



IMPACT DE L'ÉVÉNEMENT DE MORTALITÉ MASSIVE DE 2022 SUR LES POPULATIONS DE GORGONES DE LA FAÇADE MÉDITERRANÉENNE FRANÇAISE



SEPTENTRION ENVIRONNEMENT
Juin 2023

PREAMBULE

Contexte, financements et réalisation : Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet "Suivi de la mortalité massive des gorgones et des communautés associées sur la façade méditerranéenne française" de Septentrion Environnement (SE) financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Ce rapport présente l'impact de la vague de mortalité massive de 2022 sur les populations de gorgones de la façade méditerranéenne française, situées au sein du Parc national des Calanques, du Parc national de Port-Cros, du Parc Marin de la Côte Bleue, de la Réserve Naturelle Scandola, du Parc Marin du Golfe du Lion, et autour du Cap Sicié.

Référent scientifique : Tristan Estaque

Analyse des données : Tristan Estaque, Léonie Hébrard

Rédaction scientifique : Tristan Estaque

Remerciements : Ce travail a bénéficié des conseils réguliers et des travaux réalisés en collaboration avec le Dr. Stéphane Sartoretto, chercheur à l'Ifremer, LITTORAL, F-83500 La Seyne-sur-Mer, France, le Dr. Joaquim Garrabou, directeur de recherche, Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Barcelone, les Dr. Bastien Mérigot et Quentin Schull de l'UMR MARBEC, Sète, le Parc national de Port-Cros, le Parc national des Calanques et le Parc Marin de la Côte Bleue. Les données provenant du Parc Marin du Golfe du Lion, de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls et une partie des données provenant du Parc Marin de la Côte Bleue ont été fournies par les gestionnaires de ces Aires Marines Protégées (AMP). Les données provenant du Cap Sicié et une partie des données provenant du Parc national de Port-Cros ont été fournies par le Dr. Stéphane Sartoretto (Ifremer). Ce travail a été rendu possible par l'étroite collaboration entre scientifiques et gestionnaires. Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à cette étude.

Citation, utilisation, reproduction : Ce travail doit être cité comme suit (citation) ; l'utilisation et reproduction sont libres et gratuites, sous réserve de citer les auteurs et de mentionner les noms des organismes financeurs (Financements et réalisation).

Citation : « Estaque T., Bianchimani O., Richaume J., Hébrard L., Sartoretto S., Charbonnel E., Hartmann V., Michez N., Mérigot B., Schull Q., Cheminée A., 2023. Impact de l'événement de mortalité massive de 2022 sur les populations de gorgones de la façade méditerranéenne française - Rapport scientifique. Septentrion Env. publ. - 31 p. ».

Ce document est publié sous licence CC BY 4.0
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)



SOMMAIRE

PREAMBULE	1
1. INTRODUCTION	2
2. MATERIEL ET METHODES	4
2.1. Stratégie d'échantillonnage	4
2.2. Sites étudiés	4
2.3. Analyse des données	5
3. RÉSULTATS	5
3.1. Vagues d'anomalies thermiques au sein des zones d'étude	5
3.2. Analyse de l'événement à l'échelle de la façade méditerranéenne française	8
3.3. Etat des lieux au sein de la Côte Vermeille et de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls	13
3.4. Etat des lieux au sein du Parc Marin de la Côte Bleue	15
3.5. Etat des lieux au sein du Parc national des Calanques	17
3.6. Etat des lieux autour du Cap Sicié	19
3.7. Etat des lieux au sein du Parc national de Port-Cros	21
3.8. Etat des lieux au sein de la Réserve naturelle Scandola	22
4. DISCUSSION & CONCLUSION	24
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	28

1. INTRODUCTION

Dans le contexte de changement global actuel qui menace toute la biosphère, les écosystèmes marins côtiers se trouvent en première ligne (Harley et al., 2006). Parmi les organismes marins, les organismes benthiques sessiles sont les plus exposés aux modifications environnementales du fait de leur mode de vie fixé. En Méditerranée nord-occidentale, deux anomalies thermiques durant les étés 1999 et 2003 ont été particulièrement meurtrières pour un grand nombre de ces organismes (Cerrano et al., 2000; Garrabou et al., 2009; Perez et al., 2000; Romano et al., 2000). Les biocénoses “coralligène” et “grotte semi-obscur” sont tout particulièrement concernées par des épisodes de mortalité massive des espèces d’Alcyonacea emblématiques de ces biocénoses que sont la gorgone rouge (*Paramuricea clavata*), le corail rouge (*Corallium rubrum*), la gorgone jaune (*Eunicella cavolini*) et la gorgone blanche (*Eunicella singularis*). Les différentes populations de ces espèces vivent dans des habitats aux conditions très variées, les populations superficielles évoluant dans un environnement relativement plus variable et marqué par des fluctuations de températures saisonnières importantes (Bensoussan et al., 2010), tandis que les populations profondes se trouvent dans des conditions de températures plus stables aux alentours de 13°C. Les populations superficielles vivant très près de leur seuil de thermotolérance (Bensoussan et al., 2010; Torrents et al., 2008) sont donc grandement menacées par les anomalies thermiques (Garrabou et al., 2001, 2022; Gómez-Gras et al., 2022; Harmelin and Garrabou, 2005; Linares et al., 2005, 2008a). En Méditerranée nord-occidentale, ces anomalies thermiques peuvent être (1) caractérisées par de courtes périodes (2 à 5 jours) avec une température moyenne atteignant plus de 27°C et souvent associées à des variations journalières ou périodiques, ou (2) caractérisées par de longues durées (jusqu’à 1 mois) à une température chaude (24°C) et une faible variation saisonnière (Crisci et al., 2011).

Par ailleurs, des perturbations d’origines anthropiques impactent aussi ces espèces. Les populations de *C. rubrum* sont directement impactées par l’exploitation depuis l’Antiquité (Lo Basso et Raveux, 2018) et montrent aujourd’hui une structuration des populations en classes de tailles perturbée (Garrabou and Harmelin, 2002; Linares et al., 2010; Tsounis et al., 2007, 2006). *P. clavata* est aussi particulièrement menacée par les activités anthropiques telles que la plongée (Coma et al., 2004; Linares et al., 2008b, 2007; Piazzini et al., 2012), les ancragements ou les filets de pêche (Ferrigno et al., 2018).

L’été 2022 a été marqué par des épisodes d’anomalies thermiques historiques (Guinaldo et al., 2023). La température de surface de la Méditerranée a dépassé les 28°C pendant plusieurs jours pendant que les anomalies thermiques atteignaient +4.6°C localement. Une vague de mortalité massive particulièrement meurtrière pour la gorgone rouge (*P. clavata*) a été observée fin août 2022 dans le Parc national des Calanques et a été suivie d’une généralisation du phénomène sur l’ensemble de la façade méditerranéenne française dans des proportions plus ou moins importantes. Plus tardivement durant la fin de l’été et au cours de l’automne 2022 des mortalités ont été observées chez d’autres espèces de gorgonaires comme la gorgone jaune (*E. cavolini*), la gorgone blanche (*E. singularis*) et le corail rouge (*C. rubrum*) connues pour avoir des thermotolérances plus

importantes et qui montrent généralement une mortalité plus tardive que la gorgone rouge.

L'équipe de Septentrion Environnement a pu réaliser un très large échantillonnage du phénomène au sein du Parc national des Calanques (PnCal), du Parc national de Port-Cros (PnPC), du Parc Marin de la Côte Bleue (PMCB) et de la Réserve Naturelle de Scandola (RNS). Ces données ont été agrémentées de données fournies par les gestionnaires du Parc Marin du Golfe du Lion (PNMGL) et de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls (RNCB), du PMCB, et par des données acquises par nos partenaires scientifiques autour du Cap Sicié et au sein du PnPC. L'ensemble de ces données réunies constitue la plus importante base de données acquises lors d'un événement de mortalité massive des populations de gorgones, et offre ainsi une vision globale de l'ampleur de l'événement sur les populations des principales espèces de gorgones le long de la façade méditerranéenne française.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Stratégie d'échantillonnage

La proportion de colonies atteintes par l'épisode de mortalité massive a été estimée en utilisant le protocole T-MEDNet "Rapid Visual Assessment (RVA)". Ce protocole consiste à recenser une centaine de colonies par tranche de profondeur en déterminant si elles sont saines (< 10% de nécrose), atteintes par une nécrose récente, atteintes par une nécrose ancienne, ou atteintes par une nécrose ancienne et une nécrose récente. Ce protocole a été appliqué aux différentes espèces de gorgones étudiées dans ce projet : la gorgone rouge (*Paramuricea clavata*), la gorgone jaune (*Eunicella cavolini*), la gorgone blanche (*Eunicella singularis*) et le corail rouge (*Coralium rubrum*). Ici nous considérons donc qu'une colonie affectée par la mortalité récente est une colonie qui montre un taux de nécrose récent supérieur à 10%. Une nécrose récente se caractérise par l'apparition du squelette nu de la colonie de gorgone considérée.

2.2. Sites étudiés

Au total 6 zones ont été étudiées : La Côte Vermeille (CV) rassemblant des sites situés au sein du Parc Marin du Golfe du Lion (PNMGL) et d'autres au sein de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls (RNCB), le Parc Marin de la Côte Bleue (PMCB), le Parc national des Calanques (PnCal), le Cap Sicié (CS), Le Parc national de Port-Cros (PNPC), et le Réserve Naturelle de Scandola (RNS).

Le nombre de sites échantillonnés au sein de chaque zone était de 8 au sein de la CV, 6 au sein du PMCB, 29 au sein du PnCal, 5 autour du Cap Sicié, 8 au sein du PNPC, et 4 au sein de la RNS.

Le nombre de recensements réalisés était variable entre les zones et variait de 9 pour le Cap Sicié à 216 pour le Parc national des Calanques. L'ensemble des sites et leurs coordonnées GPS ainsi que le détail de chaque recensement sont renseignés en Annexe 1.

2.3. Analyse des données

En fonction de la profondeur à laquelle les recensements ont été réalisés, ils ont été répartis en 4 classes de profondeur (0-10 m, 10-20 m, 20-30 m, 30-40 m). A partir de chaque recensement réalisés a pu être calculé une proportion de colonies affectées par l'événement de mortalité massive (colonies affectées par une nécrose récente et par une nécrose récente + ancienne). En fonction de leur proportion de colonies affectées, les recensements ont été classés par classe de sévérité. Les recensements montraient alors des populations peu affectées (10-30% de colonies affectées), moyennement affectées (30-60% de colonies affectées), ou sévèrement affectées (> 60% de colonies affectées) par l'épisode de mortalité massive de 2022.

3. RÉSULTATS

3.1. Vagues d'anomalies thermiques au sein des zones d'étude

A titre d'illustration des vagues d'anomalies thermiques qui ont touché la façade méditerranéenne française en 2022, les profils de température issues des lignes de thermomètres du réseau T-MEDNet (www.t-mednet.org) situées au sein des zones d'études sont données ci-dessous (Fig. 1 à 5). Les données de température pour la station située au sein de la RNCB ne sont disponibles que de Mai à Août (Fig. 1). Les données de la RNS n'étant pas disponibles pour l'année 2022, la ligne de thermomètre de la station Cannelle située au sein du Parc Marin du Cap Corse de l'Agriate a été utilisée comme proxy (Fig. 5). Les données ne sont en revanche disponibles que pour la période de Mai à Septembre et à partir de 10 m de profondeur. Les données de la ligne de thermomètre située au sein du Parc national de Port-Cros ne sont pas disponibles pour l'année 2022.

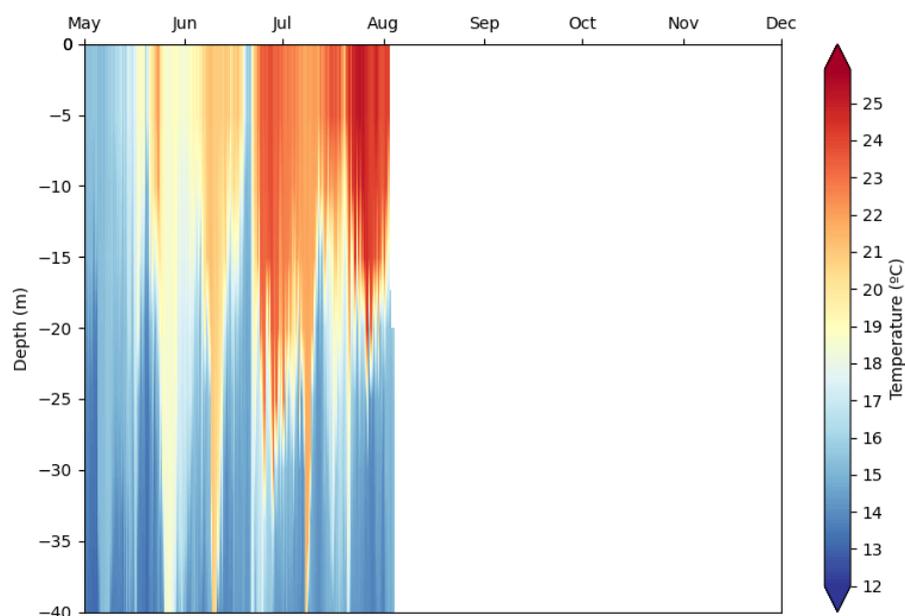


Figure 1. Profil de température de Mai à Août pour la station de Banyuls (Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls). Les données sont fournies par le réseau d'observation régionale de la température T-MEDNet, www.t-mednet.org, site Banyuls, CV/RNCB.

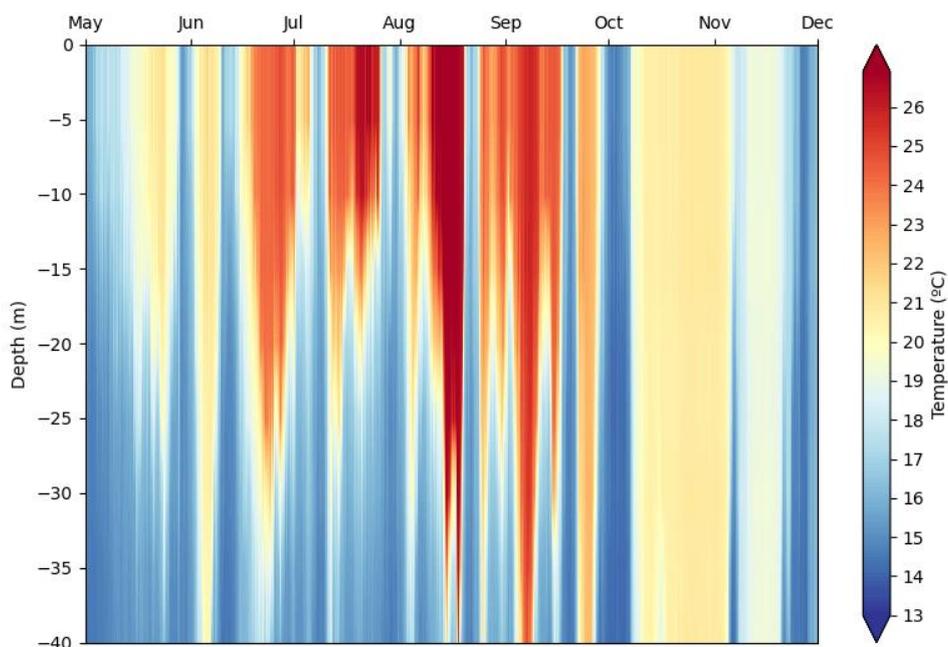


Figure 2. Profil de température de Mai à Décembre pour la station de la calanque de Méjean (Parc Marin de la Côte Bleue). Les données sont fournies par le réseau d'observation régionale de la température T-MEDNet, www.t-mednet.org, site Méjean, PMCB.

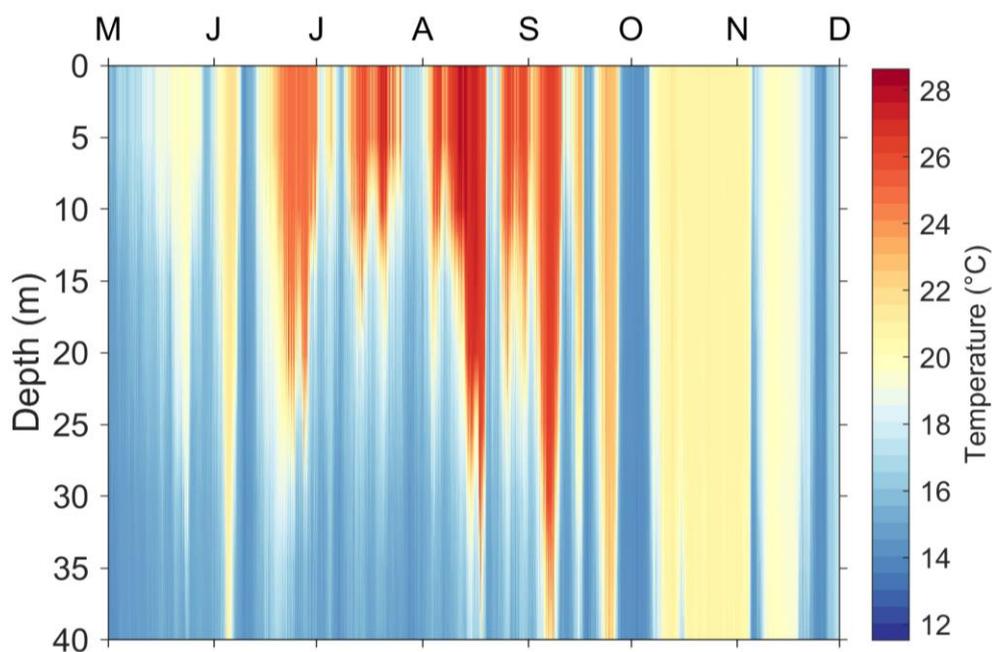


Figure 3. Profil de température de Mai à Décembre pour la station de Riou Sud (Parc national des Calanques). Les données sont fournies par le réseau d'observation régionale de la température T-MEDNet, www.t-mednet.org, site Riou Sud, Dorian Guillemain, OSU Institut Pytheas UMS 3470.

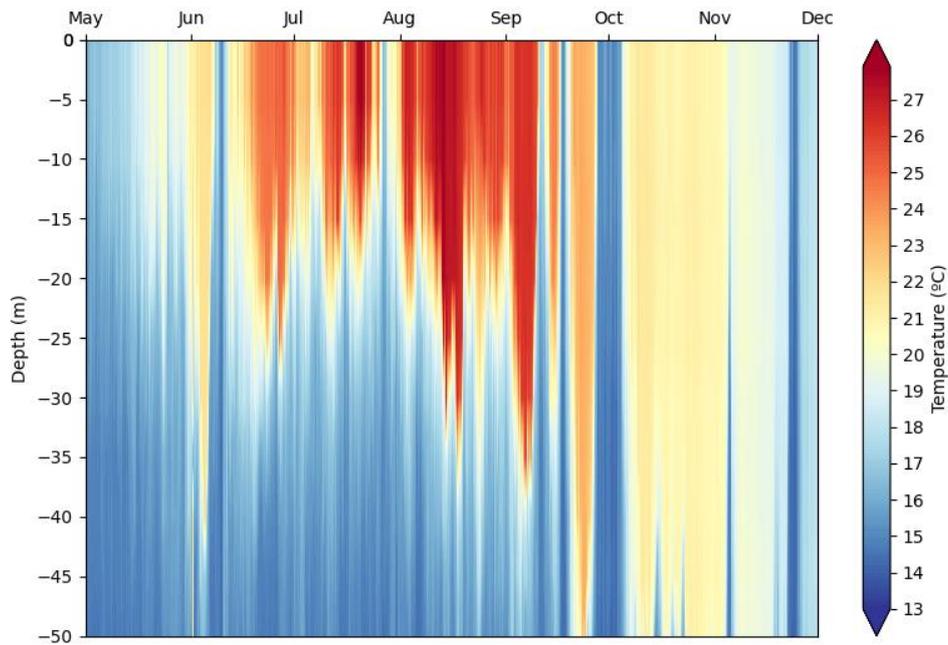


Figure 4. Profil de température de Mai à Décembre pour la station du Cap Sicié. Les données sont fournies par le réseau d'observation régionale de la température T-MEDNet, www.t-mednet.org, site Cap Sicié, IFREMER.

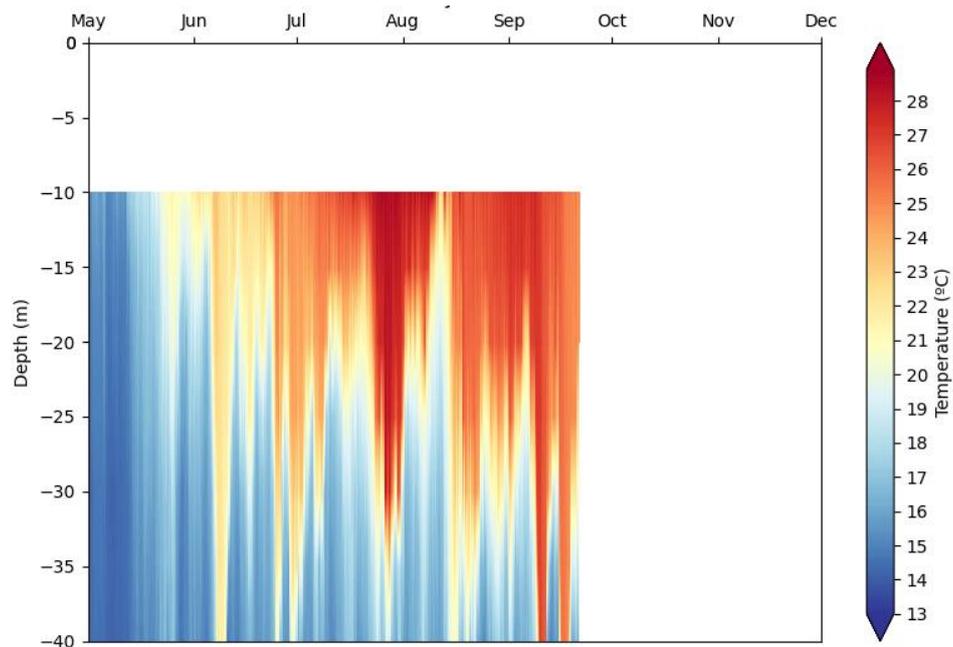


Figure 5. Profil de température de Mai à Septembre pour la station de Canelle (Parc Marin du Cap Corse et de l'Agriate). Les données sont fournies par le réseau d'observation régionale de la température T-MEDNet, www.t-mednet.org, site Canelle, PMCCA.

3.2. Analyse de l'événement à l'échelle de la façade méditerranéenne française

L'événement de mortalité massive des populations de gorgones survenu à la fin de l'été 2022 s'est traduit par une modification drastique du paysage. Les gorgones rouges (*P. clavata*) montrait des nécroses étendues pouvant atteindre 100% de la colonie (Fig. 6). L'échantillonnage à grande échelle le long de la façade méditerranéenne française a permis d'analyser l'ampleur de l'événement de mortalité massive des gorgones de l'été 2022, et les réponses différentielles des populations de gorgones des quatre espèces étudiées. Au total 6 zones ont été étudiées, au sein desquelles 336 recensements ont été réalisés entre 0 et 40 m de profondeur. Le nombre de recensements par espèce et par tranche de profondeur étaient variables en fonction de la zone d'étude (Tab. 1).

Les résultats ont permis d'affirmer que la zone du Parc national des Calanques était la zone qui a été la plus affectée globalement pour les 4 espèces confondues (Fig. 7, Tab. 1). La gorgone rouge (*P. clavata*) était l'espèce la plus affectée par l'événement dans chacune des zones où elle a été étudiée et notamment dans le PnCal où $69 \pm 3\%$ ont été affectées par l'événement de mortalité massive. La gorgone jaune (*E. cavolini*) a été très affectée au sein de la Réserve Naturelle de Scandola ($56 \pm 27\%$ des colonies affectées). Au sein du Parc marin de la Côte Bleue et du PnCal, *E. cavolini* a été moins affectée (environ 20 % de colonies touchées), tandis qu'au sein du Parc national de Port-Cros l'espèce n'a pas été affectée par l'épisode de mortalité massive. La gorgone blanche (*E. singularis*) a été affectée dans des proportions allant de 20% à 30% au sein des 3 zones où l'espèce a été recensée (CV/RNCB, PMCB et PnCal). Enfin, le corail rouge (*C. rubrum*) a été très affecté au sein du PnCal ($43 \pm 5\%$ des colonies affectées) et moyennement affecté au sein de la RNS ($17 \pm 8\%$ des colonies affectées). L'espèce ne semble pas avoir été affectée au sein de la CV/RNCB et semble avoir été très peu affectée au sein du PMCB où un unique recensement a été réalisé (17 % des colonies touchées). De manière générale, ces résultats sont à nuancer au vu du faible nombre de recensement qui a parfois été recensé pour certaines espèces dans certaines zones (Tab. 1).

2012

2022

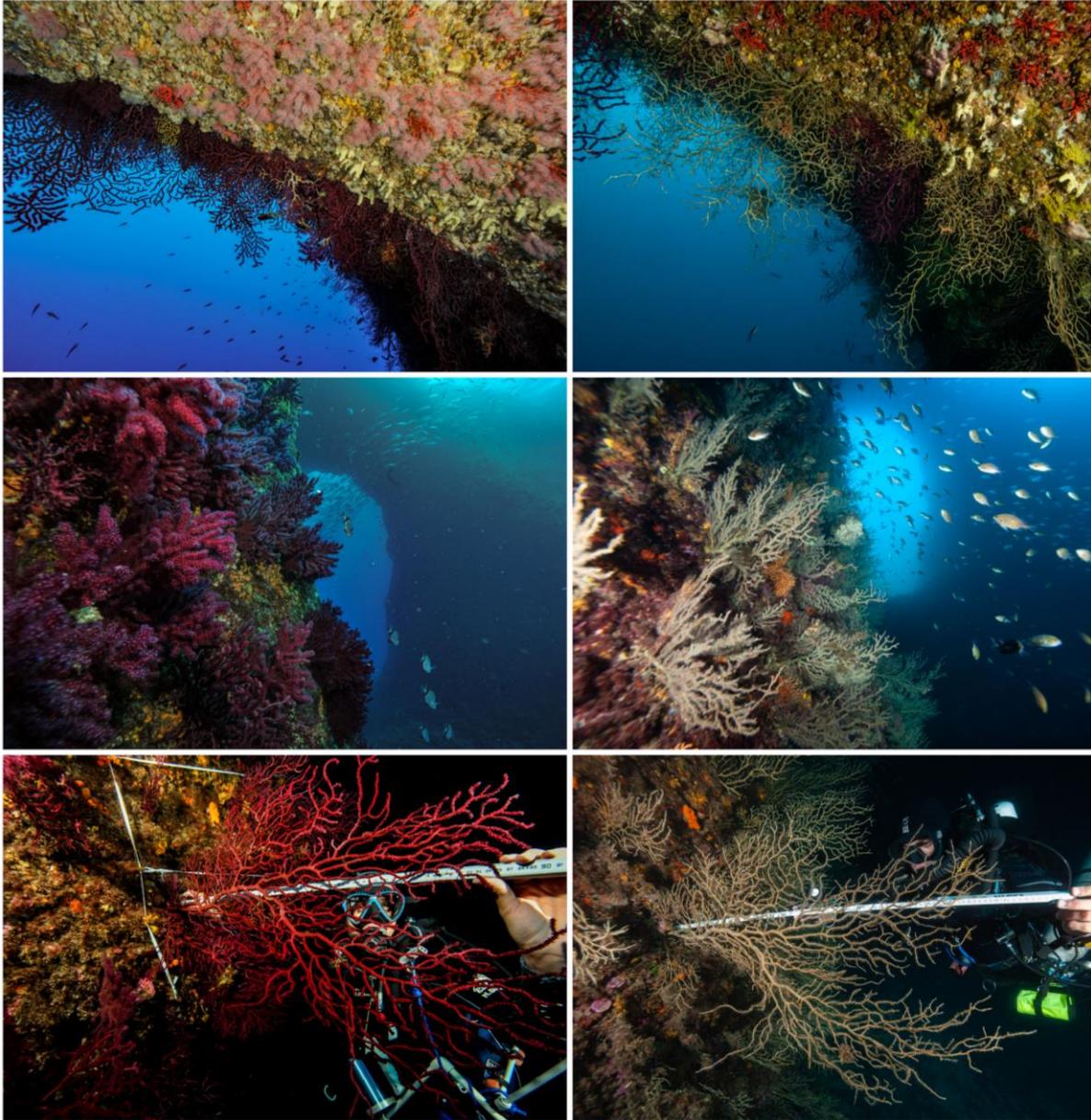


Figure 6. Illustration de l'épisode de mortalité massive chez la gorgone rouge (*Paramuricea clavata*). Les photographies ont été prises dans différents sites du Parc national des Calanques à 10 ans d'intervalle.

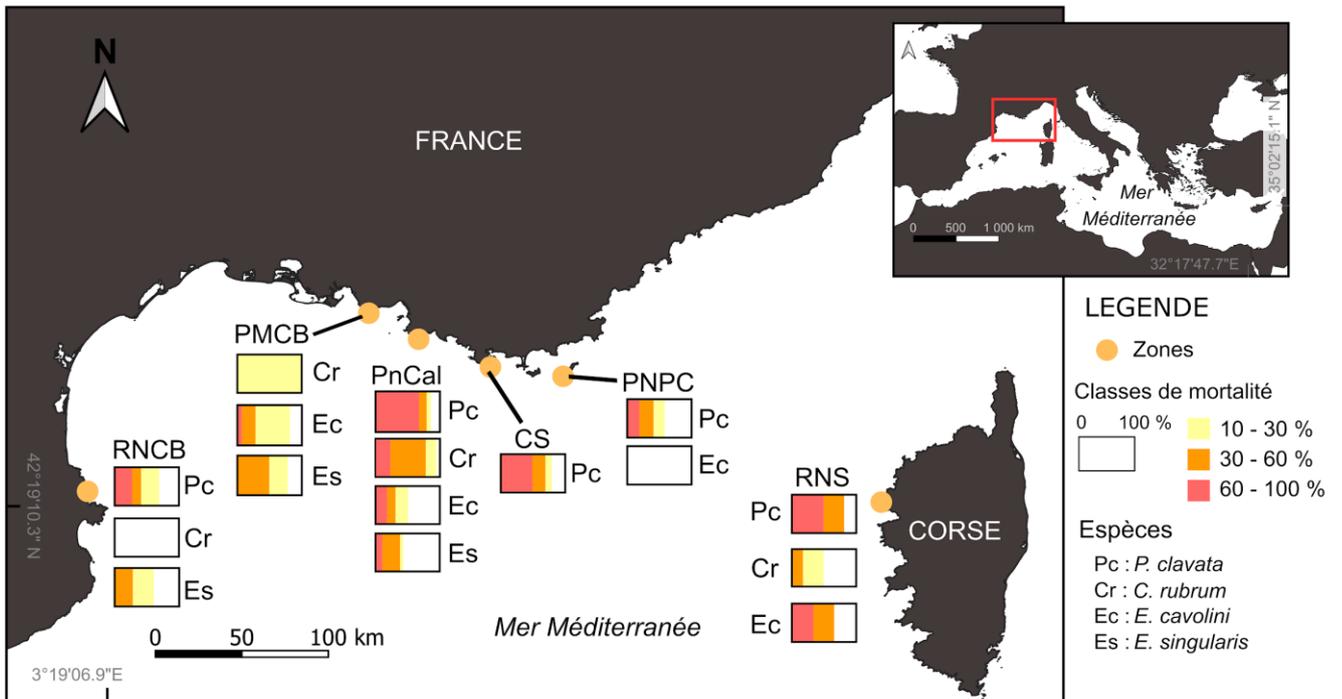


Figure 7. Sévérité d'impact pour les 4 espèces étudiées dans les 6 zones d'échantillonnage réparties le long de la façade méditerranéenne française. RNCB : Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls et Côte Vermeille, PMCB : Parc Marin de la Côte Bleue, PnCal : Parc national des Calanques, CS : Cap Sicié, PNPC : Parc national de Port-Cros, RNS : Réserve Naturelle de Scandola. Les classes de sévérité correspondent à des taux d'impact faible (10-30% de colonies affectées en moyenne par transect), modéré (30-60%), ou sévère (60-100%).

Tableau 1 : Nombre de recensements réalisés et proportion moyenne de colonies atteintes par l'épisode de mortalité de 2022 par zone et par tranche de profondeur. La proportion moyenne de colonies atteintes par tranche de profondeur et par zone est calculée en moyennant la proportion de colonies atteintes pour chaque recensement réalisés au sein de la tranche profondeur et de la zone.

Zone	Espèce	Tranches de profondeur	Nombre de recensements	Proportion moyenne de colonies atteintes
CV/RNCB	<i>P. clavata</i>	TOTAL	15	34 ± 8%
CV/RNCB	<i>P. clavata</i>	0-10 m	-	-
CV/RNCB	<i>P. clavata</i>	10-20 m	6	65 ± 11%
CV/RNCB	<i>P. clavata</i>	20-30 m	9	13 ± 4%
CV/RNCB	<i>P. clavata</i>	30-40 m	-	-
CV/RNCB	<i>C. rubrum</i>	TOTAL	7	2 ± 1%
CV/RNCB	<i>C. rubrum</i>	0-10 m	-	-
CV/RNCB	<i>C. rubrum</i>	10-20 m	-	-
CV/RNCB	<i>C. rubrum</i>	20-30 m	7	2 ± 1%

CV/RNCB	<i>C. rubrum</i>	30-40 m	-	-
CV/RNCB	<i>E. singularis</i>	TOTAL	18	20 ± 4%
CV/RNCB	<i>E. singularis</i>	0-10 m	3	44 ± 6%
CV/RNCB	<i>E. singularis</i>	10-20 m	13	18 ± 3%
CV/RNCB	<i>E. singularis</i>	20-30 m	2	1 ± 1
CV/RNCB	<i>E. singularis</i>	30-40 m	-	-
PMCB	<i>C. rubrum</i>	TOTAL	1	17%
PMCB	<i>C. rubrum</i>	0-10 m	-	-
PMCB	<i>C. rubrum</i>	10-20 m	-	-
PMCB	<i>C. rubrum</i>	20-30 m	1	17 %
PMCB	<i>C. rubrum</i>	30-40 m	-	-
PMCB	<i>E. cavolini</i>	TOTAL	18	25 ± 5%
PMCB	<i>E. cavolini</i>	0-10 m	4	35 +- 11%
PMCB	<i>E. cavolini</i>	10-20 m	8	29 ± 7%
PMCB	<i>E. cavolini</i>	20-30 m	6	13 ± 4%
PMCB	<i>E. cavolini</i>	30-40 m	-	-
PMCB	<i>E. singularis</i>	TOTAL	10	30 ± 6
PMCB	<i>E. singularis</i>	0-10 m	-	-
PMCB	<i>E. singularis</i>	10-20 m	6	36 ± 6%
PMCB	<i>E. singularis</i>	20-30 m	4	21 ± 13%
PMCB	<i>E. singularis</i>	30-40 m	-	-
PnCal	<i>P. clavata</i>	TOTAL	148	69 ± 3%
PnCal	<i>P. clavata</i>	0-10 m	7	80 ± 4%
PnCal	<i>P. clavata</i>	10-20 m	59	80 ± 3%
PnCal	<i>P. clavata</i>	20-30 m	72	67 ± 4%
PnCal	<i>P. clavata</i>	30-40 m	10	9 ± 4%
PnCal	<i>C. rubrum</i>	TOTAL	18	43 ± 5%
PnCal	<i>C. rubrum</i>	0-10 m	1	45 %
PnCal	<i>C. rubrum</i>	10-20 m	10	48 ± 8%
PnCal	<i>C. rubrum</i>	20-30 m	7	35 ± 5%
PnCal	<i>C. rubrum</i>	30-40 m	-	-

PnCal	<i>E. cavolini</i>	TOTAL	29	23 ± 5%
PnCal	<i>E. cavolini</i>	0-10 m	5	5 ± 3%
PnCal	<i>E. cavolini</i>	10-20 m	13	37 ± 8%
PnCal	<i>E. cavolini</i>	20-30 m	11	15 ± 6%
PnCal	<i>E. cavolini</i>	30-40 m	-	-
PnCal	<i>E. singularis</i>	TOTAL	21	20 ± 5%
PnCal	<i>E. singularis</i>	0-10 m	3	38 ± 19%
PnCal	<i>E. singularis</i>	10-20 m	14	22 ± 6%
PnCal	<i>E. singularis</i>	20-30 m	4	3 ± 2%
PnCal	<i>E. singularis</i>	30-40 m	-	-
Cap Sicié	<i>P. clavata</i>	TOTAL	9	49 ± 12%
Cap Sicié	<i>P. clavata</i>	0-10 m	0	-
Cap Sicié	<i>P. clavata</i>	10-20 m	2	88 ± 2%
Cap Sicié	<i>P. clavata</i>	20-30 m	5	43 ± 17%
Cap Sicié	<i>P. clavata</i>	30-40 m	2	24 ± 24%
PNPC	<i>P. clavata</i>	TOTAL	22	29 ± 7%
PNPC	<i>P. clavata</i>	0-10 m	-	-
PNPC	<i>P. clavata</i>	10-20 m	4	71 ± 7%
PNPC	<i>P. clavata</i>	20-30 m	14	26 ± 7%
PNPC	<i>P. clavata</i>	30-40 m	4	0 %
PNPC	<i>E. cavolini</i>	TOTAL	5	2 ± 1%
PNPC	<i>E. cavolini</i>	0-10 m	-	-
PNPC	<i>E. cavolini</i>	10-20 m	2	2 ± 2%
PNPC	<i>E. cavolini</i>	20-30 m	2	2 ± 2%
PNPC	<i>E. cavolini</i>	30-40 m	1	0%
RNS	<i>P. clavata</i>	TOTAL	6	59 ± 14%
RNS	<i>P. clavata</i>	0-10 m	-	-
RNS	<i>P. clavata</i>	10-20 m	2	90 ± 10%
RNS	<i>P. clavata</i>	20-30 m	4	43 ± 15%
RNS	<i>P. clavata</i>	30-40 m	-	-
RNS	<i>C. rubrum</i>	TOTAL	6	17 ± 8%

RNS	<i>C. rubrum</i>	0-10 m	-	-
RNS	<i>C. rubrum</i>	10-20 m	-	-
RNS	<i>C. rubrum</i>	20-30 m	6	17 ± 8%
RNS	<i>C. rubrum</i>	30-40 m	-	-
RNS	<i>E. cavolini</i>	TOTAL	3	56 ± 27%
RNS	<i>E. cavolini</i>	0-10 m	-	-
RNS	<i>E. cavolini</i>	10-20 m	1	100%
RNS	<i>E. cavolini</i>	20-30 m	2	34 ± 26%
RNS	<i>E. cavolini</i>	30-40 m	-	-

3.3. Etat des lieux au sein de la Côte Vermeille et de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls

Au sein de la Côte Vermeille et de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls (CV/RNCB), la gorgone rouge, *P. clavata*, était l'espèce la plus affectée, comme dans l'ensemble des zones où elle a été recensée. Au global sur les 15 recensements réalisés, 34 ± 8% des colonies de *P. clavata* étaient affectées par l'événement de mortalité. Au sein de la tranche de profondeur 10-20 m, en moyenne 65% des colonies recensées sur chaque recensement ont été affectées, tandis que cette valeur descendait à 13% pour la tranche de profondeur 20-30 m (Fig. 8). Entre 10 m et 20 m de profondeur la majorité des recensements réalisés (67%, n = 4) montraient des populations sévèrement atteintes (entre 60% et 100% des colonies affectées) par l'épisode de mortalité massive. Entre 20 m et 30 m de profondeur la majorité des recensements (44%, n = 4) montraient des populations faiblement atteintes (entre 10% et 30% des colonies affectées; Fig. 9).

La gorgone blanche, *E. singularis*, montraient une proportion moyenne de colonies affectées par recensement de 20 ± 4%. Entre la surface et 10 m de profondeur, les recensements réalisés comprenait en moyenne 44% de colonies affectées par la mortalité récente (Fig. 8). Entre 10 m et 20 m de profondeur cette moyenne descendait à 18%; pour n'atteindre que 1% entre 20 m et 30 m. Entre la surface et 10 m de profondeur, l'ensemble des recensements réalisés (100% n = 3) montraient des populations modérément affectées (entre 30% et 60 % des colonies affectées). Entre 10 m et 20 m de profondeur, la majorité des populations recensées étaient faiblement affectées (Fig. 9).

Les populations de corail rouge, *C. rubrum*, recensées au sein de la CV/RNCB (n = 7) étaient toutes situées entre 20 m et 30 m de profondeur et n'ont pas été affectées par l'épisode de mortalité massive. Seulement 2 ± 1% des colonies montraient des nécroses récentes (Fig. 8).

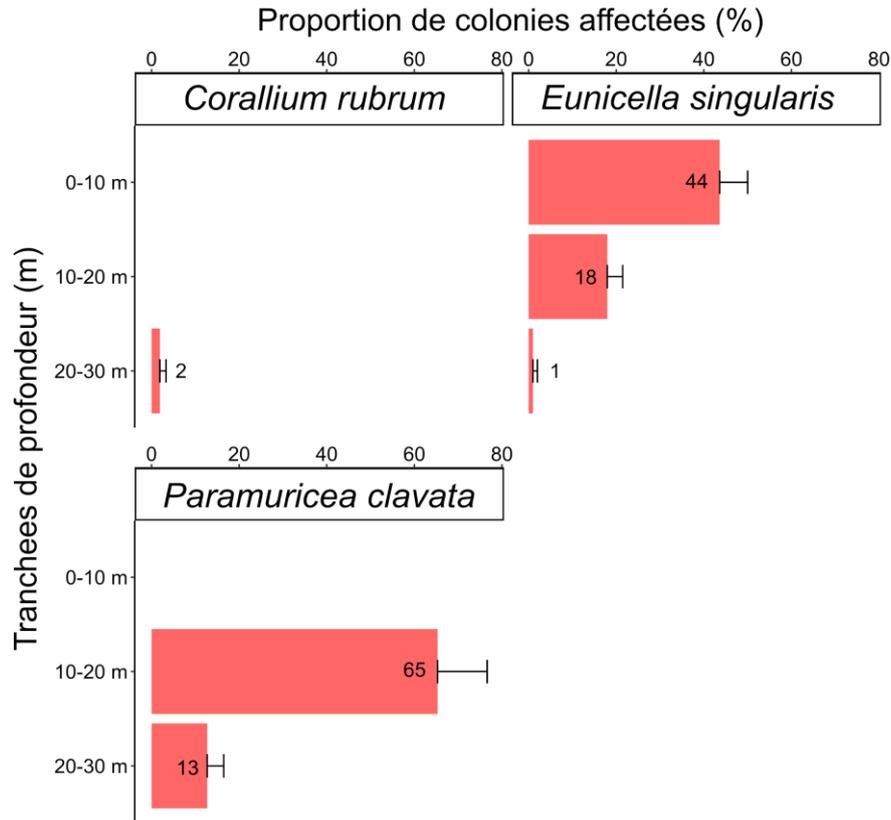


Figure 8. Proportion moyenne de colonies affectées par recensement effectuées par tranche de profondeur durant l'épisode de mortalité massive de 2022 pour les 3 espèces recensées au sein de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls. Les barplots indiquent la valeur moyenne, précisée également en valeur numérique, et les moustaches correspondent à la valeur positive de l'erreur standard.

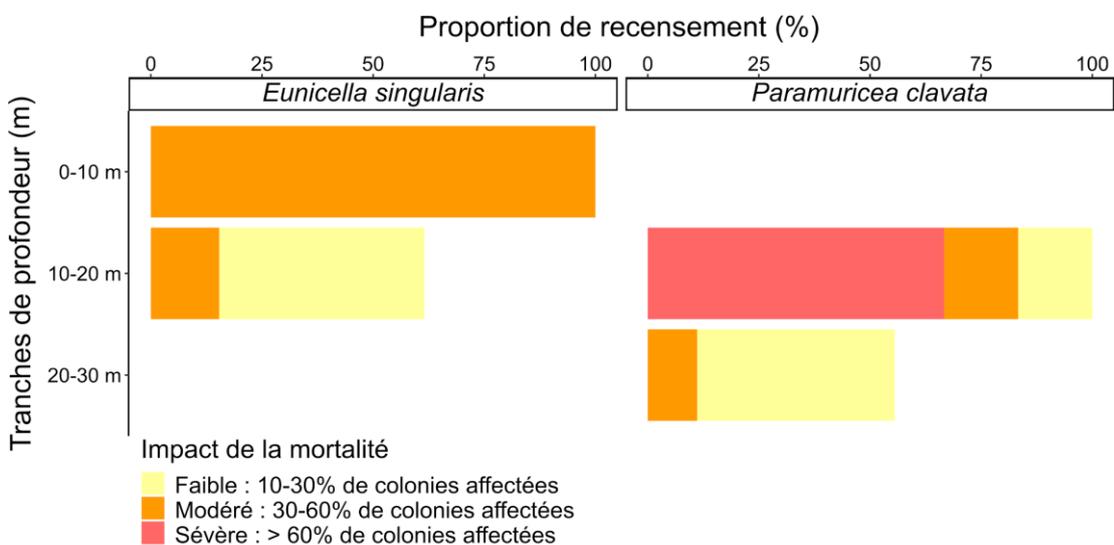


Figure 9. Proportion de recensement répartis par classe de sévérité d'impact pour chaque tranche de profondeur pour les 2 espèces recensées au sein de la Réserve naturelle de Cerbère Banyuls.

3.4. Etat des lieux au sein du Parc Marin de la Côte Bleue

Au sein du Parc Marin de la Côte Bleue (PMCB), les populations de gorgones rouges n'étant pas nombreuses et/ou pas très denses dans les premières tranches de profondeur, l'espèce n'a donc pas été recensée.

Au sein du PMCB c'est la gorgone blanche, *E. singularis*, qui était l'espèce la plus affectée par l'événement de mortalité massive avec des recensements qui montraient en moyenne $30 \pm 6\%$ de colonies affectées. L'espèce n'a pas été recensée au-dessus de 10 m de profondeur, mais entre 10 m et 20 m, les recensements réalisés comprenaient en moyenne 36% de colonies affectées, tandis que cette valeur était de 21 % à 20-30 m (Fig. 10). Pour la tranche de profondeur 10-20 m, la majorité des populations recensées était modérément affectée par l'épisode de mortalité massive (67%, $n = 4$; Fig. 11). Entre 20 m et 30 m de profondeur, la moitié des recensements montraient des populations non affectées (5%, $n = 2$), tandis que les autres populations étaient pour l'une faiblement affectée et pour l'autre modérément affectée.

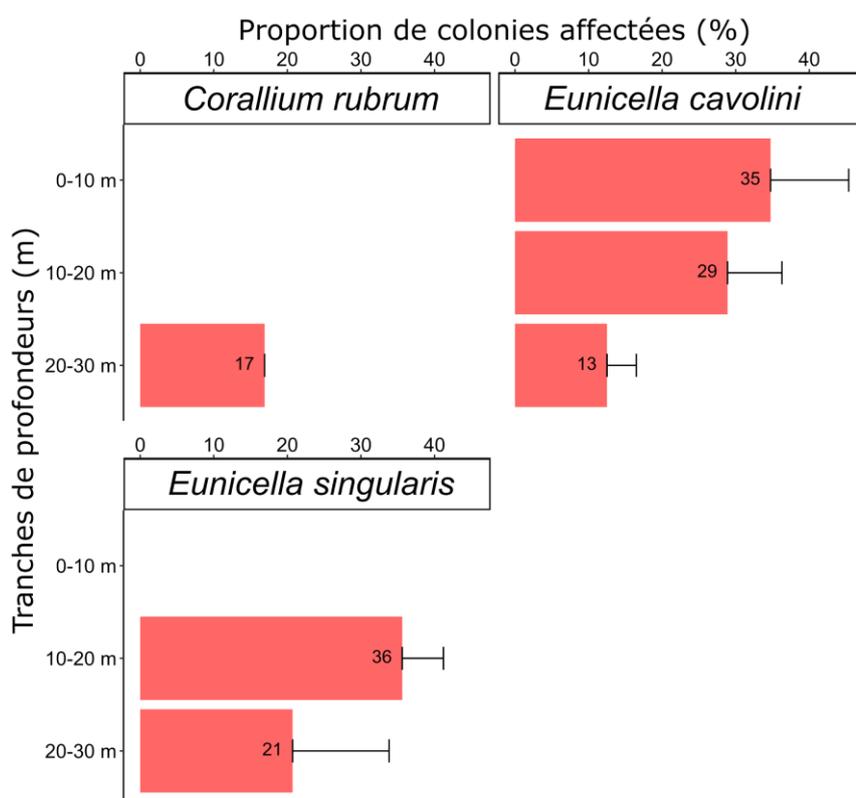


Figure 10. Proportion moyenne de colonies affectées par recensement effectuées par tranche de profondeur durant l'épisode de mortalité massive de 2022 pour les 3 espèces recensées au sein du Parc Marin de la Côte Bleue. Les barplots indiquent la valeur moyenne, précisée également en valeur numérique, et les moustaches correspondent à la valeur positive de l'erreur standard.

La gorgone jaune, *E. cavolini*, étaient également affectées par l'épisode de mortalité massive de 2022. Sur l'ensemble des recensements réalisés, $25 \pm 5\%$ des colonies étaient affectées (Fig. 10). Les tranches de profondeur les plus affectées étaient 0-10 m et 10-20 m avec des recensements qui montraient en moyenne 35% et 29% de colonies affectées respectivement. Entre 20 m et 30 m de profondeur les recensements réalisés montraient en moyenne 13% de colonies affectées (Fig. 10). Entre la surface et 10 m de profondeur les populations recensées étaient pour moitié faiblement affectées (50%, n = 2; Fig. 11) et pour moitié modérément affectées (50%, n = 2). Entre 10 m et 20 m de profondeur la majorité des populations recensées étaient faiblement affectées (50%, n = 4). Enfin, entre 20 m et 30 m l'ensemble des populations qui ont été affectées l'étaient faiblement (67%, n = 4) tandis que les autres populations n'étaient pas affectées (moins de 10% de colonies affectées).

L'unique population de corail rouge recensée au sein du PMCB était située dans la tranche de profondeur 20-30 m et étaient faiblement affectées (17% de colonies affectées; Fig 5, 6).

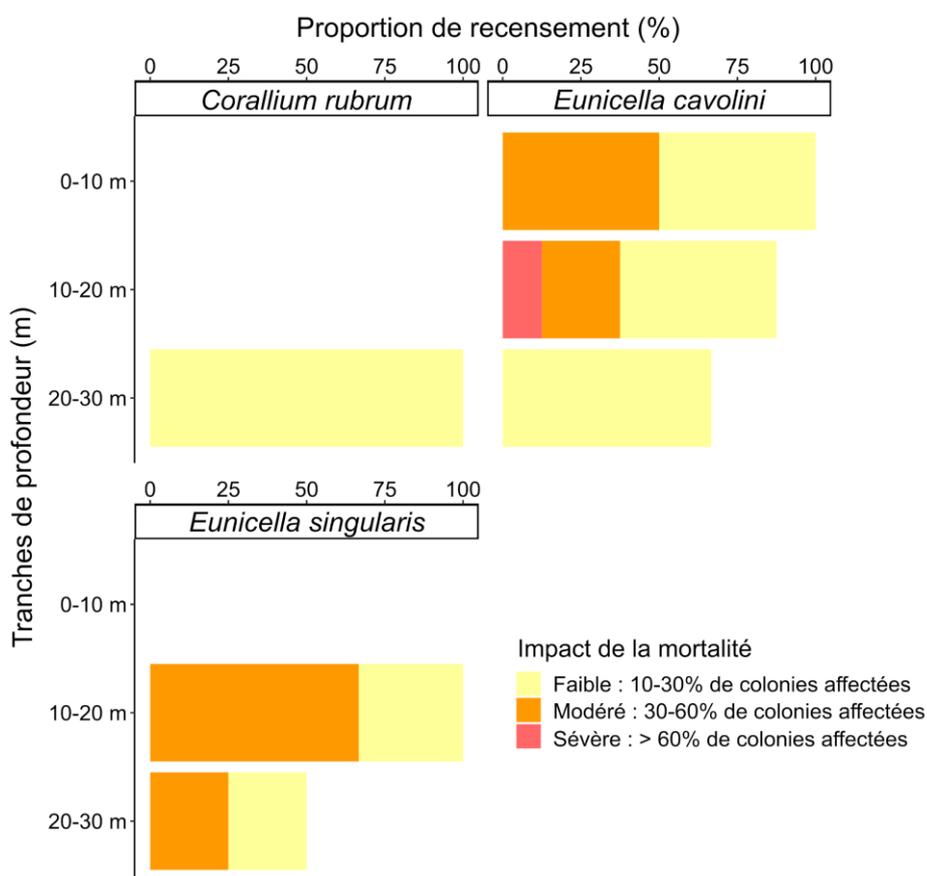


Figure 11. Proportion de recensement répartis par classe de sévérité d'impact pour chaque tranche de profondeur pour les 3 espèces recensées au sein du Parc Marin de la Côte Bleue.

3.5. Etat des lieux au sein du Parc national des Calanques

Le Parc national des Calanques (PnCal) était de loin la zone où le plus de recensement ont été réalisés pour l'ensemble des 4 espèces. En effet, 148 populations de *P. clavata*, 18 de *C. rubrum*, 29 de *E. cavolini*, et 21 de *E. singularis* ont été recensées.

La gorgone rouge, *P. clavata*, était l'espèce la plus affectée avec des recensements qui montraient en moyenne $69 \pm 3\%$ de colonies affectées. Les tranches de profondeur 0-10 m et 10-20 m étaient très impactées, avec des recensements contenant en moyenne 80% de colonies affectées. Entre 20 m et 30 m de profondeur, les recensements montraient 67% de colonies affectées, ce qui fait du PnCal la zone où les populations de *P. clavata* vivant dans cette tranche de profondeur étaient les plus impactées. Entre 30 m et 40 m de profondeur, les recensements réalisés comprenaient en moyenne 9% de colonies affectées. Entre la surface et 10 m de profondeur, l'ensemble des recensements réalisés montraient des populations de *P. clavata* sévèrement affectées (100%, n = 7; Fig. 13). Les tranches de profondeur 10-20 m et 20-30m montraient en majorité des populations sévèrement affectées avec 83% (n = 49) et 63% (n = 45) des recensements situés dans cette classe de sévérité respectivement. Entre 30 m et 40 m, la majorité des populations n'étaient pas affectées (n = 7).

Au sein du PnCal, *C. rubrum* a également été particulièrement affectée avec des recensements qui montraient en moyenne $43 \pm 5\%$ de colonies affectées. Pour la tranche de profondeur 0-10 m, un seul recensement a été réalisé et montrait une population modérément affectée (Fig. 13) au sein de laquelle 45% des colonies étaient touchées par la mortalité massive (Fig. 12). Pour les tranches de profondeur 10-20 m et 20-30 m, les recensements comprenaient en moyenne 48% et 35% de colonies affectées respectivement. Entre 10 m et 20 m de profondeur, une proportion notable de populations étaient sévèrement affectées (40%, n = 4) et modérément affectée (40%, n = 4), tandis qu'une population située au sein de la Calanques de Figuerolles (15 m de profondeur) ne semblaient pas affectée (3% de colonies montrant des nécroses récentes). Entre 20 m et 30 m de profondeur, la majorité des populations étaient modérément affectées (71%, n = 5). Aucune mortalité de corail rouge n'a été observée au-delà de 25 m de profondeur.

La gorgone jaune, *E. cavolini*, était globalement moins affectées au sein du Parc national des Calanques que dans les autres zones d'étude (Fig. 7). Globalement, les recensements montraient $23 \pm 5\%$ de colonies affectées, mais les populations situées entre la surface et 10 m de profondeur semblaient assez résistantes puisque les recensements réalisés (n = 5) comprenaient en moyenne 5 % de colonies touchées (Fig. 7) et montraient des populations majoritairement non affectées par l'événement (80%, n = 4; Fig. 13). Entre 10 m et 20 m de profondeur les recensements réalisés comprenaient en moyenne 37% de colonies touchées. Cette valeur tombait à 15% pour la tranche de profondeur 20-30 m. Entre 10 m et 20 m de profondeur, la majorité des populations étaient sévèrement affectées (30%, n = 4). Entre 20 m et 30 m de profondeur, la majorité des populations n'étaient pas affectées (55 %, n = 6), mais une part non négligeable étaient faiblement affectée (27%, n = 3).

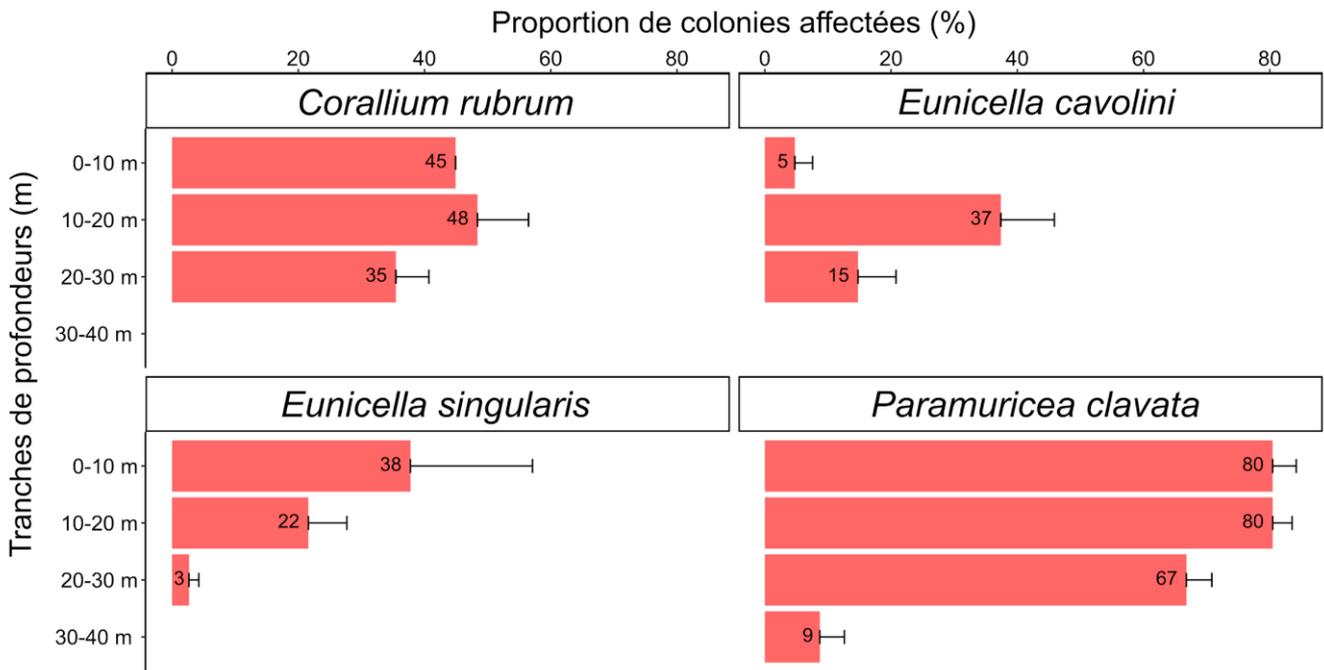


Figure 12. Proportion moyenne de colonies affectées par recensement effectuées par tranche de profondeur durant l'épisode de mortalité massive de 2022 pour les 4 espèces recensées au sein du Parc national des Calanques. Les barplots indiquent la valeur moyenne, précisée également en valeur numérique, et les moustaches correspondent à la valeur positive de l'erreur standard.

La gorgone blanche, *E. singularis*, montrait des populations très affectées (Fig. 7). Globalement les recensements réalisés comprenaient $20 \pm 5\%$ de colonies affectées par la mortalité massive. Entre la surface et 10 m, les recensements réalisés comprenaient en moyenne 38% de colonies affectées (Fig. 12). Entre 10 m et 20 m de profondeur, les recensements comprenaient en moyenne 22% de colonies affectées. Enfin, entre 20 m et 30 m de profondeur, les populations recensées ($n = 4$) n'étaient pas affectées par l'événement de mortalité massive (Fig. 13) et comprenaient seulement 3% de colonies nécrosées en moyenne. Entre la surface et 10 m de profondeur, sur les 3 populations recensées, la première était sévèrement affectée (Fig. 13), la deuxième modérément affectée, et la troisième n'était pas affectée ($< 10\%$ de colonies nécrosées récemment). Enfin, entre 10 m et 20 m, la majorité des populations n'étaient pas affectées (50%, $n = 7$), mais 35% d'entre elles étaient modérément affectées ($n = 5$), tandis qu'une seule population était sévèrement affectée.

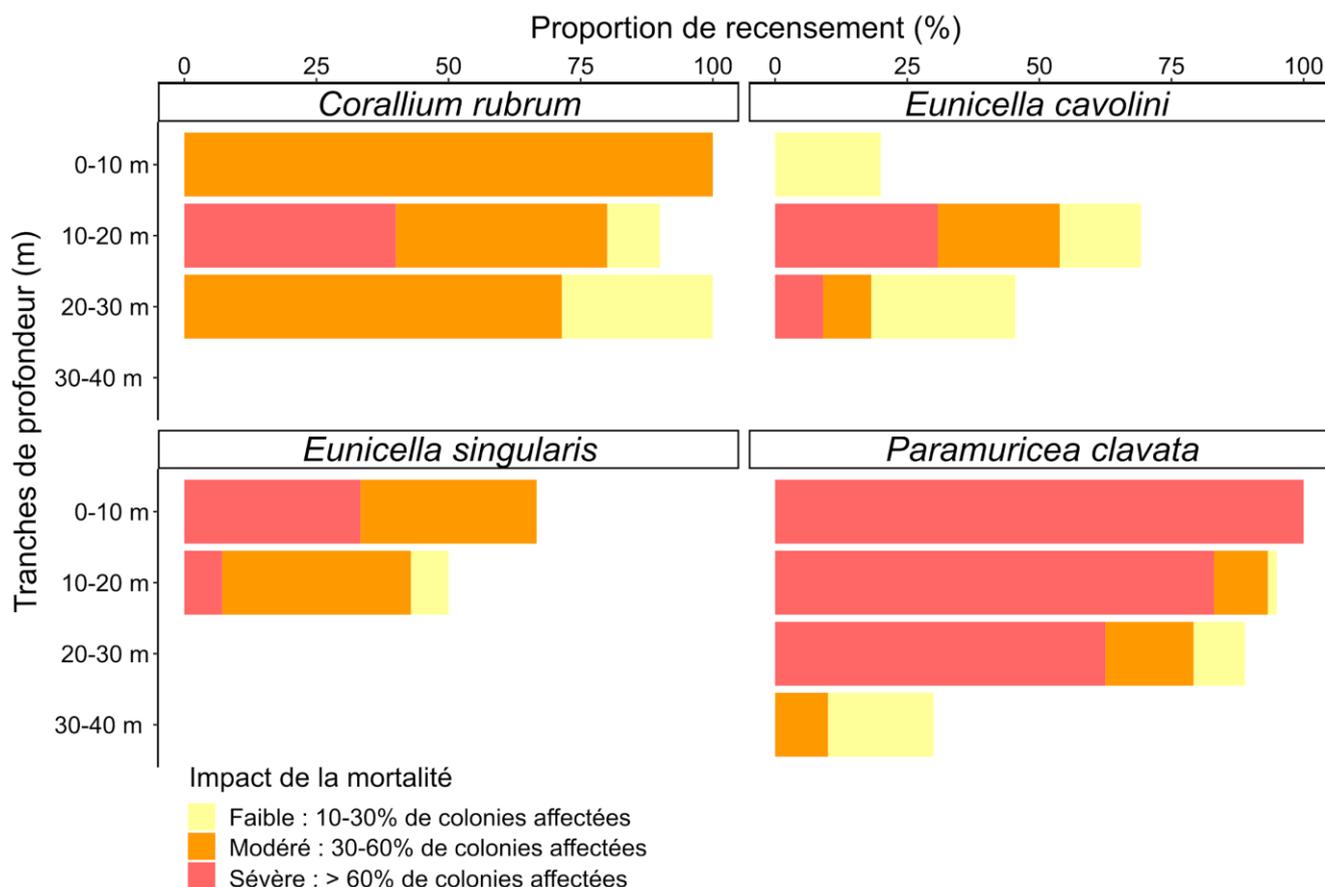


Figure 13. Proportion de recensement répartis par classe de sévérité d'impact pour chaque tranche de profondeur pour les 4 espèces recensées au sein du Parc national des Calanques.

3.6. Etat des lieu autour du Cap Sicié

Sur les sites situés autour du Cap Sicié (CS), la seule espèce qui a été recensée était *P. clavata*. En moyenne les recensements réalisés montraient $49 \pm 12\%$ de colonies affectées (Tab. 1). L'espèce a été particulièrement affectée dans la tranche de profondeur 10-20 m (Fig. 14 et 15), puisque les recensements réalisés contenaient en moyenne 88% de colonies affectées par l'épisode de mortalité. C'est également dans cette zone que la tranche de profondeur 30-40 m était la plus affectée avec des recensements qui contenaient en moyenne 24% de colonies affectées par l'événement de mortalité de 2022. Ces résultats sont cependant à nuancer puisque seulement 2 recensements ont été réalisés sur chacune de ces deux tranches de profondeur.

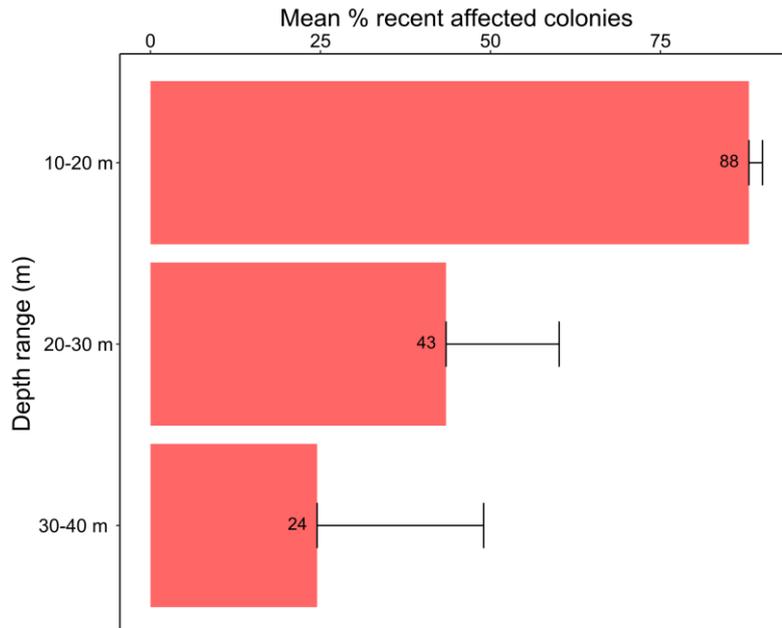


Figure 14. Proportion moyenne de colonies de *P. clavata* affectées par recensement effectuées par tranche de profondeur durant l'épisode de mortalité massive de 2022 sur les sites situés autour du Cap Sicié. Les barplots indiquent la valeur moyenne, précisée également en valeur numérique, et les moustaches correspondent à la valeur positive de l'erreur standard.

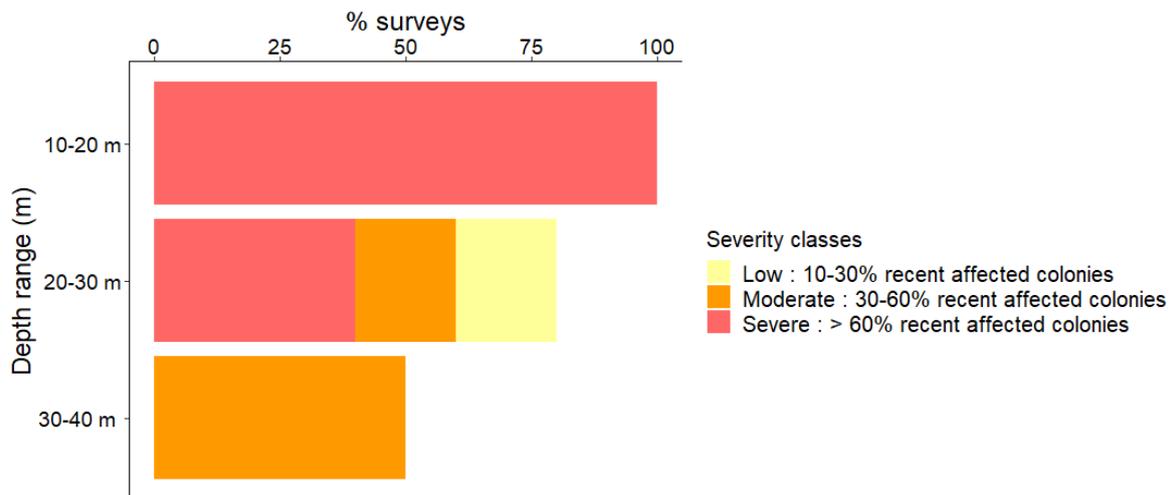


Figure 15. Proportion de recensement répartis par classe de sévérité d'impact pour chaque tranche de profondeur pour *P. clavata* sur les sites situés autour du Cap Sicié.

3.7. Etat des lieux au sein du Parc national de Port-Cros

Au sein du Parc national de Port Cros (PNPC) les populations de gorgones rouges (*P. clavata*) ont été recensées entre 10 m et 40 m de profondeur. En moyenne les populations recensées montraient $29 \pm 7\%$ de colonies affectées par l'épisode de mortalité de 2022 (Tab. 1). La tranche de profondeur 10-20 m était la plus affectée avec des recensements qui montraient en moyenne $71 \pm 7\%$ de colonies touchées par la mortalité massive (Fig. 16). Dans cette tranche de profondeur, 75% des recensements réalisés montraient des populations sévèrement affectées (Fig. 17).

La gorgone jaune (*E. cavolini*) ne semblait pas avoir été affectée par l'épisode de mortalité de 2022 au sein du PNPC. Les très rares nécroses peu étendues ne peuvent pas être reliées directement à cet événement de mortalité massive. Cette observation est à considérer avec parcimonie puisque seulement 5 populations ont été recensées pour cette espèce. Néanmoins, il se pourrait également que les populations recensées montraient des adaptations au changement de contexte thermique ayant lieu lors des vagues de chaleur marine.

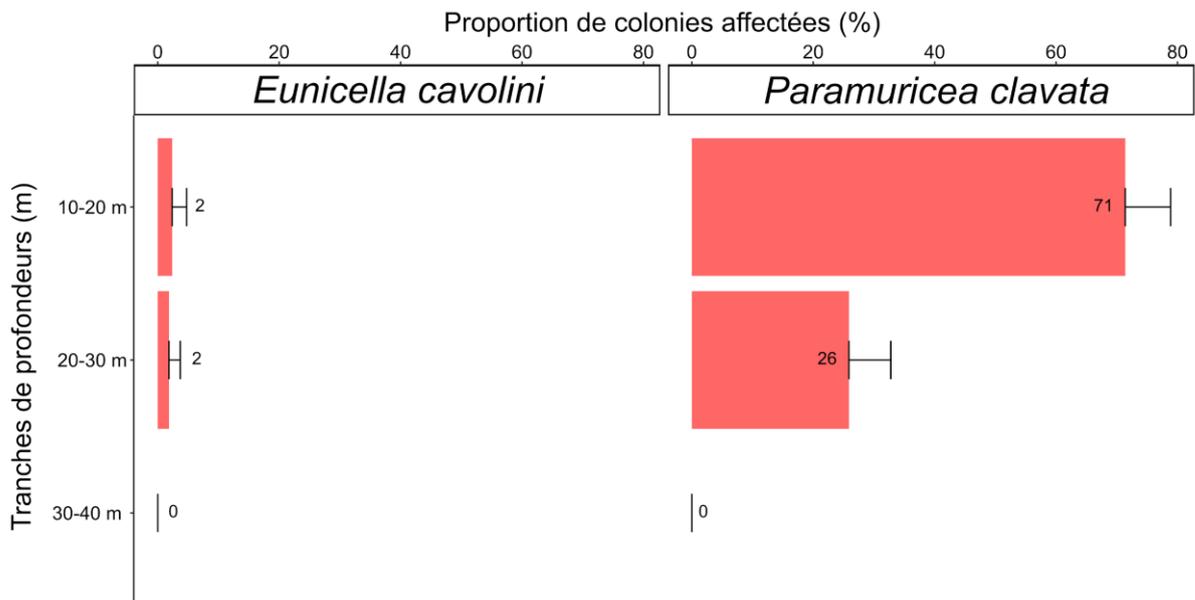


Figure 16. Proportion moyenne de colonies affectées par recensement effectuées par tranche de profondeur durant l'épisode de mortalité massive de 2022 pour les 2 espèces recensées au sein du Parc national de Port-Cros. Les barplots indiquent la valeur moyenne, précisée également en valeur numérique, et les moustaches correspondent à la valeur positive de l'erreur standard.

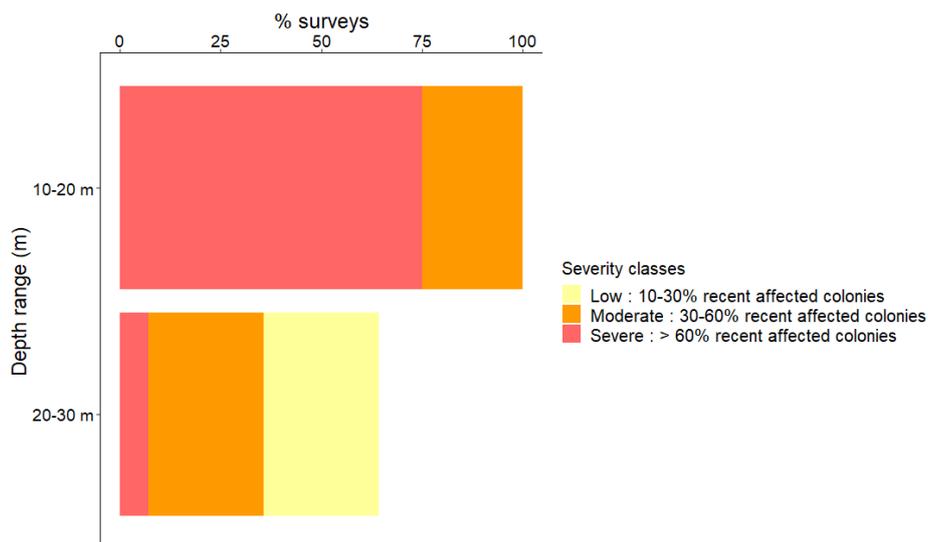


Figure 17. Proportion de recensement répartis par classe de sévérité d'impact pour chaque tranche de profondeur pour *P. clavata* au sein du Parc national de Port-Cros. Les résultats pour *E. cavolini* ne sont pas présentés puisque que l'espèce n'a pas été impactée au sein du PNPC.

3.8. Etat des lieux au sein de la Réserve naturelle Scandola

La Réserve Naturelle de Scandola (RNS) a la particularité d'avoir été déjà fortement impactée par des événements de mortalité massive par la passé. En 2022, la RNS était la zone où la gorgone rouge (*P. clavata*) était le plus impactée dans la tranche de profondeur 10–20 m, avec des recensements qui possédaient en moyenne $90 \pm 10\%$ de colonies affectées par l'événement de mortalité (Fig. 18). L'ensemble des populations de *P. clavata* recensées dans la RNS étaient sévèrement ou moyennement impactées (Fig. 19).

La RNS est également la zone où la gorgone jaune (*E. cavolini*) a été le plus impactée (Fig. 18 et 19) avec des recensements qui montraient en moyenne $56 \pm 27\%$ de colonies impactées par l'événement de mortalité massive de 2022. L'unique recensement réalisée dans la tranche de profondeur 10–20 m contenait 100% de colonies affectées (Fig. 18). Ces moyennes sont néanmoins à nuancer au vu du faible échantillonnage réalisé dans la zone (Tab. 1).

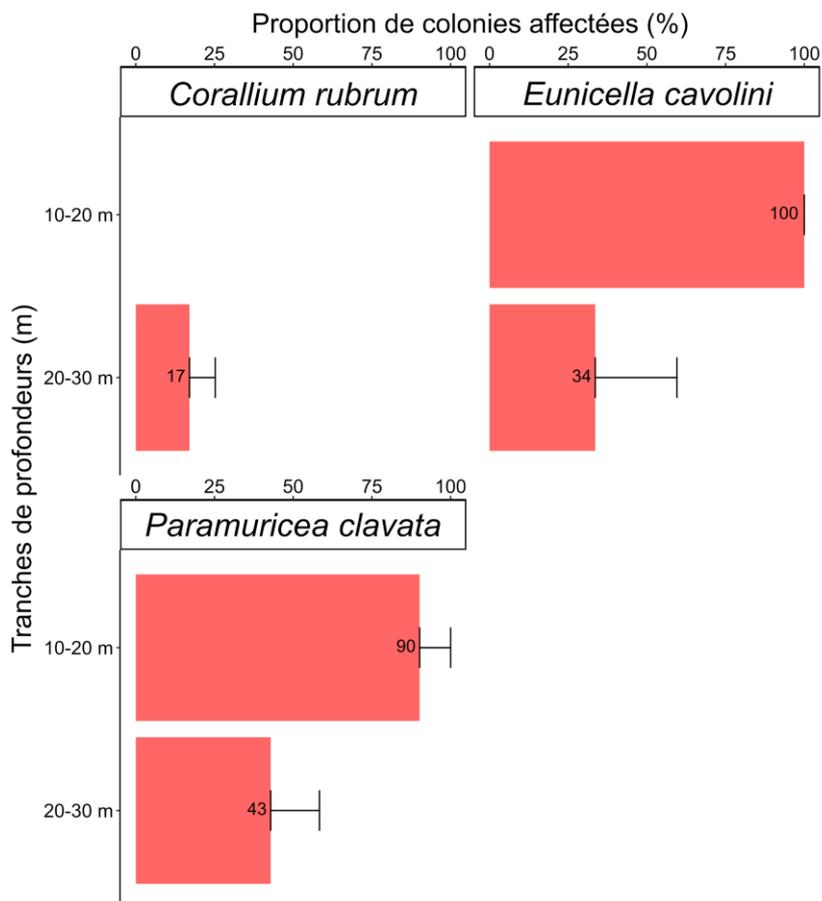


Figure 18. Proportion moyenne de colonies affectées par recensement effectuées par tranche de profondeur durant l'épisode de mortalité massive de 2022 pour les 3 espèces recensées au sein de la Réserve Naturelle de Scandola. Les barplots indiquent la valeur moyenne, précisée également en valeur numérique, et les moustaches correspondent à la valeur positive de l'erreur standard.

Les populations de corail rouge (*C. rubrum*) ont été recensées uniquement entre 20 m et 30 m de profondeur. Les 6 recensements réalisés montraient en moyenne $17 \pm 8\%$ de colonies affectées par l'événement de mortalité récente. Les observations étaient globalement disparates puisque sur le site de Palazzu on retrouvait 57% de colonies affectées à 21 m de profondeur et 13% à 25 m de profondeur. Sur le site de la Grotte à Jo, située non loin du site de Palazzu, on retrouvait à 21 m de profondeur seulement 6% de colonies affectées et 8% à 25 m. Les populations de *C. rubrum* de Scandola semblent donc montrer des réponses différentielles face à la vague d'anomalies thermiques de l'été 2022.

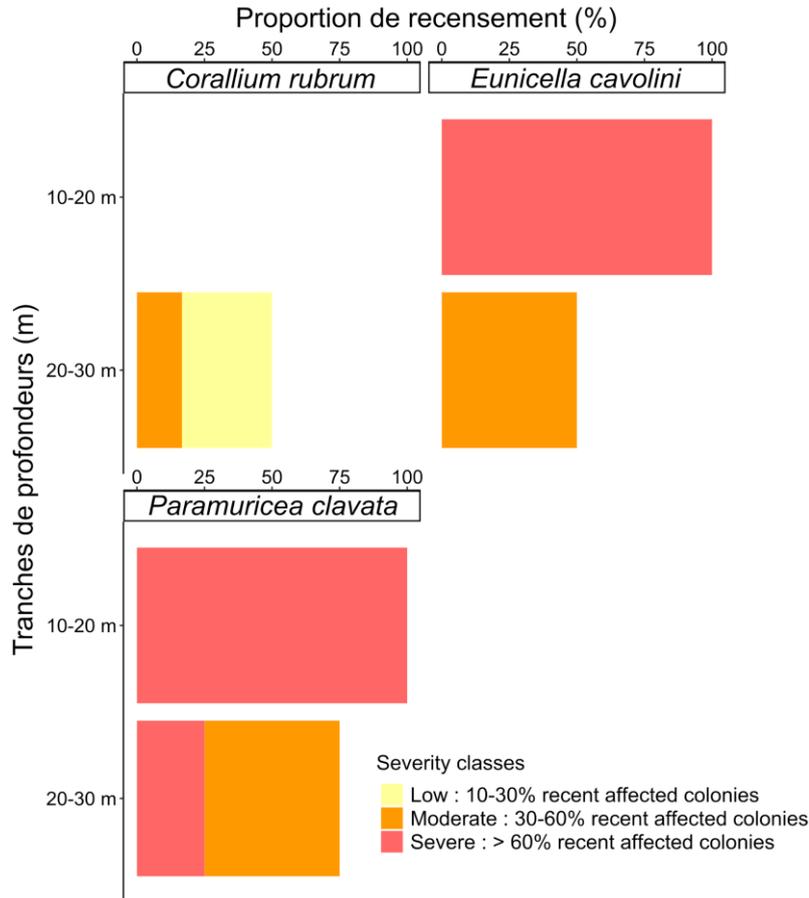


Figure 19. Proportion de recensement répartis par classe de sévérité d'impact pour chaque tranche de profondeur pour les 3 espèces recensées au sein de la Réserve naturelle de Scandola.

4. DISCUSSION & CONCLUSION

L'épisode de mortalité massive des organismes benthiques survenue suite aux anomalies thermiques observées durant l'été et l'automne 2022 a atteint des records. Globalement, cet événement de mortalité massive a grandement affecté les 4 principales espèces de gorgones vivant dans les premières tranches de profondeur en Méditerranée que sont la gorgone rouge (*P. clavata*), la gorgone jaune (*E. cavolini*), la gorgone blanche (*E. singularis*) et le corail rouge (*C. rubrum*). Des exceptions ont néanmoins été observées puisque au sein de la Côte Vermeille et de la Réserve Naturelle de Cerbère Banyuls (CV/RNCB), *C. rubrum* ne semble pas avoir été impactée par cette épisode de mortalité, tout comme *E. cavolini* au sein du Parc national de Port-Cros.

Au sein du Parc national des Calanques, l'événement est clairement le plus meurtrier jamais enregistré. La proportion de colonies de gorgones rouges (*P. clavata*) affectées au sein du PnCal est 142% supérieure au précédent record enregistré en 2003. Au sein du PnCal, en lien avec les régimes de mistral (vent du N-NO) et les apports d'eaux froides chargées en nutriment grâce aux *upwellings*, il existait avant cet épisode des populations remarquables de *P. clavata* vivant à moins de 20 m de profondeur. Cette caractéristique est propre au PnCal, puisque dans les autres zones comme le PNPC ou le CS, ces populations superficielles avaient bien plus souffert des épisodes de mortalités massives

précédents. L'existence de ces populations denses à faible profondeur au sein du PnCal a donc participé à faire du PnCal la zone où les populations de *P. clavata* étaient les plus touchées.

L'ensemble des résultats présentés dans ce rapport sont à nuancer en fonction du nombre d'observations réalisées au sein de chaque zone, en fonction de la profondeur et pour les 4 espèces étudiées. En effet, au sein du PnCal, l'échantillonnage réalisé était beaucoup plus important qu'au sein des autres zones d'étude. Dans certaines zones très peu de recensement ont parfois été réalisés pour certaines espèces (e.g. une seule population de *C. rubrum* recensée au sein du PMCB, Tab. 1). Au sein du PnCal l'échantillonnage peut donc être considéré comme robuste et offrant une vision exhaustive de l'impact de l'événement de mortalité massive de 2022 sur les 4 espèces étudiées.

Cet événement de mortalité massive n'a pas impacté les populations de gorgone de la même manière au sein de chaque zone d'étude. La profondeur d'impact variait également selon les zones. Au sein du PnCal et sur les sites situés autour du Cap Sicié, des mortalités de *P. clavata* ont été observées jusqu'à 40 m de profondeur. Cette observation n'a pas été faite au sein des autres zones abritant des populations de *P. clavata*. L'ensemble de ces différences pourrait être lié à une différence d'intensité ou de durée des anomalies thermiques en fonction de la profondeur dans chaque zone d'étude. Il est également connu que certaines populations des différentes espèces de gorgones répondent de manière différentes au stress thermiques et montrent parfois même des adaptations à celles-ci (Haugenauer et al., 2013; Ledoux et al., 2010, 2015; Mokhtar-Jamaï et al., 2013; Pratlong et al., 2018, 2015). Ces différences pourraient donc également être liées à des capacités adaptatives différentes chez les populations échantillonnées.

De plus, cette étude fait état de la proportion de colonies affectées par l'événement de mortalité massive de 2022. Une colonie a été considérée comme étant affectée lorsqu'elle montrait une nécrose récente étendue à plus de 10% de la colonie. L'ensemble des colonies affectées par cet épisode de mortalité massive n'est donc pas mort. Certaines colonies montrant des étendues de nécroses situées dans des gammes inférieures à 50% ont de grandes chances de survivre. Selon l'espèce considérée, les nécroses étaient également plus ou moins étendues à l'échelle de la colonie. Globalement, dans les tranches de profondeur 0-10 m et 10- 20 m, les colonies de *P. clavata* montraient majoritairement des nécroses étendues entre 70% et 100% de la colonie. Ces colonies n'ont donc aucune chance de survie. Pour les colonies de *C. rubrum* et de *E. singularis*, l'étendue des nécroses à l'échelle de la colonie était assez variable et atteignait parfois 100% comme 20%. Ces nécroses pouvaient parfois être restreintes aux apex des colonies ou touchées l'ensemble de la colonie. Les nécroses observées sur *E. cavolini* étaient majoritairement des nécroses peu étendues et restreintes aux apex des colonies, mais certaines colonies montraient néanmoins des nécroses atteignant 100% de la colonie.

La récupération des populations de gorgones suite à l'événement de mortalité massive de 2022 sera extrêmement difficile, voire impossible. La gravité sans précédent de l'impact enregistré, conjuguée à la lenteur de la dynamique de la population (faible croissance et recrutement), à la faible connectivité entre populations et à une réduction du rendement de la reproduction dans les colonies survivantes restantes, laisse présager une trajectoire d'effondrement pour la plupart des populations vivant entre 0 m et 30 m de profondeur. En outre, dans le contexte de réchauffement actuel, on peut s'attendre à ce que de nouvelles vagues de chaleur intense affectent les tranches de profondeur situées entre la surface et 30 m, ce qui remettra probablement en cause le rétablissement naissant des populations. La principale conséquence de l'événement de mortalité massive de 2022 sera un changement spectaculaire de la répartition des espèces concernées dans des gammes de profondeurs plus importantes. Compte tenu de l'importance écologique des différentes espèces de gorgones, en tant qu'espèces ingénieuses, leur effondrement entraînera une perte importante de la complexité de l'habitat qui, à son tour, aura des conséquences importantes au niveau de l'écosystème et entraînera la perte des services qu'ils fournissent (Garrabou et al., 2021 ; Gómez-Gras et al., 2021).

Au vue des anomalies thermiques et des études précédentes (Crisci et al., 2017; Garrabou et al., 2022, 2009, 2001; Torrents et al., 2008), la cause identifiée de cet événement de mortalité massive est la succession d'anomalies thermiques tout au long de l'été et de l'automne 2022. Il est néanmoins important de garder à l'esprit que ces mortalités favorisées par les anomalies thermiques peuvent parfois également être liées à la prolifération de microorganismes pathogènes dont le développement est favorisé par l'élévation de la température au sein des colonies de gorgones (BALLY et al., 2009; Bally et Garrabou, 2007). C'est dans le but d'étudier ces phénomènes que nous avons, en parallèle des recensements de mortalité, réalisé un échantillonnage de *C. rubrum*, *P. clavata* et *E. cavolini* qui après analyse permettra d'en apprendre plus sur la variation du microbiome de ces organismes dans le cas d'anomalies thermiques.

L'étendue et l'amplitude d'impact de l'événement de mortalité massive 2022 sur les populations de gorgones de la façade méditerranéenne française illustre parfaitement l'intérêt de mettre en place un réseau de suivis permanents sur des sites ateliers instrumentés. La mesure des variables physico-chimiques de la colonne d'eau, en parallèle de la réalisation de recensements de l'état de santé des populations de gorgones à pas de temps réguliers, permettra de mieux comprendre et d'appréhender les événements de mortalité massive des différentes espèces de gorgones. La mise en place de ce réseau de suivi à des profondeurs aujourd'hui peu impactées par les événements de mortalité massive, c'est-à-dire aux alentours de 40 m de profondeur, mais qui le seront certainement dans les décennies à venir, devrait être considéré comme un sujet prépondérant par les gestionnaires. Il semble également essentiel de réaliser une cartographie de la présence de populations de gorgones le long de la façade méditerranéenne française la plus exhaustive possible. Cette cartographie pourrait permettre aux gestionnaires de mieux diriger leurs efforts de conservation des populations de gorgones en soustrayant l'impact des activités

anthropiques sur ces populations. Dans le cas particulier des populations de corail rouge (*C. rubrum*) vivant à faible profondeur dans des grottes semi-obscurées soumises à l'activité de plongée sous-marine récréative, il semble urgent de s'intéresser à leur conservation *via* limitation de cette activité. La préservation des populations de gorgones vis-à-vis des activités anthropiques pourrait en effet favoriser l'adaptation de ces populations en réduisant les facteurs impactant leur bon état de santé.

Actuellement l'origine des adaptations de certaines populations de gorgones aux vagues d'anomalie thermique n'est pas connue. L'ensemble des échantillons prélevés en 2022 devrait permettre d'avancer sur la question. Il semble donc essentiel de continuer sur cette thématique d'étude et de mobiliser des financements pour permettre l'analyse de l'ensemble des échantillons récoltés durant la campagne de terrain 2022.

Aujourd'hui les vagues d'anomalies thermiques n'impactent pas les populations de gorgones au-delà de 30 m ou 40 m de profondeur selon les zones. Il existe au-delà de ces profondeurs des populations remarquables, souvent isolées, qui persistent dans un environnement parfois fortement soumis aux impacts de la pêche professionnelle, de la pêche de loisir, de la plongée, ou du mouillage des navires. De plus, on ne sait pas actuellement si ces populations vont être impactées ou non par la perte des populations vivant moins en profondeur. En effet, dans le cas où ces populations dépendraient des échanges larvaires et/ou génétiques avec les populations superficielles, l'impact des vagues d'anomalies thermiques sur les populations superficielles pourrait impacter indirectement les populations profondes. Un effort de recherche associé à un effort de conservation de ces populations profondes est donc à réaliser. L'association entre scientifiques, gestionnaires, financeurs et décideurs semble donc plus qu'essentielle pour arriver à la sauvegarde des populations de gorgones menacées par l'augmentation des effets du changement global.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bally, M., Garrabou, J., 2007. Thermodependent bacterial pathogens and mass mortalities in temperate benthic communities: a new case of emerging disease linked to climate change. *Glob. Change Biol.* 13, 2078–2088. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01423.x>
- Bally, M., La Rivière, M., Roumagnac, M., Garrabou, J., 2009. Bacterial communities associated with the mediterranean gorgonian *Paramuricea clavata*, in: ASLO Aquatic Sciences Meeting. Nice, France.
- Bensoussan, N., Romano, J.-C., Harmelin, J.-G., Garrabou, J., 2010. High resolution characterization of northwest Mediterranean coastal waters thermal regimes: To better understand responses of benthic communities to climate change. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.008>
- Cerrano, C., Bavestrello, G., Bianchi, C.N., Cattaneo-vietti, R., Bava, S., Morganti, C., Morri, C., Picco, P., Sara, G., Schiaparelli, S., Siccardi, A., Sponga, F., 2000. A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. *Ecol. Lett.* 3, 284–293. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00152.x>
- Coma, R., Pola, E., Ribes, M., Zabala, M., 2004. Long-Term Assessment Of Temperate Octocoral Mortality Patterns, Protected Vs. Unprotected Areas. *Ecol. Appl.* 14, 13.
- Crisci, C., Bensoussan, N., Romano, J.-C., Garrabou, J., 2011. Temperature Anomalies and Mortality Events in Marine Communities: Insights on Factors behind Differential Mortality Impacts in the NW Mediterranean. *PLoS ONE* 6, e23814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023814>
- Crisci, C., Ledoux, J.-B., Mokhtar-Jamaï, K., Bally, M., Bensoussan, N., Aurelle, D., Cebrian, E., Coma, R., Féral, J.-P., La Rivière, M., Linares, C., López-Sendino, P., Marschal, C., Ribes, M., Teixidó, N., Zuberer, F., Garrabou, J., 2017. Regional and local environmental conditions do not shape the response to warming of a marine habitat-forming species. *Sci. Rep.* 7, 5069. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05220-4>
- Ferrigno, F., Appolloni, L., Russo, G.F., Sandulli, R., 2018. Impact of fishing activities on different coralligenous assemblages of Gulf of Naples (Italy). *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 98, 41–50. <https://doi.org/10.1017/S0025315417001096>
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., Diaz, D., Harmelin, J.G., Gambi, M.C., Kersting, D.K., Ledoux, J.B., Lejeusne, C., Linares, C., Marschal, C., Pérez, T., Ribes, M., Romano, J.C., Serrano, E., Teixido, N., Torrents, O., Zabala, M., Zuberer, F., Cerrano, C., 2009. Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Glob. Change Biol.* 15, 1090–1103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>
- Garrabou, J., Gómez-Gras, D., Medrano, A., Cerrano, C., Ponti, M., Schlegel, R., Bensoussan, N., Turicchia, E., Sini, M., Gerovasileiou, V., Teixido, N., Mirasole, A., Tamburello, L., Cebrian, E., Rilov, G., Ledoux, J.-B., Souissi, J.B., Khamassi, F., Ghanem, R., Benabdi, M., Grimes, S., Ocaña, O., Bazairi, H., Hereu, B., Linares, C., Kersting, D.K., la Rovira, G., Ortega, J., Casals, D., Pagès-Escolà, M., Margarit, N., Capdevila, P., Verdura, J., Ramos, A., Izquierdo, A., Barbera, C., Rubio-Portillo, E.,

- Anton, I., López-Sendino, P., Díaz, D., Vázquez-Luis, M., Duarte, C., Marbà, N., Aspillaga, E., Espinosa, F., Grech, D., Guala, I., Azzurro, E., Farina, S., Cristina Gambi, M., Chimienti, G., Montefalcone, M., Azzola, A., Mantas, T.P., Frascchetti, S., Ceccherelli, G., Kipson, S., Bakran-Petricioli, T., Petricioli, D., Jimenez, C., Katsanevakis, S., Kizilkaya, I.T., Kizilkaya, Z., Sartoretto, S., Elodie, R., Ruitton, S., Comeau, S., Gattuso, J.-P., Harmelin, J.-G., 2022. Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea. *Glob. Change Biol.* 28, 5708–5725. <https://doi.org/10.1111/gcb.16301>
- Garrabou, J., Harmelin, J.G., 2002. A 20-year study on life-history traits of a harvested long-lived temperate coral in the NW Mediterranean: insights into conservation and management needs. *J. Anim. Ecol.* 71, 966–978. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2002.00661.x>
- Garrabou, J., Perez, T., Sartoretto, S., Harmelin, J., 2001. Mass mortality event in red coral *Corallium rubrum* populations in the Provence region (France, NW Mediterranean). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 217, 263–272. <https://doi.org/10.3354/meps217263>
- Cómez-Gras, D., Bensoussan, N., Ledoux, J.B., López-Sendino, P., Cerrano, C., Ferretti, E., Kipson, S., Bakran-Petricioli, T., Serrao, E.A., Paulo, D., Coelho, M. a. G., Pearson, G.A., Boavida, J., Montero-Serra, I., Pagès-Escolà, M., Medrano, A., López-Sanz, A., Milanese, M., Linares, C., Garrabou, J., 2022. Exploring the response of a key Mediterranean gorgonian to heat stress across biological and spatial scales. *Sci. Rep.* 12, 21064. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25565-9>
- Guinaldo, T., Saux Picart, S., Roquet, H., 2023. Response of the sea surface temperature to heatwaves during the France 2022 meteorological summer. *EGUsphere* 1–18. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1119>
- Haugenauer, A., Zuberer, F., Ledoux, J.-B., Aurelle, D., 2013. Adaptive abilities of the Mediterranean red coral *Corallium rubrum* in a heterogeneous and changing environment: from population to functional genetics. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 449, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.10.010>
- Harley, C.D.G., Randall Hughes, A., Hultgren, K.M., Miner, B.G., Sorte, C.J.B., Thornber, C.S., Rodriguez, L.F., Tomanek, L., Williams, S.L., 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems: Climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.* 9, 228–241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>
- Harmelin, J.-G., Garrabou, J., 2005. Suivi d'une population de *Paramuricea clavata* (Risso, 1826) (Cnidaria, Octocorallia, Gorgonacea) dans le parc national de Port-Cros (Méditerranée, France) : Comparaison des états 1992 et 2004 sur le site de la Galère 17.
- Ledoux, J., Aurelle, D., Feral, J.P., Garrabou, J., Marschal, C., Université, A.-M., 2010. Experimental Approach To The Potential Response Of A Long-Lived Invertebrate Species Facing The Warming In The Nw Mediterranean 1.
- Ledoux, J.-B., Aurelle, D., Bensoussan, N., Marschal, C., Féral, J.-P., Garrabou, J., 2015. Potential for adaptive evolution at species range margins: contrasting interactions between red coral populations and their environment in a changing ocean. *Ecol. Evol.* 5, 1178–1192. <https://doi.org/10.1002/ece3.1324>

- Linares, C., Bianchimani, O., Torrents, O., Marschal, C., Drap, P., Garrabou, J., 2010. Marine Protected Areas and the conservation of long-lived marine invertebrates: the Mediterranean red coral. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 402, 69–79. <https://doi.org/10.3354/meps08436>
- Linares, C., Coma, R., Diaz, D., Zabala, M., Hereu, B., Dantart, L., 2005. Immediate and delayed effects of a mass mortality event on gorgonian population dynamics and benthic community structure in the NW Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 305, 127–137. <https://doi.org/10.3354/meps305127>
- Linares, C., Coma, R., Garrabou, J., Díaz, D., Zabala, M., 2008a. Size distribution, density and disturbance in two Mediterranean gorgonians: *Paramuricea clavata* and *Eunicella singularis*. *J. Appl. Ecol.* 45, 688–699. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01419.x>
- Linares, C., Coma, R., Zabala, M., 2008b. Restoration of threatened red gorgonian populations: An experimental and modelling approach. *Biol. Conserv.* 11.
- Linares, C., Doak, D.F., Coma, R., Diaz, D., Zabala, M., 2007. Life History and Viability of a Long-Lived Marine Invertebrate: The Octocoral *Paramuricea clavata*. *Ecology* 88, 918–928.
- Lo Basso, L., Raveux, O., 2018. Introduction. Le corail, un kaléidoscope pour l'étude de la Méditerranée dans le temps long. *Rives Méditerranéennes* 7–15. <https://doi.org/10.4000/rives.5566>
- Mokhtar-Jamäi, K., Coma, R., Wang, J., Zuberer, F., Féral, J.-P., Aurelle, D., 2013. Role of evolutionary and ecological factors in the reproductive success and the spatial genetic structure of the temperate gorgonian *Paramuricea clavata*. *Ecol. Evol.* 3, 1765–1779. <https://doi.org/10.1002/ece3.588>
- Perez, T., Garrabou, J., Sartoretto, S., Harmelin, J.-G., Francour, P., Vacelet, J., 2000. Mortalité massive d'invertébrés marins: un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale. *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. III - Sci. Vie* 323, 853–865. [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(00\)01237-3](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)01237-3)
- Piazzì, L., Gennaro, P., Balata, D., 2012. Threats to macroalgal coralligenous assemblages in the Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 2623–2629. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.027>
- Pratlong, M., Haguénauer, A., Brener, K., Mitta, G., Toulza, E., Garrabou, J., Bensoussan, N., Pontarotti, P., Aurelle, D., 2018. Separate the wheat from the chaff: genomic scan for local adaptation in the red coral *Corallium rubrum* (preprint). *Evolutionary Biology*. <https://doi.org/10.1101/306456>
- Pratlong, M., Haguénauer, A., Chabrol, O., Klopp, C., Pontarotti, P., Aurelle, D., 2015. The red coral (*Corallium rubrum*) transcriptome: A new resource for population genetics and local adaptation studies. *Mol. Ecol. Resour.* 15. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12383>
- Romano, J.-C., Bensoussan, N., Younes, W.A.N., Arlhac, D., 2000. Anomalie thermique dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés ? *Life Sci.* 13.
- Torrents, O., Tambutté, E., Caminiti, N., Garrabou, J., 2008. Upper thermal thresholds of

shallow vs. deep populations of the precious Mediterranean red coral *Corallium rubrum* (L.): Assessing the potential effects of warming in the NW Mediterranean. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 357, 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.12.006>

Tsounis, G., Rossi, S., Gili, J.-M., Arntz, W., 2006. Population structure of an exploited benthic cnidarian: the case study of red coral (*Corallium rubrum* L.). Mar. Biol. 149, 1059–1070. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0302-8>

Tsounis, G., Rossi, S., Gili, J.-M., Arntz, W.E., 2007. Red Coral Fishery at the Costa Brava (NW Mediterranean): Case Study of an Overharvested Precious Coral. Ecosystems 10, 975–986. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9072-5>