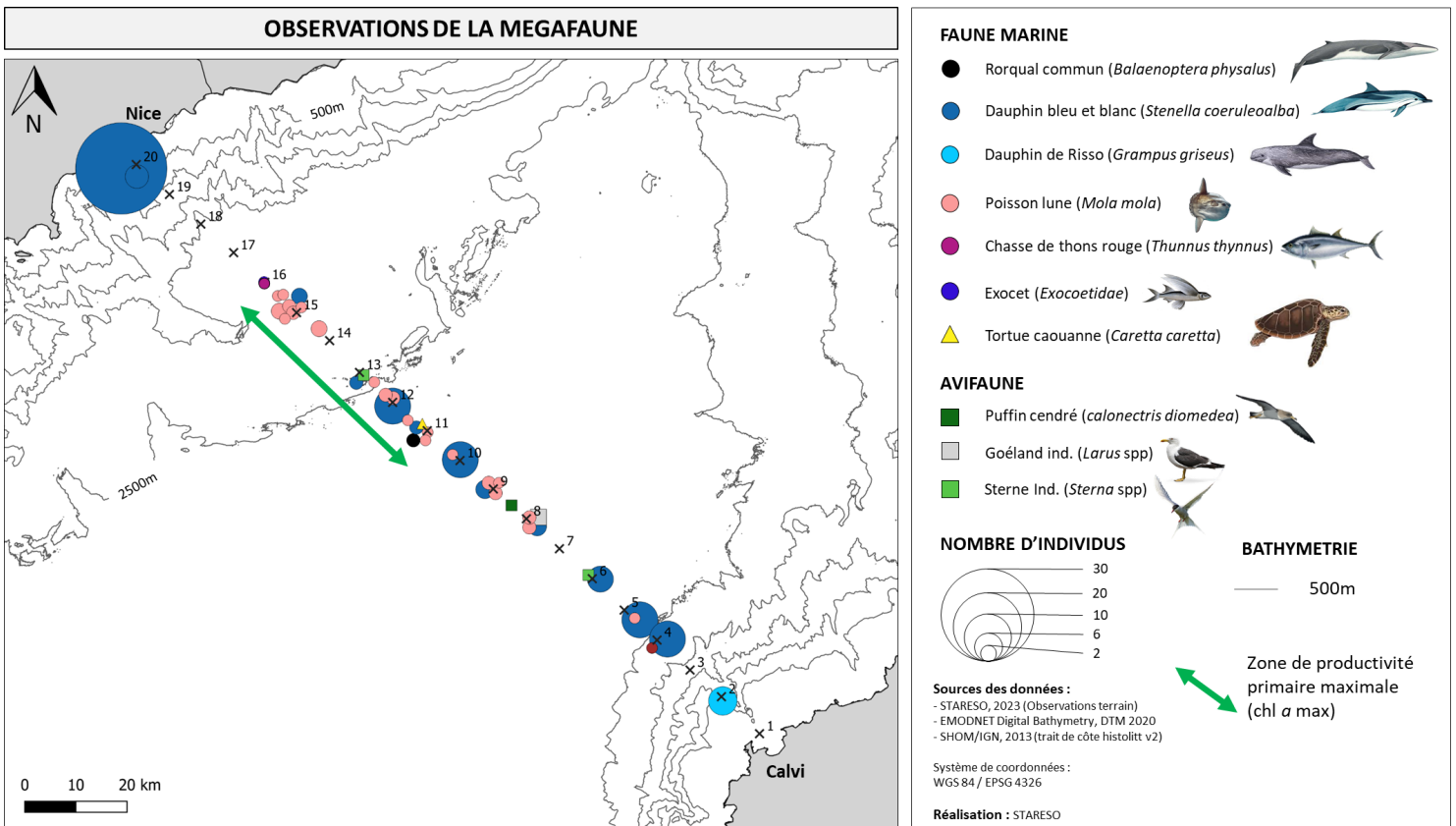
FAUNE		NOMBRE
Cétacés	Dauphin bleu et blanc ( <i>Stenella coeruleoalba</i> )	Entre 71 et 141
	Dauphin de Risso ( <i>Grampus griseus</i> )	8
	Rorqual commun ( <i>Balaenoptera physalus</i> )	1
Avifaune	Goéland ( <i>Larus sp.</i> )	3
	Puffin cendré ( <i>Calonectris diomedea</i> )	1
	Sterne ( <i>Sterna spp.</i> )	1
Poisson lune ( <i>Mola mola</i> )		31
Chasse de thon ( <i>Scombridae</i> )		1
Tortue Caouanne ( <i>Caretta caretta</i> )		1
Macrozooplancton		Banc de vérelles continu sur l'ensemble de la radiale

caractérisé par une profondeur de fond de 2500 m et dont les concentrations en chl *a* sont les plus élevées (comparées aux habitats décrits pour les autres espèces) (Delacourtie et al., 2009). De plus, d'autres études montrent que cette espèce présente une présence accrue proche des zones frontales (Bailey & Thompson, 2010). Bien que des bancs aient été en effet rencontrés en zone frontale au niveau des points 4 et 5 et aux environs de la zone de forte productivité, entre le point 10 et 12, d'autres individus ont également été observés en zone côtière, au large de Nice. Bien qu'une campagne ne soit pas suffisante pour tirer de robustes conclusions, la répartition spatiale de ces bancs ne semble pas être étroitement liée à la celle des zones de productivité maximale et peut suggérer que le lien trophique entre phytoplancton et cétacés ne soit pas direct et que les facteurs sous-jacents à la disponibilité de leurs proies (céphalopodes et/ou poissons pélagiques) ne sont pas exclusivement tributaires de ces zones de forte productivité.

La deuxième espèce de cétacé la plus communément observée au large en mer Ligure après le dauphin bleu et blanc est le rorqual commun (Figure 32). Celui-ci semble être relativement fréquemment observé en été dans certaines parties localisées au Nord et surtout à l'Ouest des délimitations du Parc (Delacourtie et al., 2009; Pettex et al., 2014). En effet, sa distribution suit celle de sa nourriture principale, à savoir le krill (Figure 25), dont les abondances maximales sont généralement



**32** Rorqual commun (crédit photo: Greg Lecoeur).



**31** Répartition spatiale des observations de faune et avifaune le long de la radiale Calvi-Nice.

retrouvées dans la zone centrale ou frontale (Licandro & Icardi, 2009; Molinero et al., 2008). Or, le seul rorqual observé durant les traversées se situait en zone centrale, au niveau du point 11 soit en effet à proximité immédiate de la zone de forte concentration en chl  $a$ .

Enfin, la dernière espèce de cétacé observé est le dauphin de Risso (Figure 33), à raison d'un groupe de 8 au large de Calvi (Point 2). Ce cétacé fréquenterait en effet principalement le talus (200 m à 2000 m), ici au-dessus de 500 m, mais habituellement davantage près des côtes continentales plutôt que corses (Laran et al., 2012).



33 Dauphin de Risso.

### IV.3.B. Autres observations d'espèces potentiellement bio-indicatrices de forte productivité

Tel le rorqual, une tortue caouanne *Caretta caretta*, a pu être observée au niveau du point 11, soit à proximité immédiate de la zone de forte productivité. Des modèles de prédiction ont permis de mettre en valeur qu'en été, les tortues caouanne se distribuaient en mer Méditerranée principalement sur la strate océanique où la profondeur peut atteindre jusqu'à -3000 m et dans une gamme de températures comprises entre 16°C et 24°C (Racine, 2015). De plus, d'autres études ont montré que ces tortues avaient tendance à se concentrer au niveau de zone présentant des

gradients prononcés de température et de chl  $a$ , où se produit une convergence de phytoplancton et de zooplancton, ce dernier représentant une ressource trophique pour les tortues (Polovina et al., 2000; Kobayashi et al., 2008; Mansfield et al., 2009). Ces caractéristiques expliquent finalement le nombre important de tortue fréquentant la partie Ouest de la Mer Ligure, considérée comme une zone de fort bloom phytoplanctonique (D'Ortenzio & Ribera d'Alcala 2008). La tortue en période d'alimentation peut donc être bio-indicatrice des zones de forte productivité, telles que celles identifiées au moment de l'expédition entre le point 10 et 16.

Le poisson lune *Mola mola* constitue la deuxième espèce de mégafaune la plus souvent rencontrée lors de cette expédition. Des suivis aériens des campagnes SAMM (suivi aérien de la mégafaune marine) ont pu mettre en évidence une forte variabilité spatio-temporelle de cette espèce avec l'identification d'un couloir de présence reliant le nord de la Corse au continent (au niveau de la frontière franco-italienne) en hiver et l'ouverture de ce couloir vers l'Ouest en été avec une densité maximale alors située au sud-ouest de la mer Ligure jusqu'au Golfe du Lion (Pettex et al., 2014). Lors de l'expédition, il a été observé une forte concentration de ce grand poisson au niveau du point 15, point dont la colonne d'eau présentait les plus fortes concentrations en chl  $a$ . Contrairement à ce qui est communément considéré comme une espèce strictement consommatrice de plancton gélatineux, le poisson lune s'avère être un prédateur généraliste présentant un régime très diversifié de plancton principalement constitué de crustacés, de téléostéens et de cnidaires (Sousa et al., 2016; Syväranta et al., 2012). Il est donc cohérent de s'attendre à retrouver cette espèce dans des zones présentant de fortes densités planctoniques, tout taxa confondu. Toutefois, il est important de souligner la présence quasi continue de nappes de vélelles, *Velevella velevella*,

sur l'ensemble de la traversée (Figure 34) et que ces hydrozoaires constitueraient environ 15 % de leur régime alimentaire (Sousa et al., 2016).



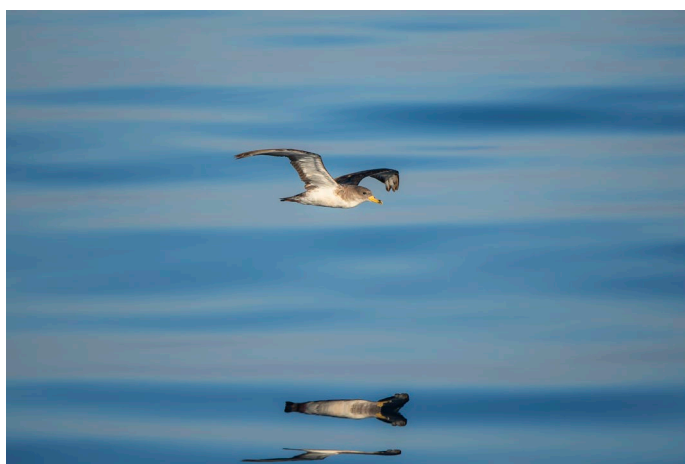
**34** Nappe de vélèlles en continue sur l'ensemble de la radiale.

Enfin, notons l'observation d'une chasse de thon rouge *Thunnus thynnus* au large de Calvi, en plein zone frontale, dans des eaux présentant 2200 m de fond. Cette observation est parfaitement en accord avec les zones de prédilection du thon rouge (Fromentin & Powers, 2005). Ce poisson pélagique migre de l'Atlantique vers la Méditerranée de mai à août environ dans le but de se reproduire, bien que certains individus restent en Mer Méditerranée toute l'année. De plus, les études ont montré que les bancs sont souvent associés à la présence de fronts océaniques ou de zones d'upwelling (de remontée d'eaux profondes), à grâce à la présence de proies généralement plus abondantes (Rooker et al., 2007). La spatio-temporalité de cette observation (en zone frontale et en mai), bien qu'unique, est donc parfaitement en accord avec la biologie décrite pour cette espèce et conforte le rôle écologique des zones frontales traversées au cours de l'expédition.

### IV.3.C. Avifaune

Concernant les observations d'avifaune, que peu de conclusions peuvent être tirées de ces

rare rencontres. Toutefois, il est pertinent de souligner l'observation d'un puffin cendré, *Calonectris diomedea* (Figure 35), espèce protégée et ce peu de temps avant la période de ponte, à la fin du mois de mai. Or, les colonies les plus proches de puffins cendrés sont situées sur la Giraglia, à la pointe du Cap Corse, et sur l'île Gargalu, dans la réserve naturelle de Scandola. Ce grand puffin est en effet capable de parcourir de grandes distances en haute mer pour trouver des sites d'alimentation, bien qu'il soit plus fréquemment rencontré le long des zones côtières (Pettex et al., 2014). Le secteur hauturier particulièrement productif, surtout au printemps, représente probablement une zone d'alimentation pour ces colonies.



**35** Puffin cendré (crédit photo: Greg Lecoer).

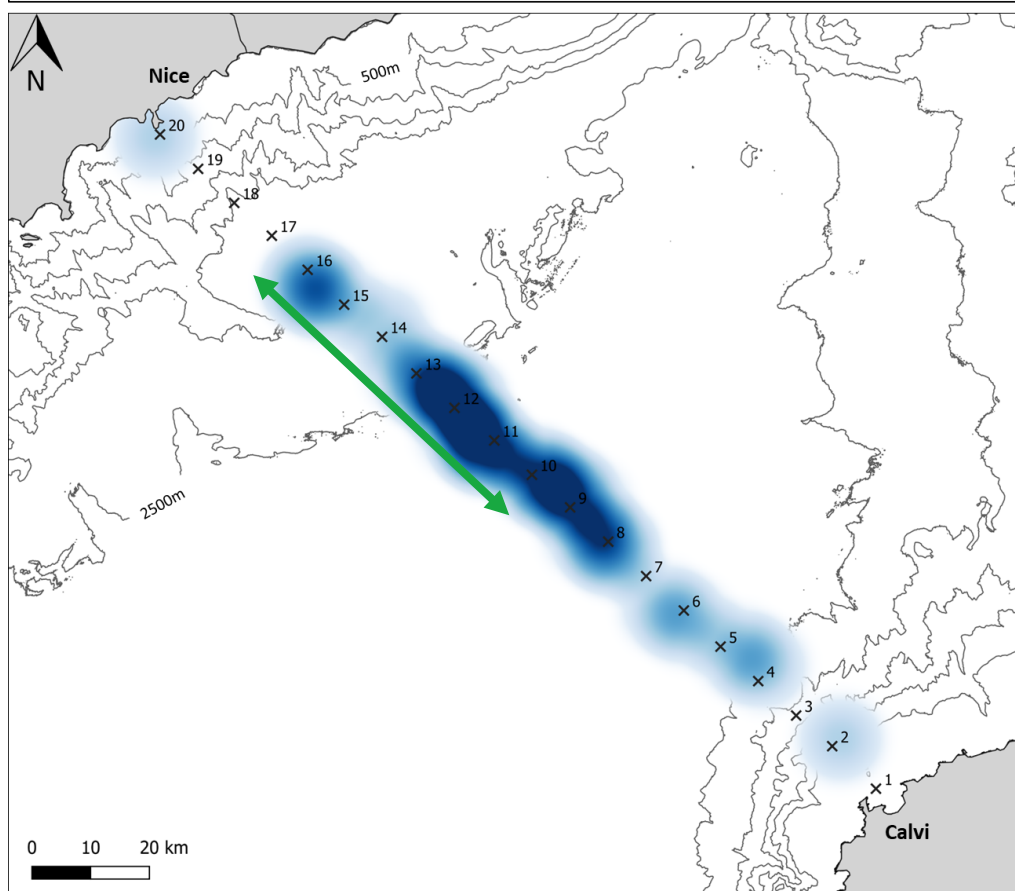
### IV.3.D. Distribution de la richesse spécifique

Malgré le faible nombre d'espèces dénombrées, le calcul de l'indice de la richesse spécifique permet de souligner une répartition hétérogène le long de la radiale avec des richesses maximales allant du point 8 au point 13, et, dans une moindre mesure au point 16 (Figure 36). Bien que cette zone ne corresponde que partiellement à la zone de forte productivité définie précédemment, il peut être conclu que la zone centrale présente a priori une plus grande diversité d'espèce au moment de l'expédition début mai. Toutefois, 7 des 10

espèces ou taxons observés soit 70% de la diversité totale étaient tout de même présentes au niveau de la zone de productivité maximale (point 10 à 17), y compris les uniques individus de tortue et rorqual observés. De même une zone de plus grande diversité est notable au niveau de la zone frontale au large de Calvi (entre les sites 4 et 6).

Quoiqu'il en soit, il faut rester conscient que les observations faites depuis un bateau reste relativement fortuites et ne représentent que la partie immergée de l'iceberg de toute la diversité de mégafaune pélagique potentiellement présente. C'est pourquoi, parallèlement à cette étude, des prélèvements d'ADN environnementales ont été effectués afin de révéler la présence potentielle d'espèces rares ou bien non visibles depuis la surface et ainsi de renforcer l'idée d'une Mer Méditerranée riche et pleine de surprises.

### OBSERVATIONS DE LA MEGAFAUNE



#### RICHESSE SPECIFIQUE (10 KM)



#### BATHYMETRIE

— 500m

↔ Zone de productivité primaire maximale (chl a max)

#### Sources des données :

- STARESO, 2023 (Observations terrain)
- EMODNET Digital Bathymetry, DTM 2020
- SHOM/IGN, 2013 (trait de côte histolitt v2)

Système de coordonnées :  
WGS 84 / EPSG 4326

Réalisation :  
STARESO

# SYNTHESE

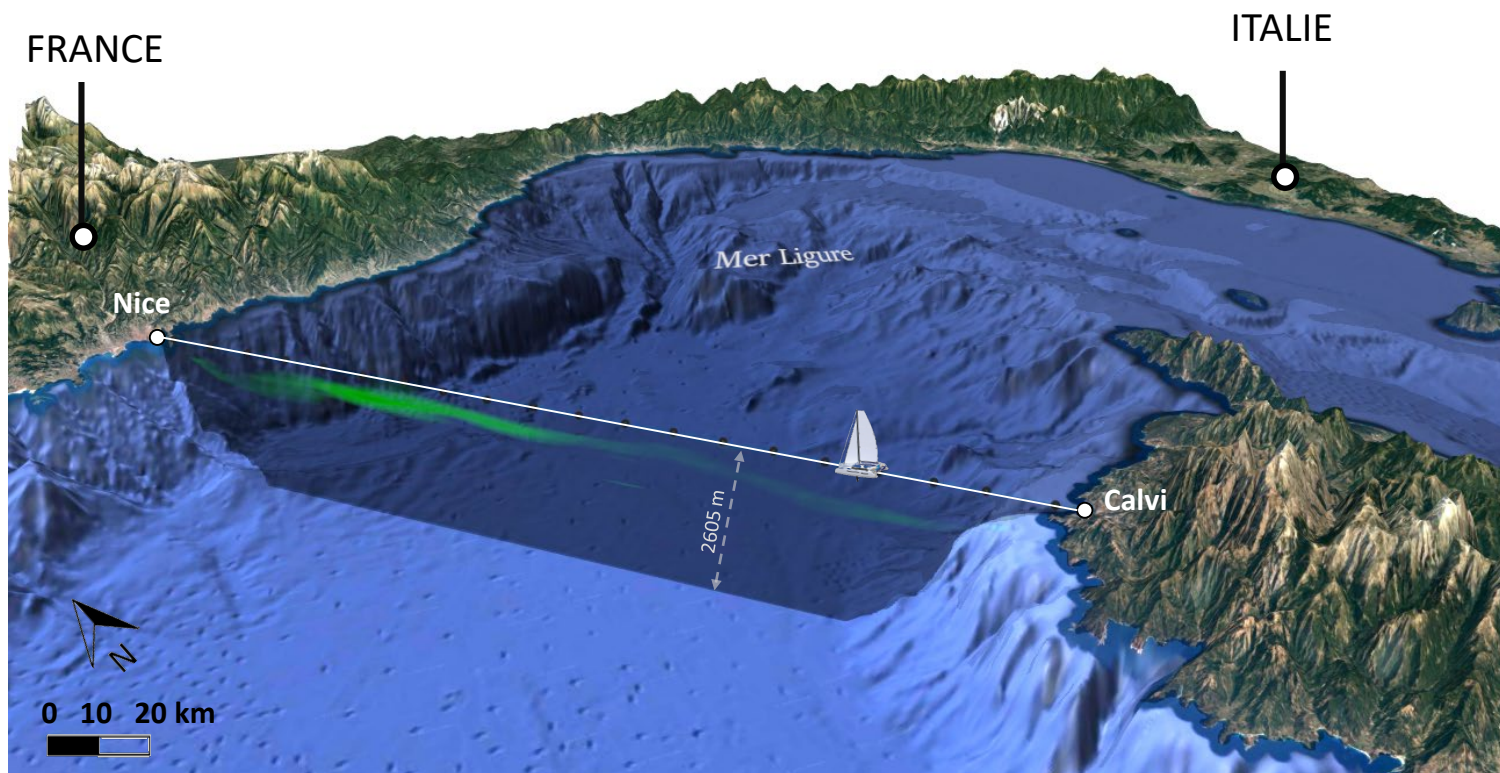


L'expédition Pelagos du projet We Are Méditerranée a été menée début mai 2023 au sein du Sanctuaire Pelagos, et plus particulièrement, au sein d'un espace maritime se distinguant du reste de la Mer Méditerranée par une importante productivité planctonique printannière sur le large comme sur le côtier, formant ainsi un habitat pélagique vital pour de nombreuses espèces, notamment de cétacés. La réalisation d'une radiale reliant le continent français à la Corse (Figure 37) a permis de documenter et d'imager une zone hydrographique complexe et biologiquement riche, pourtant généralement méconnue du grand public. A cette fin, 20 sites de mesures physico-chimiques et phytoplanctoniques, associés à 4 prélèvements zooplanctoniques et 45 observations de mégafaune marine ont été réalisés. L'ensemble de la donnée récoltée est présentée, analysée, et cartographiée dans ce rapport.

**L'identification et la description des différentes zones hydrographiques structurant la colonne d'eau de la Mer Ligure, à savoir la zone centrale, la zone frontale et la zone périphérique, ont pu être déterminées via l'étude des paramètres physiques et chimiques (Figure 38). De plus, outre cette contextualisation hydrographique, la considération**

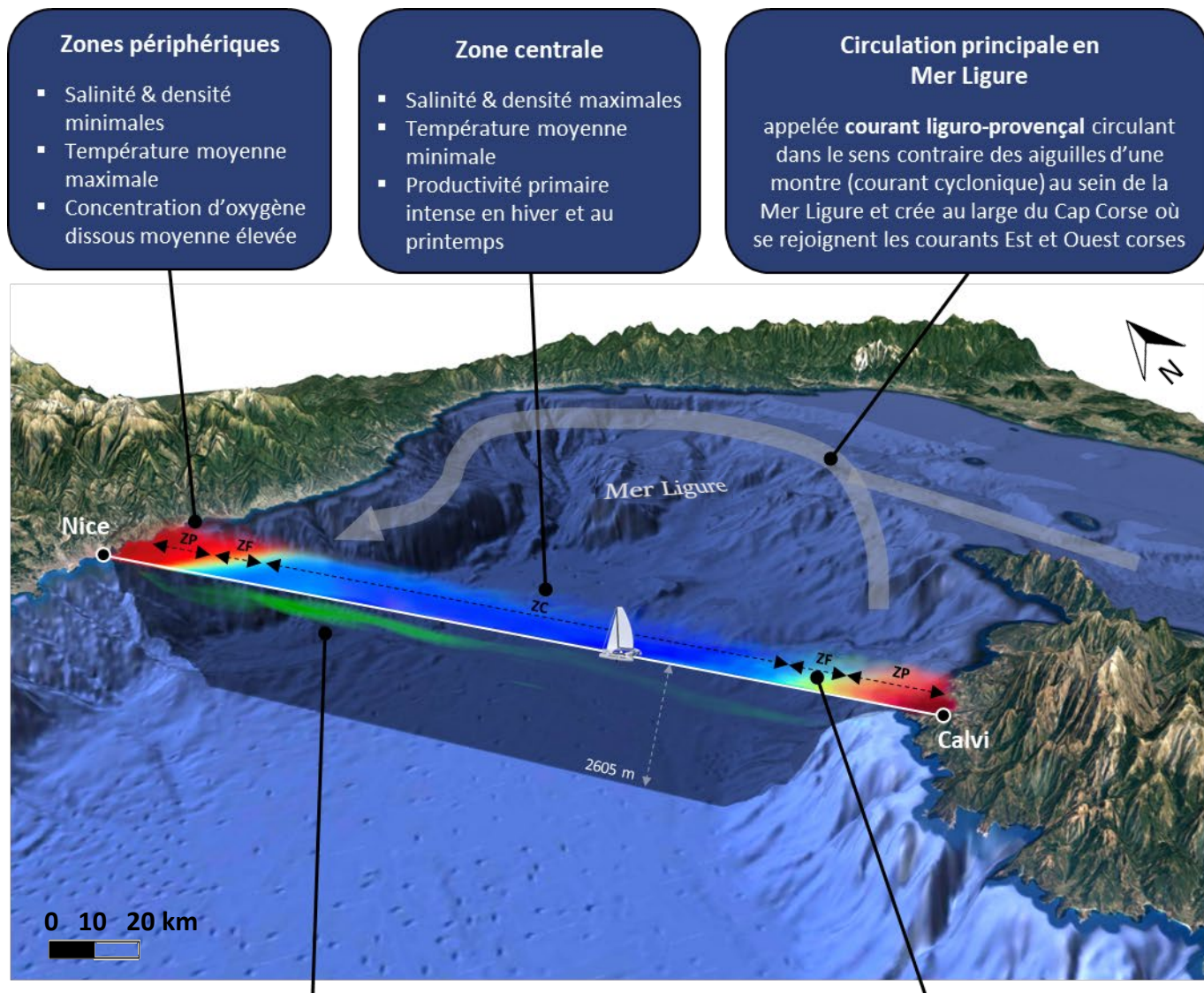
**de paramètres biologiques appartenant à différents étages de la chaîne trophique a permis d'illustrer les relations en cascade entre mouvements des masses d'eau, production primaire (phytoplancton), production secondaire (zooplancton) et consommateur tertiaire (stades juvéniles de divers poissons, thon, cétacés, etc.) (Figure 41).**

La zone centrale est un espace hauturier particulier, influencée par des convections profondes, surtout en hiver, qui, via la remontée d'eaux profondes et riches en sels nutritifs dans la zone euphotique, peuvent soutenir l'activité photosynthétique du phytoplancton. Au moment de l'expédition, les biomasses phytoplanctoniques (identifiées via la concentration en chlorophylle a) étaient en effet maximales sur la moitié nord de la zone centrale, soit environ sur 40 km. La distribution spatiale de ces micro-algues, formant un maillon clé de la chaîne alimentaire, coïncide avec des températures de surface ainsi que des concentrations en phosphate et en silicate plus élevées, traduisant potentiellement la disponibilité des deux conditions nécessaires à la photosynthèse du phytoplancton : la lumière et des sels nutritifs. Cette activité photosynthétique devient alors le foyer d'une



37

Vue 3D de la zone d'étude incluant la radiale reliant Nice à Calvi (ligne blanche) et une coupe transversale de la colonne d'eau au niveau de la radiale avec la distribution des concentrations en chlorophylle a (en vert).



### Zone de biomasse phytoplanktonique (concentration chlorophylle a) maximale

- Concentration maximale de chlorophylle a située entre 35 m et 75 m de profondeur sur une zone s'étalant de 40 km à 80 km des côtes de Nice
- Concentrations maximales des sels nutritifs (nitrate, phosphate et silicate) consommés ou produits lors de l'activité photosynthétique et de la reminéralisation de la matière organique générée
- Concentrations maximales en oxygène dissous et turbidité maximale (témoin d'une activité photosynthétique et d'une production de matière organique)

*Chlorophylle a (µg/l) sur les 200 premiers mètres*

### Zones frontales

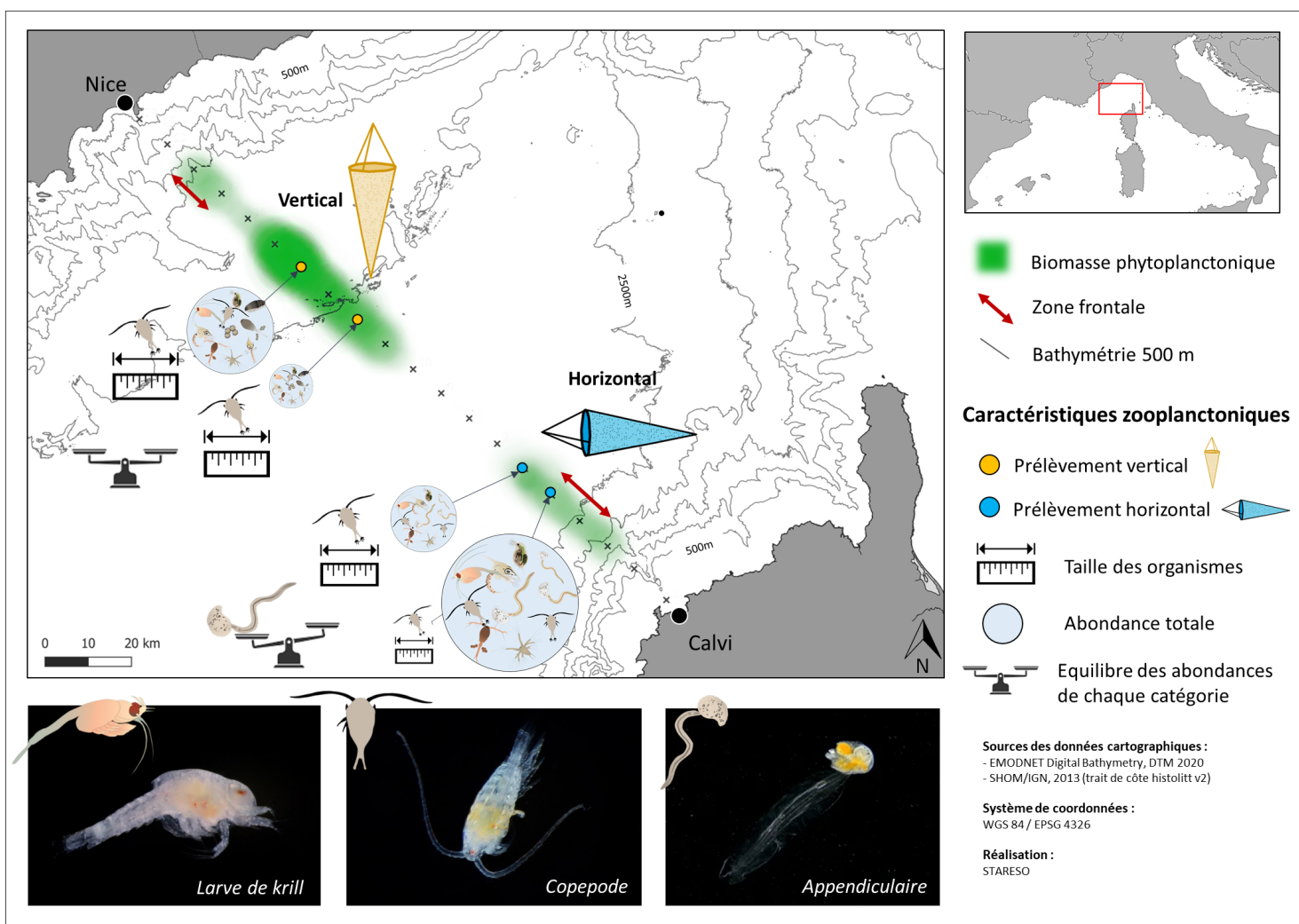
- Gradient horizontal de salinité et densité
- Une zone située à 15-30 km des côtes continentales (correspondant au front « liguro-provençal »), une autre, située à 30-40 km des côtes corses
- Mouvements verticaux des masses d'eau entraînant un enfoncement en profondeur vers la côte de la productivité primaire (potentiel rôle d'enrichissement des zones côtières)

*Salinité en surface*

**38** Schéma synthétisant les principales caractéristiques physiques, chimiques et phytoplanktoniques basées sur une vue 3D de la zone d'étude.

productivité primaire (biosynthèse de matière organique) capable d'impacter la physico-chimie de la colonne d'eau en entraînant par exemple, l'augmentation locale de la concentration en oxygène dissous (puisqu'il y a création d'O<sub>2</sub>) ou encore l'augmentation de la turbidité de l'eau (puisqu'il y a production de matière organique). Les 2 échantillons de zooplancton réalisés au sein de cette zone de forte biomasse phytoplanctonique montrent également que malgré des assemblages de communauté relativement similaires et équilibrés, l'abondance totale en zooplancton est plus élevée au niveau des biomasses phytoplanctoniques maximales (Figure 39). Bien que cette relation

puisse être tout simplement expliquée par le fait que le zooplancton consomme le phytoplancton, plus de prélèvements et d'observations seraient nécessaires pour significativement établir de telles relations de causalité trophique. Toutefois, il est remarquable de constater que cette distribution des biomasses maximales de phytoplancton, coïncide également avec celle de 70% de la diversité des espèces de mégafaune observées en mer, parmi lesquelles, certaines bio-indicatrices des zones de productivité telles que le poisson lune, la tortue ou encore le rorqual (Figure 40). Il est donc fort probable que cette zone ait représenté, à ce moment de l'année, un espace d'alimentation

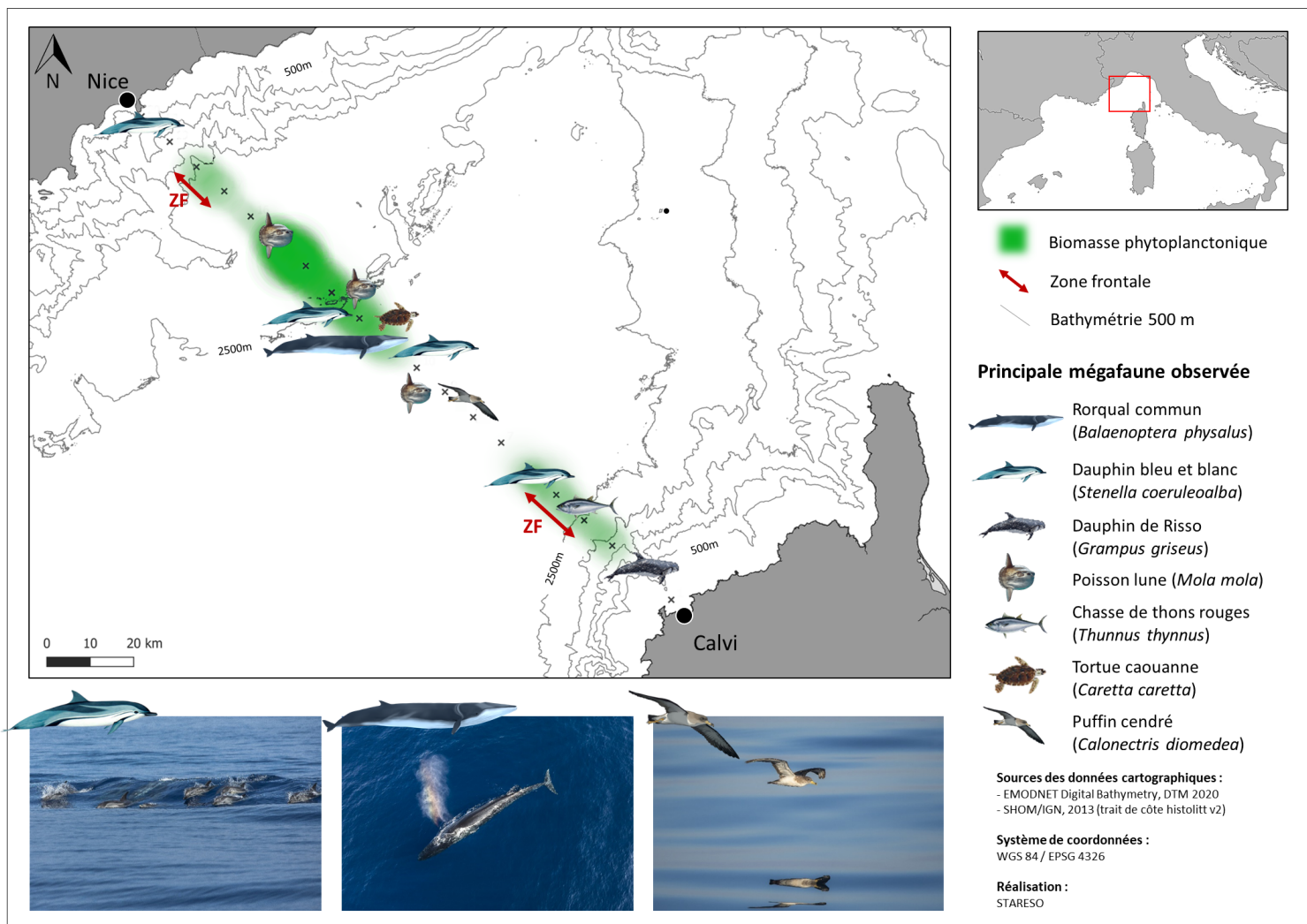


**39** Schématisation synthétique de quelques résultats clés concernant le compartiment zooplanctonique. Les 4 prélèvements zooplanctoniques montrent des différences en termes d'abondances totales, d'assemblages des communautés et de spectre de taille. Les deux types de prélèvements se différencient notamment par une proportion plus importante d'appendiculaires dans les échantillons horizontaux et un meilleur équilibre des communautés ainsi qu'une plus grande diversité au sein des échantillons verticaux. Des larves de krill étaient présentes dans des proportions similaires dans l'ensemble des échantillons. Le prélèvement le plus au sud se démarque des autres par une abondance totale maximale formée majoritairement d'individus de petites tailles.

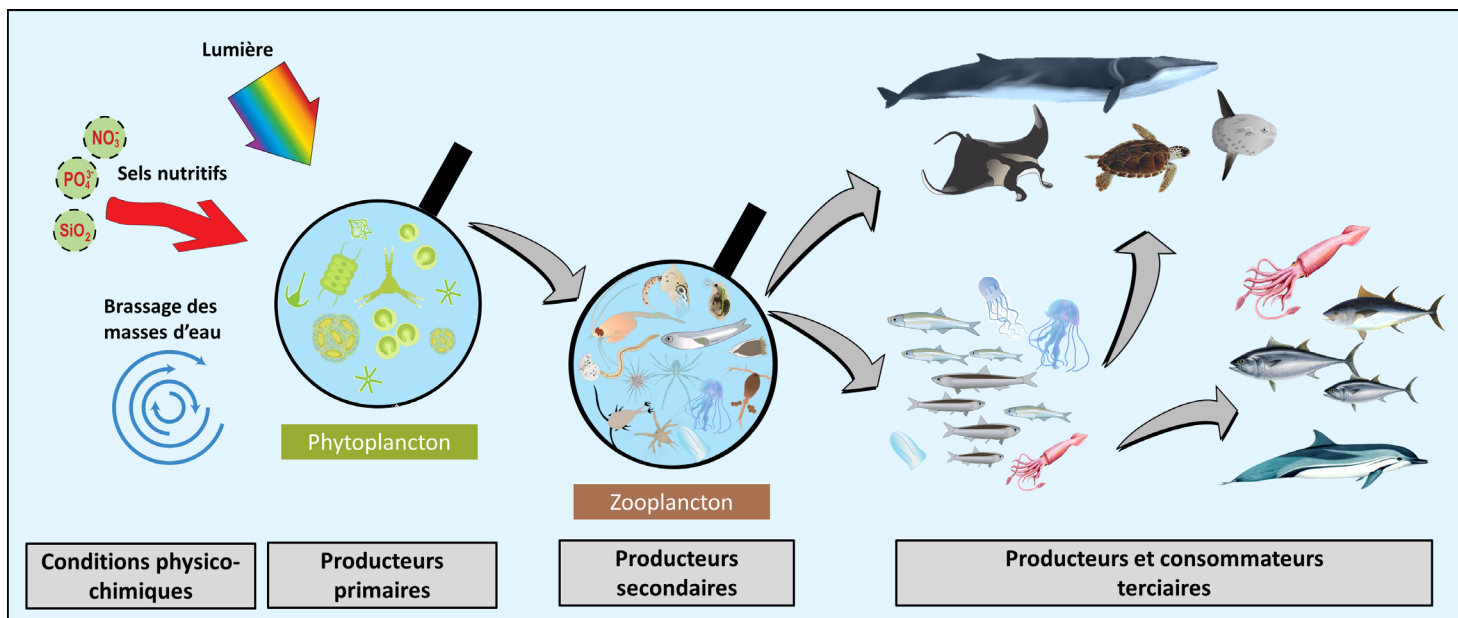
privilegié pour de nombreuses espèces notamment migratrices. Le rorqual, par exemple, se nourrit directement de zooplancton, et plus exactement, de krill, crustacé appartenant à l'ordre *Euphausiacea*, dont les larves ont effectivement pu être retrouvées dans l'ensemble des prélèvements de zooplancton.

Par ailleurs, deux zones frontales ont pu être identifiées à différentes distances des côtes : le front liguro-provençal étant en effet plus proche des côtes continentales que le front au large de la Corse. Ces zones frontales, caractérisées notamment par un gradient horizontal de densité, sont le siège d'intenses mouvements (horizontaux, obliques et verticaux) des masses d'eau, leur conférant un double rôle à la fois de barrière et (surtout) d'échange. Ces zones sont ainsi susceptibles de, non seulement, fertiliser la

couche euphotique par l'apport de sels nutritifs mais aussi d'entraîner la matière particulaire vers des couches plus profondes. Les résultats montrent en effet de légères anomalies positives de biomasse phytoplanctonique au niveau de ces fronts qui semblent s'enfoncer vers les côtes, tendant donc vers un rôle d'alimentation des zones côtières. C'est ainsi que les zones frontales peuvent constituer une zone de ressource pour divers maillons de la chaîne trophique, expliquant notamment la présence d'une chasse de thon observée en pleine zone frontale au large de la Corse. Les prélèvements horizontaux de zooplancton montrent par ailleurs une importante hétérogénéité des communautés, avec des abondances maximales au sein même de la zone frontale, composés notamment d'individus de plus petites tailles. Ces différences de structures de communauté au sein d'un espace



40 Schématisation synthétique de la répartition des principales observations de mégafaune, superposée avec la distribution des biomasses phytoplanctoniques.



**41** Schématisation synthétique et simplifiée d'une part du réseau trophique hauturier nord-ouest méditerranéen. Les flèches grises représentent les flux trophiques entre les différents groupes de consommateurs et producteurs.

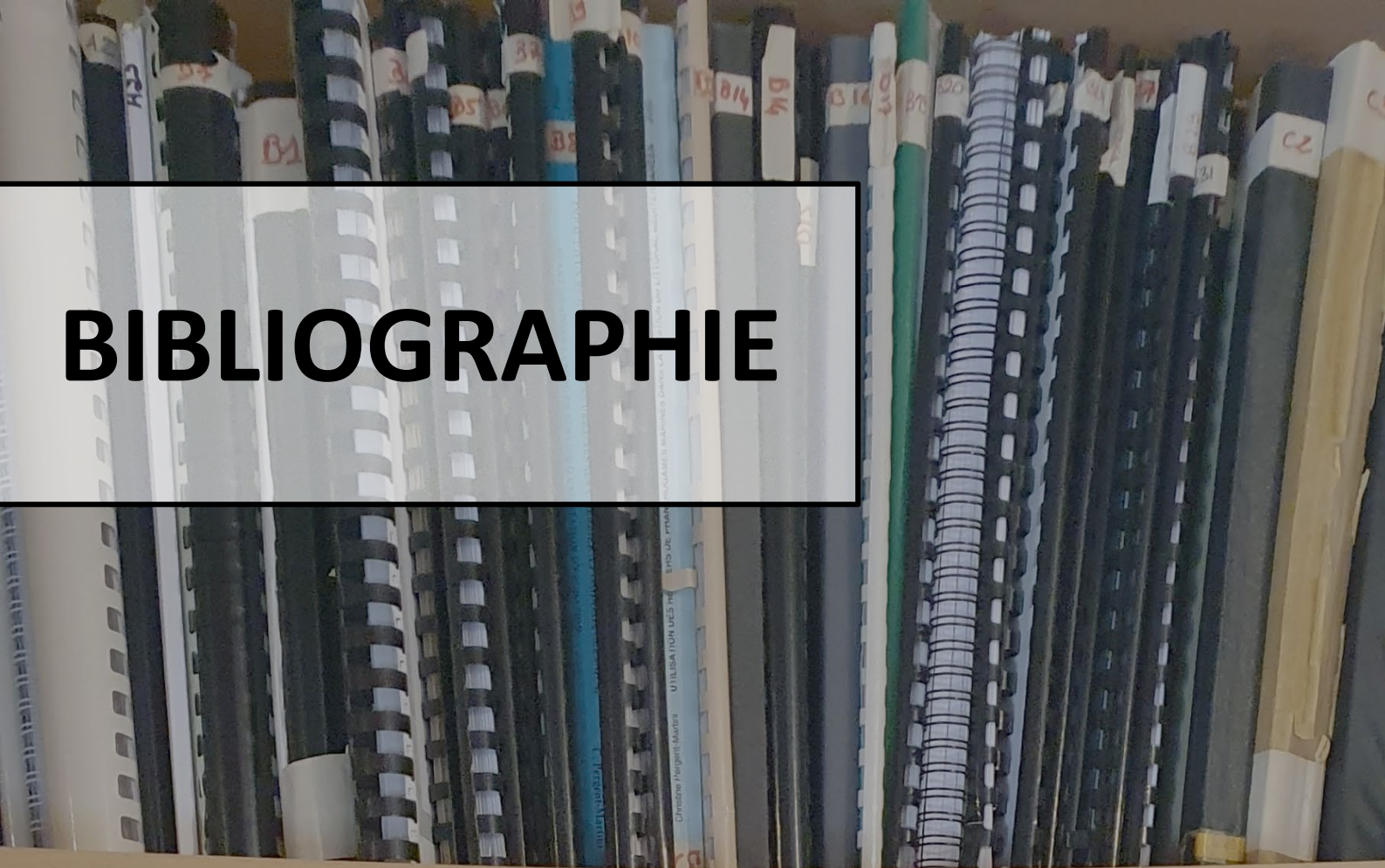
géographique pourtant restreint suggèrent que l'importante dynamique des zones frontales se répercutent sur celle du zooplancton, donnant lieu à une diversité de communauté hauturière pouvant *in fine* soutenir une diversité de fonctionnalités écologiques.

Ainsi, de manière générale, cette étude a ainsi permis de :

- Contextualiser les résultats via l'identification des différentes zones hydrographiques structurant l'espace étudié ;
- Décrire la dynamique et le lien entre les différents paramètres physiques, chimiques et biologiques afin de souligner la résonance entre phénomènes physiques et phénomènes biologiques ;
- D'aborder et rendre accessible une diversité de notions océanographiques et de processus écologiques sur base de résultats et d'analyses scientifiques ;
- Donner un aperçu sur les différentes techniques scientifiques de prélèvements en mer mais aussi d'analyse de la donnée ;

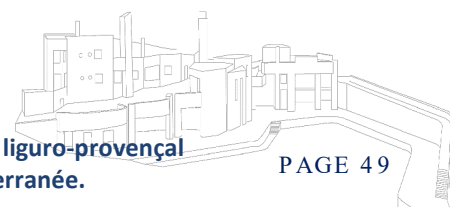
- Générer, tout au long de ce rapport, différents supports visuels concernant la diversité des principales dynamiques côte-large, la richesse biologique de l'espace hauturier et diverses notions océanographiques ;
- Proposer une méthode innovante de symbiose entre art et science matérialisée par une expédition en mer comme outil de prise de conscience auprès du grand public de la richesse des processus marins hauturiers animant la Méditerranée nord-occidentale et les interfaces côte-large.

# BIBLIOGRAPHIE



- Barnett, A. J., Finlay, K., & Beisner, B. E. (2007). Functional diversity of crustacean zooplankton communities: towards a trait-based classification. *Freshwater Biology*, 52(5), 796-813.
- Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., ... & Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752-755.
- Damien, P. (2015). Etude de la circulation océanique en Méditerranée Nord-Occidentale à l'aide d'un modèle numérique à haute résolution: influence de la submésoséchelle (Doctoral dissertation, Université Toulouse III Paul Sabatier).
- Delacourtie, F., Laran, S., David, L., Di-Méglio, N., & P. (2009). Analyse spatio-temporelle de la distribution des cétacés en relation avec les paramètres environnementaux. Rapport Final Du Programme de Recherche, 2009.
- Estrada, M. (1999). Hidrodinàmica i fitoplàncton en el mar Català.
- Fromentin, J. M., & Powers, J. E. (2005). Atlantic bluefin tuna: population dynamics, ecology, fisheries and management. *Fish and fisheries*, 6(4), 281-306.
- Fullgrabe, L., Grosjean, P., Gobert, S., Lejeune, P., Leduc, M., Engels, G., ... & Richir, J. (2020). Zooplankton dynamics in a changing environment: a 13-year survey in the northwestern Mediterranean Sea. *Marine environmental research*, 159, 104962.
- Goffart, A., Collignon, A., & Hecq, J. H. (2015). Control of plankton phenology by climate variation in a Mediterranean coastal area: results from a long-term study (1979-2011). In *Effects of Climate Change on the World's Oceans*, 3rd International Symposium.
- Kobayashi, D. R., Polovina, J. J., Parker, D. M., Kamezaki, N., Cheng, I. J., Uchida, I., ... & Balazs, G. H. (2008). Pelagic habitat characterization of loggerhead sea turtles, *Caretta caretta*, in the North Pacific Ocean (1997–2006): insights from satellite tag tracking and remotely sensed data. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 356(1-2), 96-114.
- Labat, J. P., & Cuzin-Roudy, J. (1996). Population dynamics of the krill *Meganyctiphanes norvegica* (M. Sars, 1857)(Crustacea: Euphausiacea) in the Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea). Size structure, growth and mortality modelling. *Journal of Plankton Research*, 18(12), 2295-2312.
- Laran, S., Delacourtie, F., Di Fulvio, T., David, L., Di Méglio, N., & Monestiez, P. (2012). Synthèse sur la distribution des cétacés dans le Sanctuaire PELAGOS et les eaux adjacentes, mise en relation avec leur environnement. *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park*, 26, 119-147.
- Licandro, P., & Icardi, P. (2009). Basin scale distribution of zooplankton in the Ligurian Sea (north-western Mediterranean) in late autumn. *Hydrobiologia*, 617, 17-40.
- Mansfield, K. L., Saba, V. S., Keinath, J. A., & Musick, J. A. (2009). Satellite tracking reveals a dichotomy in migration strategies among juvenile loggerhead turtles in the Northwest Atlantic. *Marine Biology*, 156, 2555-2570.
- Marty, J. C., Chiavérini, J., Pizay, M. D., & Avril, B. (2002). Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991–1999). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(11), 1965-1985.
- Marty, J. C., & Chiavérini, J. (2010). Hydrological changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean, DYFAMED site) during 1995–2007 and biogeochemical consequences. *Biogeosciences*, 7(7), 2117-2128.
- Molinero, J. C., Ibanez, F., Souissi, S., Buecher, E., Dallot, S., & Nival, P. (2008). Climate control on the long-term anomalous changes of zooplankton communities in the Northwestern Mediterranean. *Global Change Biology*, 14(1), 11-26.
- Molinero, J. C., Ibanez, F., Souissi, S., Bosc, E., & Nival, P. (2008). Surface patterns of zooplankton spatial variability detected by high frequency sampling in the NW Mediterranean. Role of density fronts. *Journal of Marine Systems*, 69(3–4), 271–282.
- Motoda, S. (1959). Devices of simple plankton apparatus. *Memoirs of the faculty of fisheries Hokkaido University*, 7(1-2), 73-94.
- Orsi Relini, L. (1992). The fin whale and other pelagic filterers as samplers of *Meganyctiphanes norvegica*. *Rapp. Comm. Int. Mer Méditerr.*, 33, 263.

- Orsi Relini, L. and Relini, G. (1993). *Meganyctiphanes norvegica* nelle reti trofiche del Mar Ligure. *BioLMar. Suppl. Not. SIBM*, 1, 151-155.
- d'Ortenzio, F., & Ribera d'Alcalà, M. (2009). On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis. *Biogeosciences*, 6(2), 139-148.
- Pasqueron De Fommervault, O. (2015). *Dynamique des nutriments en Méditerranée: des campagnes océanographiques aux flotteurs Bio-Argo* (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Pettex, E., Lambert, C., Laran, S., Ricart, A., Virgili, A., Falchetto, H., Authier, M., Monestiez, P., Van Canneyt, O., & Dorémus, G. (2014). *Suivi aérien de la mégafaune marine en France métropolitaine. SAMM Rapport Final*.
- Platt, T., & Denman, K. (1977). Organisation in the pelagic ecosystem. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 30, 575-581.
- Prieur, L., d'Ortenzio, F., Taillandier, V., & Testor, P. (2020). Physical oceanography of the Ligurian sea. *The Mediterranean Sea in the Era of Global Change 1: 30 Years of Multidisciplinary Study of the Ligurian Sea*, 49-78.
- Polovina, J. J., Kobayashi, D. R., Parker, D. M., Seki, M. P., & Balazs, G. H. (2000). Turtles on the edge: movement of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) along oceanic fronts, spanning longline fishing grounds in the central North Pacific, 1997–1998. *Fisheries Oceanography*, 9(1), 71-82.
- Racine, M. (2015). *Développement de modèles d'habitats pour les tortues caouannes (Caretta caretta) de Méditerranée occidentale* (Doctoral dissertation, éditeur inconnu).
- Robinson, C. (2019). Microbial respiration, the engine of ocean deoxygenation. *Frontiers in Marine Science*, 5, 533.
- Rooker, J. R., Alvarado Bremer, J. R., Block, B. A., Dewar, H., De Metrio, G., Corriero, A., ... & Secor, D. H. (2007). Life history and stock structure of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *Reviews in Fisheries Science*, 15(4), 265-310.
- Sanchez, P. (1982). Regimen alimentario de *Illex coindetti* en el mar Catalan. *Invest. Pesq.*, 46, 443-449.
- Sato, R., Tanaka, Y., & Ishimaru, T. (2003). Species-specific house productivity of appendicularians. *Marine Ecology Progress Series*, 259, 163-172.
- Scales, K. L., Miller, P. I., Hawkes, L. A., Ingram, S. N., Sims, D. W., & Votier, S. C. (2014). On the front line: Frontal zones as priority at-sea conservation areas for mobile marine vertebrates. *Journal of Applied Ecology*, 51(6), 1575-1583.
- Segura i Noguera, M. del M., Cruzado, A., & Blasco, D. (2016). The biogeochemistry of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll a in the Catalan Sea (NW Mediterranean Sea).
- Silva, T., Gislason, A., Licandro, P., Marteinsdóttir, G., Ferreira, A. S. A., Gudmundsson, K., & Astthorsson, O. S. (2014). Long-term changes of euphausiids in shelf and oceanic habitats southwest, south and southeast of Iceland. *Journal of plankton research*, 36(5), 1262-1278.
- Silvert, W., & Platt, T. (1978). Energy flux in the pelagic ecosystem: A time-dependent equation. *Limnology and Oceanography*, 23(4), 813-816.
- Somot, S., Ruti, P., Ahrens, B., Coppola, E., Jordà, G., Sannino, G., & Solmon, F. (2018). Editorial for the Med-CORDEX special issue. *Climate Dynamics*, 51, 771-777.
- Sournia, A., Brylinski, J. M., Dallot, S., LeCorre, P., Leveau, M., Prieur, L., & Froget, C. (1990). Fronts hydrologiques au large des côtes françaises: Les sites-ateliers de programme Frontal. *Oceanologica Acta*, 13(4), 413-438.
- Sousa, L. L., Queiroz, N., Mucientes, G., Humphries, N. E., & Sims, D. W. (2016). Environmental influence on the seasonal movements of satellite-tracked ocean sunfish *Mola mola* in the north-east Atlantic. *Animal Biotelemetry*, 4(1), 1-19.
- Suroy, M. (2013). *Rôles du frustule des diatomées et des conditions nutritives de leur croissance sur l'export de carbone dans les océans* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).



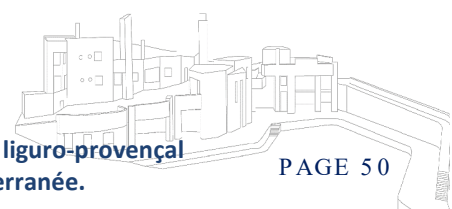
Warren, J. D., Demer, D. A., McGehee, D. E., Di Mento, R., & Borsani, J. F. (2004). Zooplankton in the Ligurian Sea: Part II. Exploration of their physical and biological forcing functions during summer 2000. *Journal of Plankton Research*, 26(12), 1419–1427.

Watelet, S., Beckers, J. M., Barth, A., & Back, Ö. (2016, April). Data-Interpolating Variational Analysis (DIVA) software: recent development and application. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EPSC2016-6262).

Welschmeyer, N. A. (1994). Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. *Limnology and oceanography*, 39(8), 1985-1992.

Zhou, M. (2006). What determines the slope of a plankton biomass spectrum?. *Journal of plankton research*, 28(5), 437-448.

Zhou, M., Tande, K. S., Zhu, Y., & Basedow, S. (2009). Productivity, trophic levels and size spectra of zooplankton in northern Norwegian shelf regions. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(21-22), 1934-1944.





Station STARESO  
Pte de la Revellata – BP 33 – 20260 Calvi  
(Corse) - FRANCE  
Tel : +00 33 (0)6 86 22 32 61  
Email : [stareso@stareso.corsica](mailto:stareso@stareso.corsica)  
Site web : [www.stareso.com](http://www.stareso.com)



**WE ARE**  
**MÉDITERRANÉE**  
EXPÉDITION PELAGOS