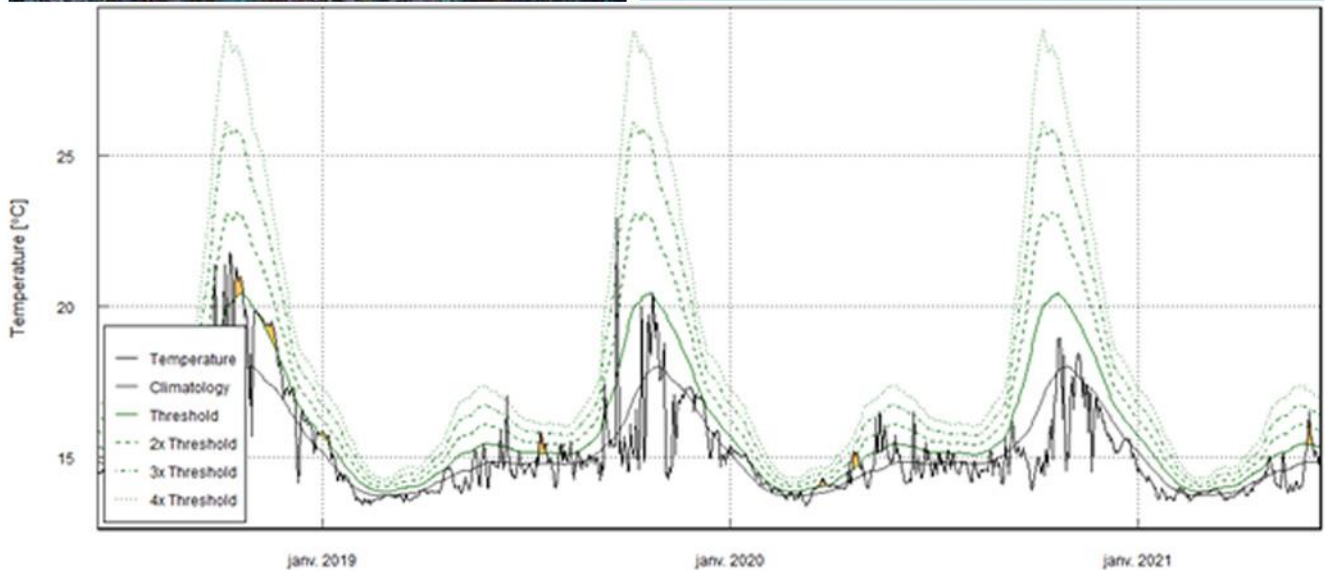
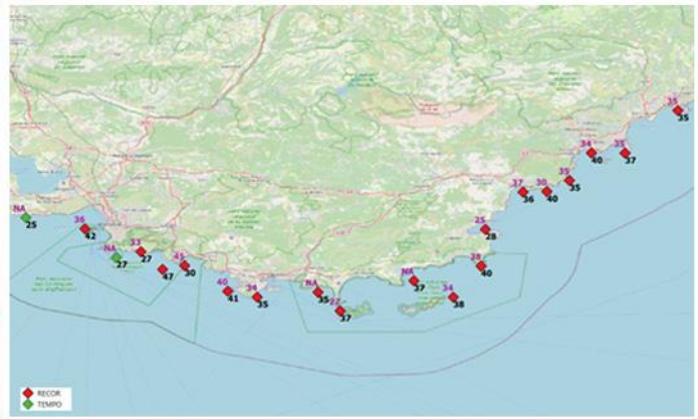


Compléments à la surveillance biologique Suivis des communautés coralligènes suite à l'épisode caniculaire 2022



Novembre 2024

ANDROMÈDE
OCÉANOLOGIE

7, place Cassan - Carnon-Plage

34 130 Mauguio - France

Tél. : 04.67.66.32.48

contact@andromede-ocean.com



LES GORGONES ROUGES (*PARAMURICEA CLAVATA*) AFFECTÉES PAR L'ÉPISODE CANICULAIRE DE 2022 ©ANDROMEDE Océanologie.

Coordination Andromède :

HOLON Florian, florian.holon@andromede-ocean.com

Analyses, rédaction :

MARRE Guilhem, guilhem.marre@andromede-ocean.com

Coordination Agence de l'Eau RMC :

BOISSERY Pierre, Pierre.BOISSERY@eaurmc.fr

Participants aux missions de terrain :

BLANDIN Agathe, HOLON Florian, MARRE Guilhem, MAURON Stephen, SCHIES Jo-Ann

Ce document doit être cité sous la forme suivante :

ANDROMEDE Océanologie, 2024. Compléments à la surveillance biologique. Suivis des communautés coralliennes suite à l'épisode caniculaire 2022. Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau. 86 pages.

Édito

Depuis l'entrée en vigueur de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE), les États membres se sont engagés à atteindre un bon état écologique des masses d'eau d'ici 2020 (Parlement Européen, 2000).

La Directive cadre Stratégie pour le Milieu Marin 2008/56/CE (DCSMM) a renforcé cette volonté pour le milieu marin. Pour cela, il s'agit de suivre l'état des écosystèmes marins, mesurer les impacts liés aux pressions des activités humaines et mettre en œuvre une gestion intégrée permettant une utilisation durable des ressources.

C'est dans ce contexte réglementaire que la société Andromède Océanologie a développé depuis 2010, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, des réseaux de surveillance axés sur des thématiques variées tels que TEMPO (Herbier de posidonie), RECOR (Récifs coralligènes), CALME (bruit acoustique en collaboration avec société Chorus), CALOR (température de fond), PISCIS (suivi des Poissons par ADNe).

Ces réseaux permettent de suivre des descripteurs à différentes échelles (individus, populations, communautés, paysages) et mettent en commun leur logistique de terrain afin d'en diminuer les coûts. Les suivis sur les mêmes sites facilitent la corrélation des données entre elles.

En 2022, un épisode extraordinaire de mortalité de gorgones en PACA a suivi l'épisode de canicule extrême qui a touché le sud de la France. Une campagne extraordinaire a permis de réaliser des mesures de l'état des peuplements coralligènes juste après l'épisode caniculaire, et de relever les capteurs de température en place afin d'étudier le phénomène.

Ce document présente les résultats, suites aux acquisitions d'octobre 2022, des analyses de l'état des peuplements coralligènes entre Marseille et Nice. En particulier, cette étude vise à :

- Réaliser une **campagne d'acquisition de données en mer en octobre 2022** afin de i) relever des capteurs de température positionnés dans le cadre du réseau de surveillance [CALOR](#) sur différents sites entre Marseille et Nice et ii) étudier l'état des peuplements coralligènes suivis dans le cadre du réseau [RECOR](#) sur ces mêmes sites ;
- **Analyser les données de température de fond** entre le 1^{er} Juin et le 30 Octobre 2022 sur les sites CALOR et quantifier les vagues de chaleur ;
- **Analyser les données sur l'état des peuplements coralligènes** et quantifier la sévérité de l'évènement de mortalité sur ces sites ;
- Etudier les **liens entre température de fond et sévérité de la mortalité des peuplements coralligènes** ;
- **Comprendre les liens entre la température de fond et d'autres données environnementales** (température de surface, courantologie, morphologie bathymétrique...) pour anticiper les vagues de chaleur par imagerie satellite, et définir des **zones de « refuge » thermique**.

Les résultats de ces analyses sont consultables sur la plateforme en ligne MEDTRIX (<http://plateforme.medtrix.fr>) dans les projets CALOR et RECOR.

Sommaire

| | | |
|-------------|---|-----------|
| I. | CONTEXTE ET OBJECTIFS | 1 |
| II. | MATERIELS ET METHODES..... | 2 |
| | <i>I.A. Acquisition des données</i> | <i>2</i> |
| | I.A.1. Localisation des stations échantillonnées | 2 |
| | I.A.2. Température de fond | 5 |
| | I.A.3. Etat des peuplements coralligènes..... | 6 |
| | I.A.4. Données externes participatives | 8 |
| | I.A.5. Données externes environnementales..... | 8 |
| | <i>I.B. Traitement et analyse des données.....</i> | <i>9</i> |
| | I.B.1. Température de fond | 9 |
| | I.B.1.a. Descripteurs statistiques | 10 |
| | I.B.1.b. Anomalies thermiques et vagues de chaleur marine | 10 |
| | I.B.2. Mortalité des espèces érigées | 12 |
| | I.B.3. Mortalité des espèces sessiles | 12 |
| | I.B.4. Liens entre température et mortalité | 13 |
| | I.B.5. Liens entre température de fond CALOR et données externes..... | 13 |
| III. | ANALYSE DE L'EPISODE CANICULAIRE DE 2022..... | 15 |
| | <i>I.A. Analyse descriptive de chaque site d'ouest en est.....</i> | <i>15</i> |
| | I.A.1. Nord Cote Bleue | 15 |
| | I.A.2. Frioul | 16 |
| | I.A.3. Tiboulouen..... | 16 |
| | I.A.4. Ile Plane | 19 |
| | I.A.5. Morgiou | 20 |
| | I.A.6. Morgiou PI..... | 21 |
| | I.A.7. Devenson..... | 22 |
| | I.A.8. Rosier..... | 26 |
| | I.A.9. Alon | 28 |
| | I.A.10. Alon PI | 29 |
| | I.A.11. Embiez Nord | 30 |
| | I.A.12. Embiez Nord PI | 31 |
| | I.A.13. Pierre à Christian | 32 |
| | I.A.14. Cap Sicie Ouest | 33 |
| | I.A.15. Cap Sicie Ouest PI | 34 |
| | I.A.16. Les deux frères | 34 |
| | I.A.17. Pointe Langoustier..... | 37 |
| | I.A.18. Cap des Medes PI | 39 |
| | I.A.19. Pointe Esquilette PI..... | 40 |
| | I.A.20. Rade de Bormes..... | 41 |
| | I.A.21. Pointe Andati | 42 |
| | I.A.22. Pointe Andati PI | 43 |
| | I.A.23. Les Ancres..... | 43 |
| | I.A.24. Emissaire Saint Tropez 2 | 46 |
| | I.A.25. Lion de Mer | 46 |
| | I.A.26. Lion de Mer PI | 50 |
| | I.A.27. La Sèche Saint Pierre | 50 |
| | I.A.28. Cap Nice Est | 54 |
| | I.A.29. Tombant des Américains Nord | 54 |
| | <i>I.B. Etat des peuplements coralligènes après la canicule de 2022</i> | <i>57</i> |
| | I.B.1. Gorgones | 57 |
| | I.B.2. Algues rouges encroûtantes | 59 |
| | <i>I.C. Analyse de la température de fond</i> | <i>60</i> |
| IV. | LIENS ENTRE TEMPERATURE ET NECROSES | 64 |
| | <i>I.A. Gorgones</i> | <i>64</i> |

| | | |
|------------|--|-----------|
| I.B. | <i>Algues rouges encroûtantes</i> | 68 |
| V. | LIENS ENTRE TEMPERATURE DE FOND ET LES DONNEES EXTERNES | 71 |
| I.A. | <i>Liens entre température de surface et température de fond</i> | 71 |
| I.B. | <i>Prédiction de la température de fond</i> | 73 |
| I.C. | <i>Définition de refuges thermiques</i> | 77 |
| VI. | CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES | 79 |

I. Contexte et objectifs

La mer Méditerranée est un **hotspot de biodiversité** : alors qu'elle ne représente que **0,32 %** du volume de l'océan global, elle abrite plus de **7 % de la biodiversité marine mondiale** (Coll et al., 2010) dont environ **un quart** est **endémique** du bassin (Bianchi and Morri, 2000). Malheureusement elle est aussi une des régions les plus **vulnérables aux perturbations climatiques** en cours et à venir (Adloff et al., 2015; Cramer et al., 2018). Outre le réchauffement progressif des océans, l'acidification, la désoxygénation et l'élévation du niveau de la mer (Halpern et al., 2008, 2019), les activités humaines ont provoqué une **augmentation rapide** de la **fréquence**, de la **durée** et de l'**intensité** des **Vagues de Chaleur Marines** (VCM) (Collins et al., 2019; Garrabou et al., 2022). Ces **événements extrêmes** sont généralement associés à des **épisodes de mortalité massive**, avec des impacts très variables selon les espèces, les populations et les individus (Garrabou et al., 2022).

Les événements **les plus dramatiques** rapportés en termes **d'étendue géographique** et de **nombre d'espèces** affectées se sont produits en **1999** et **2003** au **Nord-Ouest** de la **Méditerranée** (Perez et al., 2000; Garrabou et al., 2009). Sur les côtes de Provence (France) et de Ligurie (Italie), l'évènement de l'été 1999 a **sévèrement affecté** une **grande diversité d'invertébrés sessiles** et **filtreurs** des communautés de substrats durs, parmi lesquels des **spongiaires** (en particulier, les éponges cornées *Hippospongia* et *Spongia*), des **cnidaires** (en particulier, les **anthozoaires** *Corallium*, *Paramuricea*, *Eunicella* et *Cladocora*), des **bivalves**, des **ascidies** et des **bryozoaires** (Perez et al., 2000). Au total, on estime que ces deux événements de 1999 et 2003 ont **affecté plus de 40 espèces** de divers taxons sur des **milliers de kilomètres de côte** (Garrabou et al., 2022).

L'été 2022 a été marqué par une **vague de chaleur terrestre** sans précédents en France, Espagne et Italie, avec plus de **2,5 °C au-dessus** des normales saisonnières et une **période de retour** de l'évènement de **300-400 ans** (Tripathy and Mishra, 2023). La **température de surface de l'eau en Méditerranée française** a elle aussi connu une augmentation **significative** et **soudaine** : entre **1,3** et **2,6 °C** au-dessus de la normale, une des plus **longues** et **intenses** VCM jamais enregistrée (Guinaldo et al., 2023). La durée de l'évènement climatique exceptionnel, combiné à de **faibles vents** a provoqué un **enfouissement de la thermocline** avec des températures anormalement élevées **jusqu'à 40 m** (Estaque et al., 2023). Fin août 2022, un **épisode de mortalité massive** de **gorgones rouges** (*Paramuricea clavata*) a été observé dans les eaux du **Parc National des Calanques** et d'autres aires marines protégées du littoral méditerranéen français, avec des mortalités **extrêmes jusqu'à 30 m** (Estaque et al., 2023). D'autres espèces de **gorgones**, de **coraux** et de **bryozoaires** ont également été **sévèrement affectées** (Marie et al., 2023).

Mis en place en **2010**, le réseau de surveillance **RECOR** (Andromède Océanologie / Agende le l'Eau Rhône Méditerranée Corse) permet le suivi de l'**état écologique des assemblages coralligènes** sur **124 sites / 206 stations** (une station = une profondeur, certains sites ont plusieurs stations) réparties entre **17 et 120 mètres de profondeur** sur toute la façade méditerranéenne française. Initié en 2013, le réseau **CALOR** permet de suivre l'**évolution de la température de fond** à travers **262 capteurs** de température disposés entre **3 et 115 m** de fond, principalement sur les stations **RECOR** et **TEMPO** (réseau de surveillance des herbiers de posidonie). En effet, la température est le **principal facteur environnemental** régissant la **distribution des espèces** (Tittensor, 2010).

Ce projet de **compléments à la surveillance biologique** suite à l'épisode caniculaire de l'été 2022 vise à :

- **Etudier l'évolution de la température de fond** durant l'été 2022 sur différentes stations **TEMPO** et **RECOR** localisées entre Marseille et Nice ;
- **Qualifier et étudier l'état des peuplements coralligènes** sur ces stations (gorgones, algues rouges encroustantes, éponges, ...) suite à cet épisode caniculaire afin de quantifier la sévérité de l'évènement de mortalité dans l'espace ;
- **Etudier les liens entre température de fond et mortalité des peuplements coralligènes** sur toute la base de données RECOR afin de mieux comprendre le rôle des VCM sur les peuplements coralligènes ;
- **Comprendre les liens entre la température de fond et d'autres données environnementales** (température de surface, courantologie, morphologie bathymétrique...) pour anticiper les vagues de chaleur par imagerie satellite, et définir des **zones de « refuge » thermique**.



II. Matériels et méthodes

I.A. Acquisition des données

I.A.1. Localisation des stations échantillonnées

Une **campagne de terrain** spécifique à ce projet a été conduite en **octobre 2022** immédiatement après l'épisode caniculaire afin de relever les capteurs de température sur les stations des réseaux **TEMPO** et **RECOR** entre **Marseille** et **Nice**, et d'évaluer **l'état des peuplements coralligènes** avec le **protocole RECOR** sur les stations du réseau et des stations additionnelles à des **profondeurs intermédiaires** afin de préciser la profondeur d'influence de l'épisode caniculaire.

Les observations de terrain relatant des **nécroscs massives** des peuplements (éponges, gorgones) à l'été 2022 semblent se concentrer en **région Sud**, à **moins de 40 m** de profondeur. Ainsi, nous avons plongé sur **12 sites RECOR** (stations entre 16 et 53 m) et **20 sites TEMPO** (entre 15 et 34 m) depuis **Marseille à l'Ouest** jusqu'à **Nice à l'Est** (voir figure suivante).

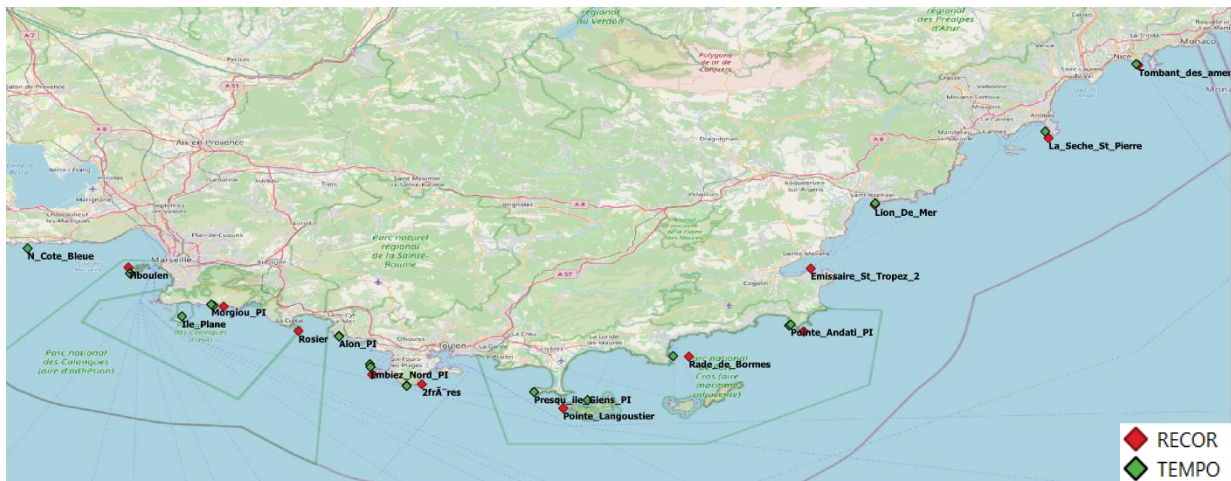


FIGURE 1 : LOCALISATION DES SITES ECHANTILLONNES EN OCTOBRE 2022.

Pour chaque **site RECOR**, nous avons **relevé les capteurs** présents sur les **stations entre plus de 50 m et la surface** afin d'encadrer **l'intervalle bathymétrique** a priori impacté par l'épisode caniculaire. Pour chaque **site TEMPO**, seul le **capteur de température** a été relevé. Le tableau suivant donne le détail des **39 stations CALOR** échantillonnées :

TABLEAU 1 : LISTE DES STATIONS CALOR ECHANTILLONNEES EN OCTOBRE 2022

| Réseau | Site | Profondeur capteur | Commentaire |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| RECOR | 2freres | 37 | |
| | Devenson | 46 | |
| | Devenson | 16 | |
| | Devenson | 27 | |
| | Emissaire_St_Tropez_2 | 28 | |
| | La_Seche_St_Pierre | 31 | |
| | La_Seche_St_Pierre | 37 | |
| | Les_Ancre | 30 | Capteur non retrouvé |
| | Les_Ancre | 38 | |
| | Lion_De_Mer | 37 | |
| | Lion_De_Mer | 31 | |
| | Pierre_a_Christian | 46 | |
| | Pierre_a_Christian | 41 | Capteur non retrouvé |
| | Pointe_Langoustier | 37 | |
| | Rade_de_Bormes | 37 | |
| | Rosier | 44,7 | |
| | Rosier | 52,5 | |
| | Tiboulén | 41 | |
| | Tombant_des_americains_N | 35 | |
| | TEMPO | Morgiou | 28,2 |
| Morgiou_PI | | 15 | |
| Ile_Plane | | 26,5 | |
| Frioul_PI | | 16,5 | Capteur non retrouvé |
| Frioul | | 25,4 | |
| N_Cote_Bleue | | 25 | |
| Alon | | 22,3 | |
| Alon_PI | | 18 | |
| Embiez_Nord | | 29,3 | |
| Embiez_Nord_PI | | 15 | |
| Cap_Sicie_Ouest | | 30,8 | |
| Cap_Sicie_Ouest_PI | | 14,5 | |
| Cap_Nice_Est | | 23 | |
| Lion_de_Mer_PI | | 15 | |
| Pointe_Andati | | 34 | |
| Pointe_Andati_PI | | 14,5 | |
| Cap_des_Medes_PI | | 15,4 | |
| Pointe_Esquillette_PI | | 15 | |
| Presqu_ile_Giens_PI | | 15 | Capteur non retrouvé |
| Juan_PI | | 15 | Capteur non retrouvé |

Concernant les **gorgones**, nous avons suivi les stations usuelles du réseau RECOR, et ajouté plusieurs **stations intermédiaires** à des profondeurs **inférieures à 30 m** afin de cadrer la profondeur limite d'influence de l'épisode caniculaire. Le tableau suivant donne le détail des **22 stations gorgones** échantillonnées :



TABLEAU 2 : LISTE DES STATIONS GORGONES ECHANTILLONNEES DURANT LA CAMPAGNE DE TERRAIN 2022

| Site | Profondeur | Commentaire |
|--------------------------|------------|------------------------|
| 2freres | 25 | Station supplémentaire |
| | 28 | Station supplémentaire |
| | 34 | Station RECOR |
| Devenson | 27 | Station supplémentaire |
| | 33 | Station RECOR |
| Emissaire_St_Tropez_2 | 25 | Station RECOR |
| La_Seches_St_Pierre | 30 | Station supplémentaire |
| | 31 | Station supplémentaire |
| | 35 | Station RECOR |
| Les_Ancres | 25 | Station supplémentaire |
| | 38 | Station RECOR |
| Lion_De_Mer | 24 | Station supplémentaire |
| | 25 | Station supplémentaire |
| | 26 | Station supplémentaire |
| | 28 | Station supplémentaire |
| | 31 | Station supplémentaire |
| Pierre_a_Christian | 40 | Station RECOR |
| Pointe_Langoustier | 24 | Station supplémentaire |
| | 28 | Station RECOR |
| Rosier | 28 | Station supplémentaire |
| Tiboulen | 36 | Station RECOR |
| Tombant_des_americains_N | 35 | Station RECOR |

Concernant les **espèces des strates basse et intermédiaire**, nous avons réalisé des **quadrats photographiques** sur toutes les stations RECOR plongées (à l'exception des stations des sites « Pierre à Christian », « Rade de Bormes » et « Rosier » pour des raisons logistiques) et ajouté trois stations supplémentaires. Le tableau suivant donne le détail des **15 stations strates basse et intermédiaire** échantillonnées :

TABLEAU 3 : LISTE DES STATIONS QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES ECHANTILLONNEES DURANT LA CAMPAGNE DE TERRAIN 2022

| Site | Profondeur | Commentaire |
|--------------------------|------------|------------------------|
| 2freres | 30 | Station supplémentaire |
| | 35 | Station RECOR |
| Devenson | 47 | Station RECOR |
| | 16 | Station supplémentaire |
| Emissaire_St_Tropez_2 | 27 | Station supplémentaire |
| | 28 | Station RECOR |
| La_Seches_St_Pierre | 30 | Station RECOR |
| | 37 | Station RECOR |
| Les_Ancres | 30 | Station RECOR |
| | 40 | Station RECOR |
| Lion_De_Mer | 38 | Station RECOR |
| | 30 | Station RECOR |
| Pointe_Langoustier | 37 | Station RECOR |
| Tiboulen | 40 | Station RECOR |
| Tombant_des_americains_N | 35 | Station RECOR |

Au final, nous avons relevé **34 capteurs de température**, échantillonné **22 stations de gorgones** et **15 stations de strates basse et intermédiaire**.

I.A.2. Température de fond

Depuis 2013, Andromède Océanologie (en partenariat avec l'AERMC) équipe les **sites de surveillance** [RECOR](#) et [TEMPO](#) avec des capteurs de température. (HOBO Water Temp Pro v2, www.onsetcomp.com). Chaque site est relevé en mai-juin tous les trois ans avec un décalage d'un an d'une région à une autre : Occitanie/PACA Ouest, PACA Est et Corse).



Les objectifs de ce réseau de surveillance sont de :

1. Réaliser une **modélisation de la température de fond** sur le littoral méditerranéen français à partir des capteurs récupérés suite aux campagnes RECOR (suivi des récifs coralligènes) et TEMPO (suivi des herbiers de posidonie) ;
2. Pérenniser la **mise en place de capteurs de température**, pour un suivi à long terme ;
3. Permettre la **calibration de modèles physiques** de température en fournissant des **données fiables in-situ haute fréquence** sur tout le littoral méditerranéen français ;
4. Affiner les modèles physiques de température, isoler les séquences **d'anomalies thermiques**, définir des **descripteurs de ces anomalies** en lien avec les données de la surveillance biologique TEMPO et RECOR.

Ces données de température, affinées tous les ans et disponibles tout le long des côtes méditerranéennes françaises, sont essentielles pour **comprendre les effets du changement climatique** sur les écosystèmes marins, en utilisant les données collectées dans les autres réseaux de surveillance.

Andromède Océanologie équipe tous les sites de surveillance (TEMPO et RECOR) avec des capteurs [HOBO Water Temp Pro v2](#). Chaque capteur relevé est systématiquement remplacé par un nouveau capteur. Le capteur relevé est déchargé, sa pile changée (durée de vie maximale cinq ans) et il peut ensuite être réutilisé lors d'une prochaine campagne.

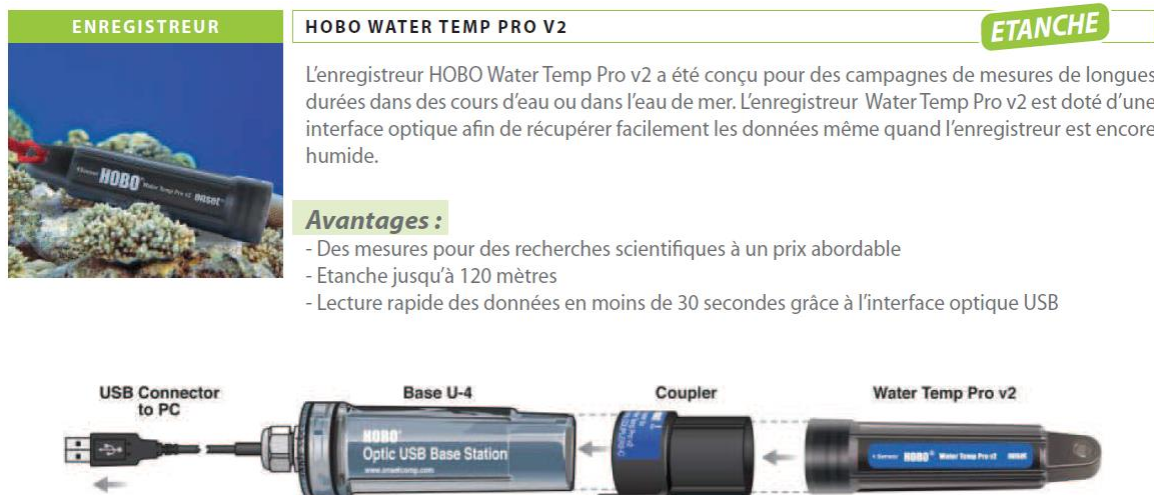


FIGURE 2 : MODELE DE CAPTEUR DE TEMPERATURE UTILISE DANS LE CADRE DU RESEAU CALOR



I.A.3. *Etat des peuplements coralligènes*

Porté par l'Agence de l'eau RMC et Andromède Océanologie, le **réseau de surveillance RECOR** s'étend sur l'ensemble de la **façade méditerranéenne française** bordée par les trois régions Corse, Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et Occitanie. Initié en 2010, les objectifs de ce réseau sont de recueillir des données descriptives de **l'état et du fonctionnement des récifs coralligènes** et de suivre leurs changements dans le temps et dans l'espace.

Sur toute la façade méditerranéenne française, le réseau RECOR comprend actuellement **124 sites qui correspondent à 206 stations** (une station = une profondeur) réparties entre **17 et 120 mètres** de profondeur. Ce réseau s'étend également dans les eaux périphériques comme en Sardaigne (Italie) ou à Monaco, comprenant un total de **160 sites** correspondant à **251 stations** différentes. Chaque année, une région française est suivie à la fin du printemps (Mai-Juin) afin de couvrir **l'ensemble de la façade tous les trois ans**.

Des protocoles différents, réalisés en plongée sous-marine, sont appliqués sur les récifs coralligènes, à partir desquels différents indicateurs sont calculés pour évaluer l'état général des récifs. Le **réseau RECOR** inclut deux protocoles d'acquisition de données :

- Mesures in-situ des populations de **gorgones** (lorsqu'il existe une population suffisante) : mesures de **mortalité** et de **dynamique de population** ;
- **Quadrats photographiques** afin d'évaluer **l'état et la diversité des assemblages** des strates basse et intermédiaire.

Par ailleurs, une évaluation de la **diversité de poissons** et **d'invertébrés benthiques** est réalisée par **ADN environnemental** (réseau **PISCIS**) et par **bioacoustique** (réseau **CALME**). Le schéma ci-dessous synthétise les différentes données relevées sur les récifs coralligènes :

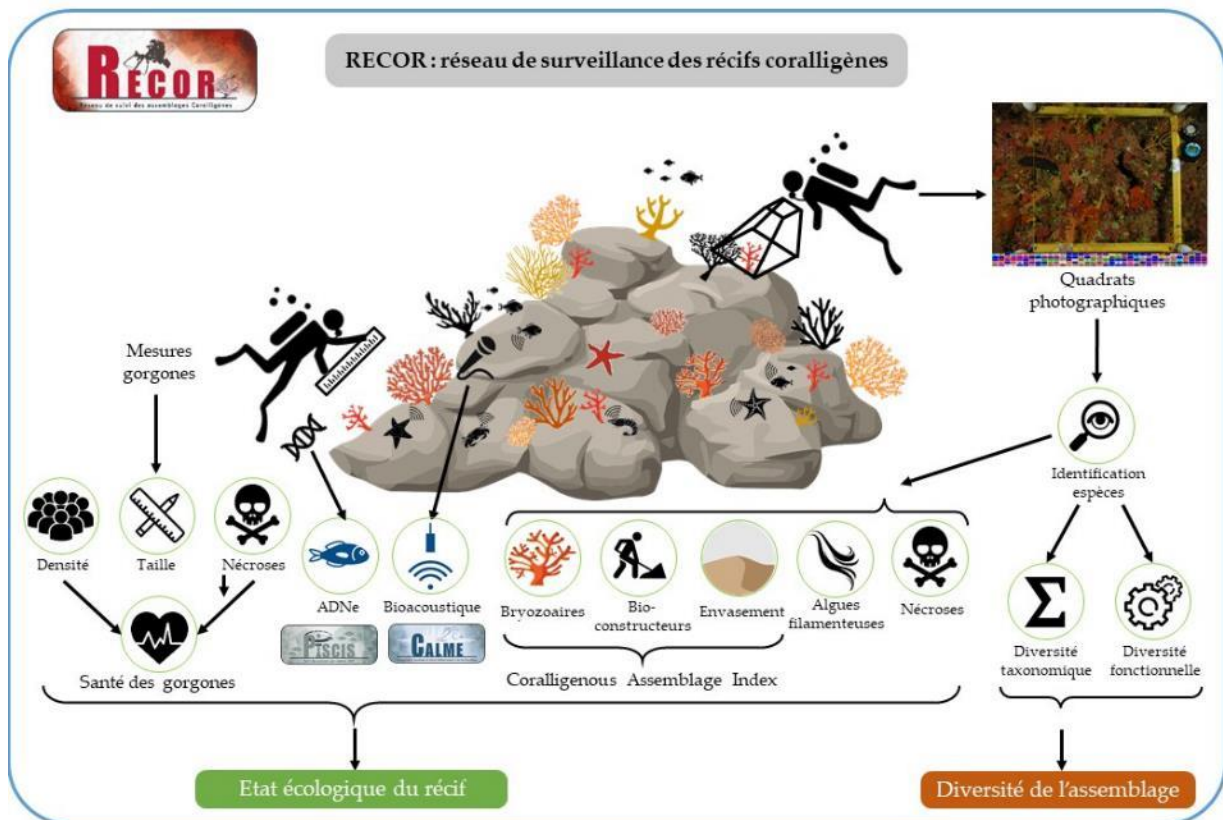


FIGURE 3 : PRESENTATION GENERALE DES PROTOCOLES APPLIQUES DANS LE CADRE DE RECOR.

I.A.1.a. Gorgones

Les gorgones sont des **cnidaires** caractérisées par une **dynamique de population lente** et des **capacités de dispersion restreintes**. Elles dominent de nombreux récifs coralligènes, et sont très importantes au niveau fonctionnel car elles contribuent à la structure tridimensionnelle des récifs, nécessaire au développement de nombreuses espèces associées. Les précédents **événements de mortalité** ont montré que les cnidaires étaient beaucoup plus touchés que tout autre groupe. En effet, les gorgones méditerranéennes (par exemple, *Paramuricea clavata*, *Corallium rubrum*, *Eunicella cavolini*, et *Eunicella singularis*) sont parmi les organismes **les plus affectés** par les canicules marines (Garrabou et al., 2022). Il est fort probable que les gorgones méditerranéennes subiront de **nouveaux déclin**s dans la partie supérieure de leur distribution bathymétrique, ce qui pourrait avoir des conséquences importantes sur le **fonctionnement des écosystèmes benthiques** méditerranéens (Gómez-Gras et al., 2021) et indirectement sur la **fourniture des services écosystémiques** associés.

Pour **chaque station** échantillonnée, nous avons estimé le **taux de nécrose** des gorgones à partir de **30 quadrats aléatoires de 50 x 50 cm** réalisés à une même profondeur, au sein desquels chaque gorgone est évaluée : une évaluation visuelle du **pourcentage de mortalité**, la **date** de la nécrose (récente ou ancienne) et la **distribution** (localisée ou diffuse, voir figure suivante).



FIGURE 4 : TYPOLOGIE DE DISTRIBUTION DES NECROSES DES GORGONES

I.A.1.b. Strates basse et intermédiaire

Pour chaque station, nous avons réalisé **30 quadrats photographiques de 2500 cm²** (50 x 50 cm) à l'aide d'un Nikon D810 (capteur 24 x 36 mm, résolution 36,3 millions pixels) sur une **même profondeur** le long d'un **transect de 20 m** (Deter et al., 2012) (voir figure suivante). L'analyse de ces quadrats dans le cadre du réseau RECOR permet l'évaluation de l'**état écologique** et de la **diversité** des assemblages coralligènes. L'analyse dans le cadre de cette étude se limite à l'estimation du **pourcentage de nécrose** des espèces sessiles du coralligène.





FIGURE 5 : QUADRAT PHOTOGRAPHIQUE POUR L'ETUDE DES STRATES BASSE ET INTERMEDIAIRE DES RECIFS CORALLIGENES

I.A.4. *Données externes participatives*

Les **sciences participatives** permettent à la communauté scientifique de **mettre à contribution la société civile** afin de collecter de la donnée et d'élargir les **échelles spatio-temporelles** d'observation. La difficulté en écologie marine est le **nombre d'utilisateurs restreint** en comparaison avec l'écologie terrestre. Pour autant, Figuerola-Fernando et al. (2024) ont validé l'utilisation d'une **méthode rapide, facile et à grande échelle** pour les scientifiques et les citoyens afin d'examiner **l'état de conservation des populations de gorgones méditerranéennes**. Cette méthode d'évaluation est basée sur la quantification du pourcentage de colonies nécrosées sur une centaine de colonies pour chaque espèce, localité, et gamme de profondeur.

Afin d'évaluer l'étendue du phénomène de mortalité des gorgones et son évolution dans le temps, nous avons utilisé le module communautaire de l'application DONIA ainsi que la plateforme MEDTRIX. Malheureusement, sur les **3529 observations** collectées via l'application DONIA entre le 10 juillet 2018 et le 4 juillet 2023, **seulement une observation** fait référence à des gorgones : une signalisation de « jolies gorgones noires » en 2023 à l'Ouest des Îles de Lérins. Nous n'avons donc pas utilisé les données participatives collectées via l'application Donia pour nos analyses.

I.A.5. *Données externes environnementales*

Si le réseau CALOR fournit la **température de fond à haute fréquence** sur de nombreuses stations de mesures le long du littoral Méditerranéen, il n'a été mis en place qu'en 2013 et progressivement élargit à tous les sites TEMPO et RECOR. Les séries de données les plus longues comptabilisent **9 ans de mesures**, quand il faut normalement **au moins 30 ans** pour établir une **normale saisonnière** et mesurer des **anomalies thermiques**. Afin **d'élargir les analyses** et la compréhension des liens entre la **température de l'eau** et les **événements de mortalité** des peuplements coralligènes, nous avons téléchargé des **séries de données temporelles** de paramètres environnementaux **pour chaque site TEMPO et RECOR** à partir de la plateforme [Copernicus](#) :

- **Température de surface** journalière obtenue par satellite (1^{er} janvier 1982 au 31 décembre 2022 ; résolution ~5km) ;
- **Température de fond** journalière modélisée à partir de fusion de données satellite et capteurs in-situ :
 - 1^{er} janvier 1993 au 30 décembre 2020 : données consolidées ; résolution ~9km ;
 - 31 décembre 2020 au 31 décembre 2022 : données de prévisions ; résolution ~9km.

- **Profondeur de la couche de mélange** (Mixed Layer Depth, MLD) journalière (correspondant à la profondeur sous laquelle la densité moyenne dépasse la **densité de surface + 0,03 km/m³**) modélisée à partir de fusion de données satellite et capteurs in-situ :
 - 1^{er} janvier 1993 au 30 décembre 2020 : données consolidées ; résolution ~9km ;
 - 31 décembre 2020 au 31 décembre 2022 : données de prévisions ; résolution ~9km.

I.B. Traitement et analyse des données

I.B.1. *Température de fond*

Après récupération des capteurs, nous disposons pour chaque station de mesure d'une **série de données horaire de températures** sur toute la période d'immersion (classiquement 3 ans depuis la dernière campagne pour la même région).

Chaque série de données a été analysée afin **d'extraire des descripteurs statistiques, décomposer** la série en **plusieurs signaux** et **détecter** ce qui correspond à des **Vagues de Chaleur Marines (VCM)**.

Ci-dessous un exemple de série de données pour le site Mimosa (-60 m) sur la période de juin 2018 à juin 2021 :

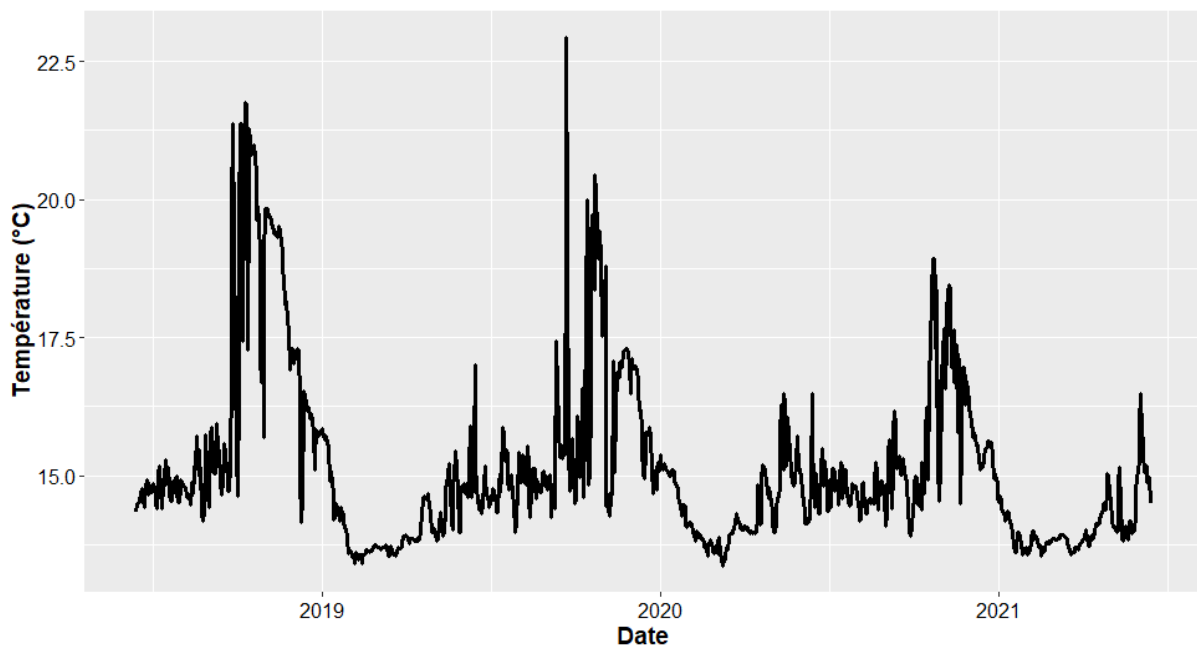


FIGURE 6 : EXEMPLE DE SERIE TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE DE FOND (SITE DE MIMOSA – 60M ENTRE JUIN 2018 ET JUIN 2021).

Afin d'étudier l'effet des anomalies thermiques et des VCM sur les assemblages coralligènes, nous avons focalisé nos analyses sur la **période hydrologique chaude**, du **1er juin au 30 novembre** : Juin-Juillet-Août-Septembre-Octobre-Novembre (JJASON) (Garrabou et al., 2022). En effet, cette période inclut les **températures maximales** observées (habituellement en juillet ou en août) après l'approfondissement de la couche de mélange à la fin du printemps et avant les brassages hivernaux.



I.B.1.a. Descripteurs statistiques

Chaque série de données est d'abord caractérisée par des **descripteurs statistiques** classiques, qui rendent compte de la **distribution** des valeurs observées sur une **période donnée** (voir figure suivante **l'histogramme des températures** mesurées pour le même site de Mimosa (-60 m) entre juin 2018 et juin 2019).

Les descripteurs classiques comprennent la valeur **moyenne**, **l'écart-type** (variabilité de la valeur), la valeur **médiane** (50 % des valeurs y sont inférieures, 50 % supérieures, soit le quantile Q50) et les autres **quantiles** classiques (Q5, Q10, Q25, Q75, Q90, Q95).

On constate **visuellement** sur la figure suivante la **non-normalité** de la distribution des valeurs de température, avec une **distribution asymétrique** des valeurs autour de la moyenne (en pointillés bleus) et un écart entre la médiane (pointillés rouges) et la moyenne dû aux valeurs élevées mais peu fréquentes.

Ces différents descripteurs peuvent être calculés sur plusieurs **fenêtres de temps** (sur la période JJASON par exemple) pour mesurer l'évolution de la distribution des valeurs de température.

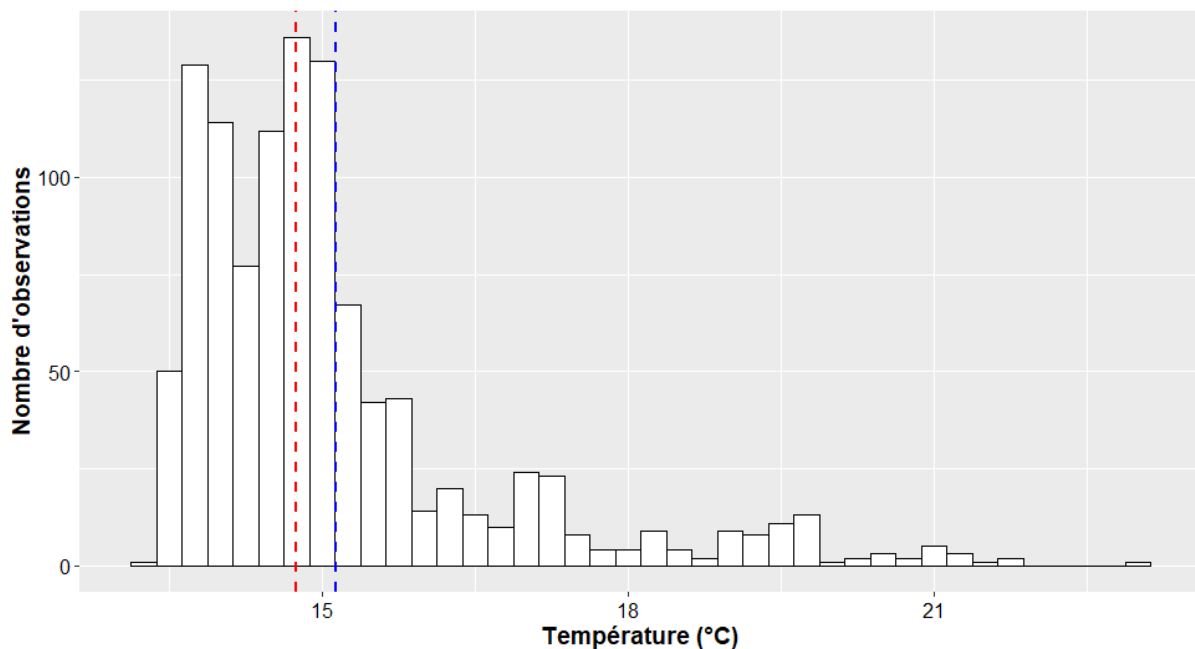


FIGURE 7 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES JOURNALIERES MESUREES POUR LE SITE DE MIMOSA – 60M ENTRE JUIN 2018 ET JUIN 2021. EN POINTILLES BLEUES LA MOYENNE DES OBSERVATIONS, EN POINTILLES ROUGES LA MEDIANE.

I.B.1.b. Anomalies thermiques et vagues de chaleur marine

Une autre approche consiste à déterminer la **normale saisonnière** afin de mesurer les **anomalies thermiques**, et pouvoir **détecter** et **quantifier** les **VCM** dans une série de données de température (Hobday et al., 2016). La méthode employée par ces auteurs est la suivante (Figure 8) :

- Calcul de la **courbe de référence** (ou courbe **climatologique**) par l'application d'une **moyenne mobile** avec une fenêtre de 11 jours sur l'ensemble des années : la valeur pour un jour donné de l'année est égal à la moyenne des valeurs depuis J-5 jusqu'à J+5 pour toutes les années confondues (sur une série de données de 10 ans, la valeur de chaque jour de l'année sera égal à la moyenne de $5 \times 11 = 55$ valeurs de températures) ;

- Calcul de la **courbe critique** de la même manière que la courbe de référence mais en retenant le **90^{ème} percentile** de la distribution des températures pour chaque jour ;
- Calcul des courbes pour **2, 3 et 4 fois** la courbe critique ($T_{ref} + (T_{crit} - T_{ref}) \times N$ avec $N = \{2,3,4\}$) ;
- Détection des **vagues de chaleur** : épisodes dépassant la courbe seuil pendant **au moins 5 jours consécutifs**. Le **qualificatif d'intensité** dépend de la valeur de la température maximale, définie par $I_{max} = T_{max} - T_{ref}$:
 - **Modérée** si : $I_{max} < 2 \times T_{crit}$
 - **Forte** si : $2 \times T_{crit} \leq I_{max} \leq 3 \times T_{crit}$
 - **Sévère** si : $3 \times T_{crit} \leq I_{max} \leq 4 \times T_{crit}$
 - **Extrême** si : $4 \times T_{crit} \leq I_{max}$

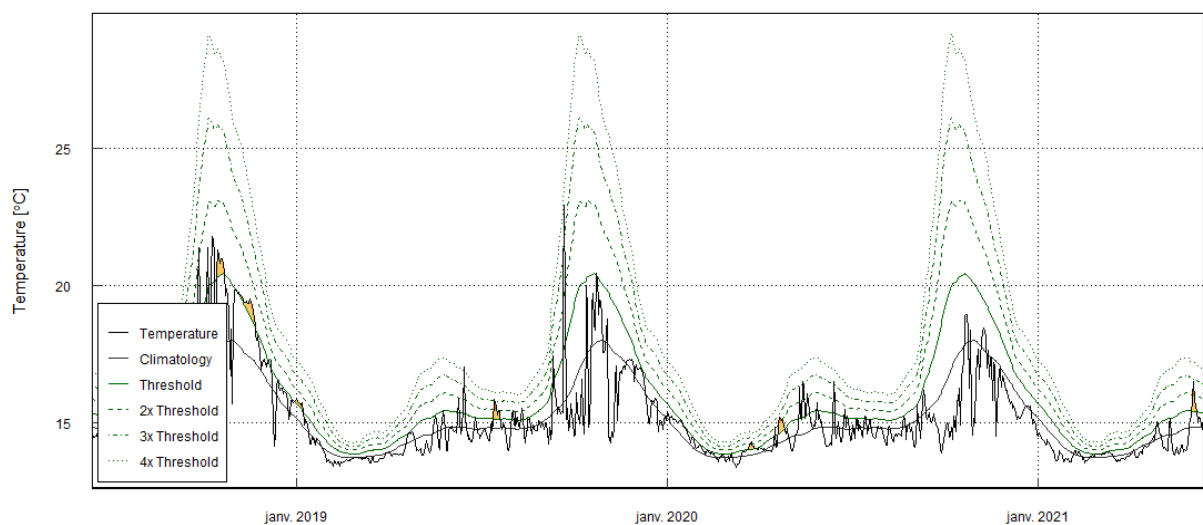


FIGURE 8 : DETECTION DE VAGUES DE CHALEUR MARINE POUR LE SITE MIMOSA -60 M

Cette méthode permet de **détecter** des épisodes **d'anomalies thermiques positives** potentiellement **néfastes** pour les espèces fixées, et permet de **calculer des indicateurs basés sur ces évènements**, comme par exemple : le nombre d'évènements sur une période, la durée cumulée des évènements sur une période, avec ou sans pondération par la sévérité de chaque vague de chaleur, etc.

Il est important de noter qu'il faudrait théoriquement des séries de données **d'au moins 30 ans** pour interpréter correctement la **courbe de référence** (« normale saisonnière » pour chaque jour de l'année) et détecter / quantifier précisément les vagues de chaleur. L'approche étant intéressante et tout de même applicable sur quelques années seulement (avec une **courbe de référence imprécise**), nous avons utilisé ces indicateurs pour les séries de données de ce projet afin d'analyser les observations de mortalité de gorgones.



I.B.2. *Mortalité des espèces érigées*

Pour **chaque station**, nous avons calculé la **valeur moyenne de mortalité** sur toutes les gorgones évaluées dans les **30 quadrats** de 50 x 50 cm afin de chercher les **corrélations avec la température** de l'eau. Pour chaque station, le **niveau de gravité** de l'épisode de **mortalité des gorgones** est déterminé avec la **classification** suivante (Garrahou et al., 2022) :

- **Aucune mortalité** (< 10 %)
- **Faible** (≥ 10 % et < 30 %)
- **Modérée** (≥ 30 % et < 60 %)
- **Sévère** (≥ 60 %)

I.B.3. *Mortalité des espèces sessiles*

L'ensemble des **quadrats photographiques** ont été analysés par notre **algorithme de reconnaissance d'espèces** entraîné sur la base de données RECOR 2010-2021 (Marre et al., 2020; Andromède Océanologie, 2023), en **projetant aléatoirement 64 points** à identifier au sein de chaque quadrat. Au total, cela correspond à **28 800 identifications** (15 stations x 30 quadrats x 64 points). Les résultats sont **exportés au format CPCe** (Coral Point Count with Excel extension ; voir figure suivante) (Kohler and Gill, 2006) pour **chaque quadrat**, et compilés dans un fichier csv unique.

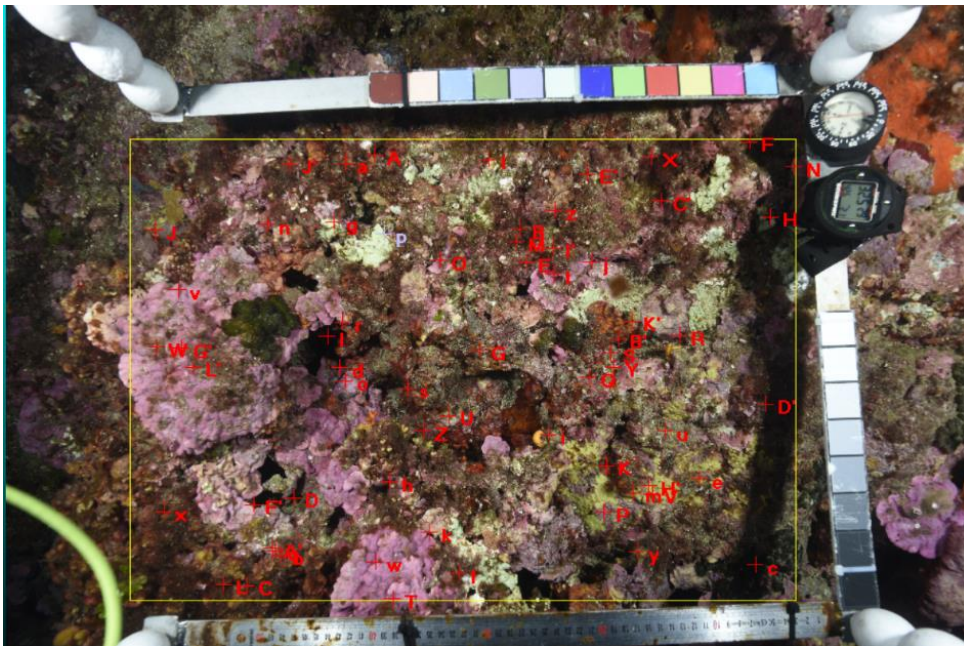


FIGURE 9: QUADRAT PHOTOGRAPHIQUE AVEC LES 64 POINTS IDENTIFIES PAR L'ALGORITHME OUVERT DANS CPCe.

Dans le **cadre de cette étude**, nous ne nous sommes intéressés qu'au **taux de nécroses moyen des espèces encroûtantes** sur les 30 quadrats de **chaque station**.

I.B.4. *Liens entre température et mortalité*

Si cette étude vise à faire la lumière sur l'**évènement de mortalité exceptionnelle** suite à la **canicule de l'été 2022**, nous avons utilisé l'**ensemble des données RECOR** et **CALOR** pour nos analyses afin d'augmenter la puissance statistique. En effet, le protocole de suivi mis en place **depuis 2010** dans le cadre de **RECOR** permet de collecter des données sur la **démographie des gorgones** (taux de nécroses, structure en taille) ainsi que sur l'**état écologique des strates basse et intermédiaire** (diversité, envasement, nécroses).

Nous avons cherché des **liens statistiques** entre les **indicateurs de température (calculés sur les données de température de fond CALOR et de surface satellite)** et le pourcentage de **nécroses des gorgones**, exprimé comme le **pourcentage moyen de tissus nécrosés par colonie**, ainsi que le pourcentage de **nécroses des espèces encroûtantes**. Nous avons également analysé les séries de données de MLD pour déterminer les anomalies d'enfoncement de la thermocline et voir les liens avec la température de surface et les nécroses.

I.B.5. *Liens entre température de fond CALOR et données externes*

L'objectif de cette partie est de chercher à comprendre les **liens entre la température de surface et la température de fond** selon la localisation, en particulier durant la **période critique estivale** où la thermocline s'enfonce et expose les espèces sensibles aux **VCM**. Pour ce faire, nous avons utilisé des **séries de données de température de surface**, de **température de fond (modélisée)** ainsi que de la **profondeur de couche de mélange**, assez longues pour dériver de manière fiable les **normales saisonnières** et donc les **anomalies** et les **VCM** (40 ans pour la température de surface et 30 ans pour les autres ; voir méthodologie section I.B.1.b). A titre d'exemple, ci-dessous l'**anomalie de température de surface** observée le **28 août 2022** en Méditerranée :

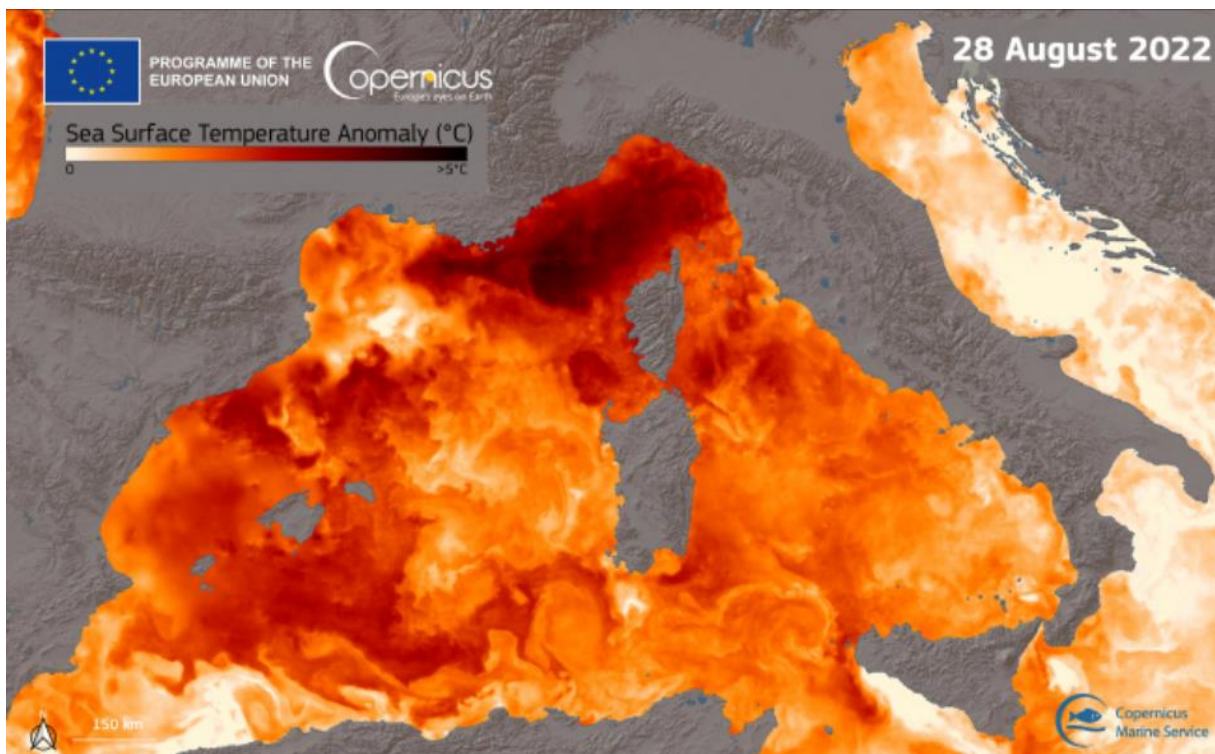


FIGURE 10 : ANOMALIE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE EN MEDITERRANEE LE 28 AOUT 2022 (SOURCE : WWW.COPERNICUS.EU)



En particulier, nous chercherons à :

- **Etudier les liens entre températures de surface et de fond**, notamment pendant les périodes de vagues de chaleur en surface ;
- **Construire un modèle prédictif de la température de fond** à partir des autres données environnementales, afin d'être de pouvoir la prédire en tout point en quasi « temps réel » (à mesure que les données environnementales satellite sont mises à disposition) ;
- Définir des « **refuges thermiques** » (i.e. qui font l'objet d'une **forte anomalie positive** en surface, et pourtant **non impactées** en profondeur).

Selon les résultats concernant ces deux premiers points, nous chercherons à **extrapoler les relations** pour cartographier des **zones de refuges thermiques**, en se basant sur les données environnementales disponibles. Selon la pertinence des résultats, ces zones pourraient devenir **prioritaires pour la conservation**, afin de **protéger des impacts humains directs** les zones épargnées par les épisodes de vagues de chaleur, et permettre aux zones impactées de **recupérer plus facilement** (par réensemencement notamment).

III. Analyse de l'épisode caniculaire de 2022

I.A. Analyse descriptive de chaque site d'ouest en est

Pour **chaque station CALOR**, nous avons produit un **graphique affichant en parallèle** les moyennes journalières de **température de fond CALOR**, ainsi que les valeurs de **température de surface** et de **profondeur de couche de mélange (MLD)** pour la période de juin à octobre 2022. La température de fond semble suivre globalement les **mêmes tendances** que la température de surface, avec **davantage de variation** (mais les données ne sont pas de même nature), et semble de manière assez logique **d'autant plus corrélée** à la température de fond que **la MLD se rapproche de la station CALOR**. La température de fond atteint ainsi régulièrement des maximums à des moments où la température de surface n'est pas nécessairement au plus haut, mais la MLD basse.

Par ailleurs, des exemples de **quadrats photographiques** et de **photos d'illustrations** permettent de se rendre compte de l'état de peuplements coralligènes pour chaque station comprenant des mesures biologiques. La ou les station(s) de mesures de gorgones sont reportées sur le graphique, le cas échéant.

I.A.1. Nord Cote Bleue

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la **station « Nord Côte Bleue 25 m »**, **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

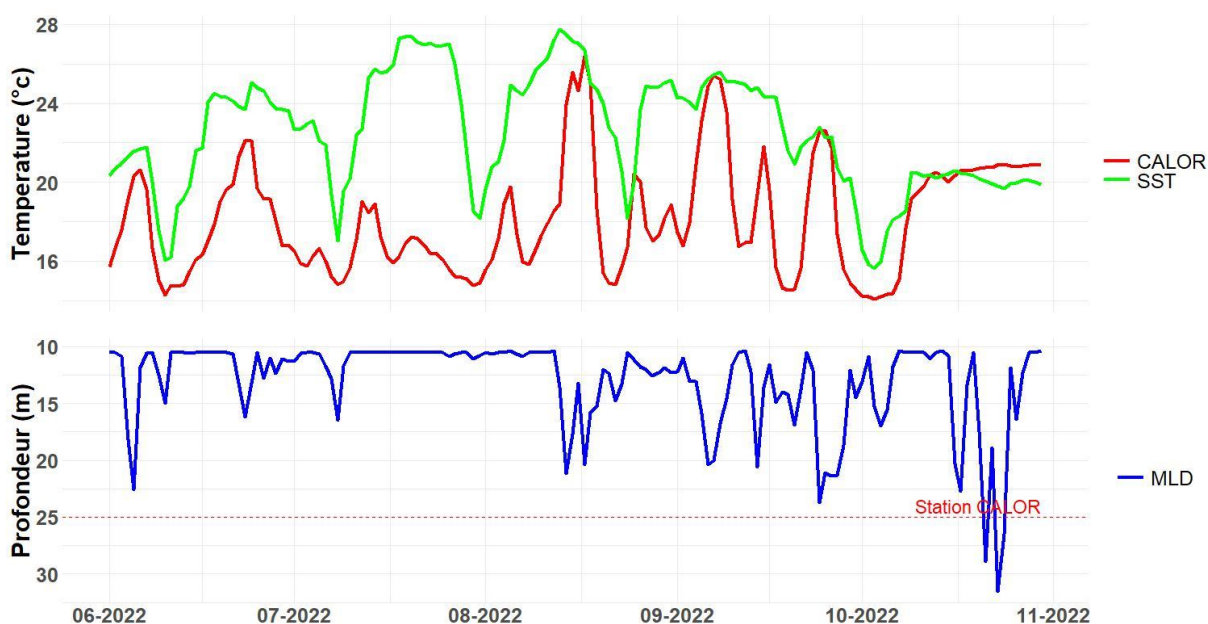


FIGURE 11 : TEMPERATURE DE LA STATION NORD COTE BLEUE 25 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.2. *Frioul*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Frioul 25 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

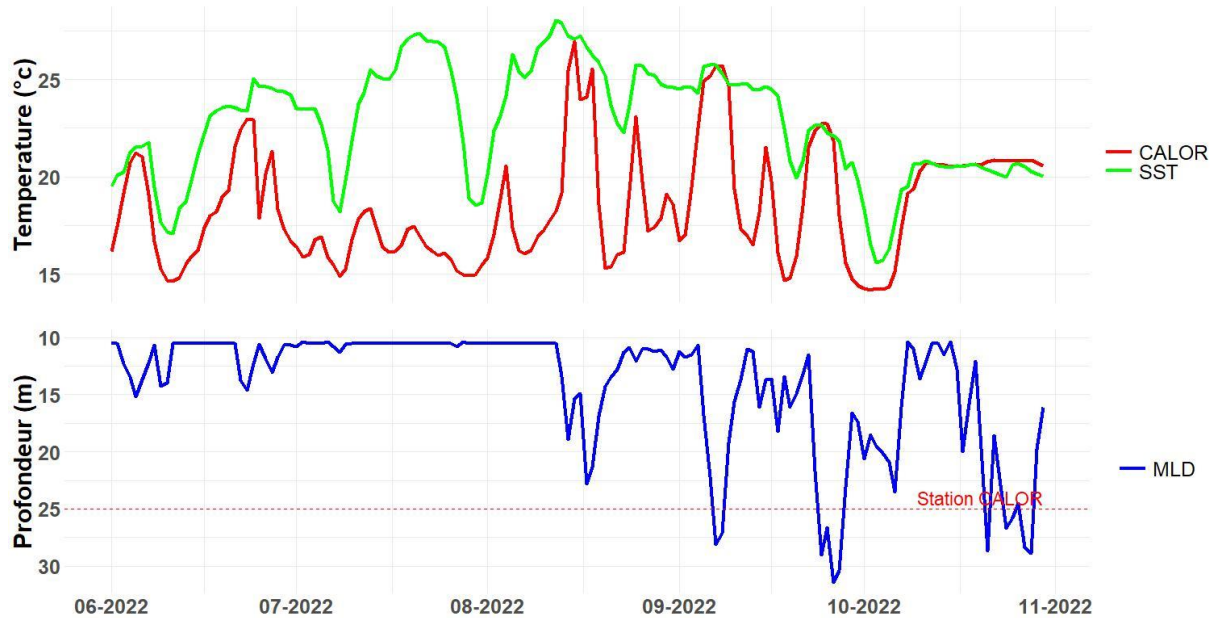


FIGURE 12 : TEMPERATURE DE LA STATION FRIOUL 25 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.3. *Tiboulen*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station **Tiboulen 40 m**, **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

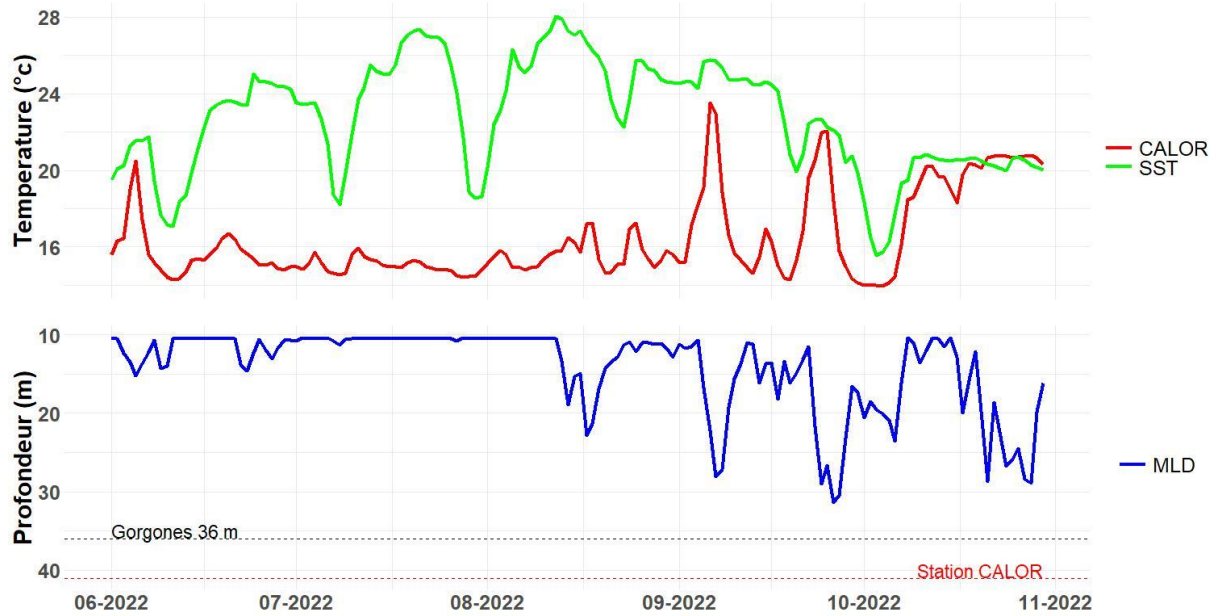


FIGURE 13 : TEMPERATURE DE LA STATION TIBOULEN 40 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

Les colonies de *Paramuricea clavata* étaient **partiellement nécrosées** entre 30 et 35 m, avec une **majorité de colonies (74 %) non affectés** par l'épisode de mortalité sur la station à 36 m. Seules 4 colonies d'*Eunicella cavolini* ont été évaluées, **dont 3 sans aucunes traces de nécroses**. La figure suivante illustre l'état des gorgones sur le site Tiboulen :

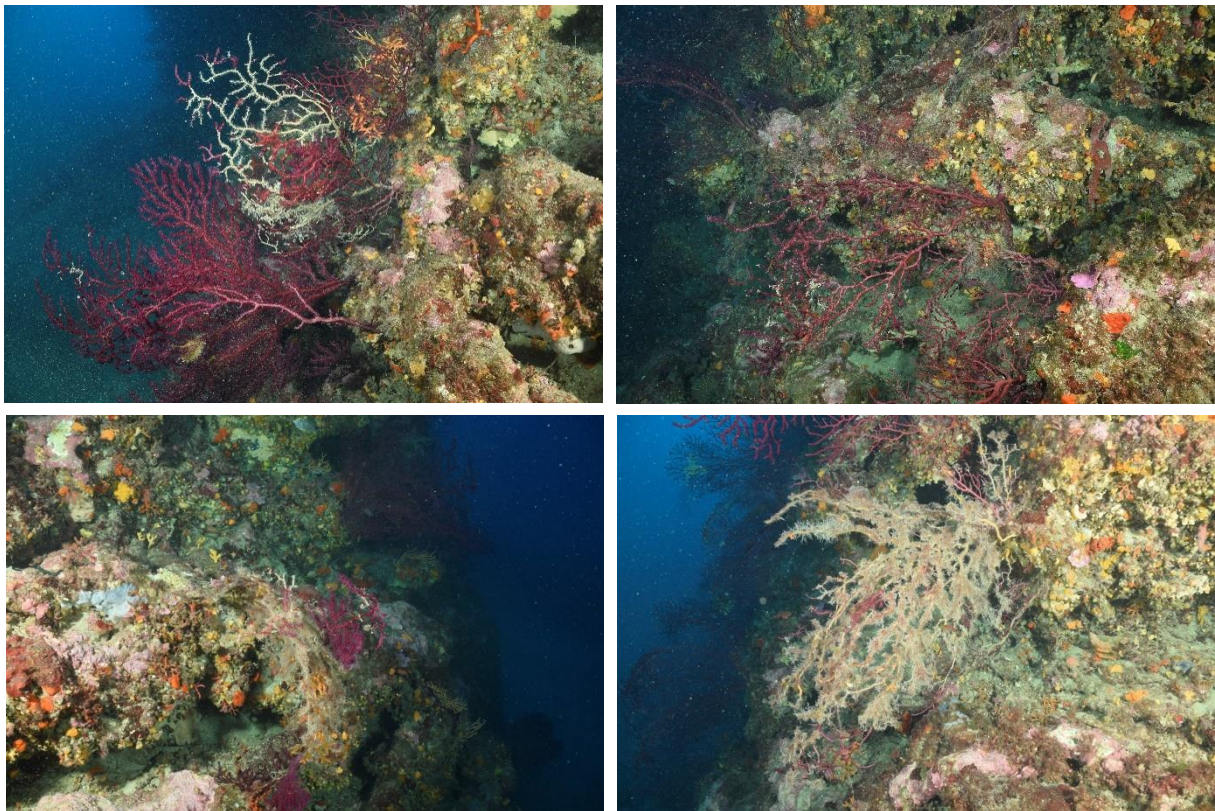


FIGURE 14 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE TIBOULEN



Nous avons observé des **macro-nécroses des ARE** en remontant sur le tombant autour de **31-32 m**, où nous avons fait une série de **quelques quadrats complémentaires** en plus de la station 40 m qui montrait un faible taux de nécroses (1,3 %) :

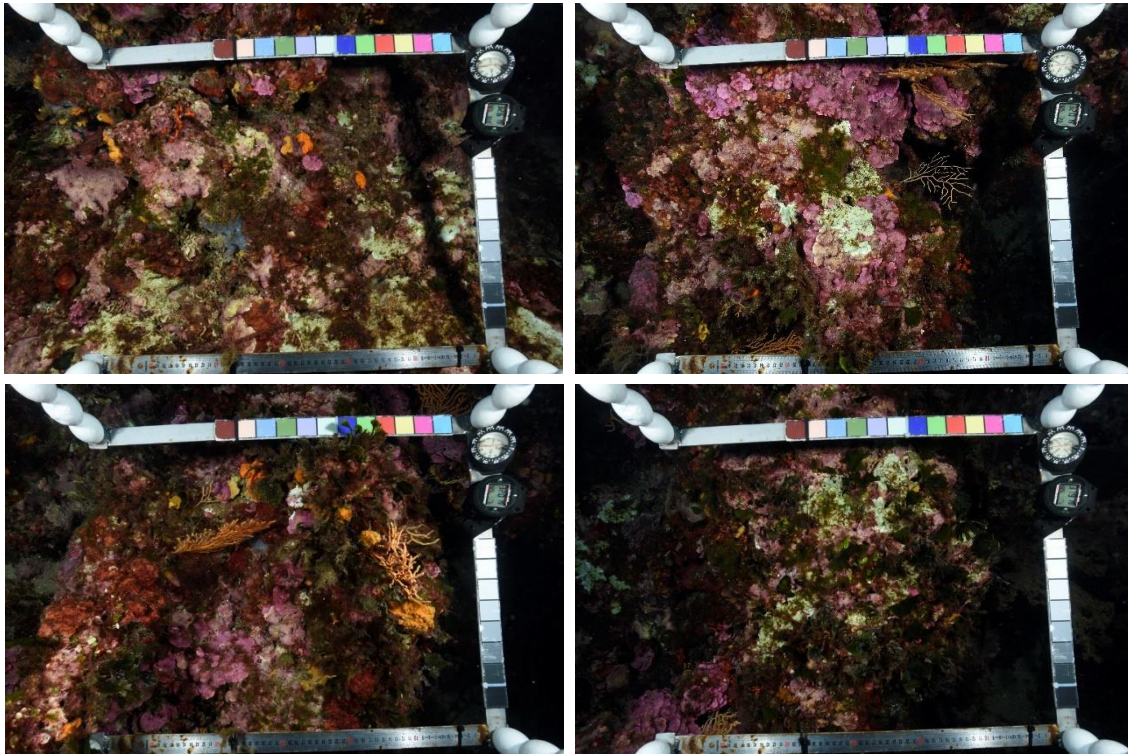


FIGURE 15 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION TIBOULEN 32M

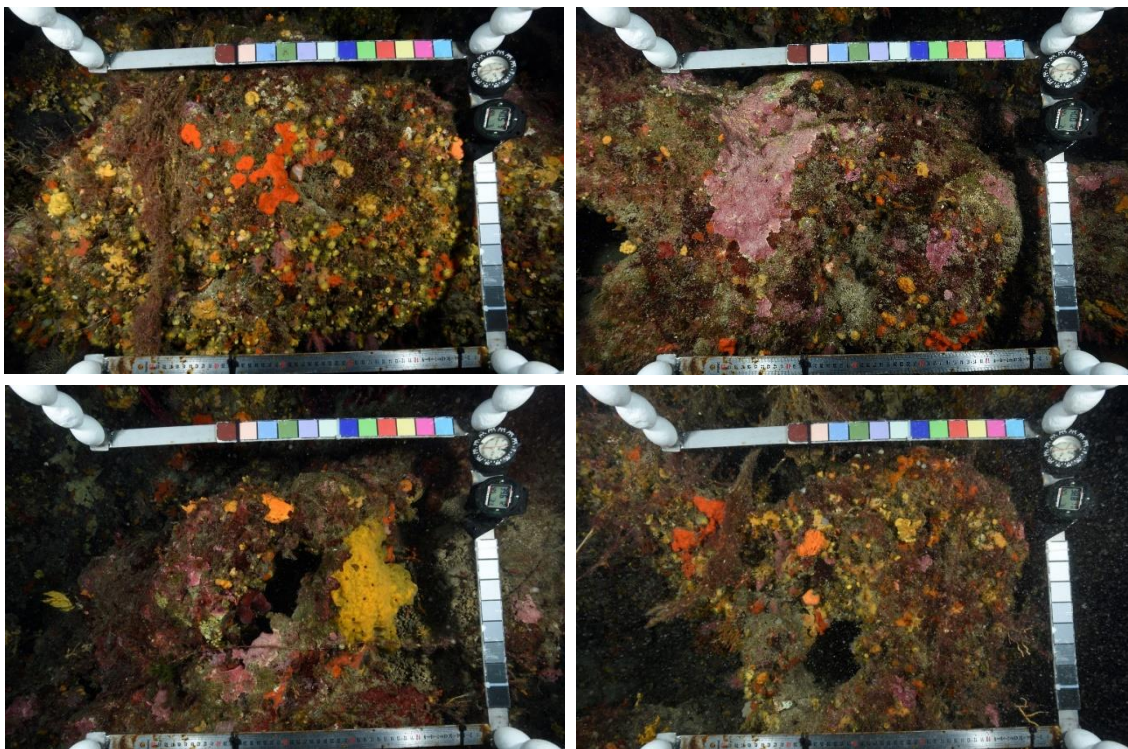


FIGURE 16 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION TIBOULEN 40M

I.A.4. Ile Plane

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « Ile Plane 26 m », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

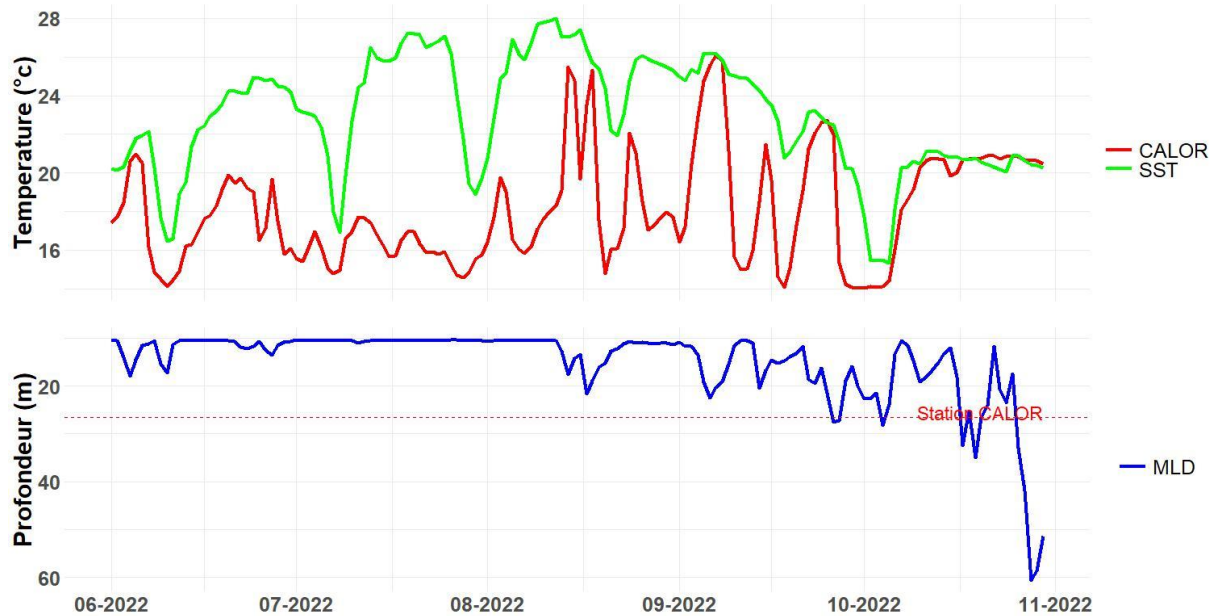


FIGURE 17 : TEMPERATURE DE LA STATION ILE PLANE 26 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.5. Morgiou

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Morgiou 28 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

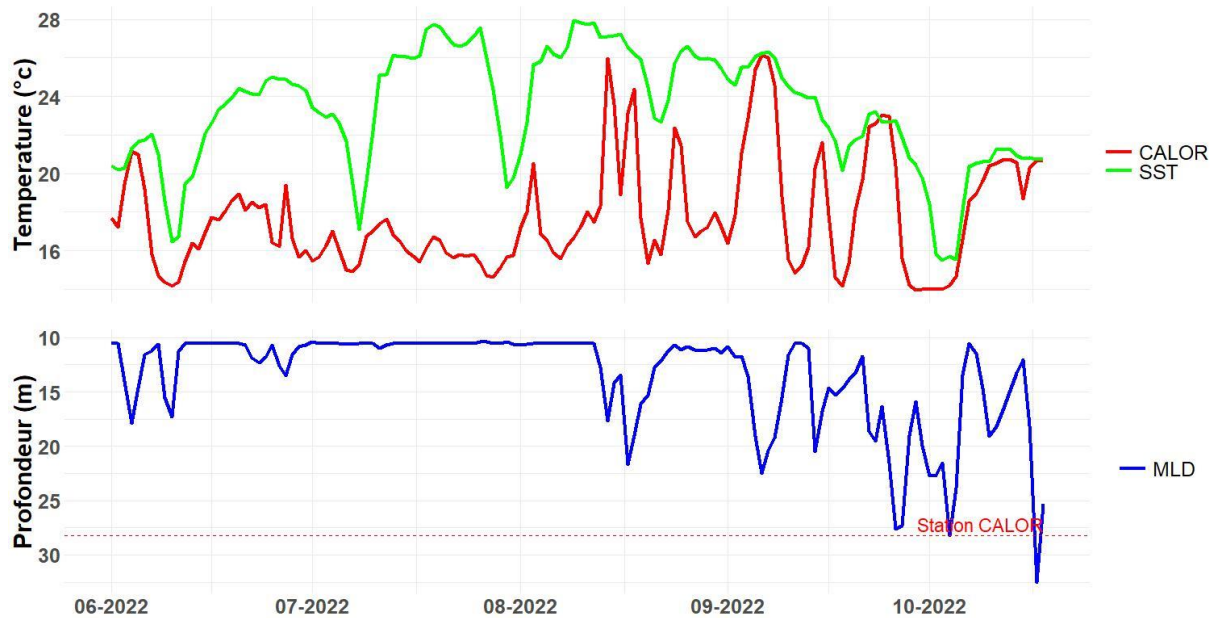


FIGURE 18 : TEMPERATURE DE LA STATION MORGIOU 28 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.6. Morgiou PI

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Morgiou PI 15 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

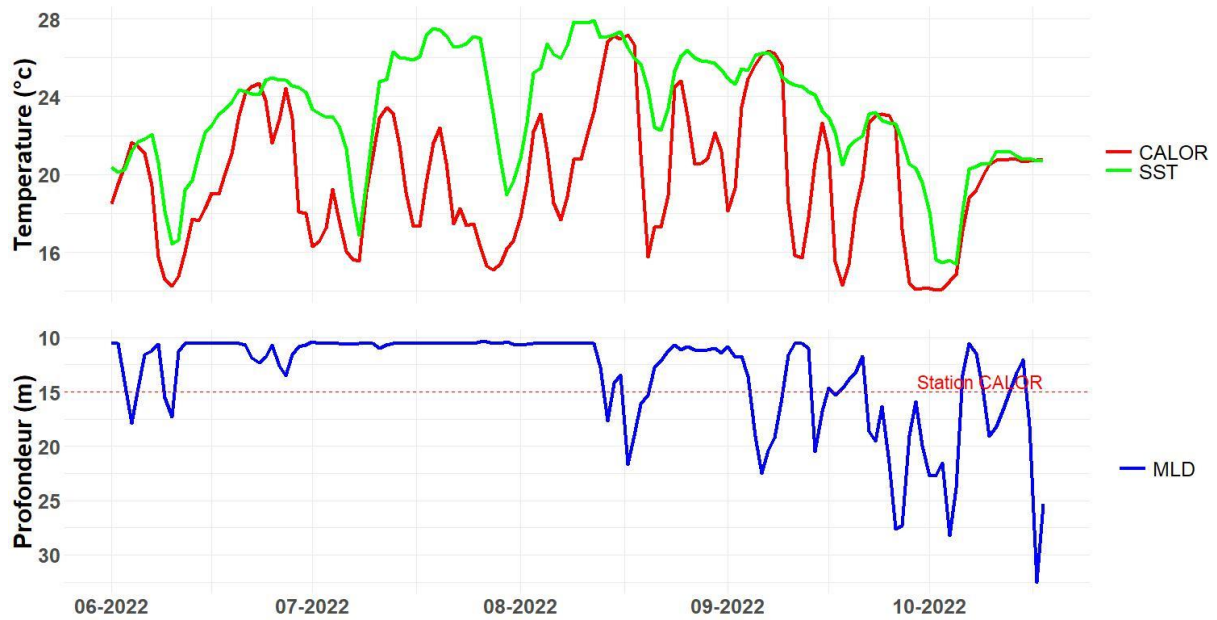


FIGURE 19 : TEMPERATURE DE LA STATION MORGIUO PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.7. *Devenson*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Devenson 16 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

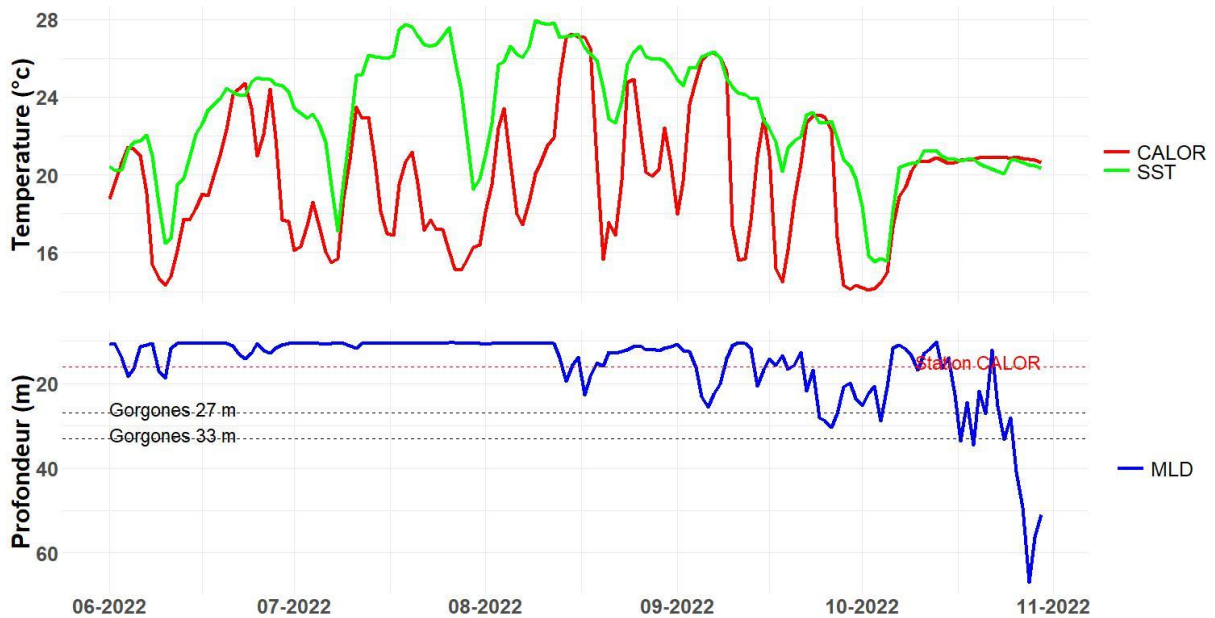


FIGURE 20 : TEMPERATURE DE LA STATION DEVENSON 16 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Devenson 27 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

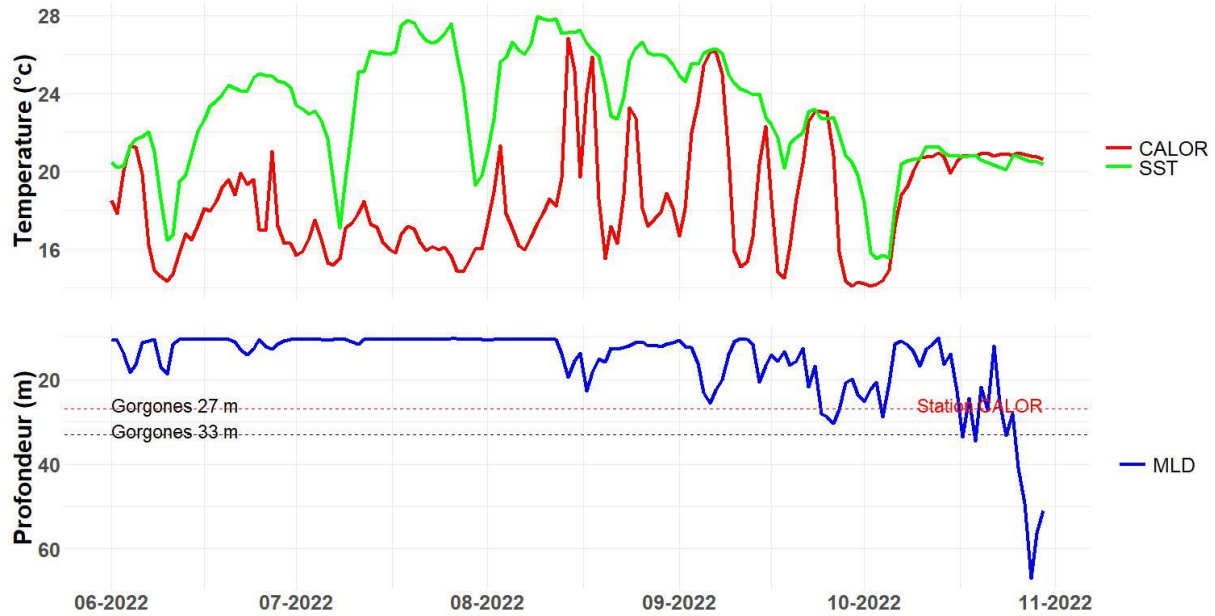


FIGURE 21 : TEMPERATURE DE LA STATION DEVENSON 27 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Devenson 46 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

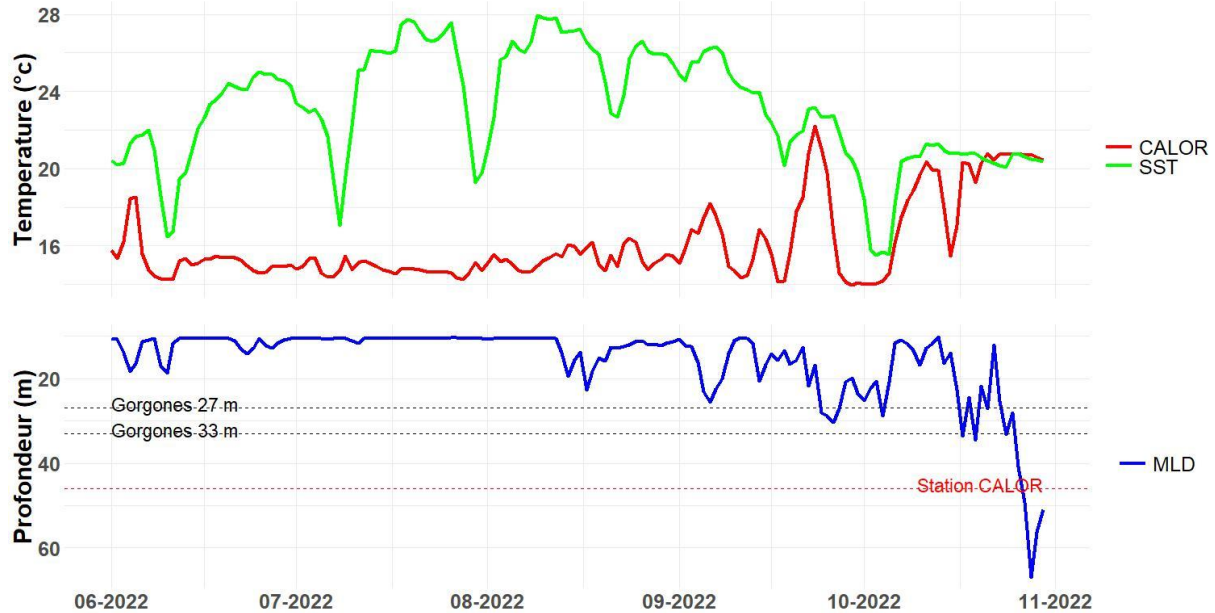


FIGURE 22 : TEMPERATURE DE LA STATION DEVENSON 46 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

Il n’y a **pas de colonies de *Paramuricea clavata*** sur la station RECOR Devenson 33 m ni sur la station complémentaire à 27 m. Les colonies d’*Eunicella cavolini* étaient **majoritairement intactes** (77 % à 33 m et 69 % à 27 m) avec une proportion de colonies sévèrement nécrosées supérieure à 27 m (17 %) qu’à 33 m (7 %).



La station RECOR Devenson 47 m montrait un faible **taux de nécroses des ARE** (1,6 %), mais nous avons échantillonné **deux autres stations à 27 et 16 m** à la remontée, qui présentaient toutes deux des macro-nécroses des ARE, en particulier la station à 27 m (4,9 % à 27 m et 2 % à 16 m) :

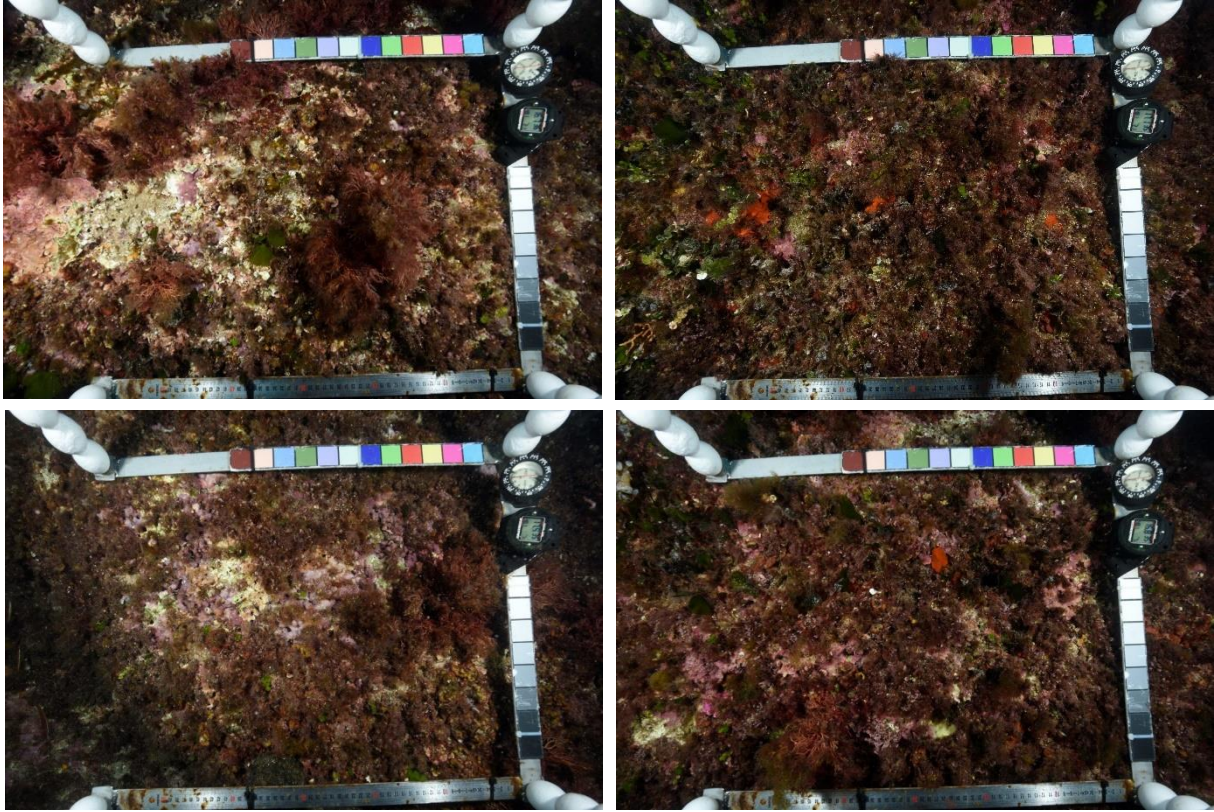


FIGURE 23 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION DEVENSON 16M

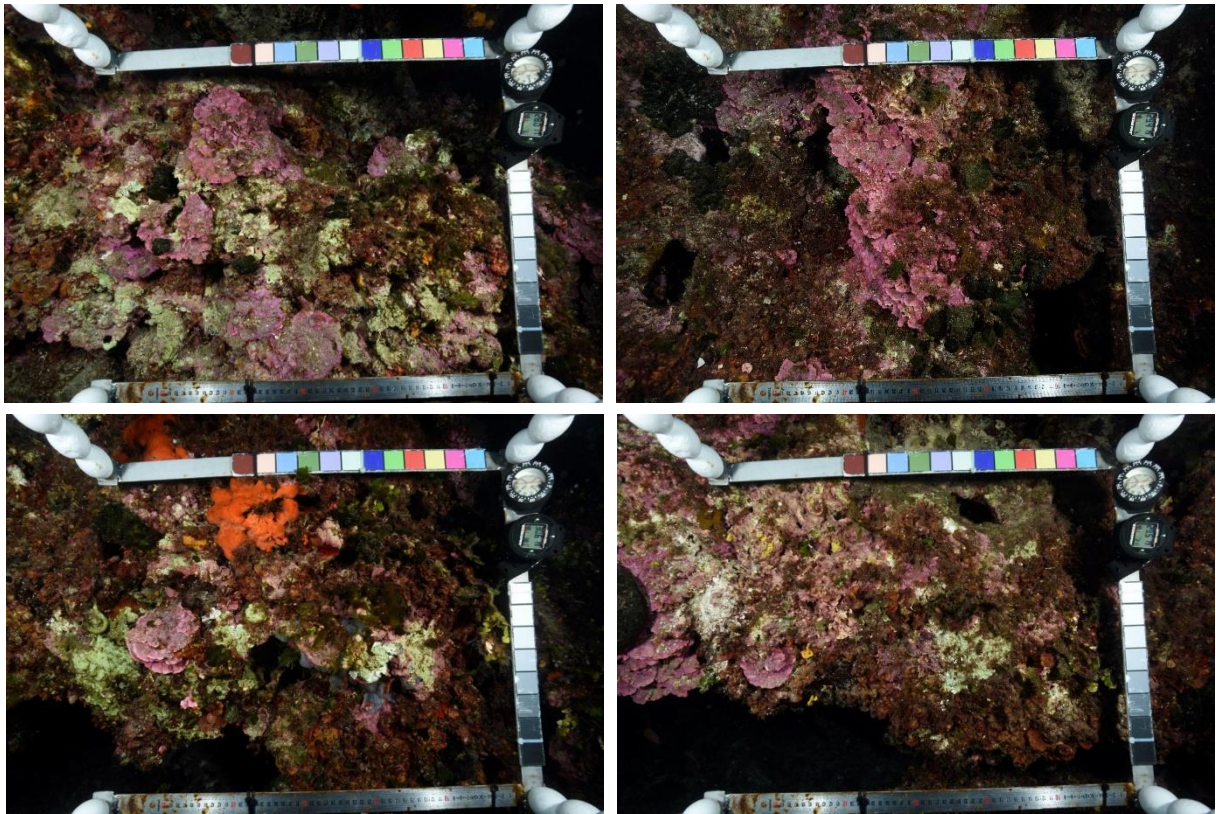


FIGURE 24 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION DEVENSON 27M

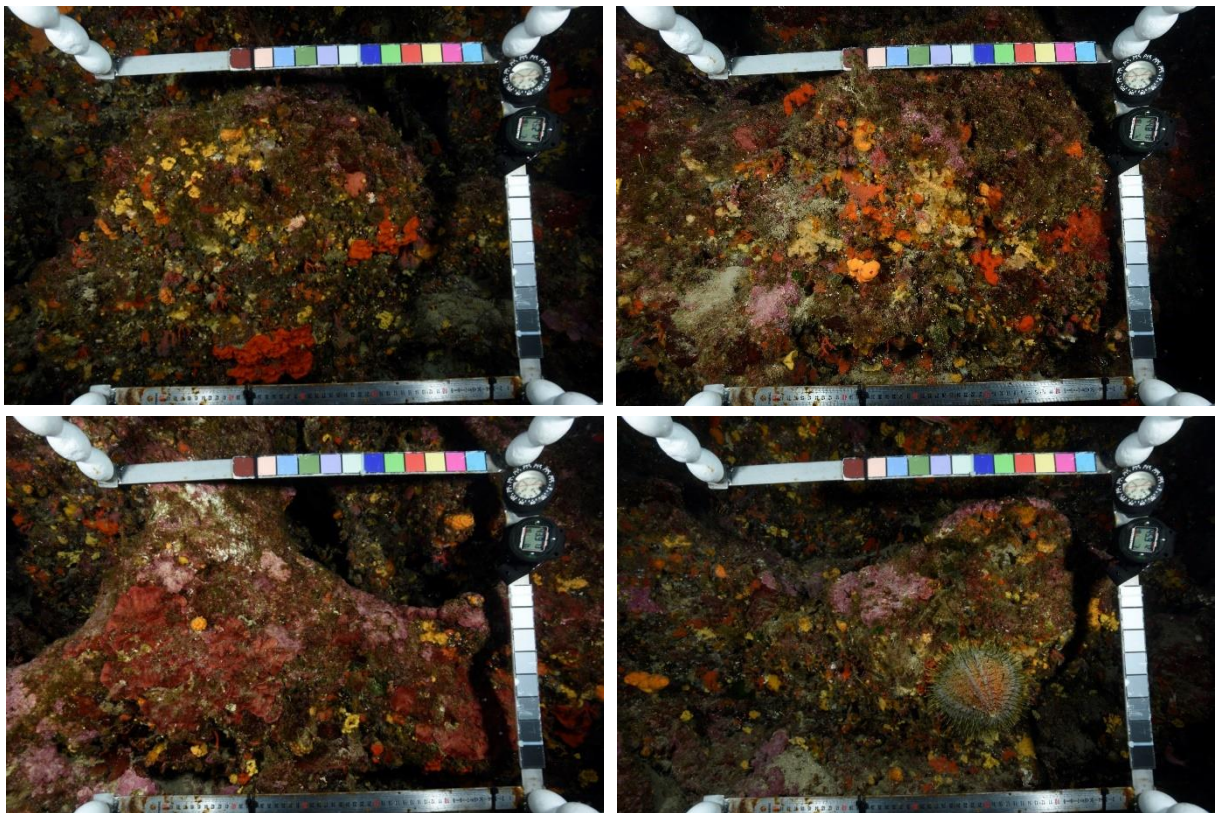


FIGURE 25 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION DEVENSON 47M



I.A.8. Rosier

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Rosier 45 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

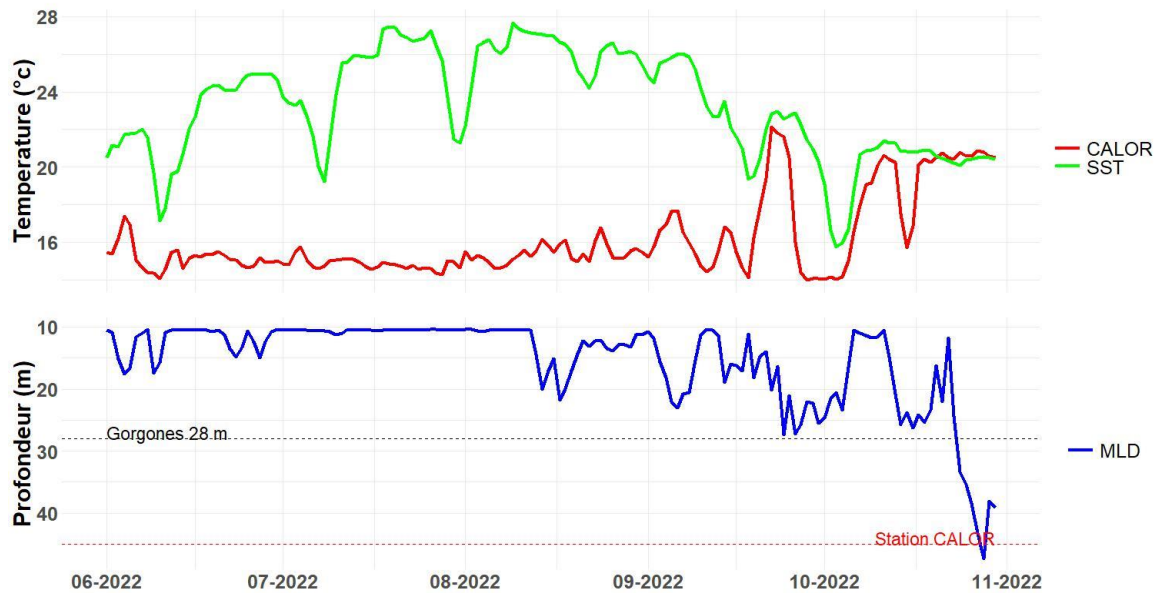


FIGURE 26 : TEMPERATURE DE LA STATION ROSIER 45 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Rosier 55 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

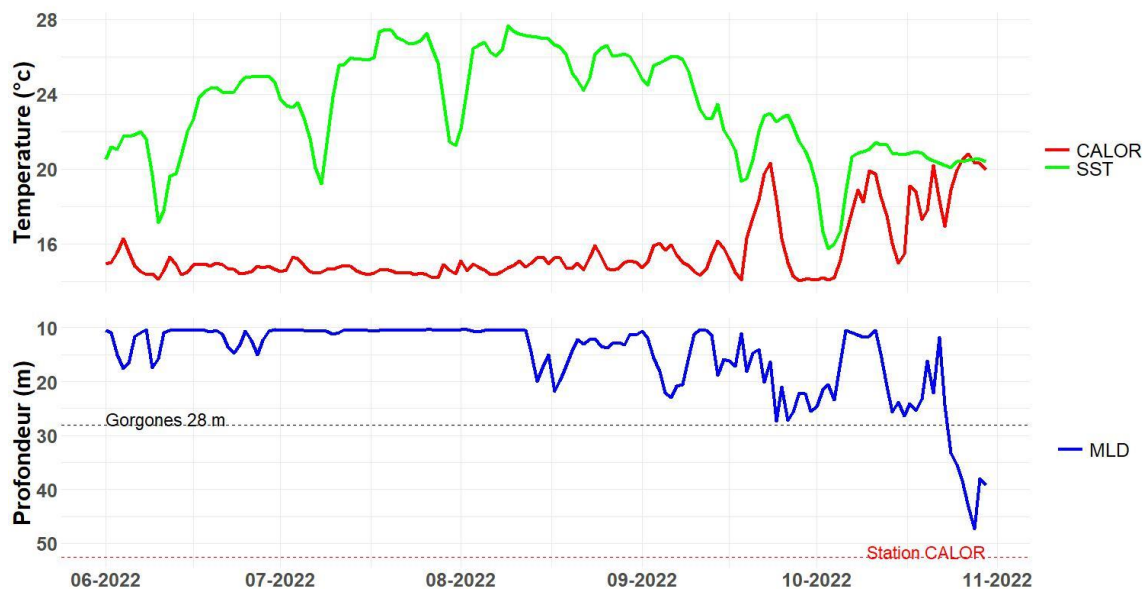


FIGURE 27 : TEMPERATURE DE LA STATION ROSIER 55 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

Le site de **Rosier** hébergeant des gorgones sur une large amplitude bathymétrique, nous avons pu constater **l'impact de l'épisode de mortalité en fonction de la profondeur**, avec une limite apparente **autour de 30 m** :

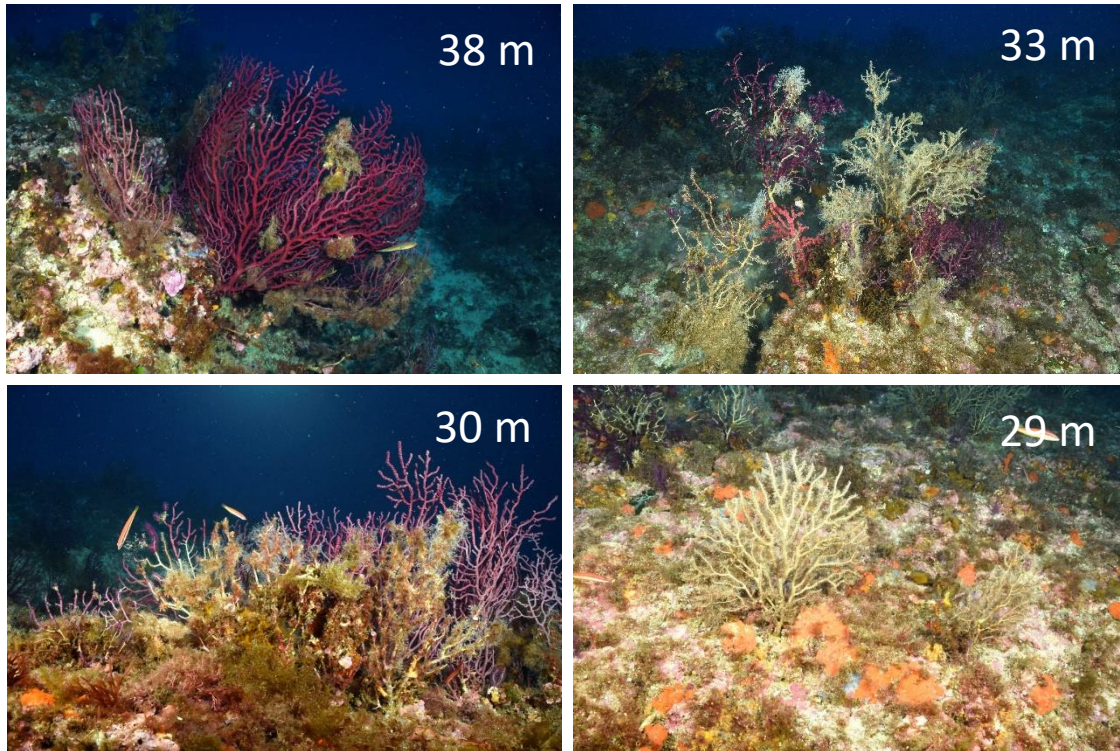


FIGURE 28 : ILLUSTRATIONS DES GORGONES A DIFFERENTES PROFONDEURS SUR LE SITE ROSIER

Sur la **station complémentaire** réalisée à **28 m**, nous avons observé **une colonie d'*Eunicella cavolini* intacte**, et une population de *Paramuricea clavata* très affectée par l'épisode, avec **60 % de colonies sévèrement nécrosées**.

Au-dessus de 30m, le **taux de nécroses est très élevé**, avec des colonies intégralement nécrosées. En revanche, certaines colonies ne montraient aucune nécrose, possiblement des génotypes différents ne conférant pas la même résistance à l'exposition à la chaleur :



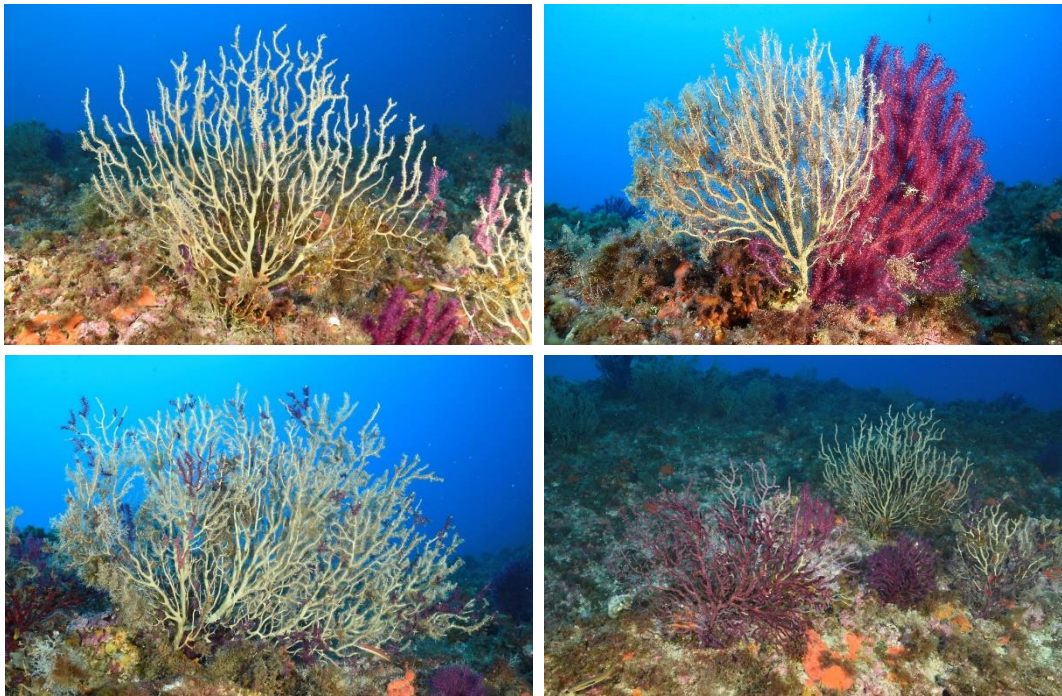


FIGURE 29 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE ROSIER (PROFONDEUR INFÉRIEURE À 30 M)

I.A.9. *Alon*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Alon 22 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

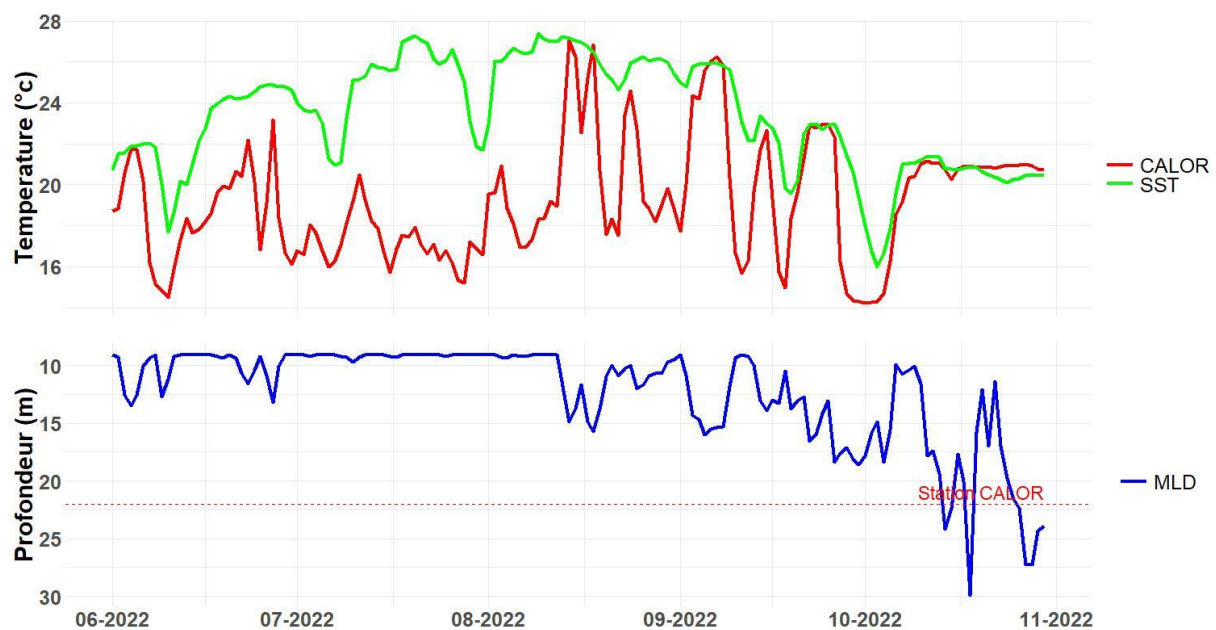


FIGURE 30 : TEMPÉRATURE DE LA STATION ALON 22 M (CALOR), TEMPÉRATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MÉLANGE (MLD) DE JUIN À OCTOBRE 2022

I.A.10. *Alon PI*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Alon PI 16 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

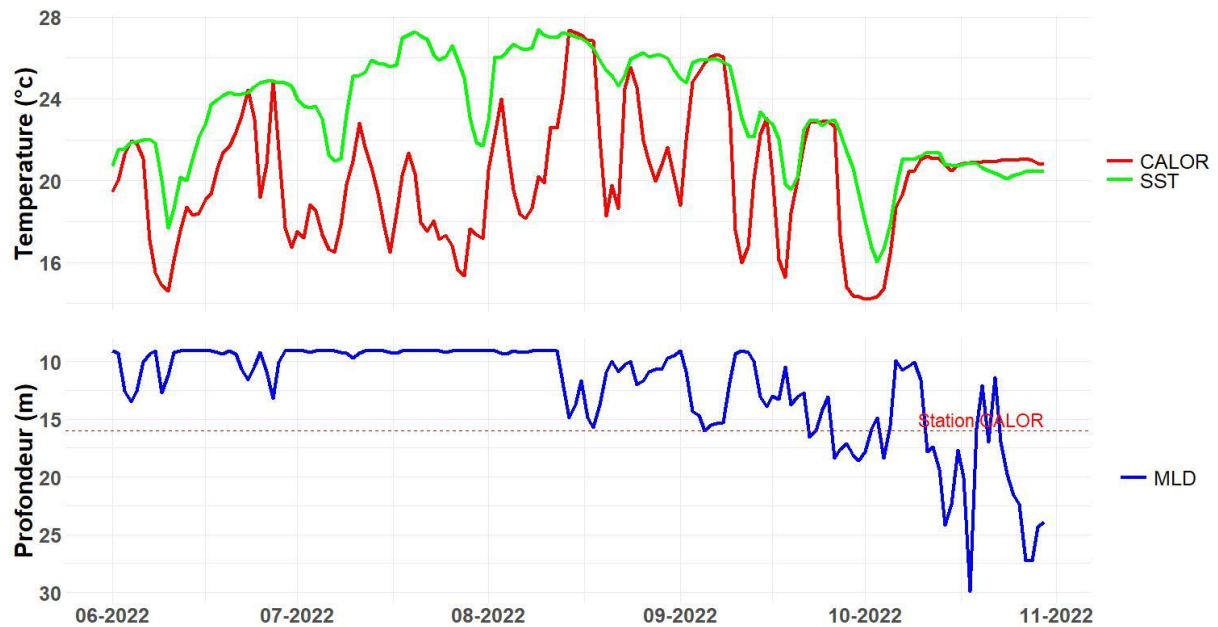


FIGURE 31 : TEMPERATURE DE LA STATION ALON PI 16 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.11. Embiez Nord

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Embiez Nord 30 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

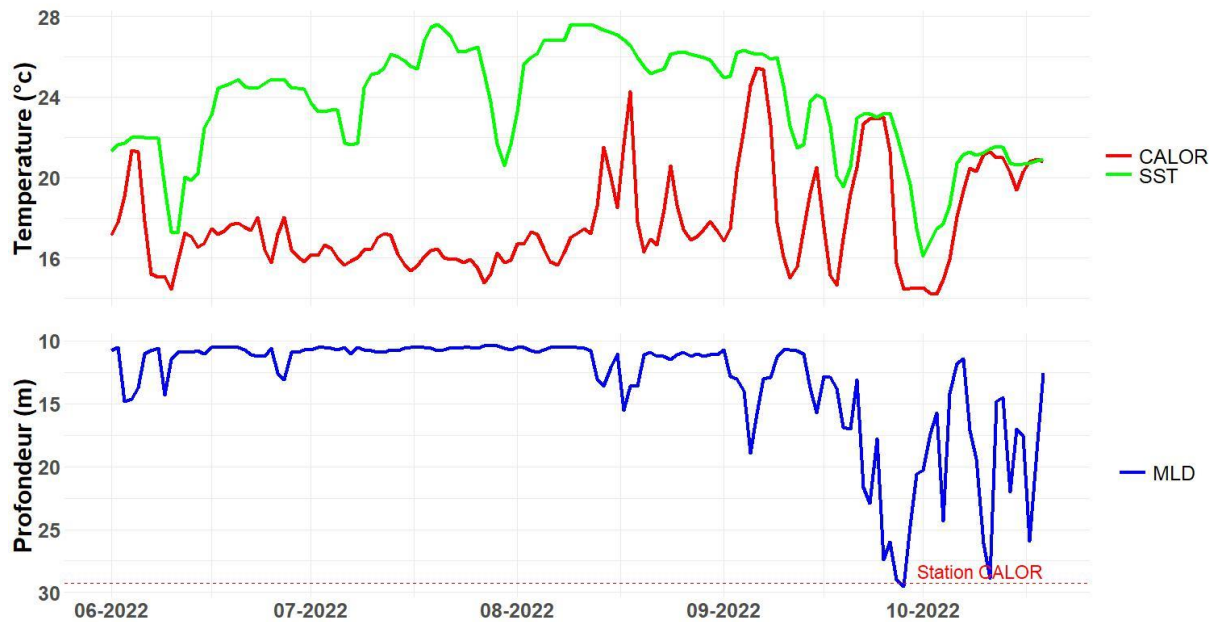


FIGURE 32 : TEMPERATURE DE LA STATION EMBIEZ NORD 30 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.12. Embiez Nord PI

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Embiez Nord PI 15 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

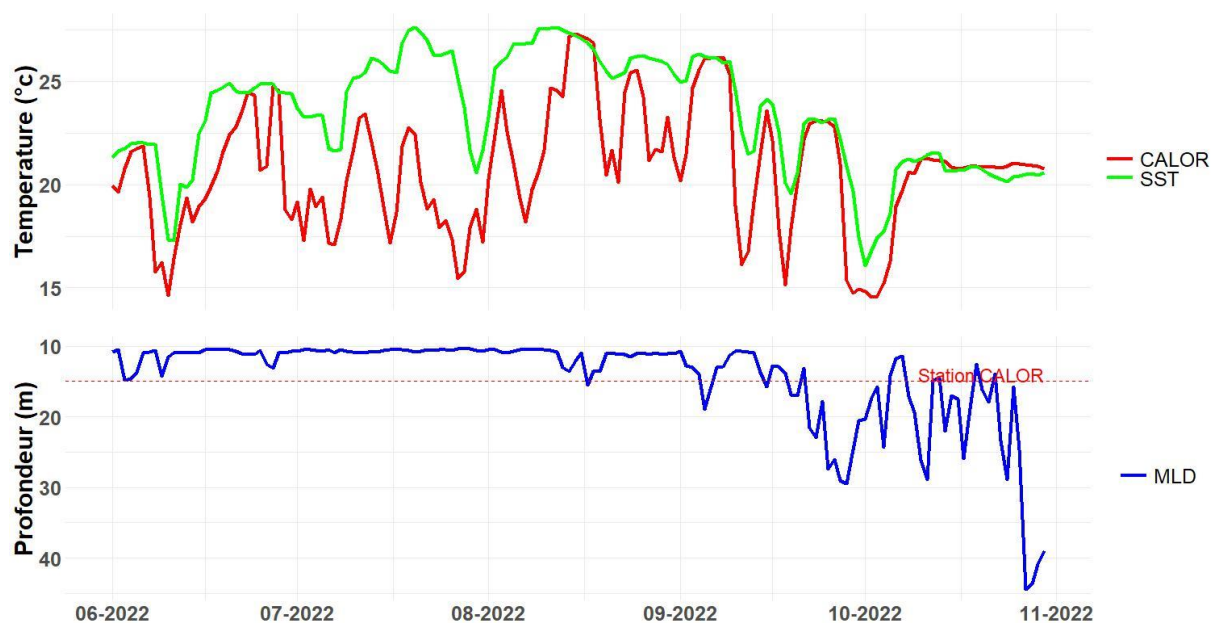


FIGURE 33 : TEMPERATURE DE LA STATION EMBIEZ NORD PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.13. *Pierre à Christian*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Pierre à Christian 46 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

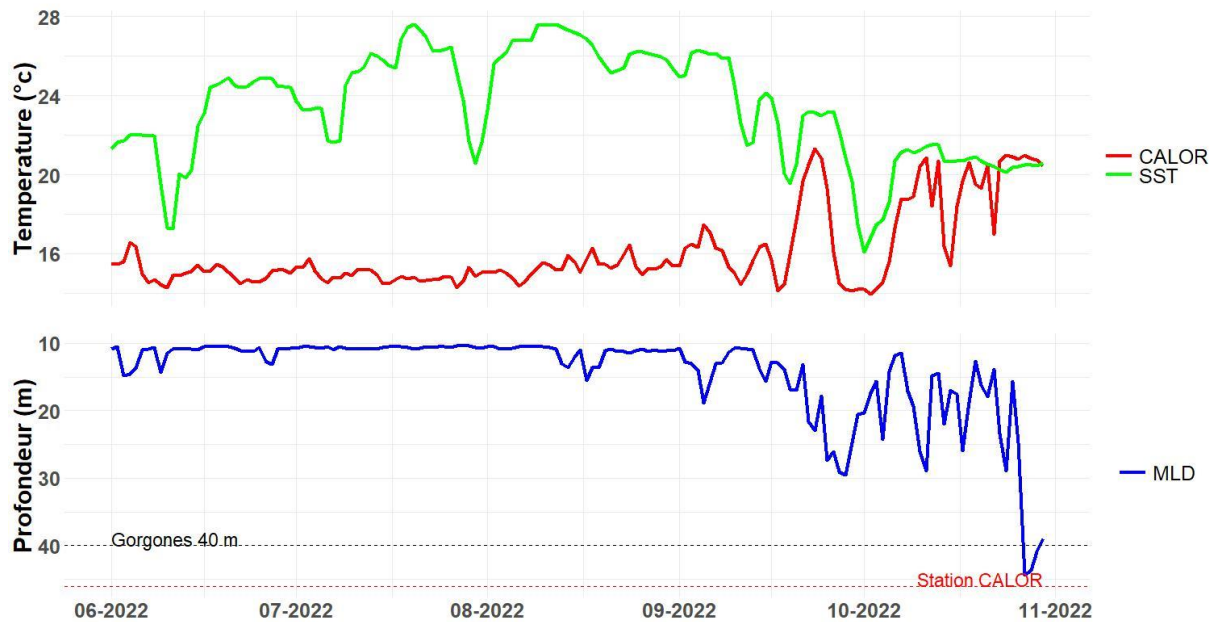


FIGURE 34 : TEMPERATURE DE LA STATION PIERRE A CHRISTIAN 46 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

Nous n'avons pas observé de colonies d'*Eunicella cavolini* sur la station RECOR à 40 m. La population de *Paramuricea clavata* était **modérément affectée** avec **38 % de colonies modérément à sévèrement** nécrosées :



FIGURE 35 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE PIERRE A CHRISTIAN ENTRE 30 ET 35 M

I.A.14. Cap Sicie Ouest

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « Cap Sicie Ouest 30 m », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du 1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022 :

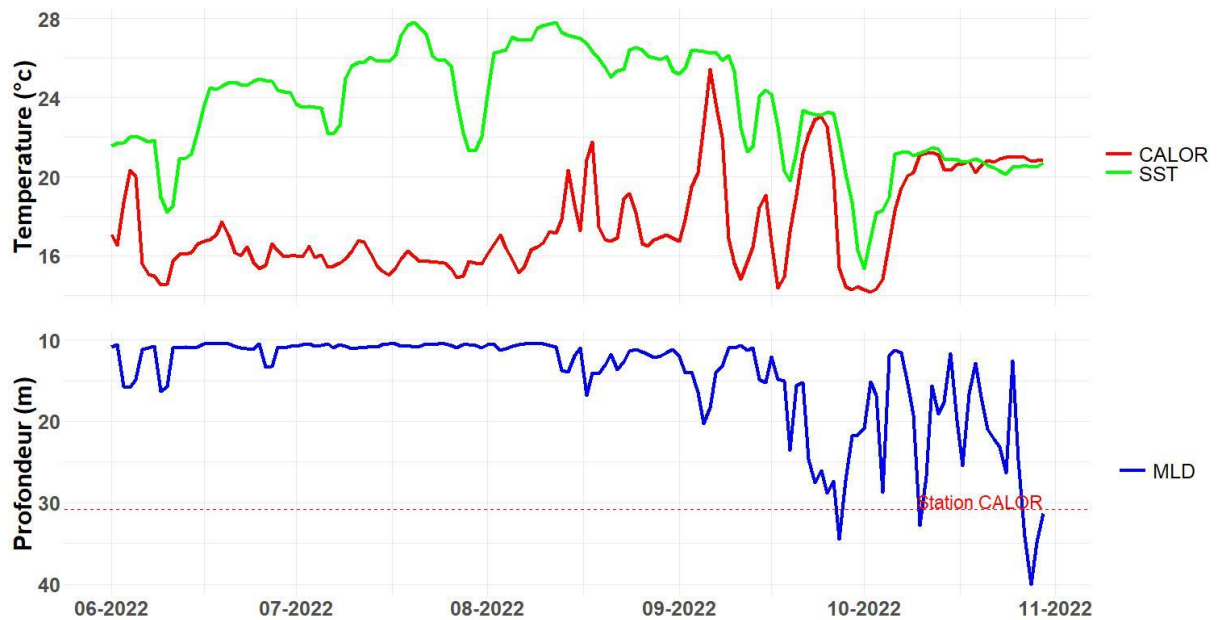


FIGURE 36 : TEMPERATURE DE LA STATION CAP SICIE OUEST 30 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.15. *Cap Sicie Ouest PI*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Cap Sicie Ouest PI 15 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

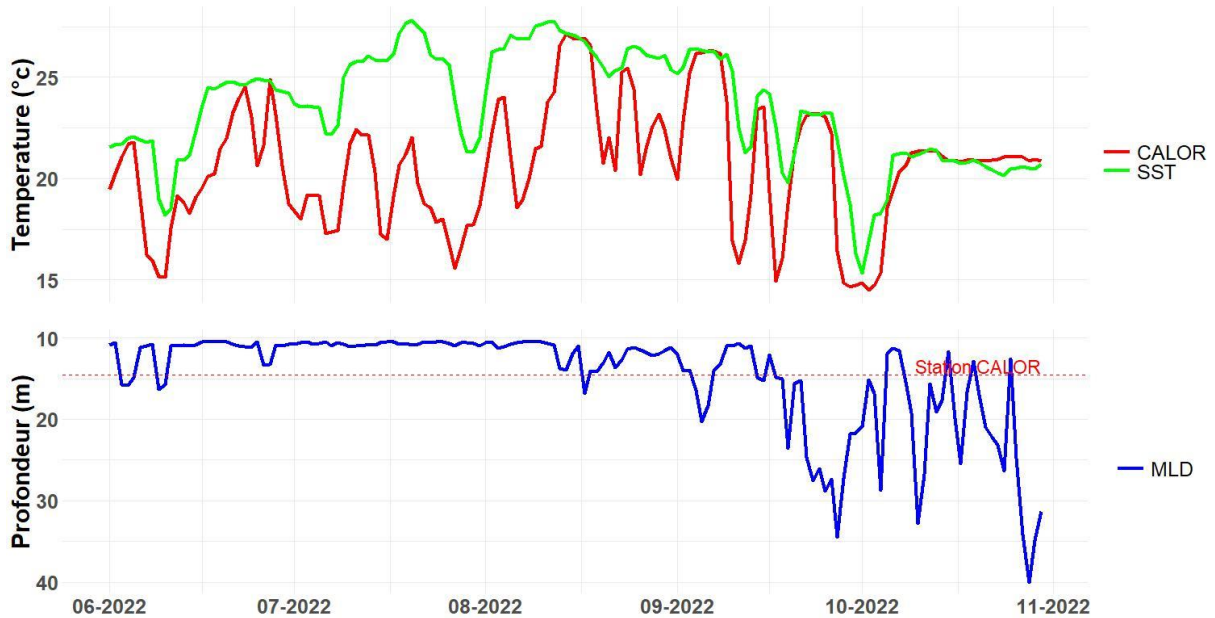


FIGURE 37 : TEMPERATURE DE LA STATION CAP SICIE OUEST PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.16. *Les deux frères*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Les deux frères 35 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

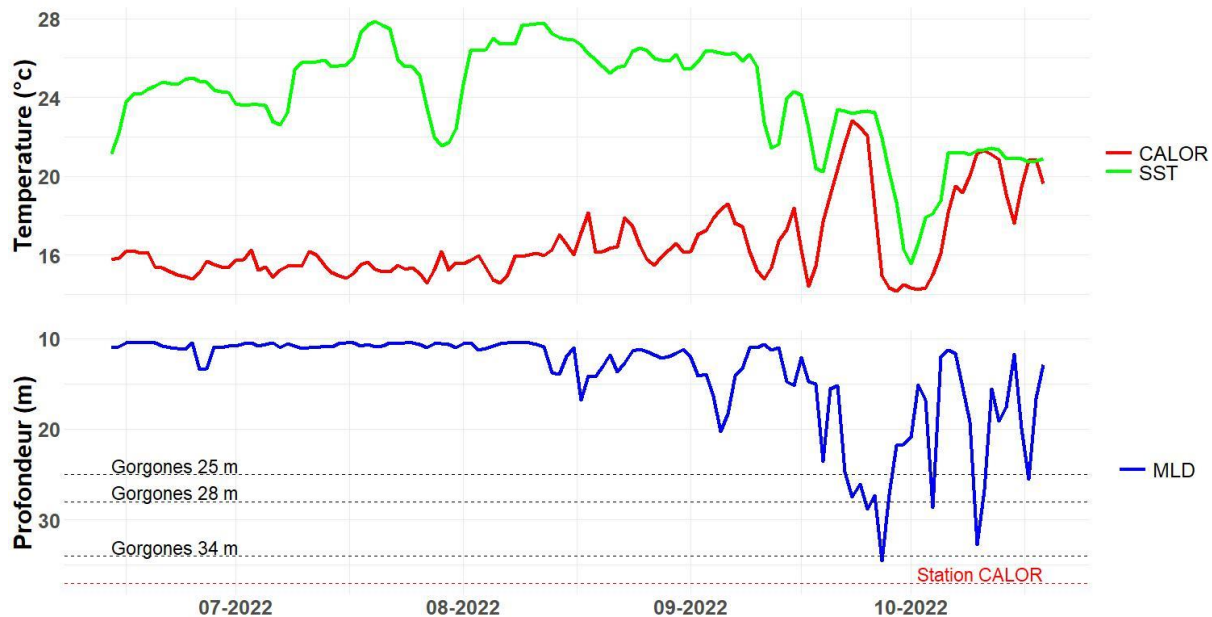


FIGURE 38 : TEMPERATURE DE LA STATION LES DEUX FRERES 35 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La station de gorgones RECOR à 34 m présentait 48 % de colonies de *Paramuricea clavata* faiblement à sévèrement nécrosées, mais aucune nécrose concernant les colonies d'*Eunicella cavolini*. Nous avons réalisé des mesures sur deux stations complémentaires à 28 et 25 m, avec une proportion de nécroses sévères de *Paramuricea clavata* augmentant drastiquement à mesure que la profondeur diminue (48 % à 28 m ; 89 % à 25 m). *Eunicella cavolini* suit la même tendance mais avec des valeurs moindres (20 % de colonies fortement nécrosées à 25 m). La figure suivante illustre les nécroses observées entre 27 et 29 m de fond :

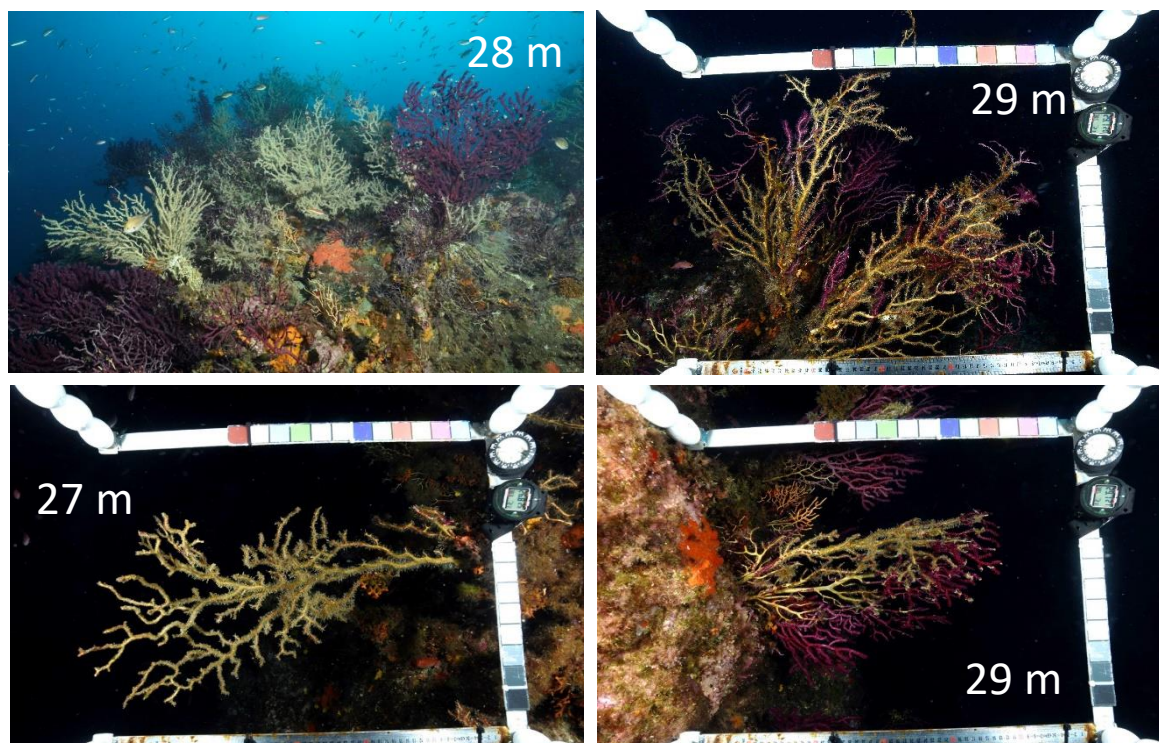


FIGURE 39 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE LES DEUX FRERES



Concernant les ARE, nous avons réalisé une **station complémentaire à 30 m**, mais nous n'avons pas observé de différence importante avec la station RECOR à 35 m (2,5 % à 30 m vs 1,8 % à 35 m) :

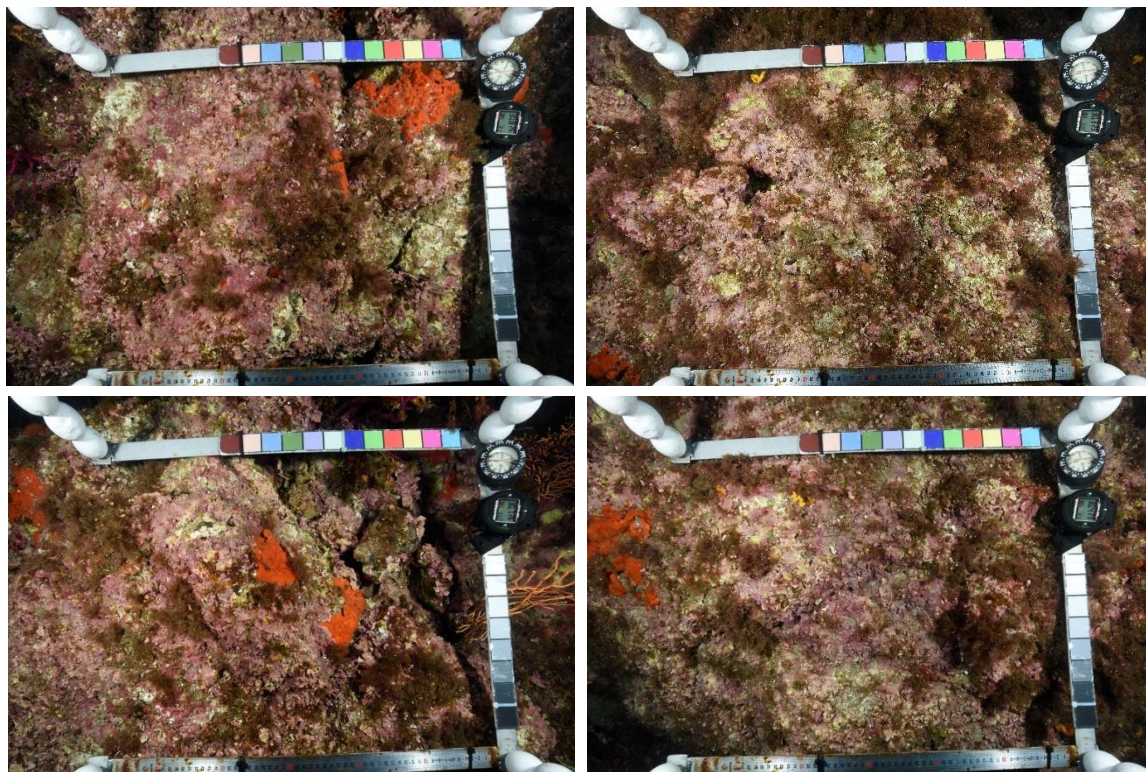


FIGURE 40 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LES DEUX FRERES 30 M

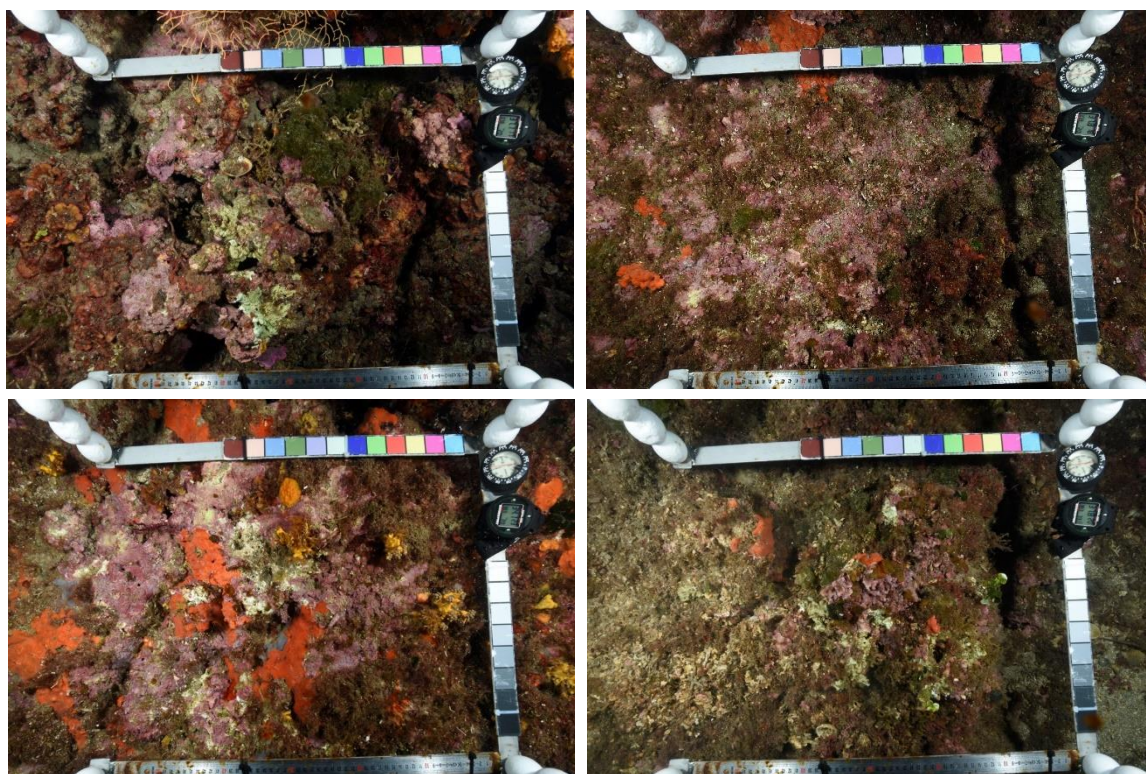


FIGURE 41 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LES DEUX FRERES 35 M

I.A.17. *Pointe Langoustier*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Pointe Langoustier 37 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

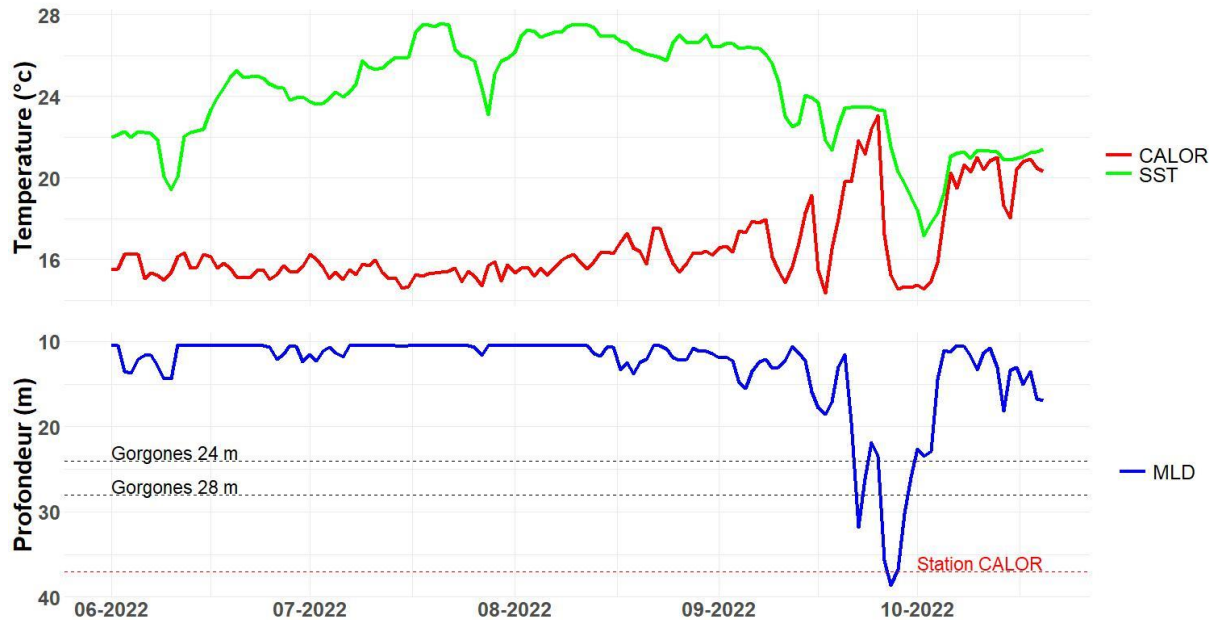


FIGURE 42 : TEMPERATURE DE LA STATION POINTE LANGOUSTIER 37 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La station RECOR à 28 m semble avoir été **peu affectée**, avec une population de *Paramuricea clavata* et d'*Eunicella cavolini* **majoritairement sans nécroses** apparentes (respectivement 96 % et 91 %). Nous avons réalisé une **station complémentaire à 24 m, plus sévèrement touchée** avec 49 % des colonies de *Paramuricea clavata* nécrosées (34 % sévèrement et 15 % faiblement) et 25 % des colonies d'*Eunicella cavolini* faiblement nécrosées. La figure suivante illustre les gorgones sur le site de Pointe Langoustier :





FIGURE 43 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE POINTE LANGOUSTIER

La station RECOR « Pointe Langoustier 37 m » présentait des zones de **macro-nécroses localisées**, avec un **taux de nécroses moyen** de 2,3 % :

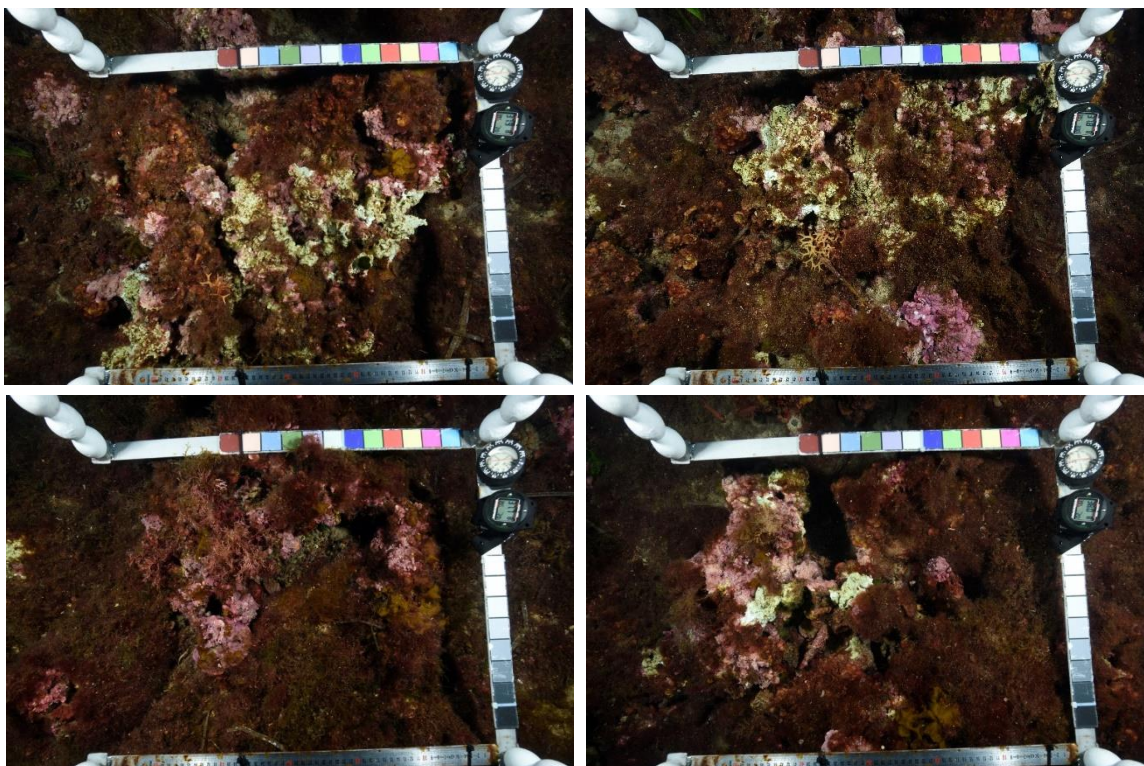


FIGURE 44 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION POINTE LANGOUSTIER 37 M

I.A.18. *Cap des Medes PI*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Cap des Médès PI 15 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

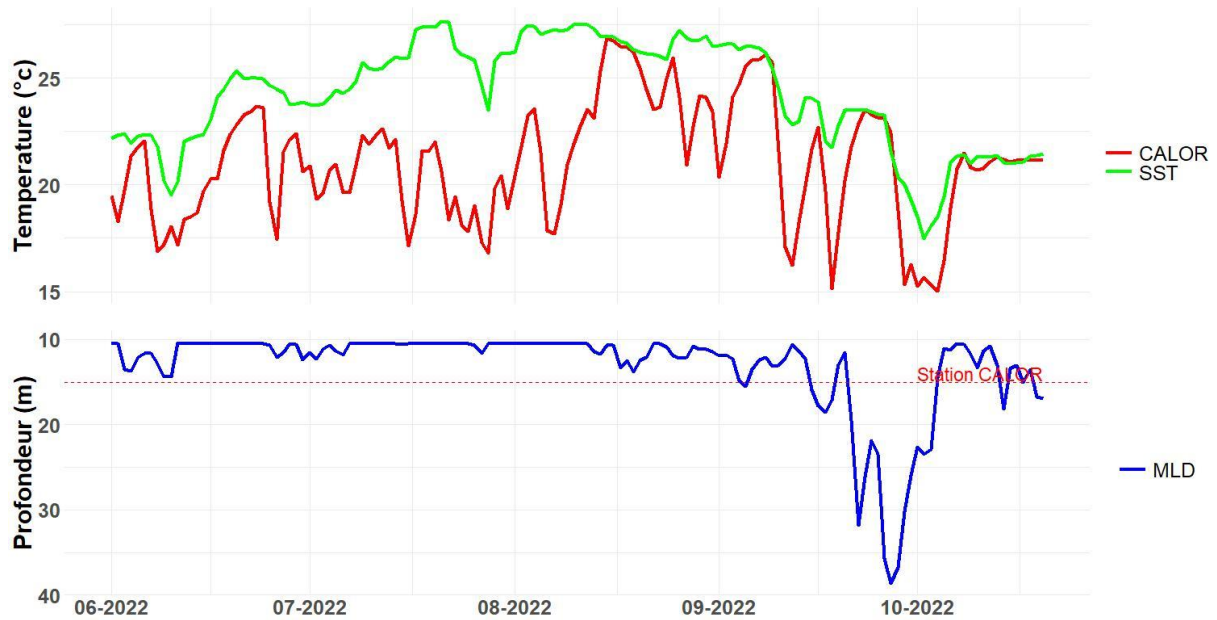


FIGURE 45 : TEMPERATURE DE LA STATION CAP DES MEDES PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.19. *Pointe Esquillette PI*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la **station « Pointe Esquillette PI 15 m »**, **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

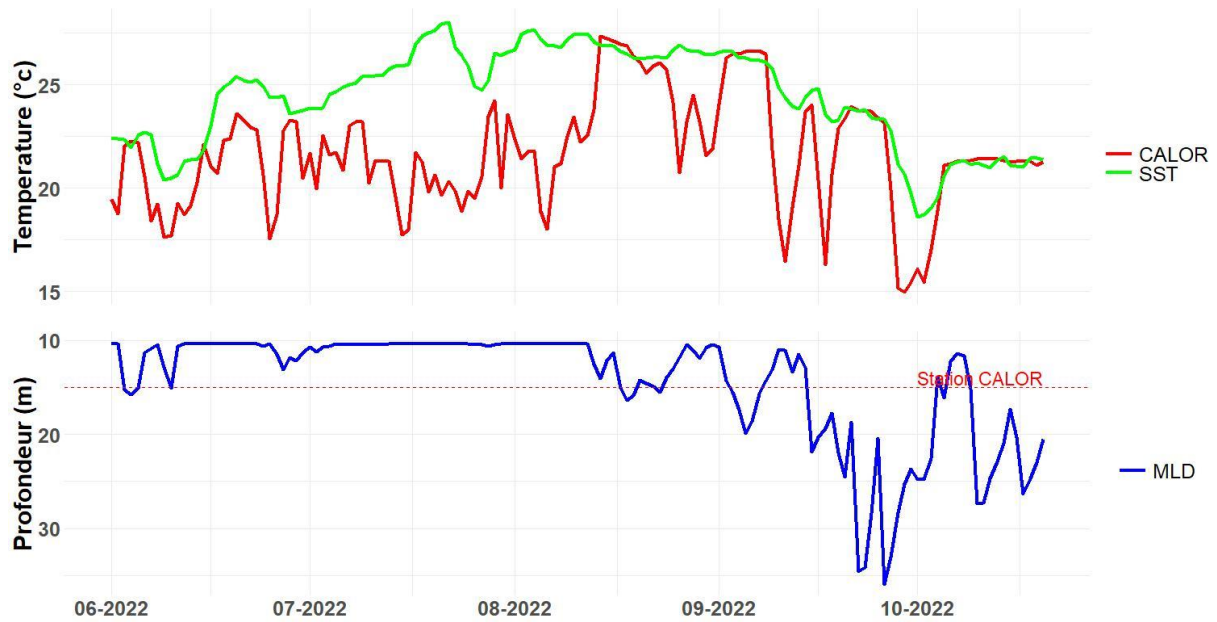


FIGURE 46 : TEMPERATURE DE LA STATION POINTE ESQUILLETTE PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.20. Rade de Bormes

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la **station Rade de Bormes 36 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

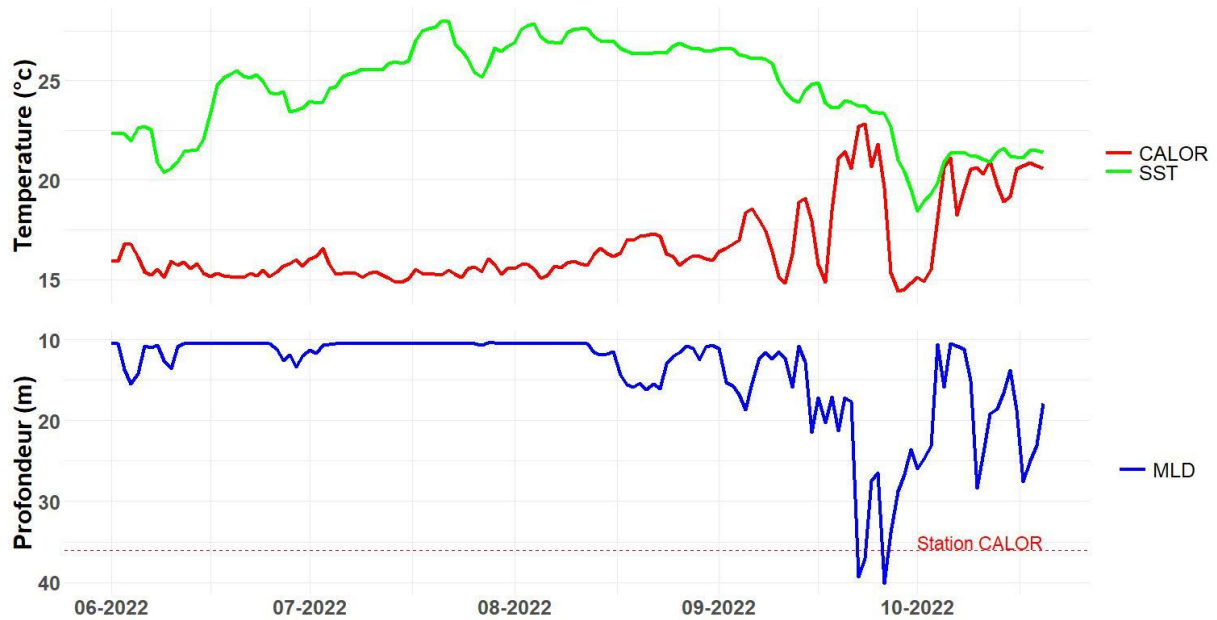


FIGURE 47 : TEMPERATURE DE LA STATION RADE DE BORMES 36 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



I.A.21. *Pointe Andati*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la **station « Pointe Andati 34 m »**, **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022** :

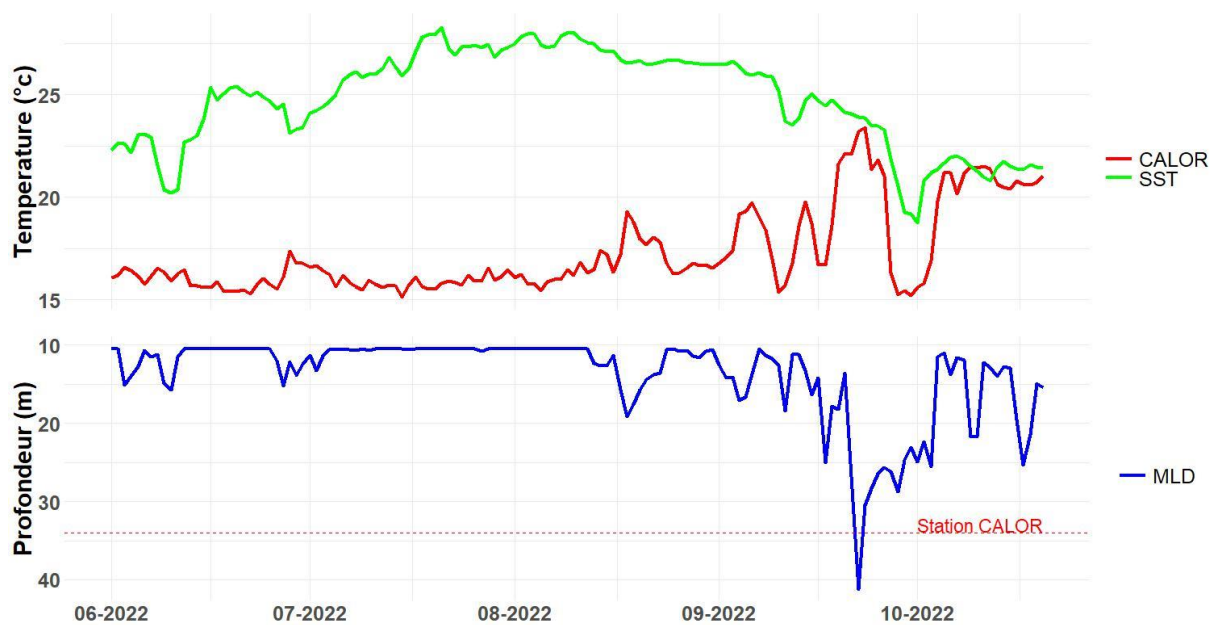


FIGURE 48 : TEMPERATURE DE LA STATION POINTE ANDATI 34 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.22. *Pointe Andati PI*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Pointe Andati PI 15 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

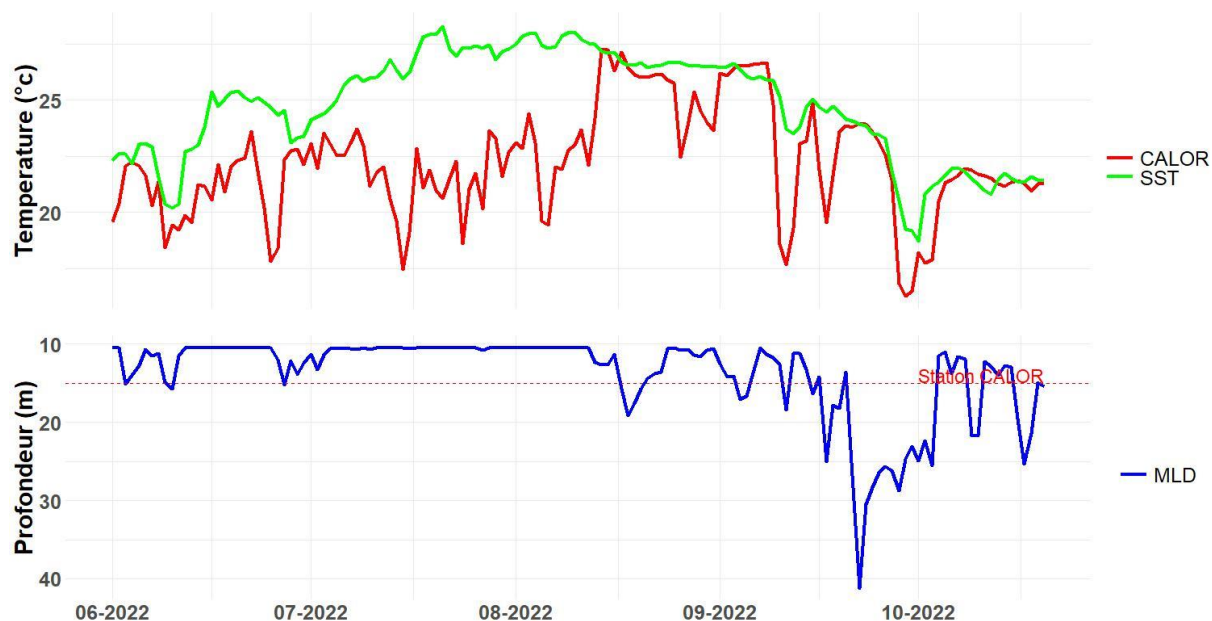


FIGURE 49 : TEMPERATURE DE LA STATION POINTE ANDATI PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.23. *Les Ancres*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Les Ancres 40 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :



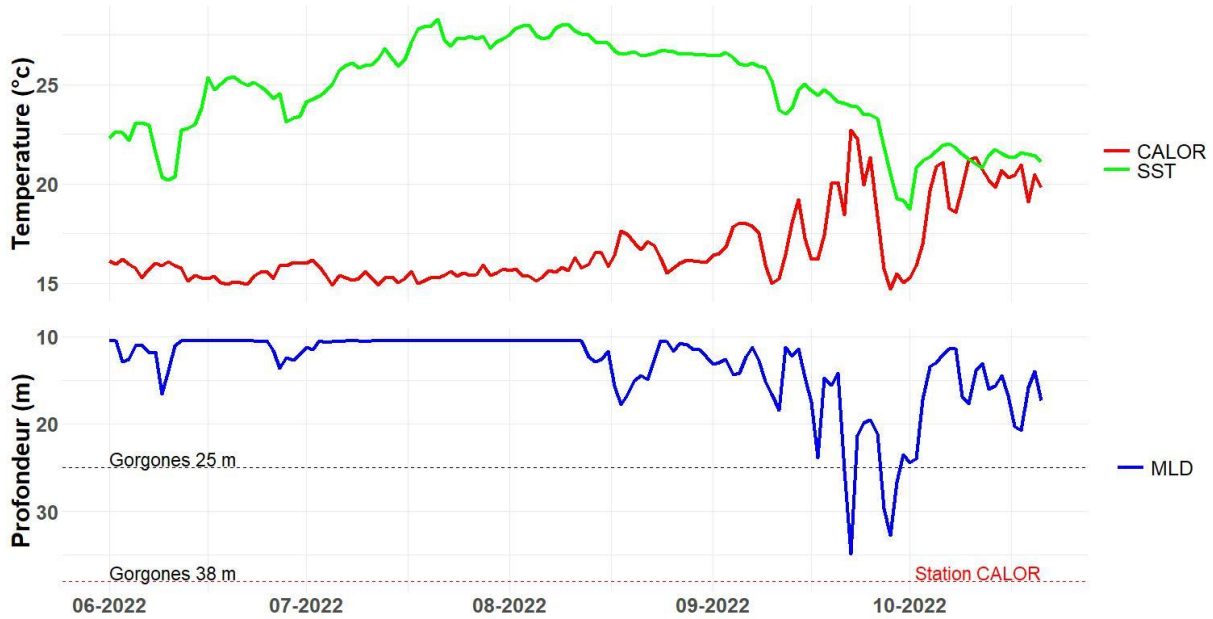


FIGURE 50 : TEMPERATURE DE LA STATION LES ANCRAS 40 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La station RECOR à 38 m était **modérément affectée** par l'épisode de mortalité, avec **46 % des colonies de *Paramuricea clavata* affectées**, dont 15 % sévèrement, et aucune des trois colonies d'*Eunicella cavolini* observées ne présentait de traces de nécroses. Nous avons réalisé une **station complémentaire à 25 m**, présentant **légèrement plus de nécroses** mais du même ordre de grandeur (51 % de colonies de *Paramuricea clavata* faiblement à sévèrement affectées, 8 % d'*Eunicella cavolini* faiblement affectées).

Les **deux stations RECOR à 30 et 40 m** présentaient des **macro-nécroses** localisées d'ARE, avec un taux moyen de 2,7 % pour la station à 40 m et 1,1 à 30 m :

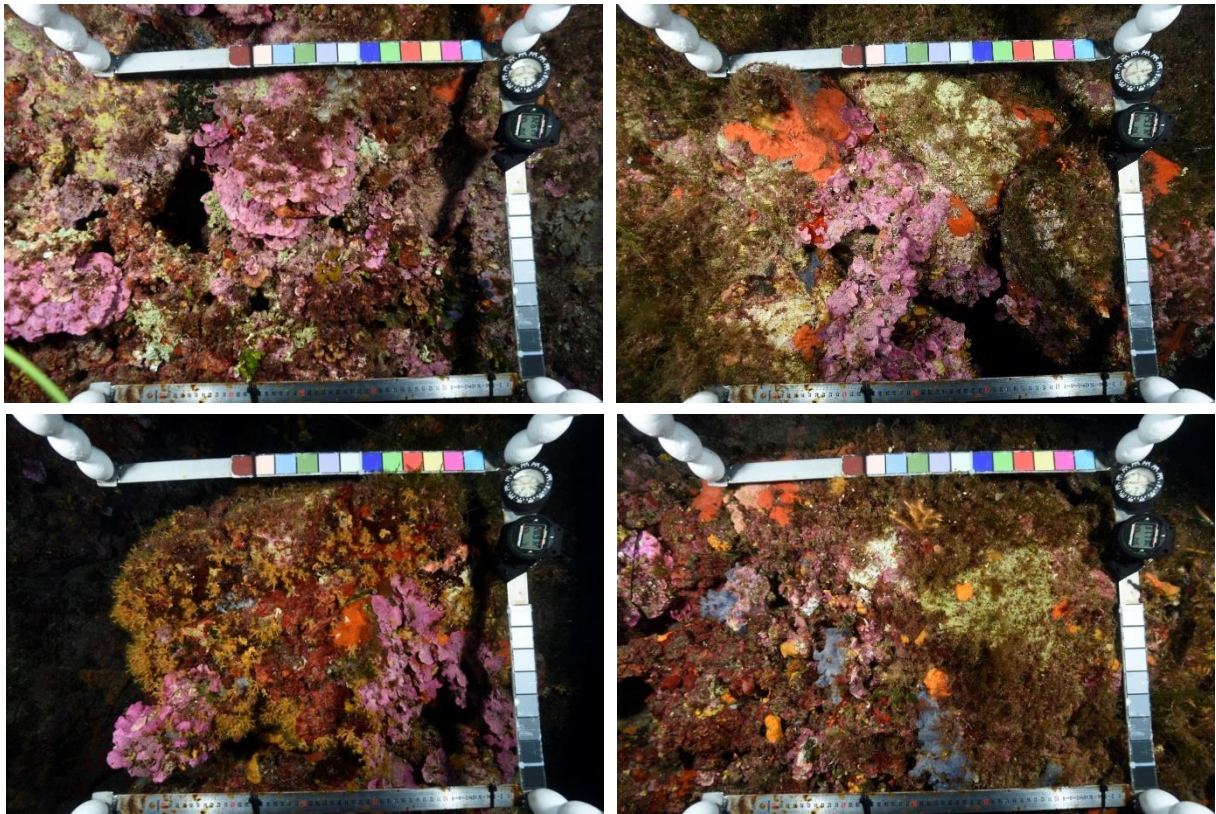


FIGURE 51 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LES ANCRÉS 30 M

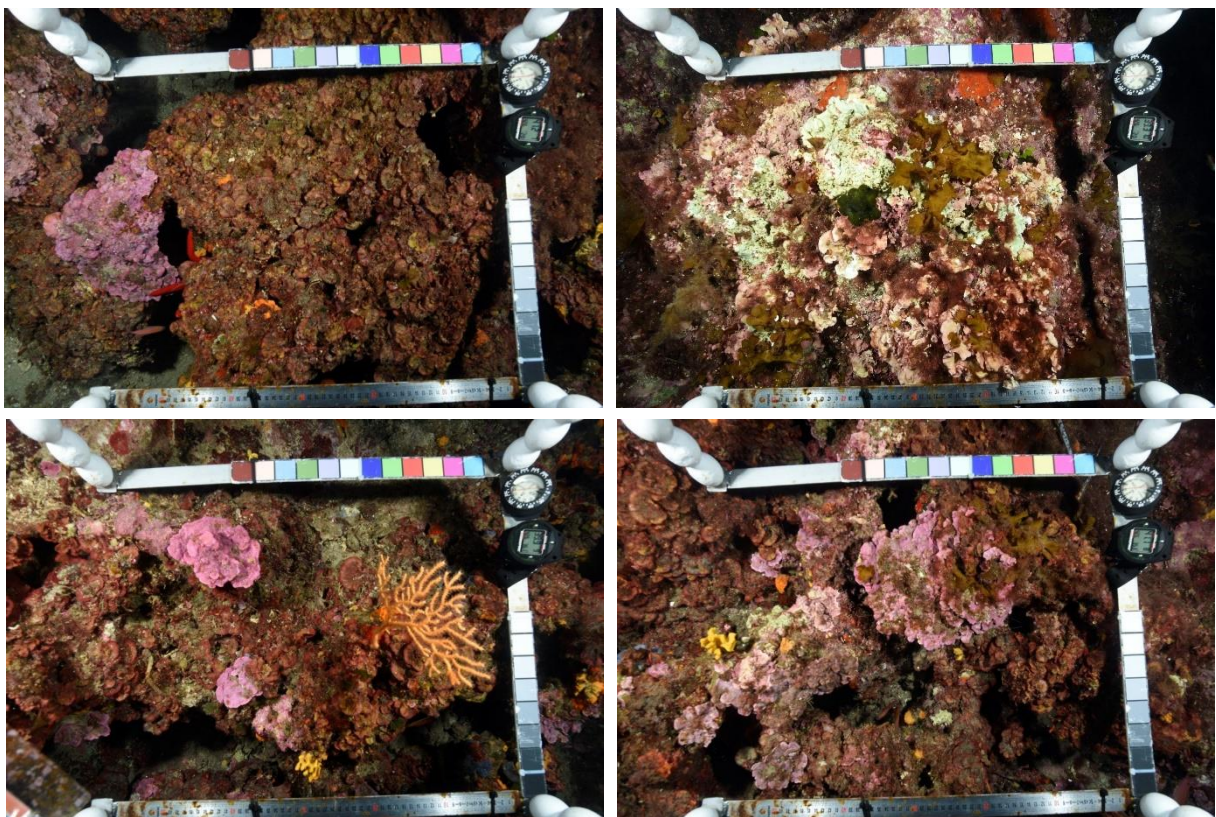


FIGURE 52 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LES ANCRÉS 40 M



I.A.24. *Emissaire Saint Tropez 2*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Emissaire Saint Tropez 2 28 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

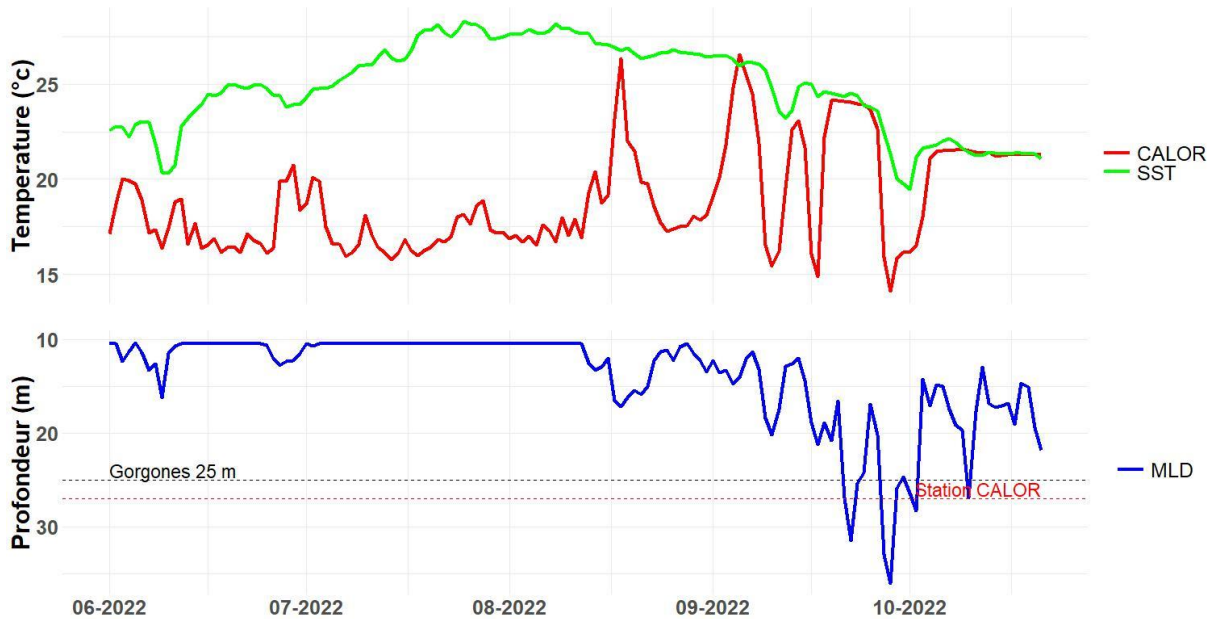


FIGURE 53 : TEMPERATURE DE LA STATION ÉMISSAIRE SAINT TROPEZ 2 28 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MÉLANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.25. *Lion de Mer*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Lion de Mer 30 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

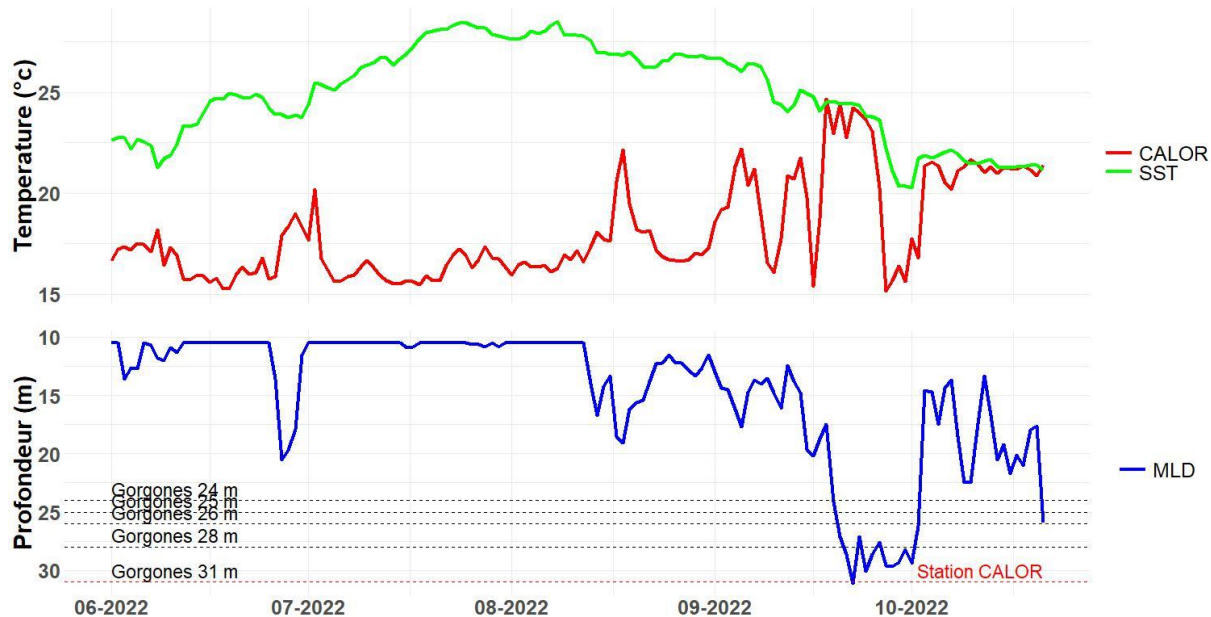


FIGURE 54 : TEMPERATURE DE LA STATION LION DE MER 30 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Lion de Mer 38 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

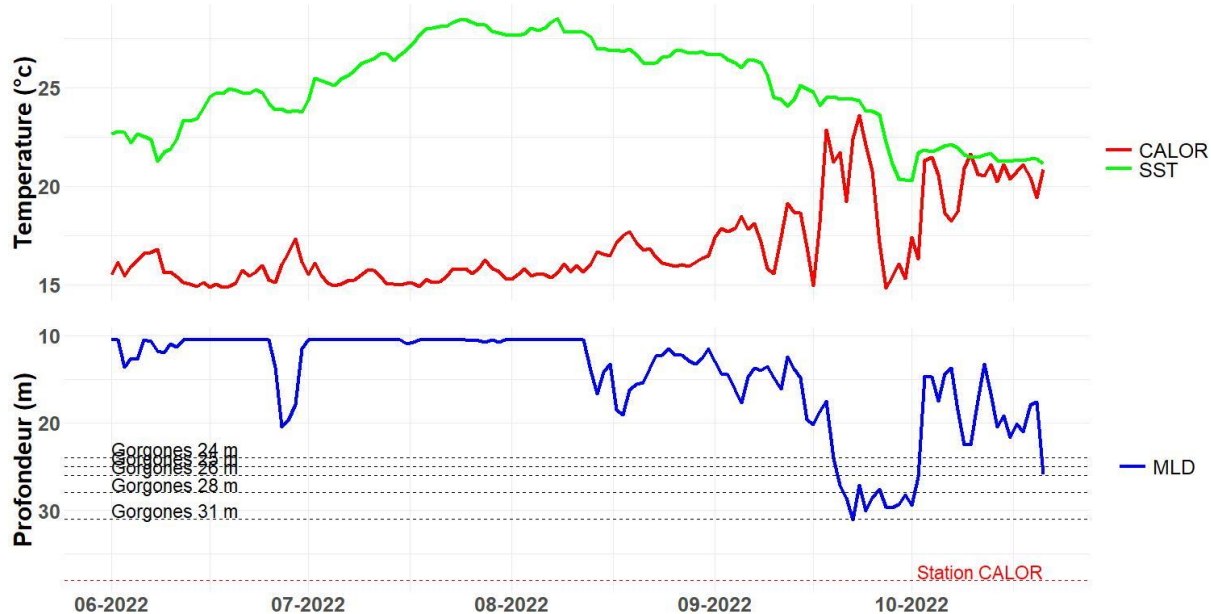


FIGURE 55 : TEMPERATURE DE LA STATION LION DE MER 38 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

Nous avons réalisé des **stations complémentaires** pour les profondeurs **31, 28, 26, 25 et 24 m** en remontant depuis la station CALOR à 38 m. Le site abrite principalement une population d'*Eunicella cavolini* (**155 observations** contre **26 observations** de *Paramuricea clavata*). La population de *Paramuricea clavata* était très



fortement affectée avec **89 % de colonies sévèrement nécrosées à 24 m** (trop peu de colonies aux autres profondeurs pour calculer des pourcentages). Entre **2 et 32 % de colonies d'*Eunicella cavolini* étaient affectées** selon les stations, sans relation claire avec la profondeur. La figure suivante illustre l'état des gorgones sur le site de Lion de Mer :

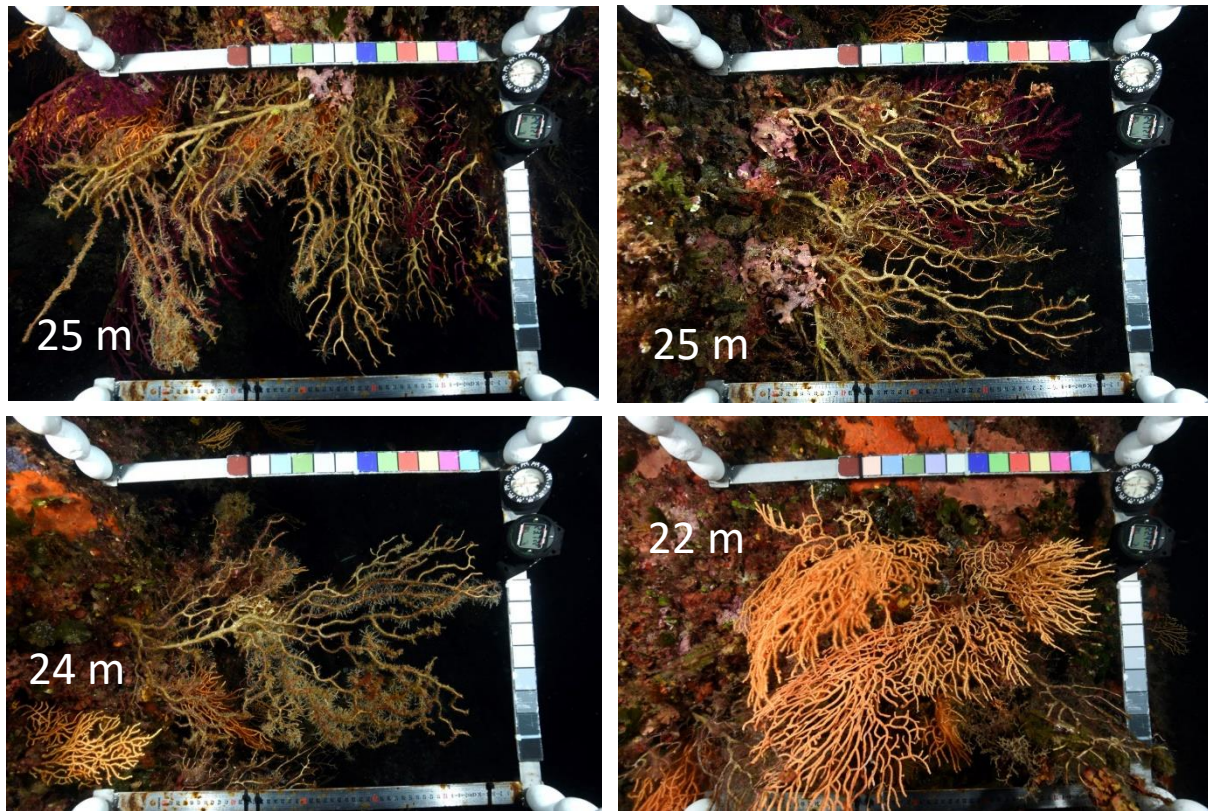


FIGURE 56 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE LION DE MER

La station **RECOR à 30 m** montre **davantage de macro-nécroses (4,4 % de nécroses)** que la station à **38 m (1,1 %)**. Les figures suivantes illustrent les quadrats photographiques réalisés sur les deux stations :

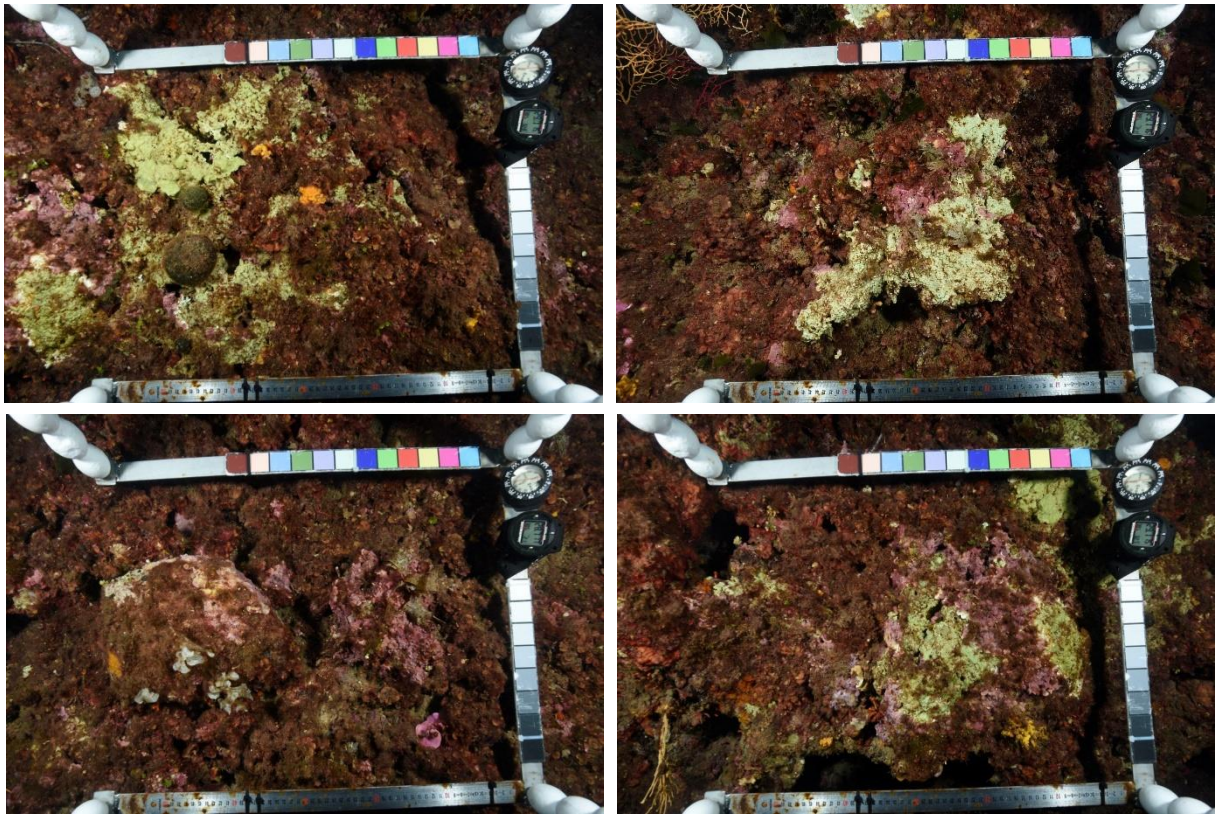


FIGURE 57 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LION DE MER 30 M

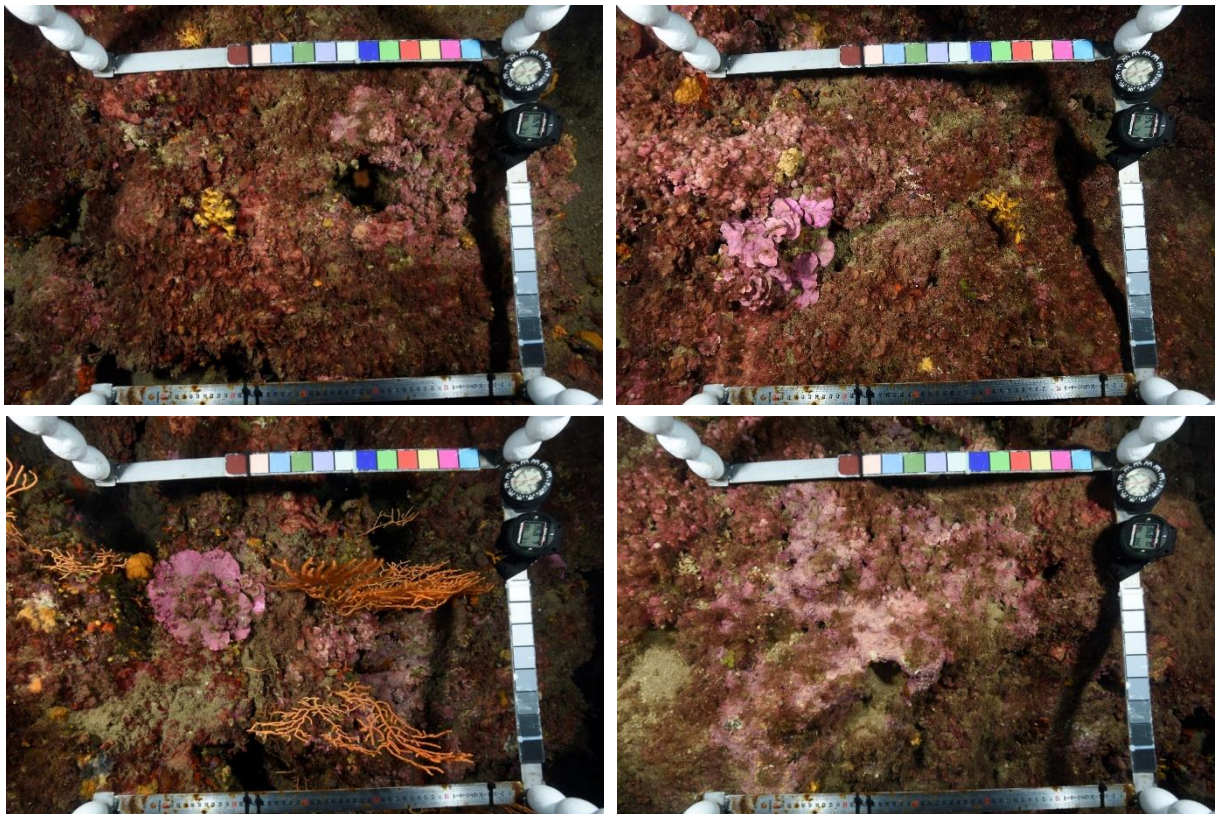


FIGURE 58 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LION DE MER 38 M



I.A.26. *Lion de Mer PI*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Lion de Mer PI 15 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

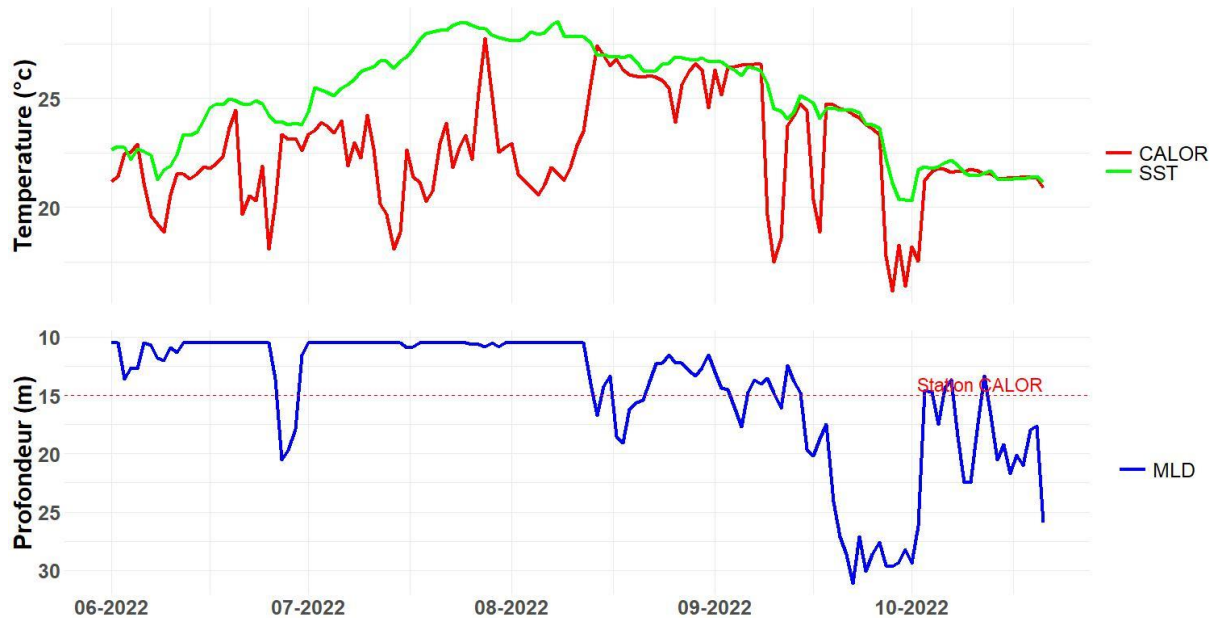


FIGURE 59 : TEMPERATURE DE LA STATION LION DE MER PI 15 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.27. *La Sèche Saint Pierre*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **La Sèche Saint Pierre 30 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

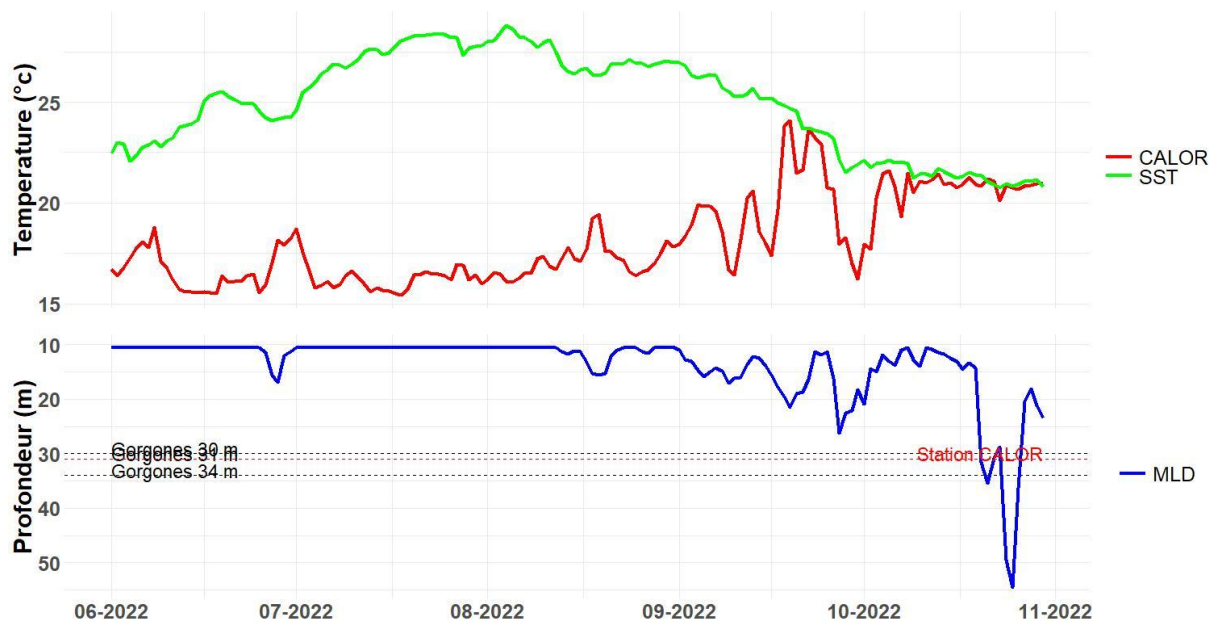


FIGURE 60 : TEMPERATURE DE LA STATION LA SECHE SAINT PIERRE 30 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « La Sèche Saint Pierre 37 m », **température de surface** (SST) et **profondeur de la couche de mélange** (MLD) sur la période du 1^{er} juin à la relève du capteur fin octobre 2022 :

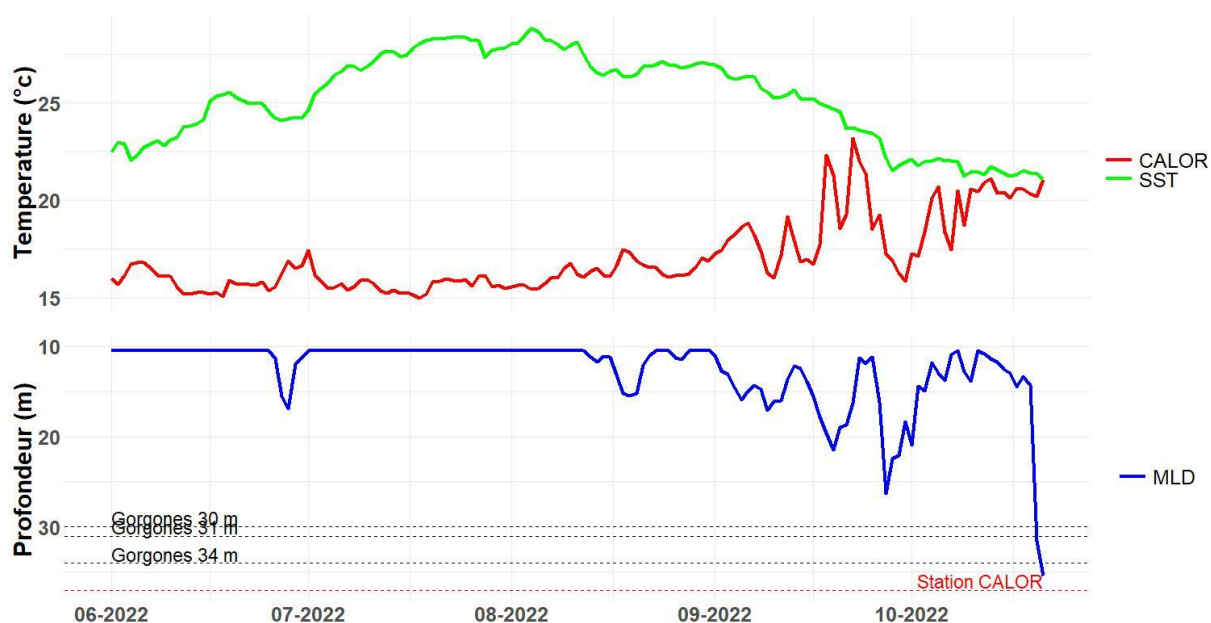


FIGURE 61 : TEMPERATURE DE LA STATION LA SECHE SAINT PIERRE 37 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022



La population de gorgones de la **station RECOR à 35 m** est **dominée par *Eunicella cavolini*** (62 observations contre 29 pour *Paramuricea clavata*). **68 % des colonies d'*E. cavolini*** étaient faiblement (8 %) à sévèrement nécrosées (44%) tandis que **90 % des colonies** de *P. clavata* étaient faiblement (17 %) à sévèrement nécrosées (69 %). Nous avons réalisé deux stations complémentaires à 31 et 30 m, avec trop peu de colonies de *P. clavata* pour estimer des pourcentages, mais avec une **relation étonnamment inverse** entre **profondeur** et **sévérité** de l'épisode de mortalité : 18 % de colonies sévèrement affectées à 31 m, et 11 % à 30 m.

Les deux **stations RECOR à 30 et 37 m** présentaient des **macro-nécroses d'ARE**, avec une valeur plus importante à 30 m (2,1 %) qu'à 37 m (1,6 %). Les figures suivantes montrent un échantillon des quadrats réalisés sur chaque station :

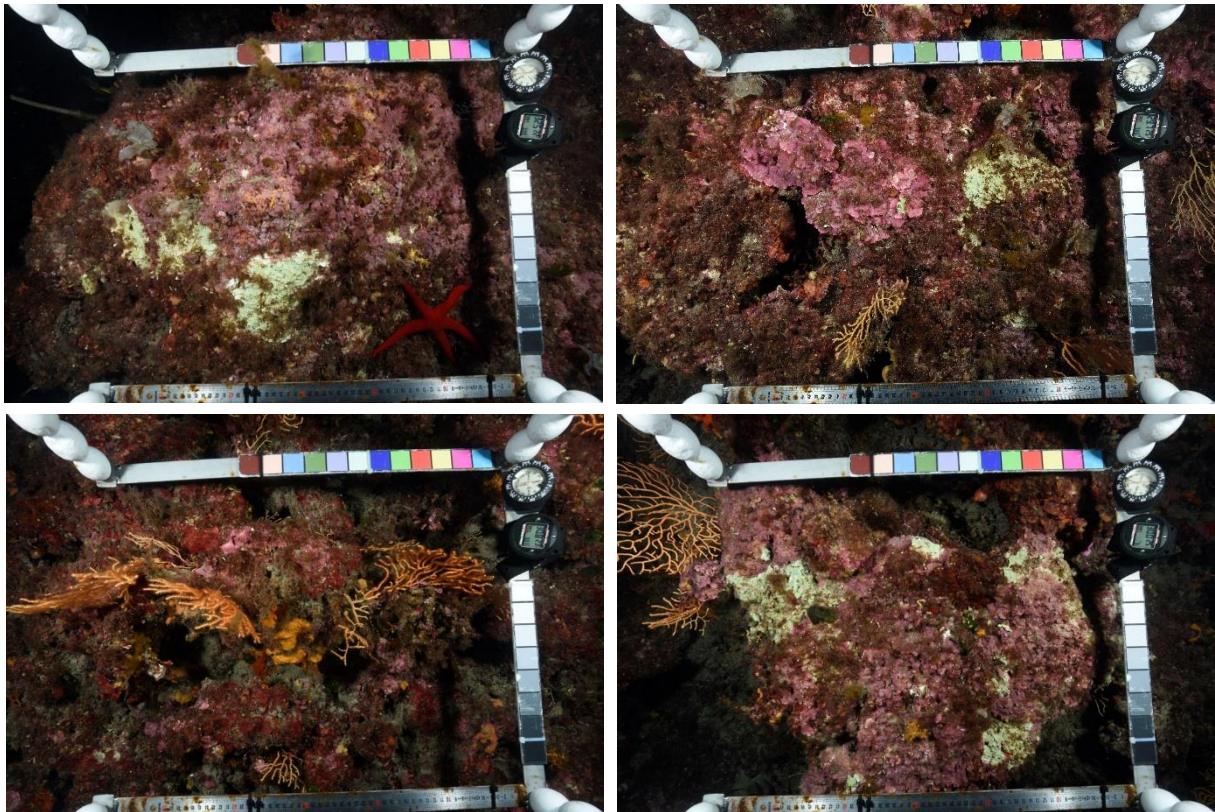


FIGURE 62 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LA SECHE SAINT PIERRE 30 M

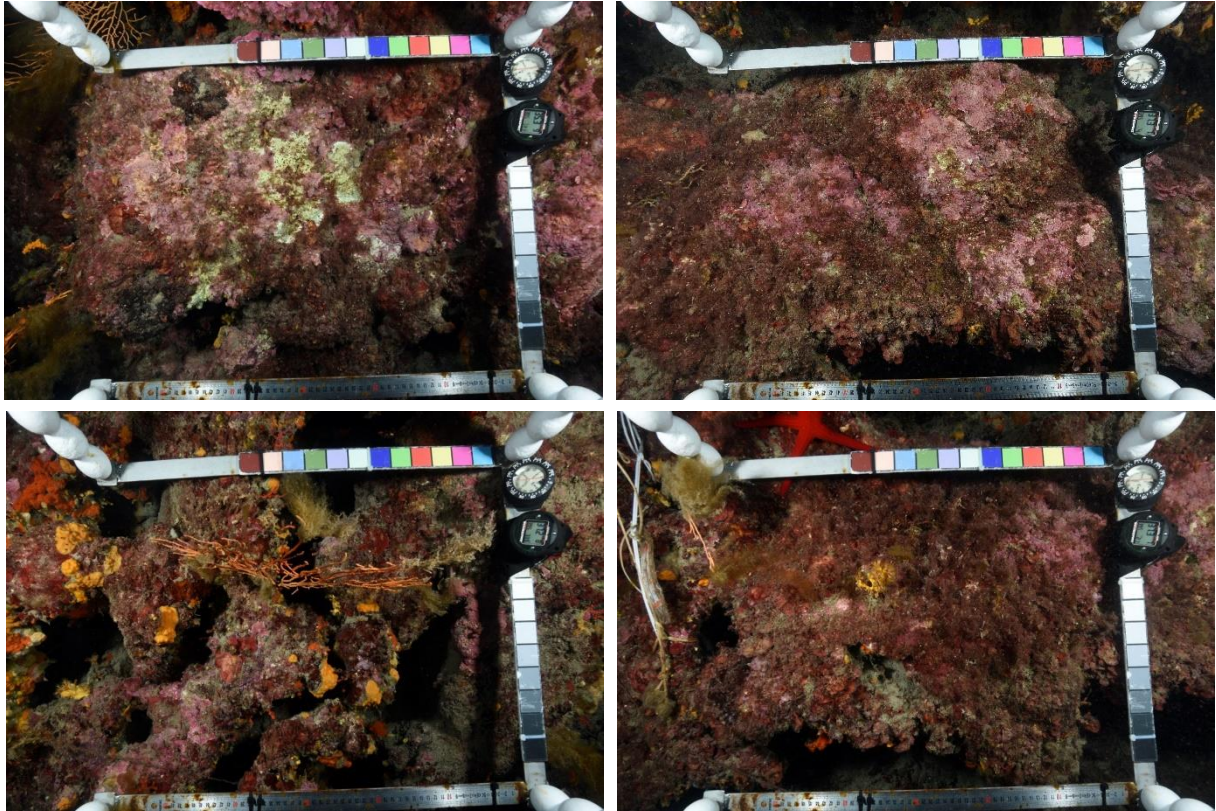


FIGURE 63 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION LA SECHE SAINT PIERRE 37 M



I.A.28. *Cap Nice Est*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Cap Nice Est 29 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

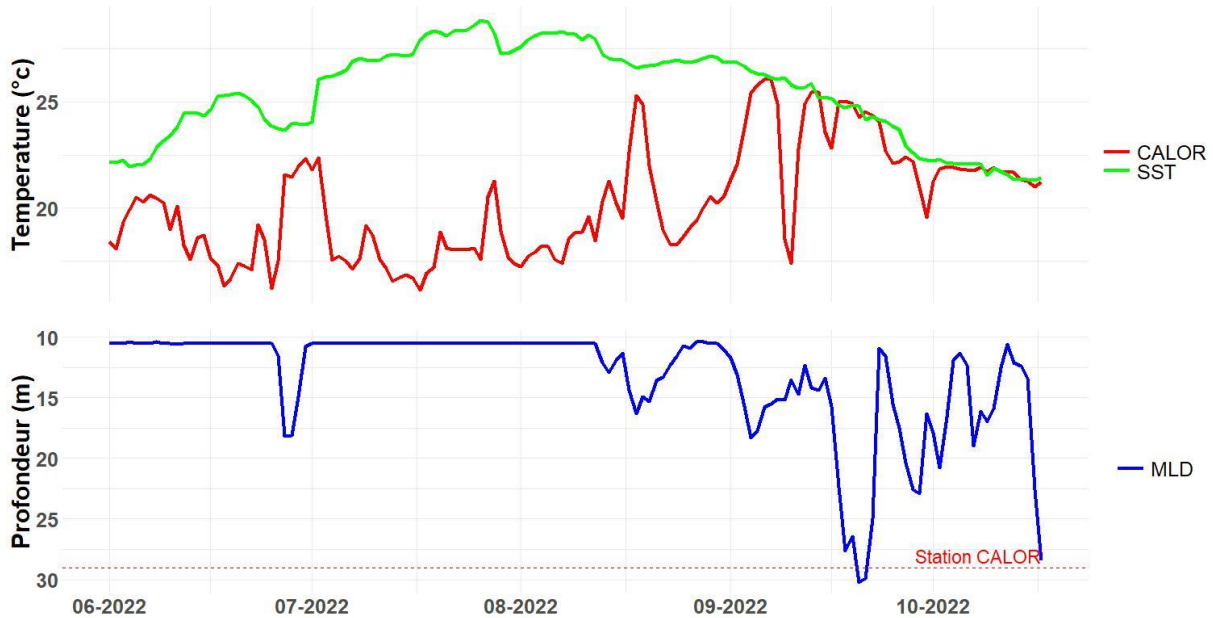


FIGURE 64 : TEMPERATURE DE LA STATION CAP NICE EST 29 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

I.A.29. *Tombant des Américains Nord*

La figure suivante montre les séries de données temporelles de **température de fond** de la station « **Tombant des américains Nord 35 m** », **température de surface (SST)** et **profondeur de la couche de mélange (MLD)** sur la période du **1^{er} juin** à la relève du capteur **fin octobre 2022** :

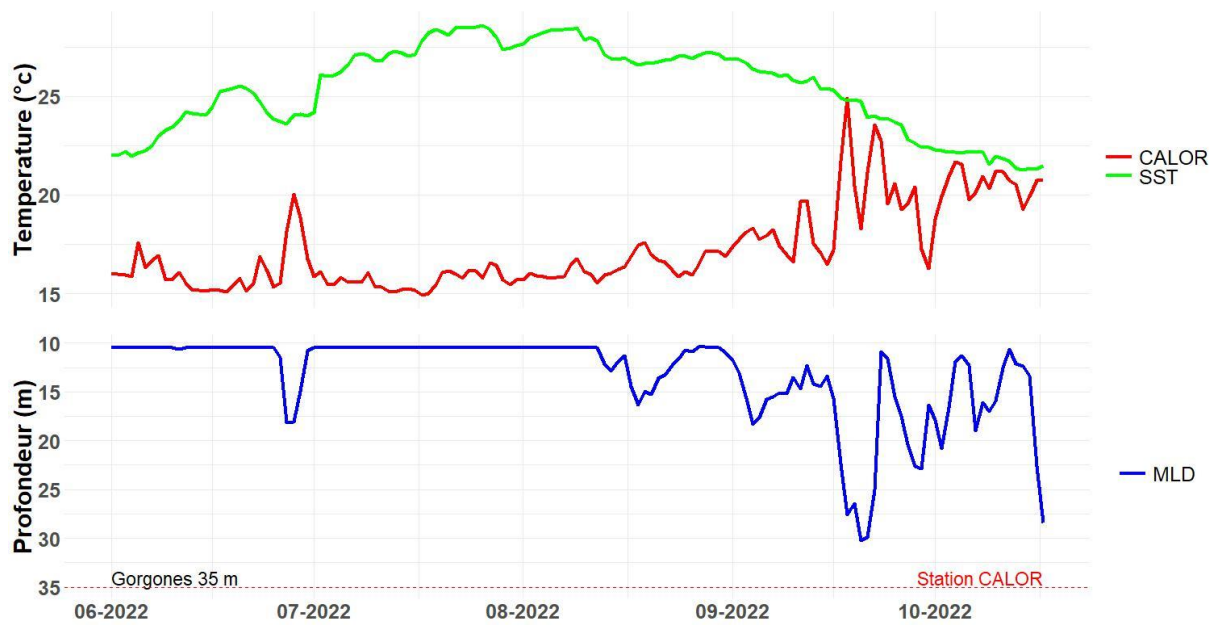


FIGURE 65 : TEMPERATURE DE LA STATION TOMBANT DES AMERICAINS NORD 35 M (CALOR), TEMPERATURE DE SURFACE (SST), ET PROFONDEUR DE LA COUCHE DE MELANGE (MLD) DE JUIN A OCTOBRE 2022

La population de gorgones de la **station RECOR à 35 m** est largement **dominée par *Paramuricea clavata*** (98 observations contre 5 pour *Eunicella cavolini*). **24 %** des colonies de *P. clavata* étaient faiblement (11 %) à modérément (13 %) nécrosées, et seule une colonie d'*E. cavolini* était faiblement nécrosée. La figure suivante illustre la population de gorgones sur le site « Tombant des Américains Nord » :



FIGURE 66 : ILLUSTRATIONS DE GORGONES SUR LE SITE TOMBANT DES AMERICAINS NORD



La station RECOR à 35 m présentait d'importantes macro-nécroses d'ARE, avec un taux de nécroses moyen de 10,9 %. La figure suivante montre un échantillon des quadrats réalisés sur la station à 35 m :

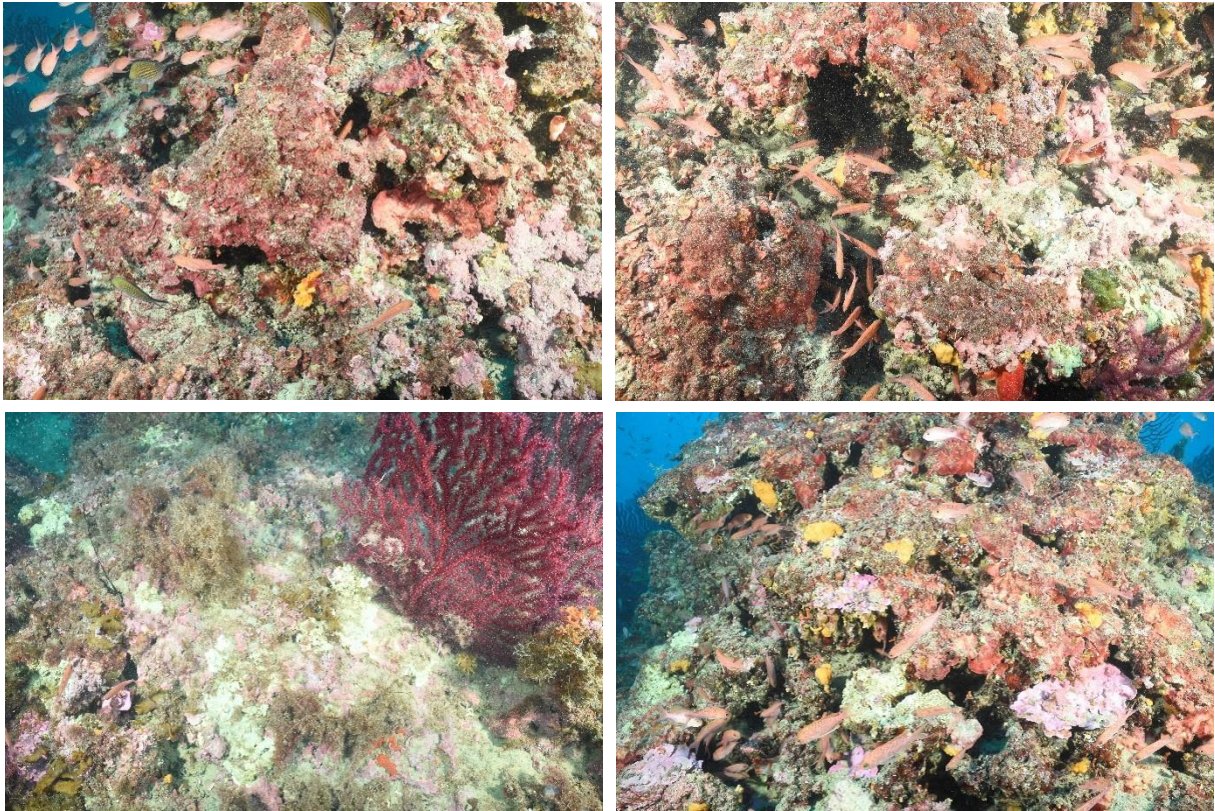


FIGURE 67 : QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES SUR LA STATION TOMBANT DES AMERICAINS NORD 35 M

I.B. Etat des peuplements coralligènes après la canicule de 2022

I.B.1. *Gorgones*

Au total, nous avons réalisé **1423** mesures de **mortalité de gorgones** (**504** mesures de *Eunicella cavolini* et **919** mesures de *Paramuricea clavata*) sur **22 stations** réparties entre **24** et **40 m**.

La figure suivante montre la cartographie du **niveau de gravité** de l'épisode de mortalité pour *Paramuricea clavata* sur les stations échantillonnées :

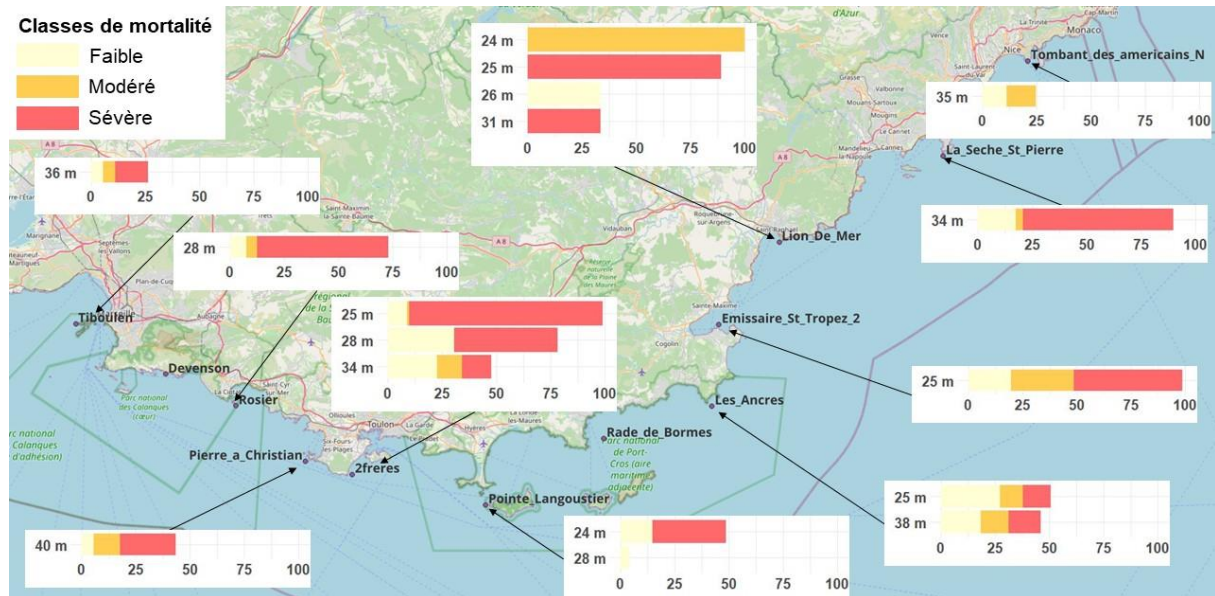


FIGURE 68 : NECROSES DES POPULATIONS DE *PARAMURICEA CLAVATA* SUR LES STATIONS ECHANTILLONNEES

Le tableau suivant fournit le **nombre d'observations** par classe de nécrose de *Paramuricea clavata* pour toutes les stations suivies :

TABLEAU 4 : NOMBRE DE COLONIES DE *PARAMURICEA CLAVATA* PAR CLASSE DE NECROSE (GARRABOU ET AL., 2022) SUR LES STATIONS ECHANTILLONNEES (EN GRIS LES STATIONS SANS *PARAMURICEA CLAVATA* A CETTE PROFONDEUR)

| Site | Profondeur | Aucune | Faible | Modérée | Sévère |
|------------------------------|------------|--------|--------|---------|--------|
| 2freres | 25 | 1 | 8 | 1 | 82 |
| | 28 | 10 | 14 | 0 | 22 |
| | 34 | 23 | 10 | 5 | 6 |
| <i>Devenson</i> | 27 | - | - | - | - |
| | 33 | - | - | - | - |
| Emissaire_St_Tropez_2 | 25 | 1 | 15 | 22 | 38 |
| La_Seche_St_Pierre | 31 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 30 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| | 35 | 3 | 5 | 1 | 20 |
| Les_Ancre | 25 | 42 | 23 | 9 | 11 |
| | 38 | 47 | 16 | 11 | 13 |
| Lion_De_Mer | 24 | - | - | - | - |
| | 25 | 2 | 0 | 0 | 16 |
| | 26 | 2 | 1 | 0 | 0 |



| | | | | | |
|---------------------------------|----|----|----|----|----|
| | 28 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| | 31 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Pierre_a_Christian | 40 | 51 | 5 | 11 | 23 |
| Pointe_Langoustier | 24 | 21 | 6 | 0 | 14 |
| | 27 | 44 | 2 | 0 | 0 |
| Rosier | 28 | 22 | 6 | 4 | 49 |
| Tiboulen | 36 | 54 | 4 | 4 | 11 |
| Tombant_des_americains_N | 35 | 74 | 11 | 13 | 0 |

La figure suivante montre la cartographie du **niveau de gravité** de l'épisode de mortalité pour *Eunicella cavolini* sur les stations échantillonnées :

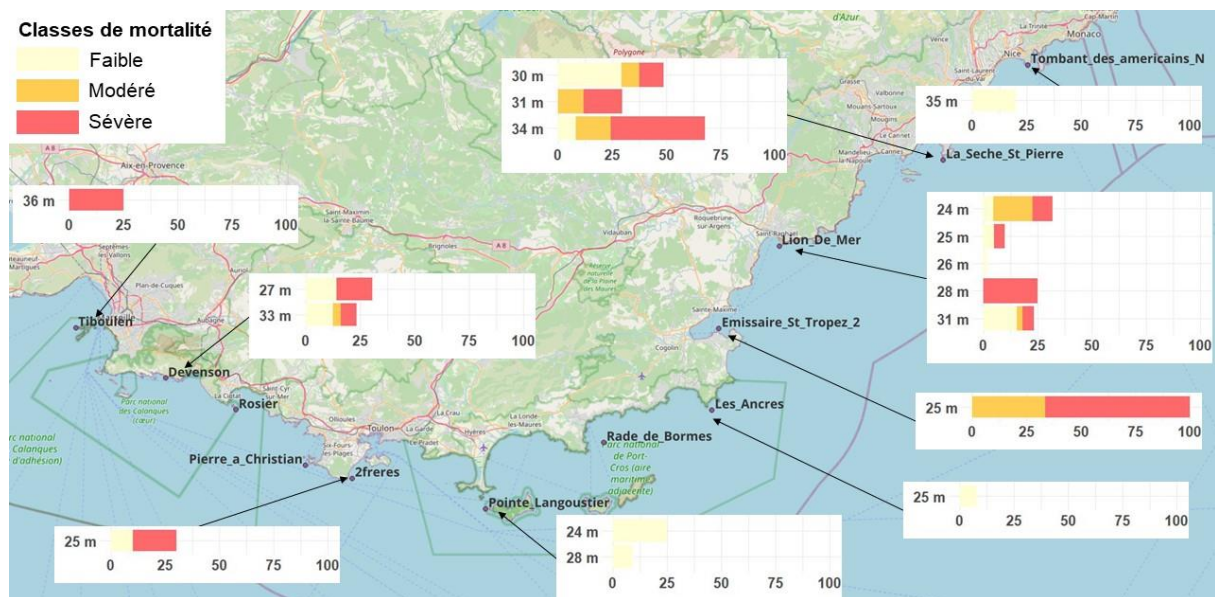


FIGURE 69 : NECROSES DES POPULATIONS DE *EUNICELLA CAVOLINI* SUR LES STATIONS ECHANTILLONNEES (EN JAUNE LE POURCENTAGE DE COLONIES CLASSEES EN « FAIBLE » ; EN ORANGE LE POURCENTAGE DE COLONIES CLASSEES EN « MODERE » ; EN ROUGE LE POURCENTAGE DE COLONIES CLASSEES EN « SEVERE »)

Le tableau suivant fournit le **nombre d'observations** par classe de nécrose de *Eunicella cavolini* pour toutes les stations suivies :

TABLEAU 5 : NOMBRE DE COLONIES DE *EUNICELLA CAVOLINI* PAR CLASSE DE NECROSE (GARRABOU ET AL., 2022) SUR LES STATIONS ECHANTILLONNEES (EN GRIS LES STATIONS SANS *EUNICELLA CAVOLINI* A CETTE PROFONDEUR)

| Site | Profondeur | Aucune | Faible | Modérée | Sévère |
|-----------------------|------------|--------|--------|---------|--------|
| 2freres | 25 | 7 | 1 | 0 | 2 |
| | 28 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 34 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| Devenson | 27 | 25 | 5 | 0 | 6 |
| | 33 | 43 | 7 | 2 | 4 |
| Emissaire_St_Tropez_2 | 25 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| La_Seche_St_Pierre | 31 | 37 | 21 | 6 | 8 |
| | 30 | 12 | 0 | 2 | 3 |
| | 35 | 20 | 5 | 10 | 27 |

| | | | | | |
|--------------------------|----|----|---|---|---|
| Les_Ancres | 25 | 35 | 3 | 0 | 0 |
| | 38 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Lion_De_Mer | 24 | 15 | 1 | 4 | 2 |
| | 25 | 19 | 1 | 0 | 1 |
| | 26 | 60 | 1 | 0 | 0 |
| | 28 | 9 | 0 | 0 | 3 |
| | 31 | 30 | 6 | 1 | 2 |
| Pierre_a_Christian | 40 | - | - | - | - |
| Pointe_Langoustier | 24 | 6 | 2 | 0 | 0 |
| | 27 | 20 | 2 | 0 | 0 |
| Rosier | 28 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Tiboulen | 36 | 3 | 0 | 0 | 1 |
| Tombant_des_americains_N | 35 | 4 | 1 | 0 | 0 |

Les populations de *Paramuricea clavata* apparaissent **nettement plus affectées** par l'épisode de mortalité qu'*Eunicella cavolini* avec parfois **près de 100 % des colonies** sévèrement nécrosées. Par ailleurs, l'épisode de mortalité touche **plus sévèrement les eaux peu profondes**, et il semble y avoir un **seuil autour de 30 m** en dessous duquel les colonies sont relativement épargnées. Enfin, il semble y avoir un vrai **gradient Ouest-Est**, les stations à l'**Est de Hyères** apparaissant **moins nécrosées**.

I.B.2. Algues rouges encroûtantes

Nous avons réalisé **450 quadrats photographiques** (méthodologie RECOR) sur **15 stations** entre **16 et 47 m**, à partir desquels nous avons évalué le niveau de **nécroses des espèces encroûtantes** par l'algorithme de reconnaissance d'espèces. La figure suivante montre la cartographie du **pourcentage de nécroses encroûtantes** sur les stations échantillonnées :

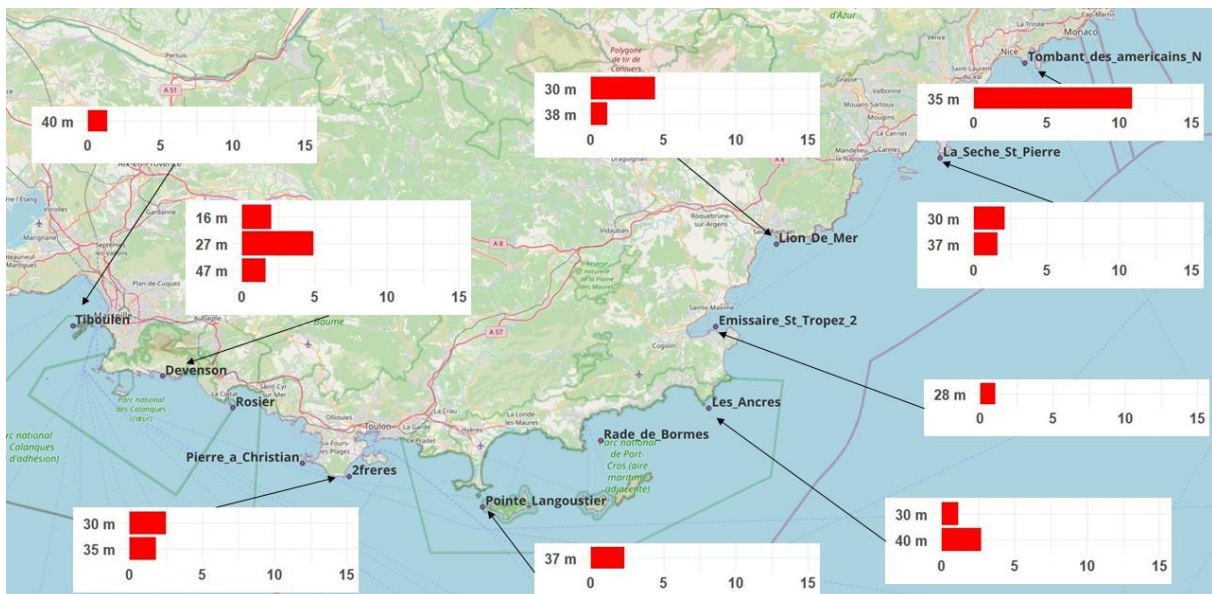


FIGURE 70 : CARTOGRAPHIE DU POURCENTAGE DE NECROSES ENCROUTANTES SUR LES STATIONS ECHANTILLONNEES



Le tableau suivant fournit **les valeurs de nécroses** pour les **15 stations** suivies :

TABLEAU 6 : POURCENTAGE DE NECROSES ENCROUTANTES SUR LES STATIONS ECHANTILLONNEES (QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES)

| Site | Profondeur | % nécroses encrountantes |
|--------------------------|------------|--------------------------|
| 2freres | 30 | 2,5 |
| | 37 | 1,8 |
| Devenson | 16 | 2 |
| | 27 | 4,9 |
| | 46 | 1,6 |
| Emissaire_St_Tropez_2 | 28 | 1 |
| La_Seche_St_Pierre | 31 | 2,1 |
| | 37 | 1,6 |
| Les_Ancre | 30 | 1,1 |
| | 40 | 2,7 |
| Lion_De_Mer | 31 | 4,4 |
| | 37 | 1,1 |
| Pointe_Langoustier | 37 | 2,3 |
| Tiboulen | 41 | 1,3 |
| Tombant_des_americains_N | 35 | 10,9 |

Le **taux de nécrose** des **espèces encroûtantes** n'atteint **pas des valeurs exceptionnelles** comme c'est le cas pour les populations de gorgones. Il ne semble par ailleurs pas se dessiner de **tendance géographique ni de relation avec la profondeur**.

I.C. Analyse de la température de fond

Les **anomalies thermiques** ont été calculées sur la **période JJASON** pour toutes les stations CALOR depuis les premières mises en place en 2013 et jusqu'à 2022 (afin d'avoir la saison JJASON complète). Il existe une **relation négative significative** entre **anomalie moyenne** et **profondeur** (t-test ; p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.12$), voir figure suivante :

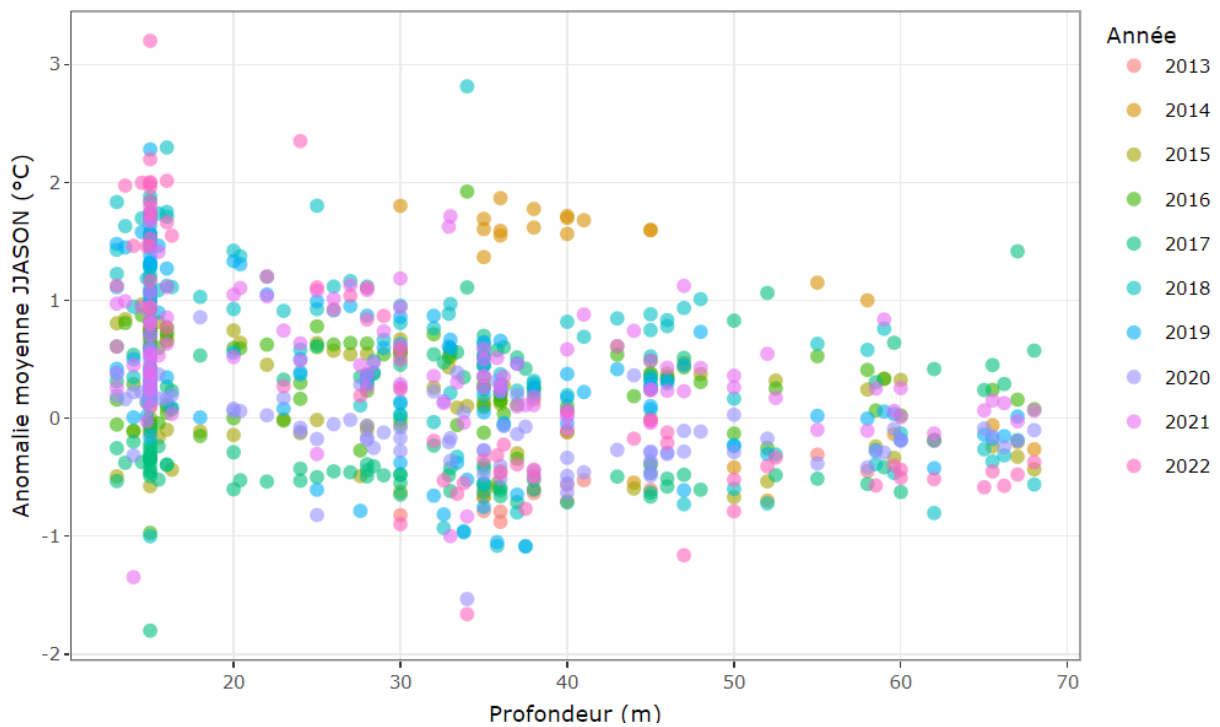


FIGURE 71 : ANOMALIES THERMIQUES MOYENNES SUR LA PERIODE JJASON POUR LES STATIONS CALOR EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, PAR ANNEE

La **durée totale des VCM** détectées pour les mêmes séries de données (période JJASON) est également **négativement corrélée à la profondeur**, quoiqu'expliquant une **faible part de variance** (t-test ; p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.05$), voir figure suivante :

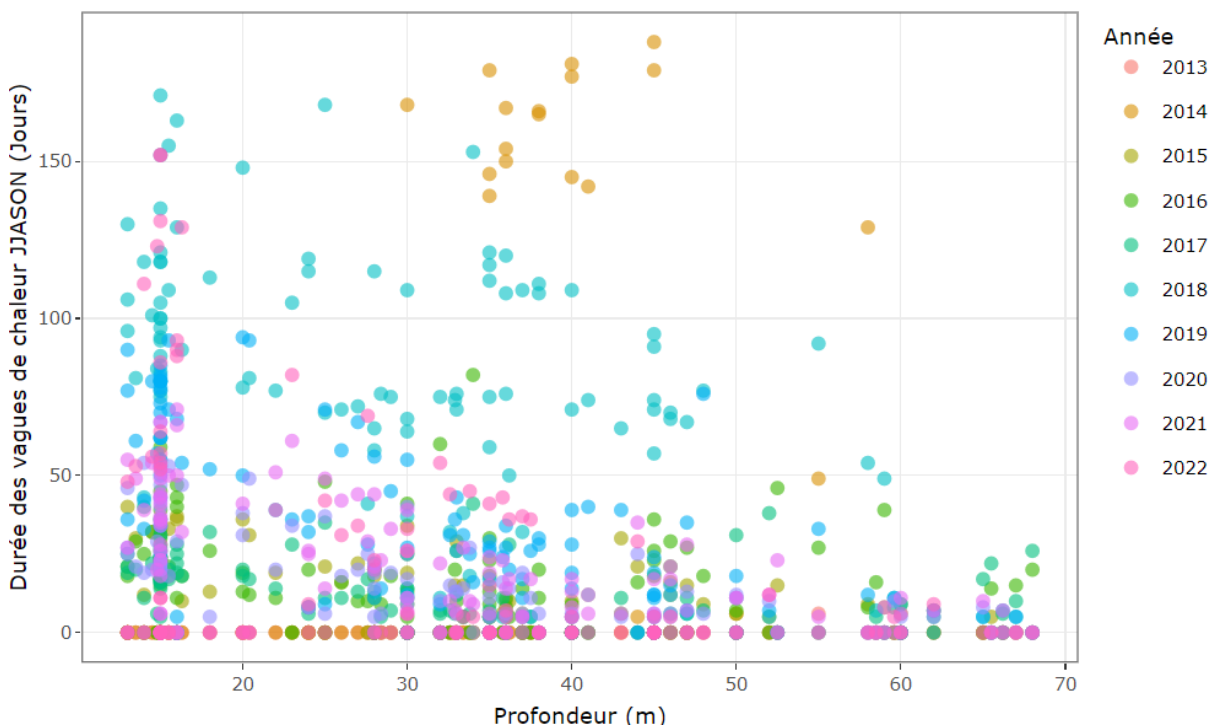


FIGURE 72 : DUREE DES VCM SUR LA PERIODE JJASON POUR LES ANNEES 2013-2023 EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



Ces résultats confortent l'idée que les **sites profonds** sont **moins soumis** aux anomalies et VCM que les sites proches de la surface, mais la **tendance reste faible** et la **variabilité non expliquée grande**. Comme précisé plus haut, le problème principal est que le réseau CALOR est jeune, et que les années d'acquisitions correspondent **majoritairement à des années « anormales »**, donc la calibration de la saisonnalité des stations CALOR s'en retrouve faussée et la détection des VCM potentiellement erronée. En effet, si l'on analyse les données de **température de surface quotidiennes** mesurées depuis 1982 (données Copernicus) et que l'on calcule **l'anomalie moyenne** ainsi que la **durée totale des VCM** sur la période JJASON pour l'ensemble des stations CALOR (positions géographiques), l'année **2022** apparaît clairement **hors normes** :

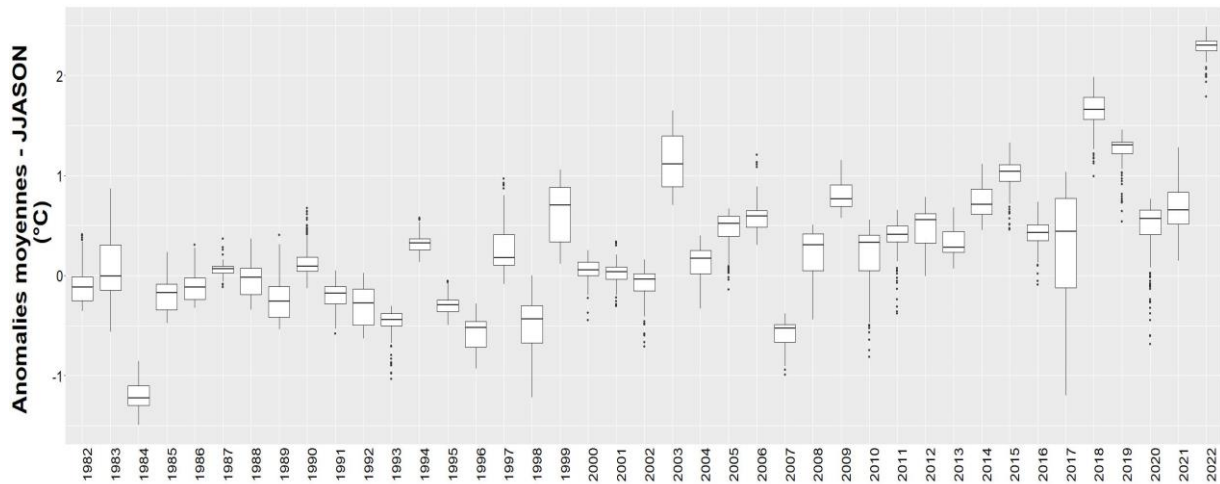


FIGURE 73 : ANOMALIES MOYENNES DE TEMPERATURE DE SURFACE SUR LA PERIODE JJASON POUR LES STATIONS CALOR, PAR ANNEE

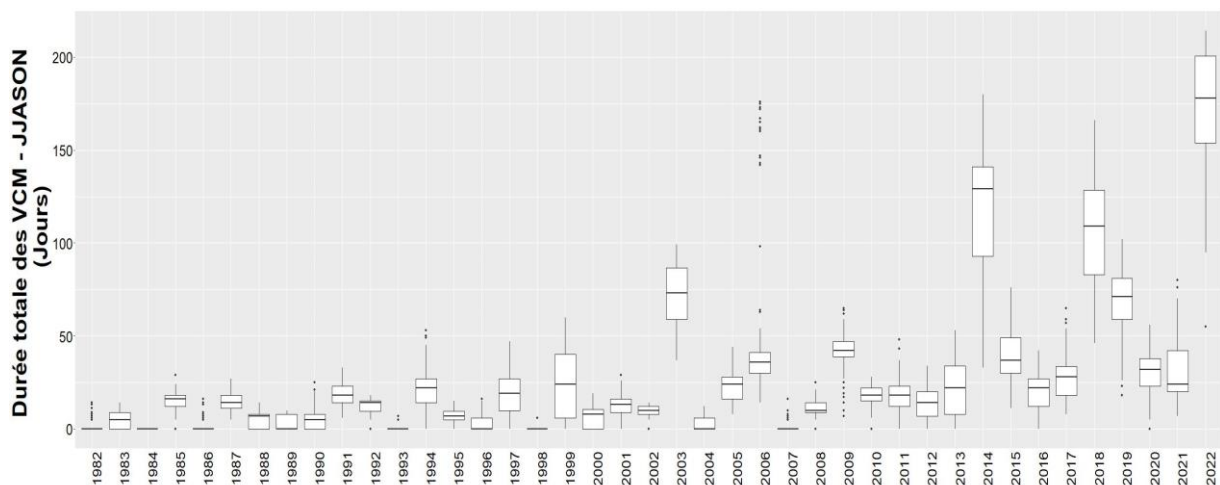


FIGURE 74 : DUREE TOTALE DES VCM DE SURFACE SUR LA PERIODE JJASON POUR LES STATIONS CALOR, PAR ANNEE

Si les années 1980 et 1990 tournent autour d'une anomalie moyenne nulle, on voit apparaître des premières années avec fortes anomalies et VCM dans les années 2000, comme la **canicule de 2003** qui ressort clairement. Une **accélération a lieu à la fin des années 2000**, et sur la **dernière décennie** (période couverte par le réseau CALOR) il y a une **anomalie moyenne toujours supérieure à 0,5°C**, avec **4 années de forte canicule** : 2014, 2018, 2019 et 2022.

En produisant les mêmes graphiques à partir des données CALOR, on retrouve les **mêmes tendances** pour 2014, 2018 et 2019 mais **moins marquées que pour la température de surface**, et 2022 ne semble clairement pas extraordinaire contrairement à l'anomalie de température de surface qui traduit bien la forte canicule de 2022.

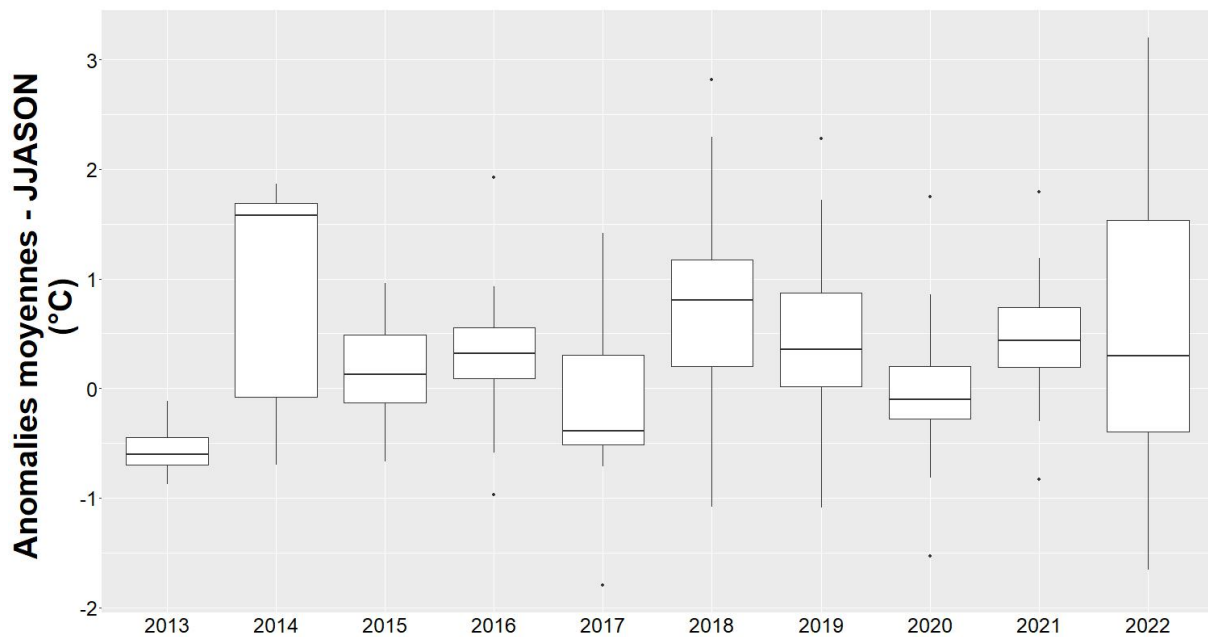


FIGURE 75 : ANOMALIES MOYENNES DE TEMPERATURE DE FOND (CALOR) SUR LA PERIODE JJASON POUR LES STATIONS CALOR, PAR ANNEE

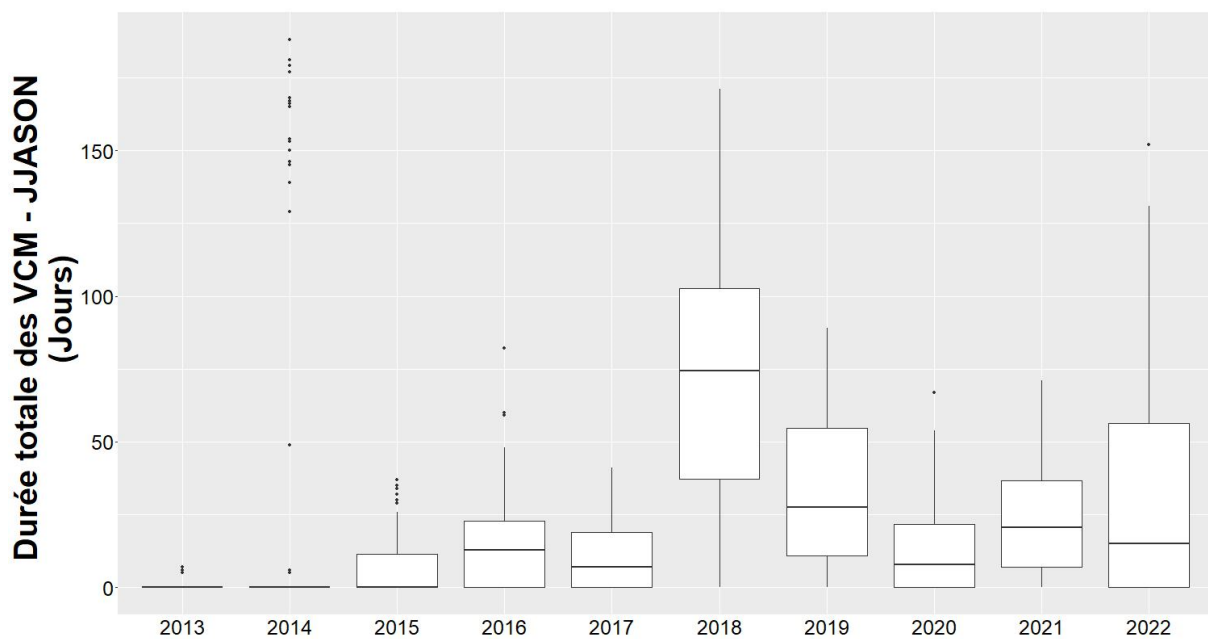


FIGURE 76 : DUREE TOTALE DES VCM DE FOND (CALOR) SUR LA PERIODE JJASON POUR LES STATIONS CALOR, PAR ANNEE

Cependant, contrairement aux graphiques basés sur la **température de surface satellite** qui montrent pour chaque année la **distribution des valeurs sur l'ensemble des localisations des stations CALOR**, celles issues du **réseau CALOR** sont **dépendantes de l'état de développement** du réseau chaque année. Ainsi, les premières années il existait encore peu de stations équipées, le temps que le réseau se développe et se généralise à toutes les stations RECOR et TEMPO. Par ailleurs, les **valeurs correspondant à l'année 2022 sont incomplètes**, car les capteurs déposés en mai / juin 2022 ne seront relevés qu'en 2025.



IV. Liens entre température et nécroses

I.A. Gorgones

La figure suivante montre le **pourcentage de nécroses par année** (trop peu de données pour distinguer par région et par année). Il existe une **augmentation significative des nécroses de *Paramuricea clavata*** avec le temps (t-test, p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.11$), mais cet effet est accentué par le suivi intermédiaire réalisé en octobre 2022 suite à la canicule, pour lequel nous avons observé des fortes valeurs de mortalité de gorgones. En revanche, il ne se dégage **pas de tendance d'évolution** du taux de mortalité d'*Eunicella cavolini* avec le temps (t-test, p-value > 0.05).

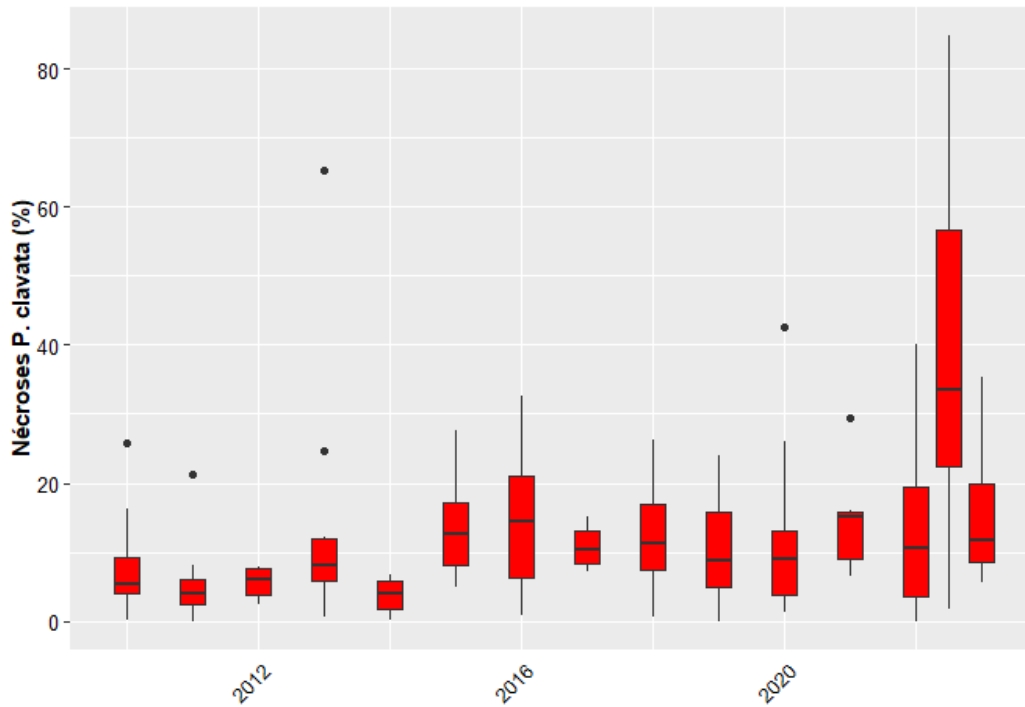


FIGURE 77 : TAUX DE NECROSE DES PARAMURICEA CLAVATA SELON L'ANNEE

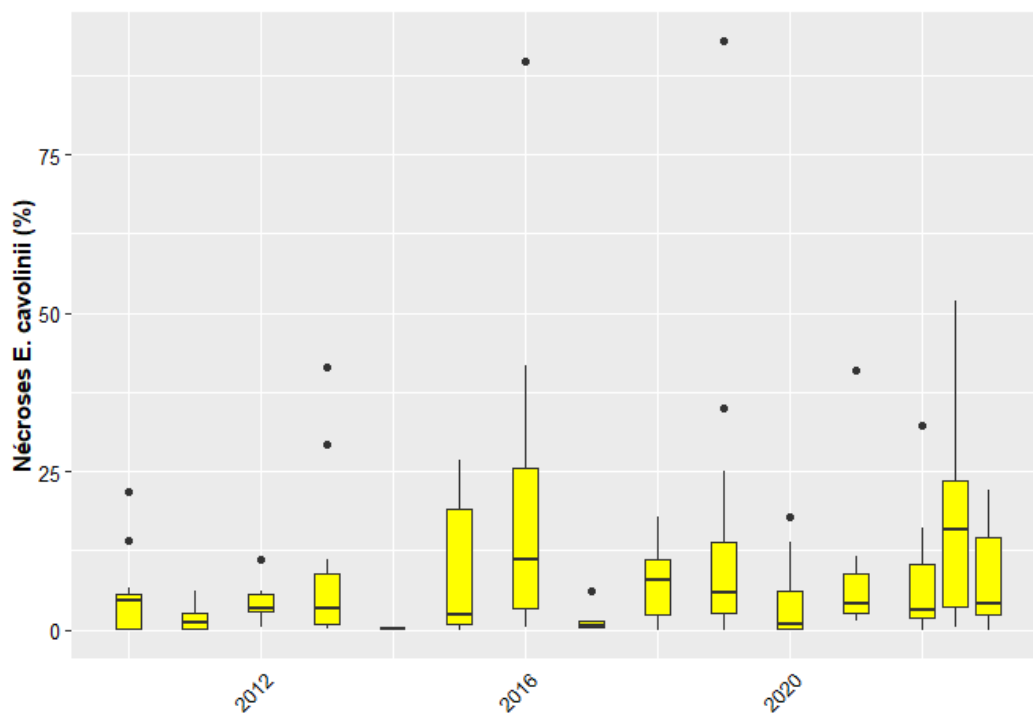


FIGURE 78 : TAUX DE NECROSE DES EUNICEALA CAVOLINI SELON L'ANNEE

Des nécroses sont **observées à toutes les profondeurs**, mais il existe une **relation négative** entre la **profondeur** et le **taux de nécrose** de *Paramuricea clavata* (log-transformation : t-test ; p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.16$). **Même relation mais plus faible** pour *Eunicella cavolini* (log-transformation : t-test ; p-value < 0.01 ; $R^2 = 0.05$).

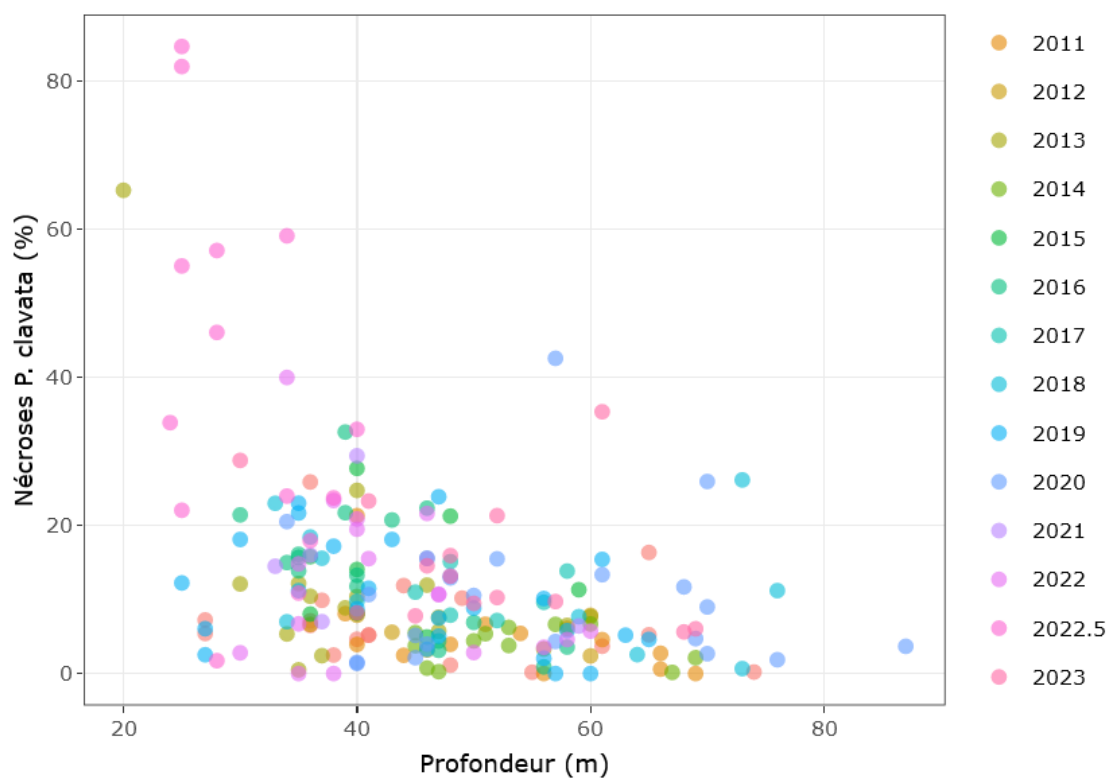


FIGURE 79 : TAUX DE NECROSE DES PARAMURICEA CLAVATA EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



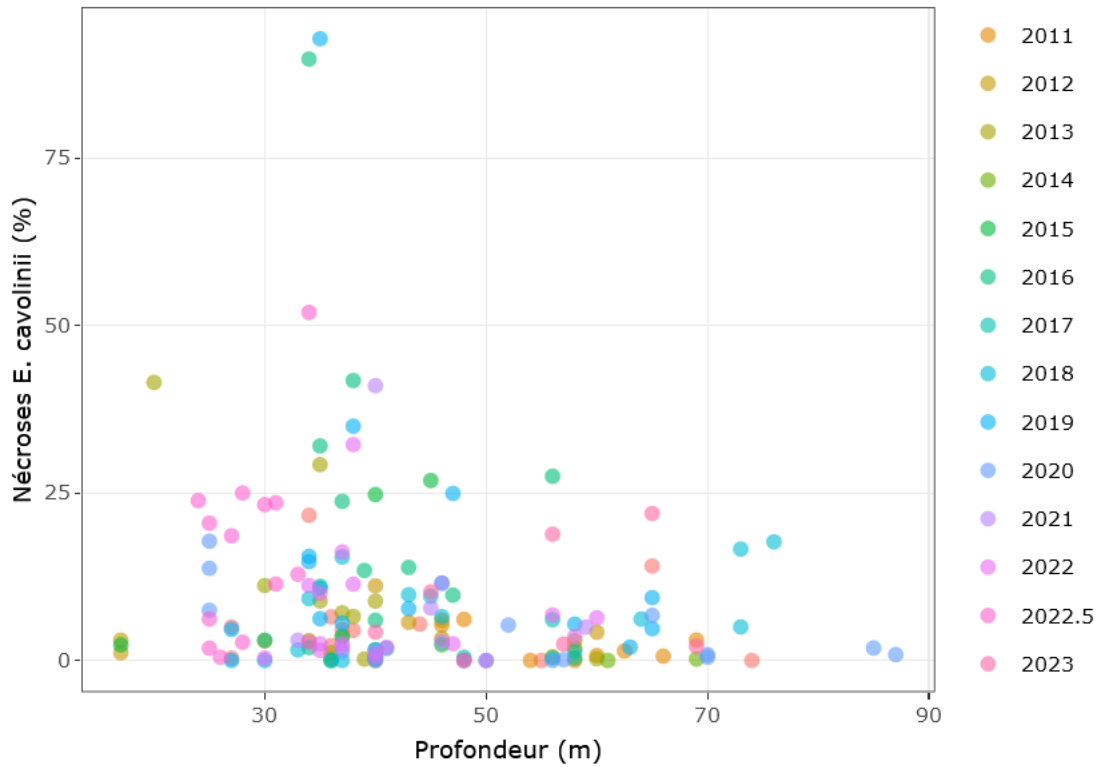


FIGURE 80 : TAUX DE NECROSE DES *EUNICELLA CAVOLINI* EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

Pourtant, il existe une **relation positive significative** entre le **taux de nécroses de *Paramuricea clavata*** et **l'anomalie thermique moyenne de la température de surface** (t-test ; $p < 0.001$; $R^2 = 0.09$) :

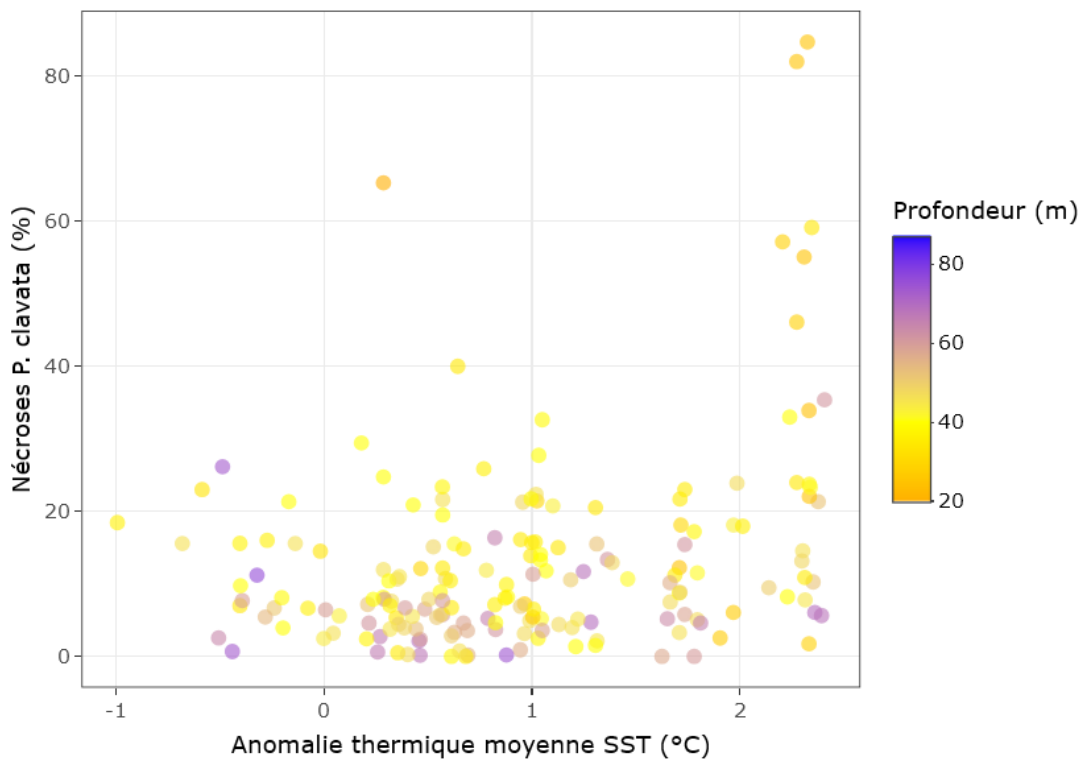


FIGURE 81 : POURCENTAGE DE NECROSES DE *PARAMURICEA CLAVATA* EN FONCTION DE L'ANOMALIE THERMIQUE MOYENNE DE SST SUR LA PERIODE JJASON DE L'ANNEE PRECEDANT LE SUIVI RECOR ET DE LA PROFONDEUR

Dans le cas d'*Eunicella cavolini*, la relation est également **significative quoique moins forte** (t-test ; p-value < 0.05 ; $R^2 = 0.02$) :

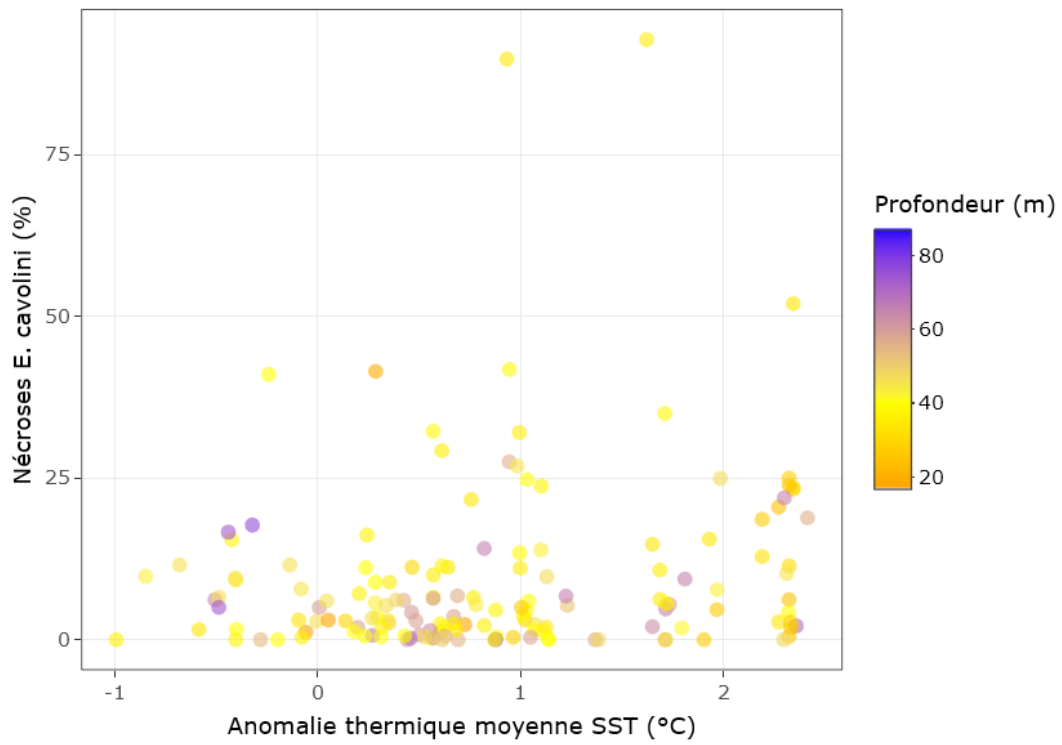


FIGURE 82 : POURCENTAGE DE NECROSES D'*EUNICELLA CAVOLINI* EN FONCTION DE L'ANOMALIE THERMIQUE MOYENNE DE SST SUR LA PERIODE JJASON DE L'ANNEE PRECEDANT LE SUIVI RECOR ET DE LA PROFONDEUR



I.B. Algues rouges encroûtantes

En 2023, la base de données RECOR dénombre **20 254 observations de nécroses** du coralligène, parmi lesquelles 19 936 touchent les **ARE** (la majorité étant non identifiées, avec 16 169 enregistrements ou *Mesophyllum alternans*, avec 3 592 enregistrements). Nous nous intéressons donc par la suite aux **nécroses des ARE** dans leur ensemble, exprimées en proportion des algues rouges encroûtantes observées.

La figure suivante montre le pourcentage de **nécroses** par **région** et par **année**. La tendance est à l'**augmentation exponentielle** avec le temps (t-test, p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.46$), avec des valeurs particulièrement élevées à partir de 2020.

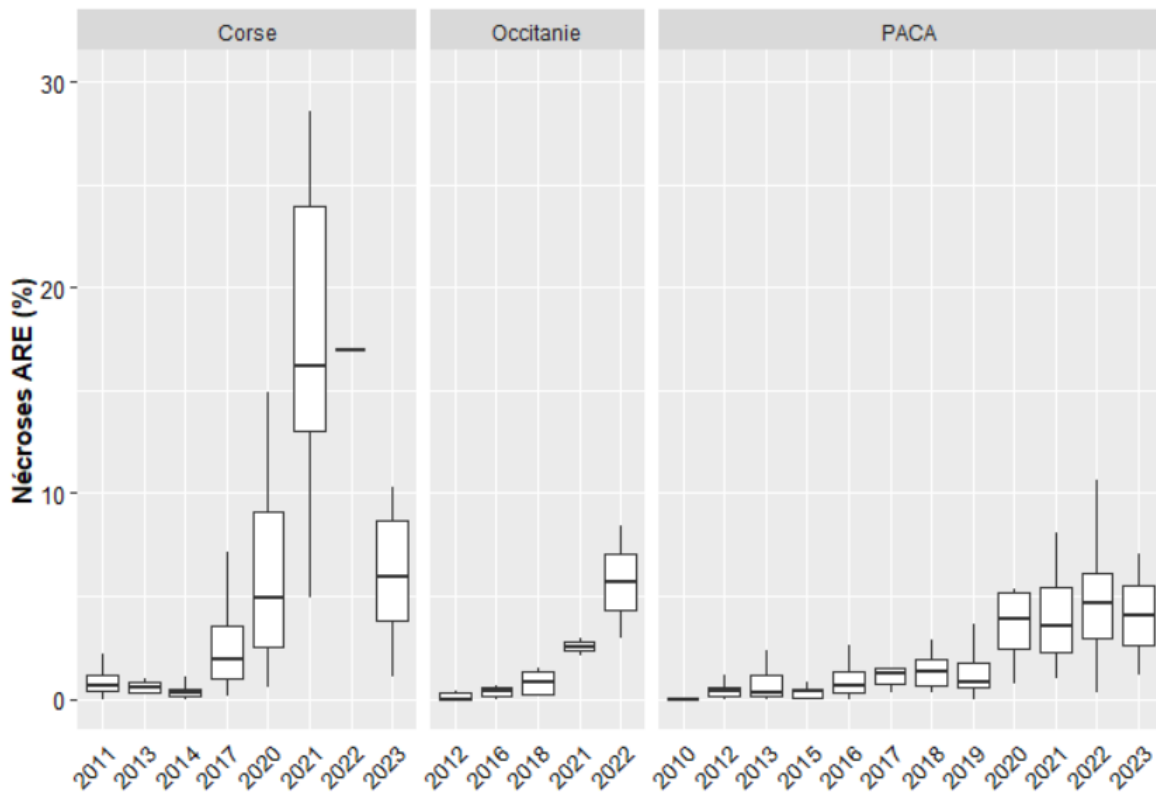


FIGURE 83 : DISTRIBUTION DES NECROSES DES ALGUES ROUGES ENCROUTANTES OBSERVEES PAR REGION ET PAR ANNEE

Ce résultat est cependant à **interpréter avec précaution**, car l'**amplitude bathymétrique des stations** change d'une région à l'autre, et toutes les stations ne sont pas échantillonnées pour chaque année pour chaque région.

Des nécroses sont **observées à toutes les profondeurs**, mais elles sont particulièrement **élevées sur les sites profonds** ces **dernières années** (2020-2023). En effet, il existe une **relation positive** entre la **profondeur** et le **taux de nécrose** des ARE (t-test ; p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.15$), voir figure suivante :

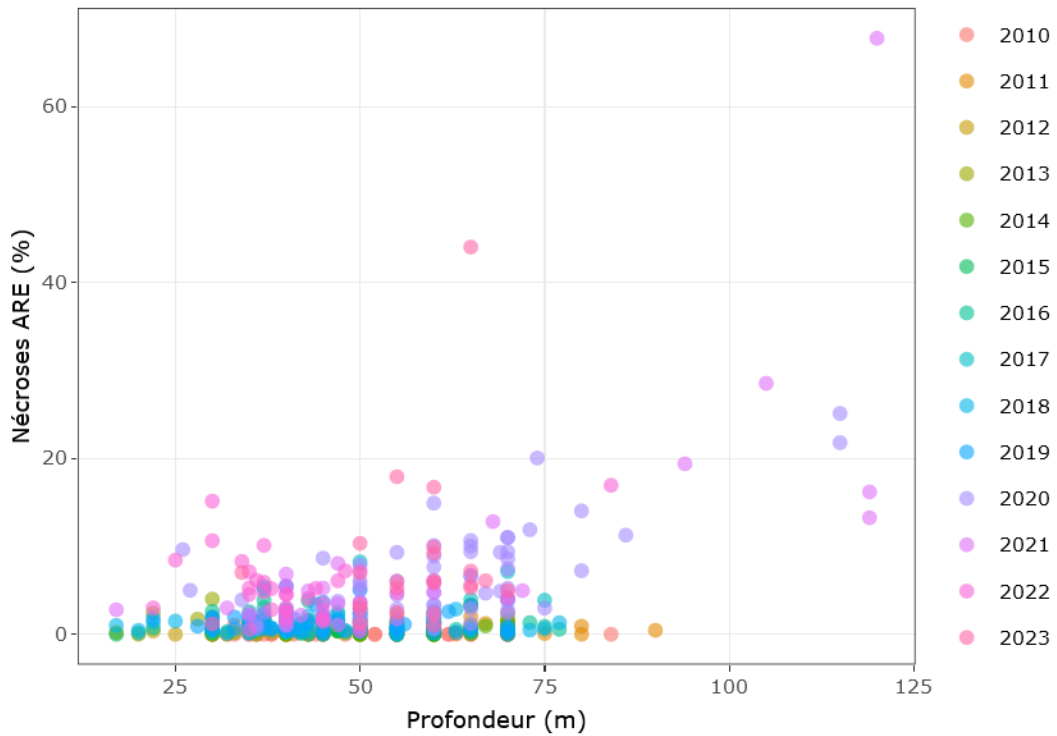


FIGURE 84 : DISTRIBUTION DES NECROSES DES ALGUES ROUGES ENCROUTANTES EN PROFONDEUR, PAR ANNEE

Pourtant, les **anomalies thermiques** et **VCM** sont **moins importantes en profondeur** d'après les résultats ci-dessus. Mais on retrouve bien une **très faible relation négative significative** entre le **pourcentage de nécrose des ARE** et **l'anomalie thermique moyenne** sur la période JJASON de l'année précédant le suivi RECOR (t-test, p-value < 0.05 ; $R^2 = 0.03$) :

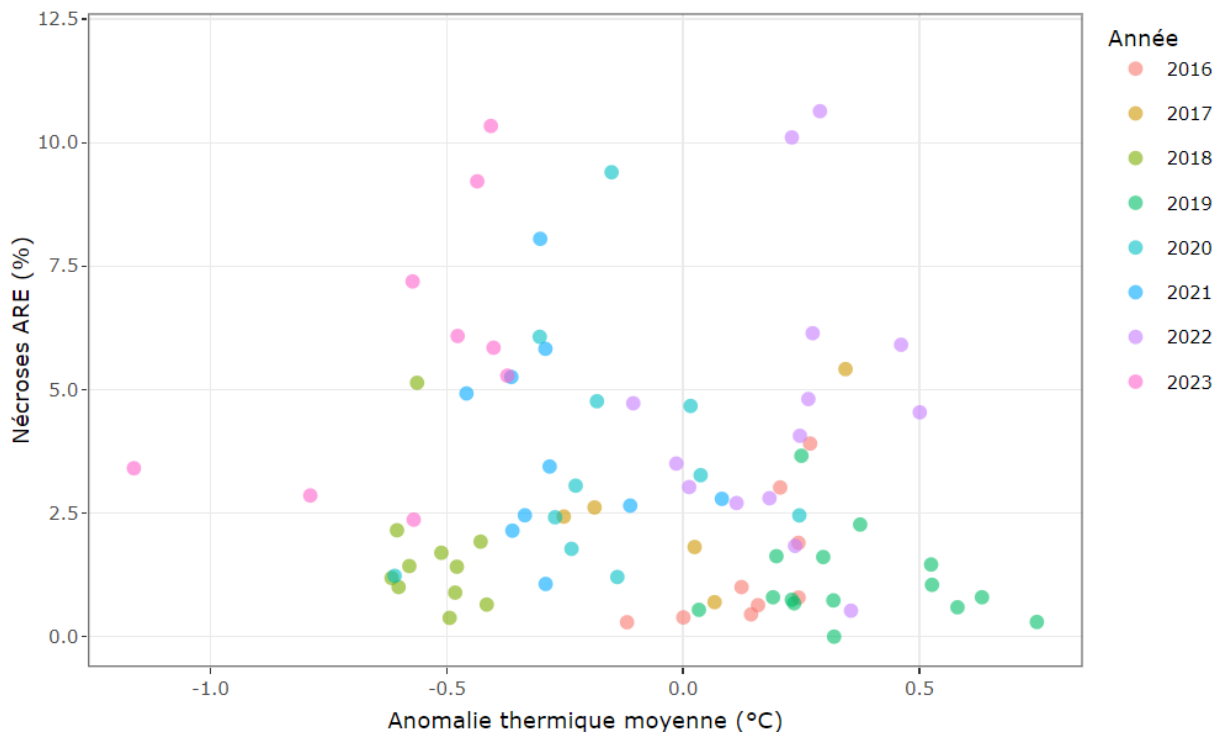


FIGURE 85 : POURCENTAGE DE NECROSES D'ALGUES ROUGES ENCROUTANTES EN FONCTION DE L'ANOMALIE THERMIQUE SUR LA PERIODE JJASON DE L'ANNEE PRECEDANT LE SUIVI RECOR



NB : ce graphique représente seulement **86 observations** de nécroses des ARE, car la représentation en fonction de l'**anomalie thermique moyenne** l'année précédant le suivi **implique d'avoir de la donnée de température sur cette période** (donc pas de points les premières années RECOR). Par ailleurs, toutes les stations suivies ne sont pas systématiquement équipées de capteurs à proximité.

Pourtant, il existe une **relation positive significative** entre le **taux de nécroses d'ARE** et l'**anomalie thermique moyenne de la température de surface** (t-test ; $p < 0.001$; $R^2 = 0.07$) :

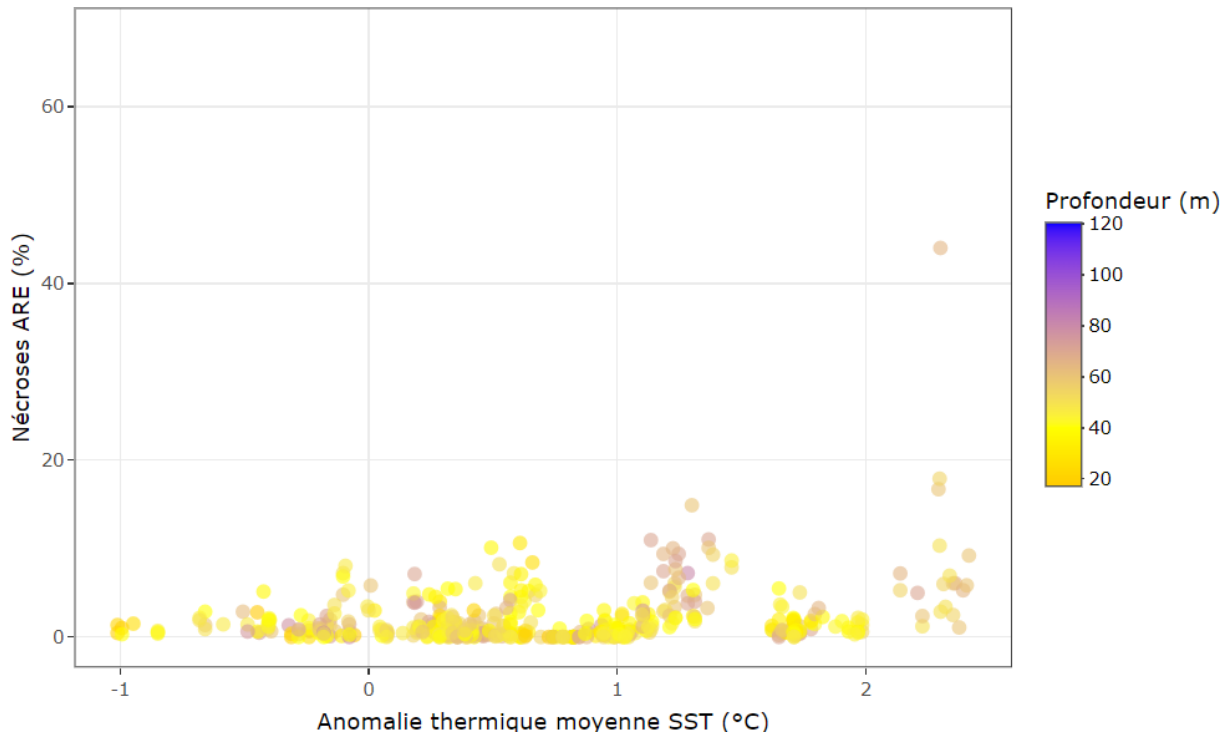


FIGURE 86 : POURCENTAGE DE NECROSES DES ALGUES ROUGES ENCROUTANTES (ARE) EN FONCTION DE L'ANOMALIE THERMIQUE MOYENNE DE SST SUR LA PERIODE JJASON DE L'ANNEE PRECEDANT LE SUIVI RECOR ET DE LA PROFONDEUR

L'interprétation des données de **nécroses des gorgones et des ARE** au regard des **anomalies thermiques in-situ** (capteurs CALOR) ne donne pas de relation aussi forte que celle avec les **anomalies de la température de surface**. La **difficulté à modéliser la saisonnalité** des températures de fond ainsi que le nombre de points (plus faible que pour la température de surface, qui permet de couvrir tout le jeu de données RECOR) pourraient être en cause.

V. Liens entre température de fond et les données externes

L'objectif de cette partie est de comprendre les **liens entre la température de fond et d'autres données environnementales** (température de surface, MLD, profondeur...) afin d'imaginer pouvoir **anticiper les vagues de chaleur** grâce à d'autres jeux de données externes acquises en continu (images satellite, argo floats...), et également de définir des **zones de « refuge » thermique** (i.e peu sujettes aux VCM).

I.A. Liens entre température de surface et température de fond

Nous avons cherché à quantifier **l'effet de la profondeur** sur la **corrélacion entre températures de surface et de fond**. Pour ce faire, nous avons conservé l'ensemble de **séries de données de plus de 3 ans** afin d'avoir des coefficients de détermination « comparables » et dont la valeur dégradée ne soit pas liée à un manque de puissance statistique ($n = 153$ observations). Pour chaque série de donnée, nous avons construit un **modèle linéaire** entre **température de fond** (CALOR) et **température de surface** (SST satellite) et mesuré son **coefficient de détermination R^2** .

Il existe une **relation négative significative** entre ce **coefficient de détermination** et la **profondeur** (t-test ; $p < 0.001$; $R^2 = 0.87$). En d'autres termes, plus la profondeur augmente, et plus la température de fond est décorrélée de la température de surface. Par ailleurs, il semble y avoir un **point d'inflexion autour de 40 m** avec une **pente et relation forte** jusqu'à 40 m de profondeur ($R^2 = 1.13 - 0.0198 \times \text{profondeur}$; t-test ; $p < 0.001$; $R^2 = 0.84$) et une **pente et relation nettement plus faibles** au-delà de 40 m ($R^2 = 0.42 - 0.0043 \times \text{profondeur}$; t-test ; $p < 0.001$; $R^2 = 0.37$).

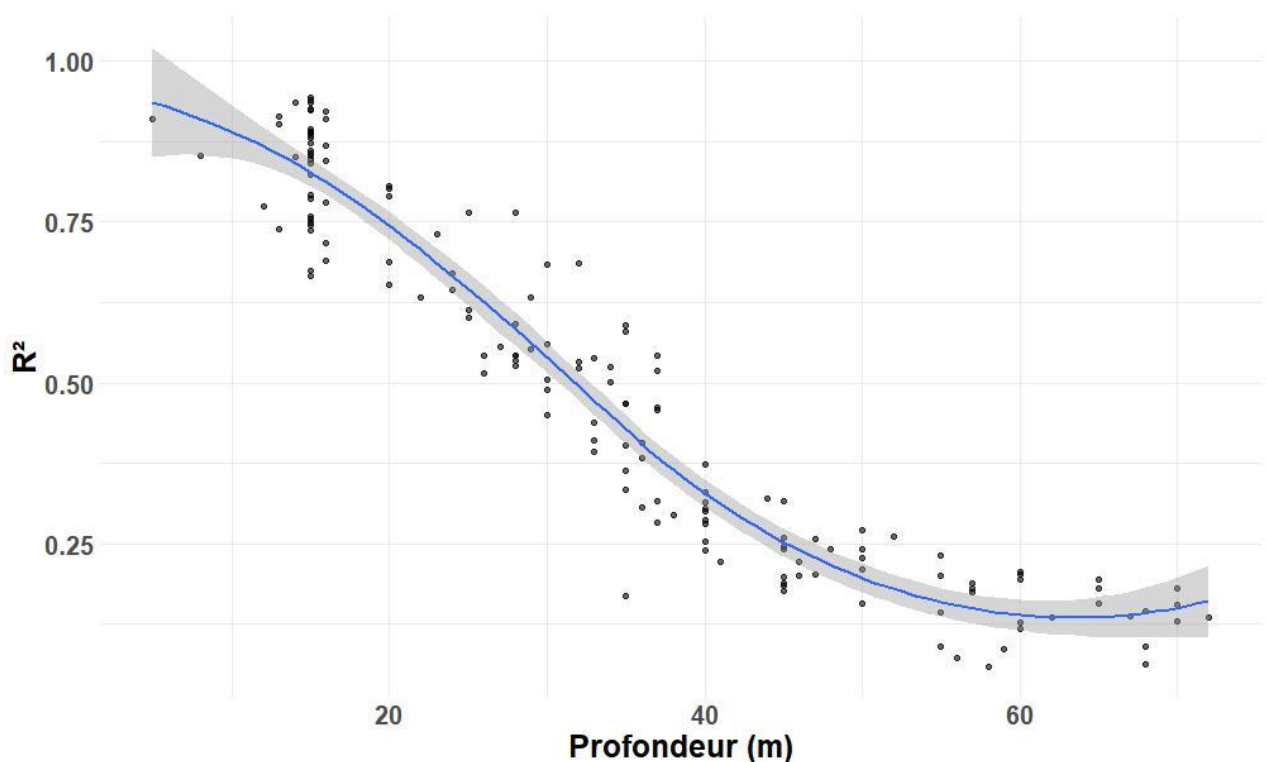


FIGURE 87 : COEFFICIENT DE DETERMINATION DE LA RELATION LINEAIRE ENTRE LA TEMPERATURE DE FOND ET LA TEMPERATURE DE SURFACE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR (EN BLEU LA MOYENNE MOBILE, EN GRIS L'INTERVALLE DE CONFIANCE DE LA MOYENNE)



Nous avons réalisé d'autres analyses, mais cette fois en ne conservant que les données en période de VCM de surface sur la période JJASON, et seulement les séries de données avec **au moins 50 observations** après filtrage par les VCM (n = 213 observations). Nous avons ensuite calculé la **température de fond moyenne (CALOR) en période de canicule de surface**, et tracé la **relation à la profondeur** (voir figure suivante). Cette relation est sans surprise **significativement négative** (t-test ; p < 0.001 ; R² = 0.84), avec un **point d'inflexion autour de 40 m moins marqué** et une variabilité moins grande au-delà de cette profondeur :

- <= 40 m : Température moyenne = 24.68 – 0.188 x profondeur ; t-test ; p < 0.001 ; R² = 0.76 ;
- > 40 m : Température moyenne = 19.81 – 0.071 x profondeur ; t-test ; p < 0.001 ; R² = 0.80.

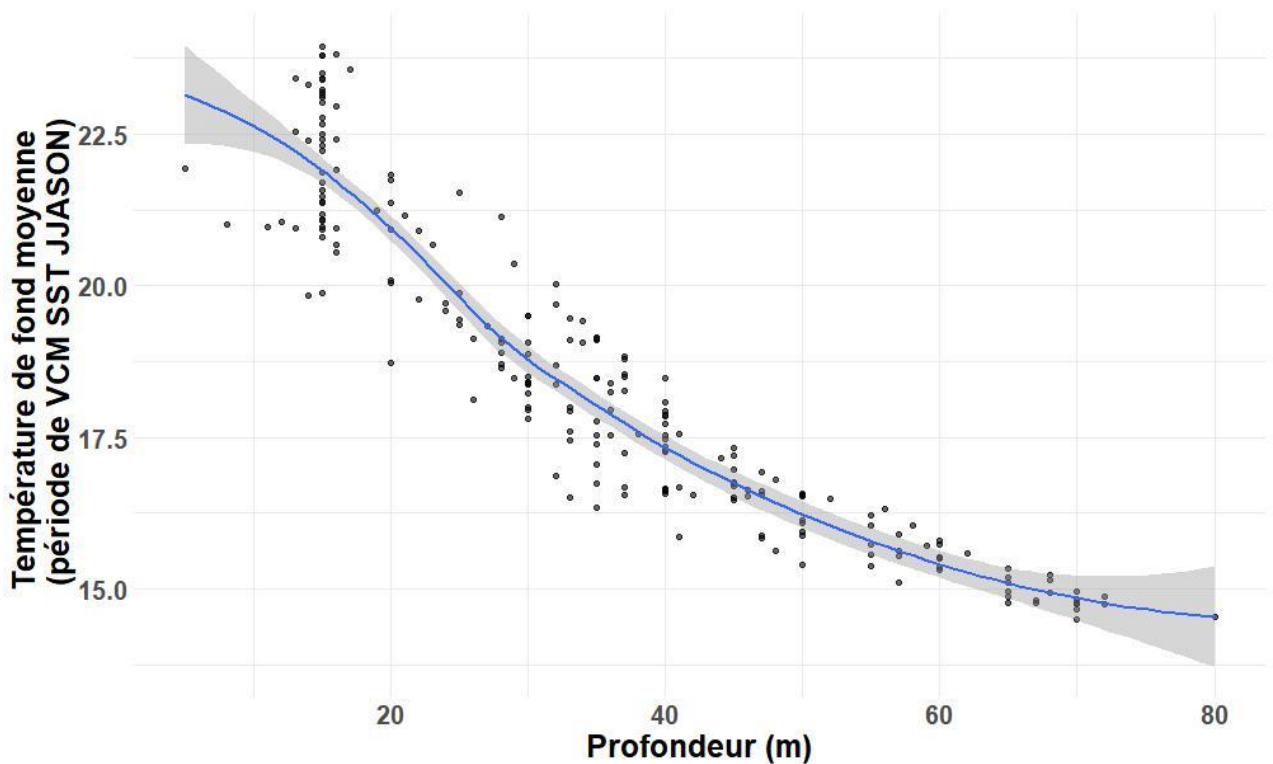


FIGURE 88 : TEMPERATURE DE FOND MOYENNE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, EN PERIODE DE VCM DE SURFACE (EN BLEU LA MOYENNE MOBILE, EN GRIS L'INTERVALLE DE CONFIANCE DE LA MOYENNE)

Enfin, nous avons calculé pour chaque site la **moyenne « hivernale »** (i.e hors période JJASON, soit décembre à mai) de la température de fond, et mesuré **l'écart moyen à cette valeur en période de canicule de surface**, en fonction de la profondeur. Il existe une **relation négative significative** entre la **différence à la moyenne hivernale** et la **profondeur** (t-test ; p < 0.001 ; R² = 0.85), montrant que la stabilité de la température augmente avec la profondeur et que les sites au-delà de 40 m semblent effectivement protégés y compris en période de VCM de surface.

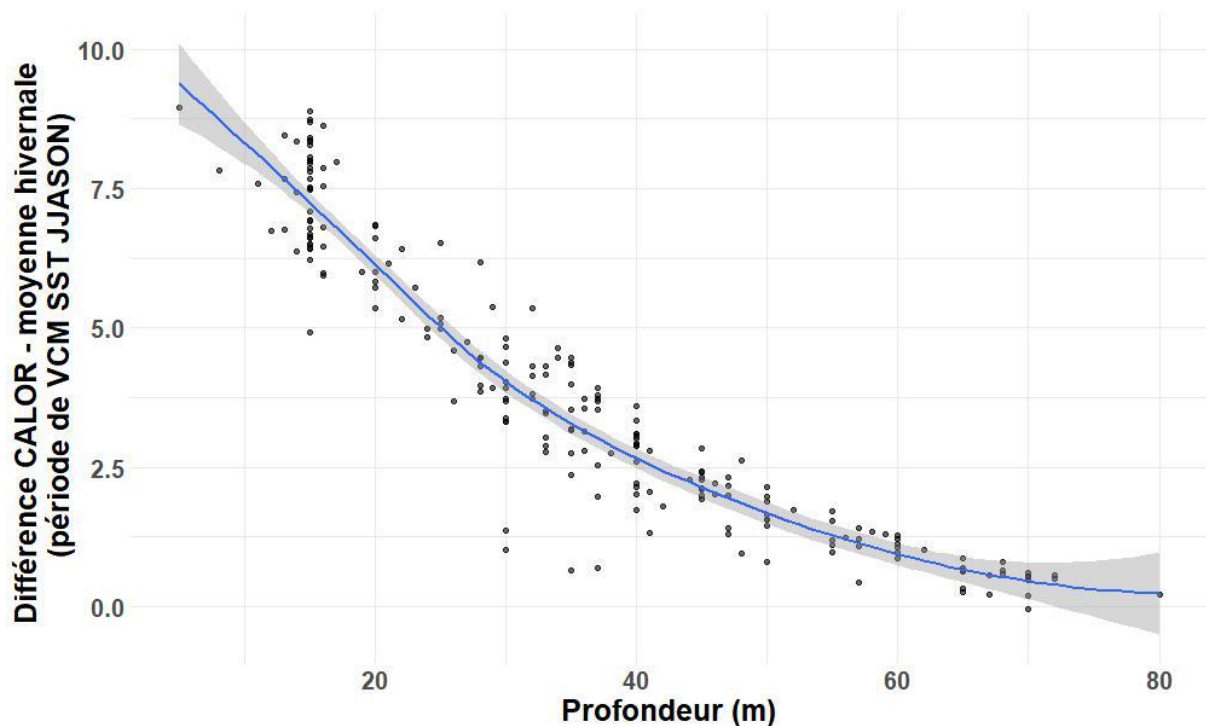


FIGURE 89 : DIFFERENCE ENTRE TEMPERATURE DE FOND ET SA MOYENNE HIVERNALE (DECEMBRE-MAI) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, EN PERIODE DE VCM DE SURFACE (EN BLEU LA MOYENNE MOBILE, EN GRIS L'INTERVALLE DE CONFIANCE DE LA MOYENNE)

I.B. Prédiction de la température de fond

L'objectif de cette partie de l'étude est de chercher à **prédire au mieux la température de fond** à partir des autres variables environnementales (température de surface, MLD, profondeur) afin de :

- Pouvoir **prédire la température de fond partout**, à mesure que les autres données environnementales sont mises à disposition ;
- Définir des « **refuges thermiques** », à tendance **moins chaudes** que prédites par le modèle, et des **zones « exposées »** en moyenne **plus chaudes**.

Pour ce faire, nous avons **compilé l'ensemble des données moyennes journalières CALOR** depuis le début la mise en place du réseau et jusqu'au 31 décembre 2022 (soit 375 566 mesures de température de fond), avec la valeur de **température de surface** (SST satellite) ainsi que la **profondeur de la MLD**. A partir de la MLD et de la profondeur de chaque capteur, nous avons calculé la **distance de la thermocline au capteur** (fixée à 0 si la thermocline descend sous le capteur). Nous avons ensuite cherché à **modéliser la température de fond** avec un **modèle linéaire multiple** et un **random forest** (forêts aléatoires) qui permet de mieux prendre en compte certaines interactions entre variables ou effets seuils qu'un modèle linéaire.

Le **modèle linéaire multiple** montre une relation **positive significative** avec la **température de surface**, et **négative** avec la **profondeur** et la **distance à la thermocline**, et explique **60 % de la variance** (t-test ; p-value < 0.001 ; $R^2 = 0.60$). Concernant le **random forest**, nous avons sous-échantillonné **10 000 observations** dans le jeu de données pour entraîner le modèle, qui explique **81 % de la variance**. La variable la plus importante est la température de surface, suivie de la distance à la thermocline, et la profondeur arrive en dernier.



A l'aide de ce modèle, nous avons calculé la **valeur prédictive de température de fond** pour toutes les stations CALOR. Les figures suivantes illustrent les différentes variables prédictives, la vraie série de donnée CALOR ainsi que la valeur prédictive de température de fond sur **trois stations à différentes profondeurs** en **2021** (année récente avec une durée totale de VCM de surface faible) et **2022** (année avec la plus grande durée totale de VCM de surface) :

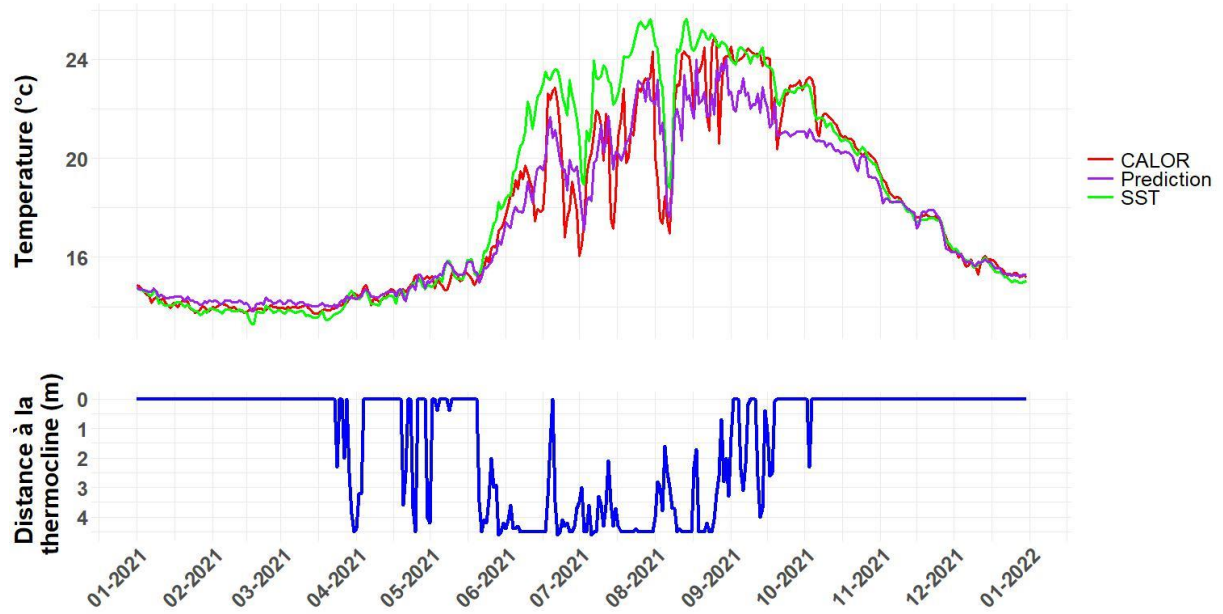


FIGURE 90 : EXEMPLE DE PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE FOND POUR LA STATION POINTE ANDATI PI 15 M EN 2021

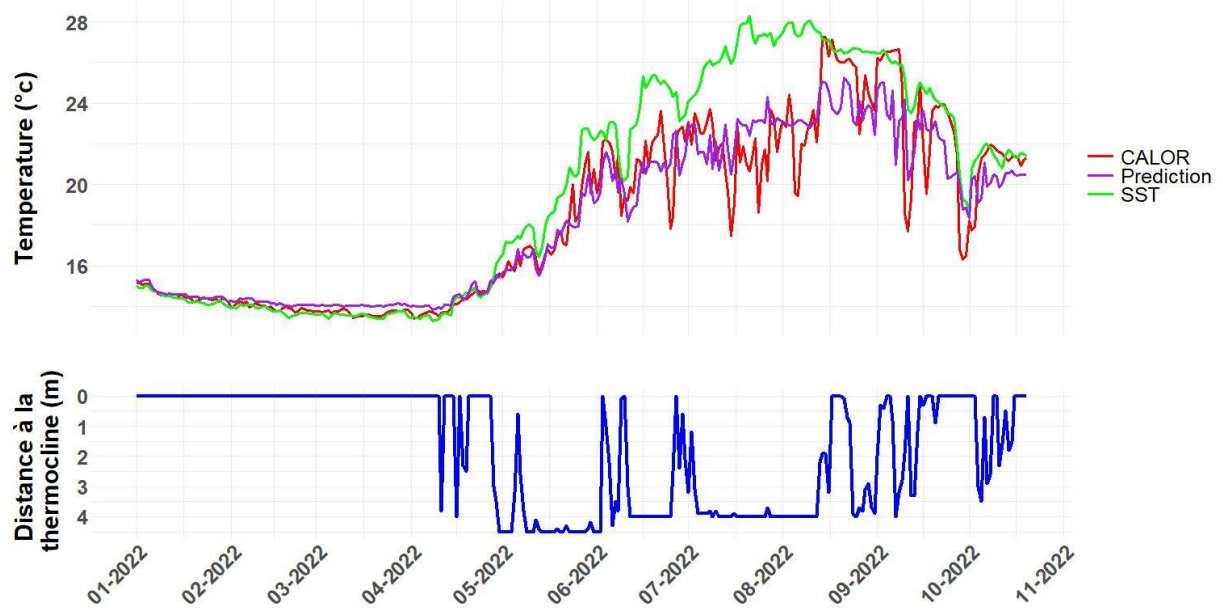


FIGURE 91 : EXEMPLE DE PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE FOND POUR LA STATION POINTE ANDATI PI 15 M EN 2022



FIGURE 92 : EXEMPLE DE PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE FOND POUR LA STATION TIBOULEN 40 M EN 2021

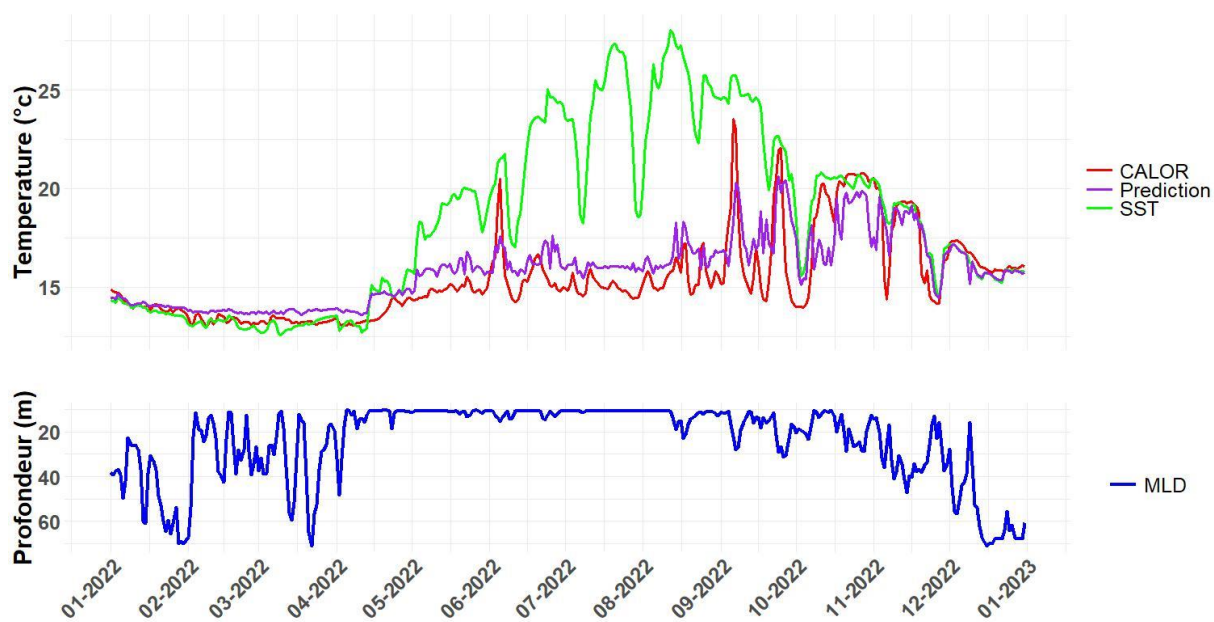


FIGURE 93 : EXEMPLE DE PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE FOND POUR LA STATION TIBOULEN 40 M EN 2022



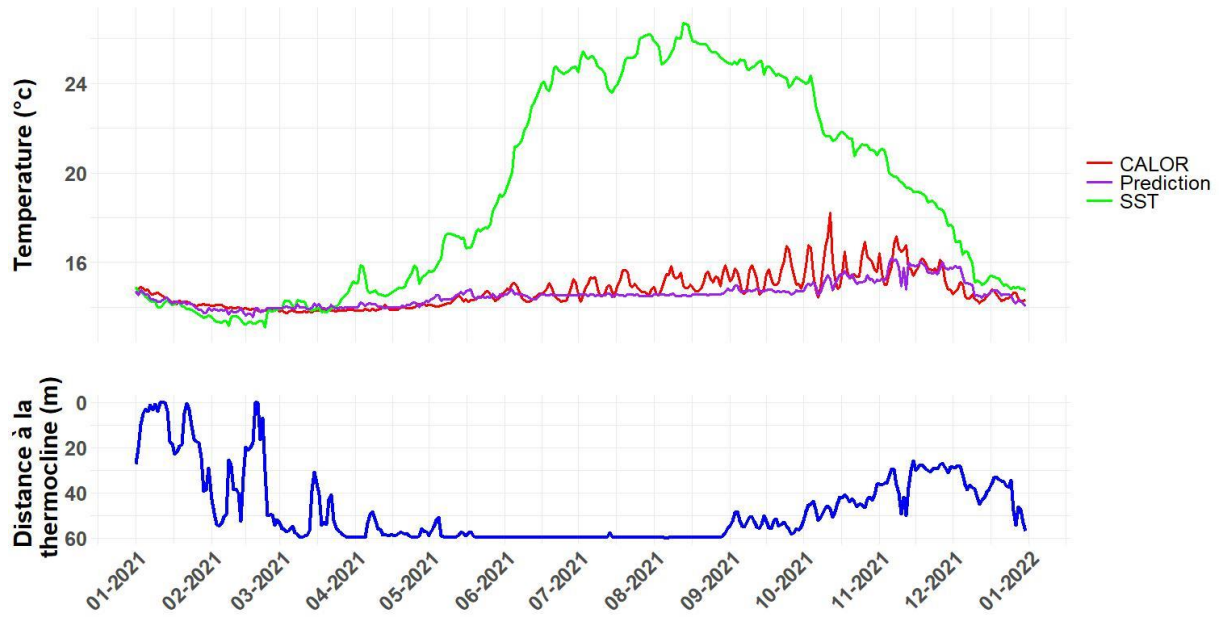


FIGURE 94 : EXEMPLE DE PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE FOND POUR LA STATION SANGUINAIRES 70 M EN 2021

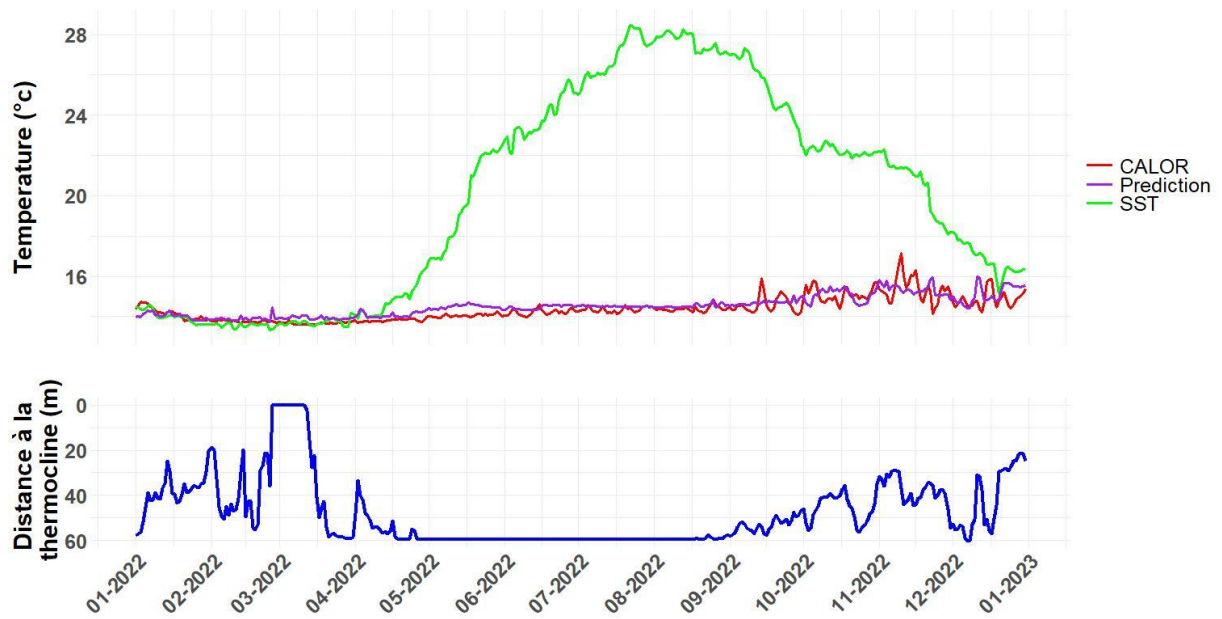


FIGURE 95 : EXEMPLE DE PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE FOND POUR LA STATION SANGUINAIRES 70 EN 2022

Visuellement, le modèle semble correctement prédire la **température de fond en période hivernale** (quand la colonne d'eau est très homogène et non stratifiée), et les **tendances évolutives en période estivale** malgré des **amplitudes plus réduites que la réalité** (maxima plus faibles, minima plus élevés). En revanche il semble y avoir parfois un **léger retard temporel de la dynamique évolutive** (inertie du système mal prise en compte), et certaines petites fluctuations profondes sont très mal prédites (exemple Sanguinaires 70 m en 2021).

I.C. Définition de refuges thermiques

Nous entendons par « **refuges thermiques** » des stations pour lesquelles la température de fond n'atteint pas des valeurs anormalement chaudes durant les **canicules en surface**. Pour ce faire, nous avons calculé **trois indicateurs** basés sur les analyses précédentes :

- **Distance à la température de fond moyenne espérée** pour une profondeur donnée en période de canicule de surface (écart entre chaque point et la courbe bleue sur la Figure 88) ;
- **Distance à l'écart moyen à la température moyenne hivernale espérée** pour une profondeur donnée en période de canicule de surface (écart entre chaque point et la courbe bleue sur la Figure 89) ;
- **Distance moyenne entre la température mesurée et celle prédite par le modèle** en période de canicule de surface (écart moyen entre les courbes rouges et violettes sur les graphiques précédents, en période de canicule de surface).

La figure suivante est une cartographie de la **distance à la température de fond moyenne espérée** sur la période de VCM de surface en JJASON 2022 :

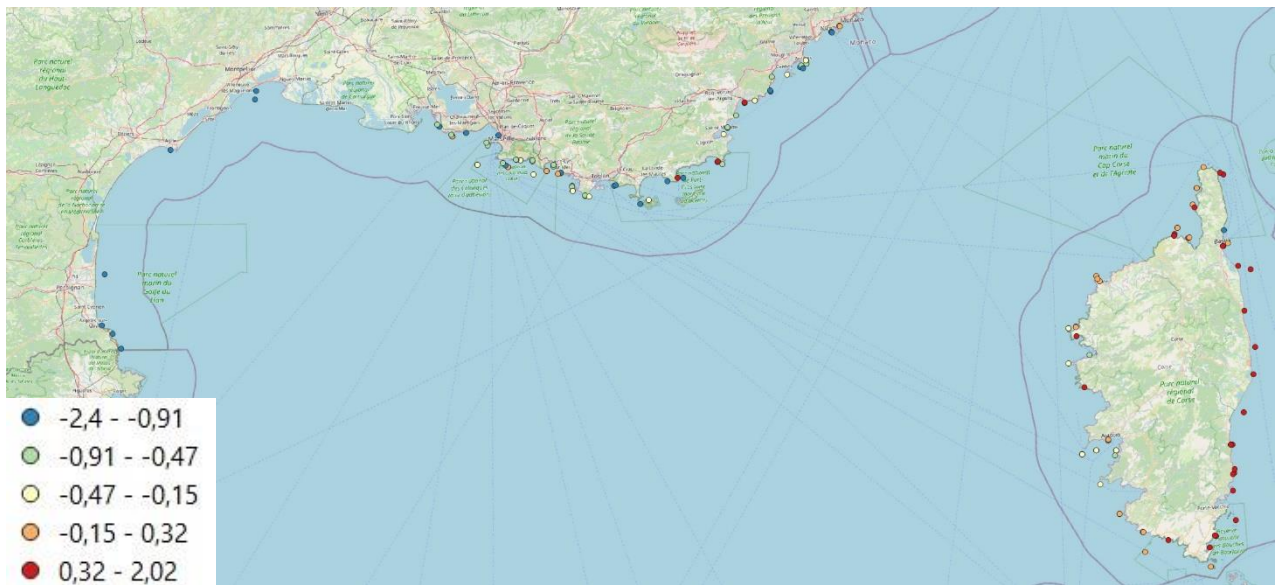


FIGURE 96 : CARTOGRAPHIE DE LA DISTANCE A LA TEMPERATURE DE FOND MOYENNE ESPEREE, EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, EN PERIODE DE CANICULE DE SURFACE



La figure suivante est une cartographie de l'écart moyen à la température moyenne hivernale espérée, sur la période de VCM de surface en JJASON 2022 :

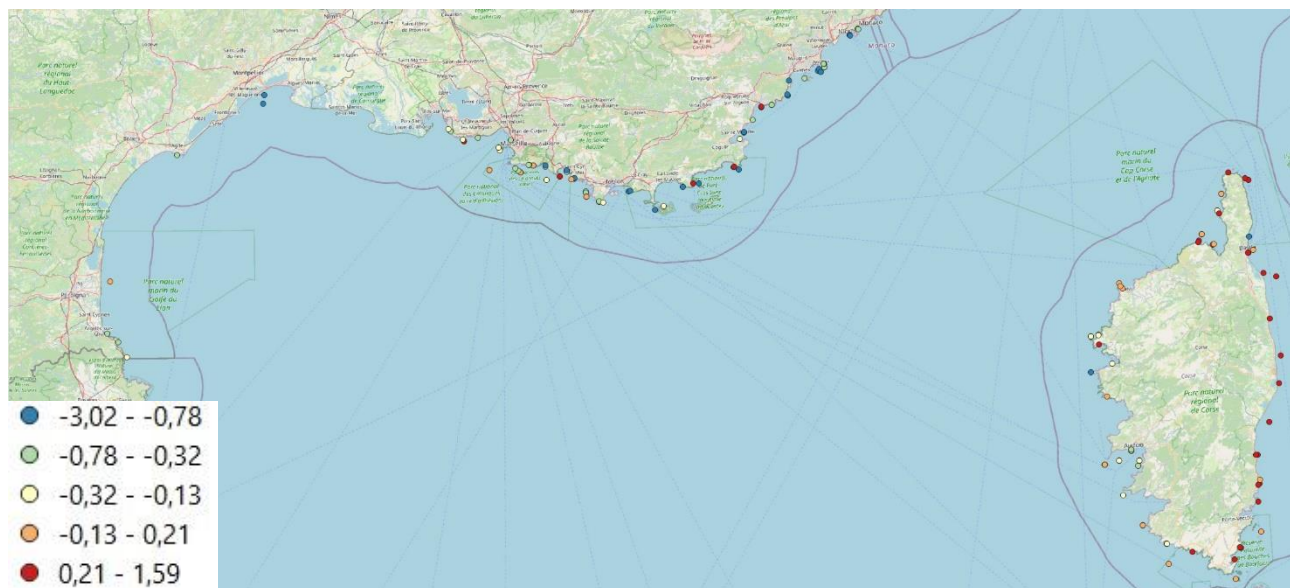


FIGURE 97 : CARTOGRAPHIE DE LA DISTANCE A LA TEMPERATURE DE FOND MOYENNE HIVERNALE ESPEREE, EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, EN PERIODE DE CANICULE DE SURFACE

La figure suivante est une cartographie de la distance moyenne entre la température mesurée et celle prédite par le modèle sur la période de VCM de surface en JJASON 2022 :

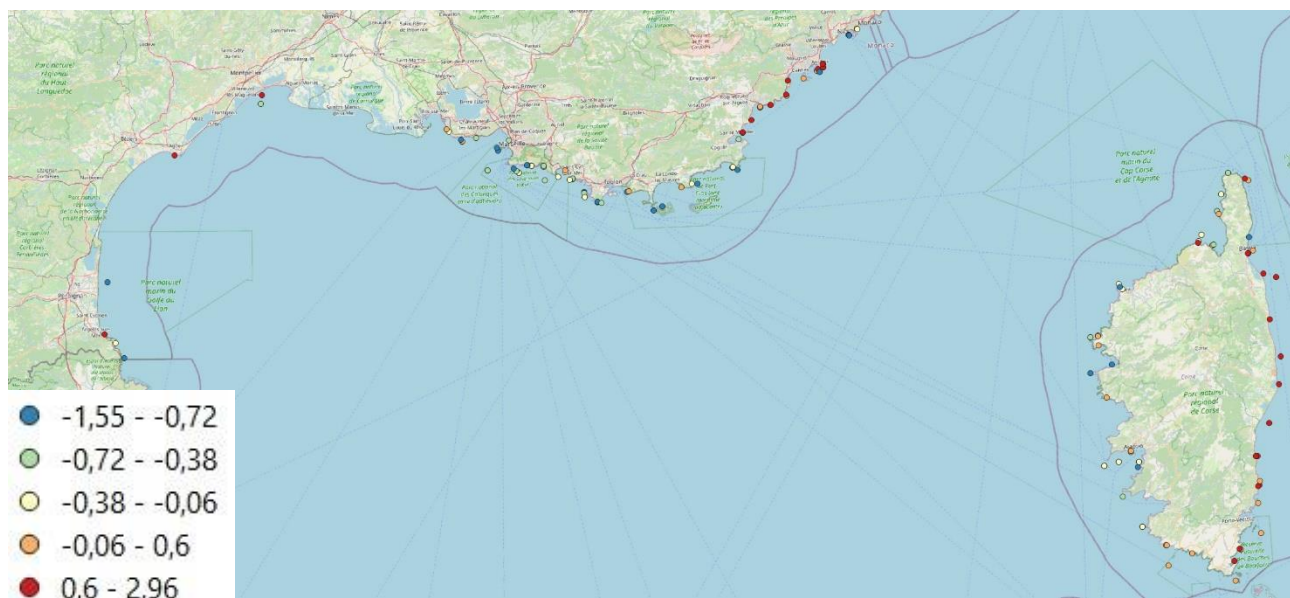


FIGURE 98 : CARTOGRAPHIE DE LA DISTANCE MOYENNE ENTRE LA TEMPERATURE DE FOND PREDITE ET MESUREE, EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, EN PERIODE DE CANICULE DE SURFACE

Visuellement, aucune de ces trois cartes ne semble pas retranscrire l'épisode de VCM de surface en PACA. Par ailleurs, il n'existe aucune relation statistique entre ces trois indicateurs et le taux de nécroses d'ARE ni des deux principales espèces de gorgones (*Eunicella cavolini* et *Paramuricea clavata*).

VI. Conclusions et perspectives

L'épisode caniculaire de l'été 2022 est **sans précédents**, comme en atteste la littérature ainsi que l'analyse de longues séries de données de **température de surface** mesurées par satellite depuis 1982. Suite aux observations de **mortalité massive de gorgones rouges** dans le Parc National des Calanques en août 2022, nous avons organisé une campagne de mesures de **vitalité des gorgones** / relève des **capteurs de température** sur les stations RECOR / CALOR à l'automne 2022. Nos observations ont confirmé celles de la littérature, avec des **taux de nécroses très élevés jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur**. Au-delà de cette limite bathymétrique assez franche, les gorgones ont été relativement préservées.

Nous avons cherché à **expliquer les nécroses de gorgones et d'algues rouges encrustantes** en appliquant la même méthodologie de vagues de chaleur que pour la température de surface, mais **nos séries de données (CALOR) sont malheureusement trop courtes** pour estimer correctement la **normale saisonnière** et donc les **anomalies thermiques** en grande partie responsables de ces épisodes de mortalité massive. Par ailleurs, la température de surface connaît des **valeurs de plus en plus anormales**, avec des anomalies et durée de vagues de chaleur importantes **depuis le début des années 2010**, date de nos premiers enregistrements. Cela sous-entend que nous cherchons à **calibrer une normale saisonnière** sur des **années principalement anormales**. Enfin, bon nombre de stations de mesures de gorgones ne correspondent pas aux profondeurs des stations CALOR (> 5 m de différence dans cette étude), ce qui réduit considérablement le jeu de données exploitable. Pour autant, nous avons trouvé une **relation positive significative** entre les **anomalies de température de surface** et le **pourcentage de nécroses d'ARE** et de **gorgones** (particulièrement *Paramuricea clavata*, qui semble plus sensible aux épisodes caniculaires).

La **température de surface** ainsi que **d'autres variables environnementales** étant accessibles à large échelle et sur plusieurs décennies sur des plateformes de données en libre accès (Copernicus), nous avons cherché à comprendre les **liens entre la température de fond et ces variables**, et en particulier à **prédire la température de fond** à partir de ces variables. Malgré un modèle aux **performances déjà enthousiasmantes**, les indicateurs utilisés afin de définir une **valeur « refuge »** aux stations de mesure **n'ont pas permis de mieux expliquer** les observations de nécroses de gorgones ni d'ARE.

La **difficulté principale** dans ce travail de recherche réside dans le **protocole d'acquisition des données de nécroses**. En effet, les articles récents révélant des **liens forts entre anomalies / durée des VCM et pourcentage de nécrose** des espèces érigées se focalisent sur les VCM durant la période JJASON, avec des mesures de nécroses à l'automne, l'idée étant de **corrélérer nécroses observées aux VCM estivales récentes**. Dans notre cas, les observations sont réalisées lors des campagnes TEMPO / RECOR / CALOR sur la période **fin mai début juin**, soit **avant** le début de la période JJASON. Nous avons donc cherché à corrélérer les données de nécroses à cette période, aux VCM sur la période JJASON de l'année précédente. Pour autant, cela laisse plusieurs mois aux nécroses pour évoluer, aux colonies atteintes à 100 % de disparaître, d'être recolonisées pour les nécroses d'ARE... Aussi, bon nombre de stations de mesures de nécroses n'étant **pas réalisées aux mêmes profondeurs** que les stations CALOR (celles-ci étant concomitantes aux stations RECOR, et les gorgones étant parfois à des profondeurs différentes), elles ne peuvent pas être prises en compte dans les analyses. Réussir à prédire avec la plus grande précision la température de fond à partir des autres variables environnementales permettrait de contourner ce dernier point.

Concernant le **modèle de prédiction** de la température de fond, plusieurs pistes restent à explorer pour continuer de l'améliorer. Si la MLD est influencée par **l'ensoleillement** et le **stress éolien en surface**, récupérer des séries de données de ces deux variables pourrait permettre de gagner en performance. Il serait également intéressant de calculer **d'autres variables dérivées** pouvant influencer la température de fond, comme la **température de surface intégrée sur les X derniers jours**.



Contact

7, place Cassan – Carnon Plage
31 130 Mauguio - France
Tél. : 04.67.66.32.48 - contact@andromede-ocean.com

www.andromede-ocean.com