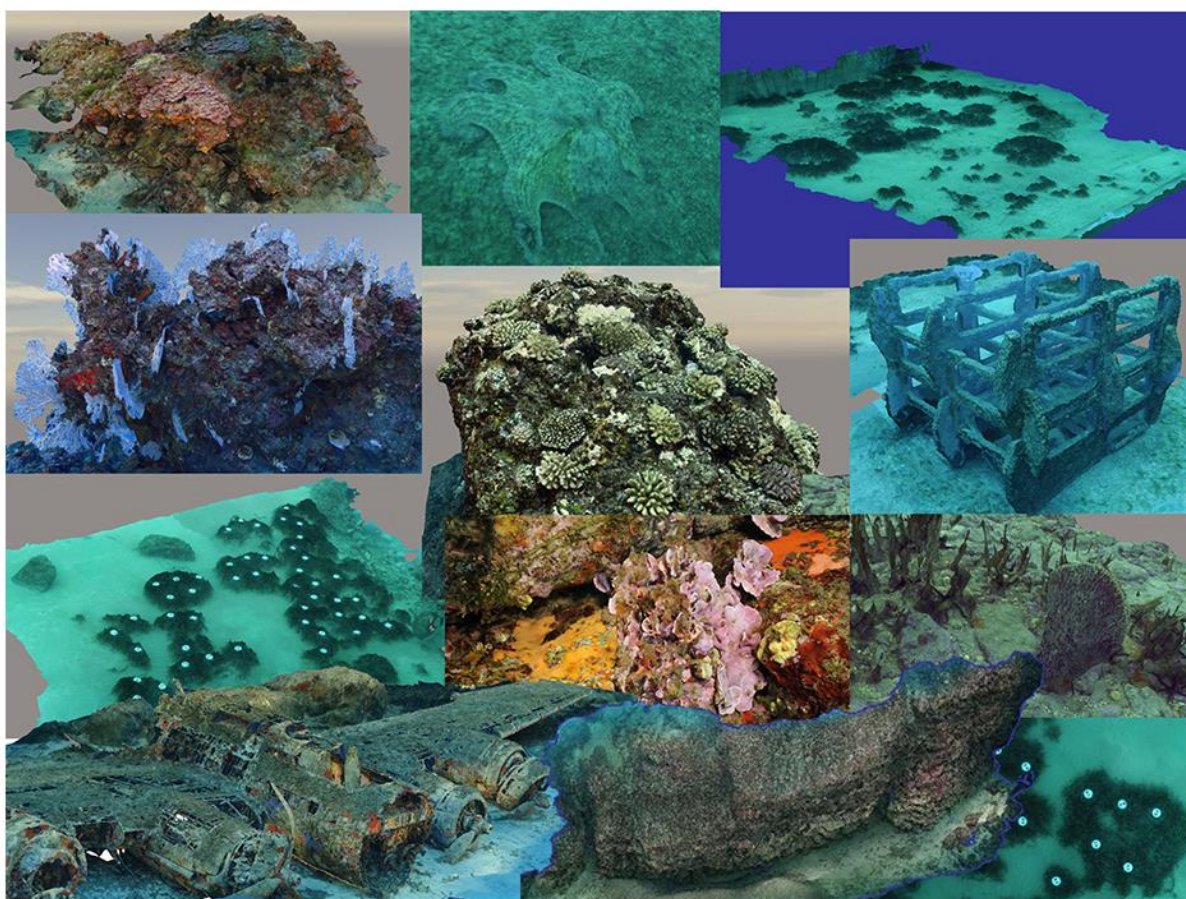


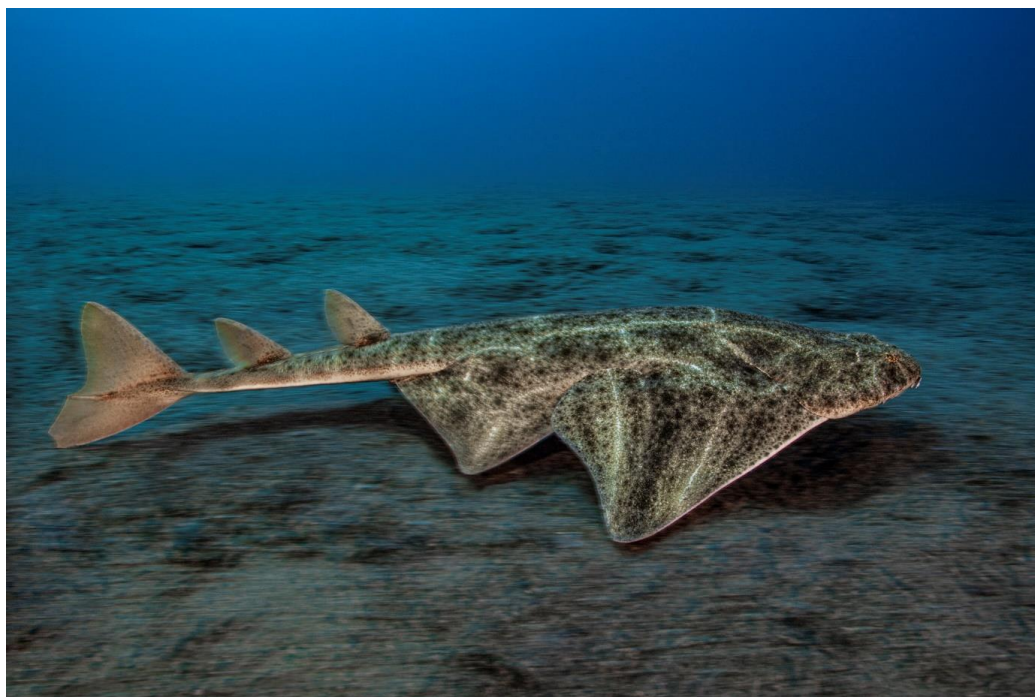
## Surveillance Biologique 2020

Acquisitions photogrammétriques sur les stations TEMPO et RECOR, suivi des populations de poissons et modélisation des données de température



  
**ANDROMÈDE**  
OCÉANOLOGIE

7, place Cassan - Carnon Plage  
34 130 Mauguio - France  
Tél. : 04.67.66.32.48  
contact@andromede-ocean.com



ANGE DE MER (SQUATINA SQUATINA), BASTIA, -40 M (© LAURENT BALLESTA) DETECTE PAR ADNE (PISCIS).

**Coordination Andromède :**

HOLON Florian, [florian.holon@andromede-ocean.com](mailto:florian.holon@andromede-ocean.com)



**Coordination Agence de l'Eau RMC :**

BOISSERY Pierre, [Pierre.BOISSERY@eurmc.fr](mailto:Pierre.BOISSERY@eurmc.fr)



**Participants aux missions de terrain :**

AGEL Noémie, BLANDIN Agathe, BOCKEL Thomas, DELARUELLE Gwenaëlle, DETER Julie, HOLON Florian, GUILBERT Antonin, GENTIL Yanick, MAURON Stephen, MARRE Guilhem, PAVY Thomas.

**Traitement des données et rédaction :**

MARRE Guilhem, BOCKEL Thomas, DELARUELLE Gwenaëlle, FERY Célia, MARRE Guilhem.

**Ce document doit être cité sous la forme suivante :**

*ANDROMEDE Océanologie, 2021. Surveillance biologique 2020 : Acquisitions photogrammétriques sur les sites TEMPO et RECOR, suivi des populations de poissons, modélisation des données de température. Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau. 170 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, de nombreux réseaux de surveillance axés sur des thématiques variées tels que TEMPO (Herbier de posidonie), RECOR (Récifs coralligènes), CALME (bruit acoustique), CALOR (Température de fond), PISCIS (Poissons).

Ces réseaux permettent de suivre un grand nombre de mesures à différentes échelles (individus, populations, communautés, paysages) et mettent en commun leur logistique de terrain. Cette mutualisation des moyens permet de limiter les coûts et d'effectuer des suivis sur les mêmes sites afin de faciliter la mise en lien des données entre elles.

**Ce document présente les résultats de la surveillance photogrammétrique (réseaux MODEL, TEMPO et RECOR), de la modélisation de la température de fond (réseau CALOR) et des acquisitions sur les poissons par ADNE (réseau PISCIS) pour l'année 2020 en région Corse.** Tous les résultats de ces réseaux de surveillance sont consultables sur la plateforme en ligne MEDTRIX (<http://plateforme.medtrix.fr>) dans les projets dédiés.



# Sommaire

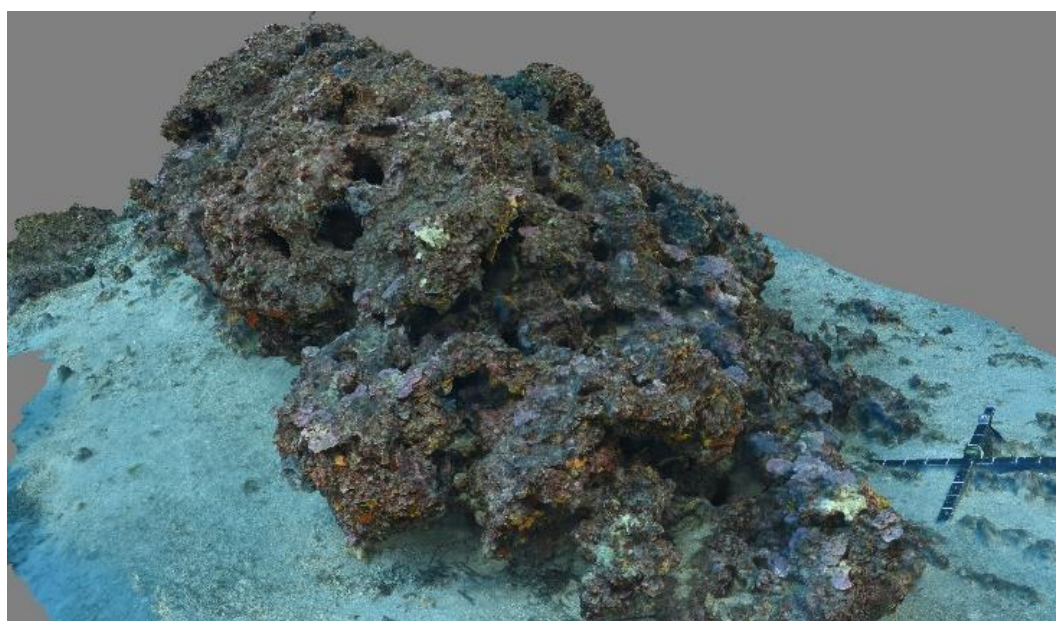
CHAPITRE 1 : MODELISATION DES SITES TEMPO ET RECOR – SURVEILLANCE 2020 EN CORSE.....	2
<b>I. OBJECTIFS.....</b>	<b>2</b>
<b>II. SITES DE SURVEILLANCE DE L'HERBIER DE POSIDONIE – RESEAU TEMPO.....</b>	<b>8</b>
II.A. Agriates.....	9
II.B. Anse Cola.....	10
II.C. Baie Tamarone Large.....	11
II.D. Capo Rosso.....	12
II.E. Côte Orientale.....	13
II.F. Fautea.....	14
II.G. Focolara.....	15
II.H. Giraglia.....	16
II.I. Girolata.....	17
II.J. Golfe Santa Manza.....	18
II.K. Isolella.....	19
II.L. Lupino.....	20
II.M. Mortoli.....	21
II.N. Plage Trottel.....	22
II.O. Punta Di Canella.....	23
II.P. Punta Mortella.....	24
II.Q. Punta Vaccaja.....	25
II.R. Rondinara.....	26
II.S. Sanguinaires.....	27
II.T. Stareso.....	28
<b>III. SITES DE SURVEILLANCE DES RECIFS CORALLIGENES – RESEAU RECOR.....</b>	<b>29</b>
III.A. Atoll 1 (PNMCCA).....	30
III.B. Agriates.....	31
III.C. Agriates Est (PNMCCA).....	32
III.D. Agriates Sud (PNMCCA).....	33
III.E. Bastia.....	34
III.F. Canari (PNMCCA).....	35
III.G. Cappu Rosso.....	36
III.H. Cargese.....	37
III.I. Centuri.....	38
III.J. Corailleurs.....	39
III.K. Lavezzi.....	40
III.L. Macinaggio.....	41
III.M. Mortoli.....	42
III.N. Morsiglia (PNMCCA).....	43
III.O. Parata.....	44
III.P. Revelatta.....	45
III.Q. Sanguinaires.....	46
III.R. Scandola-4.....	47
III.S. Senetosa.....	48
III.T. Saint Florent.....	49
III.U. Tarco.....	50
III.V. Vacca.....	51
CHAPITRE 2 : RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE D'ESPECES DU CORALLIGENE.....	53
<b>I. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....</b>	<b>53</b>
<b>II. DONNEES UTILISEES.....</b>	<b>53</b>
<b>III. METHODOLOGIE.....</b>	<b>58</b>

<b>IV.</b>	<b>RESULTATS DE L'ALGORITHME DE RECONNAISSANCE D'IMAGES BASE SUR DES RESEAUX DE NEURONES CONVOLUTIFS.....</b>	<b>61</b>
<b>V.</b>	<b>ADAPTATION DE L'ALGORITHME AUX IMAGES DE LA PHOTOGRAMMETRIE .....</b>	<b>65</b>
	<i>V.A. Problématique et objectifs .....</i>	<i>65</i>
	<i>V.B. Méthodologie .....</i>	<i>66</i>
	<i>V.C. Résultats.....</i>	<i>67</i>
	<i>V.D. Perspectives.....</i>	<i>67</i>
 <b>CHAPITRE 3 : CARACTERISATION ET SUIVI DES RECIFS CORALLIGENES PAR PHOTOGRAMMETRIE .....</b>		<b>70</b>
<b>I.</b>	<b>CARACTERISATION STRUCTURELLE DES RECIFS .....</b>	<b>70</b>
	<i>I.A. Contexte et objectifs.....</i>	<i>70</i>
	<i>I.B. Données.....</i>	<i>70</i>
	<i>I.C. Méthodologie .....</i>	<i>73</i>
	<i>I.D. Résultats.....</i>	<i>74</i>
	<i>I.E. Discussion .....</i>	<i>77</i>
<b>II.</b>	<b>SUIVIS TEMPORELS DE RECIFS CORALLIGENES .....</b>	<b>79</b>
	<i>II.A. Objectifs .....</i>	<i>79</i>
	<i>II.B. Méthodologie .....</i>	<i>79</i>
	<i>II.C. Résultats.....</i>	<i>81</i>
 <b>CHAPITRE 4 : MODELISATION DE LA TEMPERATURE DE FOND .....</b>		<b>84</b>
<b>I.</b>	<b>CONTEXTE.....</b>	<b>84</b>
<b>II.</b>	<b>HISTORIQUE .....</b>	<b>84</b>
<b>III.</b>	<b>MATERIEL UTILISE .....</b>	<b>86</b>
<b>IV.</b>	<b>FICHES DESCRIPTIVES DES CAPTEURS RELEVES EN 2020 EN REGION CORSE.....</b>	<b>87</b>
	<i>IV.A. Site: Agriates - TEMPO .....</i>	<i>87</i>
	<i>IV.B. Site: Agriates PI - TEMPO .....</i>	<i>88</i>
	<i>IV.C. Site: Aleria PI - TEMPO .....</i>	<i>89</i>
	<i>IV.D. Site: Anse Cola - TEMPO .....</i>	<i>90</i>
	<i>IV.E. Site: Baie Tamarone Large PI - TEMPO.....</i>	<i>91</i>
	<i>IV.F. Site: Balise Rabiou - RECOR .....</i>	<i>92</i>
	<i>IV.G. Site: Bastia - RECOR.....</i>	<i>93</i>
	<i>IV.H. Site: Bonnieu Nord - TEMPO.....</i>	<i>94</i>
	<i>IV.I. Site: Bonnieu Nord - TEMPO.....</i>	<i>95</i>
	<i>IV.J. Site: Bruzzi PI - TEMPO .....</i>	<i>96</i>
	<i>IV.K. Site: Canari - RECOR .....</i>	<i>97</i>
	<i>IV.L. Site: Capo Rosso PI - TEMPO .....</i>	<i>98</i>
	<i>IV.M. Site: Corailleurs - RECOR.....</i>	<i>99</i>
	<i>IV.N. Site: Cote Orientale - TEMPO.....</i>	<i>100</i>
	<i>IV.O. Site: Fautea - TEMPO.....</i>	<i>101</i>
	<i>IV.P. Site: Fautea PI - TEMPO.....</i>	<i>102</i>
	<i>IV.Q. Site: Focolara - TEMPO .....</i>	<i>103</i>
	<i>IV.R. Site: Focolara PI - TEMPO.....</i>	<i>104</i>
	<i>IV.S. Site: Giraglia - TEMPO .....</i>	<i>105</i>
	<i>IV.T. Site: Golfe Santa Manza - TEMPO .....</i>	<i>106</i>
	<i>IV.U. Site: Lavezzi - RECOR .....</i>	<i>107</i>
	<i>IV.V. Site: Lupino - TEMPO .....</i>	<i>108</i>
	<i>IV.W. Site: Lupino PI - TEMPO.....</i>	<i>109</i>
	<i>IV.X. Site: Mortoli - RECOR.....</i>	<i>110</i>
	<i>IV.Y. Site: Murtoli - TEMPO.....</i>	<i>111</i>
	<i>IV.Z. Site: Murtoli PI - TEMPO.....</i>	<i>112</i>
	<i>IV.AA. Site: Parata - RECOR.....</i>	<i>113</i>
	<i>IV.BB. Site: Parata - RECOR.....</i>	<i>114</i>
	<i>IV.CC. Site: Plage Trottel - TEMPO.....</i>	<i>115</i>
	<i>IV.DD. Site: Plage Trottel PI - TEMPO.....</i>	<i>116</i>
	<i>IV.EE. Site: Porto sud - RECOR .....</i>	<i>117</i>

IV.FF.	Site: Punta Mortella - TEMPO .....	118
IV.GG.	Site: Punta Vaccaja - TEMPO .....	119
IV.HH.	Site: Punta Vaccaja PI - TEMPO .....	120
IV.II.	Site: Revelatta - RECOR .....	121
IV.JJ.	Site: Rondinara - TEMPO .....	122
IV.KK.	Site: Rondinara PI - TEMPO.....	123
IV.LL.	Site: Sanguinaires - TEMPO .....	124
IV.MM.	Site: Sanguinaires - RECOR.....	125
IV.NN.	Site: Sanguinaires - RECOR.....	126
IV.OO.	Site: Scandola-4 - RECOR.....	127
IV.PP.	Site: Scandola-4 - RECOR.....	128
IV.QQ.	Site: Senetosa - RECOR.....	129
IV.RR.	Site: St Florent - RECOR.....	130
IV.SS.	Site: Tarco - RECOR .....	131
<b>V.</b>	<b>EXPLOITATION DES DONNEES DE TEMPERATURE POUR LA SURVEILLANCE .....</b>	<b>132</b>
V.A.	Liens entre température et phénomènes biologiques observés .....	132
V.B.	Cartographie de la température de fond .....	134
 CHAPITRE 5 : SUIVI DES POPULATIONS DE POISSONS ET EVOLUTIONS METHODOLOGIQUES.....		136
<b>I.</b>	<b>CONTEXTE ET OBJECTIFS .....</b>	<b>136</b>
<b>II.</b>	<b>METHODOLOGIE.....</b>	<b>137</b>
II.A.	Protocole d'échantillonnage.....	137
II.B.	Matériel de prélèvement et d'analyse.....	138
II.C.	Analyse des données .....	140
<b>III.</b>	<b>RESULTATS.....</b>	<b>142</b>
III.A.	Description des assemblages ichtyologiques.....	142
III.B.	Comparaison ADN environnemental et Caméra .....	152
<b>IV.</b>	<b>SYNTHESE .....</b>	<b>154</b>
 BIBLIOGRAPHIE .....		155
 ANNEXE : LISTE DES ESPECES OBSERVEES PAR ADNE .....		158

# Chapitre 1

## Modélisation des sites TEMPO et RECOR 2020



Ce chapitre présente les modèles réalisés en 2020 par photogrammétrie sur les sites **RECOR** (suivi des récifs coralligènes – **22 sites**) et **TEMPO** (suivi des herbiers de posidonie – **20 sites**). Ces 42 acquisitions photogrammétriques ont contribué à la **standardisation du protocole d’acquisition pour la modélisation 3D** des habitats herbier de posidonie et récifs coralligènes, à **cartographier la limite inférieure des herbiers de posidonie**, à **entraîner un algorithme de reconnaissance automatique des espèces** du coralligène, à **développer une méthode de suivi dans le temps** des récifs coralligènes, et à **caractériser leur distribution** dans l’espace.

# Chapitre 1 : Modélisation des sites TEMPO et RECOR – Surveillance 2020 en Corse

## I. Objectifs

L'objectif de ce chapitre est de poursuivre en **2020** l'étude menée sur les deux années précédentes en régions Occitanie / PACA Ouest (2018) et en région PACA Est (2019) sur les sites de surveillance biologique de la **région Corse** dans le cadre des marchés de surveillance biologique lots 1 et 2 (*Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau*).

Les pages suivantes présentent des vues du modèle 3D de chaque site modélisé en 2020 dans le cadre 1) du réseau de surveillance des herbiers de posidonie TEMPO et 2) du réseau de suivi des assemblages coralligènes RECOR. Le nombre de photographies réalisées pour chaque modèle est indiqué, ainsi qu'une vue d'ensemble du site et deux zooms sur une portion du modèle.

Tous les modèles sont disponibles sur la plateforme [MEDTRIX](#) dans les projets RECOR, TEMPO et aussi MODEL.

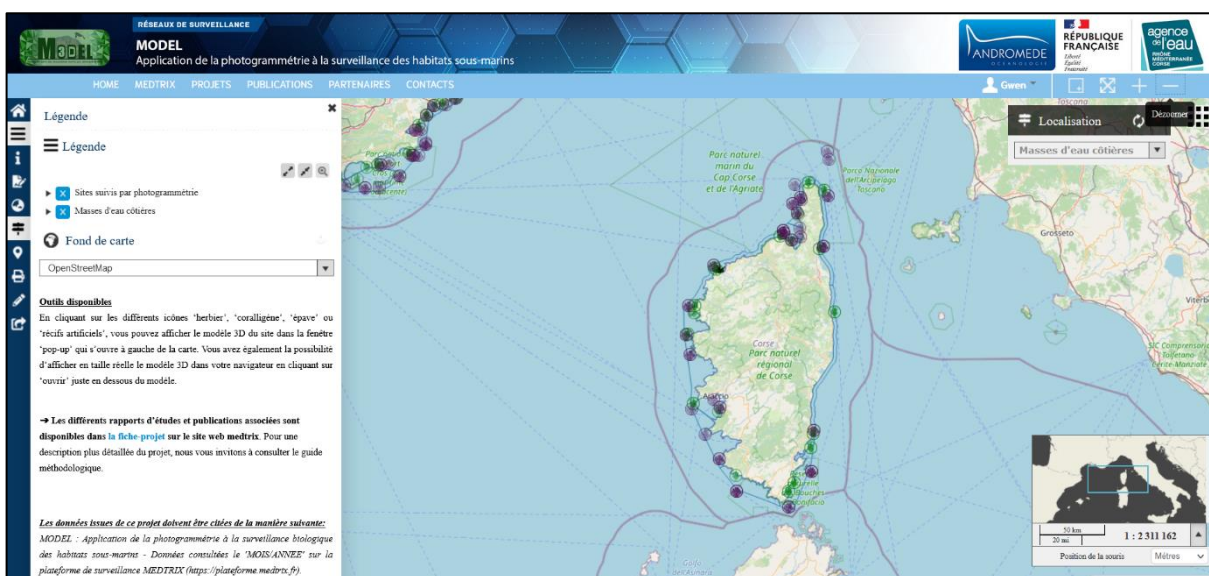


FIGURE 1 : TOUS LES MODELES PHOTOGRAMMETRIQUES REALISES EN 2020 EN REGION CORSE SONT INTEGRES SUR MEDTRIX DANS LE PROJET MODEL.

Les **42 acquisitions photogrammétriques** effectuées en 2020 en région Corse et présentées dans ce rapport contribuent à la **surveillance biologique** des herbiers de posidonie et des récifs coralligènes et ont permis de :

1/ **Standardiser le protocole d'acquisition pour la modélisation 3D** des herbiers de posidonie et des récifs coralligènes, **mesurer la résolution et la précision des modèles produits** (voir [publication](#) Marre et al., 2019 : « Monitoring marine habitats with photogrammetry : a cost-effective, accurate, precise and high-resolution reconstruction method », Frontiers in Marine Science) ;

2/ **Cartographier la limite inférieure des herbiers de posidonie** par photogrammétrie (voir [publication](#) Marre et al., 2020 : « Fine-scale automatic mapping of living Posidonia oceanica seagrass beds with underwater photogrammetry », Marine Ecology Progress Series).

A partir des modèles 3D réalisés en 2020 sur les sites TEMPO, la limite inférieure des herbiers de posidonie a été cartographiée et sa dynamique évolutive a été évaluée en comparant la cartographie de 2020 à celle effectuée en 2017 par photogrammétrie. Le [rapport](#) TEMPO 2020 présentant ces modèles photogrammétriques est accessible sur MEDTRIX. Ces acquisitions 3D complètent celles effectuées sur les sites TEMPO depuis 2016, et contribuent à quantifier les apports de la photogrammétrie et à évaluer son efficacité pour suivre la limite inférieure des herbiers. Grâce à ces cinq années d'acquisitions photogrammétriques sur les sites TEMPO (années 2016 à 2020), nous avons montré que 1) cette méthode permet, comme la télémétrie acoustique, de cartographier l'herbier à un instant t et également de comparer son évolution dans l'espace et dans le temps et 2) cette méthode est adaptée à quasiment toutes les typologies de limites inférieures, à toutes les natures de substrat et tailles de zone d'étude (Andromède Océanologie, 2020). Ces données ont orienté le choix de privilégier la méthode de photogrammétrie par rapport à la télémétrie acoustique pour la cartographie des limites inférieures d'herbiers dans le cadre du réseau de surveillance TEMPO à partir de 2021.

3/ **Développer une méthode de suivi dans le temps** des récifs coralligènes : produire des orthomosaïques locales identiques entre plusieurs modèles d'un même récif afin de réaliser un suivi surfacique dans le temps.

Grâce à des développements récents, nous sommes aujourd'hui en mesure de définir des « **quadrats permanents artificiels** » (sans balisage particulier) que l'on suit dans le temps par photogrammétrie. Cette méthode permet de reproduire exactement le **même point de vue sur le récif**, et exporter l'image **reconstruite à partir du modèle 3D**. L'image est ensuite « cartographiée », afin de rendre compte précisément de l'évolution surfacique de la colonisation du récif. Cette méthode de suivi temporel est notamment utilisée pour mesurer l'évolution des principales macronécroses sur les sites RECOR les plus touchés, en particulier en Corse. A partir des modèles 3D réalisés en 2020 sur les sites RECOR, les récifs coralligènes ont été illustrés et les images ont été comparées à celles effectuée en 2017 par photogrammétrie, notamment celles des macronécroses. Le [rapport](#) RECOR 2020 est accessible sur MEDTRIX

#### 4/ **Suivre et quantifier des pressions anthropiques dans le temps.**

La photogrammétrie permet également de visualiser des pressions anthropiques comme les engins de pêche perdus, les gorgones arrachées, les macrodéchets et de suivre leur évolution dans le temps.

#### 5/ **Développer des indicateurs de surveillance de l'état écologique de l'herbier**

Grâce aux données microsurfaciques issues de la photogrammétrie de l'herbier (et de données ponctuelles = mesures de vitalité) nous avons calculé pour chaque site TEMPO un **indicateur de dynamique évolutive de l'herbier en limite inférieure** qui prend en compte l'évolution de la densité de faisceaux (en %) et la dynamique microsurfacique de l'herbier (% de régression et/ou de progression) entre chaque suivi sur un même site. Cet indicateur a été développé en 2020 pour l'[atlas cartographique](#).

Les figures suivantes illustrent l'intérêt de la photogrammétrie pour cartographier et suivre un site d'herbier en limite inférieure.

2017 :

2020 :

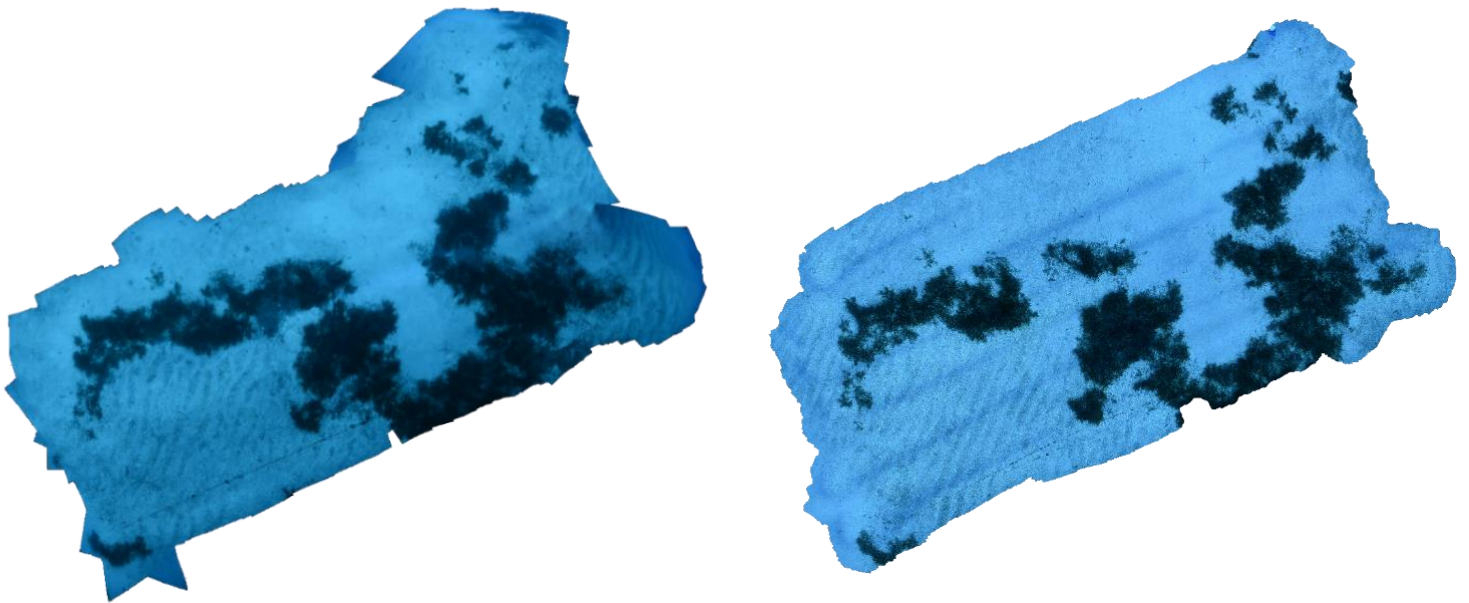


FIGURE 2 : VUE GLOBALE DU SITE « GIRAGLIA » RECONSTITUE EN 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE EN 2017 ET EN 2020.

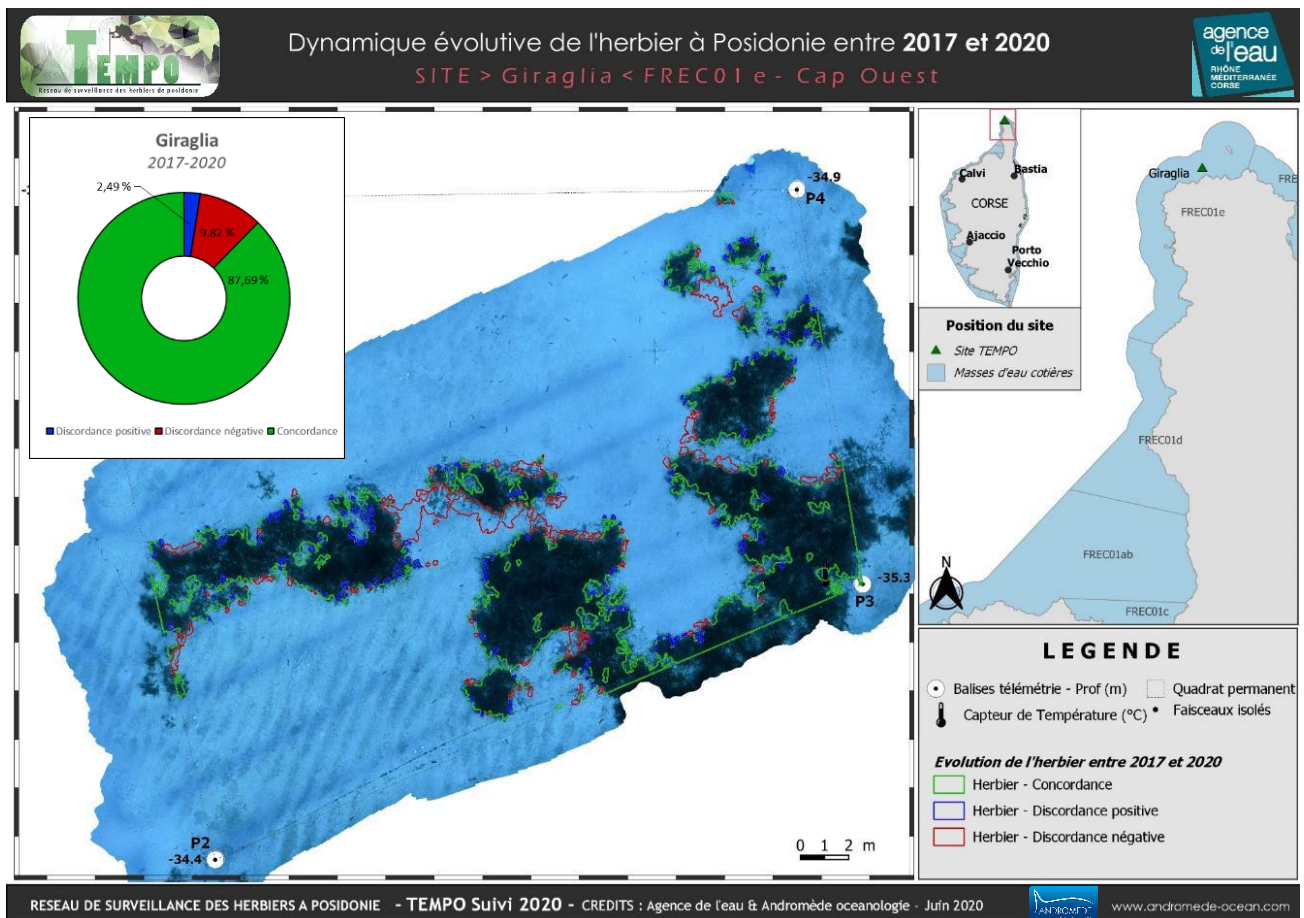


FIGURE 3 : DYNAMIQUE EVOLUTIVE DE L'HERBIER DU SITE « GIRAGLIA » ENTRE 2017 ET 2020.

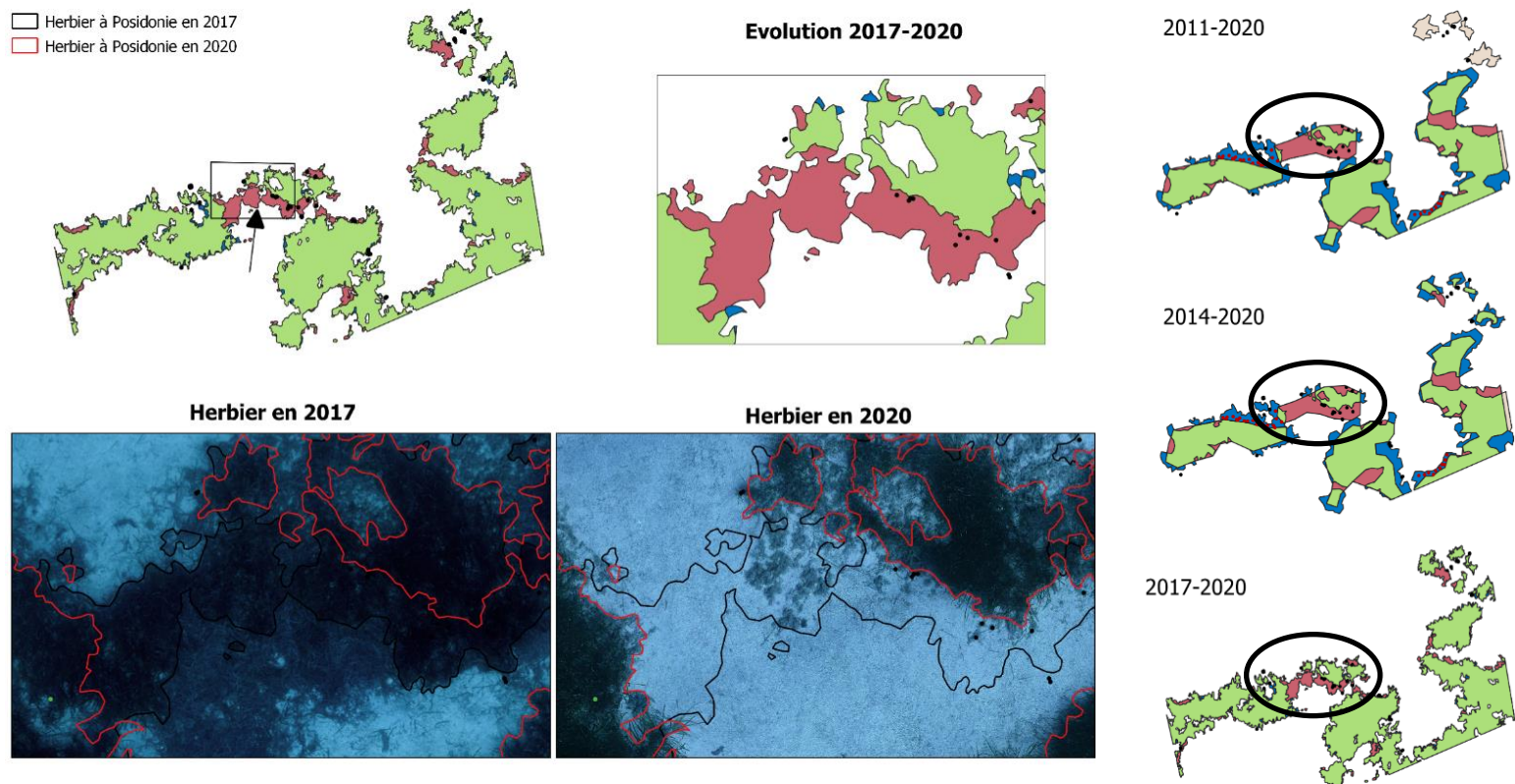


FIGURE 4 : SITE « GIRAGLIA ». ZOOM SUR UNE TACHE DE L'HERBIER ET COMPARAISON ENTRE LES CARTOGRAPHIES DE 2017 ET 2020 (A GAUCHE) ; ET (B) : DYNAMIQUE DE L'HERBIER ENTRE 2011 ET 2020, 2014 ET 2020 & 2017 ET 2020 (A DROITE).

Les figures suivantes illustrent l'intérêt de la photogrammétrie pour suivre et quantifier des pressions sur les récifs coralligènes (nécroses de gorgones, macronécroses des algues rouges bio constructrices, engins de pêche).



FIGURE 5 : ENGIN DE PECHE (ENTOURES EN ROUGE) SUR LE SITE RECOR ST FLORENT MODELISE EN 2020.



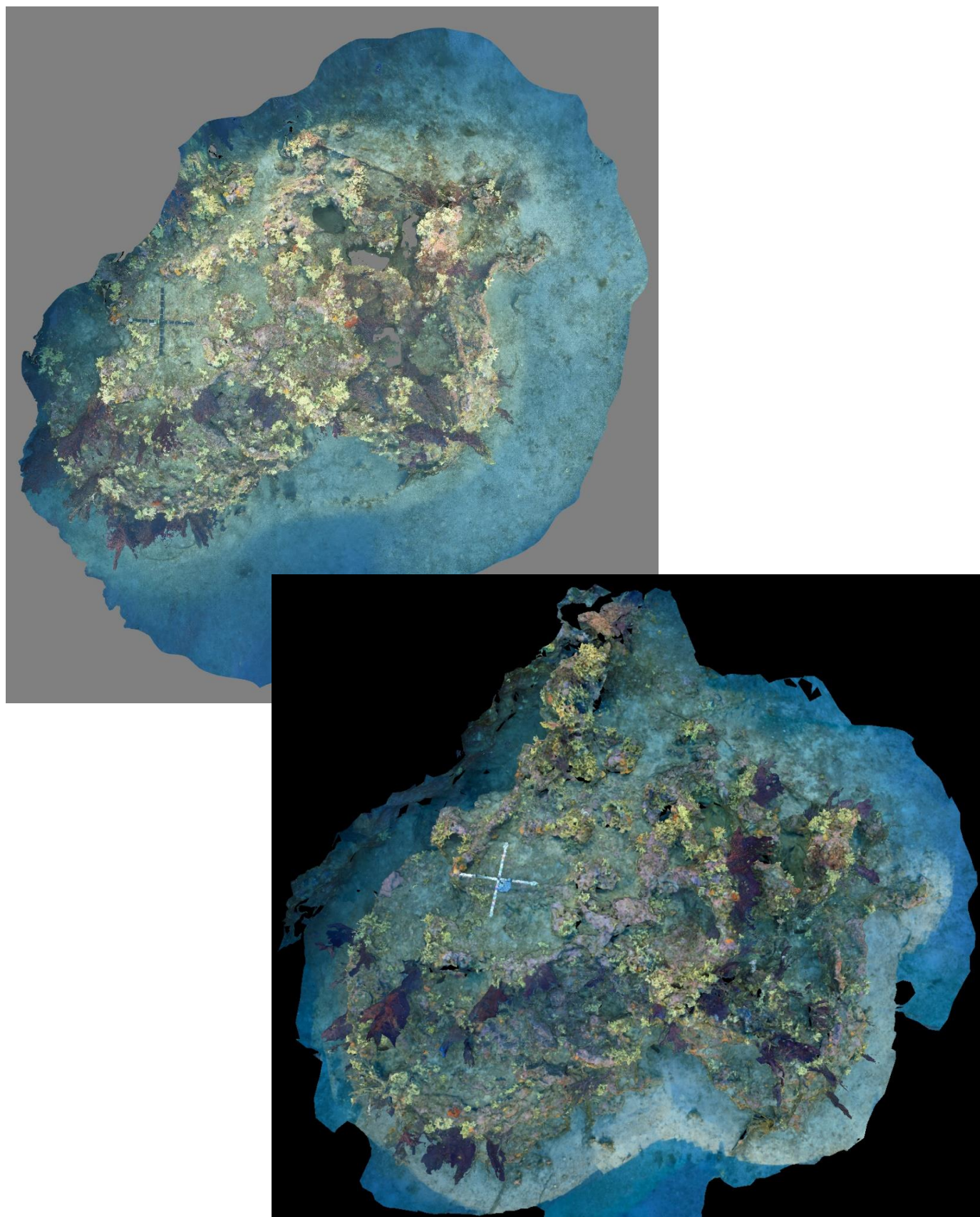


FIGURE 6 : VUE GLOBALE DU SITE ST FLORENT RECONSTITUE EN 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE EN 2017 (EN HAUT), EN 2020 (EN BAS).

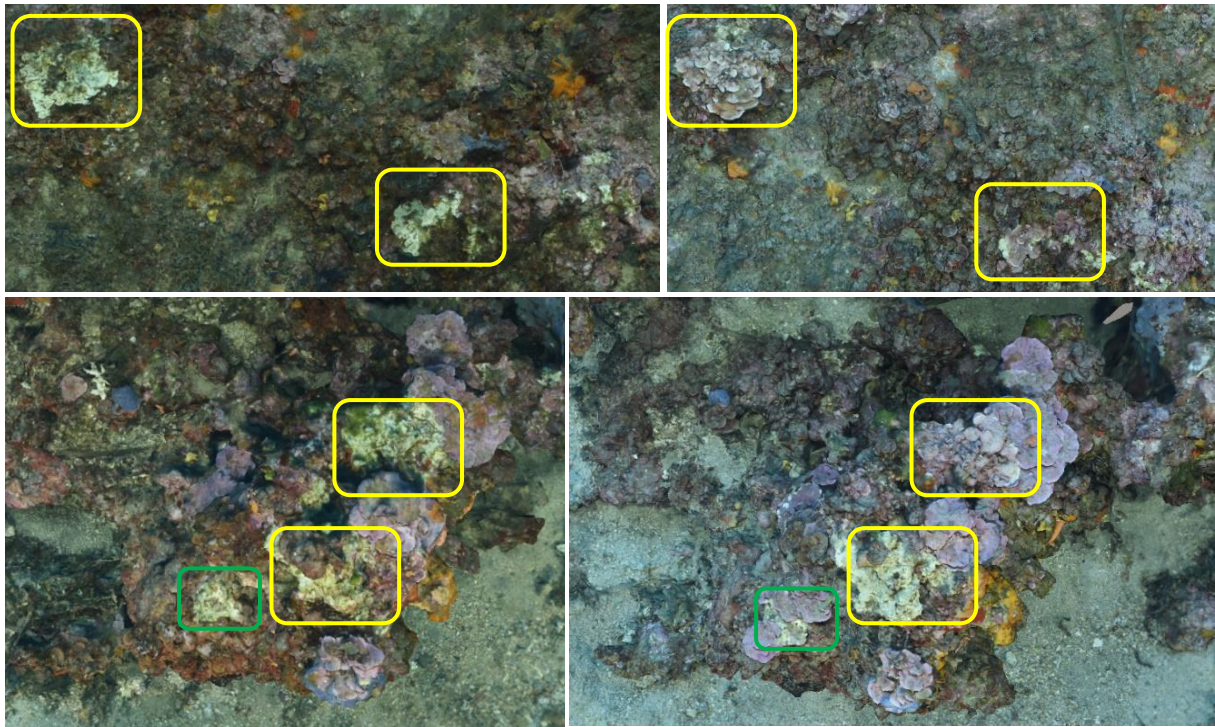


FIGURE 7 : LES MACRO-NECROSES DES MESOPHYLLUM SP. ET LITHOPHYLLUM SP. SUR LE SITE VACCA : ENTRE 2020 (A GAUCHE) PAR RAPPORT A 2017 (A DROITE) (RECTANGLES JAUNES) MAIS AUSSI UNE COLONISATION PAR LES PEYSSONNELIA SP. DE CES ANCIENS ENCREBELLEMENTS (RECTANGLES VERTS).

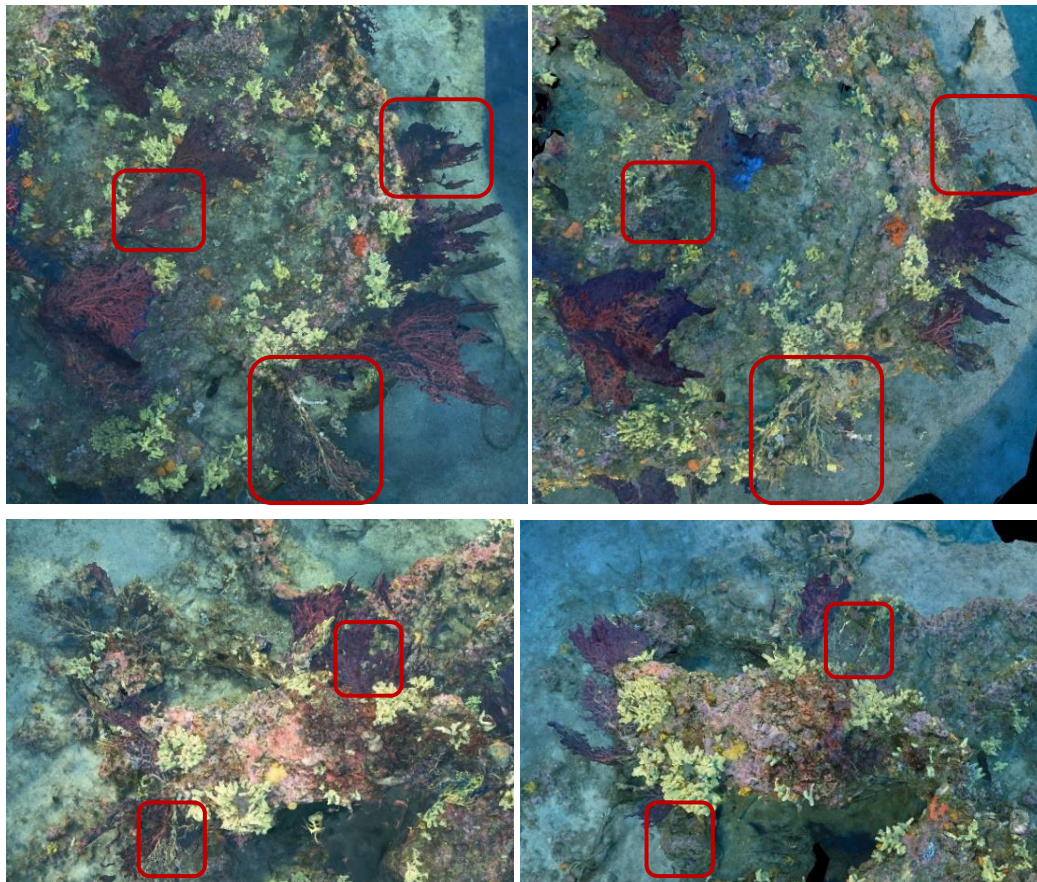


FIGURE 8 : COMPARAISON ENTRE LES MODELES DE 2017 (A GAUCHE) ET 2020 (A DROITE) MONTRANT LES GORGONES ROUGES NECROSEES (RECTANGLES ROUGES) – SITE RECOR ST FLORENT.



## II. Sites de surveillance de l'herbier de posidonie – réseau TEMPO

Le tableau ci-dessous synthétise, pour chaque site **TEMPO** modélisé en 2020 (**20 sites**), l'adresse URL du modèle :

TABLEAU 1 : ADRESSES URL DES MODELES 3D DES SITES TEMPO 2020.

Nom du site	URL
Agriates	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Agriates/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Agriates/App</a>
Anse Cola	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Anse_Cola/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Anse_Cola/App</a>
Baie Tamarone Large	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Baie_Tamarone_Large/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Baie_Tamarone_Large/App</a>
Capo Rosso	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Capo_Rosso/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Capo_Rosso/App</a>
Côte Orientale	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Cote_Orientale/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Cote_Orientale/App</a>
Fautea	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Fautea/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Fautea/App</a>
Focolara	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Focolara/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Focolara/App</a>
Giraglia	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Giraglia/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Giraglia/App</a>
Girolata	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Girolata/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Girolata/App</a>
Golfe Santa Manza	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Golfe_Santa_Manza/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Golfe_Santa_Manza/App</a>
Isolella	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Grau_Agde_Est/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Grau_Agde_Est/App</a>
Lupino	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Lupino/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Lupino/App</a>
Mortoli	<i>Indisponible au format web</i>
Plage Trottel	<i>Indisponible au format web</i>
Punta Di Canella	<i>Indisponible au format web</i>
Punta Mortella	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Punta_Mortella/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Punta_Mortella/App</a>
Punta Vaccaja	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Punta_Vaccaja/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Punta_Vaccaja/App</a>
Rondinara	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Rondinara/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Rondinara/App</a>
Sanguinaires	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Sanguinaires/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Sanguinaires/App</a>
Stareso	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Stareso/App">https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Stareso/App</a>

## II.A. Agriates

Le modèle 3D du site TEMPO « Agriates » a été construit à partir de 1058 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

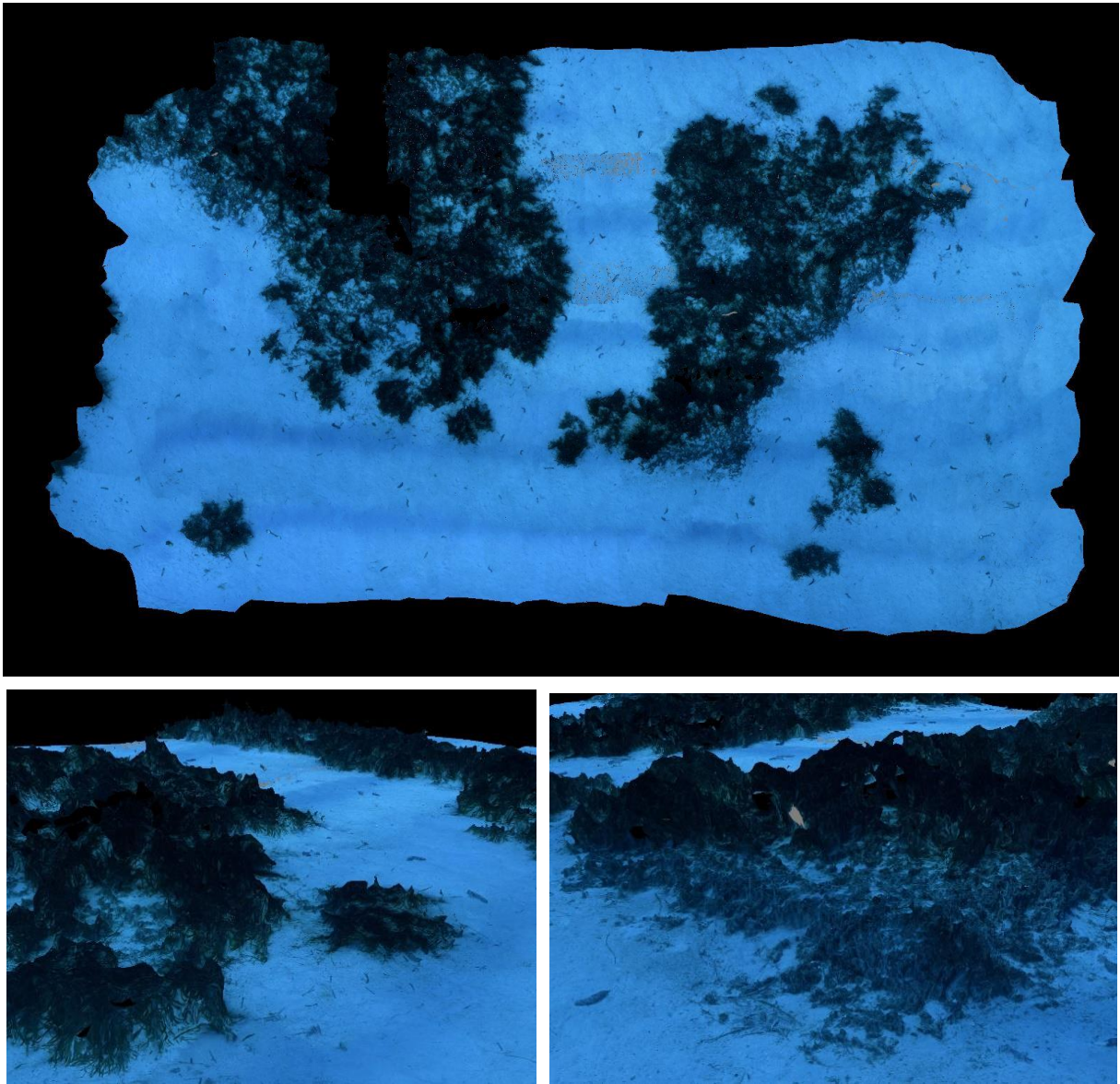


FIGURE 9: MODELE DU SITE TEMPO « AGRIATES »



## II.B. Anse Cola

Le modèle 3D du site TEMPO « Anse Cola » a été construit à partir de 1138 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

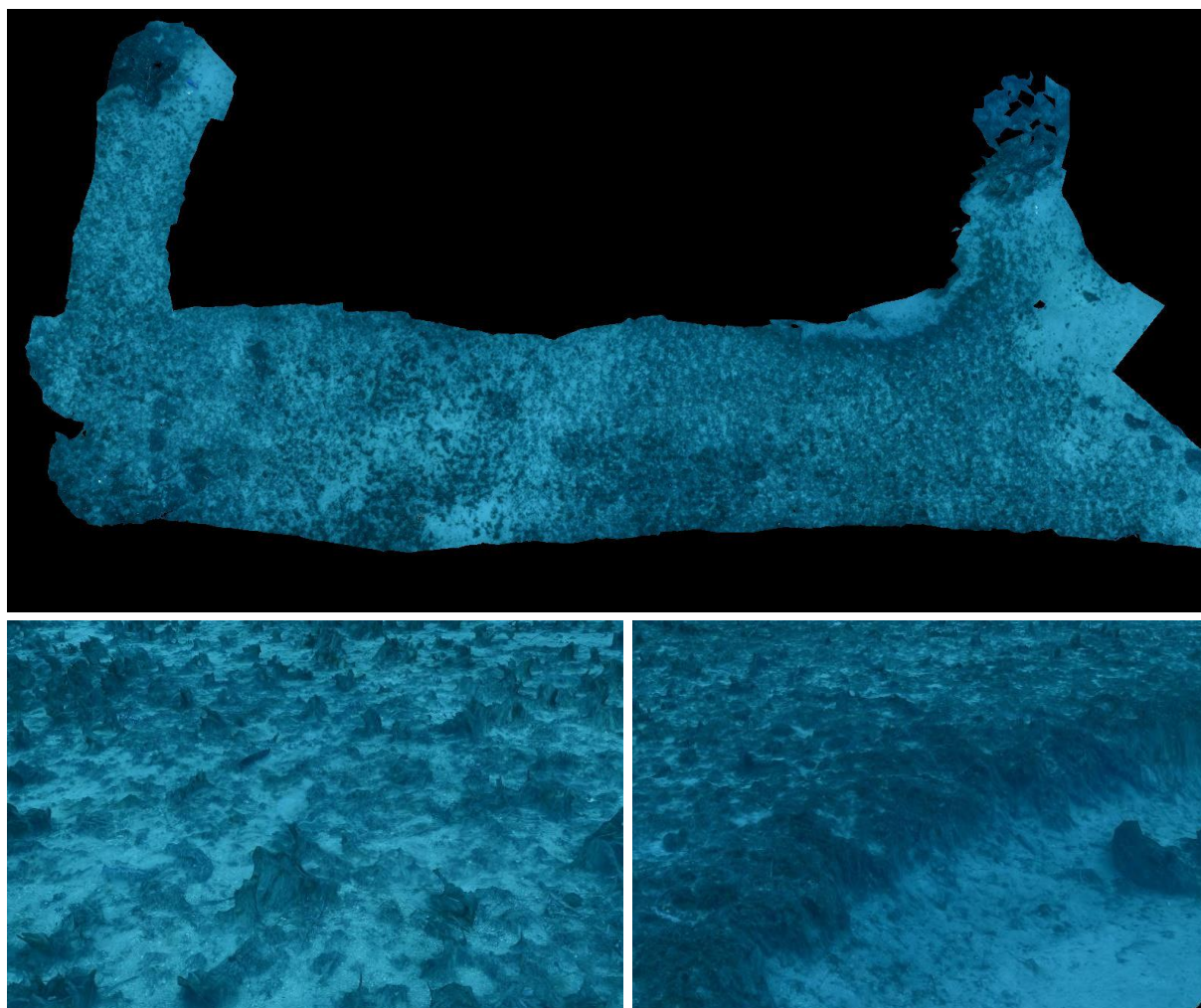


FIGURE 10 : MODELE DU SITE TEMPO « ANSE COLA »

## II.C. Baie Tamarone Large

Le modèle 3D du site TEMPO « Baie Tamarone Large » a été construit à partir de 987 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

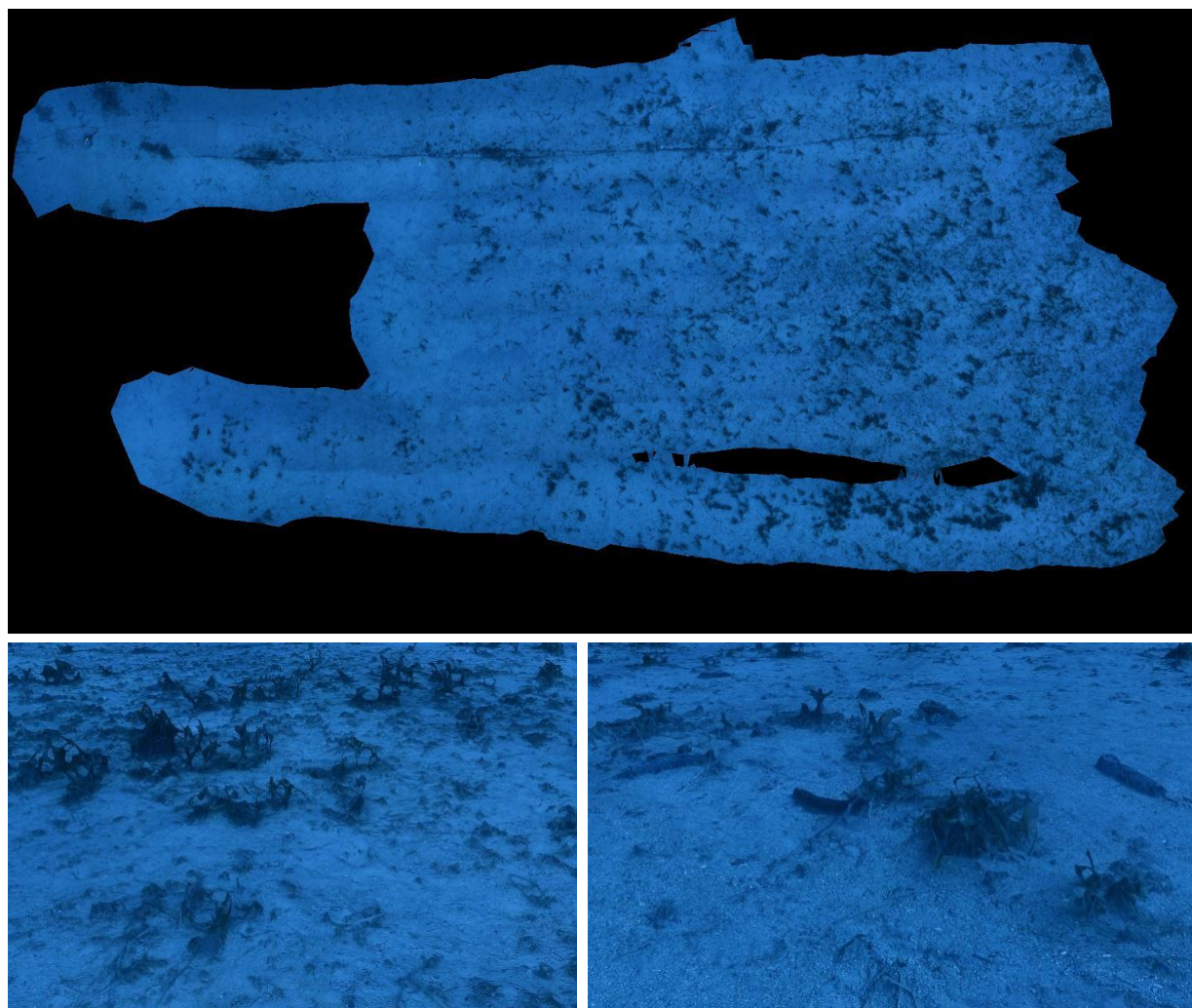


FIGURE 11 : MODELE DU SITE TEMPO « BAIE TAMARONE LARGE »



## II.D. Capo Rosso

Le modèle 3D du site TEMPO « Capo Rosso » a été construit à partir de 1086 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

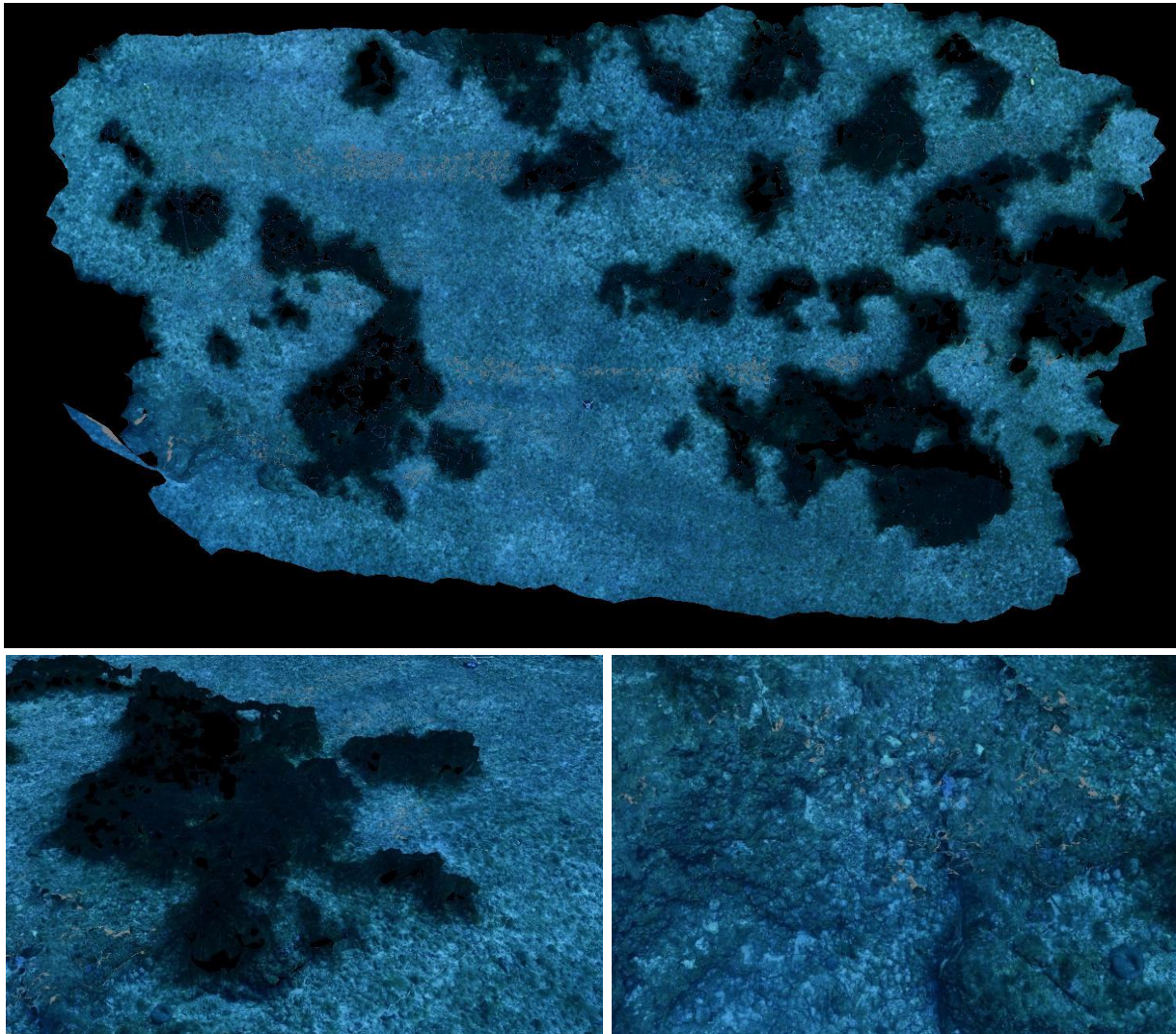


FIGURE 12 : MODELE DU SITE TEMPO « CAPO ROSSO »

## II.E. Côte Orientale

Le modèle 3D du site TEMPO « Côte Orientale » a été construit à partir de 905 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

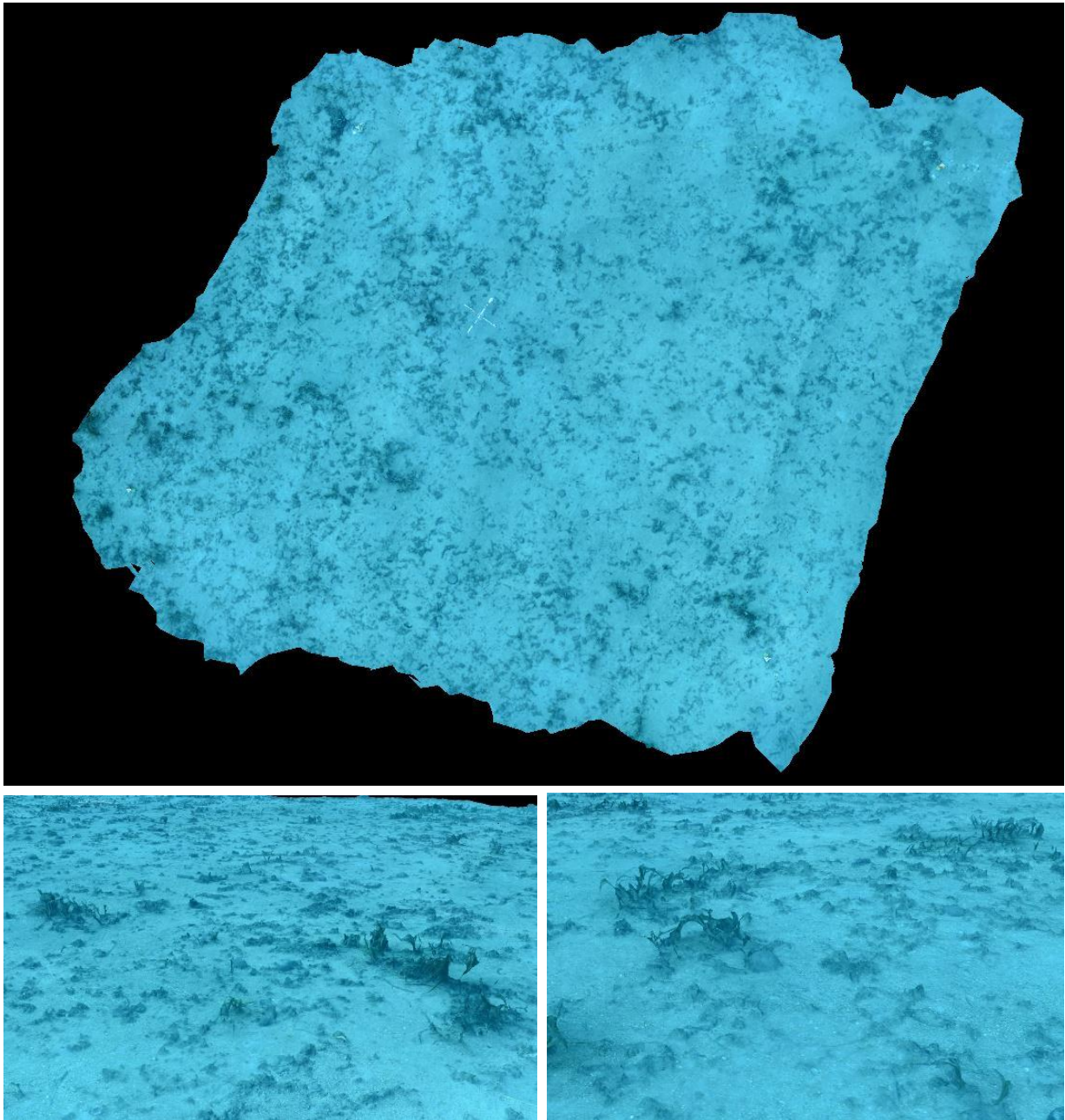


FIGURE 13 : MODELE DU SITE TEMPO « COTE ORIENTALE »



## II.F. Fautea

Le modèle 3D du site TEMPO « Fautea » a été construit à partir de 1156 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

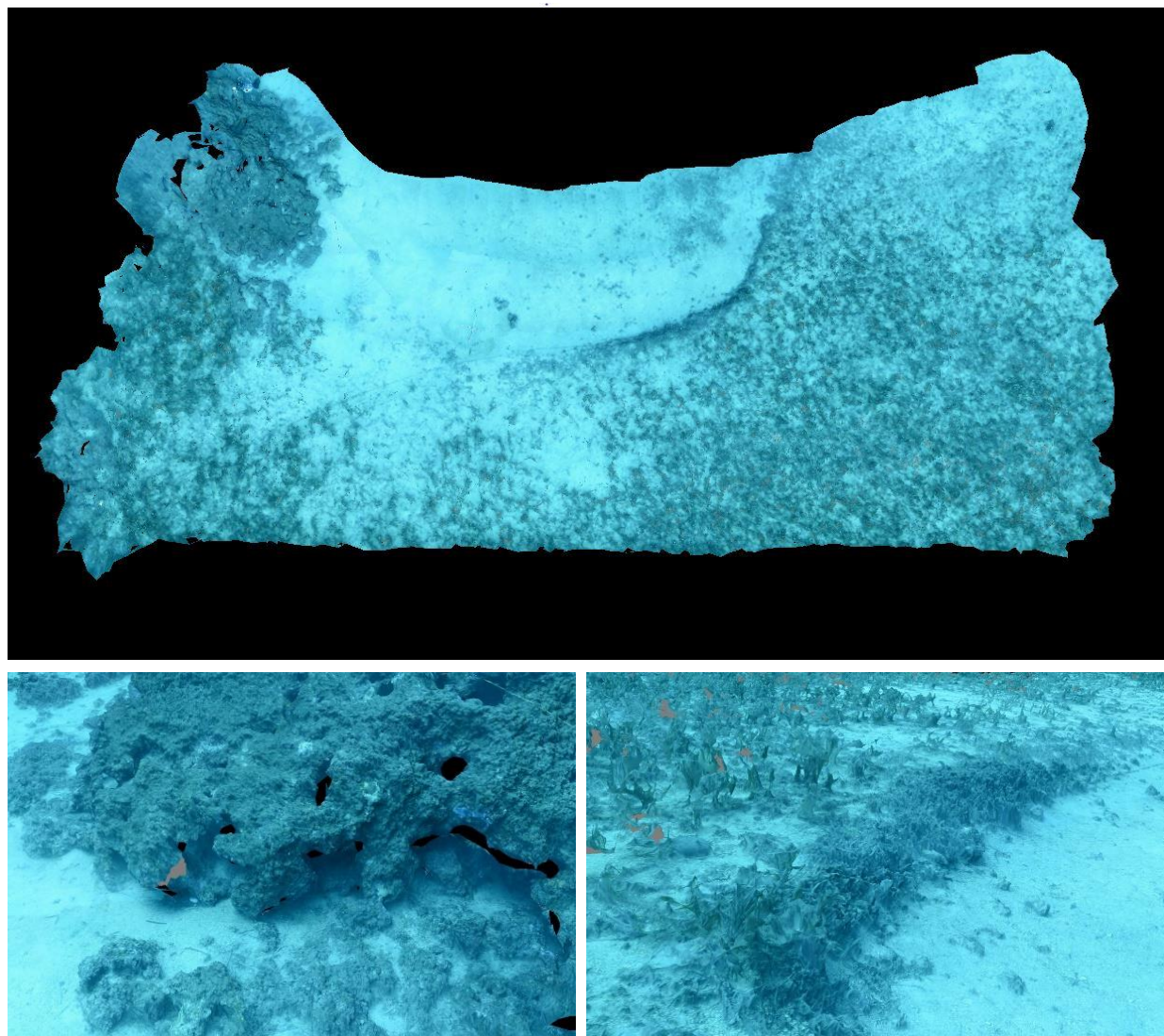


FIGURE 14 : MODELE DU SITE TEMPO « FAUTEA »

## II.G. Focolara

Le modèle 3D du site TEMPO « Focolara » a été construit à partir de 1193 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

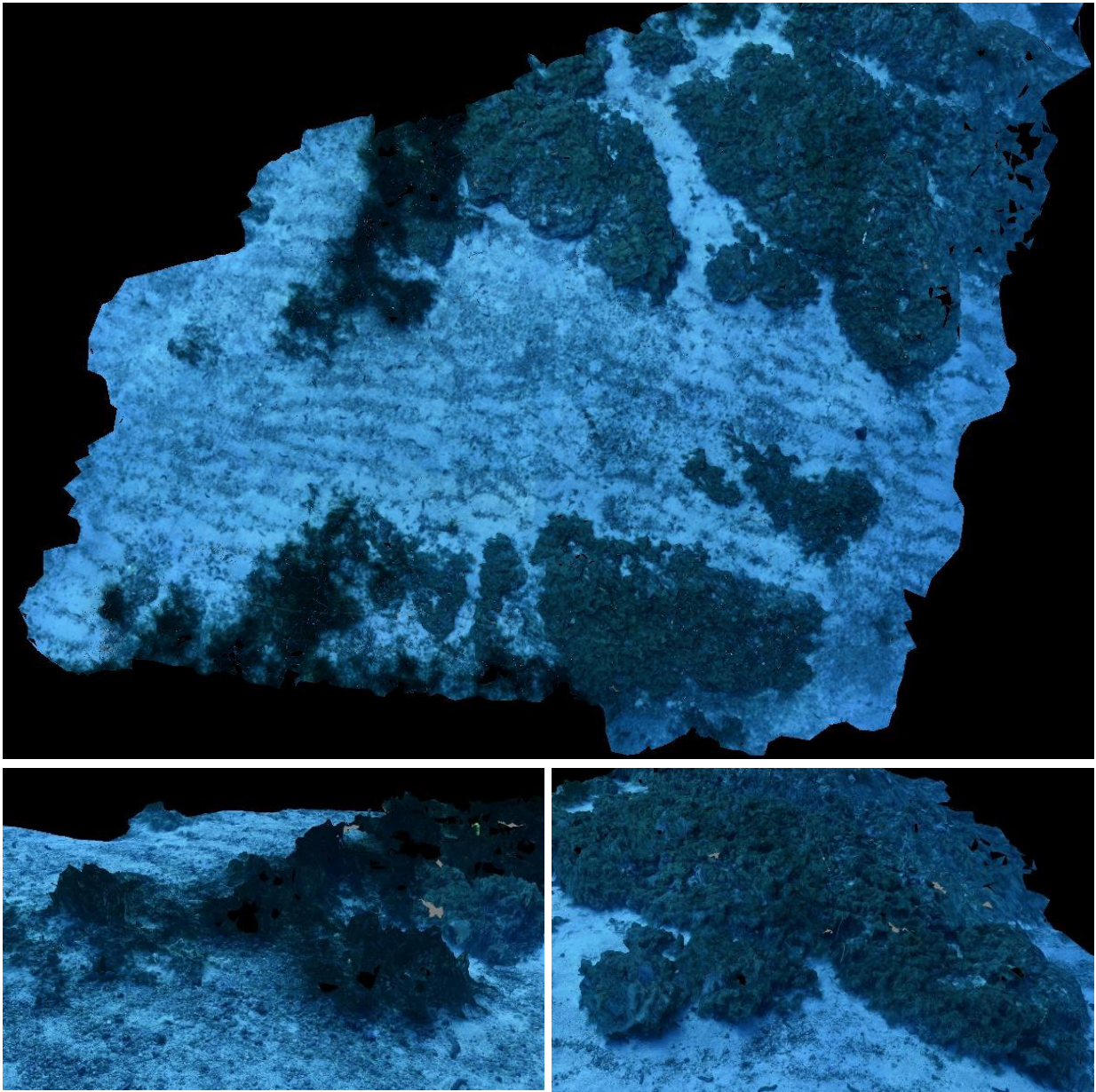


FIGURE 15 : MODELE DU SITE TEMPO « FOCOLARA »



## II.H. Giraglia

Le modèle 3D du site TEMPO « Giraglia » a été construit à partir de 1598 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

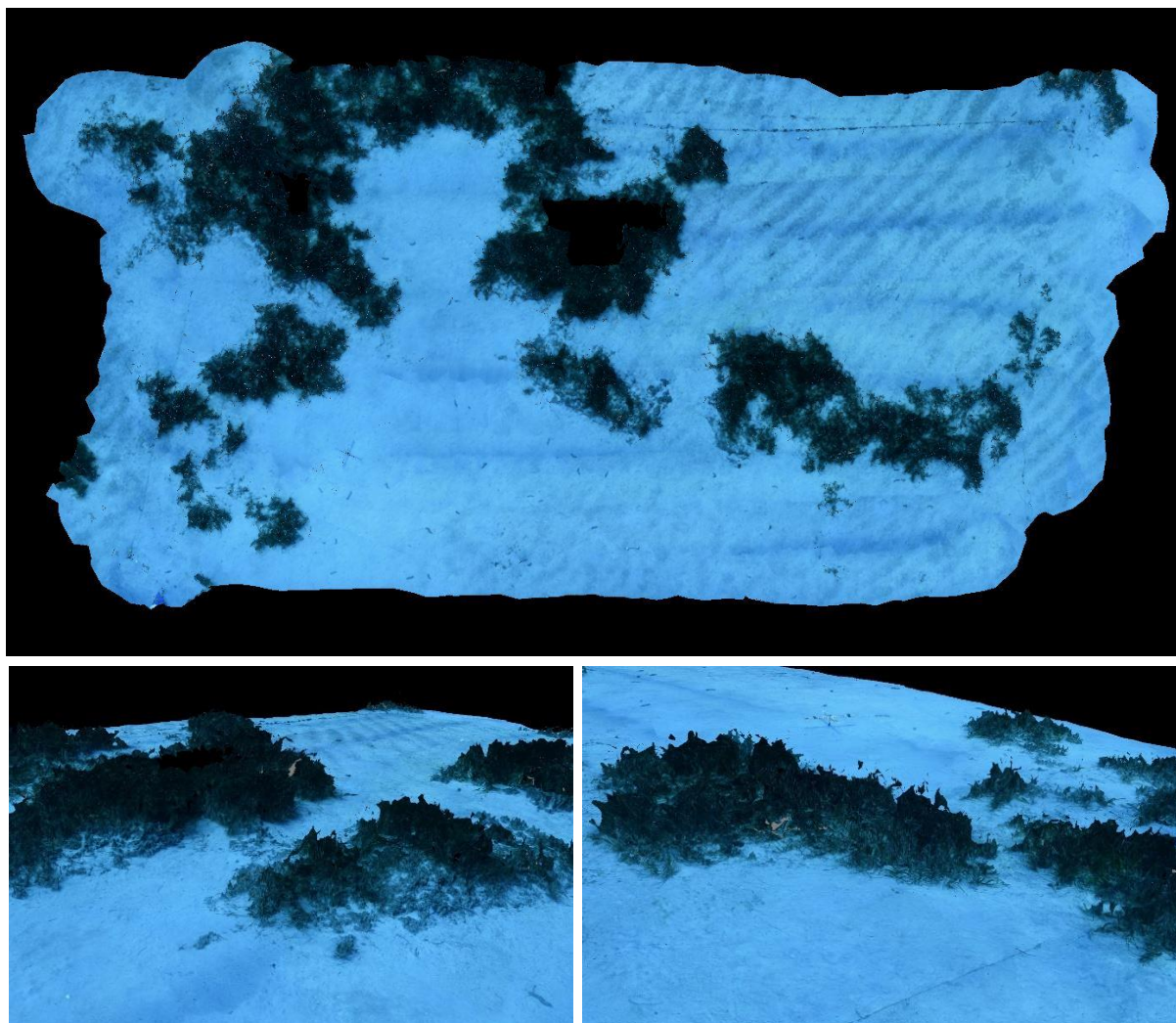


FIGURE 16 : MODELE DU SITE TEMPO « GIRAGLIA »

## II.I. Girolata

Le modèle 3D du site TEMPO « Girolata » a été construit à partir de 2369 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

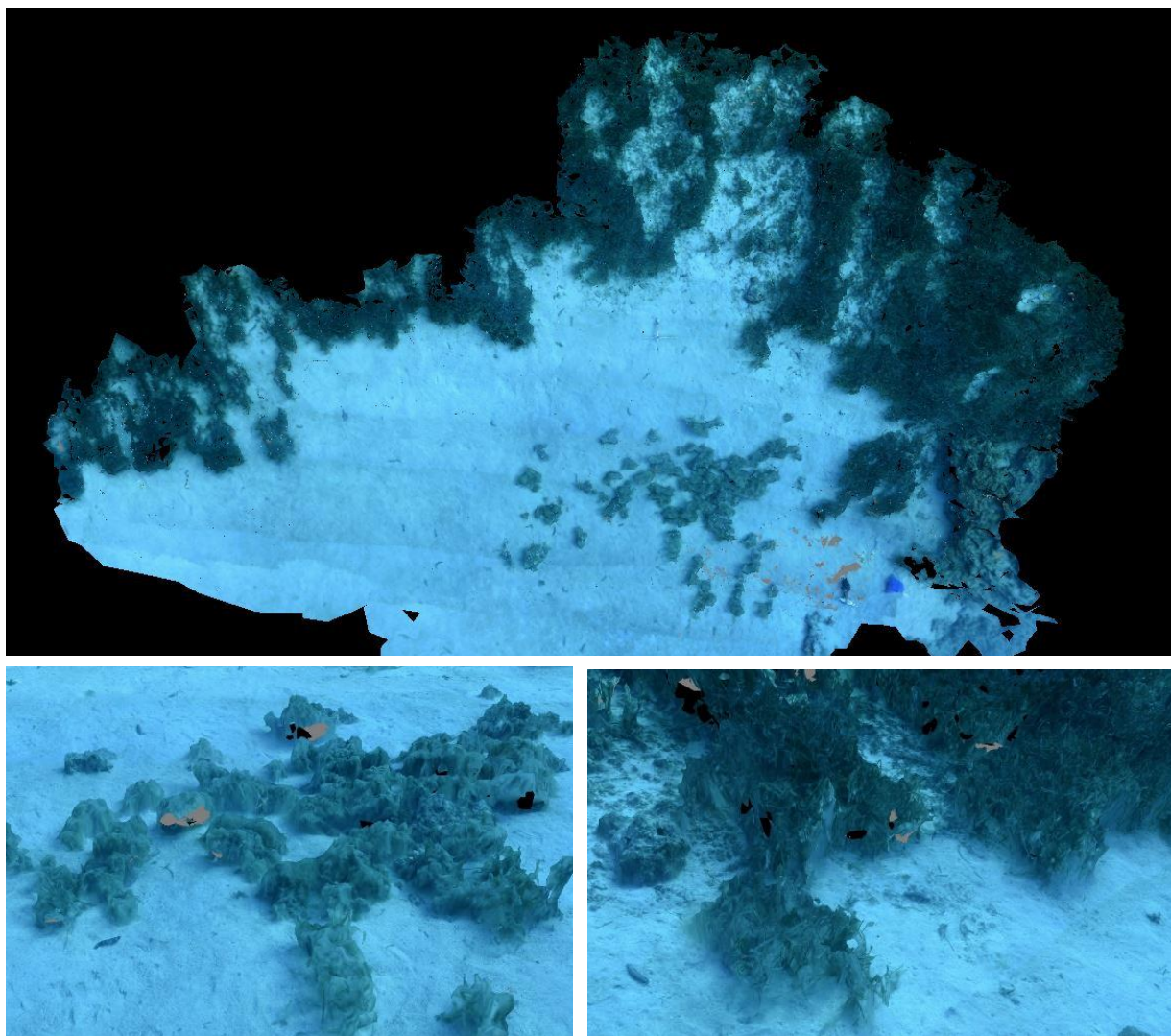


FIGURE 17 : MODELE DU SITE TEMPO « GIROLATA »



## II.J. Golfe Santa Manza

Le modèle 3D du site TEMPO « Golfe Santa Manza » a été construit à partir de 1649 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

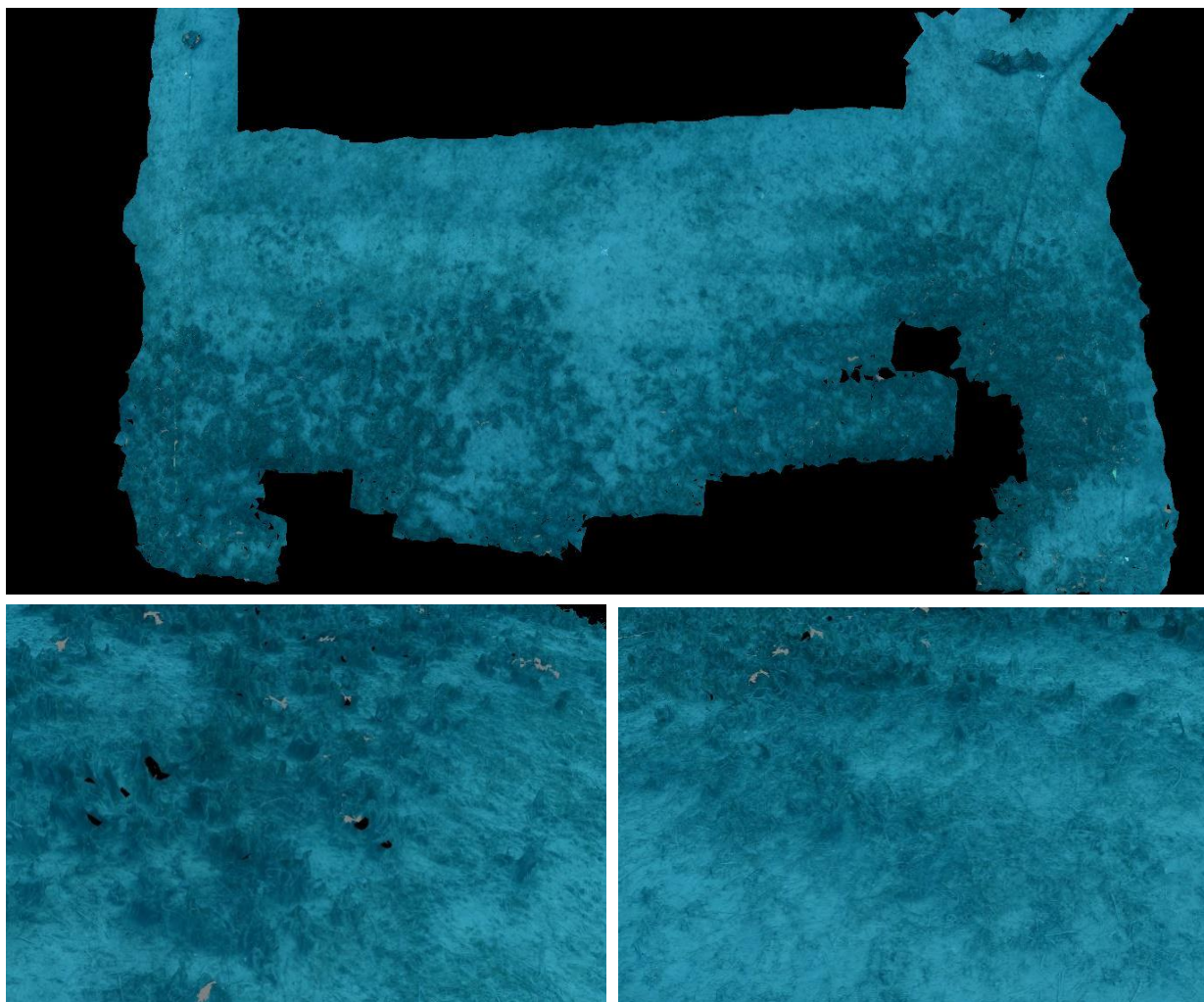


FIGURE 18 : MODELE DU SITE TEMPO « GOLFE SANTA MANZA »

## II.K. Isolella

Le modèle 3D du site TEMPO « Isolella » a été construit à partir de 798 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

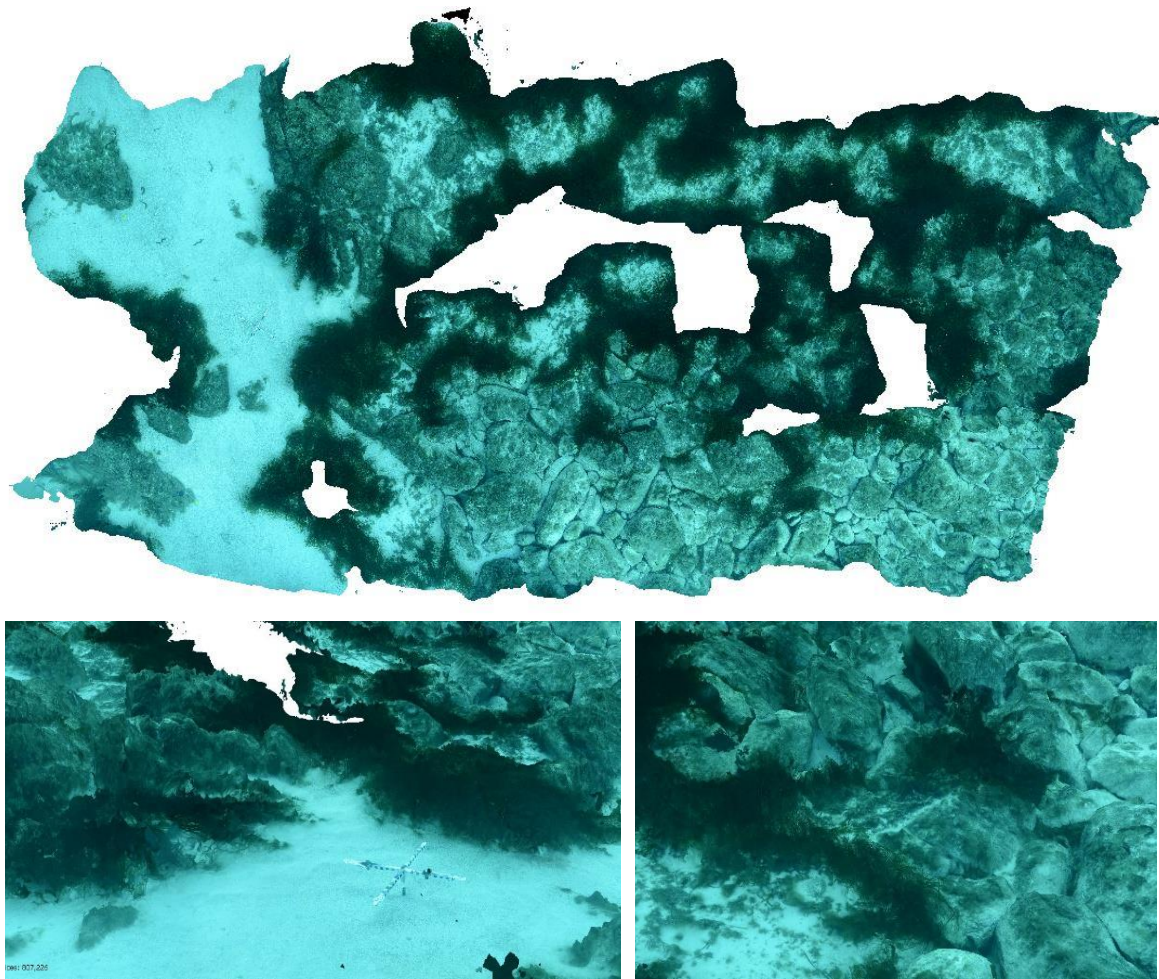


FIGURE 19 : MODELE DU SITE TEMPO « ISOLELLA »



## II.L. Lupino

Le modèle 3D du site TEMPO « Lupino » a été construit à partir de 922 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

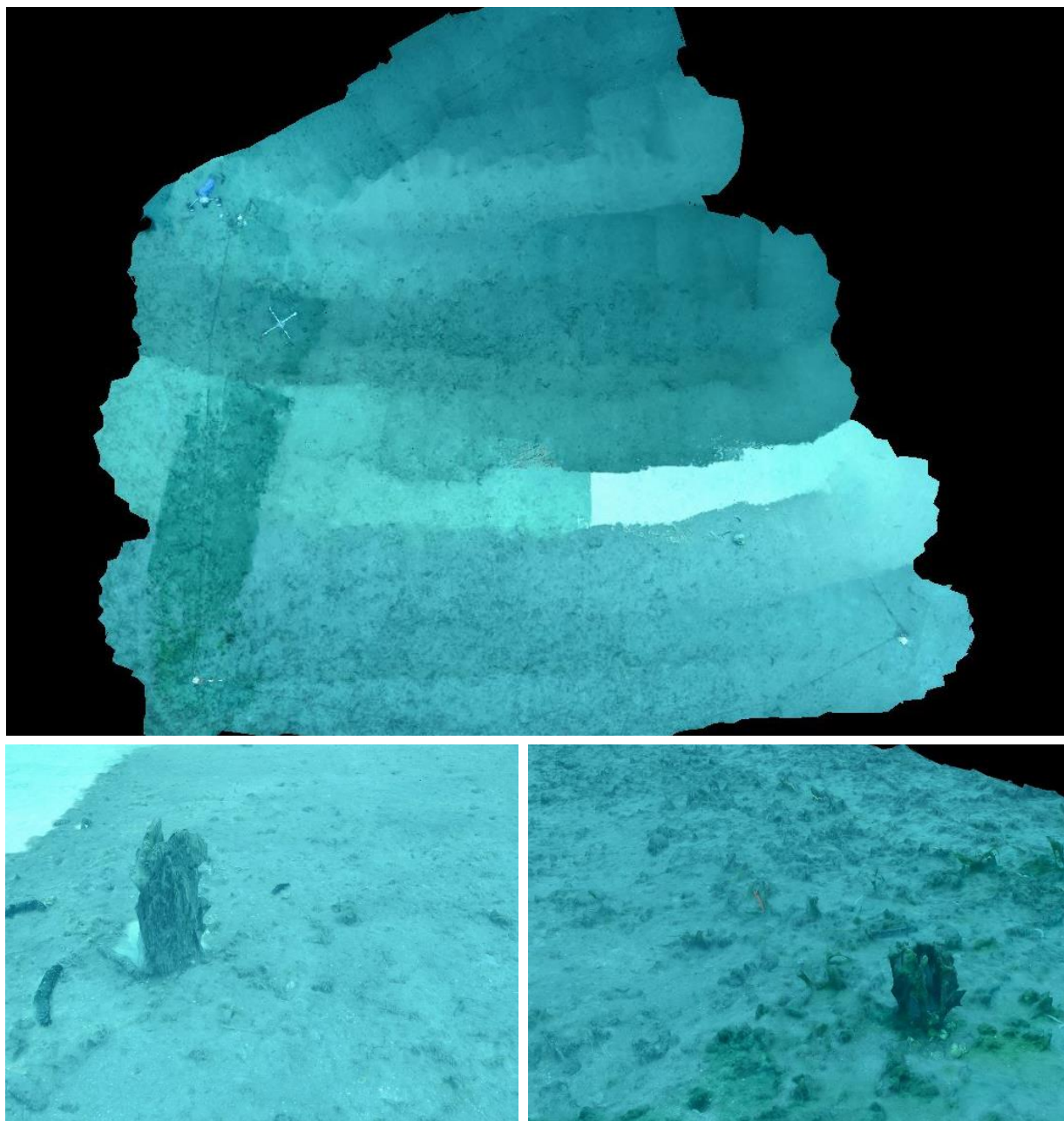


FIGURE 20 : MODELE DU SITE TEMPO « LUPINO »

## II.M. Mortoli

Le modèle 3D du site TEMPO « Mortoli » a été construit à partir de 1248 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

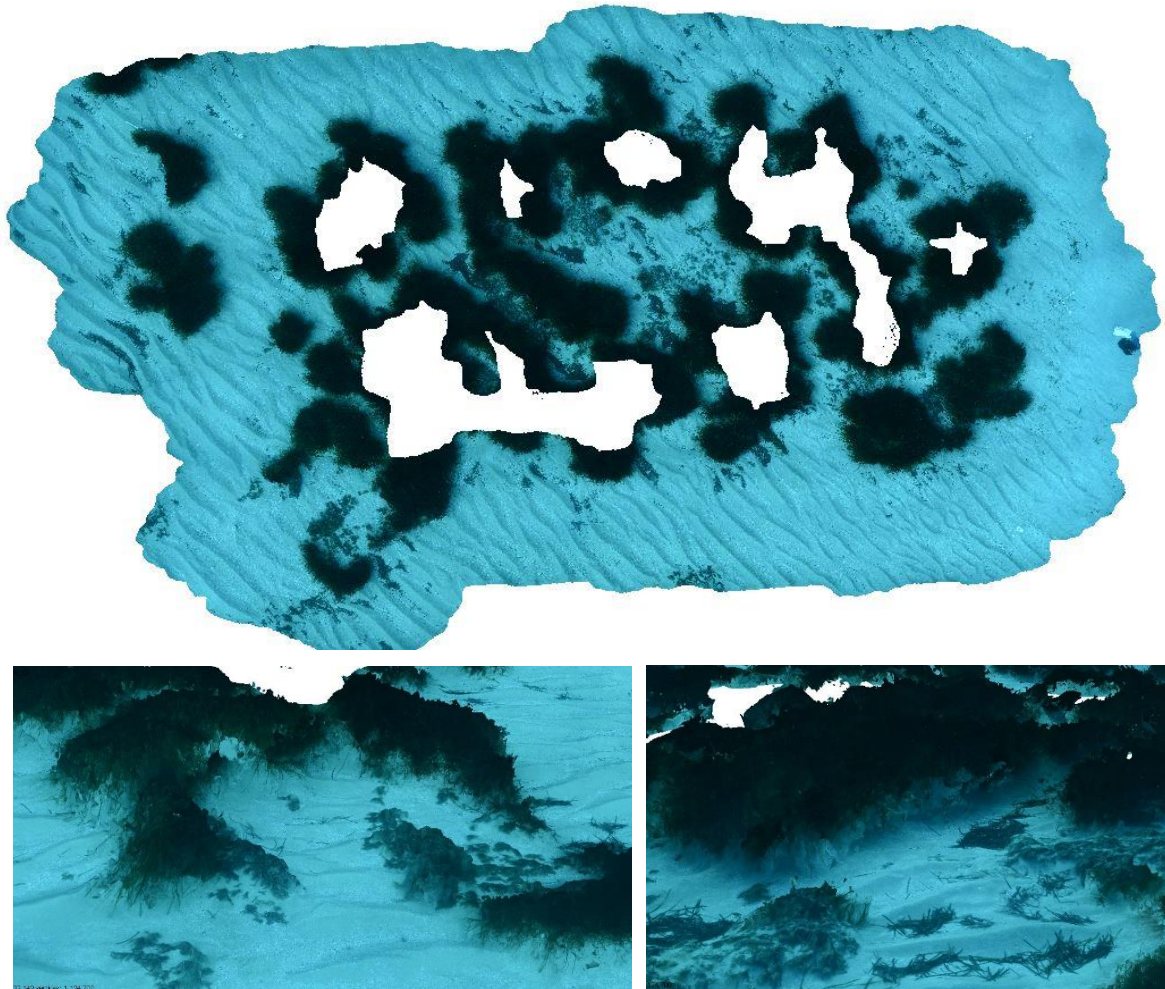
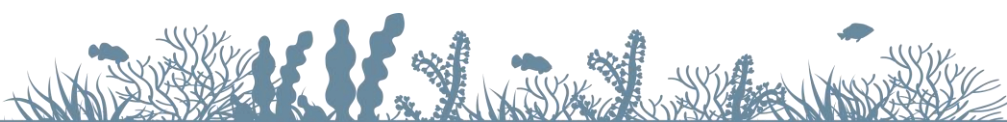


FIGURE 21 : MODELE DU SITE TEMPO « MORTOLI »



## II.N. Plage Trottel

Le modèle 3D du site TEMPO « Plage Trottel » a été construit à partir de 1392 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

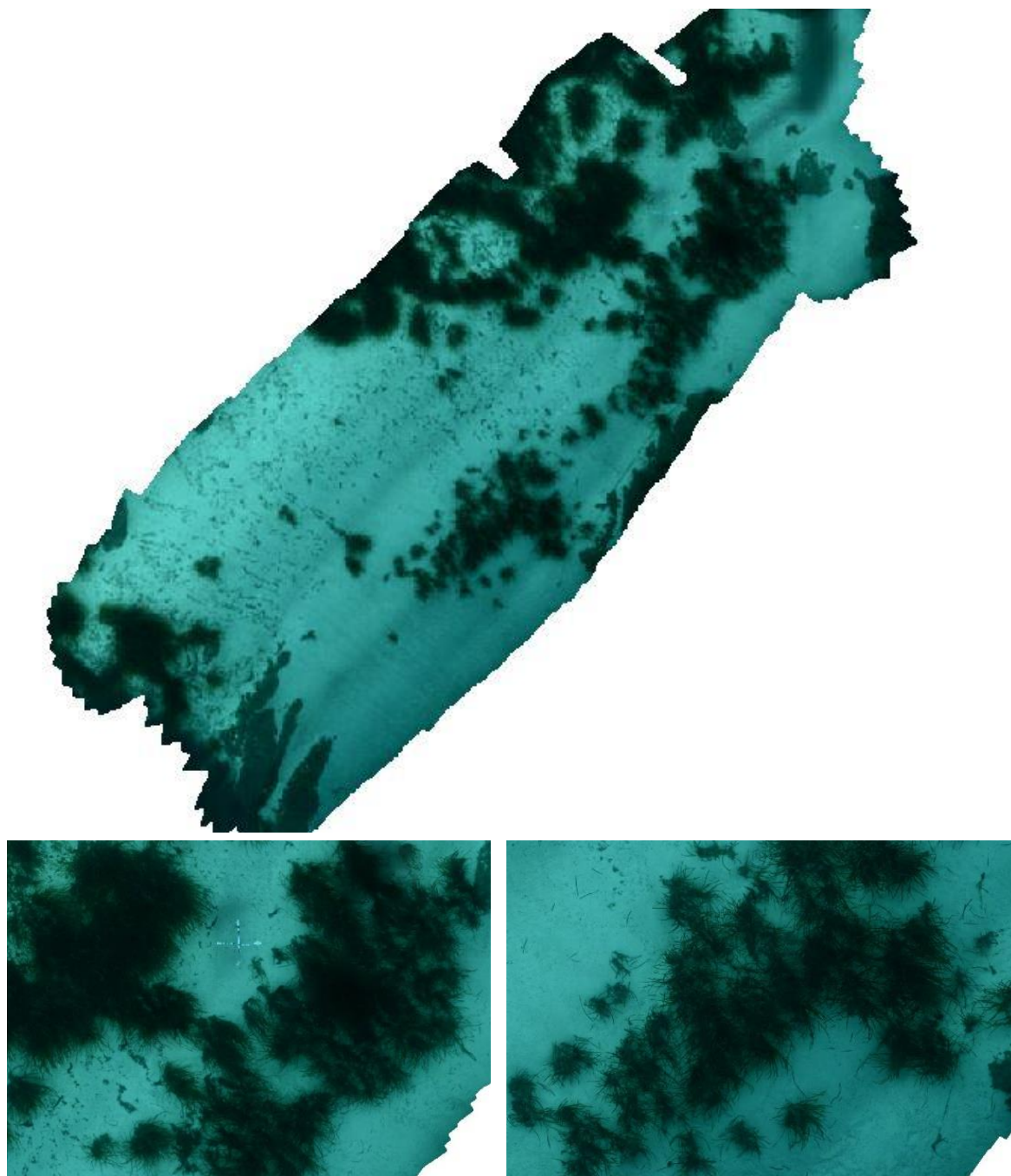


FIGURE 22 : MODELE DU SITE TEMPO « PLAGE TROTTTEL »

## II.O. Punta Di Canella

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta Di Canella » a été construit à partir de 813 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

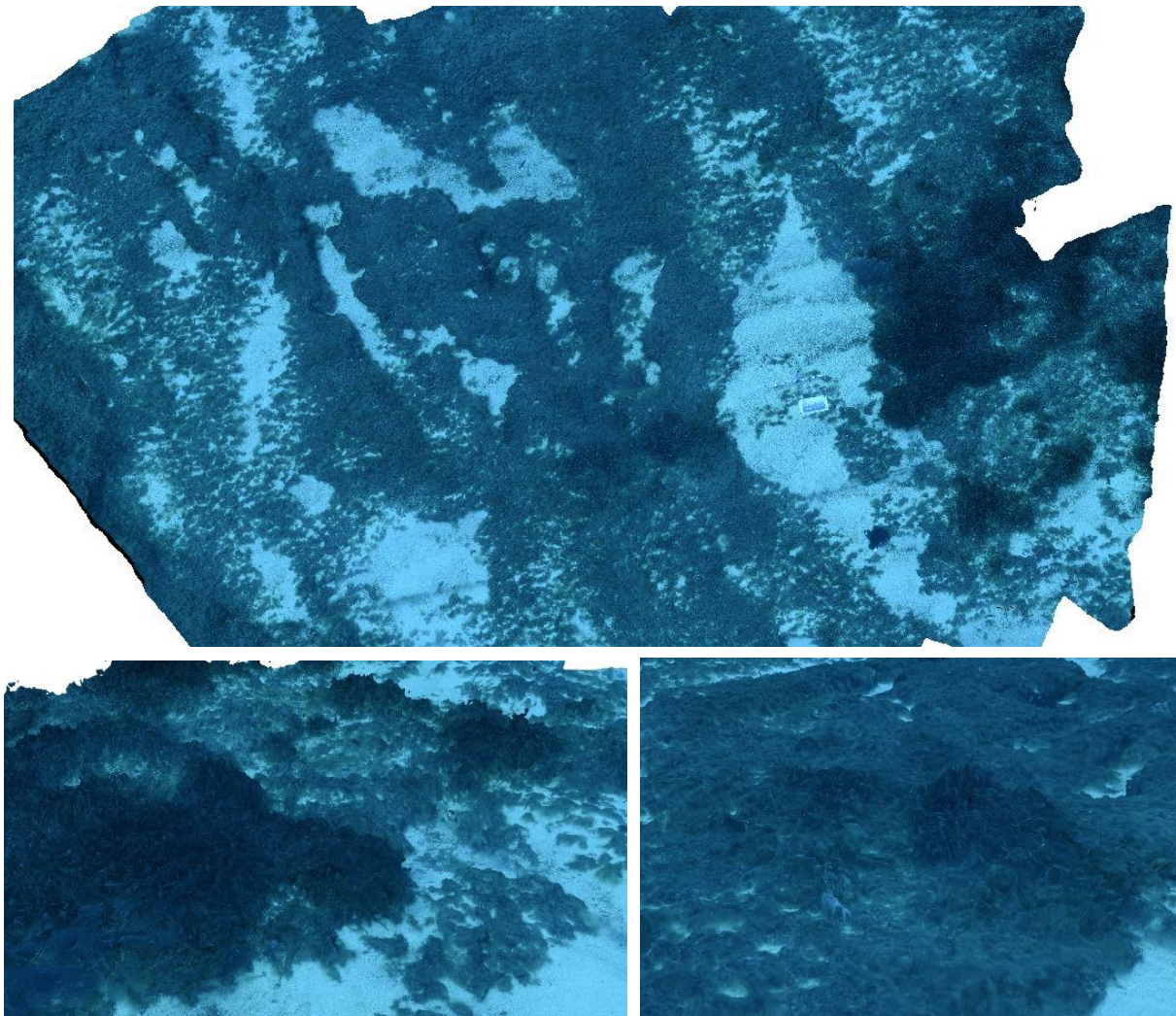


FIGURE 23 : MODELE DU SITE TEMPO « PUNTA DI CANELLA »



## II.P. Punta Mortella

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta Mortella » a été construit à partir de 1237 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

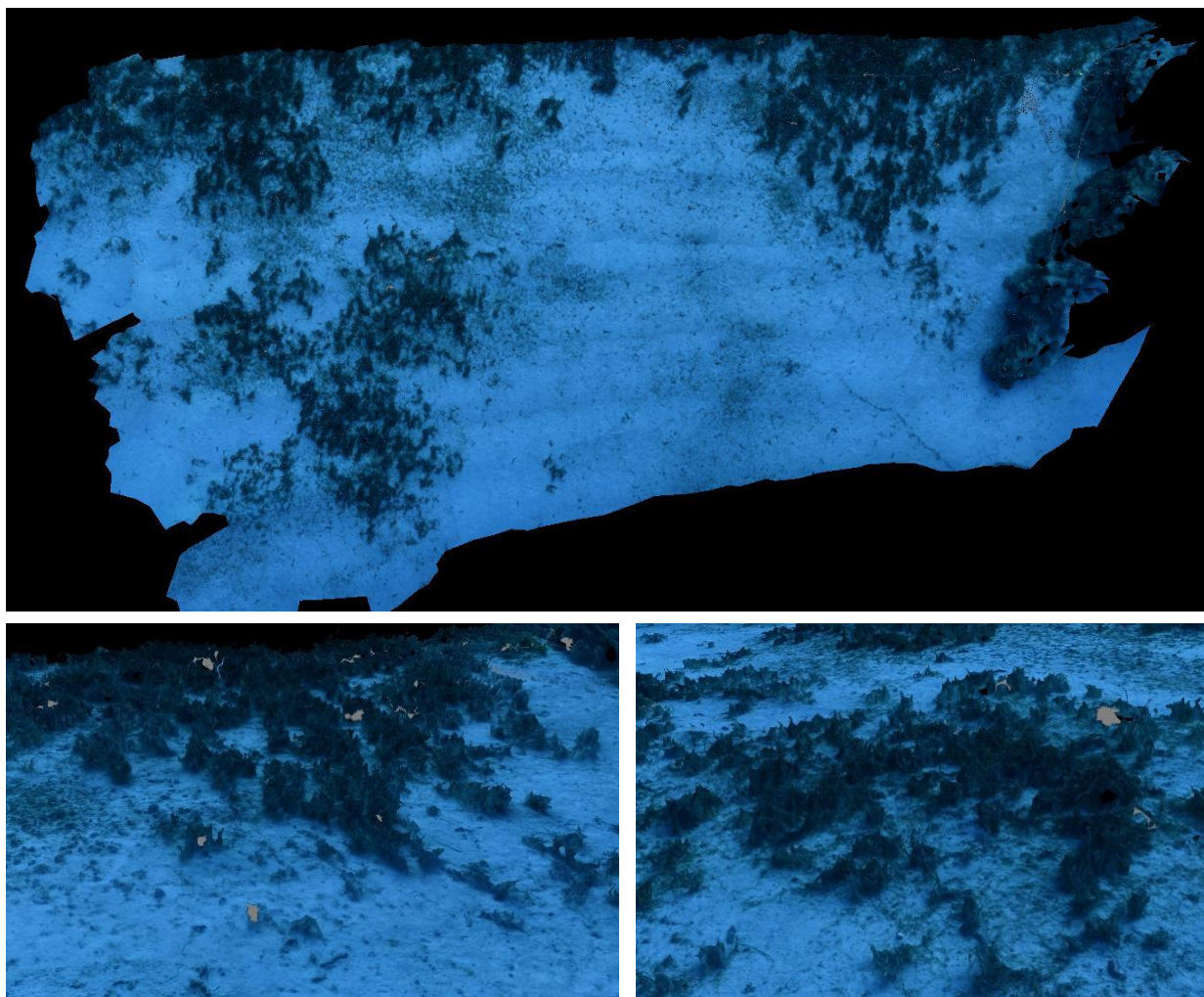


FIGURE 24 : MODELE DU SITE TEMPO « PUNTA MORTELLA »

## II.Q. Punta Vaccaja

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta Vaccaja » a été construit à partir de 1720 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

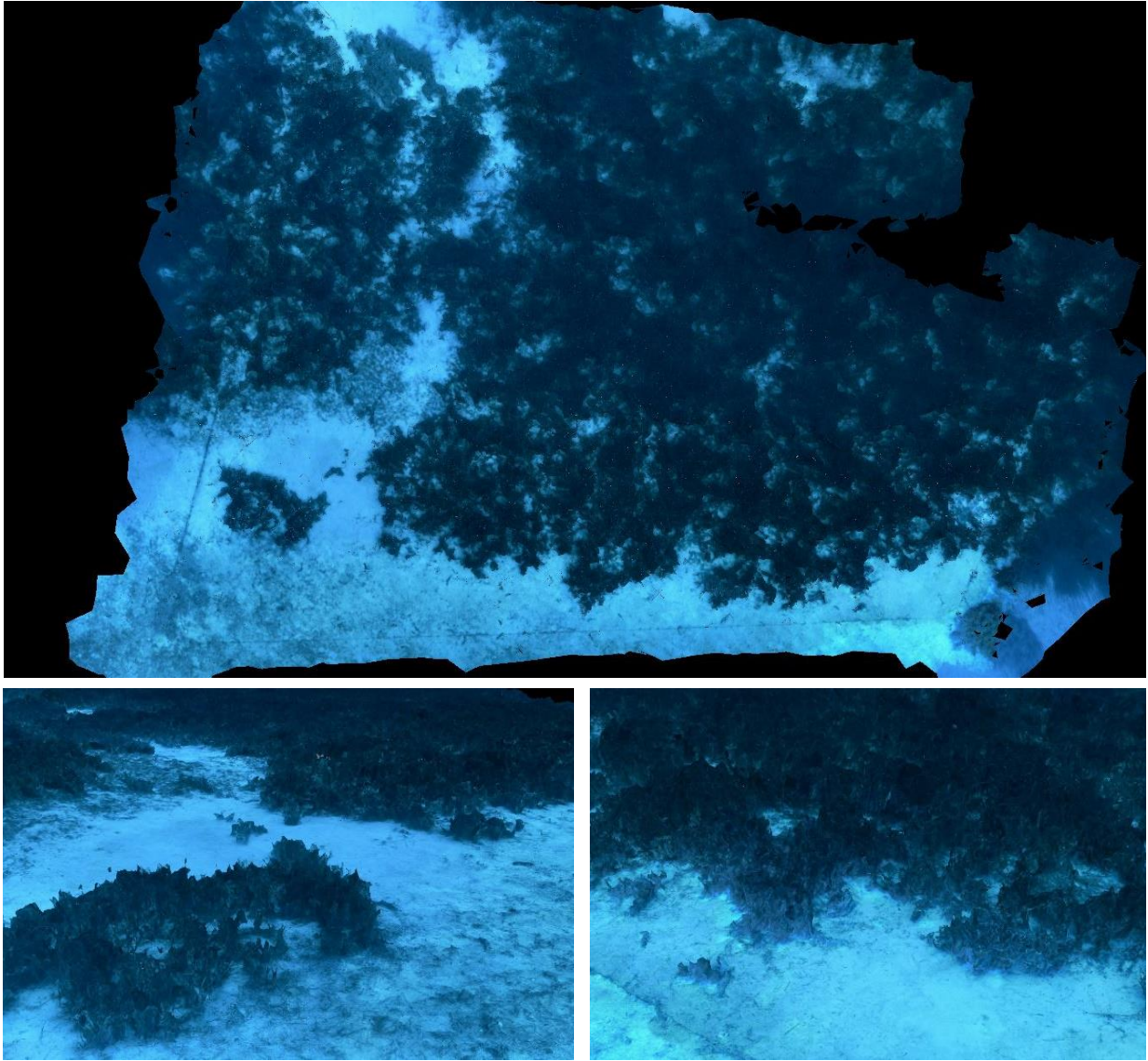


FIGURE 25 : MODELE DU SITE TEMPO « PUNTA VACCAJA »



## II.R. Rondinara

Le modèle 3D du site TEMPO « Rondinara » a été construit à partir de 1175 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

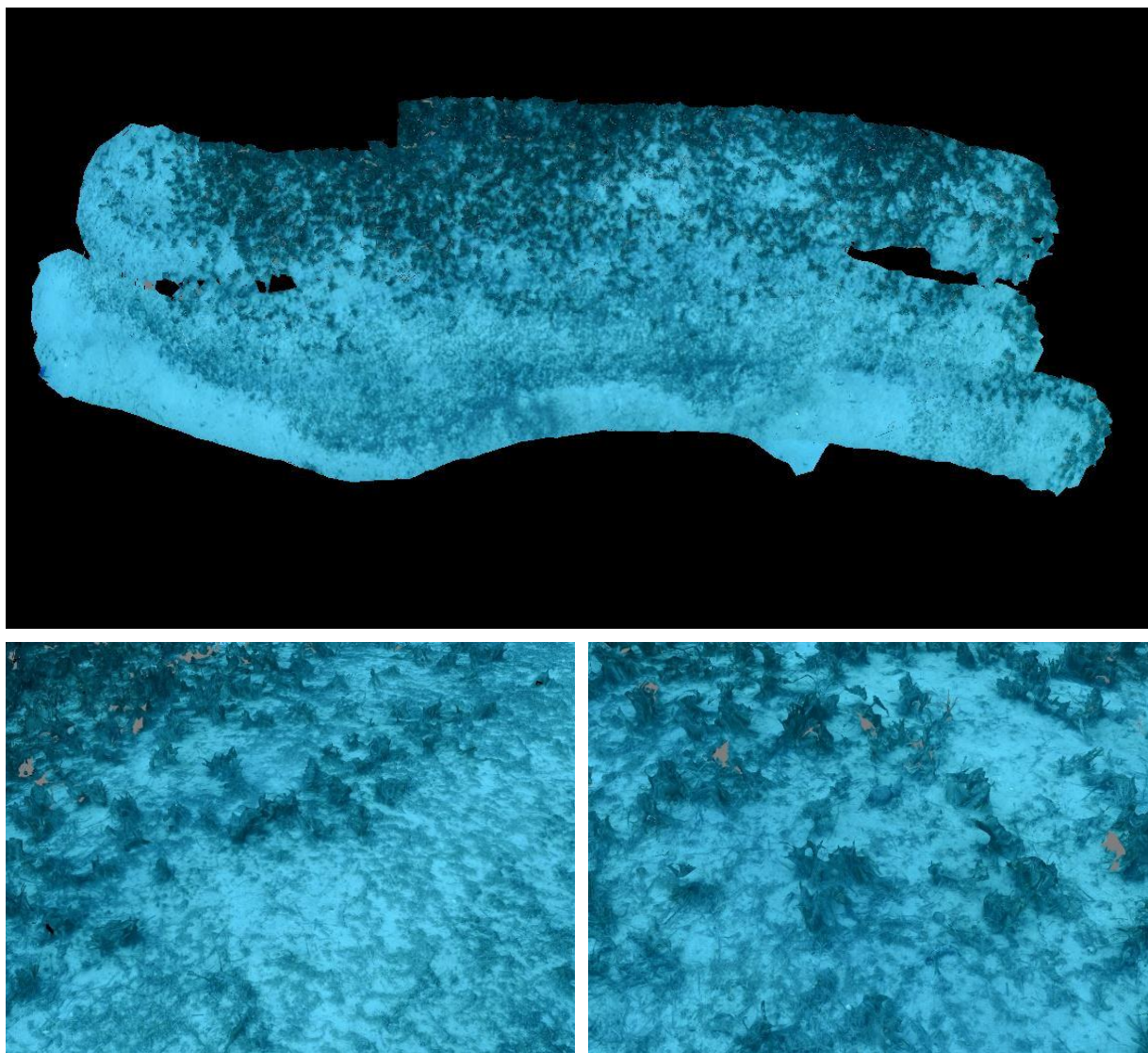


FIGURE 26 : MODELE DU SITE TEMPO « RONDINARA »

## II.S. Sanguinaires

Le modèle 3D du site TEMPO « Sanguinaires » a été construit à partir de 591 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

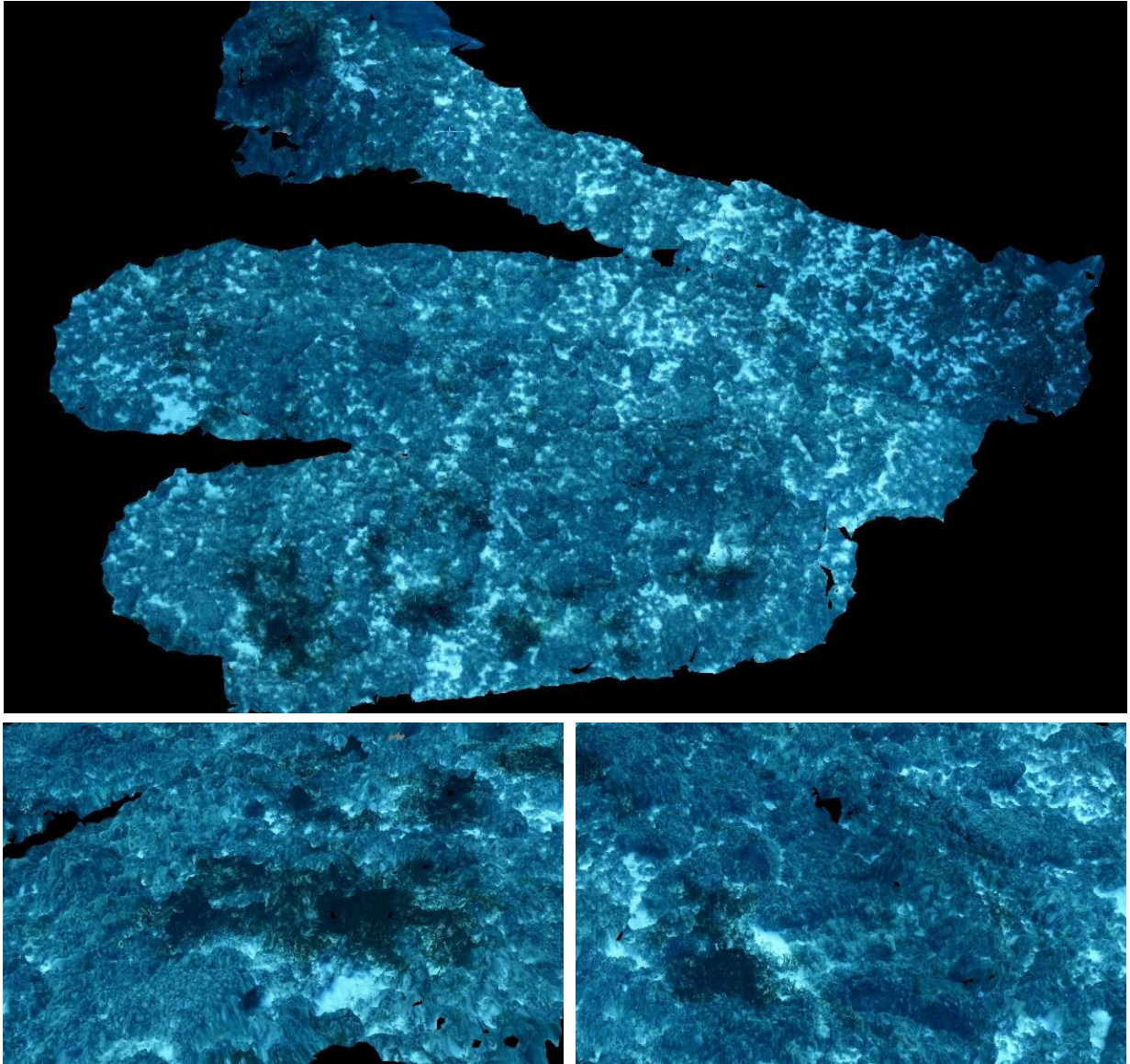


FIGURE 27 : MODELE DU SITE TEMPO « SANGUINAIRES »



## II.T. Stareso

Le modèle 3D du site TEMPO « Stareso » a été construit à partir de 1009 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

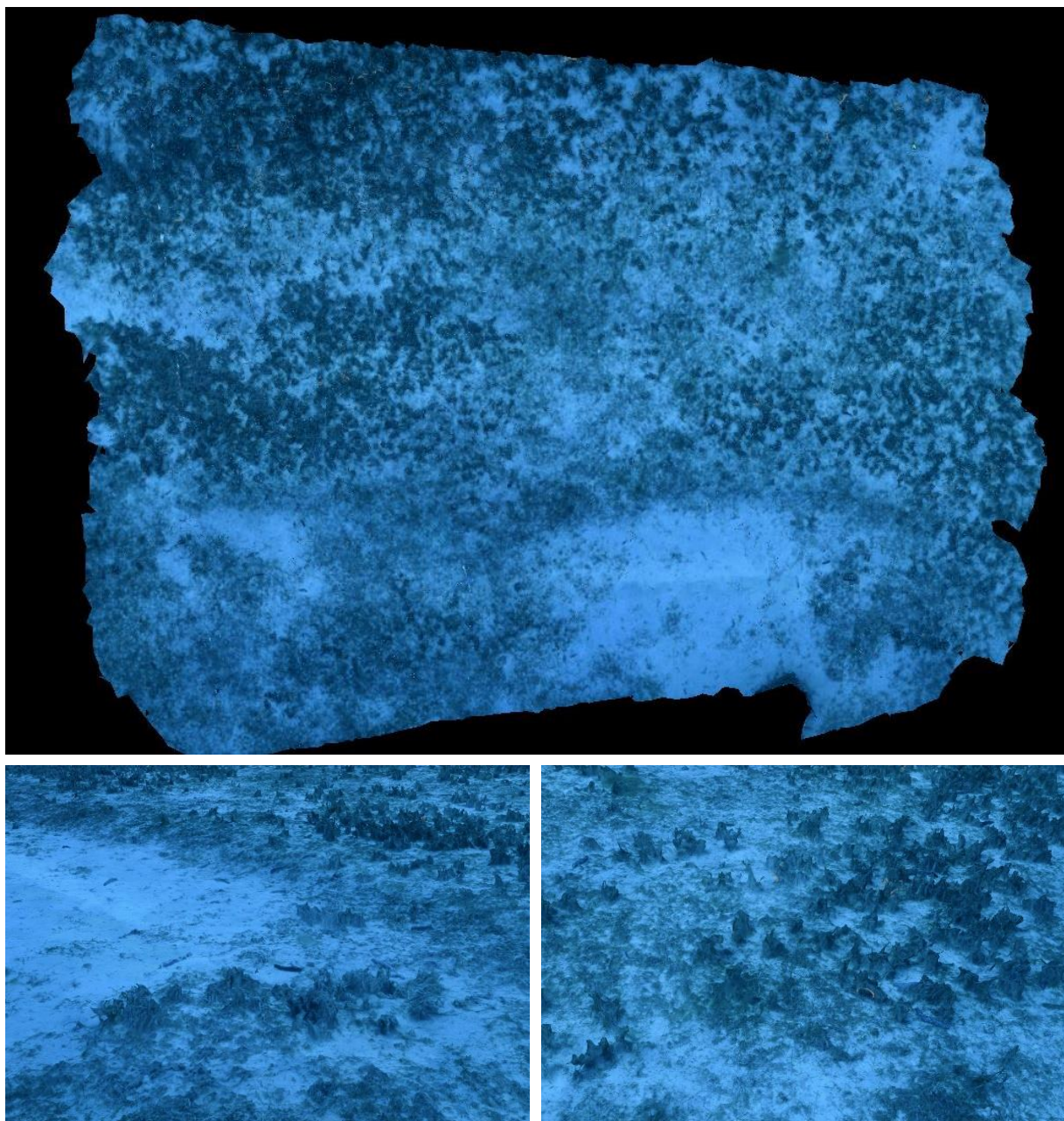


FIGURE 28 : MODELE DU SITE TEMPO « STARESO »

### III.Sites de surveillance des récifs coralligènes – réseau RECOR

Le tableau ci-dessous synthétise, pour chaque site **RECOR** modélisé en 2020 (**22 sites**), l'adresse URL du modèle :

**TABEAU 2 : ADRESSES URL DES MODELES 3D DES SITES RECOR 2020.**

Nom du site	URL
<b>Atoll 1 (PNMCCA)</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Atoll_1/App">https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Atoll_1/App</a>
<b>Agriates</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Agriates_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Agriates_60/App</a>
<b>Agriates Est (PNMCCA)</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Agriates_Est/App">https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Agriates_Est/App</a>
<b>Agriates Sud (PNMCCA)</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Agriates_Sud_CR_jour14/App">https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Agriates_Sud_CR_jour14/App</a>
<b>Bastia</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Bastia_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Bastia_60/App</a>
<b>Canari (PNMCCA)</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Canari/App">https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Canari/App</a>
<b>Cappu Rosso</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Cappu-Rosso_65/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Cappu-Rosso_65/App</a>
<b>Cargese</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Cargese_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Cargese_60/App</a>
<b>Centuri</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Centuri/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Centuri/App</a>
<b>Corailleurs</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Corailleurs_55/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Corailleurs_55/App</a>
<b>Lavezzi</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Lavezzi_50/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Lavezzi_50/App</a>
<b>Macinaggio</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Macinaggio_65/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Macinaggio_65/App</a>
<b>Mortoli</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Mortoli/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Mortoli/App</a>
<b>Morsiglia (PNMCCA)</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Morsiglia/App">https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Morsiglia/App</a>
<b>Parata</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Parata_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Parata_60/App</a>
<b>Revelatta</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Revelatta_55/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Revelatta_55/App</a>
<b>Sanguinaires</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Sanguinaires_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Sanguinaires_60/App</a>
<b>Scandola-4</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Scandola-4_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Scandola-4_60/App</a>
<b>Senetosa</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Senetosa_50/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Senetosa_50/App</a>
<b>Saint Florent</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/St_Florent_60/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/St_Florent_60/App</a>
<b>Tarco</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Tarco_50/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Tarco_50/App</a>
<b>Vacca</b>	<a href="https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Vacca/App">https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Vacca/App</a>

La mention PNMCCA visibles sur les pages suivantes fait référence aux sites localisés dans le Parc naturel marin du Cap Corse et de l'Agriate.



### III.A. Atoll 1 (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Atoll 1 » (PNMCCA) a été construit à partir de 142 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

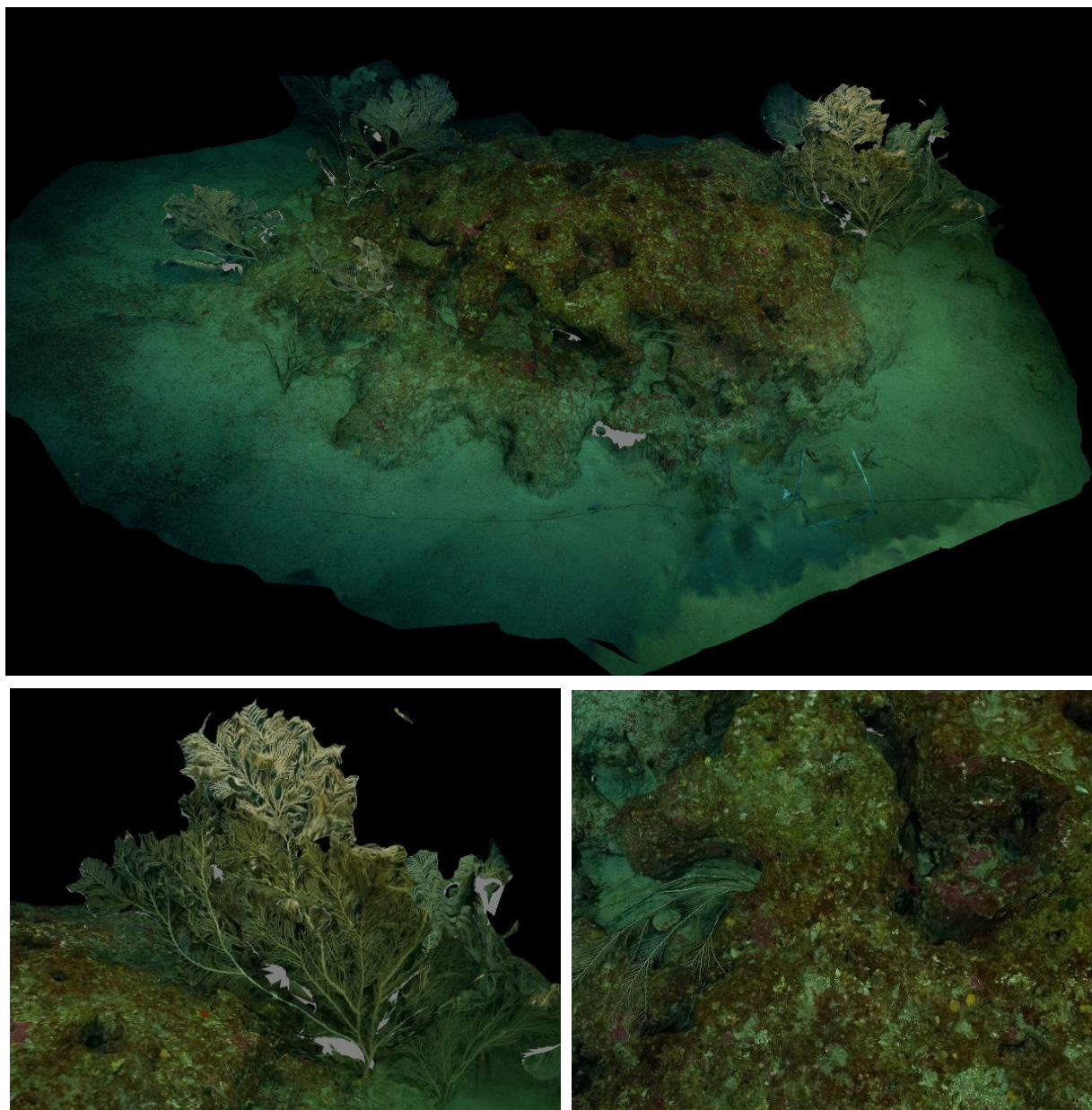


FIGURE 29 : MODELE DU SITE RECOR « ATOLL 1 »

### III.B. Agriates

Le modèle 3D du site RECOR « Agriates » a été construit à partir de 823 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

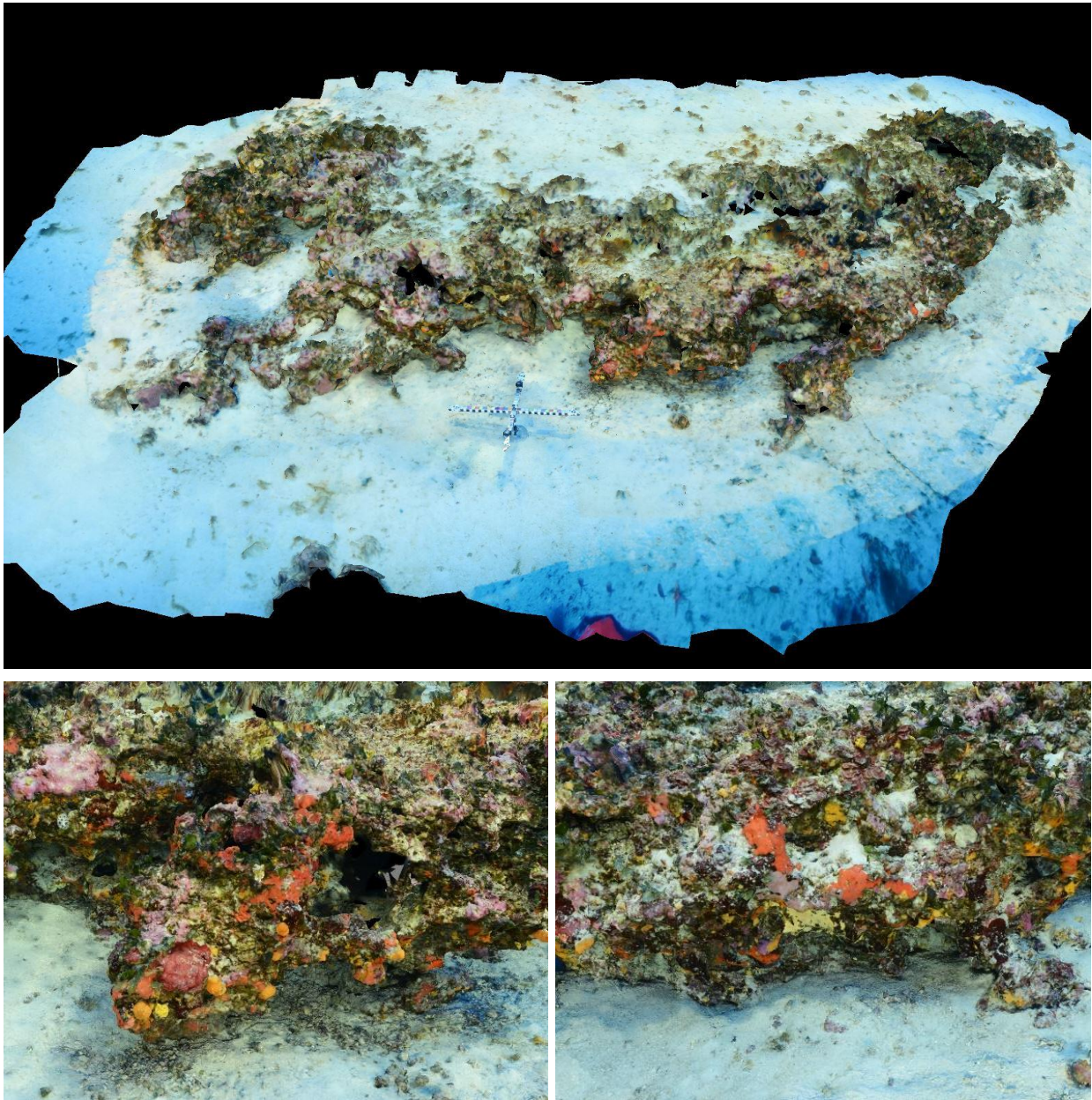
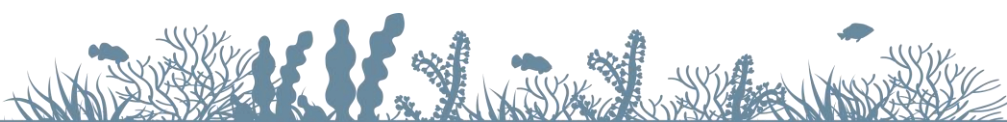


FIGURE 30 : MODELE DU SITE RECOR « AGRIATES »



### III.C. Agriates Est (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Agriates Est » (PNMCCA) a été construit à partir de 575 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

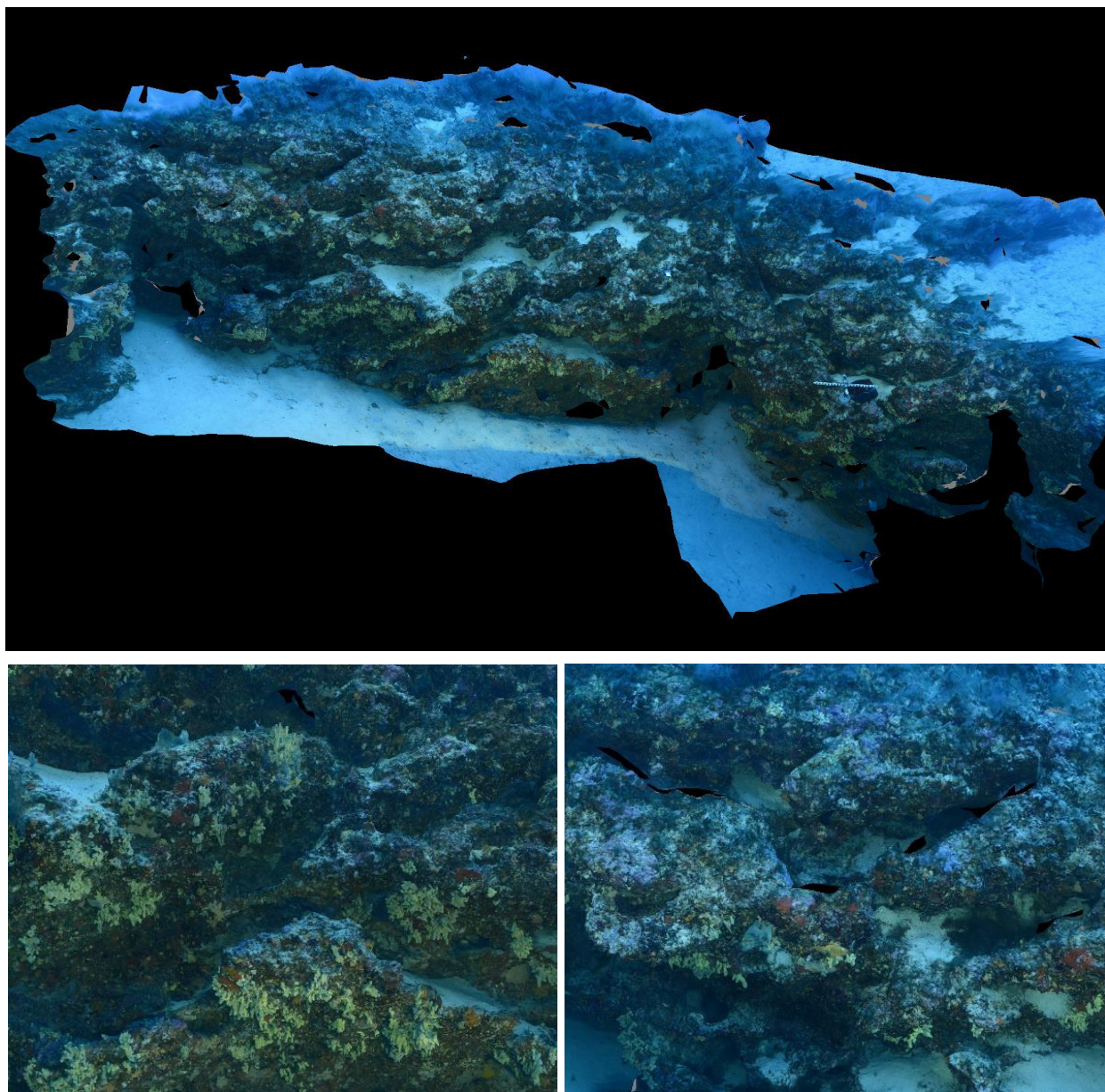


FIGURE 31 : MODELE DU SITE RECOR « AGRIATES EST »

### III.D. Agriates Sud (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Agriates Sud » a été construit à partir de 819 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

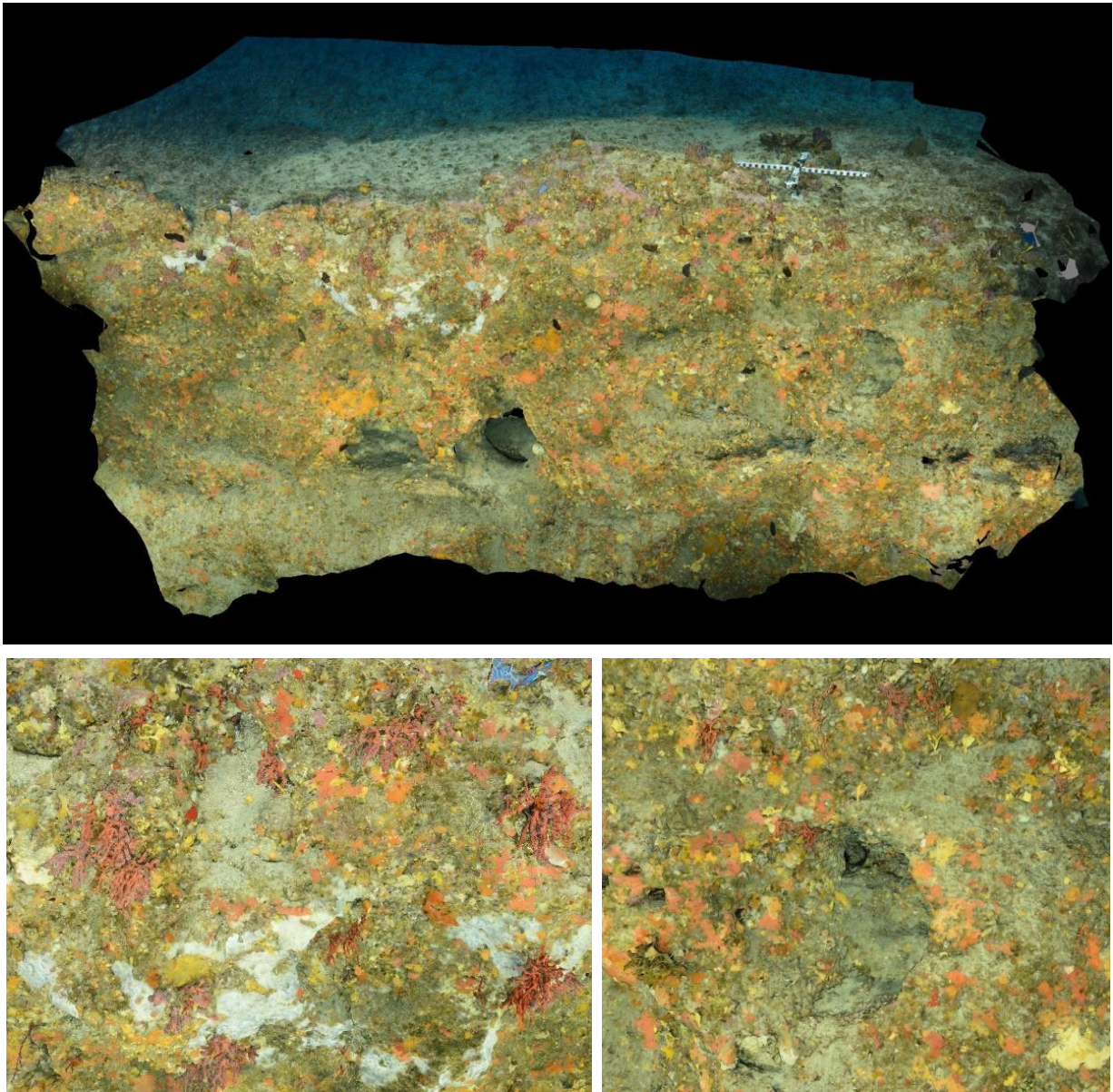


FIGURE 32 : MODELE DU SITE RECOR « AGRIATES SUD »



### III.E. Bastia

Le modèle 3D du site RECOR « Bastia » a été construit à partir de 654 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

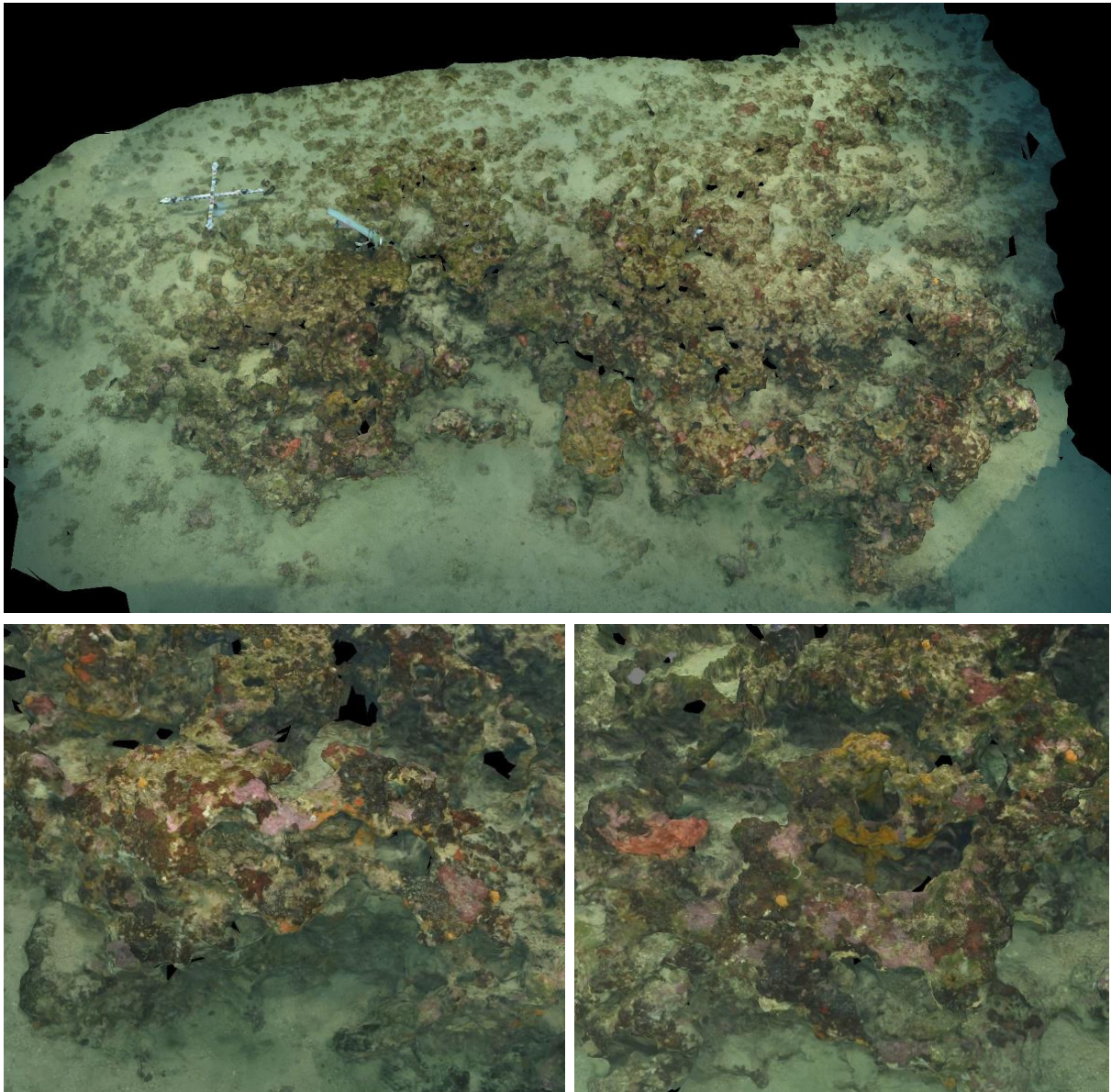


FIGURE 33 : MODELE DU SITE RECOR « BASTIA »

### III.F. Canari (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Canari » (PNMCCA) a été construit à partir de 783 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

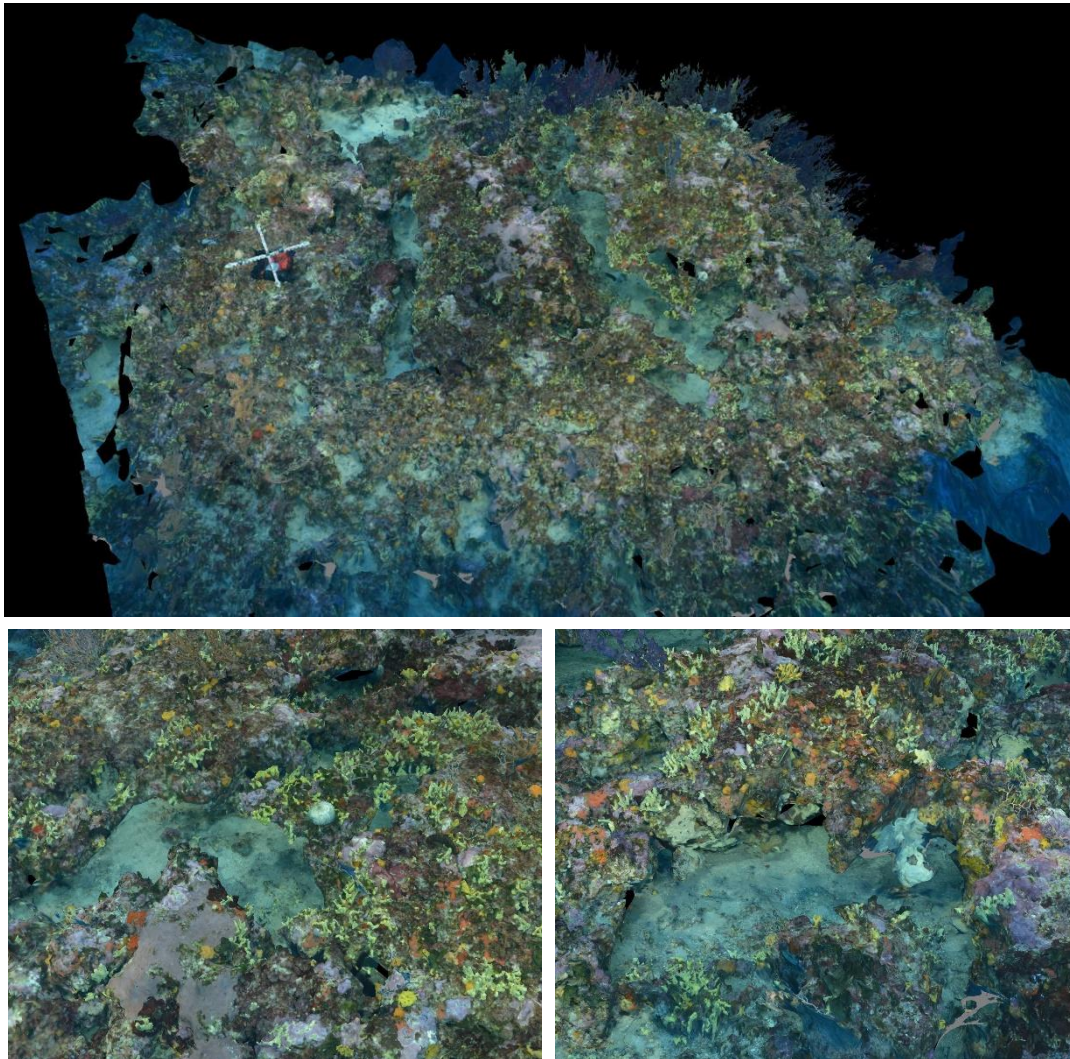


FIGURE 34 : MODELE DU SITE RECOR « CANARI »



### III.G. Cappu Rosso

Le modèle 3D du site RECOR « Cappu Rosso » a été construit à partir de 543 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

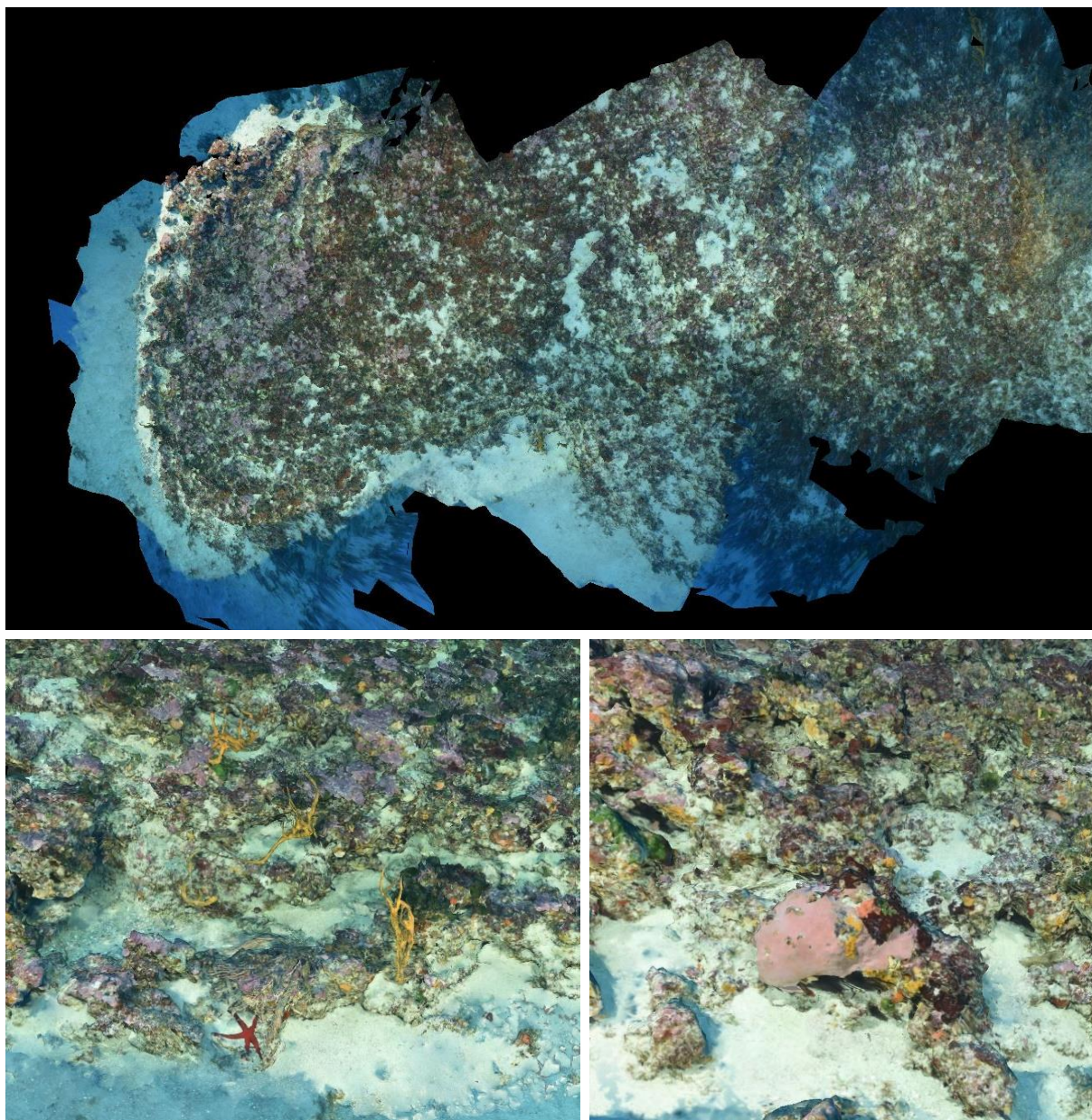


FIGURE 35 : MODELE DU SITE RECOR « CAPPU ROSSO »

### III.H. Cargese

Le modèle 3D du site RECOR « Cargese » a été construit à partir de 378 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

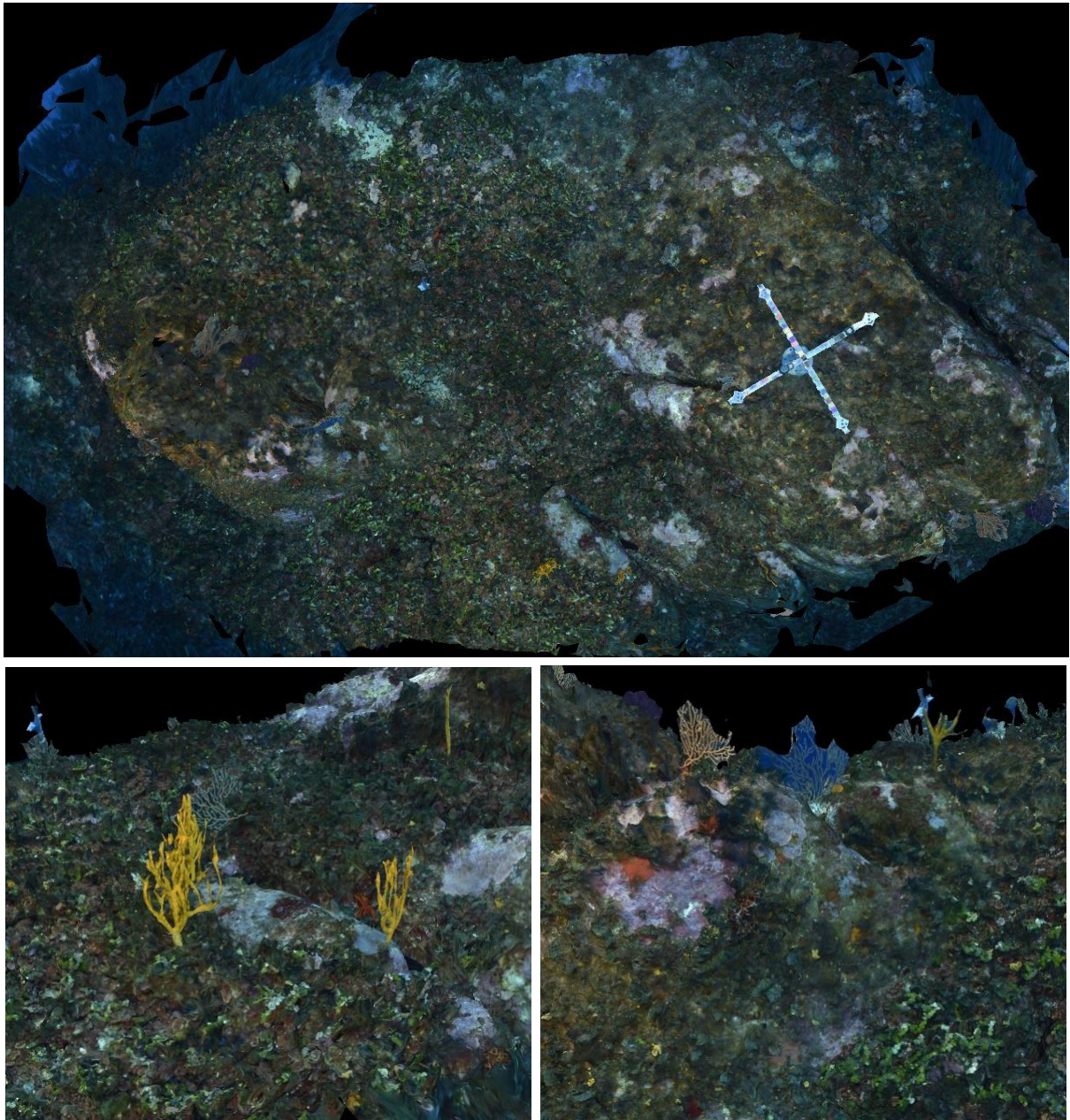
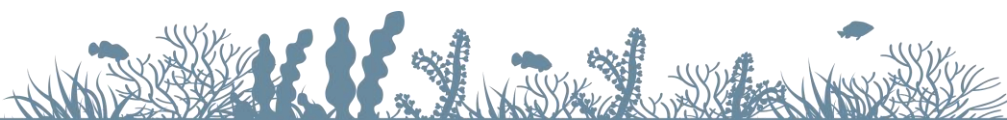


FIGURE 36 : MODELE DU SITE RECOR « CARGESE »



### III.I. Centuri

Le modèle 3D du site RECOR « Centuri » a été construit à partir de 1101 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

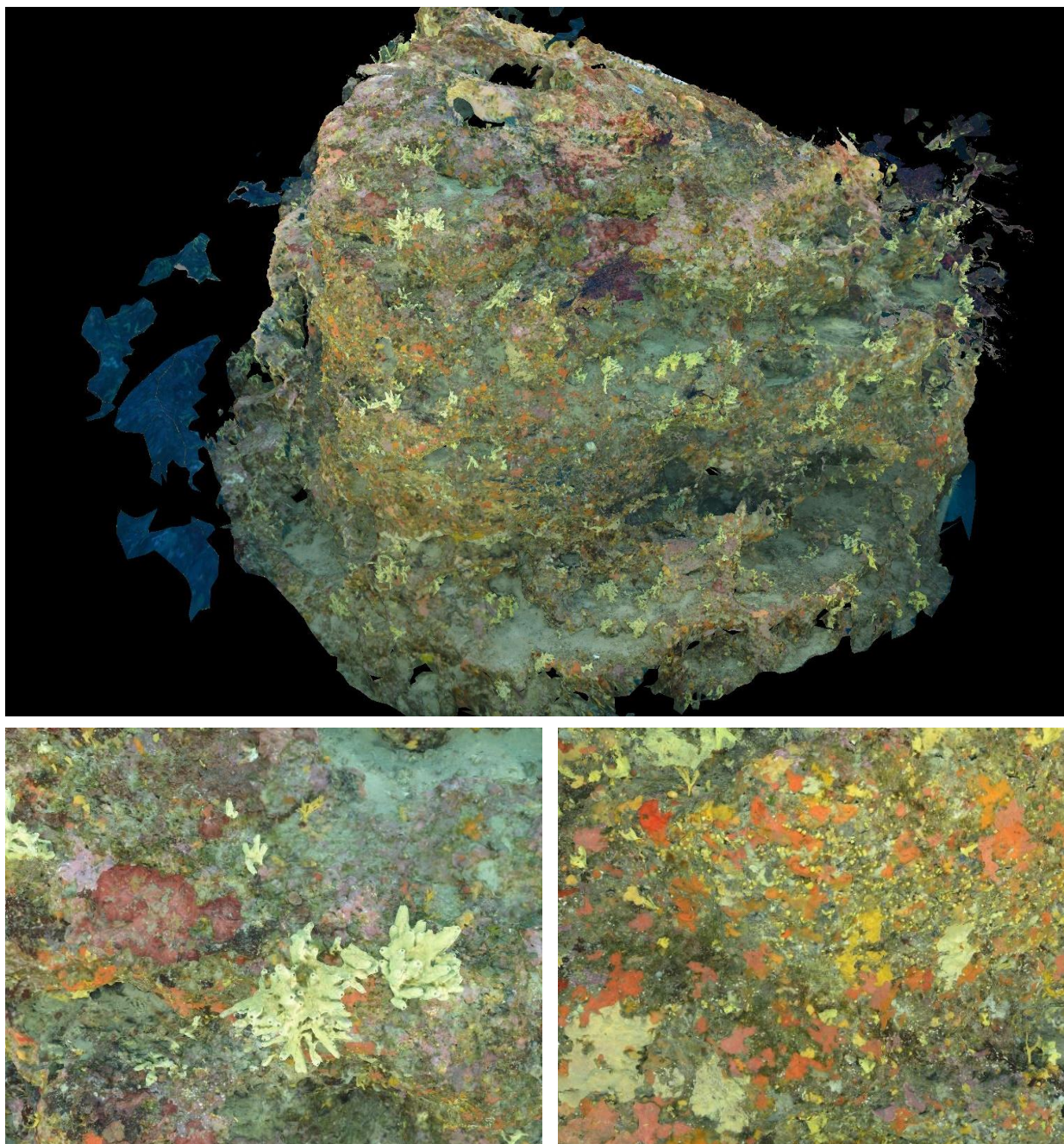


FIGURE 37 : MODELE DU SITE RECOR « CENTURI »

### III.J. Corailleurs

Le modèle 3D du site RECOR « Corailleurs » a été construit à partir de 716 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

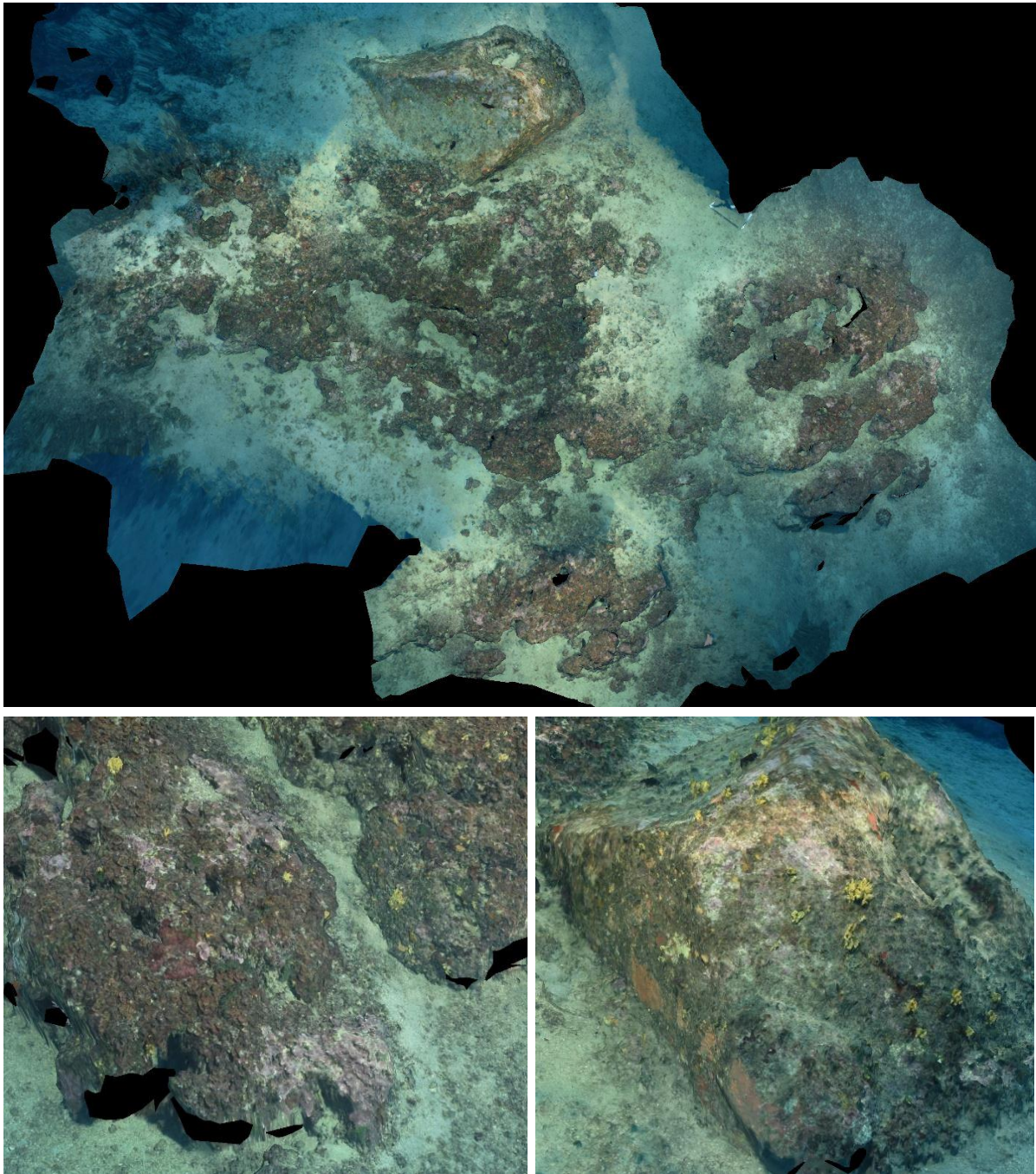


FIGURE 38 : MODELE DU SITE RECOR « CORAILLEURS »



### III.K. Lavezzi

Le modèle 3D du site RECOR « Lavezzi » a été construit à partir de 1530 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

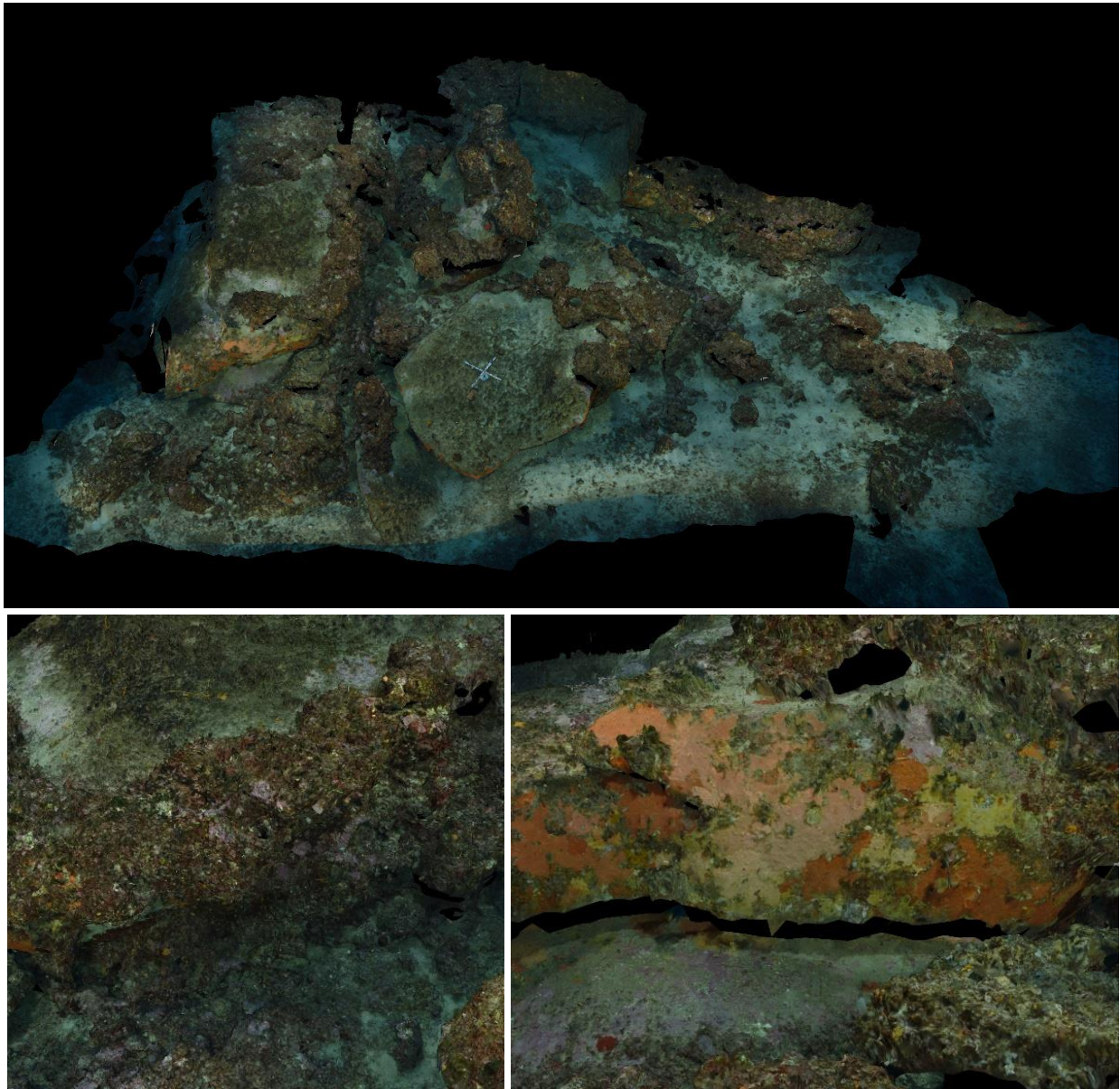


FIGURE 39 : MODELE DU SITE RECOR « LAVEZZI »

### III.L. Macinaggio

Le modèle 3D du site RECOR « Macinaggio » a été construit à partir de 1010 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

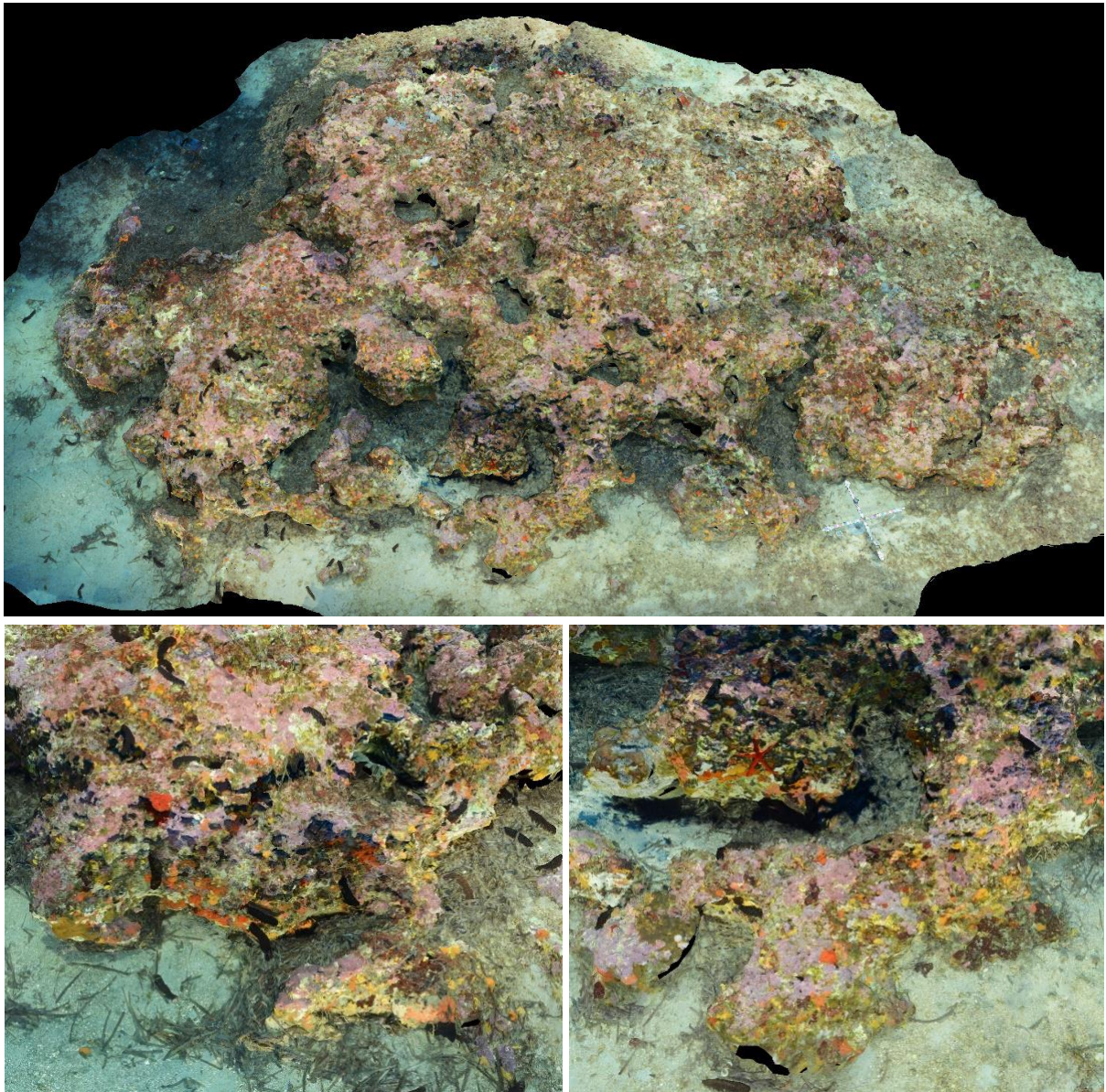


FIGURE 40 : MODELE DU SITE RECOR « MACINAGGIO »



### III.M. Mortoli

Le modèle 3D du site RECOR « Mortoli » a été construit à partir de 1377 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

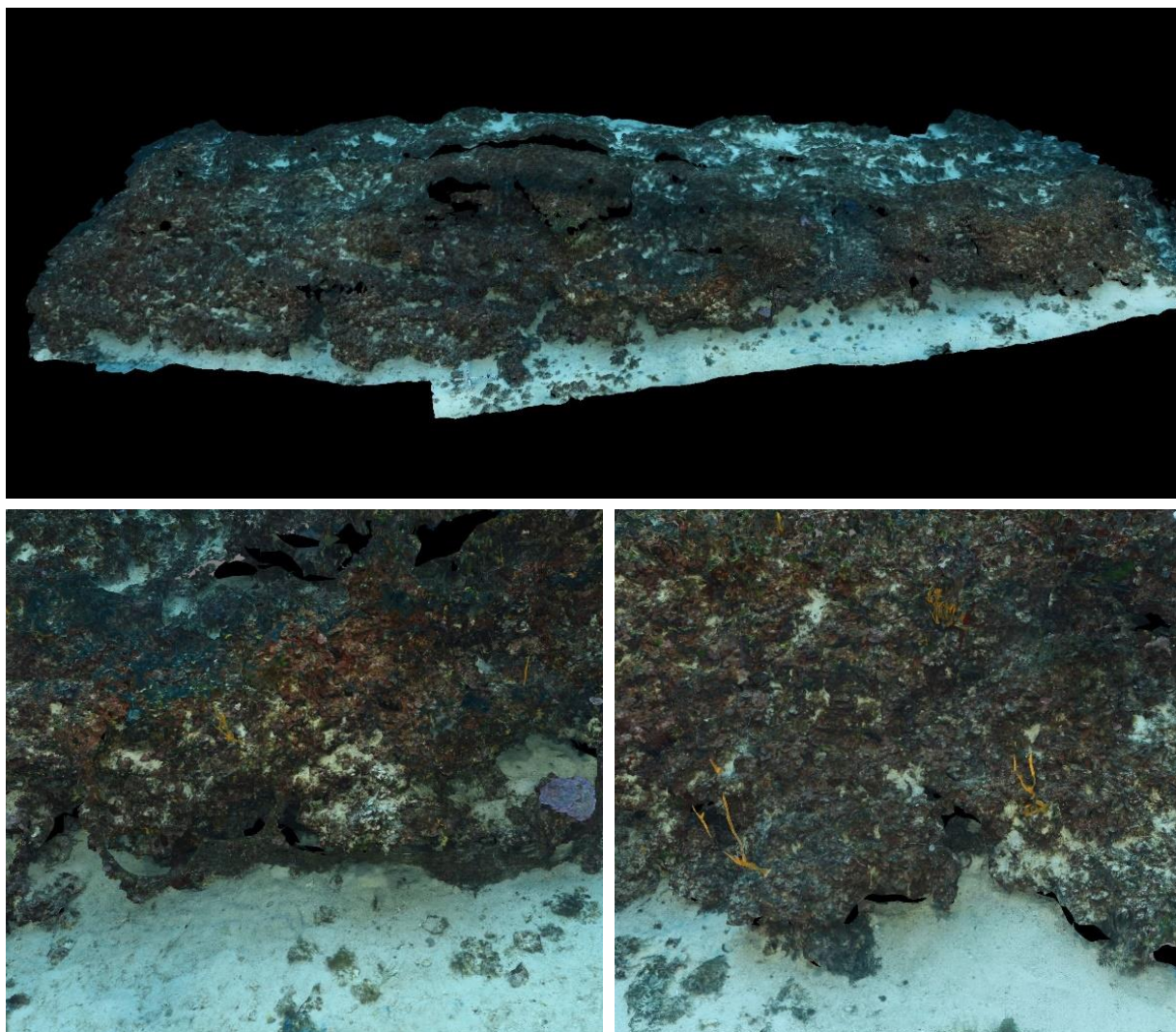


FIGURE 41 : MODELE DU SITE RECOR « MORTOLI »

### III.N. Morsiglia (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Morsiglia » a été construit à partir de 608 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

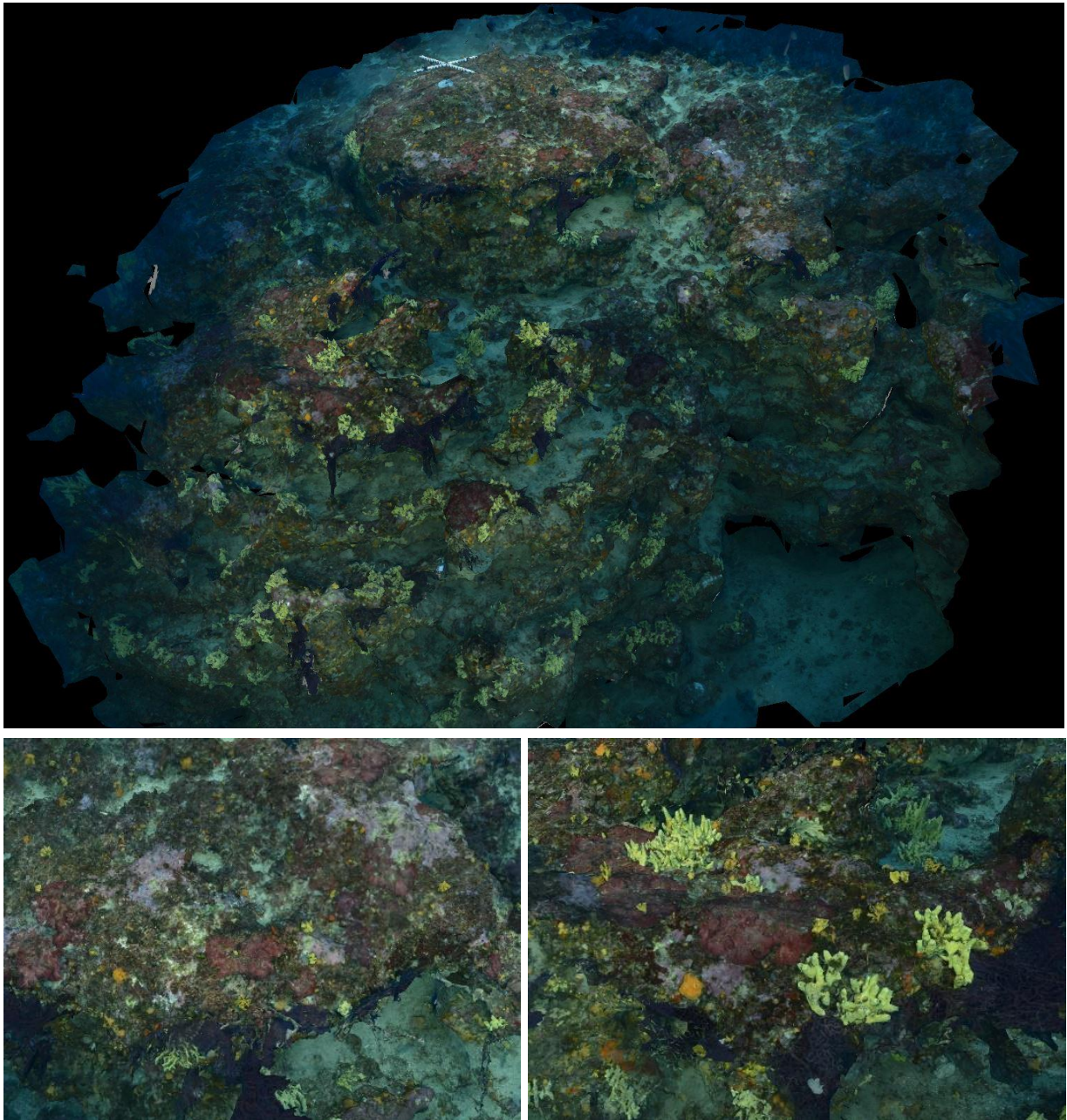


FIGURE 42 : MODELE DU SITE RECOR « MORSIGLIA »



### III.O. Parata

Le modèle 3D du site RECOR « Parata » a été construit à partir de 613 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

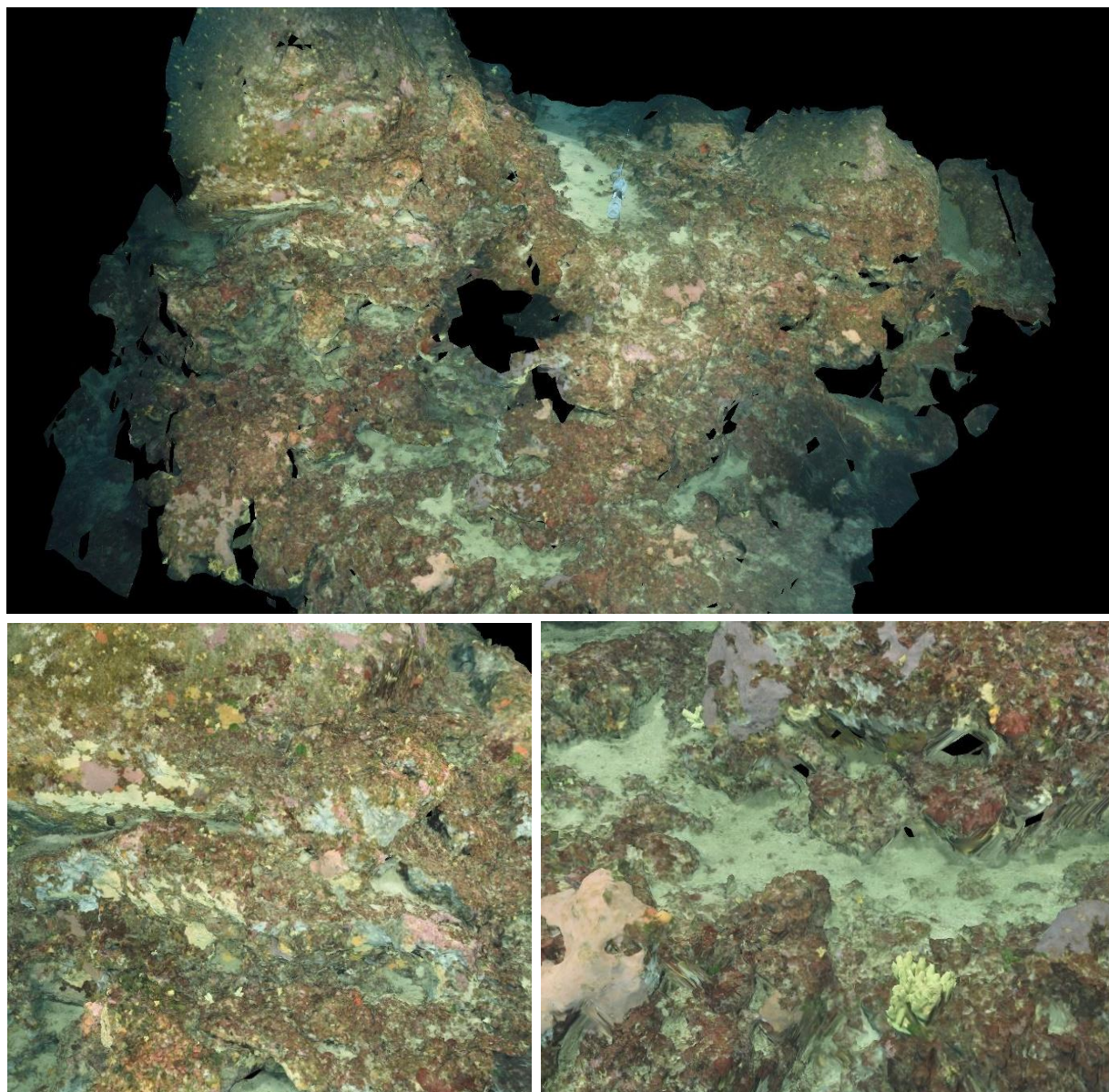


FIGURE 43 : MODELE DU SITE RECOR « PARATA »

### III.P. Revelatta

Le modèle 3D du site RECOR « Revelatta » a été construit à partir de 864 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

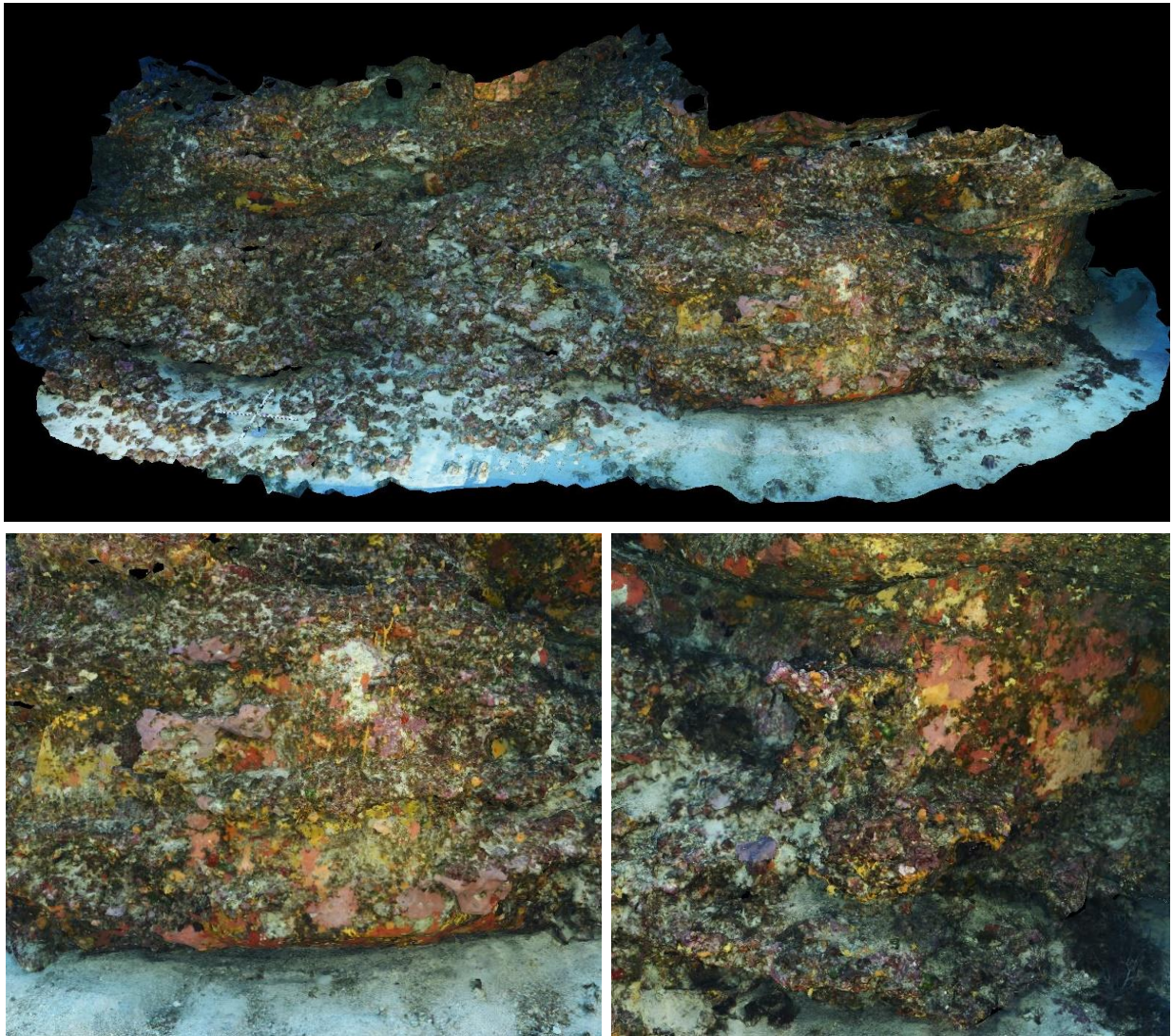


FIGURE 44 : MODELE DU SITE RECOR « REVELATTA »



### III.Q. Sanguinaires

Le modèle 3D du site RECOR « Sanguinaires » a été construit à partir de 807 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

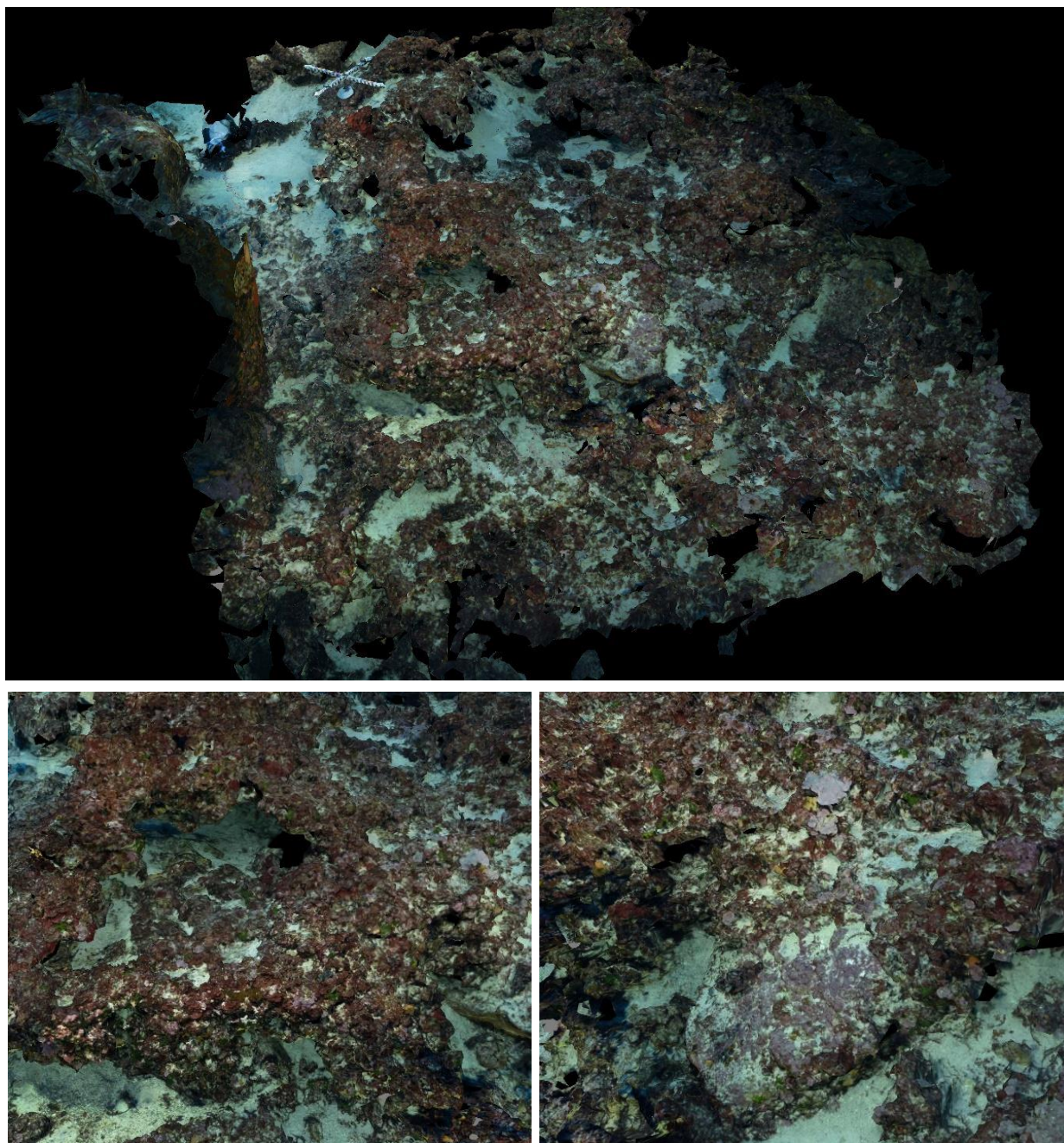


FIGURE 45 : MODELE DU SITE RECOR « SANGUINAIRES »

### III.R. Scandola-4

Le modèle 3D du site RECOR « Scandola-4 » a été construit à partir de 1057 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

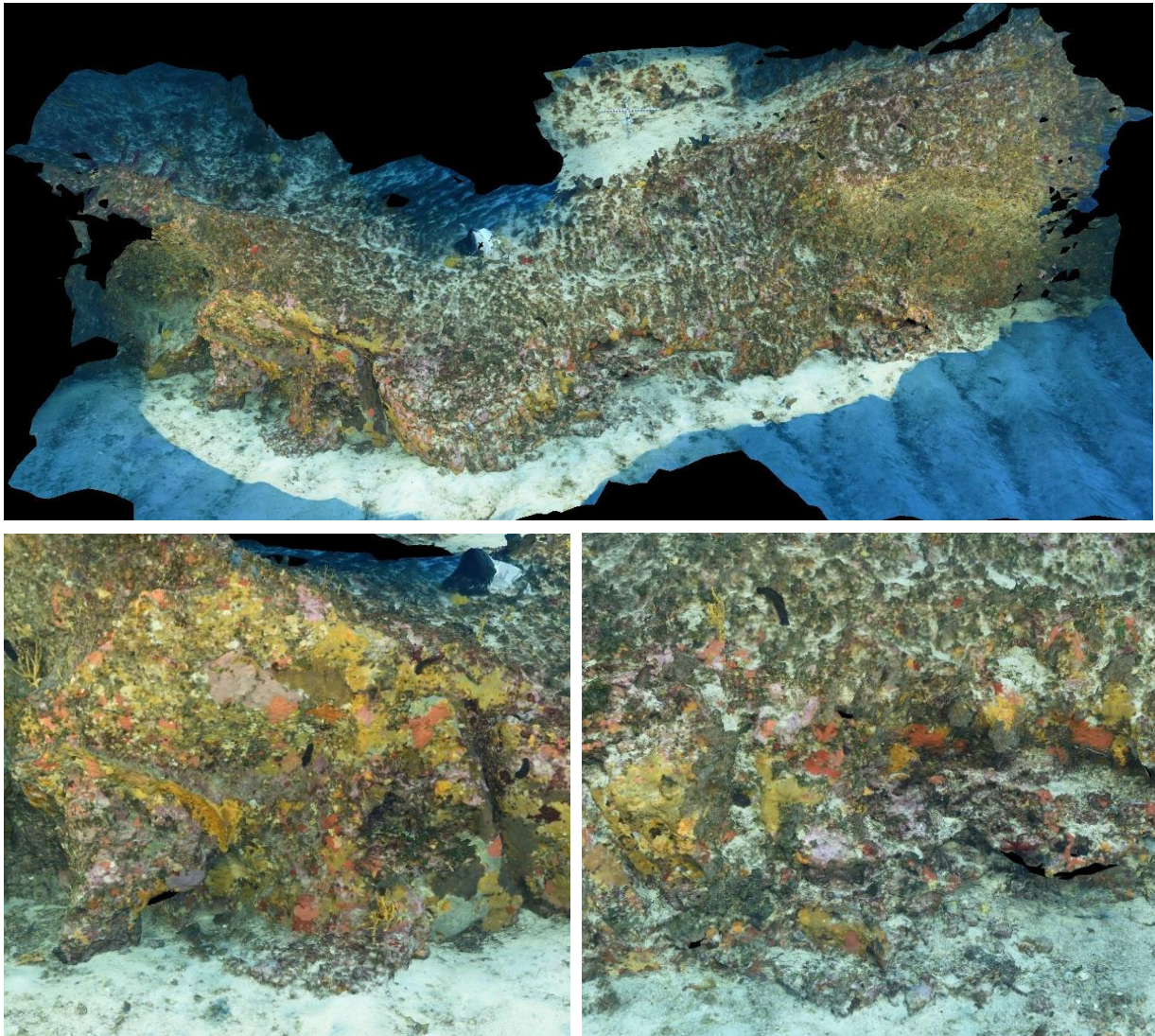


FIGURE 46 : MODELE DU SITE RECOR « SCANDOLA-4 »



### III.S. Senetosa

Le modèle 3D du site RECOR « Senetosa » a été construit à partir de 876 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

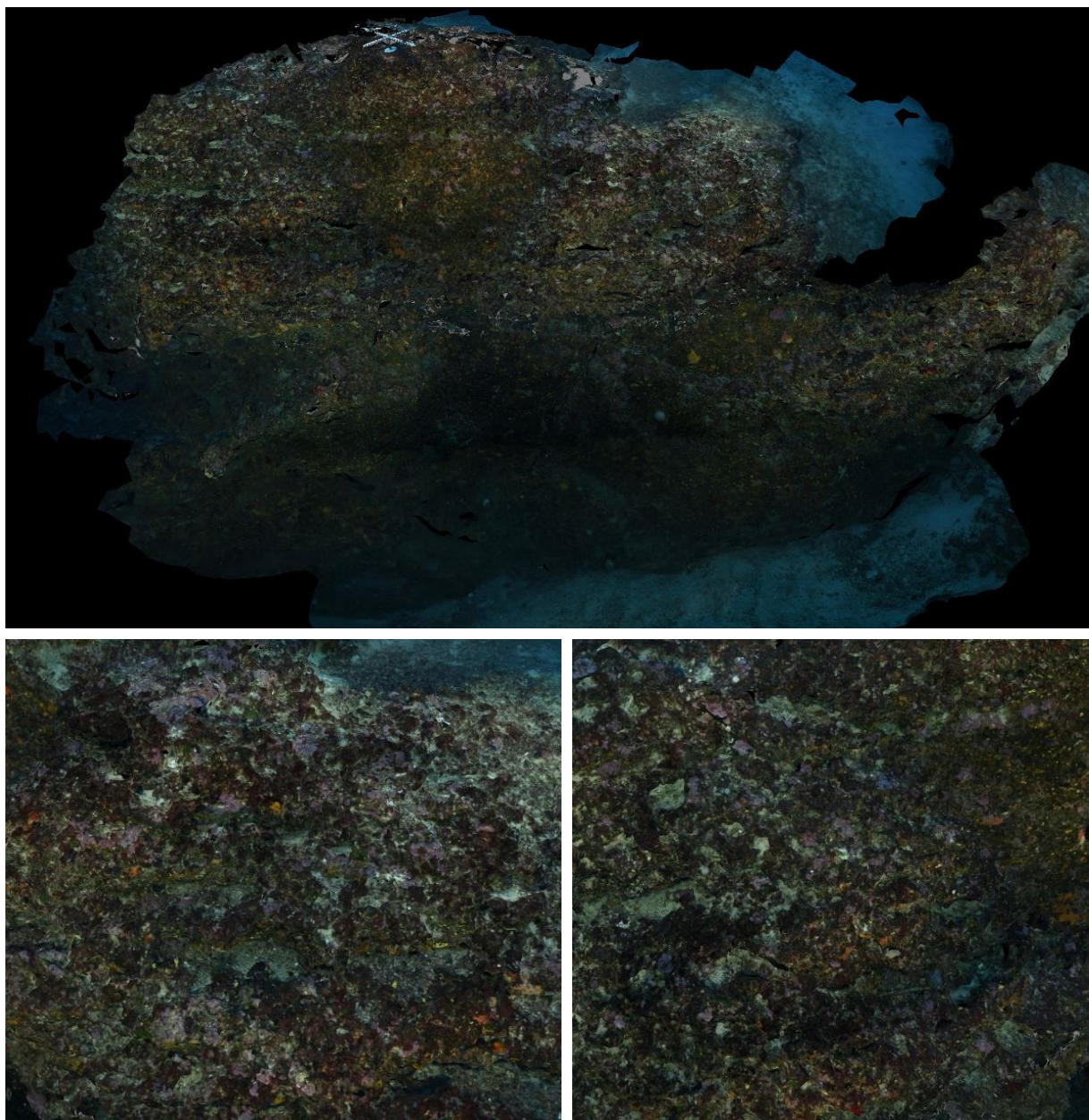


FIGURE 47 : MODELE DU SITE RECOR « SENETOSA »

### III.T. Saint Florent

Le modèle 3D du site RECOR « Saint Florent » a été construit à partir de 1716 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

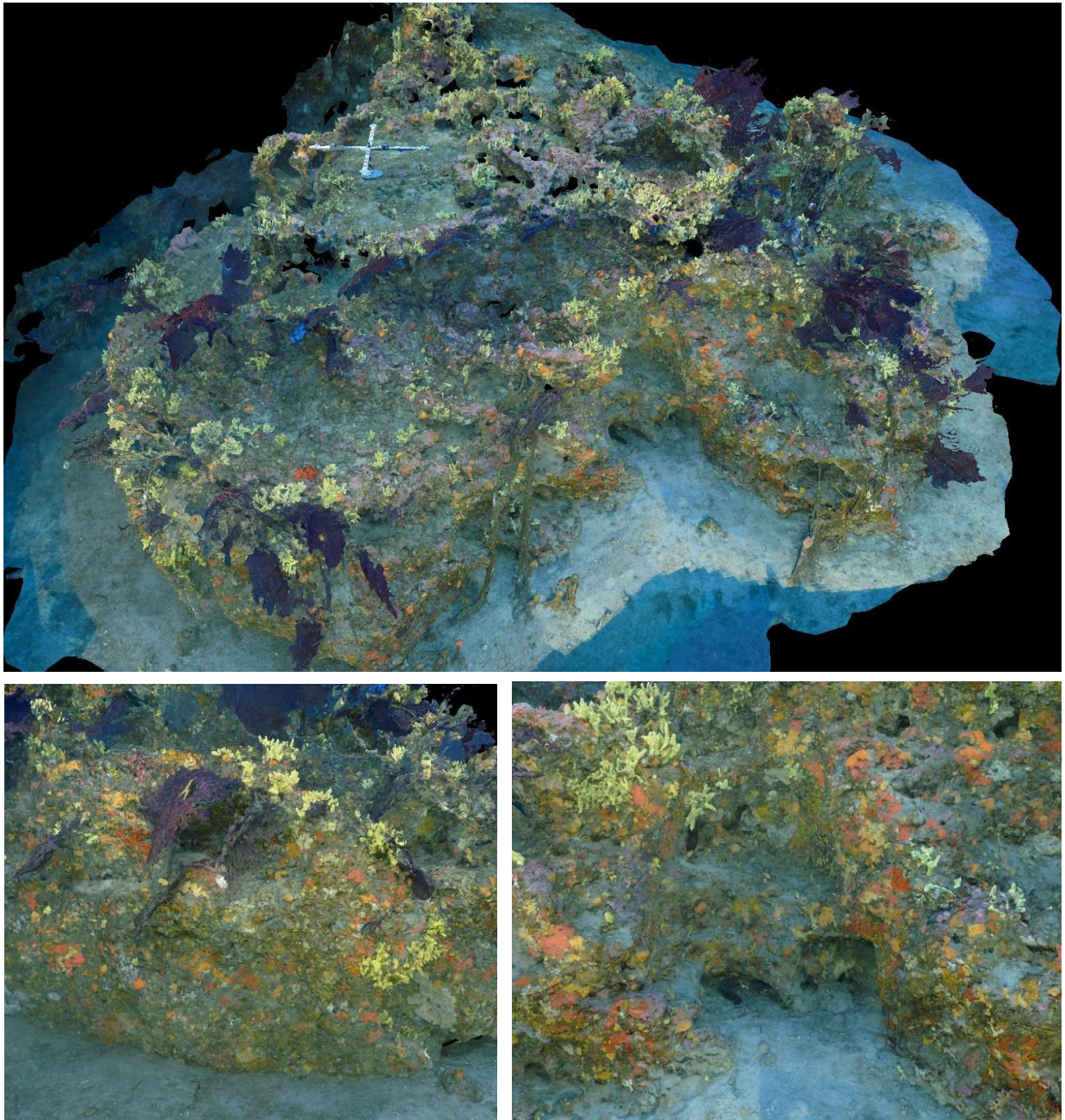


FIGURE 48 : MODELE DU SITE RECOR « SAINT FLORENT »



### III.U. Tarco

Le modèle 3D du site RECOR « Tarco » a été construit à partir de 668 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

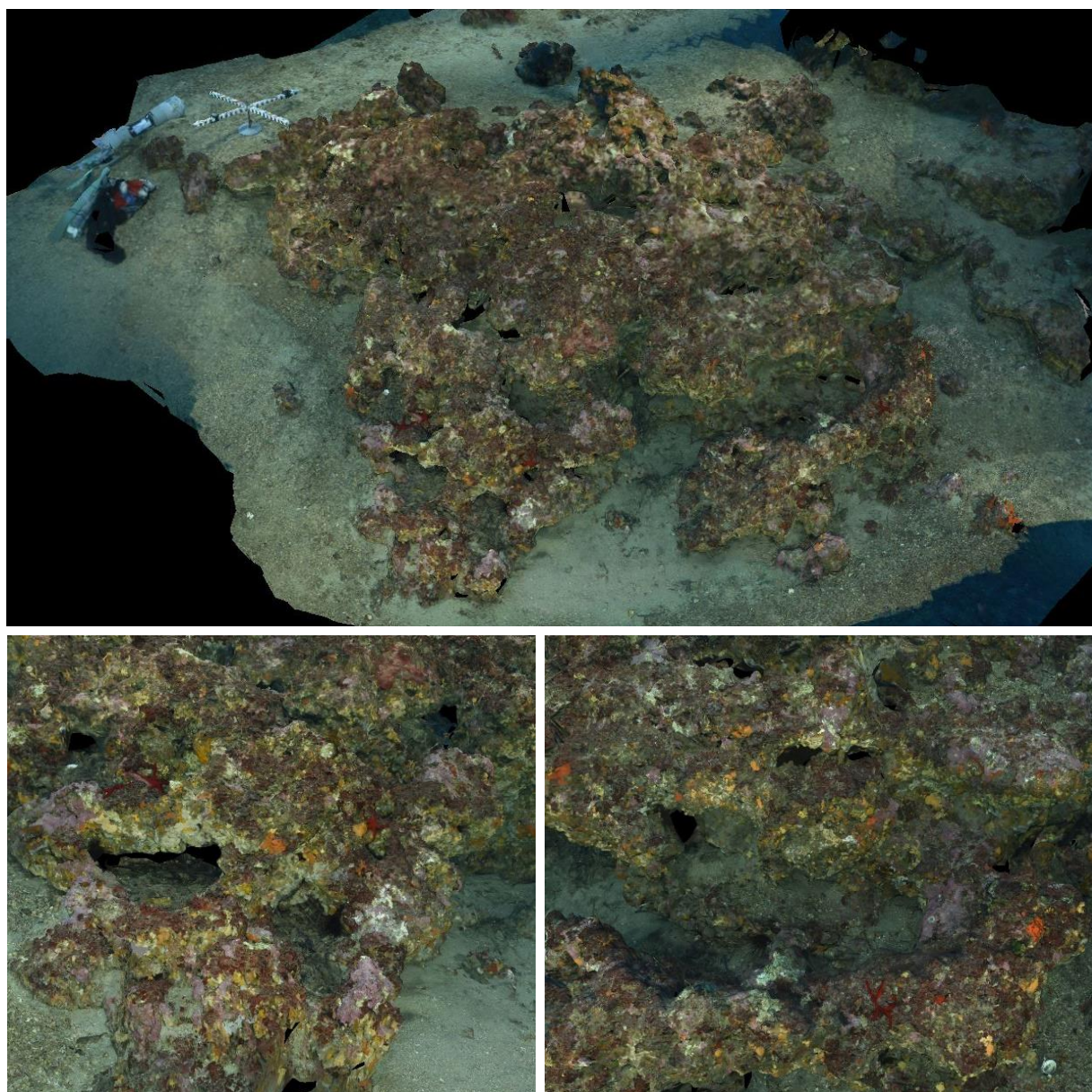


FIGURE 49 : MODELE DU SITE RECOR « TARCO »

### III.V. Vacca

Le modèle 3D du site RECOR « Vacca » a été construit à partir de 1297 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

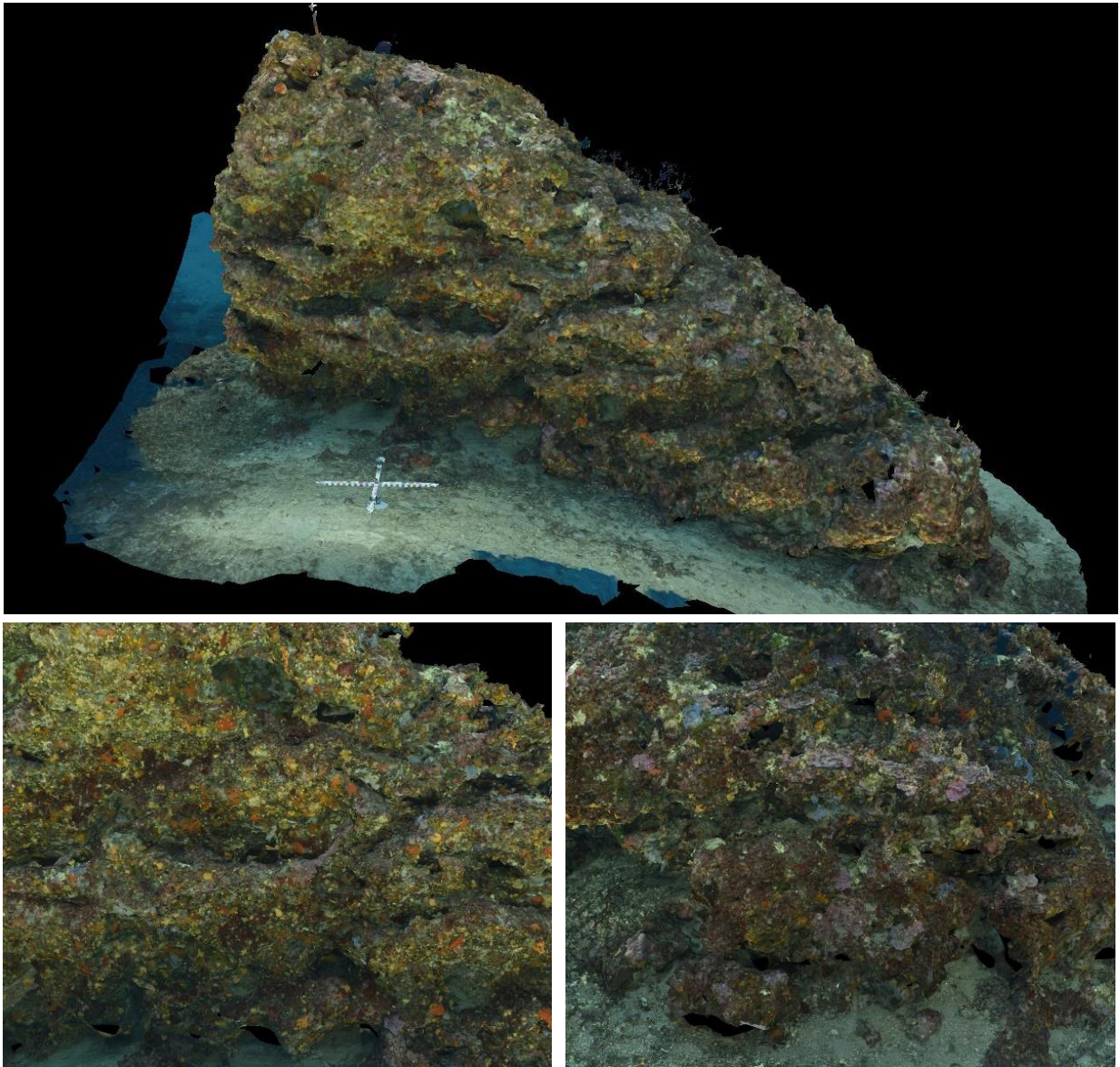


FIGURE 50 : MODELE DU SITE RECOR « VACCA »



# Chapitre 2

## Reconnaissance automatique d'espèces du coralligène



Ce chapitre présente les développements méthodologiques concernant la reconnaissance automatique d'espèces du coralligène par des réseaux de neurones convolutifs. Les détails de l'étude sont présentés dans le 1<sup>er</sup> chapitre de la [thèse de Guilhem Marre](#) (Andromède Océanologie / UMR TETIS / UMR MARBEC) et ont fait l'objet d'une [publication](#) dans la revue scientifique « Ecological Informatics » en 2020.

# Chapitre 2 : Reconnaissance automatique d'espèces du coralligène

## I. Contexte et objectifs

Compte tenu de la grande complexité des assemblages coralligènes et de la profondeur à laquelle ils se situent (12 à 120 m de profondeur, le plus souvent au-delà de 40 m), la méthode d'évaluation de leur biodiversité et de leur état de santé utilisée dans le réseau RECOR se base sur des quadrats photographiques. Pour chaque station suivie, un plongeur réalise **30 quadrats de 2500 cm<sup>2</sup>** distribués le long d'un transect, et un expert taxonomiste identifie les espèces qu'il observe pour **1920 points** aléatoirement distribués sur ces images (**64 points / quadrat**). Plus de détails sur le protocole disponible sur [Medtrix](#). A partir de ces identifications, il est possible de calculer des indicateurs de biodiversité et d'état de santé de chaque récif.

La figure suivante illustre l'acquisition et le traitement sous CPCe des quadrats photographiques :



FIGURE 51 : ILLUSTRATION DE L'ACQUISITION ET TRAITEMENT DES QUADRATS PHOTOGRAPHIQUES RECOR

L'annotation manuelle des quadrats est une tâche extrêmement chronophage, nécessitant par ailleurs une expertise rare. Compte tenu de la base de données disponible depuis les premières annotations en 2010, nous avons souhaité entraîner un algorithme de reconnaissance d'images basé sur des réseaux de neurones convolutifs afin d'automatiser l'annotation des quadrats photographiques.

## II. Données utilisées

Nous avons utilisé les données collectées et annotées dans le cadre de RECOR sur la **période 2010 – 2018**, correspondant à **198 stations localisées sur 121 sites géographiques** le long des côtes méditerranéennes françaises et italiennes (Sardaigne – deux zones). Les stations sont localisées entre 17 et 90 m de profondeur, certains sites pouvant correspondre à plusieurs stations à différentes profondeurs. La figure 52 illustre la localisation des **121 sites d'étude** :

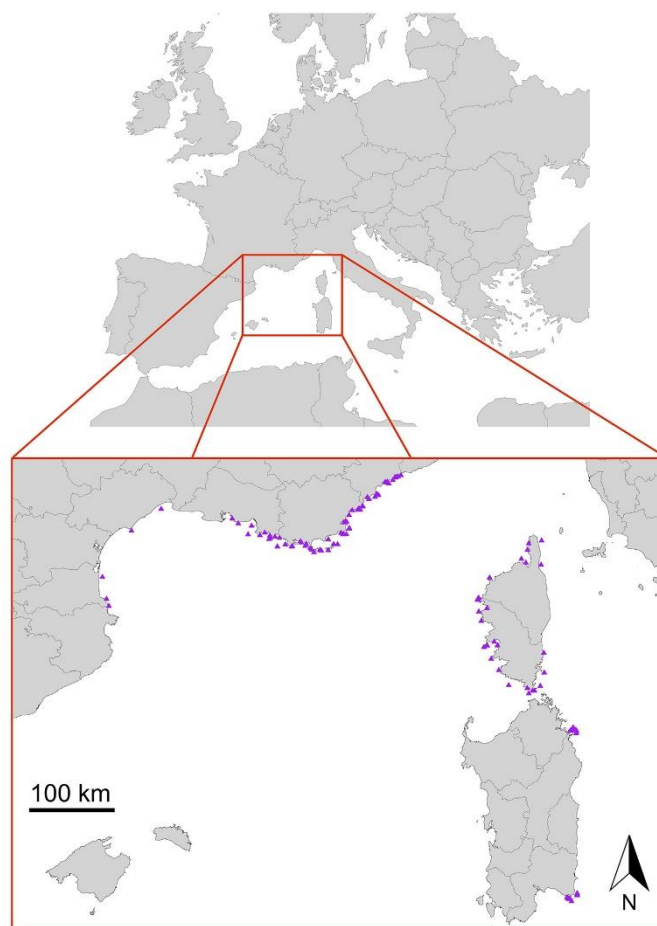


FIGURE 52 : LOCALISATION DES 121 SITES D'ETUDE (MEDITERRANEE FRANÇAISE ET SARDAIGNE)

Tous les quadrats photographiques ont été réalisés avec la même procédure, couvrant une surface de 2500 cm<sup>2</sup> et avec un éclairage artificiel par deux flashes latéraux, mais plusieurs appareils photographiques ont été utilisés sur la période 2010 – 2018 (Nikon D2Xs, D3, D3S et D810).

L'ensemble des données disponibles correspondait à **668 160 annotations** expertes réalisées sur 10 440 quadrats et appartenant à **208 classes distinctes** (une classe pouvant correspondre à des niveaux taxonomiques variables, allant de l'espèce au genre, voir au groupe d'espèces) (voir exemples figure 53). Compte tenu de la nécessité d'avoir suffisamment d'exemples pour entraîner correctement l'algorithme à reconnaître les espèces du coralligène, et de la grande variabilité du nombre d'annotations par classe (1 à plus de 100 000 selon les classes) nous avons conservé seulement les **61 classes** ayant **plus de 500 exemples** dans la base de données (à l'exception de la classe « nécrose érigée » qui ne contenait que 105 exemples, conservée pour son importance dans l'évaluation de l'état écologique du compartiment érigé). Enfin, nous avons supprimé les identifications de substrat datant des années 2010 – 2012 pour lesquelles nous n'avions pas la distinction entre sable, vase, sédiment grossier et substrat dur (premières années de mise en place du réseau RECOR).

Au final, le jeu de données contenait **349 370 annotations** appartenant à **61 classes**. Ce jeu de données a été séparé en trois jeux (1) d'entraînement, (2) de validation et (3) de test, dans les proportions respectives 80% / 10% / 10%.

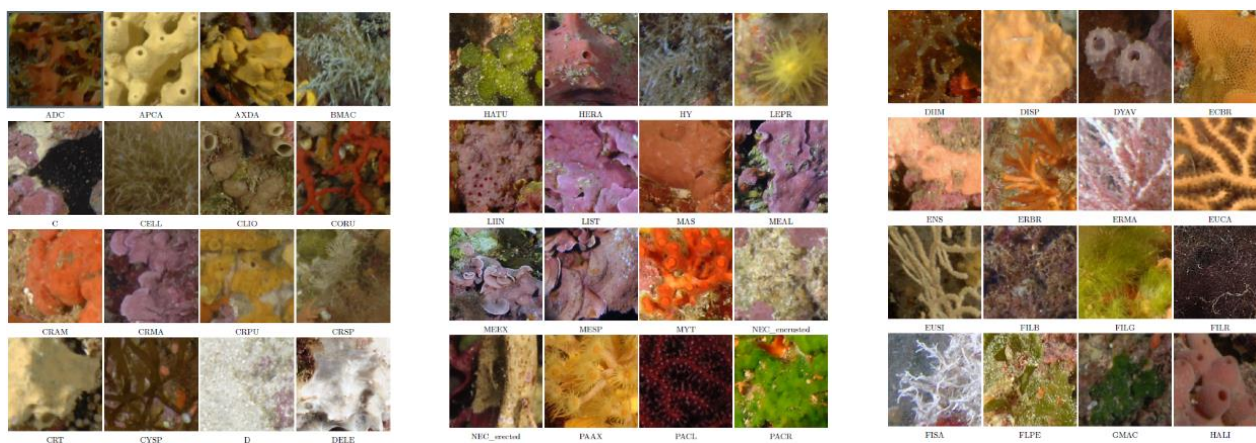
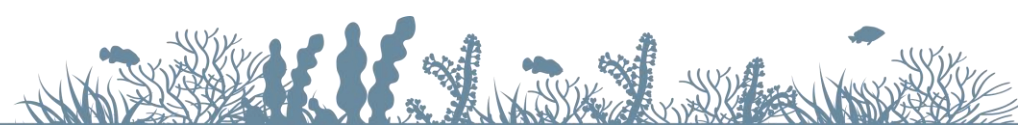


FIGURE 53 : EXEMPLES DE VIGNETTES ANNOTEES DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNEES RECOR

Sur les 61 classes retenues, 31 sont décrites au niveau spécifique, 10 au niveau du genre, 12 au niveau du phylum, et 8 au niveau de groupe d'espèces (catégorie majeure). Les relations taxonomiques entre ces différentes classes sont très complexes, certaines classes décrites au niveau spécifique pouvant appartenir à une autre classe décrite au niveau du genre ou du phylum (voir figure 54).



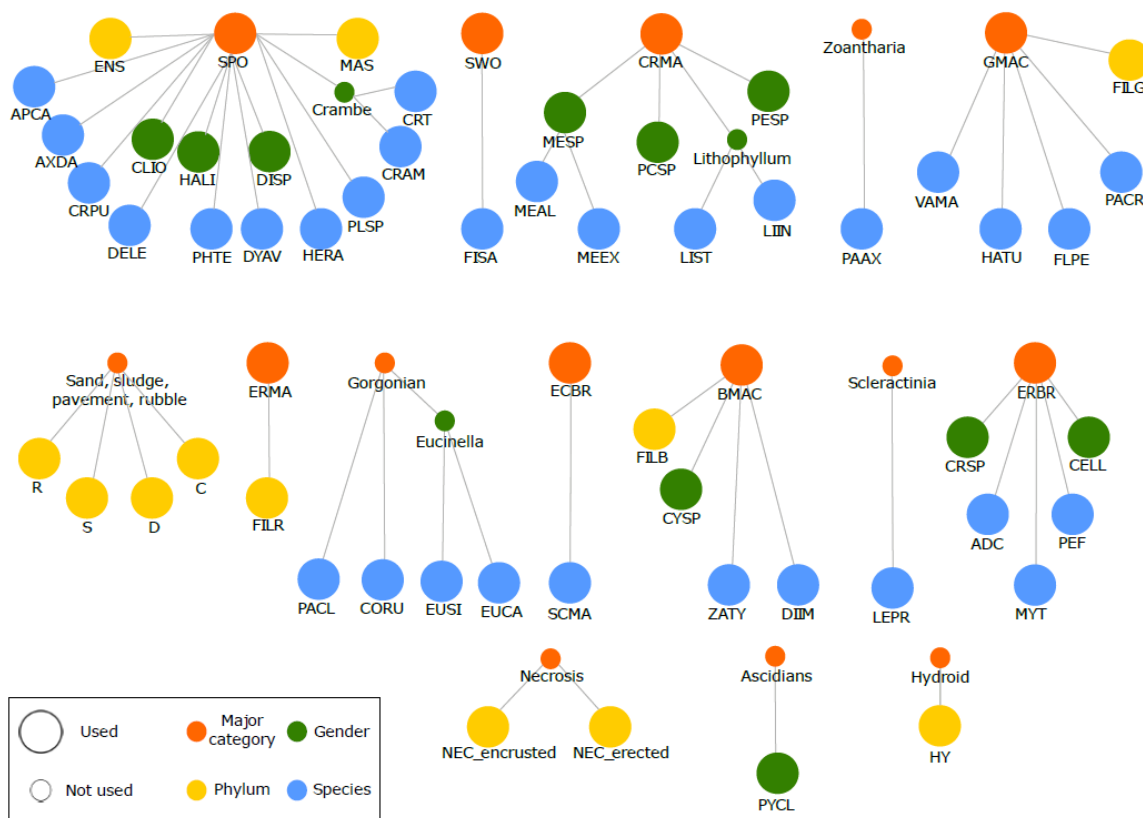
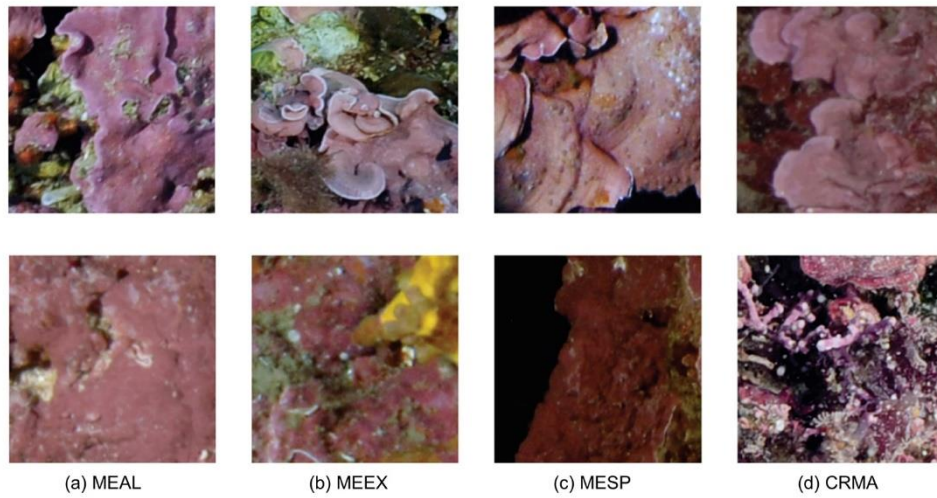


FIGURE 54 : RELATIONS TAXONOMIQUES ENTRE LES 61 CLASSES RETENUES. ADC = *ADEONELLA CALVETI*; APCA = *APLYSINA CAVERNICOLA*; AXDA = *AXINELLA DAMICORNIS*; BMAC = BROWN MACROALGAE; C = CREVICE; CELL = *CELLARIA SP.*; CLIO = *CLIONA SP.*; CORU = *CORALLIUM RUBRUM*; CRAM = *CRAMBE CRAMBE*; CRMA = ENCRUSTING RED MACROALGAE; CRPU = *CRELLA PULVINAR*; CRSP = *CRISIA SP.*; CRT = *CRAMBE TAILLIEZI*; CYSP = *CYTOSEIRA SP.*; D = SAND; DELE = *DENDROXEA LENIS*; DIIM = *DICTYOTA IMPLEXA*; DISP = *DICTYONELLA SP.*; DYAV = *DYSIDEA AVARA*; ECBR = ENCRUSTING BRYOZOAN; ENS = NON IDENTIFIED ENCRUSTING SPONGE; ERBR = ERECTED BRYOZOAN; ERMA = ERECTED RED MACROALGAE; EUCA = *EUNICELLA CAVOLINI*; EUSI = *EUNICELLA SINGULARIS*; FILB = FILAMENTOUS BROWN ALGAE; FILG = FILAMENTOUS GREEN ALGAE; FILR = FILAMENTOUS RED ALGAE; FISA = FILOGRANA OR *SALMACINA SP.*; FLPE = *FLABELLIA PETIOLATE*; GMAC = GREEN MACROALGAE; HALI = *HALICLONA SP.*; HATU = *HALIMEDA TUNA*; HERA = *HEXADELLA RACOVITZAI*; HY = HYDROZOA; LEPR = *LEPTOSAMMIA PRUVOTI*; LIIN = *LITHOPHYLLUM INCRUSTANS*; LIST = *LITHOPHYLLUM STICTAEFORME*; MAS = NON IDENTIFIED MASSIVE SPONGE; MEAL = *MESOPHYLLUM ALTERNANS*; MEEEX = *MESOPHYLLUM EXPANSUM*; MESP = *MESOPHYLLUM SP.*; MYT = *MYRIAPORA TRUNCATE*; NEC\_ENCUSTED = ENCRUSTED NECROSIS; NEC\_ERECTED = ERECTED NECROSIS; PAAX = *PARAZOANTHUS AXINELLAE*; PAEL = *PARAMURICEA CLAVATA*; PACR = *PALMOPHYLLUM CRASSUM*; PCSP = ENCRUSTING PEYSSONNELIA SP.; PEF = *PENTAPORA FASCIALIS*; PESP = ERECTED PEYSSONNELIA SP.; PHTE = *PHORBAS TENACIOR*; PLSP = *PLERAPLYSILLA SPINIFERA*; PYCL = *PYCNOCLAVELLA SP.*; R = RUBBLE; S = SLUDGE; SCMA = *SCHIZOMAVELLA MAMILLATA*; SPO = SPONGES; SWO = SEDENTARY WORMS; VAMA = *VALONIA MACROPHYSIA*; ZATY = *ZANARDINIA TYPUS*.

Comme les relations taxonomiques complexes entre les différentes classes le laissent présager, certaines classes « taxonomiquement imbriquées » peuvent ainsi partager des caractéristiques visuelles communes, ce qui ne simplifie pas la tâche de classification (voir figure 55).



**FIGURE 55 : ILLUSTRATION DES ASPECTS VISUELS DE 4 CLASSES TAXONOMIQUEMENT PROCHES ET AVEC UNE FORTE VARIABILITE MORPHOLOGIQUE INTRA-CLASSE. MEAL = *MESOPHYLLUM ALTERNANS*; MEEEX = *MESOPHYLLUM EXPANSUM*; MESP = *MESOPHYLLUM SP.*; CRMA = ENCRUSTING RED MACROALGAE.**

### III. Méthodologie

Bien que très riche, la base de données RECOR est contraignante par sa forme : les annotations sont **ponctuelles et non exhaustives** sur les quadrats. En effet, pour chaque annotation, l'expert taxonomiste fournit le **label pour une coordonnée XY** précise sur l'image, soit un pixel donné, et cela pour **64 pixels** dans l'image (64 points = couples de coordonnées XY). Or l'image est constituée de millions de pixels et peut contenir de nombreuses classes, annotées ou non selon que les points aléatoirement distribués sur l'image « tombent » sur chaque classe ou pas.

Compte tenu de cette contrainte, nous avons entraîné un algorithme à reconnaître des **vignettes extraites des quadrats**, centrées sur les points aléatoires annotés. Le centre de chaque vignette correspond donc au **pixel annoté**, et la classe associée est **assignée à la vignette entière**. Nous nous sommes basés sur l'architecture de réseaux de neurones convolutifs **ResNet18**, qui permet d'obtenir de bonnes performances de classification avec un coût d'entraînement relativement modeste (nombre raisonnable de paramètres à ajuster lors de l'entraînement). Pour rendre l'algorithme le plus **invariant** possible à la **taille des organismes** observés (qui peuvent être très variables selon les classes notamment), nous avons entraîné **plusieurs réseaux de neurones** sur quatre tailles de vignettes ( $64 \times 64$ ,  $96 \times 96$ ,  $128 \times 128$  et  $224 \times 224$  pixels). Le résultat final est produit par l'intégration des résultats bruts des 4 ResNet18 par un perceptron multicouche et une régression logistique, sous forme d'un ensemble de réseaux de neurones convolutifs (voir figure 56).

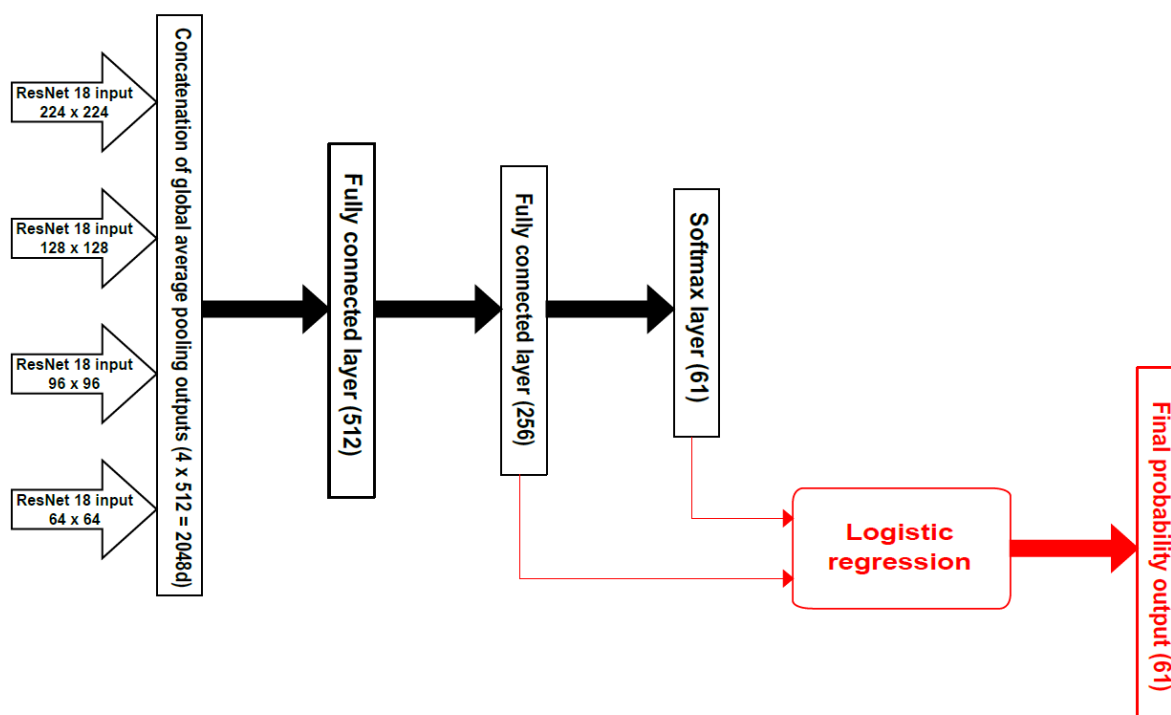


FIGURE 56 : STRUCTURE DE L'ENSEMBLE DE RESEAUX FINAL

Chaque ResNet18 est entraîné séparément, et l'ensemble de réseaux est ensuite entraîné en fixant les poids des quatre ResNet18 (ajustement des poids du perceptron multicouche uniquement). Enfin, la régression logistique sur les deux dernières couches de l'ensemble de réseaux est entraînée sur l'ensemble de réseaux final (voir la [publication](#) pour le détail de la procédure d'entraînement).

On entend par « **entraînement** » d'un réseau de neurones le **processus itératif** par lequel les paramètres internes à chaque réseau sont ajustés de manière à maximiser les performances prédictives du réseau (voir détail figure 57). A chaque itération, un petit nombre de vignettes est fourni au réseau de neurones, qui réalise ses prédictions, mesure son **erreur d'entraînement** en comparant la prédiction à la réalité et ajuste ses poids (i.e. paramètres). Une fois tout le jeu de données ainsi digéré (cela s'appelle « époque »), les cartes sont rebattues,

et le jeu de données est à nouveau découpé en petit lots de vignettes, qui seront évaluées, et ainsi de suite. A chaque fin d'époque, le réseau mesure son **erreur de prédiction** sur l'ensemble du **jeu d'entraînement** (qu'il « voit » par lots à chaque itération et entièrement à chaque époque), et sur le **jeu de validation** (qu'il ne « voit » qu'en fin d'époque). L'objectif est d'utiliser un gros jeu d'entraînement (d'où les 80 % du jeu de données total) pour permettre à l'algorithme d'apprendre à **extraire les caractéristiques** qui permettent de reconnaître chaque classe, et qu'il soit **capable de généraliser** son apprentissage à des données qu'il n'a toujours pas « vu », le jeu de validation.

A partir d'un certain nombre d'époques, l'algorithme parvient généralement à continuer de faire diminuer l'erreur d'entraînement, tandis que l'erreur de validation augmente, c'est le phénomène de « **sur-apprentissage** » : l'algorithme parvient à prédire de mieux en mieux les images qui lui servent d'apprentissage, comme s'il les apprenait par cœur, en perdant sa **capacité à généraliser**, i.e. reconnaître des images similaires mais qu'il n'a pas encore « vu ». L'apprentissage est arrêté lorsque l'erreur de validation est minimale. Les performances finales de l'algorithme sont alors mesurées sur le **jeu test**, encore jamais « vu » par le réseau de neurones.



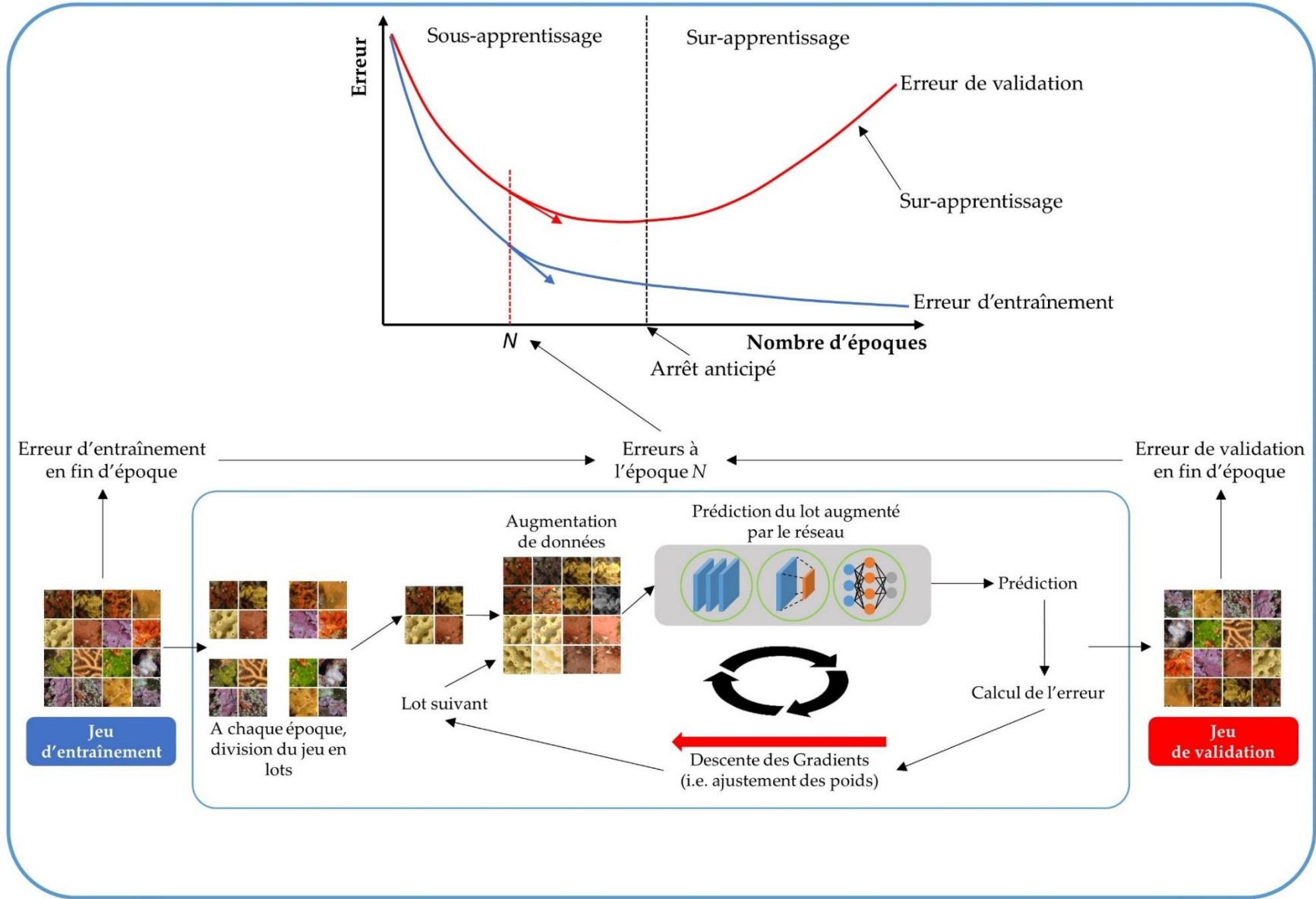


FIGURE 57 : VISION SCHEMATIQUE DE L'ENTRAÎNEMENT D'UN RESEAU DE NEURONES CONVOLUTIFS A RECONNAITRE UNE IMAGE.

Une fois l'entraînement de l'ensemble de réseaux terminé, nous avons souhaité voir si ses performances :

- Etaient semblables ou meilleures à celle d'un **expert taxonomiste** ;
- Augmentaient en réduisant le **problème à 15 classes majeures** (Ascidies, Bryozoaires encroûtant, Bryozoaires érigés, Macroalgues brunes, Macroalgues vertes, Macroalgues rouges encroûtantes, Macroalgues rouges érigées, Gorgones, Hydrozoaires, Nécroses, Scléactiniaires, Vers sédentaires, Eponges, Zoanthaires, Sédiment) ;
- Augmentaient en n'annotant que les vignettes pour lesquelles **l'algorithme est le plus confiant**, en laissant le reste à annoter par un expert taxonomiste (classification semi-automatique).

## IV. Résultats de l'algorithme de reconnaissance d'images basé sur des réseaux de neurones convolutifs

L'architecture finale sous forme d'un ensemble de quatre ResNet18, un perceptron multicouche et une régression logistique obtient **72,59 % de bonnes classifications sur le jeu test**, cela correspond à l'ordre de grandeur des performances d'un expert taxonomiste sur un problème en milieu corallien avec 20 classes, mesuré dans une étude (Beijbom et al., 2012). Les performances individuelles des réseaux unitaires augmentent avec la taille de la vignette en entrée, mais saturent à 224 × 224. L'ensemble de réseaux permet de gagner plus de 4 % de bonnes classifications, et l'ajout de la régression logistique 2 % supplémentaires (voir tableau 3).

TABLEAU 3 : PERFORMANCES COMPARATIVES DES DIFFERENTES VERSIONS DE L'ALGORITHME ENTRAINE

Performances de l'algorithme (% de bonnes classifications sur le jeu test)	
64 × 64	60,64 %
96 × 96	63,82 %
128 × 128	65,77 %
224 × 224	66,30 %
Ensemble	70,54 %
Ensemble + régression logistique	72,59 %
Ensemble + régression logistique sur les 15 classes majeures	84,47 %

Par ailleurs, en simplifiant le problème aux 15 classes majeures suscitées, l'algorithme dépasse les performances de l'expert taxonomiste (65 – 80 % sur 20 classes) avec **84,47 % de bonnes classifications** sur le jeu test. Si ces performances sont globalement très bonnes, elles varient entre les classes (voir figure 58), principalement à cause du nombre d'exemples dans la base de données (plus une classe possède d'exemples dans la base de données, mieux l'algorithme parvient à la reconnaître).

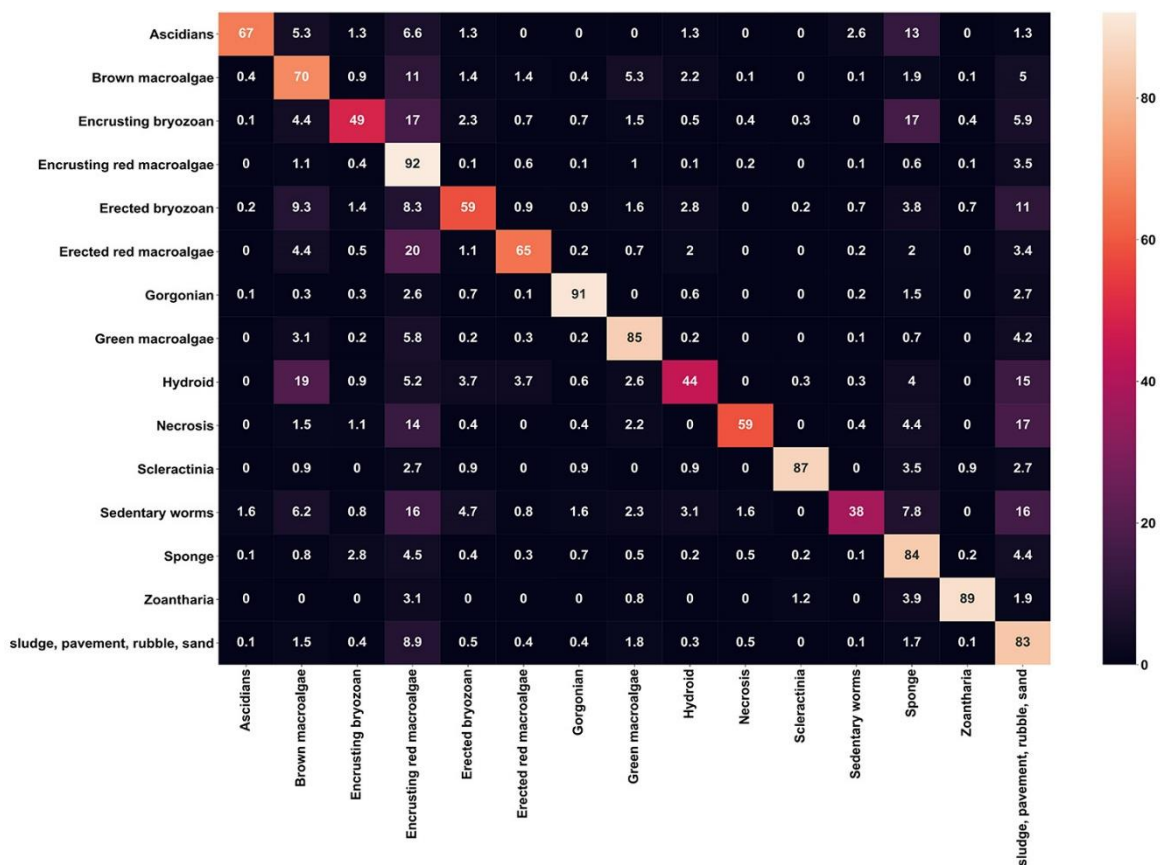


FIGURE 58 : MATRICE DE CONFUSION ENTRE LES CATEGORIES MAJEURES (% DE BONNES PREDICTIONS PAR CATEGORIE MAJEURE)

Les classes qui obtiennent les meilleurs résultats sont les algues rouges encroûtantes, les gorgones, les macroalgues vertes, les scléractiniales, les éponges, les zoanthaires et le substrat. Les classes qui obtiennent les moins bonnes performances sont les bryozoaires encroûtants, les hydrozoaires et les vers sédimentaires. Si ça n'est pas le seul facteur explicatif, le nombre d'exemples dans la base de données d'entraînement affecte largement les performances de l'ensemble de réseaux pour chaque classe, les classes les mieux représentées ayant globalement de meilleurs résultats ( $F1 \sim \log(\text{nombre de vignettes d'entraînement})$ ,  $p\text{-value} = 0.01$ ,  $R^2 = 0.15$ ) (voir figure 59).

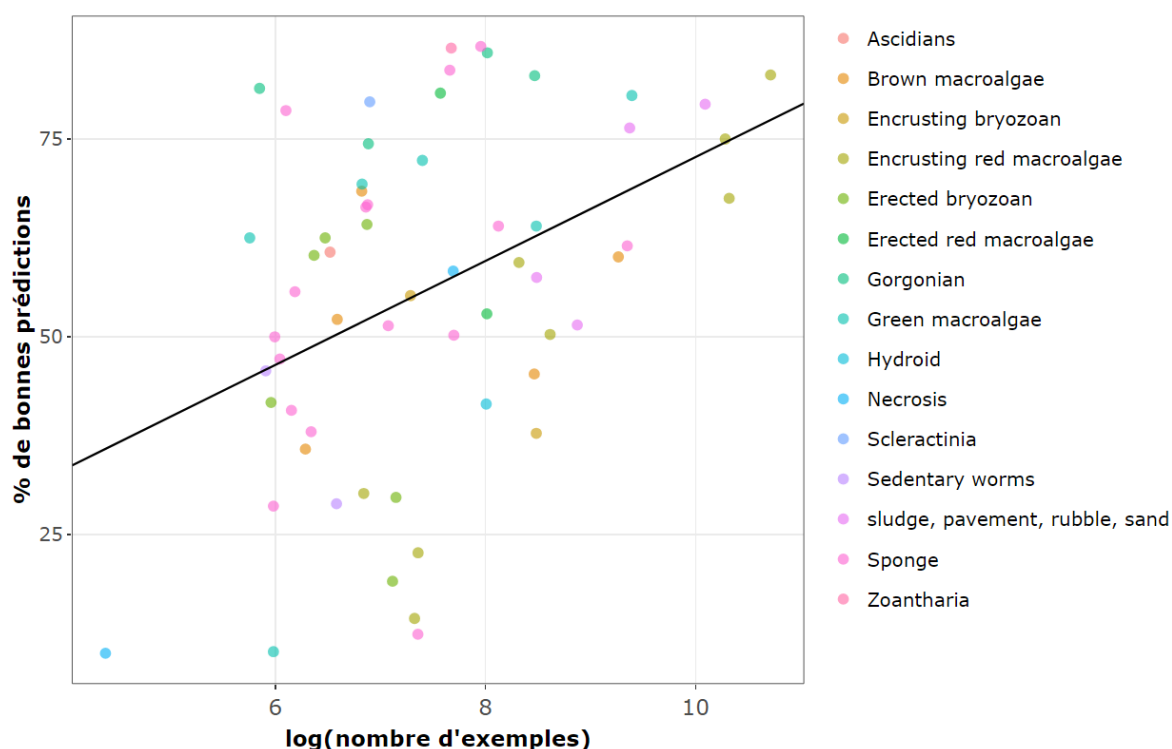


FIGURE 59 : PERFORMANCES INDIVIDUELLES DE CHAQUE CLASSE EN FONCTION DU NOMBRE D'EXEMPLES DANS LA BASE D'ENTRAINEMENT

Afin d'augmenter encore les performances de l'algorithme et de le rendre opérationnel dans un cadre de suivi des récifs coralligènes à grande échelle, nous avons rendu possible son utilisation de manière semi-automatique : l'algorithme ne classe que les vignettes dont il est « le plus sûr » et laisse ce qu'il reste à annoter à un expert taxonomiste. Plus l'on contraint l'algorithme à annoter une faible proportion du jeu de données et meilleurs sont les résultats (voir tableau 4). Avec environ 2/3 du jeu de données (67,48 %) annotés automatiquement, les performances atteignent 85 % de bonnes prédictions.

TABLEAU 4 : PERFORMANCES DE L'ALGORITHME EN CLASSIFICATION SEMI-AUTOMATIQUE AVEC DIFFERENTS SEUILS

Proportion du jeu test automatiquement annotée (%)	% de bonnes classifications pour les images automatiquement annotées	% de bonnes classifications parmi les 5 premiers choix de l'algorithme pour les images rejetées
100 %	72,59 %	-
93,17 %	75,76 %	81,75 %
80,62 %	80,74 %	88,16 %
67,48 %	85,65 %	91,06 %
51,90 %	91,3 %	92,71 %
33,72 %	95,8 %	94,16 %

La troisième colonne du tableau 2 correspond au pourcentage des images restant à analyser (rejetées par l'algorithme) pour lesquelles la bonne réponse est dans les cinq meilleures propositions de l'algorithme. En annotant environ 2/3 du jeu de données, la bonne réponse pour les images rejetées est dans les cinq meilleures propositions dans 91 % des cas. Cela permet d'envisager le développement d'une application d'annotation facile d'utilisation par l'expert, où pour chaque annotation rejetée par l'algorithme, celui-ci proposerait ses cinq meilleurs choix, le taxonomiste n'ayant « plus qu'à » choisir parmi les cinq (avec possibilité de saisir une espèce « autre » si le bon choix ne fait pas partie des cinq propositions).

Enfin, nous avons souhaité voir les performances de l'algorithme pour estimer automatiquement le CAI (Coralligenous Assemblage Index, (Deter et al., 2012a)) et l'indice de Shannon sur des assemblages coralligènes. Pour ce faire, nous avons tiré aléatoirement 10 000 tirages de 1 920 vignettes dans la base de données de test, que nous avons évalué par l'ensemble de réseau, et calculé les deux indicateurs pour ces tirages. Si la prédiction de l'indice de Shannon est bonne (coefficient de corrélation de Spearman : 0.74), elle est moins précise pour le CAI (coefficient de corrélation de Spearman : 0.61) (voir figure 60).

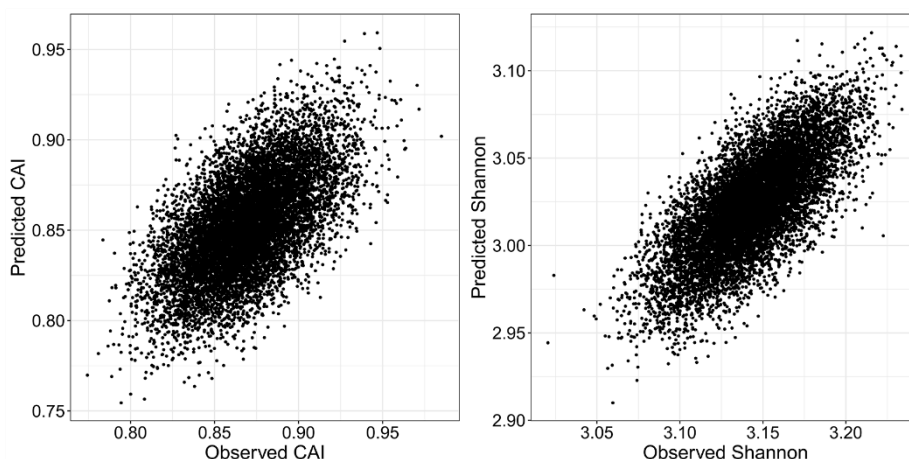


FIGURE 60 : ESTIMATION DU CAI ET DE L'INDICE DE SHANNON POUR LES 10 000 TIRAGES ALEATOIRES (CORRELATION DE SPEARMAN : CAI = 0.61, SHANNON = 0.74).

Le CAI est basé sur les valeurs d'envasement, de bryozoaires et d'espèces constructrices. Les résultats mitigés pour la prédiction du CAI semblent principalement dus à la capacité prédictive du réseau concernant la **vase** (confusion avec les autres classes de sédiments entres autres) et les **bryozoaires** (coefficient de corrélation de spearman : vase = 0.54, bryozoaires = 0.61 ; voir figure 61). Les espèces constructrices obtiennent de meilleurs résultats avec un coefficient de corrélation de spearman de 0.82.

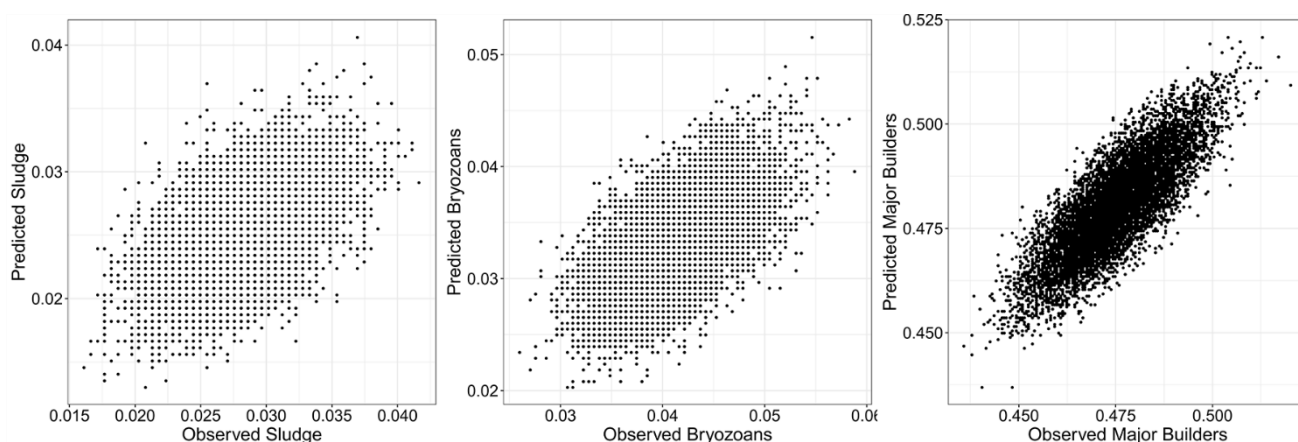


FIGURE 61 : ESTIMATION DES PROPORTIONS DE VASE, DE BRYOZOAIRES ET D'ESPECES CONSTRUCTRICES POUR LES 10 000 TIRAGES ALEATOIRES (CORRELATION DE SPEARMAN : VASE = 0.54, BRYOZOAIRES = 0.61 ET ESPECES CONSTRUCTRICES = 0.82).

En conclusion, l'algorithme de reconnaissance automatique des espèces du coralligène obtient des performances **satisfaisantes sur 61 classes** et semblables voire supérieures à celles d'un **expert taxonomiste sur 15 classes**. Les capacités prédictives sont variables selon les classes, ce qui ne permet pas de se servir de l'algorithme en l'état pour prédire précisément le CAI, à cause des performances moindres concernant la vase et les bryozoaires. En revanche, l'utilisation **semi-automatique** de l'algorithme permet de classer de manière automatique une **proportion significative d'un jeu de données avec de bonnes performances**, tout en laissant le soin à un **expert taxonomiste** d'annoter les vignettes plus rares ou difficiles à reconnaître.

## V. Adaptation de l'algorithme aux images de la photogrammétrie

### V.A. Problématique et objectifs

Afin de pouvoir automatiquement reconnaître les espèces du coralligène sur les modèles 3D reconstruits par photogrammétrie, nous souhaiterions pouvoir utiliser l'ensemble de réseaux de neurones précédemment développé. Le problème est que le réseau actuel est entraîné avec des images de la base de données RECOR. Ces quadrats photographiques sont pris dans des conditions standardisées et à distance réduite du récif (< 50 cm), or les images prises pour les reconstructions photogrammétriques sont généralement prises à **plus grande distance** (1.2 à 1.8 m) ce qui **change la taille des objets** à reconnaître ainsi que leur **coloration** (voir figure 62).

Nous avons créé un jeu de données restreint de **5760 identifications aléatoirement distribuées sur des images de la photogrammétrie sur trois sites RECOR** (identifications réalisées par Julie Deter, Andromède Océanologie) afin d'évaluer les performances du réseau de neurones sur les images de la photogrammétrie.

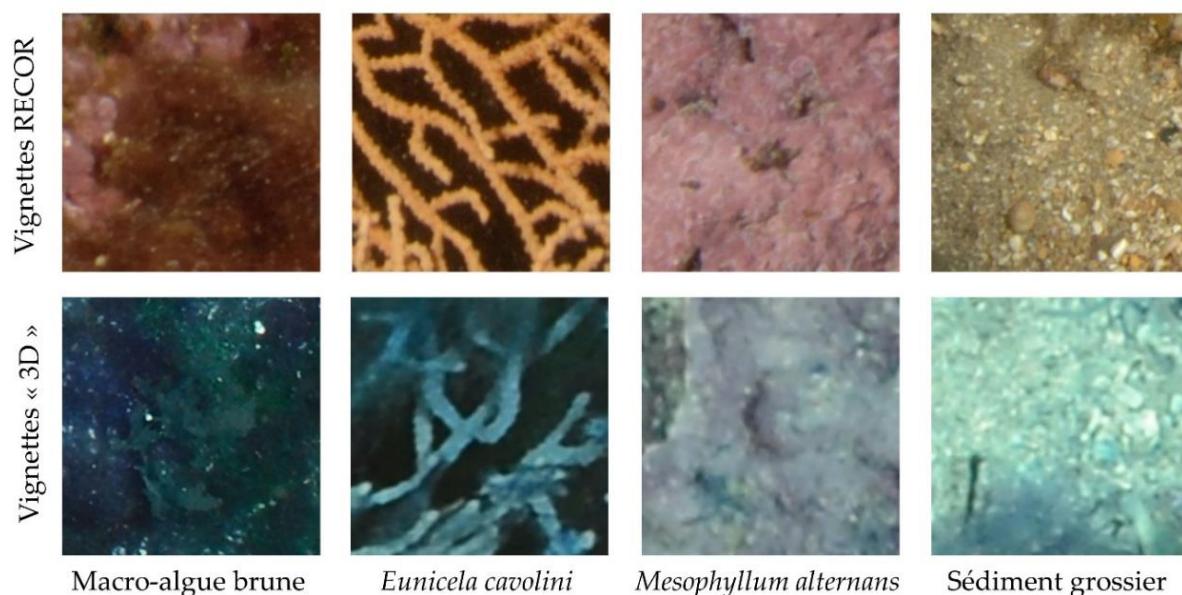


FIGURE 62 : ILLUSTRATION DES DIFFERENCES ENTRE VIGNETTES RECOR ET ISSUES DES IMAGES DE LA PHOTOGRAMMETRIE

Utiliser le réseau de neurones ainsi entraîné sur les images de la photogrammétrie sans ajustements préalables conduit nécessairement à une **baisse considérable de performances** (31,85 % de bonnes classifications vs 72,59 % sur les quadrats RECOR, voir tableau 5). Cependant, en évaluant non seulement la meilleure image sur laquelle apparaît le point 3D, mais également **toutes les images qui « voient » ce point**, en moyennant les scores par classe, nous obtenons une **légère amélioration** du nombre de bonnes classifications (33,81 % vs 31,85 %).

TABLEAU 5 : PERFORMANCES DE L'ALGORITHME UTILISE SUR LES QUADRATS RECOR OU SUR LES IMAGES DE LA PHOTOGRAMMETRIE (MEILLEURE VUE OU MULTI-VUES)

Classification	% de bonnes classifications
Quadrats RECOR	72,59 %
Photogrammétrie - meilleure vue	31,85 %
Photogrammétrie - multi-vue	33,81 %

Cependant, ces premiers résultats sont **fortement limités par la base de données de points 3D annotés** spécifiquement pour l'étude (seulement trois modèles ont été annotés avec 1 920 points échantillonnés aléatoirement sur les images de la photogrammétrie), nécessairement beaucoup plus limitée que la base de données RECOR ayant servi à entraîner l'algorithme. Par ailleurs, toutes les classes ne sont pas représentées dans ce jeu de données, ce qui ne permet pas de qualifier la précision du réseau par classe sur ce nouveau type de données et étudier les raisons précises de cette perte de performances. Nous avons ainsi tenté d'**ajuster les paramètres de l'algorithme** pour l'adapter aux images de la photogrammétrie.

### V.B. Méthodologie

« L'adaptation de domaine » correspond à **l'ajustement des paramètres** (i.e. poids) d'un réseau de neurones convolutifs à des données de même nature mais ayant des **distributions différentes** de celles utilisées pour son entraînement (colorimétrie, taille des objets...), afin de réaliser la même tâche que celle pour laquelle il a été entraîné. Les réseaux de neurones convolutifs sont constitués d'une partie « **extraction de descripteurs** » (blocs de convolutions) et d'une partie « **classificateur** » (réseau de neurones). L'adaptation par discrimination de domaine ou « Adversarial Discriminative Domain Adaptation » (Tzeng et al., 2017) vise à **ajuster les paramètres de la partie « extraction de descripteurs »** du réseau de neurones convolutifs entraîné sur le jeu de données initial (« domaine source ») de telle sorte à ce que les descripteurs produits sur le nouveau jeu de données (« domaine cible ») soient très similaires aux descripteurs produits par le réseau source sur les données source. Pour ce faire, la méthode ajuste les paramètres jusqu'à ce qu'un **discriminateur ne parvienne plus à faire la différence** entre un vecteur de descripteurs issus d'une image du domaine source ou du domaine cible (voir figure 63). La partie « extraction de descripteurs » ainsi adaptée aux nouvelles données, il est théoriquement possible d'utiliser la partie « classificateur » inchangée pour déterminer à quelle classe appartient l'image en entrée. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas d'images labellisées pour le domaine cible. Bien entendu, il est **indispensable d'avoir un jeu de données test** afin d'évaluer les performances finales du réseau adapté.

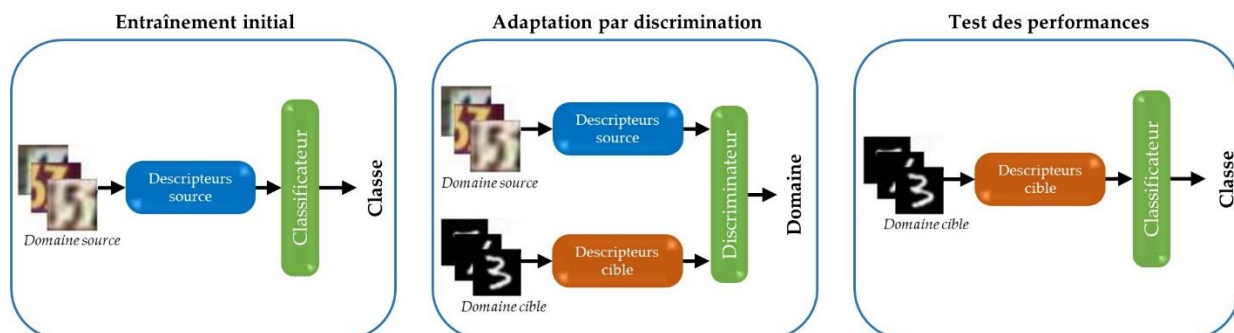


FIGURE 63 : ADAPTATION DE DOMAINE PAR DISCRIMINATION (ADAPTE DE (TZENG ET AL., 2017)).

## V.C. Résultats

Les résultats de cette première tentative d'adaptation de domaine n'ont malheureusement pas été probants, avec des **performances finales comparables à une classification aléatoire** des images laissant supposer un « **catastrophic forgetting** » (Kemker et al., 2018) (i.e. l'ajustement des poids du modèle a conduit à l'oubli de ce que le réseau avait appris) ou une incapacité du modèle à traiter les images de la photogrammétrie telles qu'elles. Cependant, nous voyons deux limitations pouvant expliquer ces résultats :

- Les vignettes extraites des images de la photogrammétrie ont été utilisées sans filtrer sur la distance à l'objet, ni mises à l'échelle pour conserver les mêmes proportions que les vignettes extraites des quadrats RECOR. La nature des données (**taille des objets** et leur **colorimétrie**) peut s'en retrouver tellement différente que **l'adaptation de domaine est impossible** ;
- L'évaluation des performances finales est **limitée par le jeu de données annotées** dont nous disposons. En effet, ce jeu de données ne représente « que » 5760 vignettes échantillonnées sur seulement trois sites RECOR, et ne couvrent ni l'ensemble des 61 classes apprises par le réseau ni leur variabilité intra-classe.

## V.D. Perspectives

Le principal problème que nous avons rencontré concernant l'adaptation de l'algorithme aux images de la photogrammétrie est le **manque de données 3D annotées** (seulement trois sites annotés, soit peu de diversité et au total seulement 5760 points). L'annotation d'images est très coûteuse en temps et nécessite une expertise rare sur ces assemblages complexes, et les annotations sur les quadrats RECOR représentent déjà une grande quantité de travail chaque année.

Cependant, grâce à nos connaissances techniques et théoriques acquises depuis 2016, ainsi qu'à l'amélioration des algorithmes de Agisoft Metashape, nous sommes récemment parvenus à **aligner des quadrats RECOR sur un modèle 3D** du même site. En réalisant quelques tests, il semblerait que cela ne fonctionne pas pour tous les quadrats ni tous les sites, mais en généralisant la méthode à l'ensemble des modèles 3D RECOR réalisés depuis 2016, nous constituerons une **base de données de points 3D annotés suffisamment importante** pour espérer réussir à adapter correctement l'algorithme aux images de la photogrammétrie. En effet, une fois les quadrats repositionnés dans l'espace, il est possible de projeter les annotations RECOR réalisées sur chaque quadrat sur la surface du modèle et ainsi produire un point 3D annoté. A partir d'un point, il est ensuite possible de récupérer l'ensemble des images sur lesquelles ce point apparaît et les coordonnées XY correspondantes dans chaque image. A partir de ces projections, il est possible d'extraire les vignettes centrées sur le point, qui permettront de nourrir l'adaptation de l'algorithme.

A partir de cette grande base de données, il sera possible d'adapter l'algorithme de trois manières :

- **Adaptation de domaine** avec le Generative Adversarial Network, ayant précédemment échoué potentiellement à cause du manque de données ;
- **Ajout des vignettes « 3D » à la base d'entraînement** pour ajuster les paramètres de l'algorithme et le rendre performant quelle que soit l'origine des données ;
- **Entraînement d'un autre réseau de neurones** de type **auto-encodeur** pour pré-traiter les images « 3D » et les rendre similaires aux images RECOR, et les faire évaluer avec l'algorithme actuel.

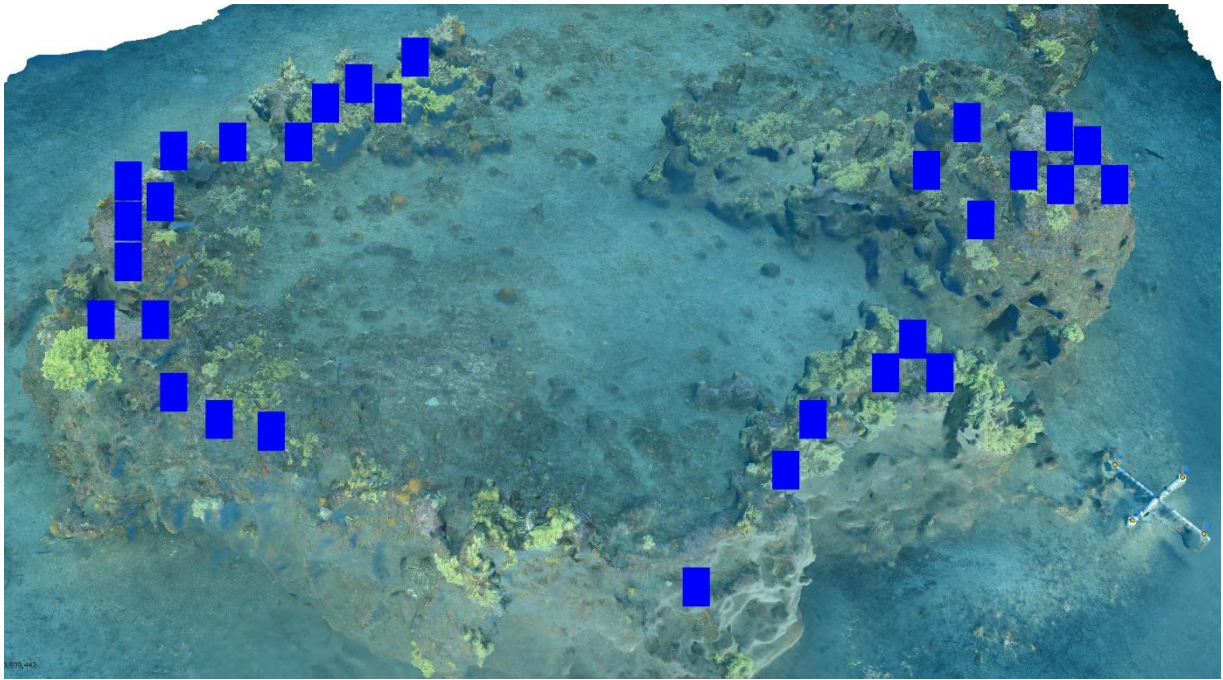


FIGURE 64 : VUE GLOBALE D'UN SITE RECOR A -65 M RECONSTITUE EN 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE EN 2020 ET ALIGNEMENT DES 30 QUADRATS REALISES (RECTANGLES BLEUS) POUR LA STATION RECOR A -65 M.

Quelle que soit la méthode finalement employée, plusieurs stratégies déjà envisagées pourraient permettre de maximiser le taux de bonnes classifications :

- **Extraction des vignettes « 3D »** en tenant compte de la **dimension réelle du pixel de l'image** (en mm / pixel) pour produire une vignette de **même étendue spatiale** que les quadrats RECOR (224 x 224 pixels sur une image prise à 40 cm du récif correspondent à une vignette plus petite sur une image prise à 1,5 m du récif). La vignette extraite, de taille inférieure à 224 x 224, sera étendue à une taille de 224 x 224 pixels pour coller à l'étendue spatiale du réseau initial ;
- Classification « **multi-vues** » comme déjà testé en fin de partie précédente, celle-ci permettant potentiellement de rendre la classification plus **robuste à certaines perturbations** (passage d'un poisson, ombre d'une gorgone...), en pondérant potentiellement les scores par **l'inverse de la distance** à l'objet (une image prise de près aura plus de poids qu'une image prise de plus loin) ;
- Selon les résultats obtenus, il sera envisagé **d'ajuster la procédure d'acquisition photogrammétrique** sur les récifs coralligènes pour éventuellement **réduire la surface numérisée** sur chaque site mais au profit d'une **distance réduite** et d'une **qualité supérieure** des images.

# Chapitre 3

## Caractérisation et suivi des récifs coralligènes par photogrammétrie



Ce chapitre présente les développements méthodologiques concernant les suivis spatio-temporels de récifs coralligènes par photogrammétrie, notamment l'étude de leur structure en lien avec leur biodiversité. Les détails concernant l'étude de la structure des récifs coralligènes sont disponibles dans le 4<sup>ème</sup> chapitre de la [thèse de Guilhem Marre](#) (Andromède Océanologie / UMR TETIS / UMR MARBEC).

## Chapitre 3 : Caractérisation et suivi des récifs coralligènes par photogrammétrie

### I. Caractérisation structurelle des récifs

#### I.A. Contexte et objectifs

Plusieurs études ont montré qu'il existait un lien entre la **complexité structurelle des récifs coralliens** et la **diversité / abondance des coraux et poissons** qu'ils abritent (Kovalenko et al., 2012; Graham and Nash, 2013; Darling et al., 2017). Inversement, il a été montré qu'une **perte de complexité structurelle** des récifs coralliens suite à une destruction de l'habitat engendrait une **perte de biodiversité** (Ferrari et al., 2016). Cousins des récifs coralliens, les **récifs coralligènes** présentent eux aussi des **architectures complexes**, une **très forte biodiversité** et des **conditions environnementales hétérogènes** garantissant de nombreuses niches écologiques (Johnson et al., 2003; Willis et al., 2005; Ballesteros, 2006; Kipson et al., 2011). Pourtant, aucune étude ne porte sur l'analyse des liens entre la structure de ces récifs et la diversité d'espèces qui le composent et qu'il abrite. Par ailleurs, les seules études à notre connaissance qui portent sur la complexité structurelle des récifs coralligènes ont estimé la structure à partir des assemblages d'espèces observées et non pas à partir de mesures 3D (Sartoretto et al., 2017; Valisano et al., 2019).

Les objectifs de cette étude sont de :

1. **Explorer les différentes facettes de la complexité structurelle** des récifs coralligènes en utilisant des métriques structurales calculées sur des modèles photogrammétriques ;
2. **Définir des morphotypes** objectifs à partir de ces métriques structurales ;
3. Explorer les liens entre la **structure** et les **assemblages coralligènes** ;
4. Explorer les liens entre la **structure** et les **conditions environnementales**.

#### I.B. Données

##### I.B.1. Structure

Nous avons utilisé les données RECOR de 39 stations suivies en juin 2018 et 2019, situées entre 17 et 77 m de profondeur (voir figure 65), pour lesquelles nous avons à disposition les modèles 3D correspondant à la zone couverte par les quadrats photographiques. La surface des modèles 3D, reproduits par photogrammétrie, s'échelonne entre 31 et 433 m<sup>2</sup>.

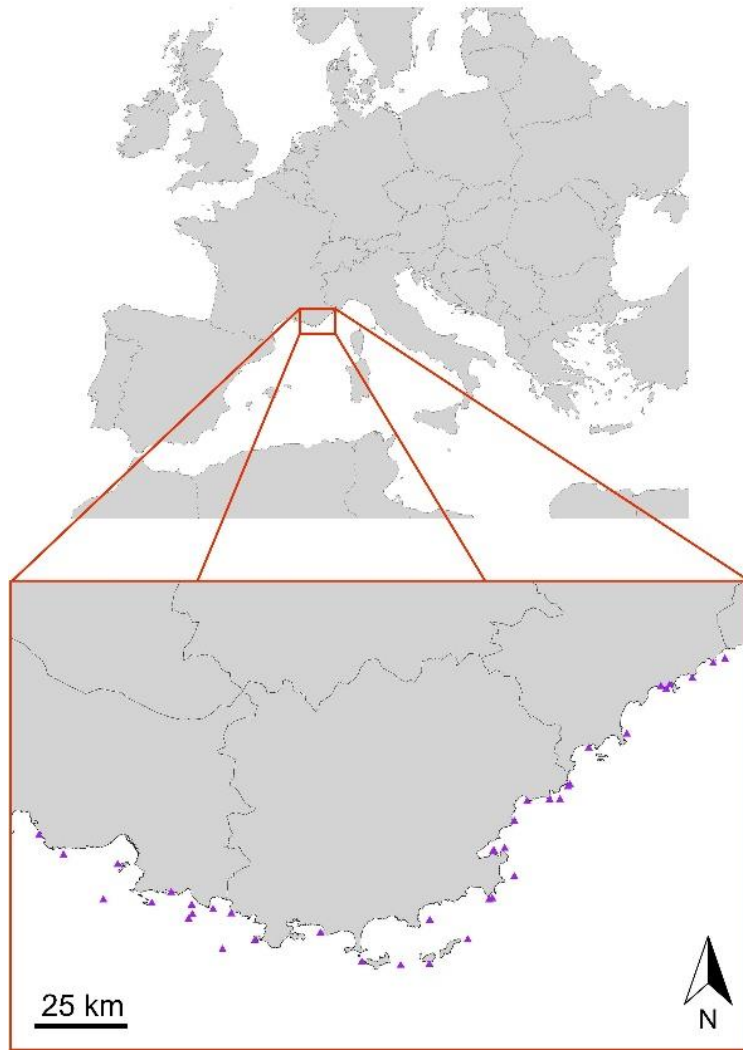


FIGURE 65 : LOCALISATION DES 39 SITES D'ETUDE

Pour chaque modèle, nous avons échantillonné 10 000 points / m<sup>2</sup> (soit environ 1 point / cm<sup>2</sup>) à l'aide du logiciel CloudCompare Version 2.10 (CloudCompare, GPL software, 2018). Nous avons ensuite calculé les paramètres structuraux suivants :

- **Indice de rugosité** pour tous les points de tous les modèles, avec CloudCompare, avec **différentes tailles de noyau** (voisinage) : 0,02 – 0,05 – 0,1 – 0,15 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,75 – 1m
- **Dimension fractale F** de chaque modèle, calculé sous R (R Core Team, 2020) avec une version adaptée du « box counting algorithm » (Liebovitch and Toth, 1989).

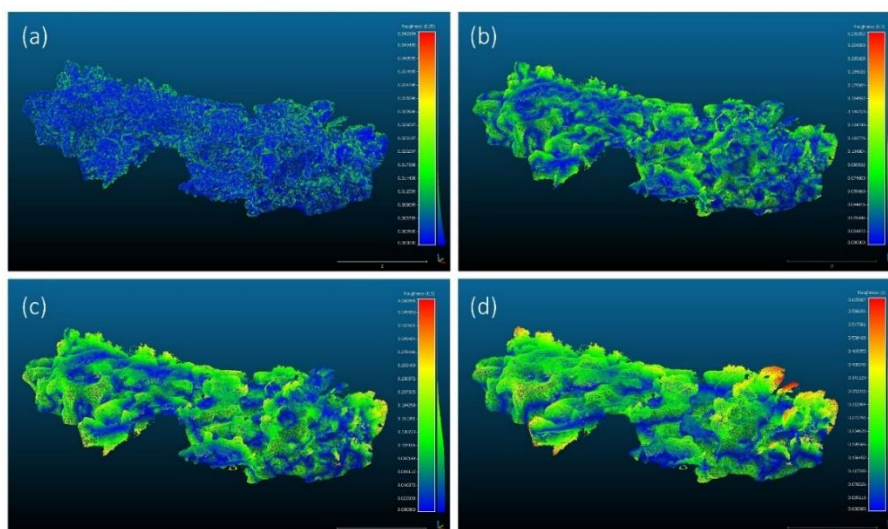


FIGURE 66 : RUGOSITE POUR LE SITE « MIMOSA » AVEC UN NOYAU DE TAILLE : (A) 0,05 M ; (B) 0,3 M ; (C) 0,5 M ; (D) 1 M

### I.B.2. Ecologie

Nous avons utilisé les annotations RECOR correspondant à chaque station (1 920 identifications réalisées sur 30 quadrats photographiques), réalisées selon le protocole RECOR (Deter et al., 2012b). Les annotations n’étant pas toutes réalisées au niveau de l’espèce (certaines au niveau du genre, voir du phylum), nous parlerons par la suite de « classes ». Au total, 124 classes différentes ont été observées sur les 39 stations. Pour chaque station, nous avons calculé les indicateurs suivants :

- **Diversité Taxonomique** (« Taxonomic Diversity » / TD sur les graphiques) : nombre de classes différentes observées sur une station ;
- **Indice de Shannon** (« Shannon Index » / SI sur les graphiques) : prend en compte l’abondance des différentes classes pour donner plus ou moins de poids aux espèces les plus rares / abondantes (Magurran, 2004) :

$$S_j = - \sum_i p_{ij} \log(p_{ij})$$

Avec  $p_{ij}$  la prévalence de la classe  $i$  au sein de la station  $j$

- **Diversité Fonctionnelle** (« Functional Diversity » / FD sur les graphiques) : facette de la biodiversité qui quantifie la valeur des traits fonctionnels des organismes, influençant leurs performances et par extension, le fonctionnement de l’écosystème (Diaz and Cabido, 2001). Nous avons utilisé un indice de diversité fonctionnelle basé sur un dendrogramme fonctionnel (Mouchet et al., 2008) et une base de traits fonctionnels compilée par Doxa et al. (2015).
- **Coralligenous Assemblage Index (CAI)** (Deter et al., 2012a) : statut écologique du coralligène basé sur la prévalence des bryozoaires, des espèces constructrices et de l’envasement d’un assemblage :

$$CAI_i = \frac{1}{3} \times \left( \frac{1 - vase_i}{1 - \min_i vase_i} + \frac{espèces\ constructrices_i}{\max_i espèces\ constructrices_i} + \frac{bryozoaires_i}{\max_i bryozoaires_i} \right)$$

- **INDEX-COR (IC)** (Sartoretto et al., 2017) : statut écologique du coralligène basé sur le nombre d'espèces observées, la sensibilité de l'assemblage à la matière organique et à la sédimentation, et un proxy de la complexité structurale :

$$IC = 0.62 \times TS + 0.6 \times OTR + 1.7 \times SC$$

Avec TS = Taxa Sensitivity : score de sensibilité de l'assemblage aux apports en matière organique et sédiments ; OTR = Observable Taxonomic Richness : égal à la diversité taxonomique ; SC = Structural Complexity : score de complexité structurale basé sur les différentes strates observées.

### I.B.3. Environnement

Nous avons utilisé les données Previmer (MARS3D v10.10 (Ifremer, 2019)) correspondant à la température de fond, la salinité, les matières en suspension et la courantologie horizontale. Les données ont été téléchargées pour toute la période 2015 – 2019 sur une fréquence hebdomadaire. Pour chaque variable, les données ont été extraites des rasters originaux pour les positions géographiques des 39 stations à leurs profondeurs respectives, et nous avons calculé la valeur moyenne sur toute la période comme indicateur pour les analyses suivantes. La profondeur a également été prise en compte comme variable environnementale.

## I.C. Méthodologie

### I.C.1. Définition de morphotypes

Pour chaque taille de noyau (voisinage pour le calcul de la rugosité), nous avons calculé la moyenne, l'écart type et les quantiles Q<sub>10</sub>, Q<sub>25</sub>, Q<sub>50</sub>, Q<sub>75</sub>, et Q<sub>90</sub> de la distribution de rugosité pour chaque station. Pour chaque taille de noyau, nous avons supprimé toutes les variables fortement corrélées (coefficient de corrélation de spearman > 0,7) et nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur tous les descripteurs de rugosité retenus et la dimension fractale de chaque station. Le nombre de composantes permettant de décrire les morphotypes a été défini comme le nombre minimal de composantes capturant plus de 90 % de la variance du jeu de données. Les morphotypes ont été définis par K-means clustering (R package ClusterR v1.2.1) avec K = 4 clusters.

Etant donné le faible nombre d'observations (39 stations), nous avons utilisé le coefficient de corrélation de spearman et des modèles linéaires pour caractériser les liens entre les différents indicateurs structurels.

### I.C.2. Liens entre la structure des récifs, leur biodiversité et les conditions environnementales

La normalité des distributions et l'égalité des variances ont été testées pour l'ensemble des variables écologiques et environnementales à l'aide du test de Shapiro-Wilkinson et du F-test. Si une variable satisfait les deux conditions, les moyennes des distributions entre les morphotypes sont comparées à l'aide d'un test de Student (t-test), autrement elles sont comparées à l'aide du test non paramétrique de Mann-Whitney-Wilcoxon (MWW).

Les données d'abondance ont été analysées à l'aide d'une PERMANOVA (Anderson, 2001) pour tester la réponse de la composition à l'appartenance à un morphotype. Par ailleurs, nous avons conduit une nMDS (non-metric multidimensional scaling) (Clarke and Gorley, 2006) pour visualiser les différents assemblages sur un graphique en 2D et apprécier visuellement les enveloppes formées par les quatre morphotypes.

Toutes les analyses et tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel R v3.6.3 (R Core Team, 2020). Les analyses écologiques ont été faites grâce au package vegan v2.5.6.



## I.D. Résultats

### I.D.1. Complexité structurale et morphotypes

Pour tous les niveaux de voisinage, tous les descripteurs sont fortement corrélés (coefficient de corrélation de spearman  $> 0.8$ ), donc nous n'avons gardé que la valeur moyenne de chaque niveau de rugosité. La dimension fractale s'échelonne entre 2.02 et 2.20 sur les 39 stations, et est moyennement corrélée à la rugosité avec des voisinages de 0,15, 0,20 et 0,30 m (coefficient de corrélation de spearman 0,62 – 0,65).

Les trois premiers axes de l'ACP sur les moyennes des rugosités et la dimension fractale représentent 93 % de la variance totale. Nous avons défini quatre morphotypes par K-means clustering dans cet espace à trois dimensions : morphotype 1 correspondant à un faible niveau de complexité structurale (6 sites), morphotype 2 correspondant à une complexité moyenne avec des petites structures (15 sites), morphotype 3 avec une complexité moyenne et des grandes structures (13 sites) et morphotype 4 correspondant à une importante complexité structurale avec des grandes structures (5 sites, voir figure 67).

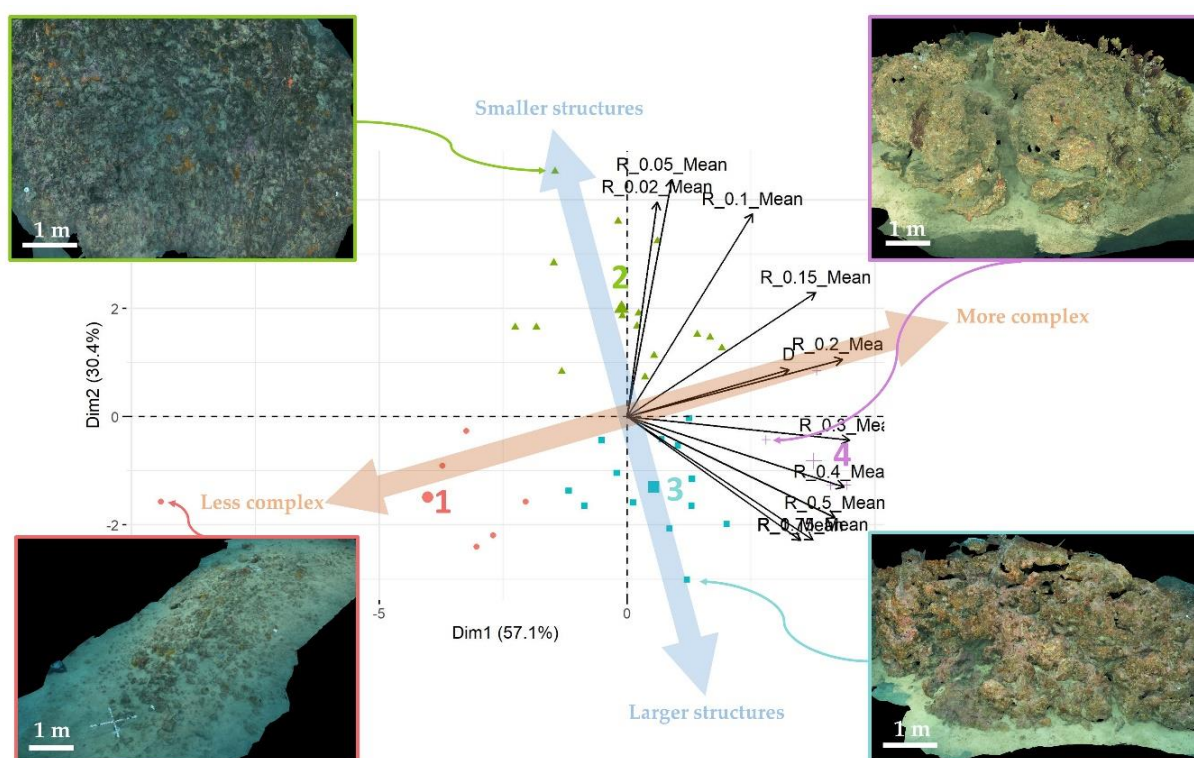


FIGURE 67 : BIPLLOT DE L'ACP SUR LES VARIABLES STRUCTURALES, AVEC LES QUATRE MORPHOTYPES DEFINIS PAR K-MEANS CLUSTERING. FLECHES NOIRES : VARIABLES PROJETEES SUR LE PREMIER PLAN DE L'ACP ; R\_X\_MEAN = RUGOSITE MOYENNE POUR LE VOISINAGE X M ; D = DIMENSION FRACTALE. MORPHOTYPES : 1 (ROUGE) = FAIBLE COMPLEXITE ; 2 (VERT) = COMPLEXITE MOYENNE / PETITES STRUCTURES ; 3 (CYAN) = COMPLEXITE MOYENNE / GRANDES STRUCTURES ; 4 (VIOLET) = COMPLEXITE ELEVEE / GRANDE STRUCTURES. LES QUATRE IMAGES REPRESENTENT UN EXEMPLE DE CHAQUE MORPHOTYPE.

F n'est pas significativement différente entre les morphotypes 2 et 3 (voir figure 68 ; t-test ; p-value  $> 0.05$ ) mais significativement différente entre les morphotypes 1 et 2-3 (t-test ; p-value  $< 0.001$ ) et entre les morphotypes 2, 3 et 4 (t-test ; p-value  $< 0.01$ ). Le pourcentage de cavités (observées sur les quadrats RECOR) est compris entre 0,6 et 16,4 %, et significativement supérieur pour le morphotype 4 que tous les autres morphotypes (MWW test ; p-value  $< 0.01$ ).

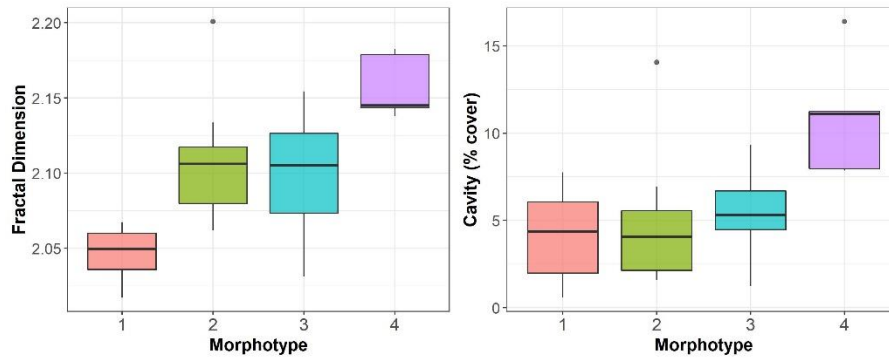


FIGURE 68 : DIMENSION FRACTALE ET POURCENTAGE DE CAVITES (% DE RECOUVREMENT) POUR LES 4 MORPHOTYPES

### I.D.2. Composition écologique des morphotypes

TD s'échelonne entre 13 et 49 classes, FD entre 1,17 et 4,41, et SI entre 1,27 et 2,74 sur les 39 stations (voir figure 69). Nous n'avons observé aucune différence entre les différents morphotypes pour les trois indicateurs (MWW ; p-value > 0.05), à l'exception de l'indice de Shannon qui est significativement supérieur pour le morphotype 2 en comparaison au morphotype 3 (MWW ; p-value < 0.01).

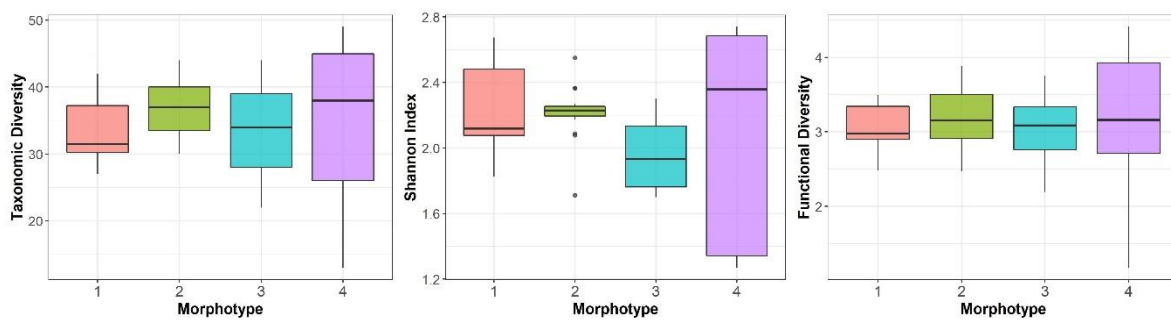


FIGURE 69 : DIVERSITE TAXONOMIQUE, INDICE DE SHANNON ET DIVERSITE FONCTIONNELLE PAR MORPHOTYPE

Le CAI s'échelonne entre 0,12 et 0,67, et l'INDEX-COR entre 25,7 et 82,7 (voir figure 70). Les deux indicateurs sont fortement corrélés (coefficient de corrélation de Spearman : 0,77), et nous n'avons observé aucune différence significative pour ces deux indicateurs entre les quatre morphotypes (MWW ; p-value > 0.05). Les rugosités moyennes à 0,15, 0,4 et 1 m expliquent 27 % de la variance de la composante structurelle SC de l'INDEX-COR. L'abondance relative de nécrose est significativement plus importante pour les morphotypes 1 et 3 que pour le morphotype 4 (MWW ; p-value < 0.01).

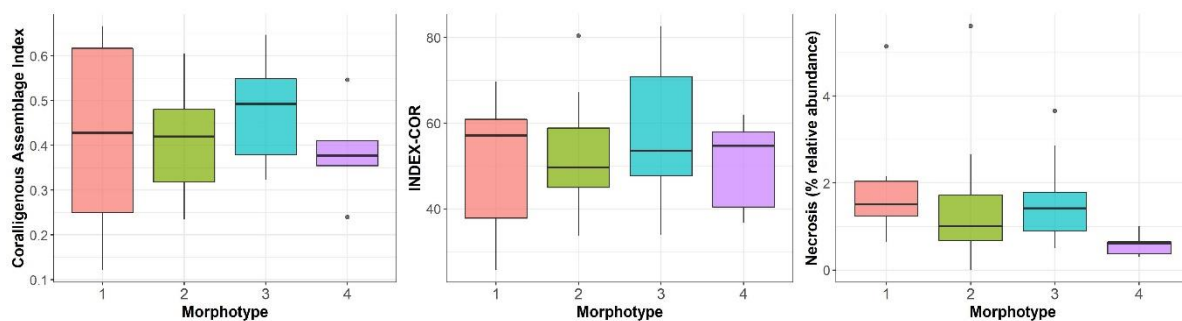
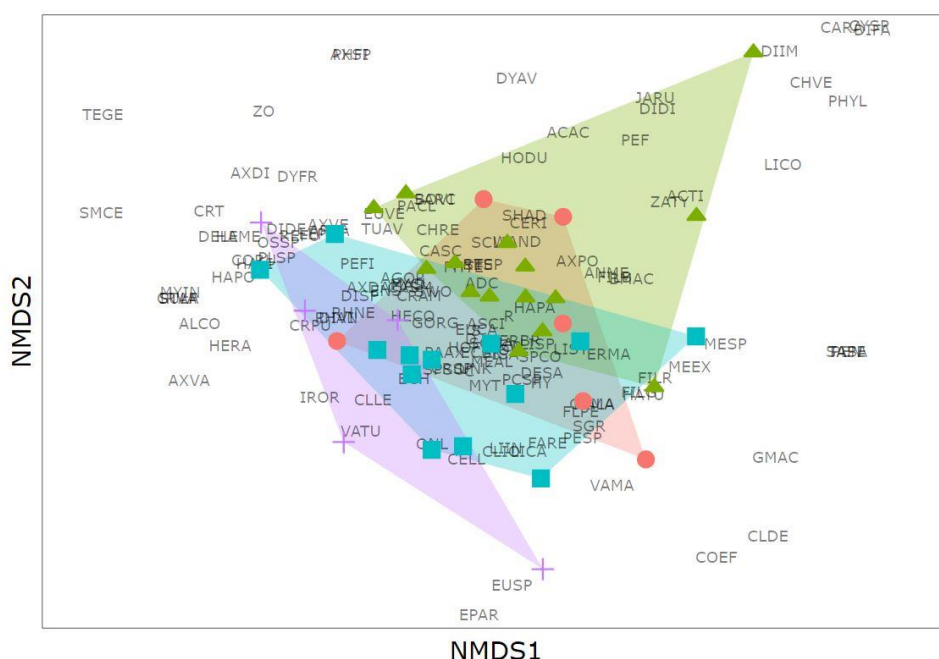


FIGURE 70 : CORALLIGENOUS ASSEMBLAGE INDEX, INDEX-COR ET ABONDANCE RELATIVE DE NECROSES, PAR MORPHOTYPE.

La PERMANOVA n'a pas montré d'effet significatif du type de morphotype sur la composition des assemblages ( $p$ -value > 0.05), résultat mis en évidence par les enveloppes convexes des quatre morphotypes qui se superposent dans l'espace bidimensionnel de la nMDS (voir figure 71).



**FIGURE 71 : REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE (NMDS) DES ASSEMBLAGES DES 39 SITES. LES POLYGOUES DE COULEUR REPRESENTENT L'ENVELOPPE CONVEXE DE CHAQUE MORPHOTYPE : MORPHOTYPE 1 EN ROUGE, MORPHOTYPE 2 EN VERT, MORPHOTYPE 3 EN CYAN ET MORPHOTYPE 4 EN VIOLET).**

### I.D.3. Liens entre environnement et morphotypes

L'ensemble des indicateurs structuraux sont peu corrélés aux variables environnementales (coefficient de corrélation de spearman < 0.3). La profondeur est significativement plus faible pour le morphotype 2 que le morphotype 3 (MWW ;  $p$ -value < 0.05), les matières en suspension sont significativement plus importantes pour le morphotype 2 que le morphotype 3 (MWW ;  $p$ -value < 0.05) ; le courant N-S est plus important pour les morphotypes 1 and 4 que le 2, et plus important pour le morphotype 1 que le 3 (MWW;  $p$ -value < 0.05).

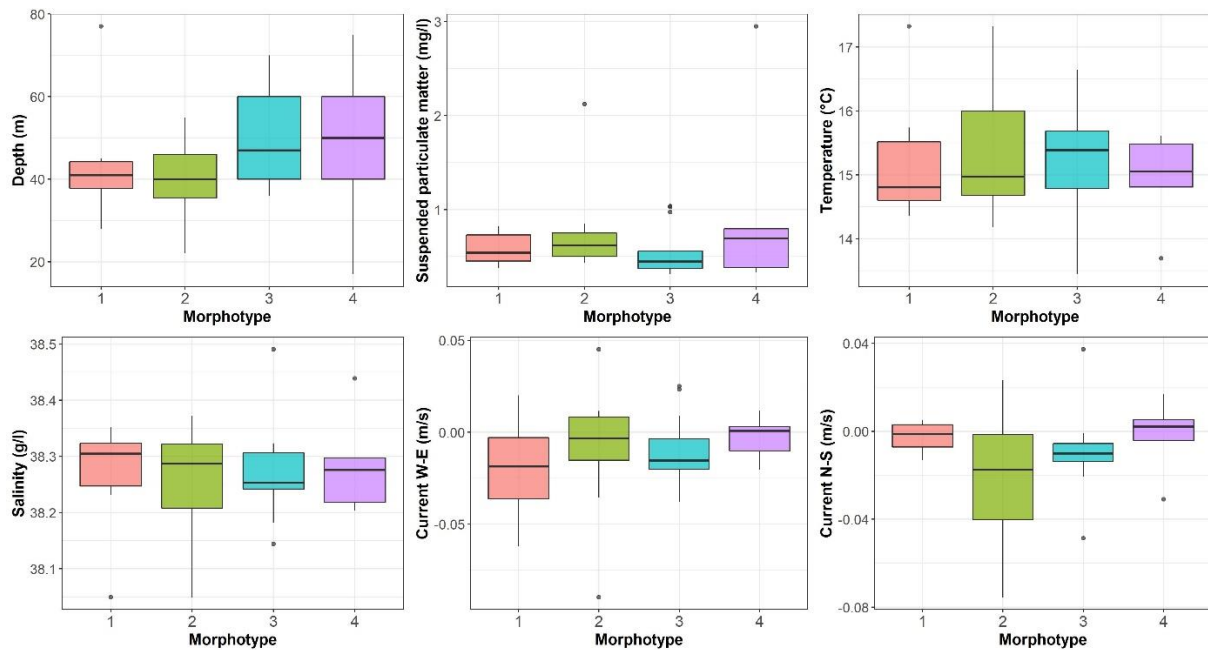


FIGURE 72 : DISTRIBUTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES EXTRAITES DE PREVIMER, PAR MORPHOTYPE. LES VALEURS CORRESPONDANT AUX MOYENNES OBSERVEES SUR LA PERIODE 2015 – 2019.

## I.E. Discussion

Dans cette étude, nous avons exploré les **différentes facettes de la complexité structurale** des récifs coralligènes, à partir de **39 modèles 3D réalisés sur des stations de suivi RECOR entre 2018 et 2019**. Les récifs étudiés correspondent à des **morphologies très différentes**, depuis des sites relativement plats et peu complexes jusqu'à des sites caractérisés par des macrostructures complexes. A partir des indicateurs structurels (rugosité à différentes échelles et dimension fractale), nous avons défini **quatre morphotypes de récifs** : faible complexité, complexité moyenne avec des petites ou des grandes structures, et complexité forte avec des macro-structures. Nous nous sommes ensuite servis de ces quatre morphotypes pour explorer les liens entre la structure, la biodiversité des récifs et les conditions environnementales.

Etonnamment, nous n'avons **pas détecté de liens significatifs** entre les **indicateurs de biodiversité** et la **complexité structurale** à travers les quatre morphotypes, ce qui contraste avec des récentes études qui ont montré que les différentes facettes de la biodiversité des récifs coralliens sont les principaux facteurs expliquant la complexité structurale des récifs (Darling et al., 2017; Price et al., 2019). Par ailleurs, la PERMANOVA n'a **pas montré de différence significative** dans la **composition des assemblages** entre les **différents morphotypes**, comme suggéré par l'analyse nMDS (voir figure 71). L'abondance relative de nécroses inférieure pour le morphotype 4 semble être liée à la plus grande abondance d'éponges pour ce morphotype (espèces en haut à gauche de la figure 71). En effet, très peu de nécroses sont généralement observées chez les éponges.

Bien que certaines variables environnementales soient significativement différentes entre les morphotypes, nous n'avons **pas détecté de tendance générale pouvant expliquer les différences structurales**, notamment des conditions environnementales favorisant la croissance d'organismes contribuant particulièrement à la structure des récifs. Cependant, les variables environnementales correspondent à des résultats de modélisation pour seulement cinq années (2015 – 2019), qui ne reflètent pas nécessairement l'histoire de récifs qui peuvent mettre des milliers d'années à se former (Sartoretto et al., 1996). Par ailleurs, les données ont été extraites sur la grille Previmer de 10x10km, qui ne permet pas de prendre en compte la variabilité très importante des conditions environnementales en fonction de la profondeur et de la configuration du site (Willis et al., 2005; Kipson et al., 2011).

Nous avons émis **trois hypothèses** pouvant expliquer que les résultats de cette étude ne confirment pas ce qui a été déjà démontré en milieu corallien, à savoir qu'il existe un lien fort entre biodiversité / qualité écologique d'un récif et sa complexité structurale :

1. Les récifs coralligènes ont une **dynamique morphologique extrêmement faible** en comparaison avec les récifs coralliens : la croissance des organismes qui les composent est très faible, et leur situation globalement plus profonde les protègent de l'action mécanique de la houle et des tempêtes. En comparaison, un épisode de blanchiment en milieu tropical est rapidement suivi d'une recolonisation par des macro-algues ou d'une altération par les mouvements de l'eau (Graham et al., 2015). Cela suggère que, concernant les récifs coralligènes, leur **structure actuelle reflète davantage leur histoire évolutive que leur état actuel** (espèces, envasement...), on parle d'**héritage topographique**. Une station en particulier (Centrale, 17 m) est caractérisée par une complexité structurale importante et les plus faibles valeurs de diversité et état écologique, à cause de son exposition récente à des sédiments d'origine anthropique (Airoldi, 2003; Ballesteros, 2006). Si cette hypothèse se confirmait, **la complexité structurale des récifs pourrait alors être perçue comme un proxy du potentiel / climax écologique du récif**, permettant de définir son vrai état écologique compte tenu de la biodiversité actuelle. A l'inverse, un récif avec une faible complexité et faible diversité pourrait simplement refléter un jeune récif en cours de formation ;
2. **Il pourrait y avoir un biais dans l'échantillonnage des données**. En effet, contrairement à certaines études qui ont labellisé toutes les espèces observées sur les modèles 3D (Price et al., 2019), nous avons numérisé 39 récifs, sur lesquels ont été réalisés 30 quadrats aléatoirement distribués sur chaque récif. Cela peut avoir d'importantes conséquences, car dans le cas des modèles de surfaces importantes, la surface couverte par les 30 quadrats (~7,5 m<sup>2</sup>) est très faible par rapport à la surface totale numérisée, ce qui implique que nous étudions majoritairement le bruit du reste du modèle 3D. Par ailleurs, certains artefacts de reconstruction peuvent sous-estimer certains descripteurs, comme les gorgones qui sont généralement mal reconstruites dans le cas de sites soumis à un courant important ou dans le cas d'individus très grands ;
3. Les récifs coralligènes sont des assemblages extrêmement complexes, dont la composition est le fruit d'interactions entre une multitude de facteurs écologiques et environnementaux sur de longues périodes. Cette complexité engendre une variabilité très forte entre les récifs, y compris au sein même d'un récif, qui est encore mal appréhendée. **L'étude de relations complexes dans des environnements aussi variables nécessite des jeux de données bien plus conséquents** pour espérer évaluer correctement l'effet de certains facteurs.

En conclusion, cette étude prépare les bases de l'analyse écologique de la complexité structurale des récifs coralligènes. Les liens entre structure et diversité, en particulier, devront faire l'objet d'analyses plus approfondies avec davantage de données et en limitant le biais d'échantillonnage. En particulier, si nous parvenons à massivement **aligner les quadrats RECOR** sur les modèles 3D déjà réalisés, nous serions en mesure de **produire la surface 3D « observée » sur chaque quadrat** et calculer les mêmes indicateurs de complexité structurale. Cela permettrait de **corrélér bien plus finement les observations** écologiques avec la structure, et de passer de **39 stations à 1000 – 2000 modèles** 3D correspondant à tous les quadrats correctement alignés sur un des modèles de notre base de données.

## II. Suivis temporels de récifs coralligènes

### II.A. Objectifs

Si la photogrammétrie permet de qualifier et quantifier la structure des récifs à un instant t, elle permet aussi de réaliser des **suivis temporels localisés** des assemblages coralligènes. En effet, des modèles photogrammétriques réalisés à différentes dates sur un même récif peuvent être **alignés grâce à des repères fixes** (roche, piquet, balises...) et **comparés** pour mesurer certaines **évolutions** (voir figure 73).

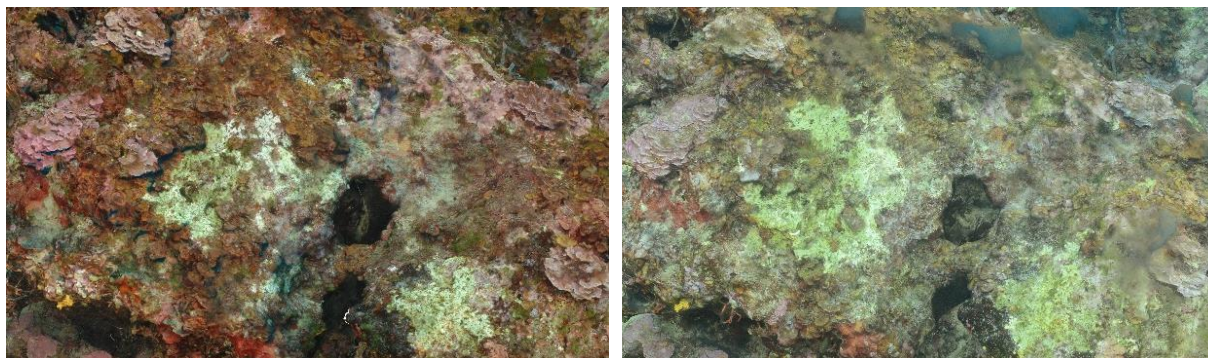


FIGURE 73 : EVOLUTION D'UNE NECROSE SUR LE SITE « RADE DE BORMES » ENTRE 2016 (GAUCHE) ET 2019 (DROITE)

L'objectif de cette partie est le développement d'une **méthode automatisée** de production d'**orthomosaïques locales** (i.e. photographies artificiellement reconstruites et ortho rectifiées d'une portion du récif) **identiques** sur plusieurs modèles réalisés à différents pas de temps, pour réaliser un suivi par « **quadrats permanents** » sur certains endroits singuliers d'un récif, comme une macro-nécrose.

### II.B. Méthodologie

Nous avons développé la méthode sur le cas particulier d'un **récif de coralligène restauré à Saint Jean Cap Ferrat** (opération de nettoyage suite à un enfouissement par des travaux de génie civile – projet RESCOR, informations disponibles sur [RESTAUMED](#)), que nous avons suivi par photogrammétrie **avant** et **après** travaux de restauration en septembre 2018, puis régulièrement **tous les six mois** depuis cette date. Afin de qualifier et quantifier précisément la recolonisation du récif restauré, nous avons défini 14 quadrats permanents de 1 m<sup>2</sup> (voir figure 74).

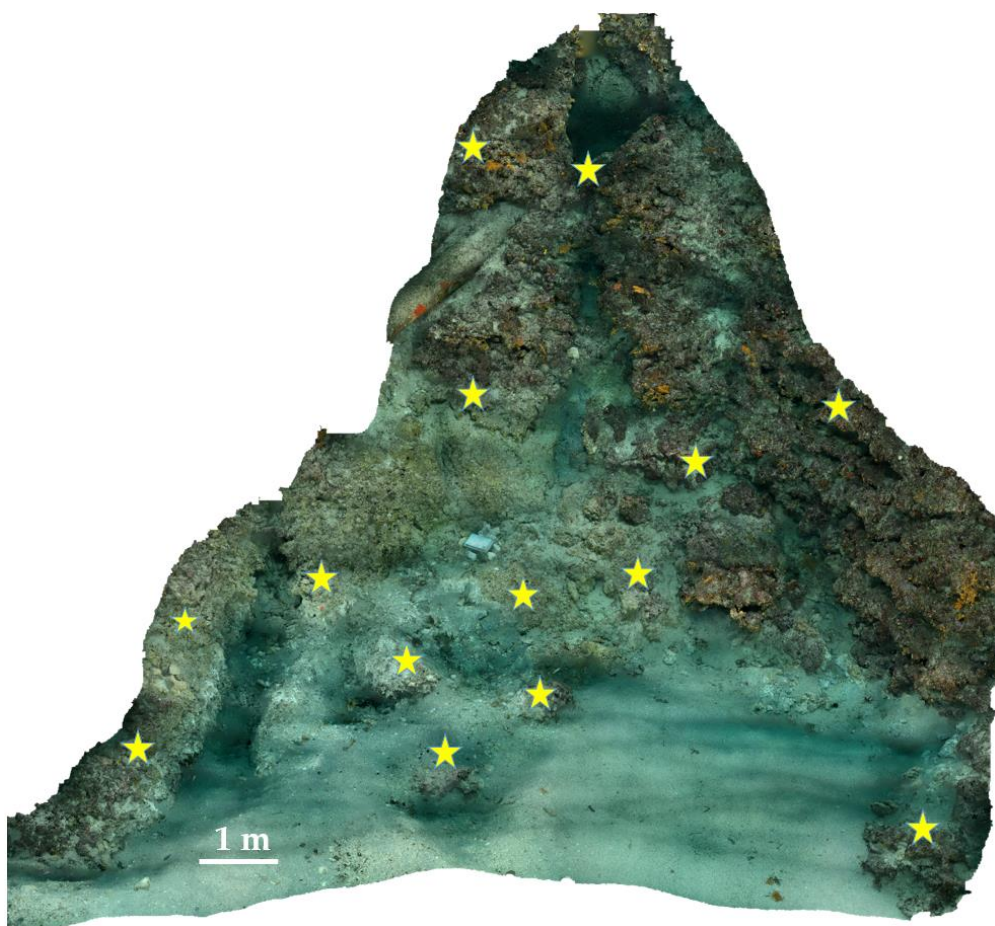


FIGURE 74 : POSITION DES 14 QUADRATS PERMANENTS SUR LE RECIF DE SAINT-JEAN-CAP-FERRAT

Pour définir les quadrats sur le premier modèle ( $t_0$ ), il est nécessaire de réaliser deux étapes manuellement :

- Positionner **trois marqueurs en équerre** sur le récif, définissant respectivement le centre du quadrat, l'axe X et l'axe Y ;
- **Mesurer les distances** entre ces marqueurs pour déterminer les **coordonnées** des deux marqueurs définissant les axes X et Y dans le futur repère.

Une fois ces étapes manuelles réalisées pour chaque quadrat, il est ensuite possible de produire l'ensemble des orthomosaïques grâce à un script Python permettant de séquentiellement :

- Utiliser les trois marqueurs pour définir un **nouveau repère orthogonal** grâce à leurs coordonnées mesurées manuellement ;
- **Produire l'orthomosaïque** locale dans ce nouveau repère, avec comme limites géographiques -0,5 et + 0,5 m en X et en Y, pour produire un quadrat de  $1 \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$ , avec une résolution de 0,5 mm / pixel ;
- **Exporter l'orthomosaïque locale produite** avec un nom de fichier correspondant au nom du quadrat et à la date de suivi.

La définition des quadrats permanents (positionnement et mesure des coordonnées des trois marqueurs) et la production du script Python sont chronophages, mais ensuite à **chaque nouveau suivi**, il suffit de :

- **Produire le modèle 3D** ;
- **Positionner manuellement plusieurs marqueurs** permettant d’aligner parfaitement le nouveau modèle aux anciens ;
- **Exécuter le script** pour cette nouvelle date, produisant tous les nouveaux quadrats permanents.

Pour chaque quadrat permanent produit, il faut ensuite **analyser son contenu manuellement** comme dans le cas des quadrats aléatoires RECOR. Ici, nous souhaitons mesurer des **surfaces** pour quantifier **l’évolution précise de la recolonisation** des zones restaurées, c’est pourquoi nous avons à chaque suivi réalisé une segmentation sémantique des quadrats permanents, mais il serait également possible d’analyser les quadrats avec le logiciel CPCe en prenant toujours les mêmes coordonnées de points projetés pour suivre l’évolution de ces points dans le temps.

## II.C. Résultats

Avec cette méthodologie, nous avons produit et analysé les 14 quadrats permanents pour le site de Saint Jean Cap Ferrat pour sept dates différentes (voir exemples figure 75).

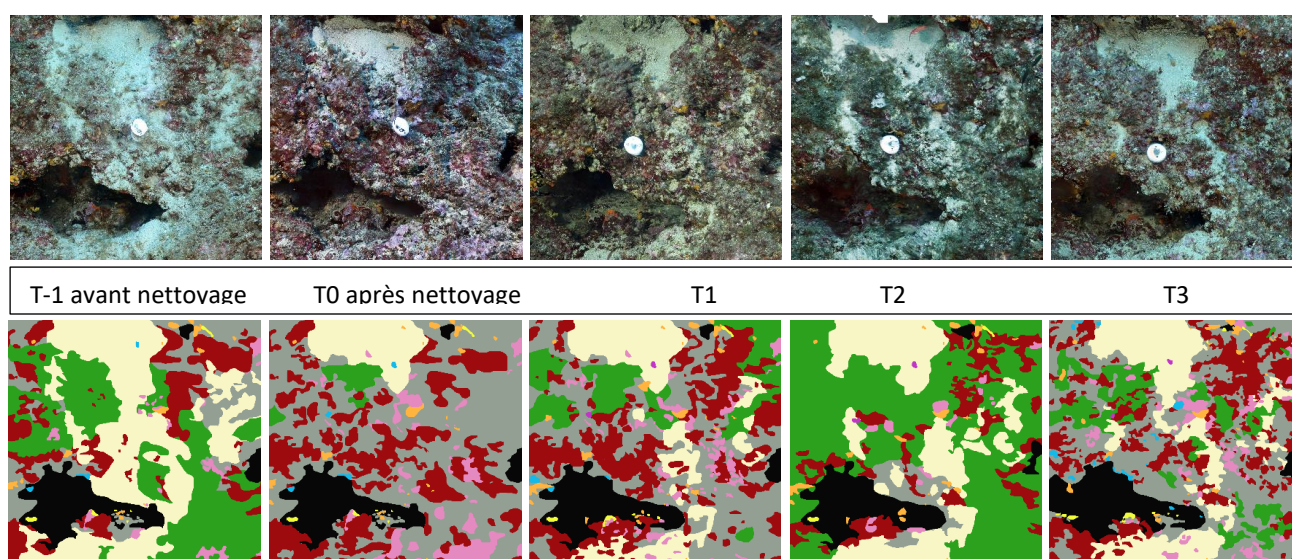


FIGURE 75 : SUIVI PHOTOGRAMMETRIQUE DE LA RECOLONISATION DU RECIF DE SAINT-JEAN-CAP- FERRAT APRES RESTAURATION. GRIS = SUBSTRAT ROCHEUX ; JAUNE PALE = SUBSTRAT MEUBLE ; VERT FONCE = ALGUES ; VERT CLAIR = DEBRIS BIOLOGIQUES ; ROSE PALE = CORALLIGENE NECROSE ; ROSE FONCE = CORALLINACEES ; ORANGE = BRYOZOAIRES ; BLEU = VIVANT NON IDENTIFIE ; VIOLET POURPRE = GORGONES.

Ce type d’analyses appliquées à certains récifs du réseau RECOR permettrait notamment de quantifier précisément **l’évolution de macro-nécroses** dans le temps. Cependant, la définition des quadrats et leur analyse restent des **étapes chronophages**, qui ne permettent pas leur généralisation à grande échelle (grand nombre de quadrats sur toutes les stations RECOR).

Selon les résultats obtenus pour l'adaptation du réseau de neurones, d'autres méthodes de suivis temporels sont imaginables, comme le suivi individuel de points sur le récif :

- **Projection / détermination** d'un certain nombre de points sur le récif à  $t_0$  ;
- **Identification** de ces points par le réseau de neurones adapté aux images de la photogrammétrie :
- **A chaque nouveau suivi** :
  - **Alignement** du nouveau modèle aux anciens ;
  - **Projection** des points de références sur la surface du nouveau modèle ;
  - **Identification** des points par le réseau de neurones.

# Chapitre 4

## Modélisation de la température de fond



La pose et la récupération des capteurs de température positionnés en 2020 lors de la campagne de surveillance sont déjà financées par les marchés de surveillance lots 1 et 2, et ne font pas partie des objectifs du présent projet. Ce chapitre présente la mise à jour des cartographies de température de fond suite à la campagne de surveillance 2020 en région Corse ainsi que l'exploration des séries de données au regard des observations ponctuelles réalisées dans le cadre du réseau RECOR.

# Chapitre 4 : Modélisation de la température de fond

## I. Contexte

Depuis 2013, Andromède Océanologie (en partenariat avec l'AERMC) équipe les sites de surveillance RECOR et TEMPO avec des **capteurs de température**. 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 et TEMPO ;
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.

## II. Historique

L'installation des capteurs de température a débuté en **2013** sur **26** sites RECOR (PACA Est), puis a été complétée en **2014** sur **18** sites RECOR (Corse); en **2015** sur **93** sites localisés dans les trois régions, dont **32** sites RECOR et **61** sites TEMPO (limite inférieure et profondeur intermédiaire); en **2016** sur **18** sites RECOR et **18** sites TEMPO en PACA Est; en **2017** sur **17** sites RECOR (Corse) et sur **30** sites TEMPO (29 sites en Corse et 1 site en PACA Est); en **2018** sur **37** sites RECOR (**3** sites en Corse, **3** en Occitanie et **31** en PACA Ouest) et **25** sites TEMPO (**22** sites en PACA Ouest et 3 en Occitanie); en **2019** sur **58** sites RECOR et **35** sites TEMPO en région PACA Est, et enfin en **2020** sur **40** sites RECOR et **33** sites TEMPO en Corse. Par ailleurs, une campagne de terrain dans le Parc Naturel Marin du Cap Corse et de l'Agriate (PNMCCA) en juillet **2020** a permis d'installer **14** capteurs sur des récifs coralligènes profonds, entre 47 et 115 mètres dans le parc. Le tableau 6 résume l'historique des mises en place et relèves de capteurs depuis 2013.

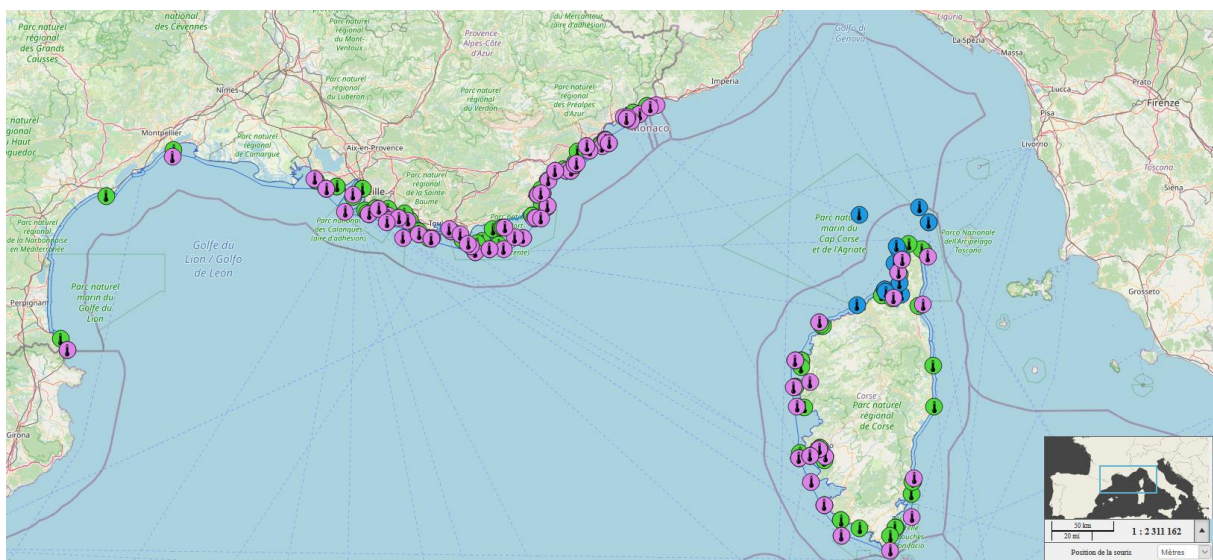
**239 capteurs de fond (133 capteurs RECOR, 14 capteurs PNMCCA et 92 capteurs TEMPO) sont actuellement en cours d'acquisition de données entre 5 et 115 mètres de fond en Méditerranée française.** Ces capteurs permettent de réaliser une mesure **toutes les 30 minutes pendant cinq ans**. Leur répartition ainsi que la fréquence élevée des mesures nous permettent de produire des cartographies de température de fond et de corréler nos observations biologiques sur les sites TEMPO et RECOR aux variations de ce paramètre abiotique.

**TABEAU 6 : HISTORIQUE DE MISE EN PLACE ET DE RELEVÉ DES CAPTEURS DE TEMPERATURE DANS LE CADRE DES SUIVIS RECOR ET TEMPO**

Année	Capteurs mis en place (RECOR)	Capteurs mis en place (TEMPO)	Capteurs relevés RECOR / TEMPO (dont illisibles)	Capteurs non retrouvés RECOR / TEMPO
2013	26	-	-	-
2014	18	-		
2015	32	61	12 (0) / 0	6 / 0
2016	18	17	11 (2) / 0	6 / 0
2017	17	31	12 / 16	6 / 4
2018	37	25	17 / 20	2 / 2
2019	58	34	16 / 27 (1)	4 / 6
2020	40 (+14 PNMCCA)	33	14 / 15	5 / 4

**NB1** : chaque capteur relevé est systématiquement remplacé par un nouveau capteur

**NB2** : PNMCCA= Parc naturel marin du Cap Corse et de l'Agriate.



**FIGURE 76 : LOCALISATION DES CAPTEURS DE TEMPERATURE INSTALLES ENTRE 2013 ET 2020 (SOURCE : [MEDTRIX](#), PROJET CALOR) ; EN VERT : HERBIER DE POSIDONIE, EN VIOLET : RECIFS CORALLIGENES, EN BLEU : SITES DU PNMCCA.**

### III. Matériel utilisé

Andromède Océanologie équipe tous les sites de surveillance 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.

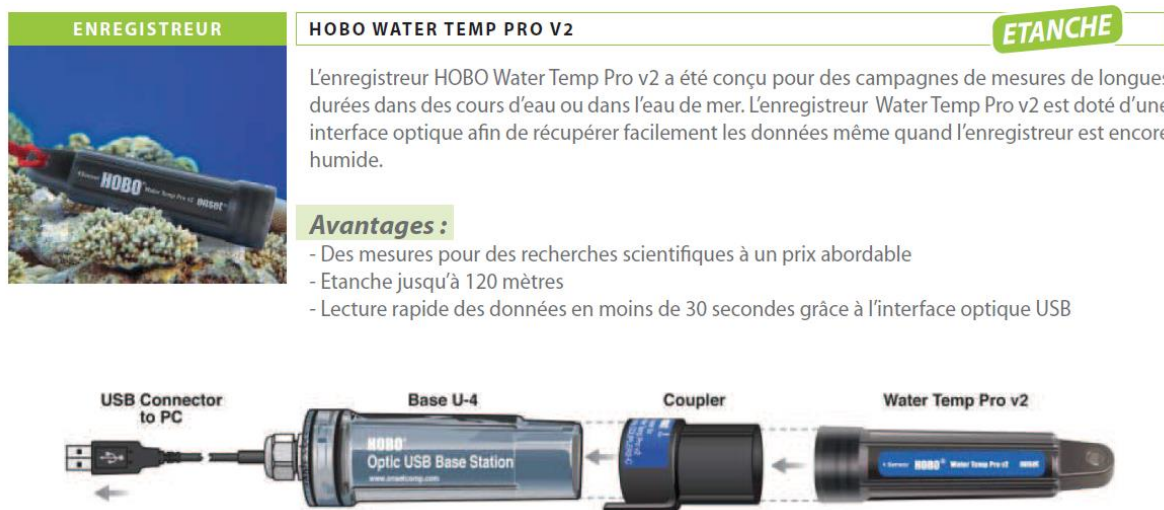


FIGURE 77 : MODELE DE CAPTEUR DE TEMPERATURE UTILISE DANS LE CADRE DU RESEAU CALOR

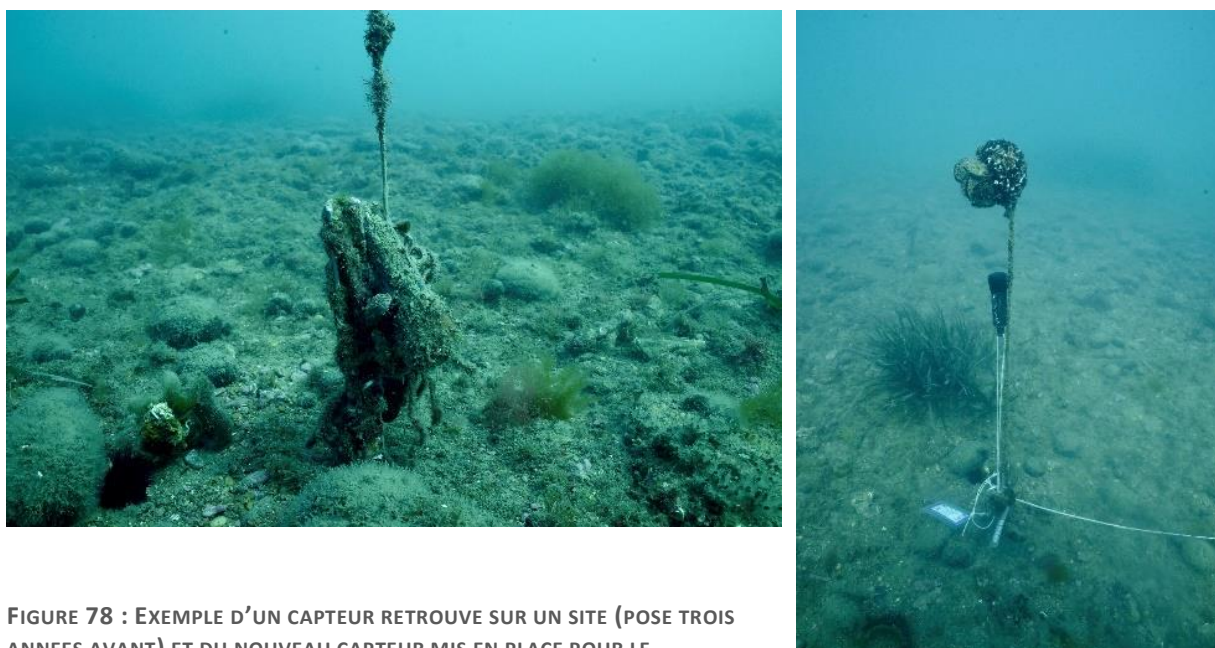
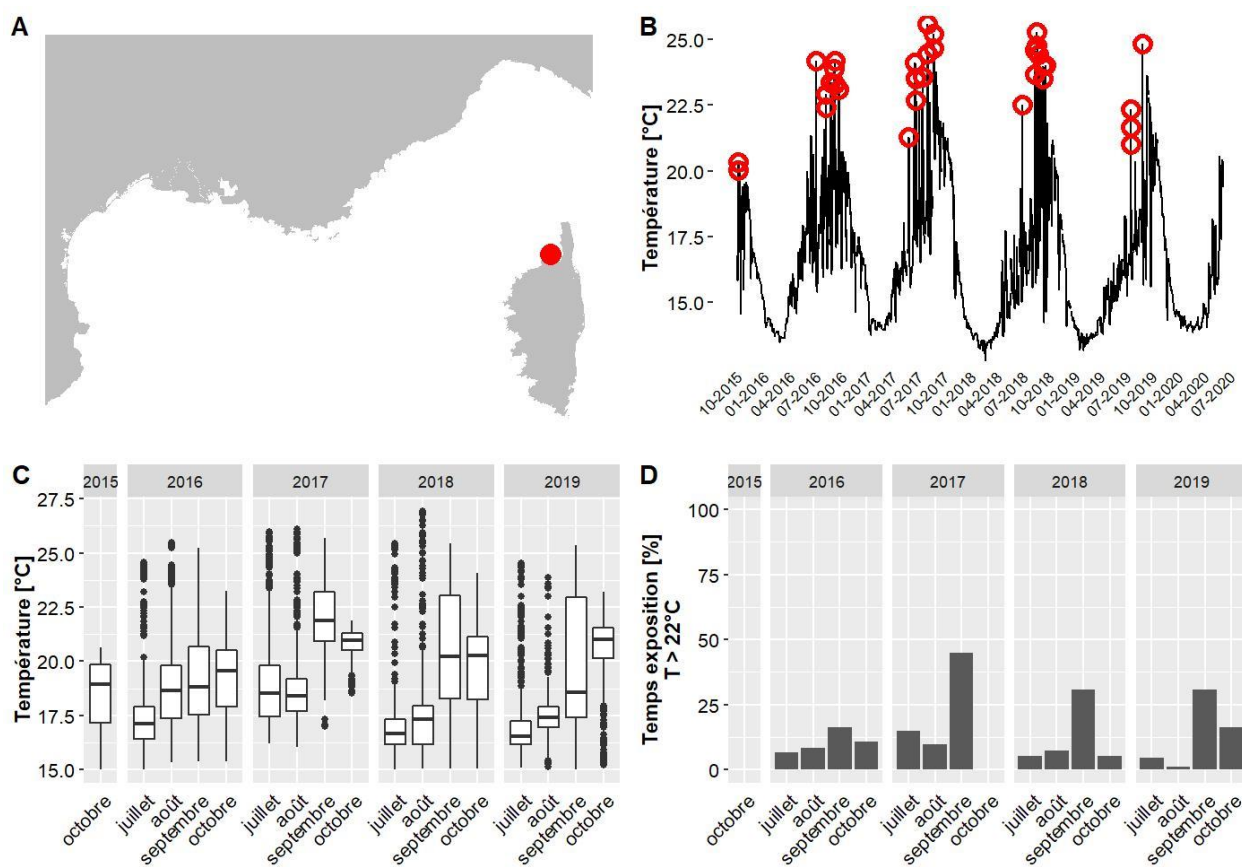


FIGURE 78 : EXEMPLE D'UN CAPTEUR RETROUVE SUR UN SITE (POSE TROIS ANNEES AVANT) ET DU NOUVEAU CAPTEUR MIS EN PLACE POUR LE REMPLACER. SITE TEMPO GRAND TRAVERS.

## IV. Fiches descriptives des capteurs relevés en 2020 en région Corse

### IV.A. Site: Agriates - TEMPO

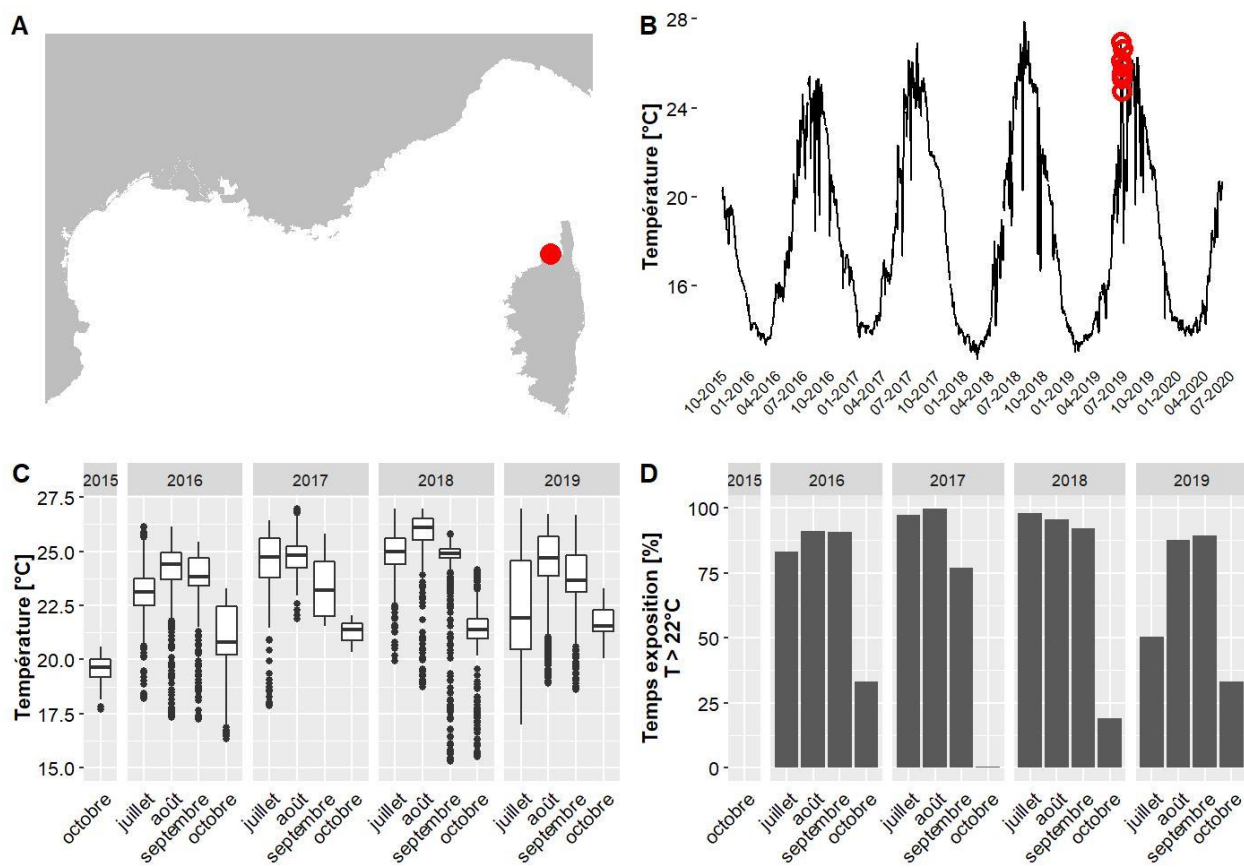
Les données de température pour le site Agriates situé à 37 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 22 °C et 45 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 26.9 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.B. Site: Agriates PI - TEMPO

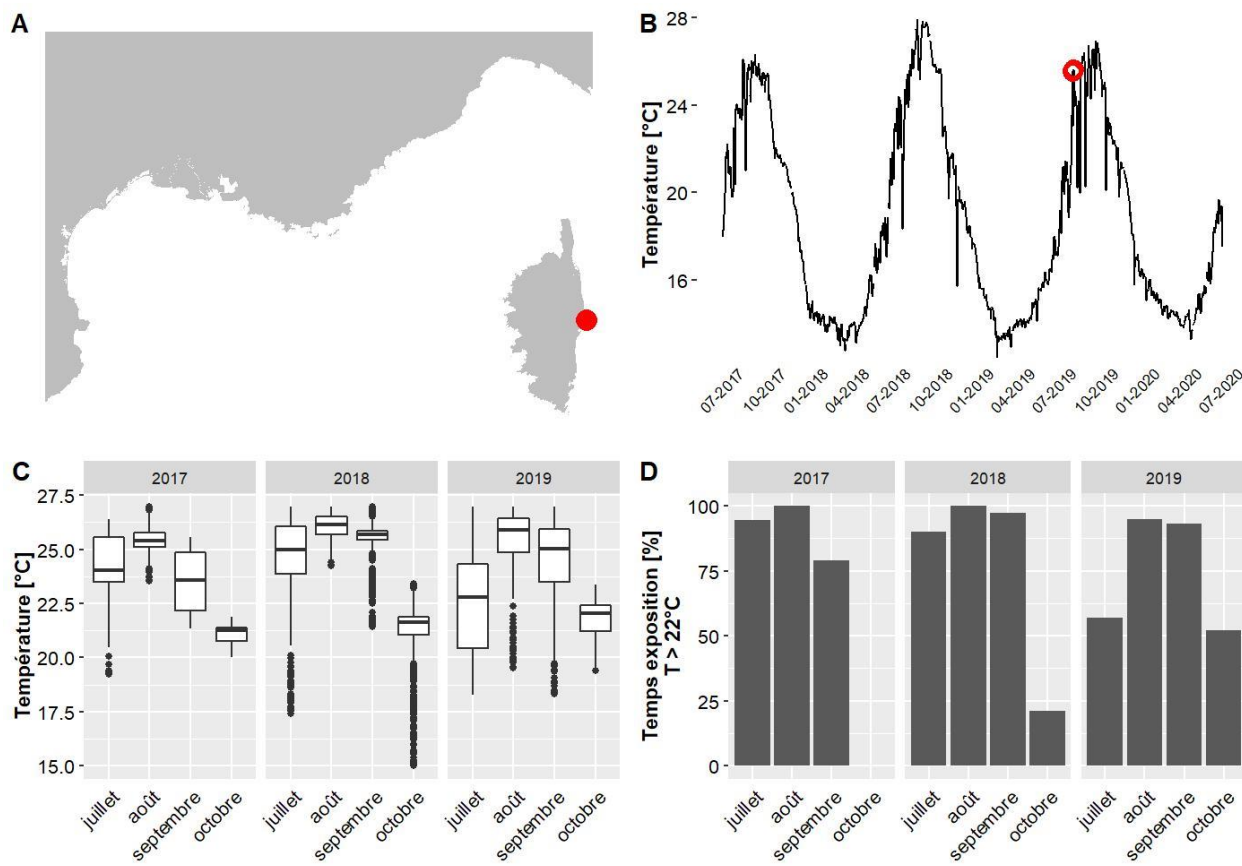
Les données de température pour le site Agriates PI situé à 14 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 26 °C et 96 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28.1 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.C. Site: Aleria PI - TEMPO

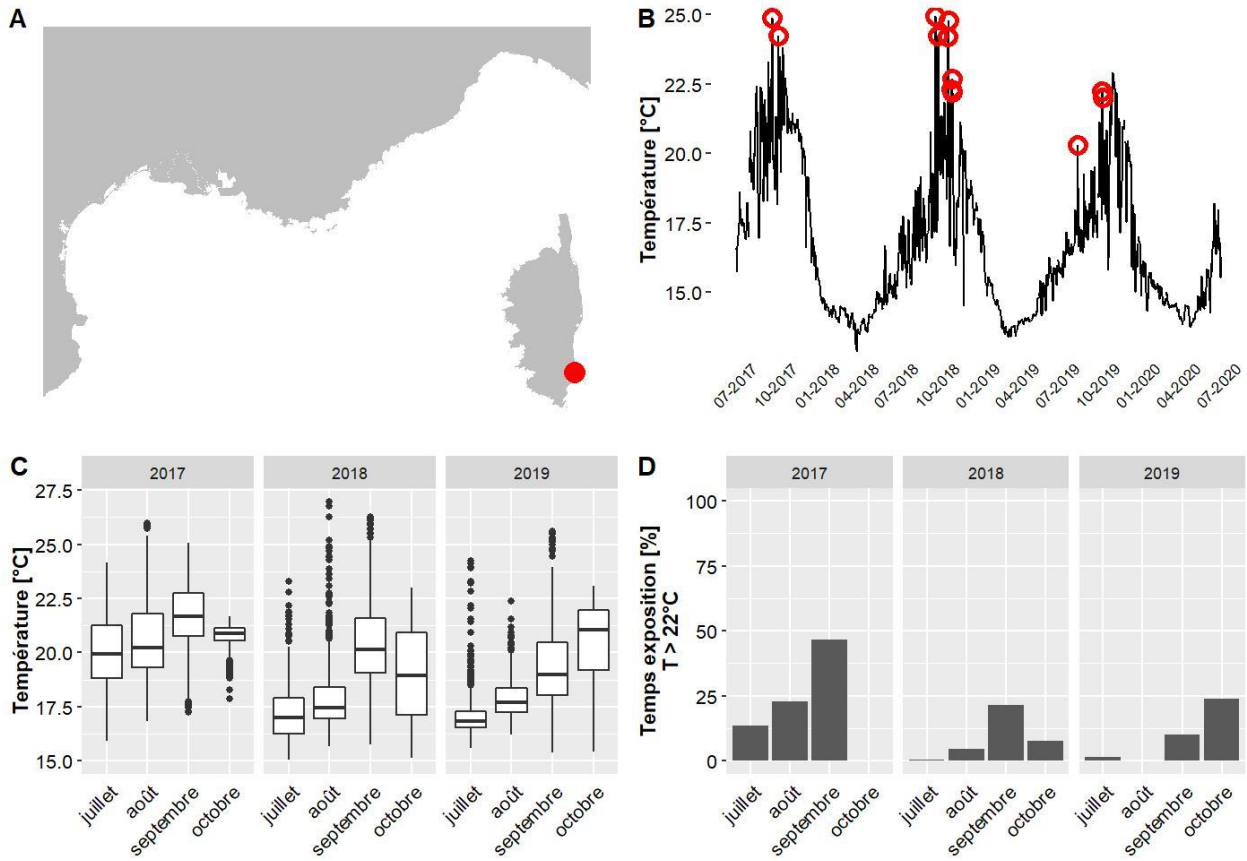
Les données de température pour le site Aleria PI situé à 14.8 m de profondeur couvrent la période allant de mai 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 27.1 °C et 100 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28.2 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

**IV.D. Site: Anse Cola - TEMPO**

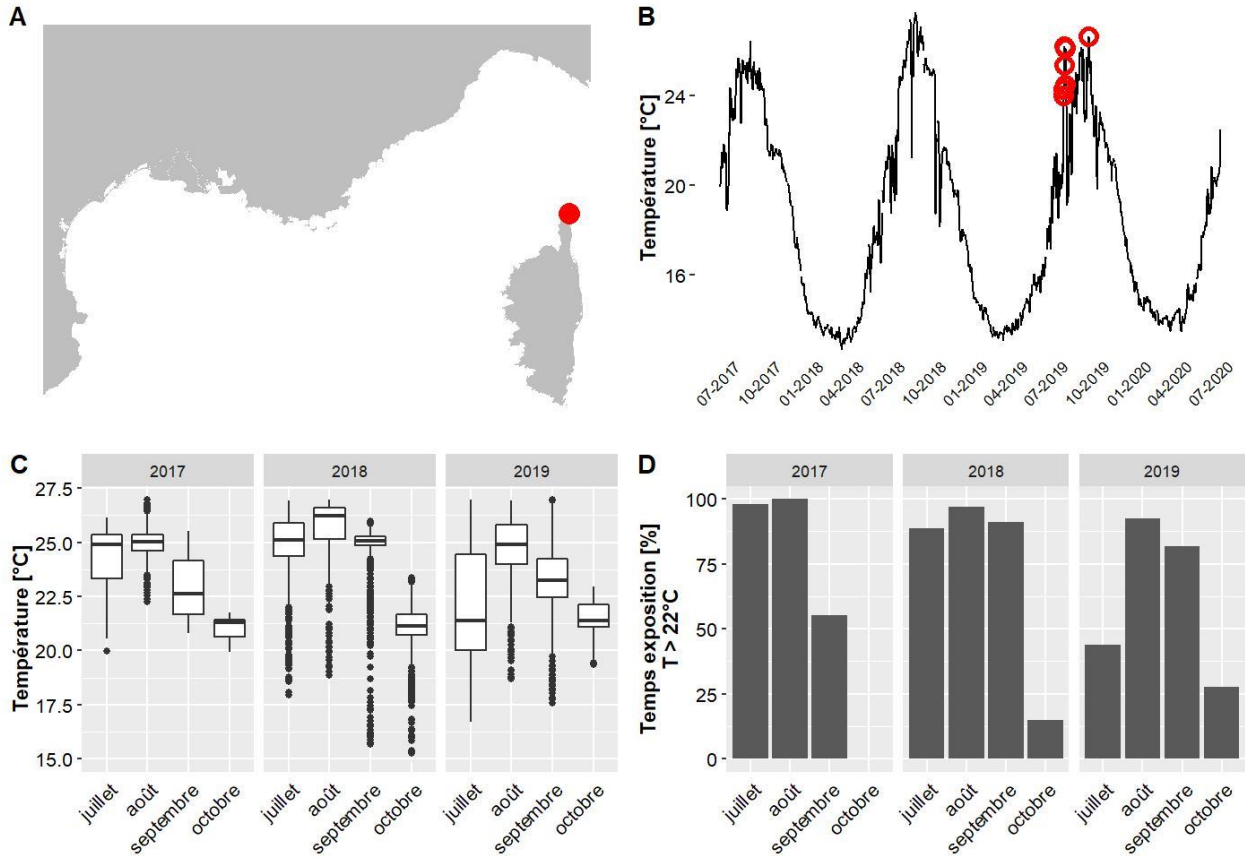
Les données de température pour le site Anse Cola situé à 37.5 m de profondeur couvrent la période allant de mai 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 21.7 °C et 47 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.2 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.E. Site: Baie Tamarone Large PI - TEMPO

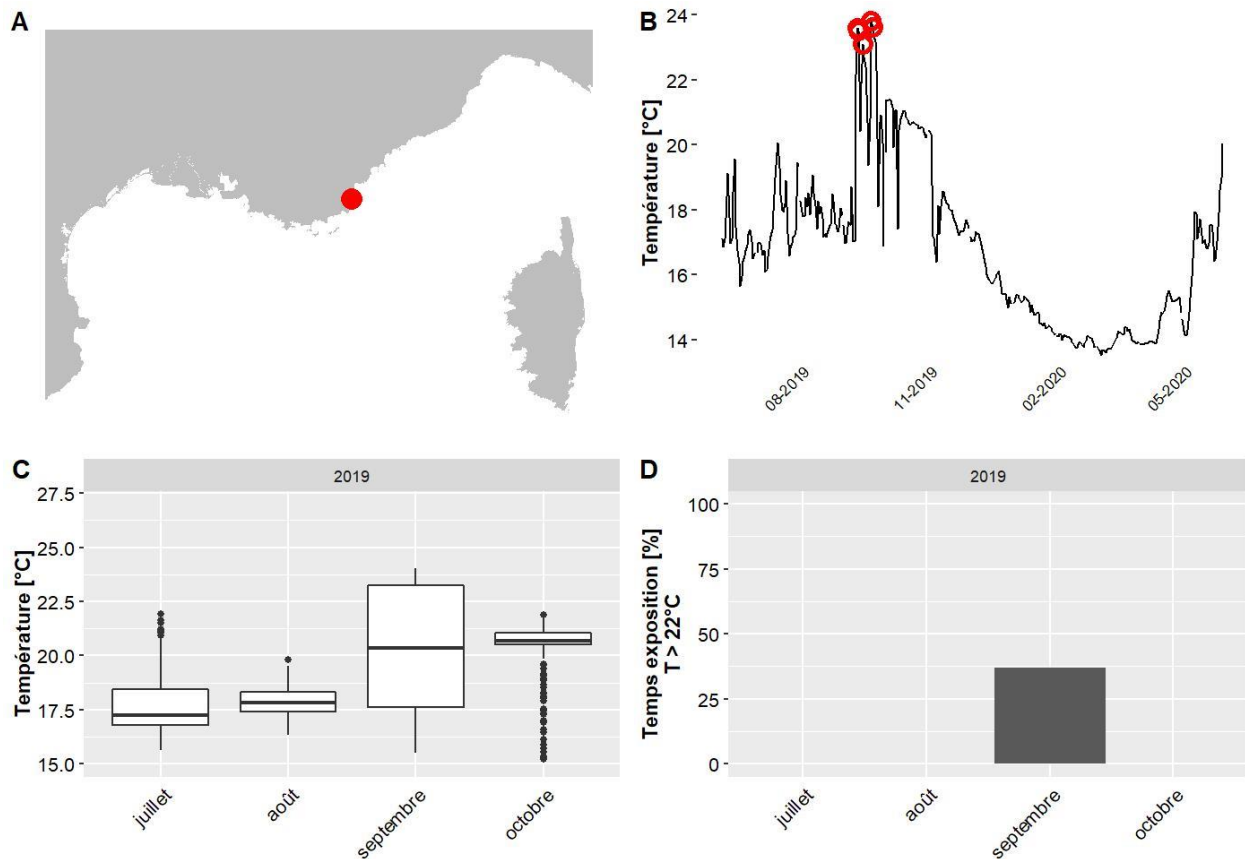
Les données de température pour le site Baie Tamarone Large PI situé à 15 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 26.3 °C et 97 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28.3 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.F. Site: Balise Rabiou - RECOR

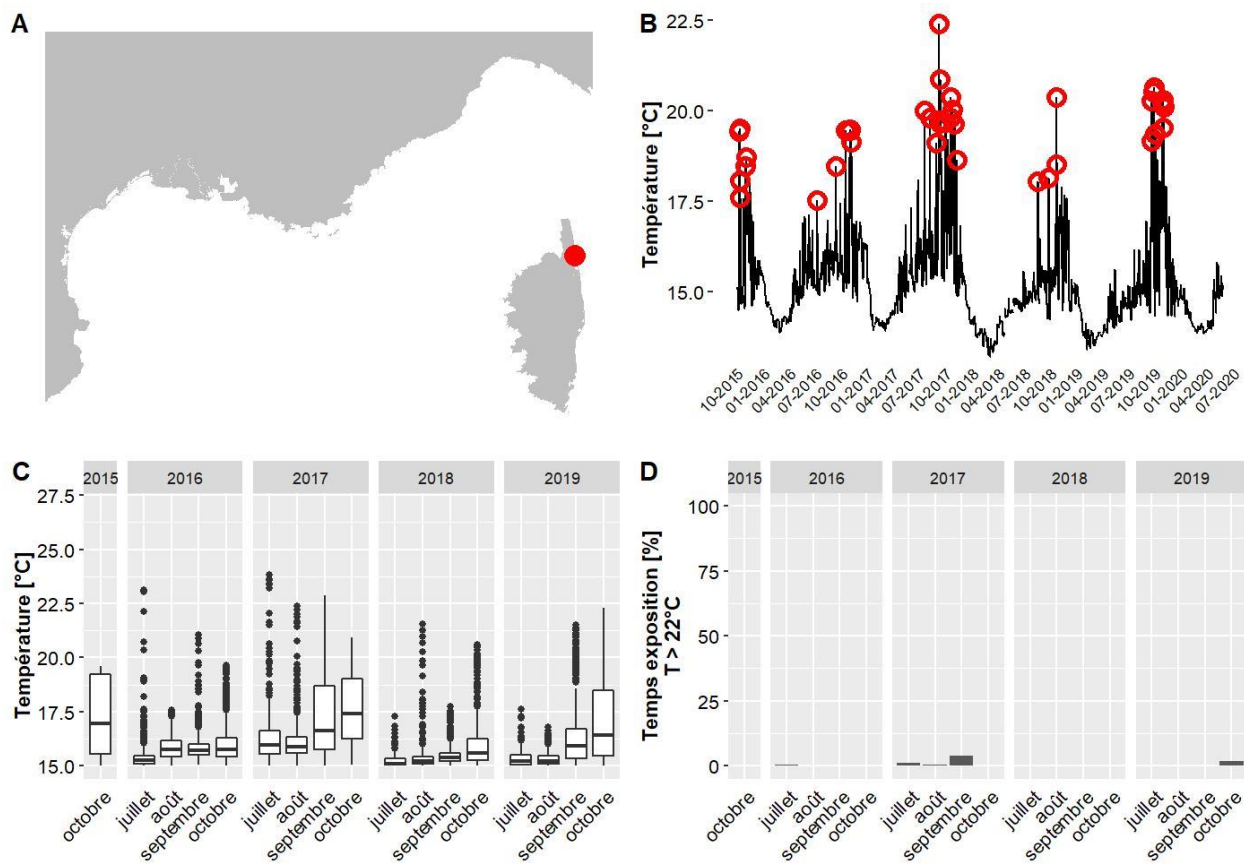
Les données de température pour le site Balise Rabiou situé à 30 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2019 à mai 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2019 avec une température moyenne de 20.6 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 24 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.G. Site: Bastia - RECOR

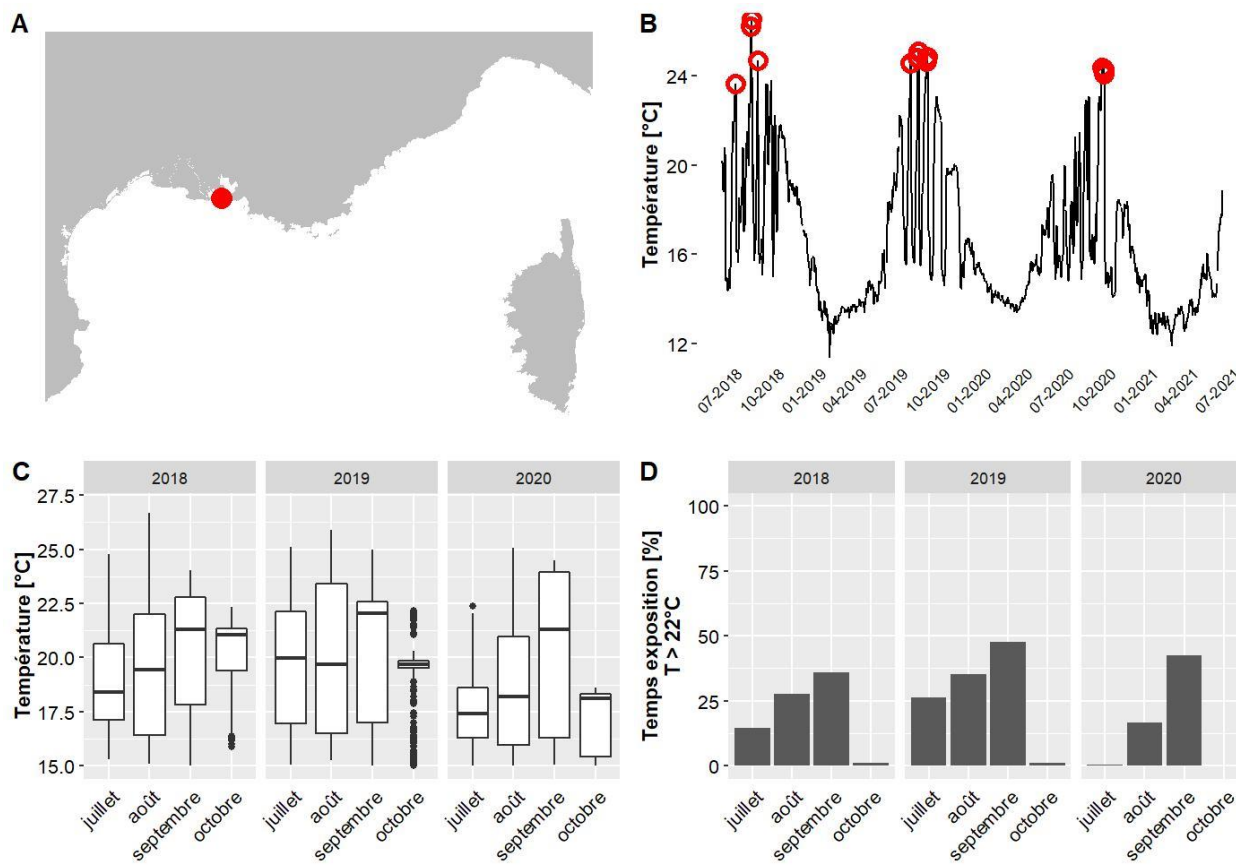
Les données de température pour le site Bastia situé à 62.8 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 17.6 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 23.8 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.H. Site: Bonnieu Nord - TEMPO

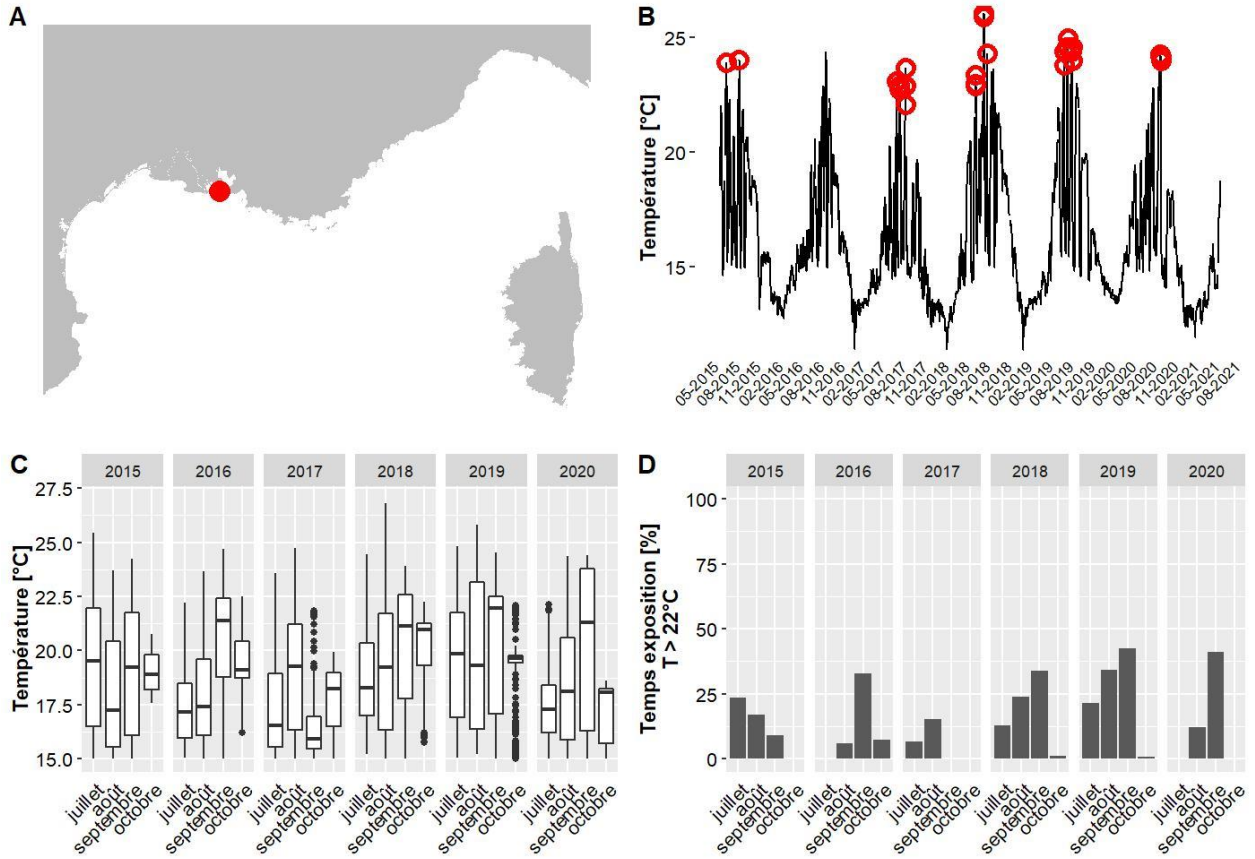
Les données de température pour le site Bonnieu Nord situé à 12.2 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2018 à juin 2021. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2018 avec une température moyenne de 20.3 °C et 1 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.9 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.1. Site: Bonnieu Nord - TEMPO

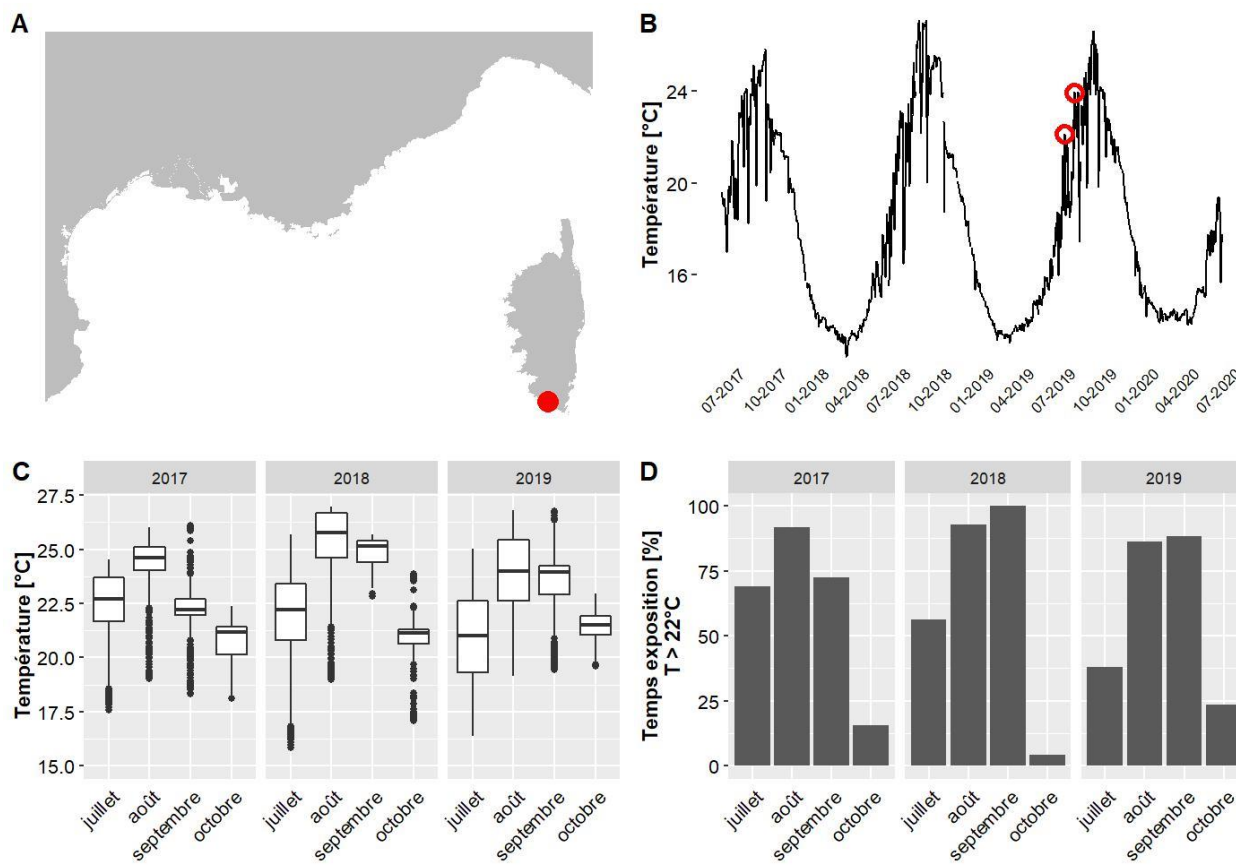
Les données de température pour le site Bonnieu Nord situé à 13 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2015 à juin 2021. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2016 avec une température moyenne de 20.4 °C et 33 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.8 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE (MOYENNE JOURNALIÈRE), AVEC ANOMALIES DE TEMPÉRATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPÉRATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.J. Site: Bruzzi PI - TEMPO

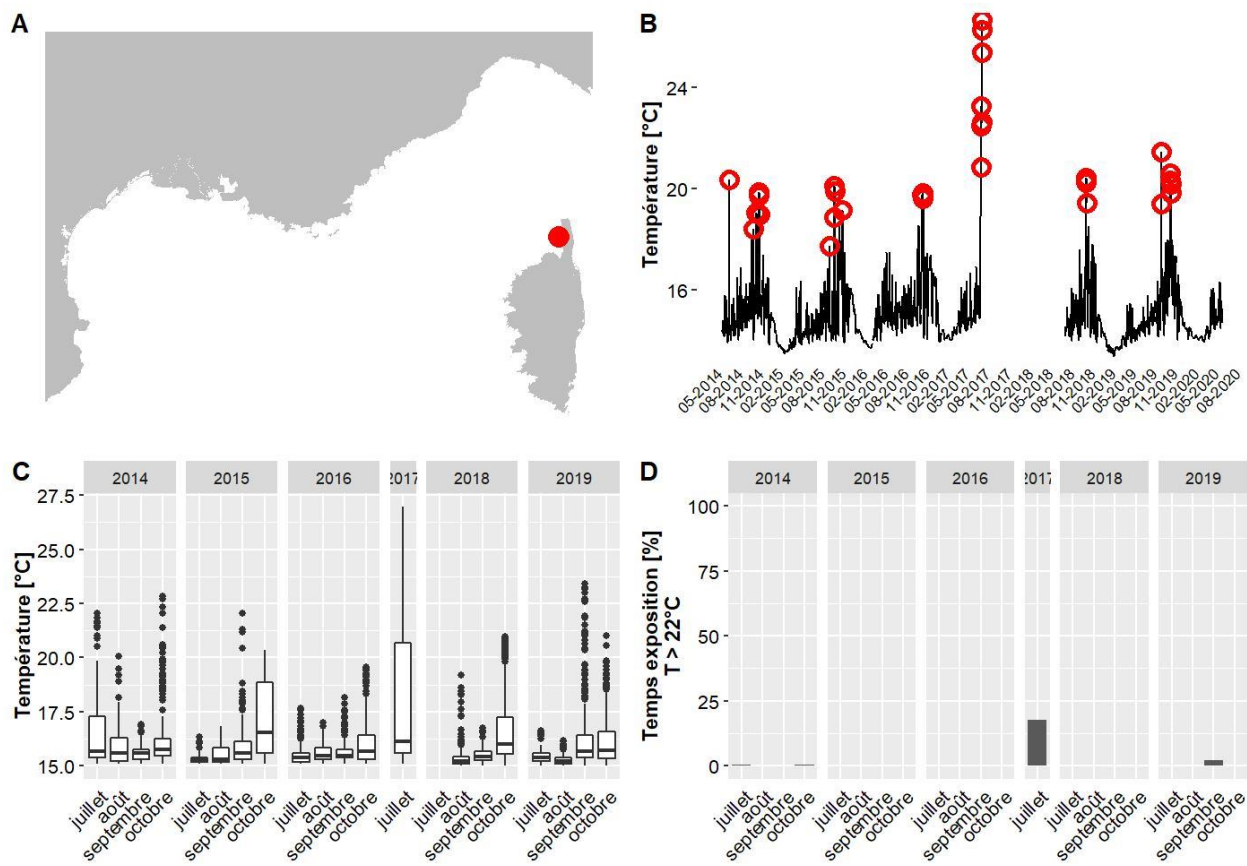
Les données de température pour le site Bruzzi PI situé à 15 m de profondeur couvrent la période allant de mai 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 25.4 °C et 93 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.7 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.K. Site: Canari - RECOR

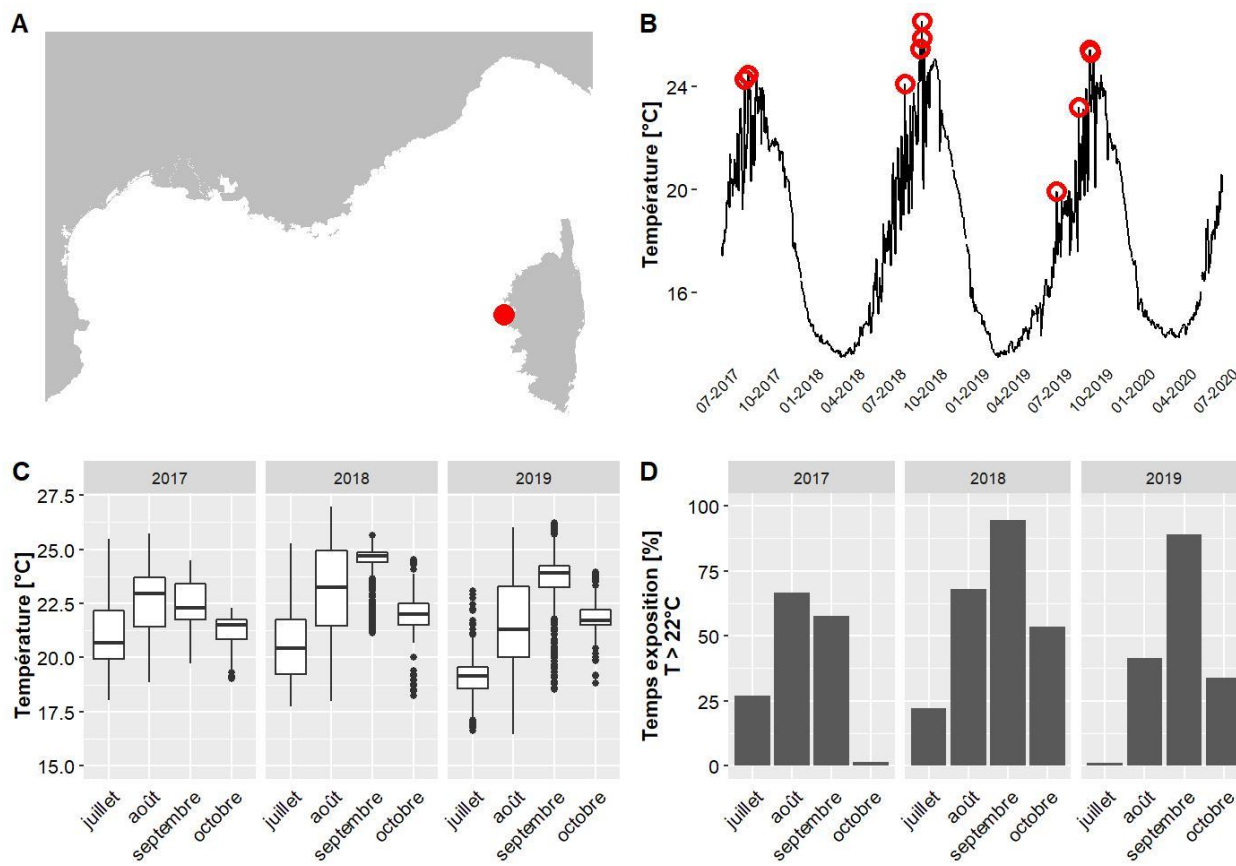
Les données de température pour le site Canari situé à 68 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2014 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de juillet 2017 avec une température moyenne de 17.7 °C et 18 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.L. Site: Capo Rosso PI - TEMPO

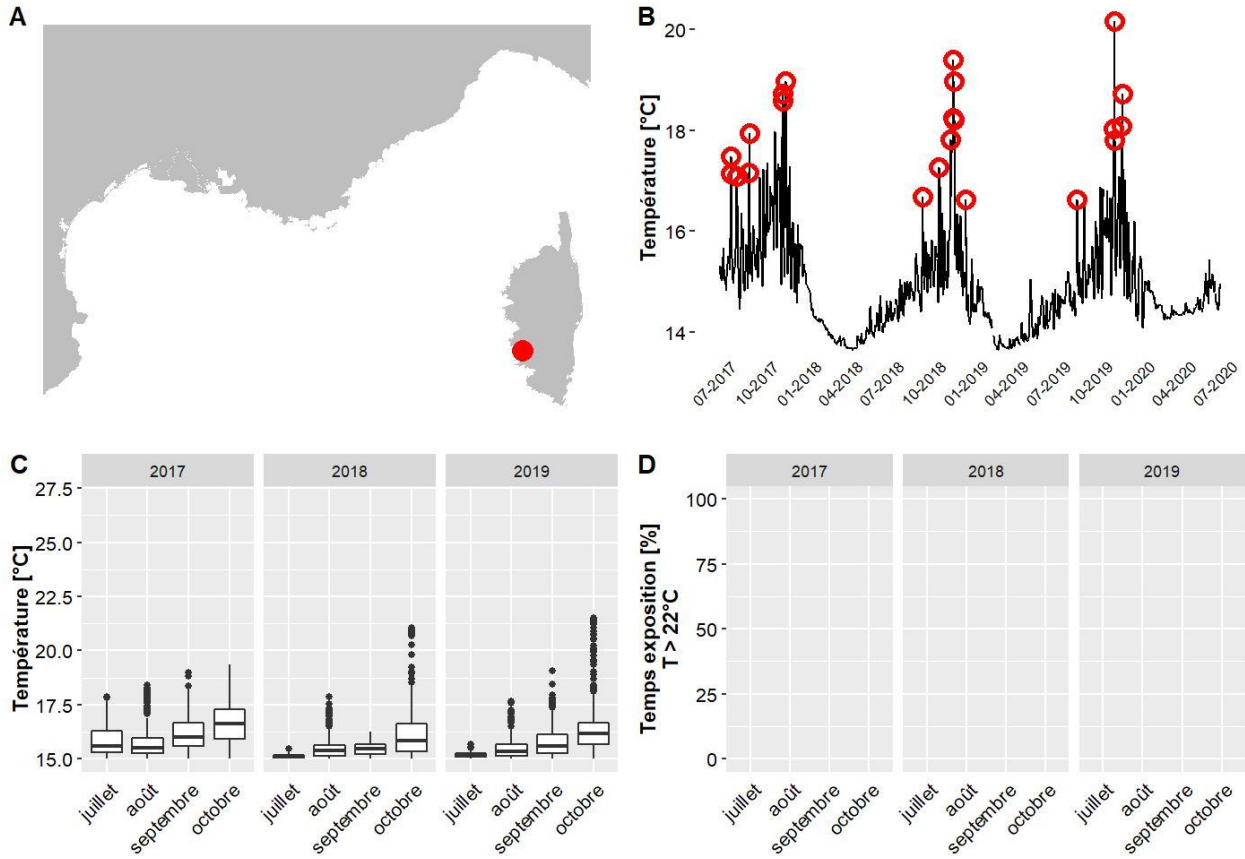
Les données de température pour le site Capo Rosso PI situé à 20 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 24.4 °C et 95 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.2 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.M. Site: Corailleurs - RECOR

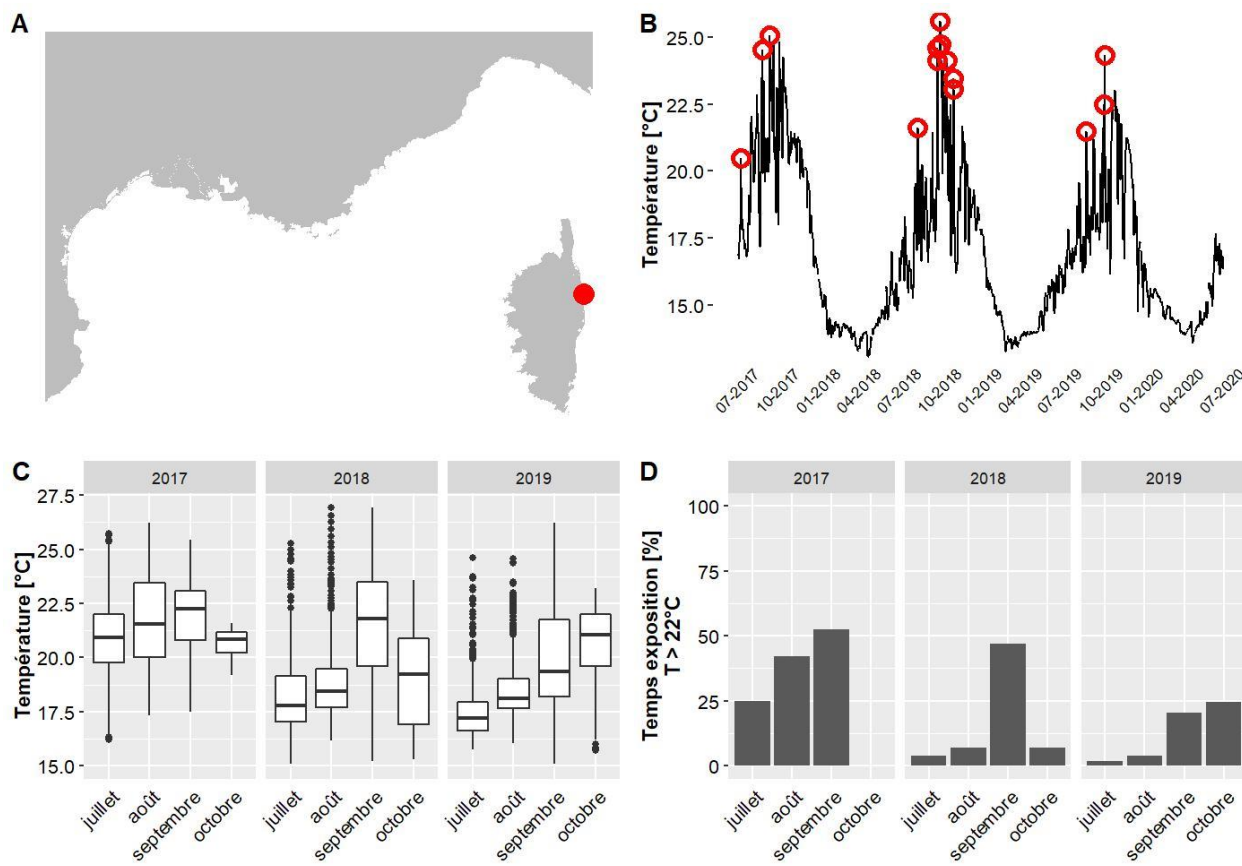
Les données de température pour le site Corailleurs situé à 63 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 16.6 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 21.5 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.N. Site: Cote Orientale - TEMPO

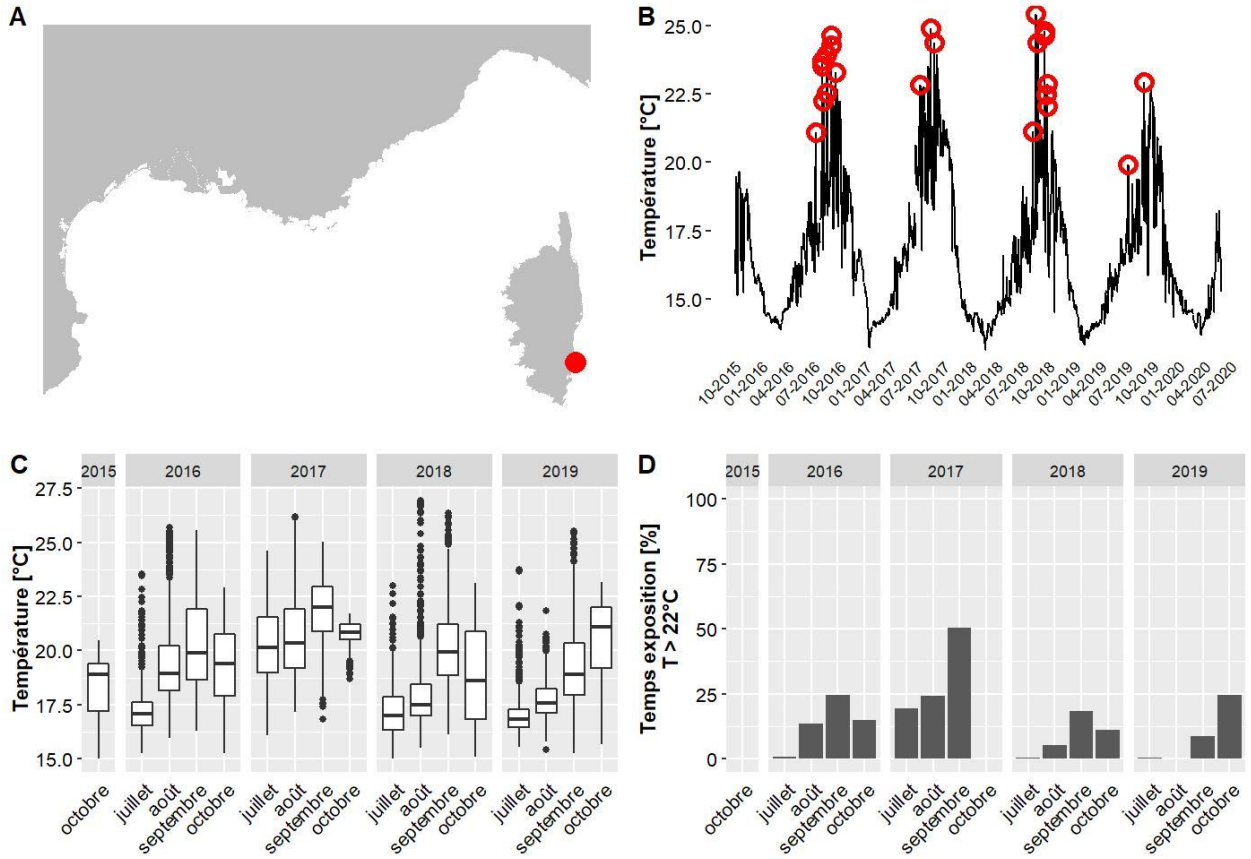
Les données de température pour le site Cote Orientale situé à 35.3 m de profondeur couvrent la période allant de mai 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 22 °C et 53 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.4 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.O. Site: Fautea - TEMPO

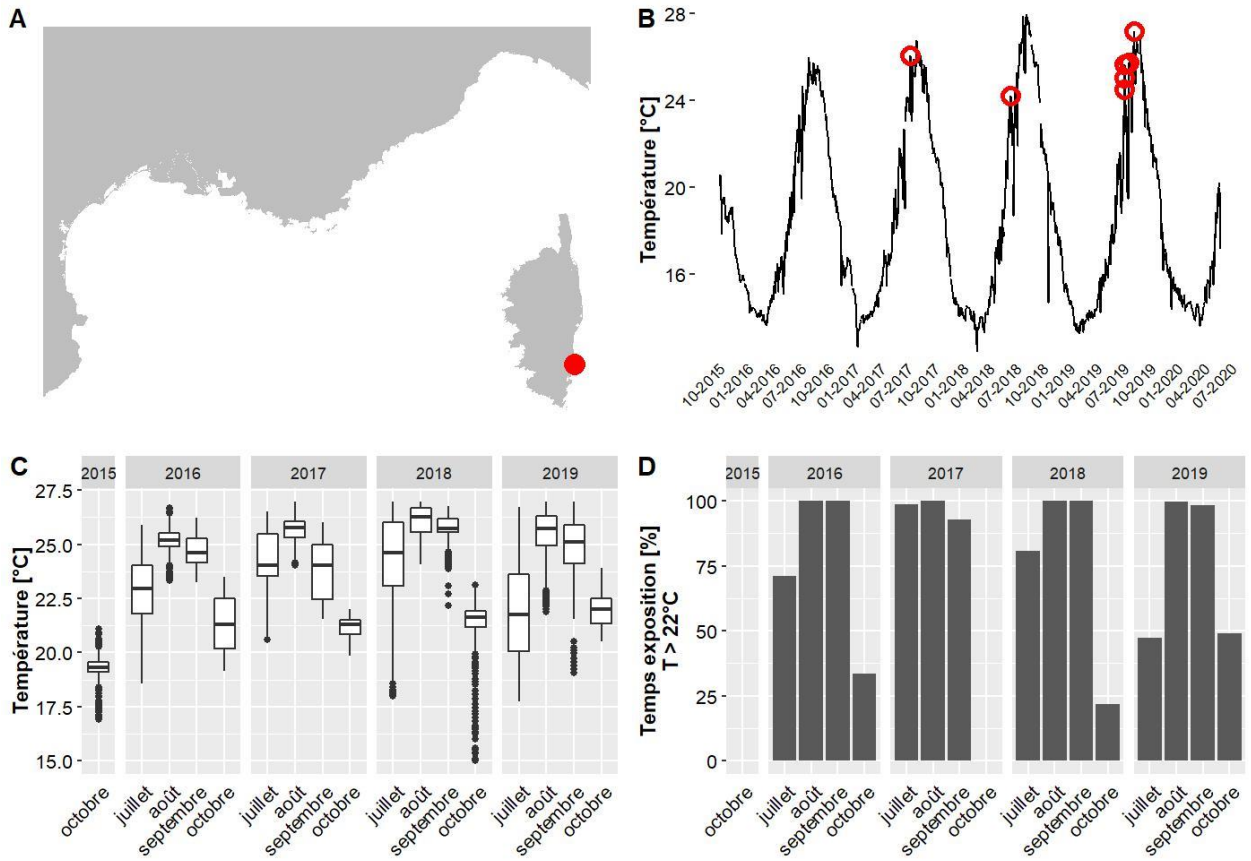
Les données de température pour le site Fautea situé à 37 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 21.9 °C et 50 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.1 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

**IV.P. Site: Fautea PI - TEMPO**

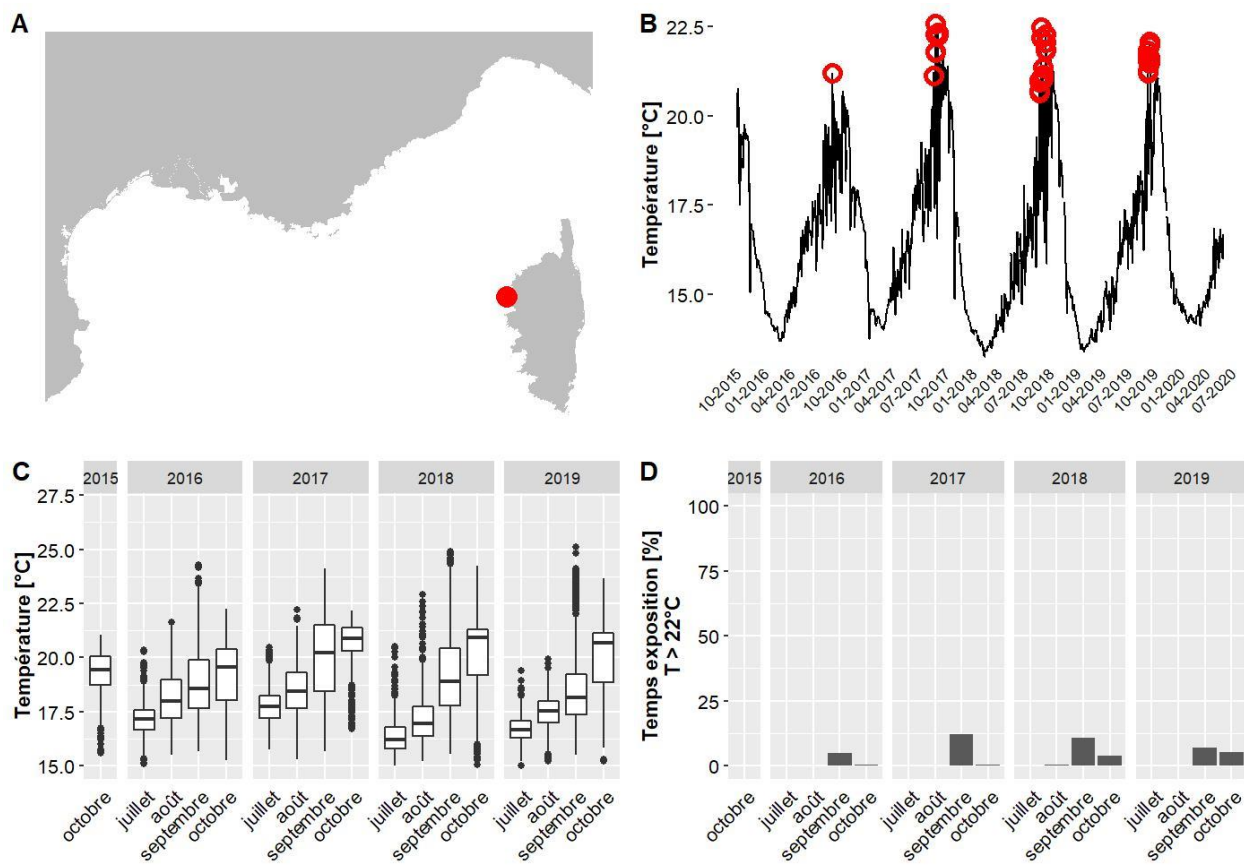
Les données de température pour le site Fautea PI situé à 16.3 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 27.1 °C et 100 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28.6 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.Q. Site: Focolara - TEMPO

Les données de température pour le site Focolara situé à 37.5 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 20.7 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 25.1 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).

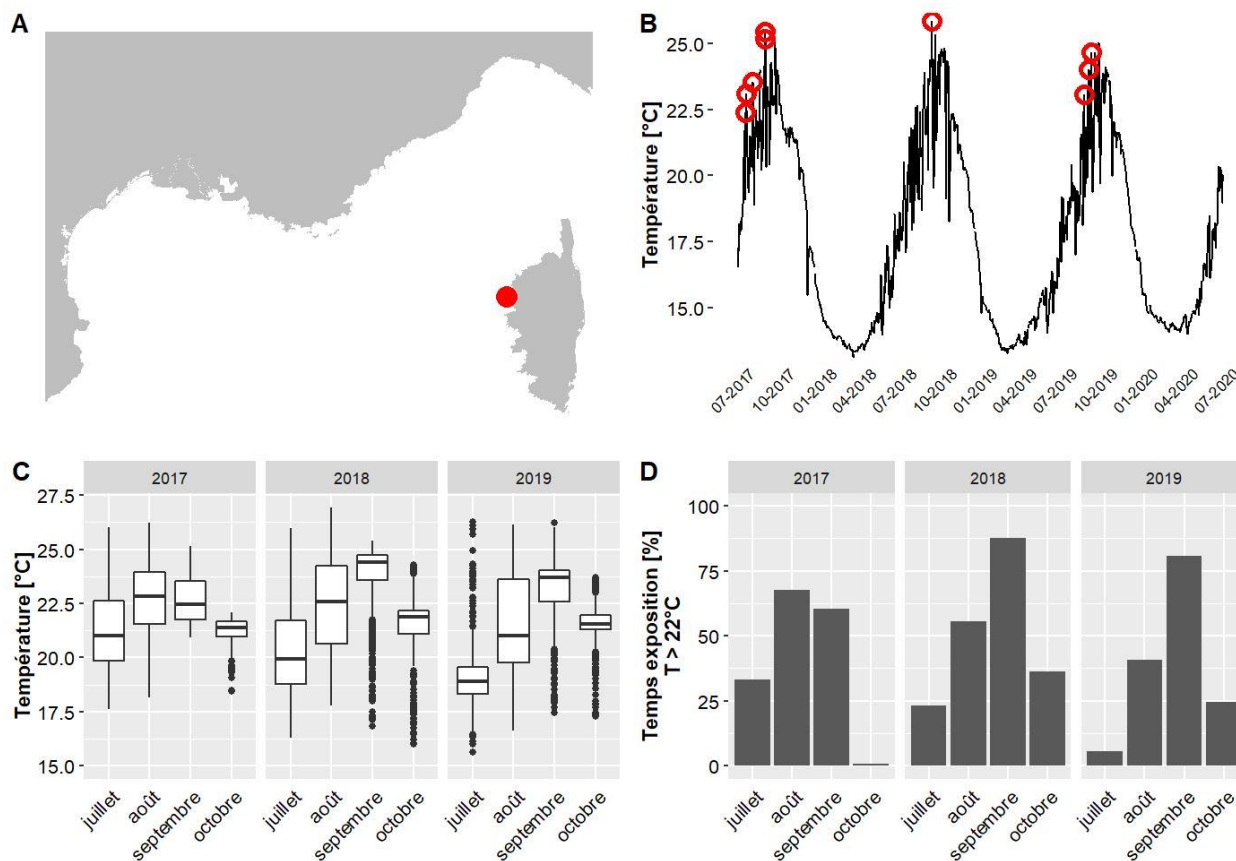


**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**



### IV.R. Site: Focolara PI - TEMPO

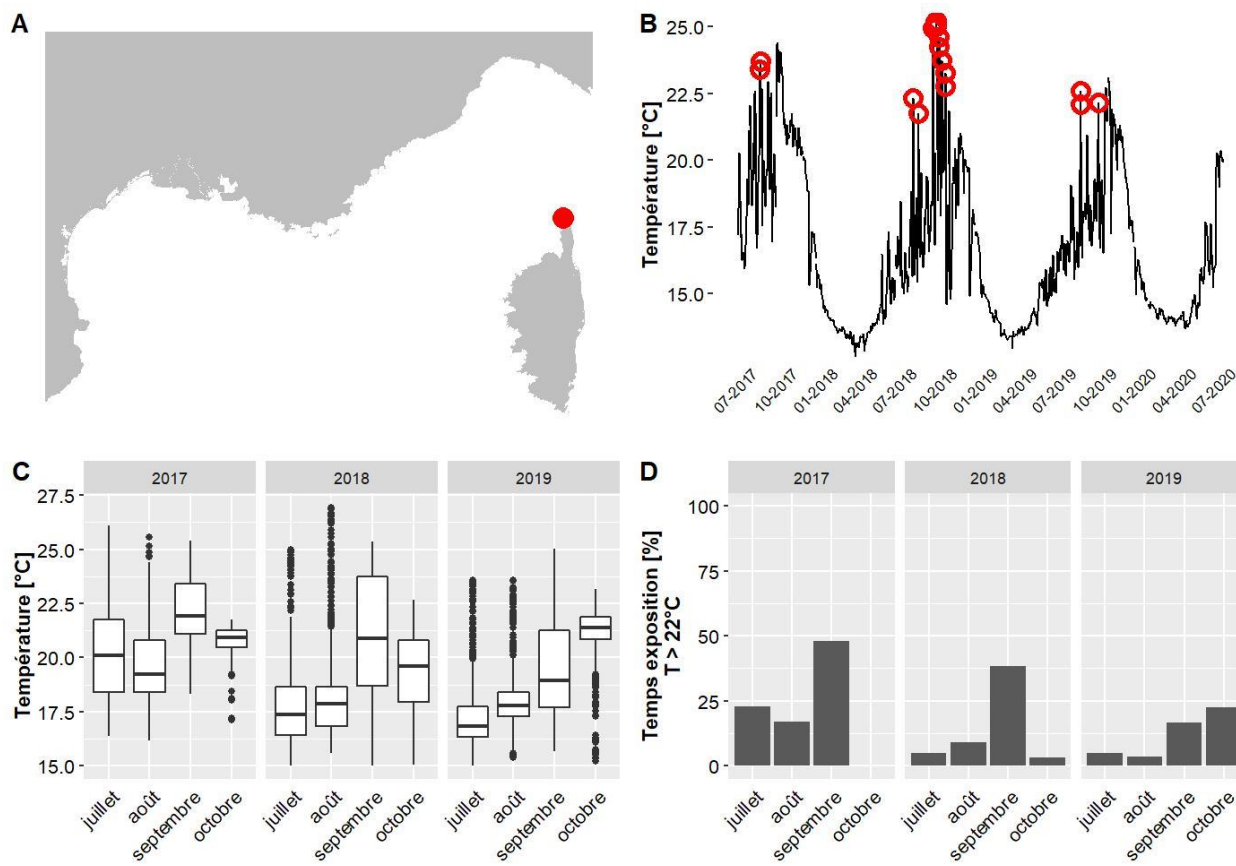
Les données de température pour le site Focolara PI situé à 20.5 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 23.8 °C et 88 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 26.9 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.S. Site: Giraglia - TEMPO

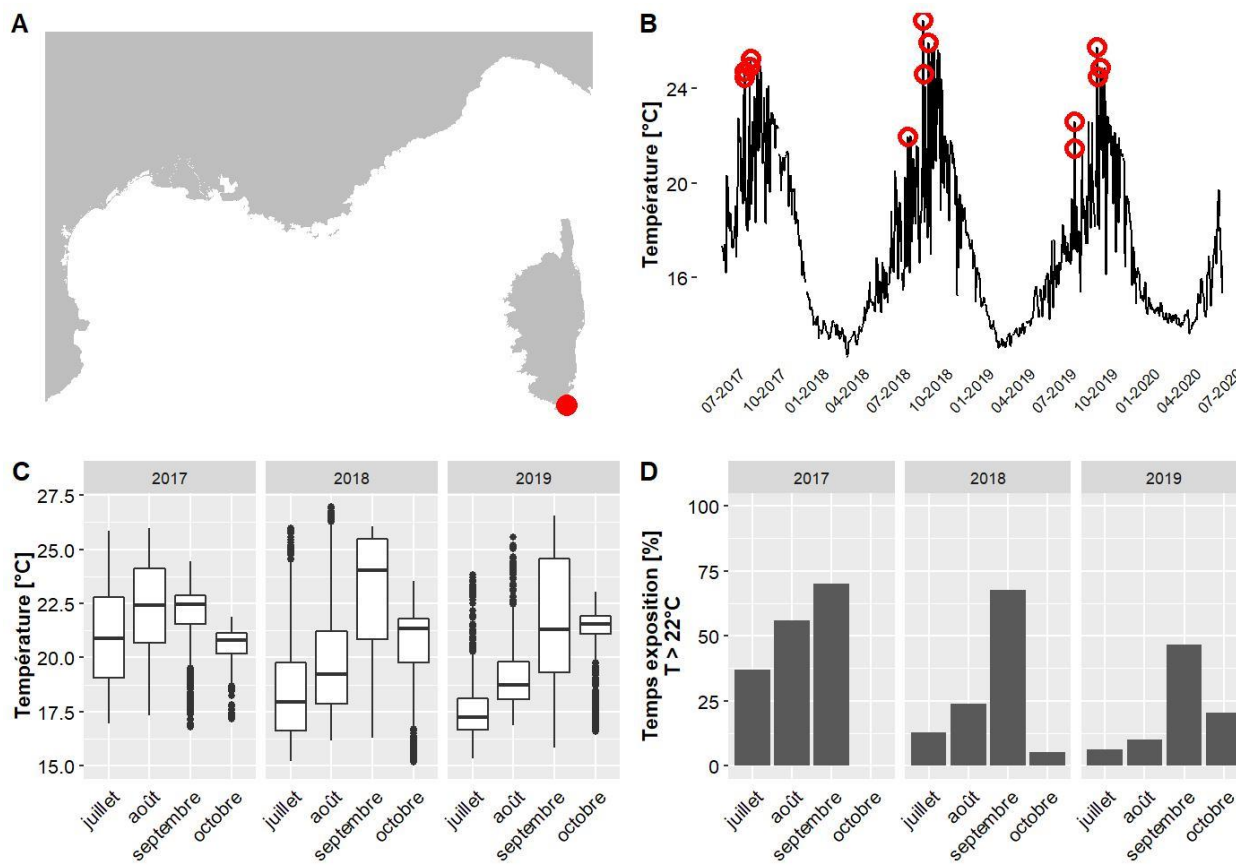
Les données de température pour le site Giraglia situé à 32.6 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 22.3 °C et 48 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 26.9 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.T. Site: Golfe Santa Manza - TEMPO

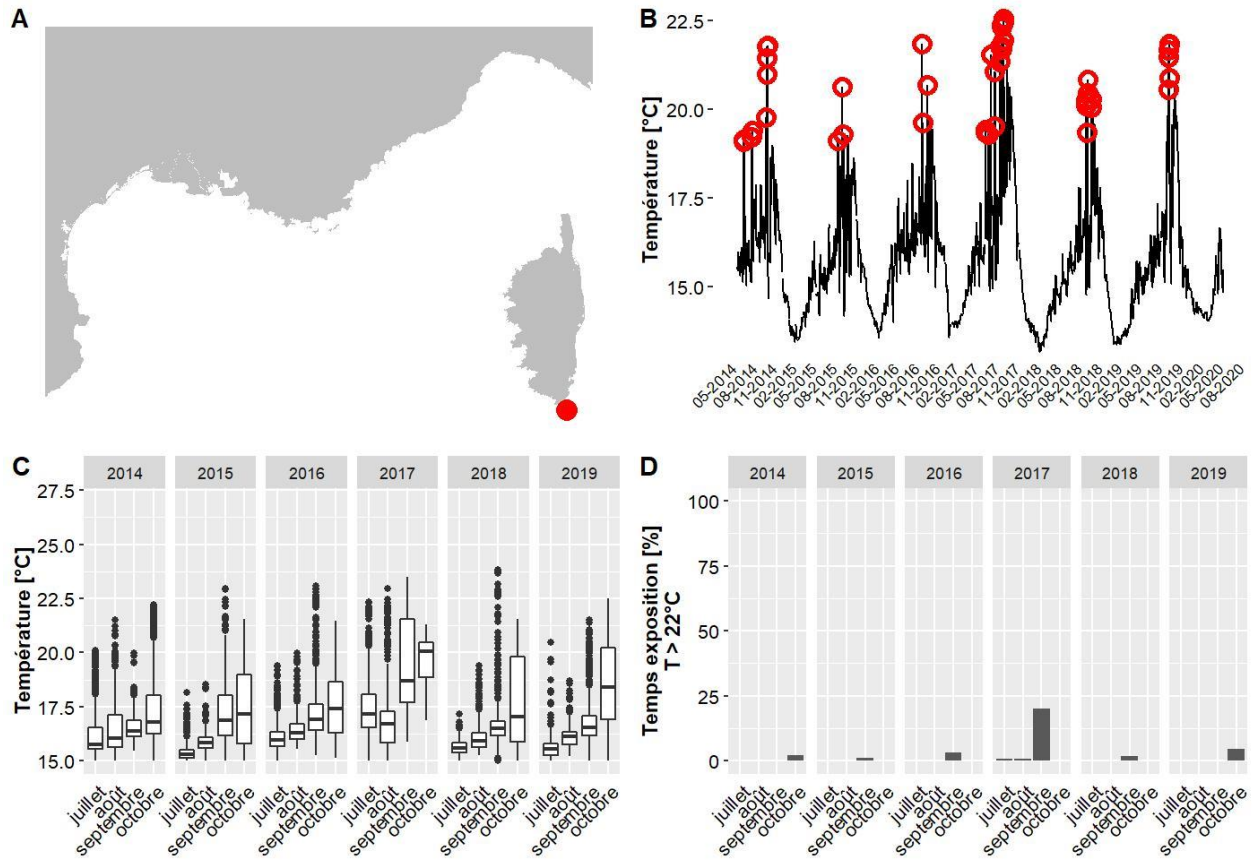
Les données de température pour le site Golfe Santa Manza situé à 32 m de profondeur couvrent la période allant de mai 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 23 °C et 68 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.6 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.U. Site: Lavezzi - RECOR

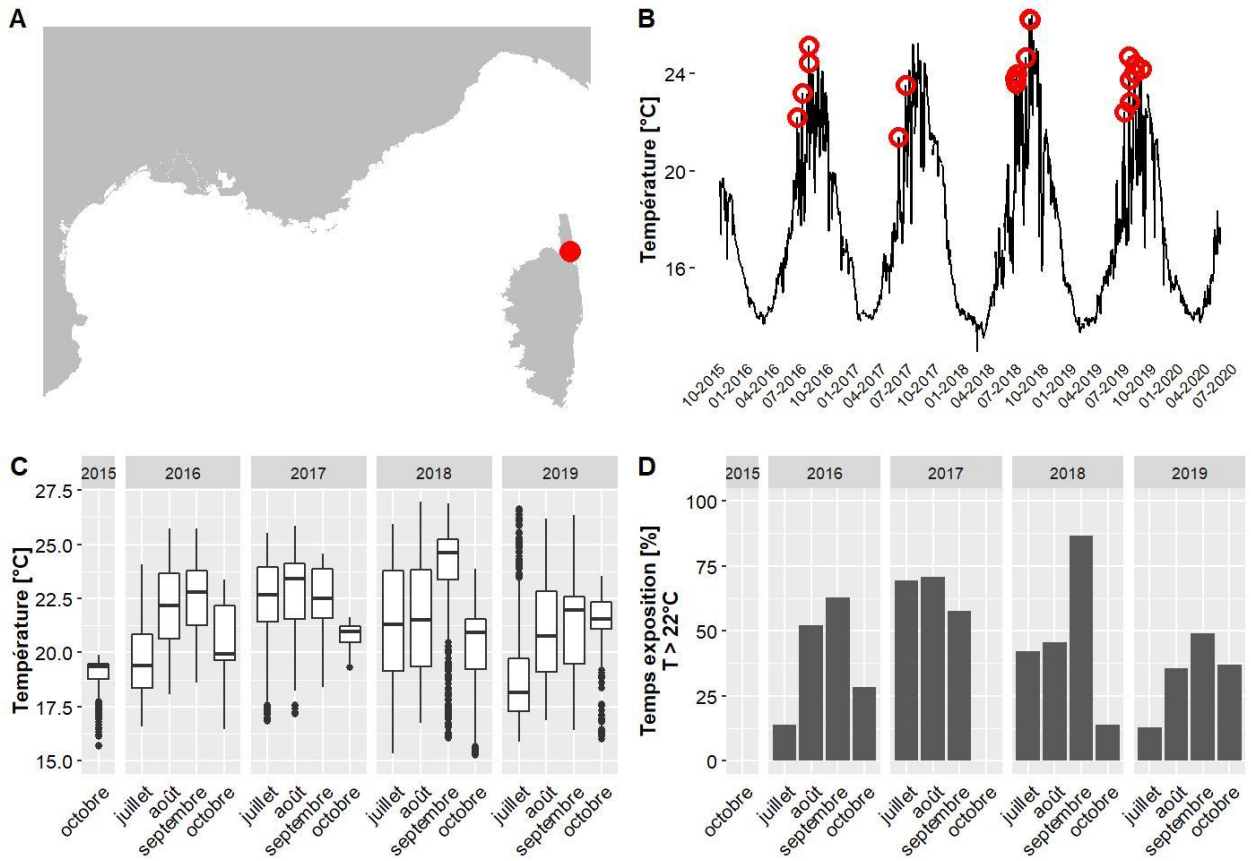
Les données de température pour le site Lavezzi situé à 50 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2014 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 19.7 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 23.8 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.V. Site: Lupino - TEMPO

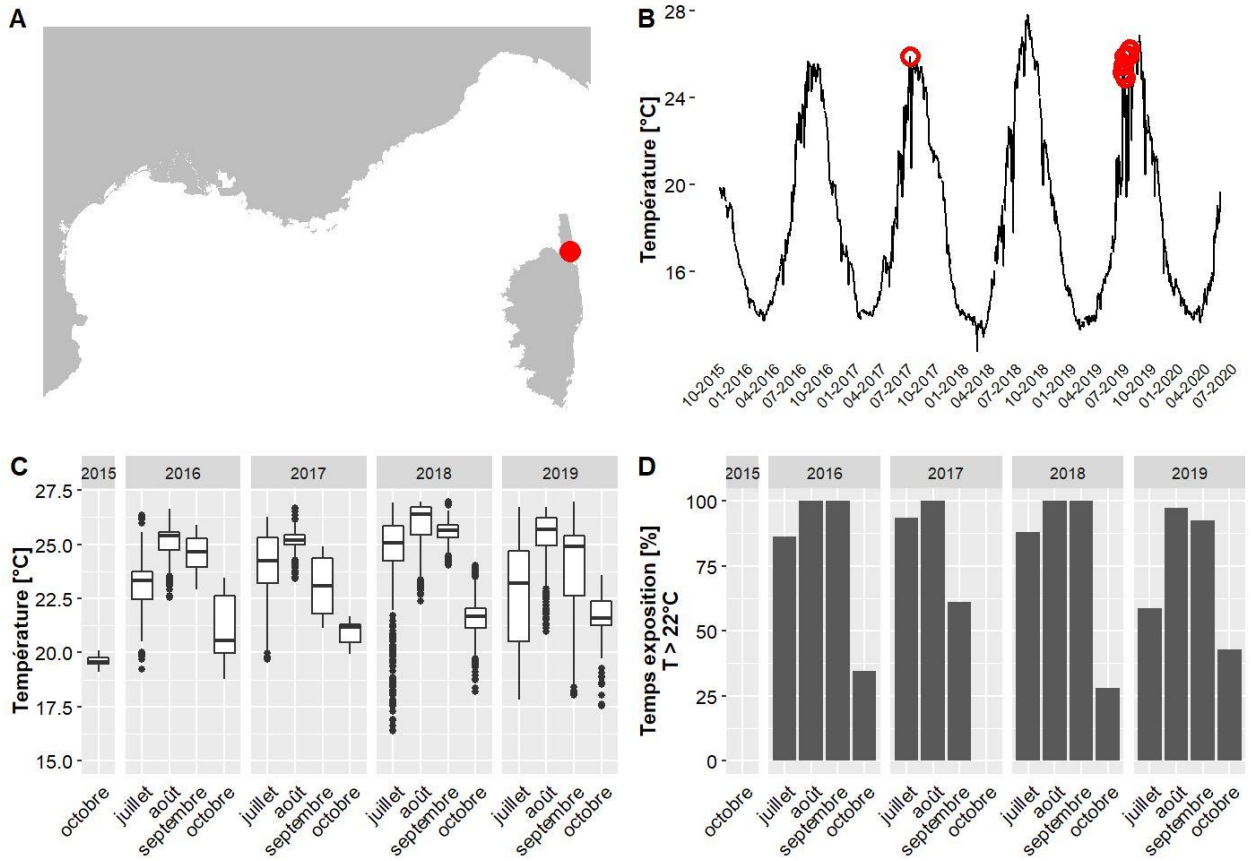
Les données de température pour le site Lupino situé à 27.6 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 23.9 °C et 87 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.6 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.W. Site: Lupino PI - TEMPO

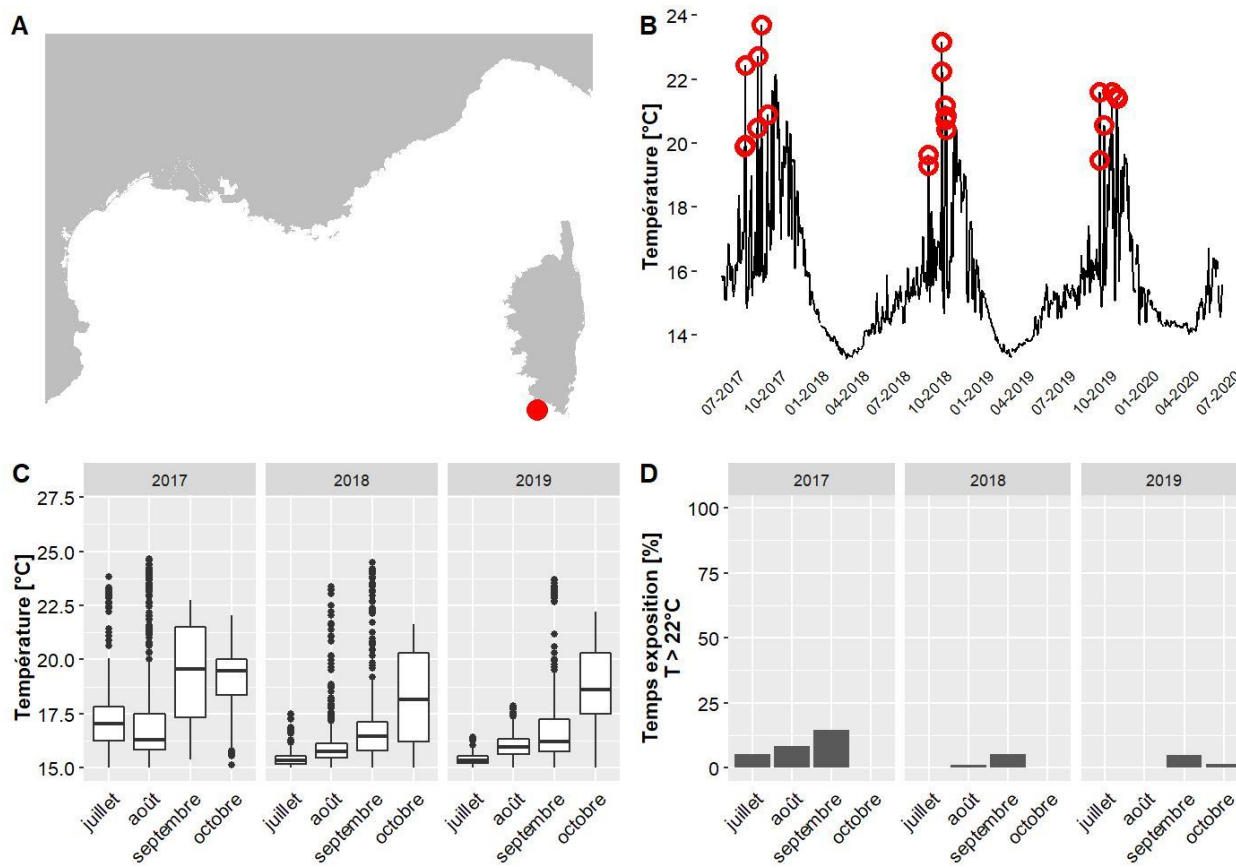
Les données de température pour le site Lupino PI situé à 15 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 26.8 °C et 100 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.X. Site: Mortoli - RECOR

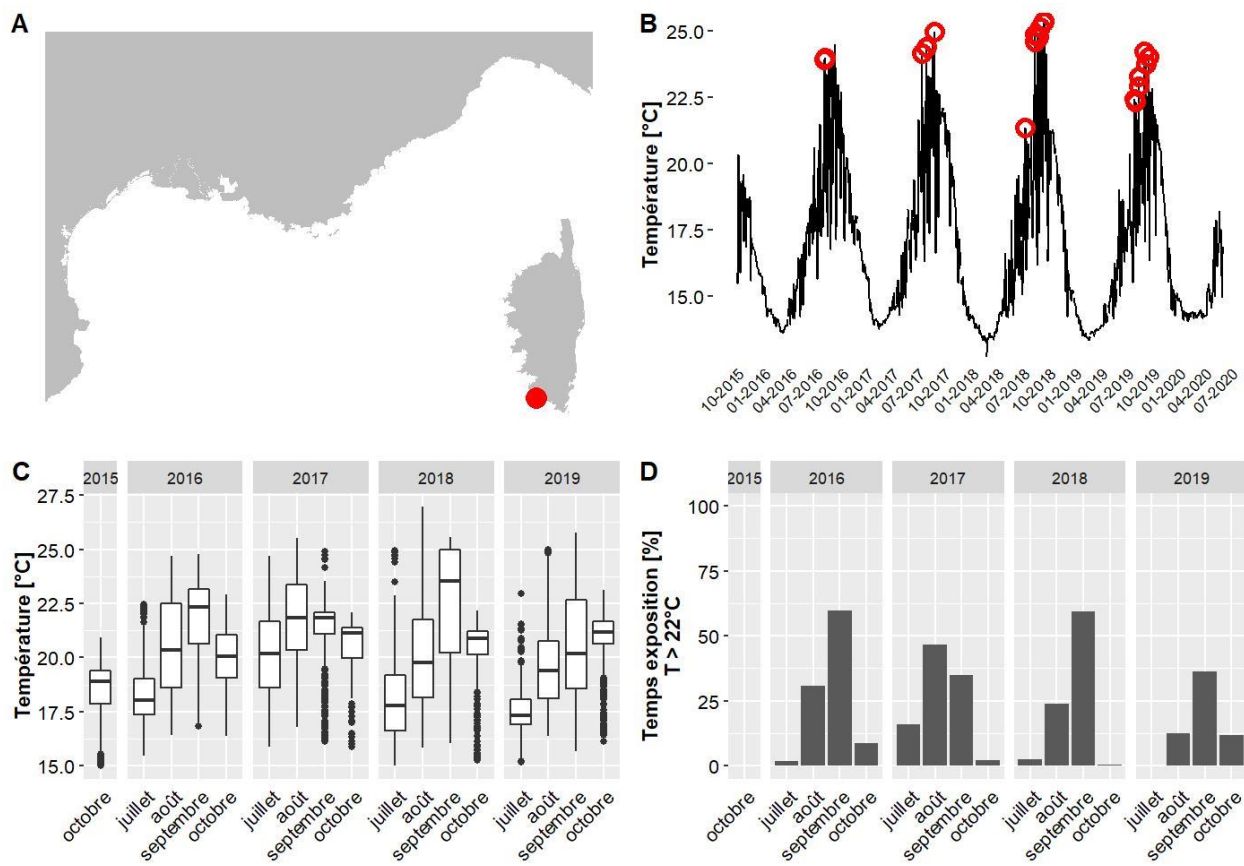
Les données de température pour le site Mortoli situé à 47 m de profondeur couvrent la période allant de mai 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 19.3 °C et 14 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 24.7 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.Y. Site: Murtoli - TEMPO

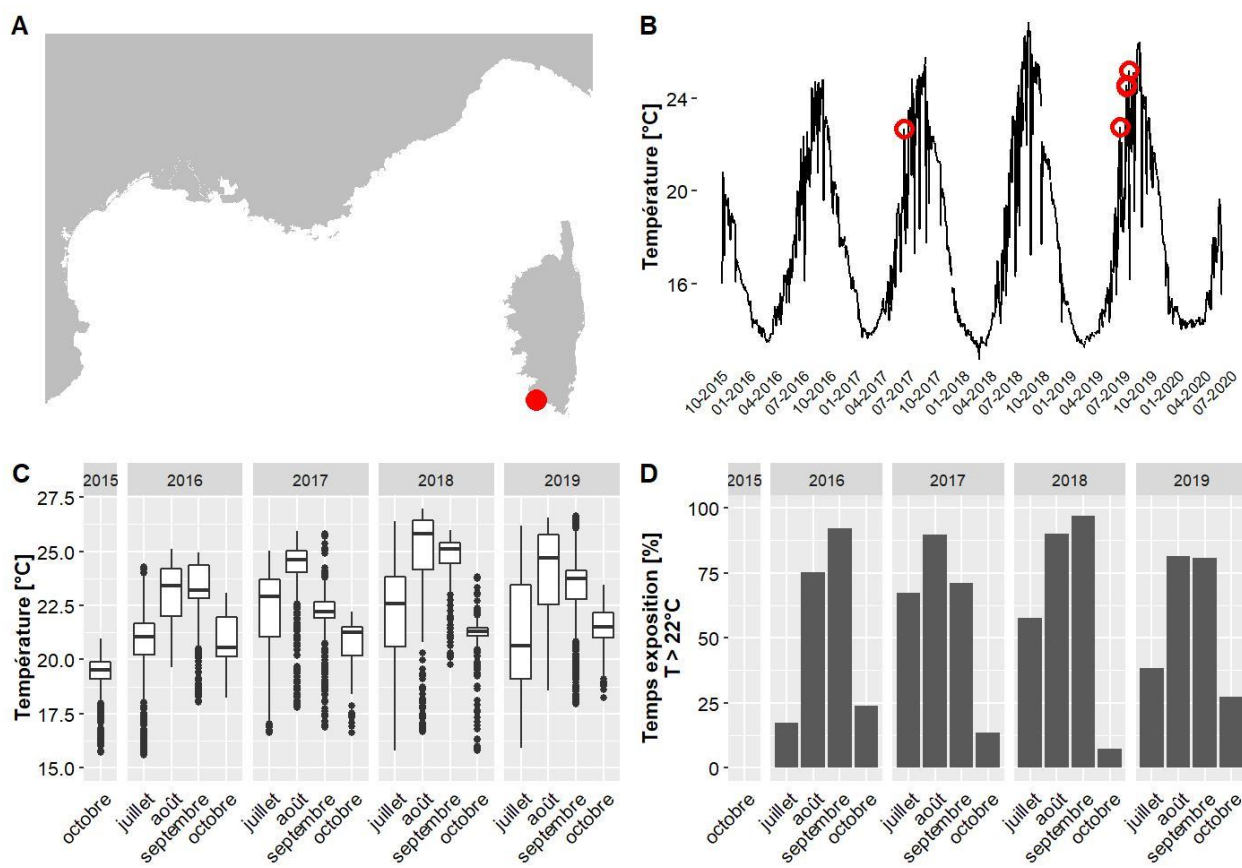
Les données de température pour le site Murtoli situé à 30 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 22.5 °C et 59 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.1 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.Z. Site: Murtoli PI - TEMPO

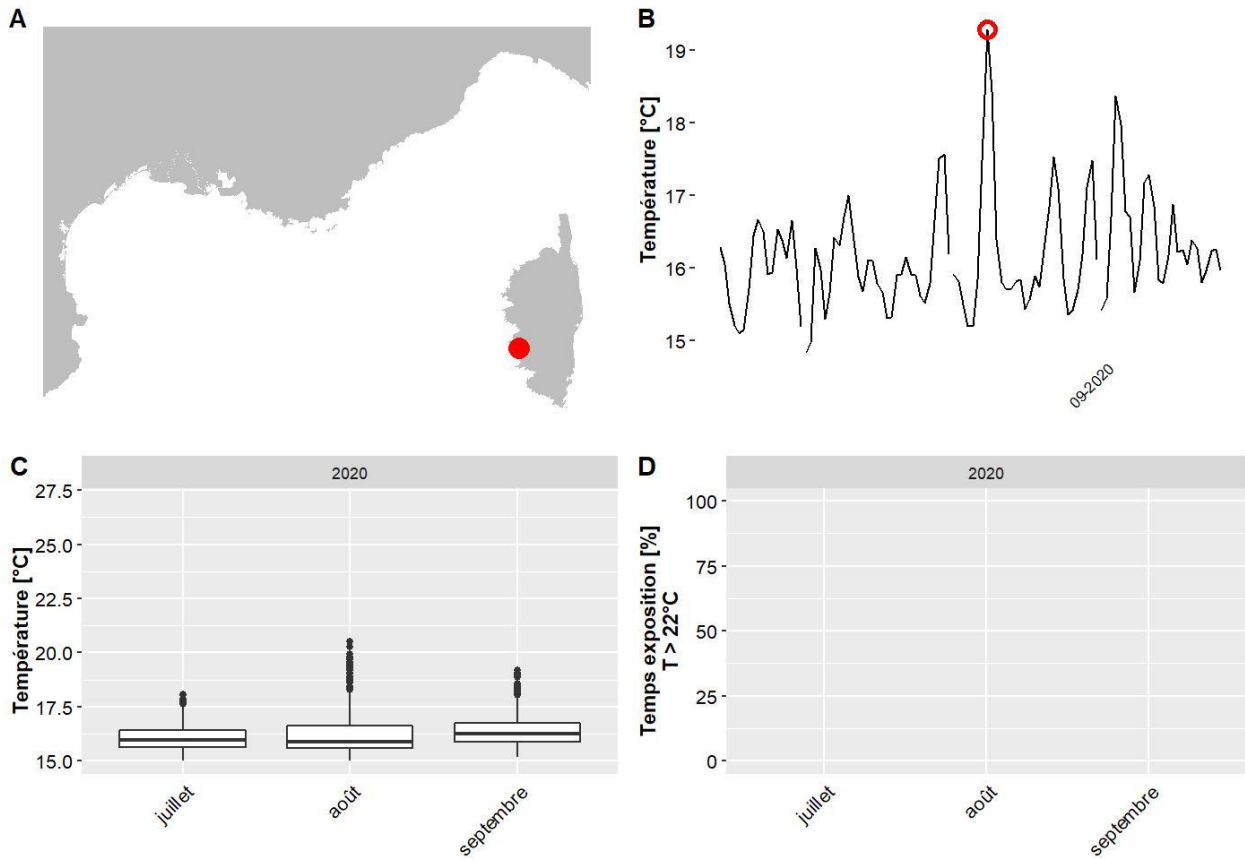
Les données de température pour le site Murtoli PI situé à 13 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 25.2 °C et 90 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28.1 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.AA. Site: Parata - RECOR

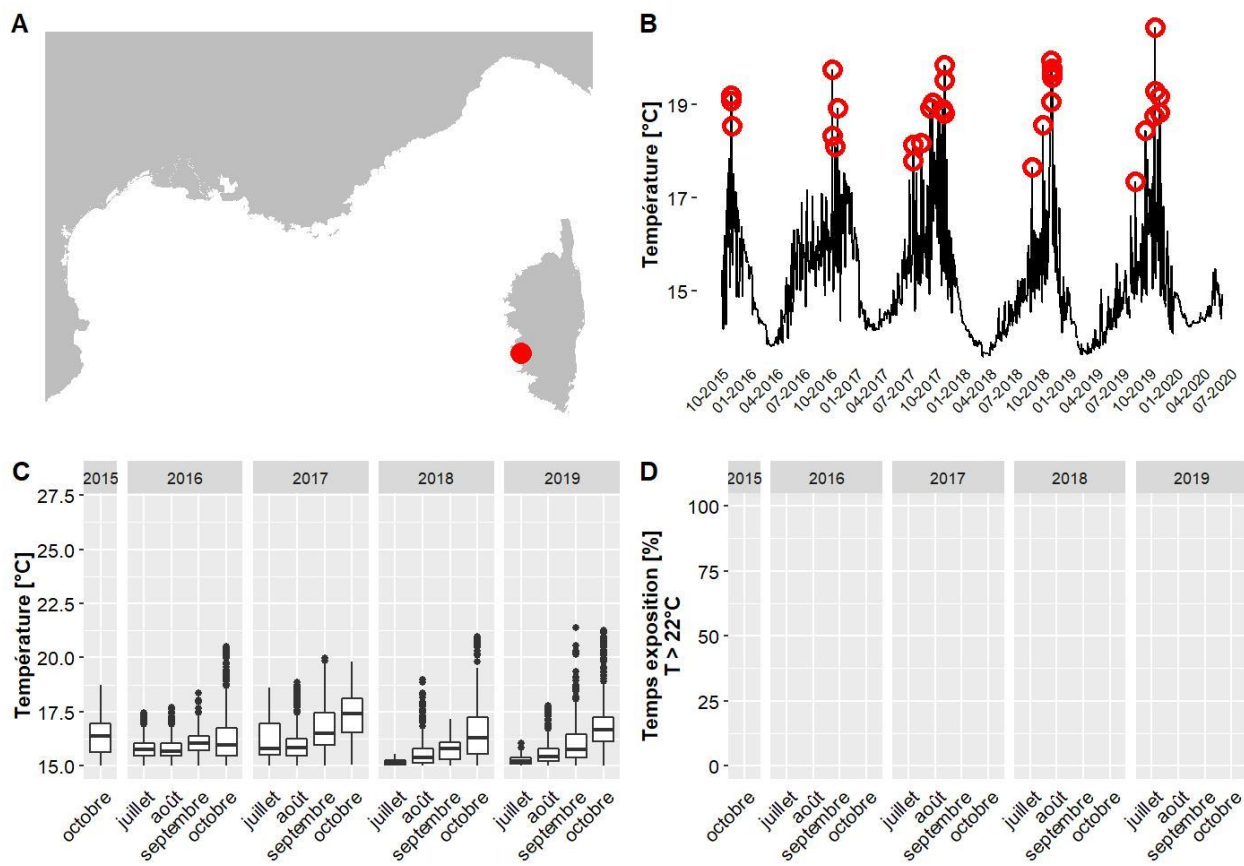
Les données de température pour le site Parata situé à 50 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2020 à septembre 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2020 avec une température moyenne de 16.4 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 20.5 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

**IV.BB. Site: Parata - RECOR**

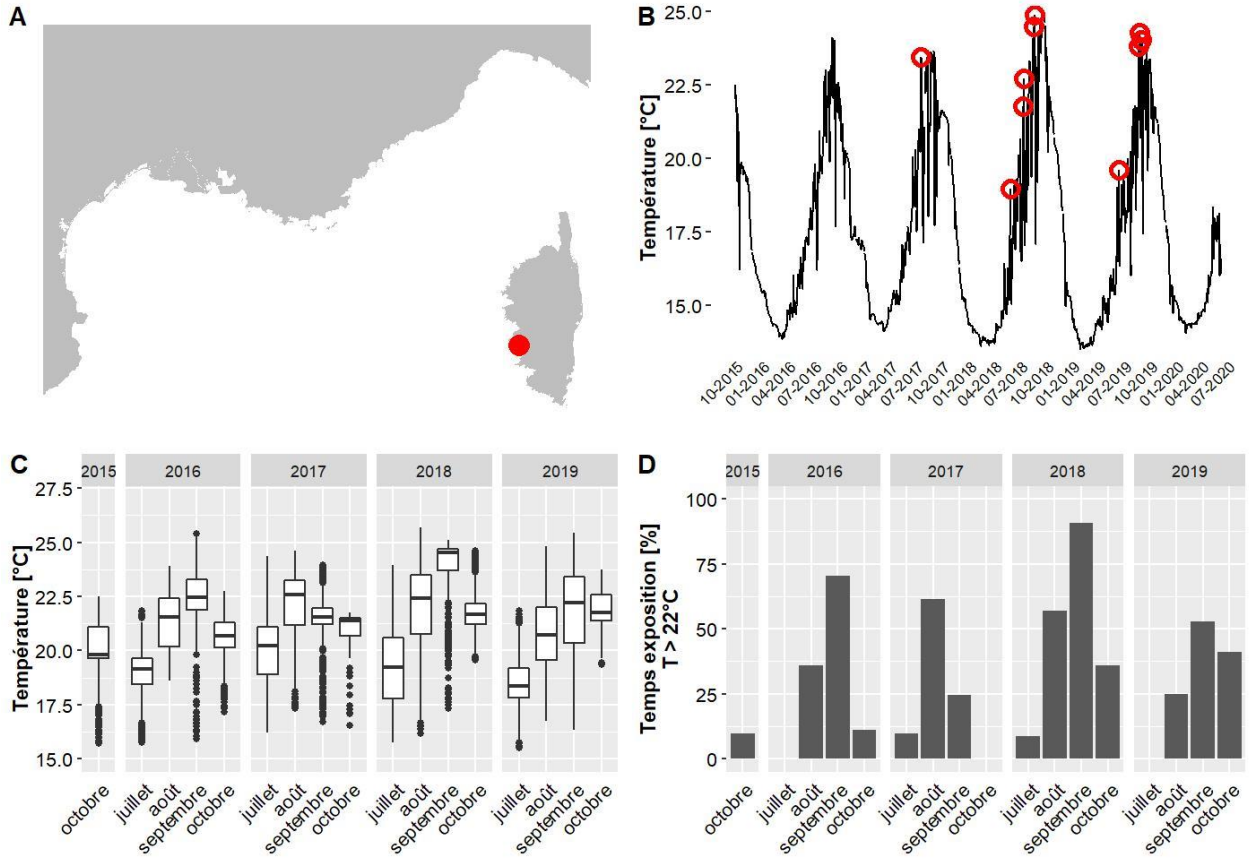
Les données de température pour le site Parata situé à 56 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 17.3 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 21.4 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.CC. Site: Plage Trottet - TEMPO

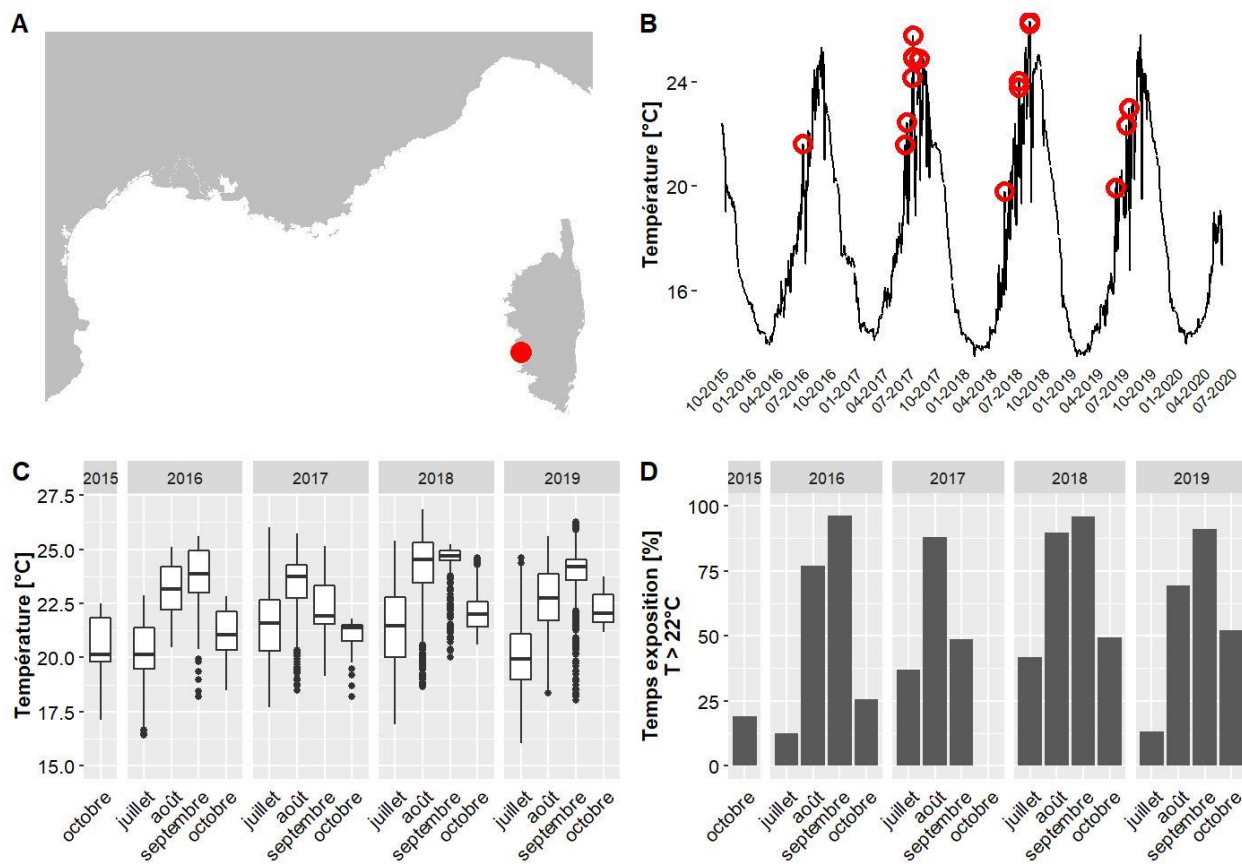
Les données de température pour le site Plage Trottet situé à 23 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 23.9 °C et 91 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 25.7 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.DD. Site: Plage Trottet PI - TEMPO

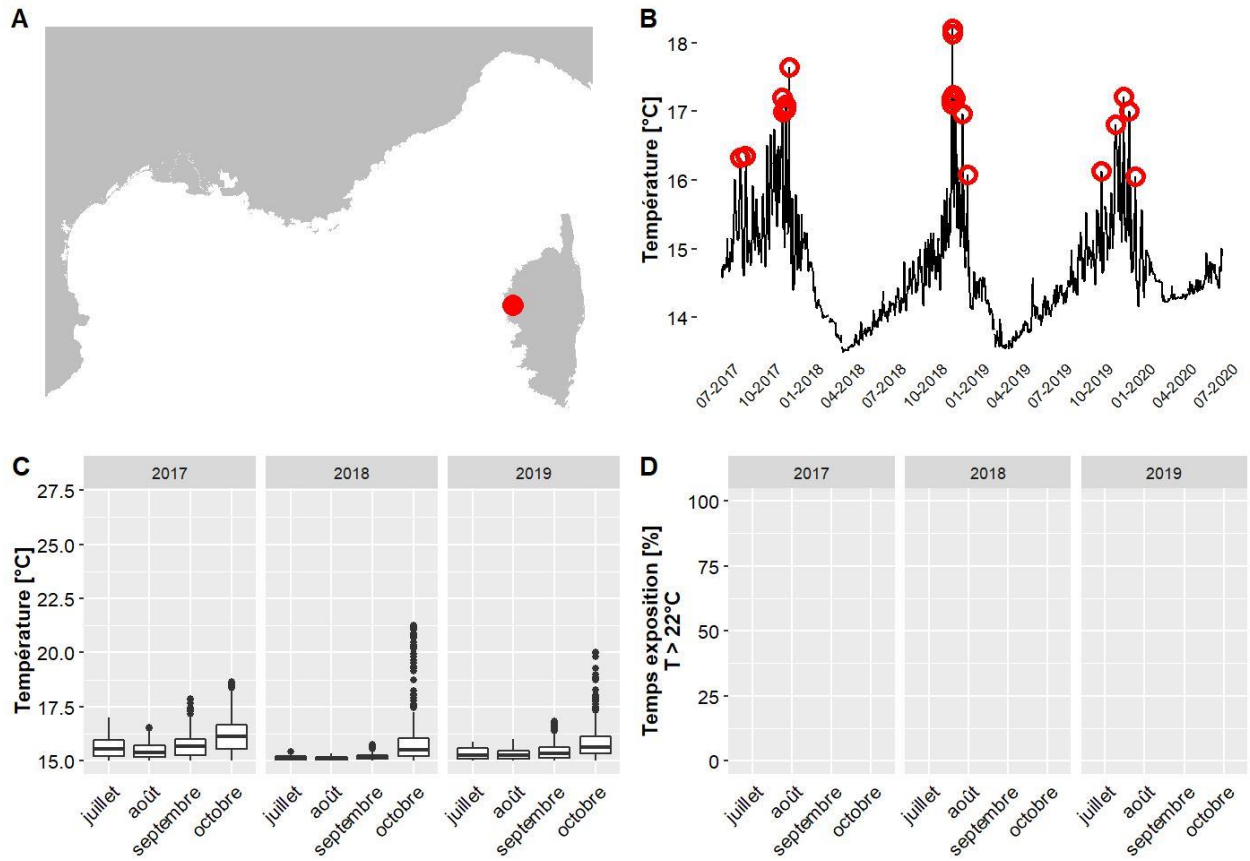
Les données de température pour le site Plage Trottet PI situé à 16 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2018 avec une température moyenne de 24.5 °C et 96 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 26.8 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.EE. Site: Porto sud - RECOR

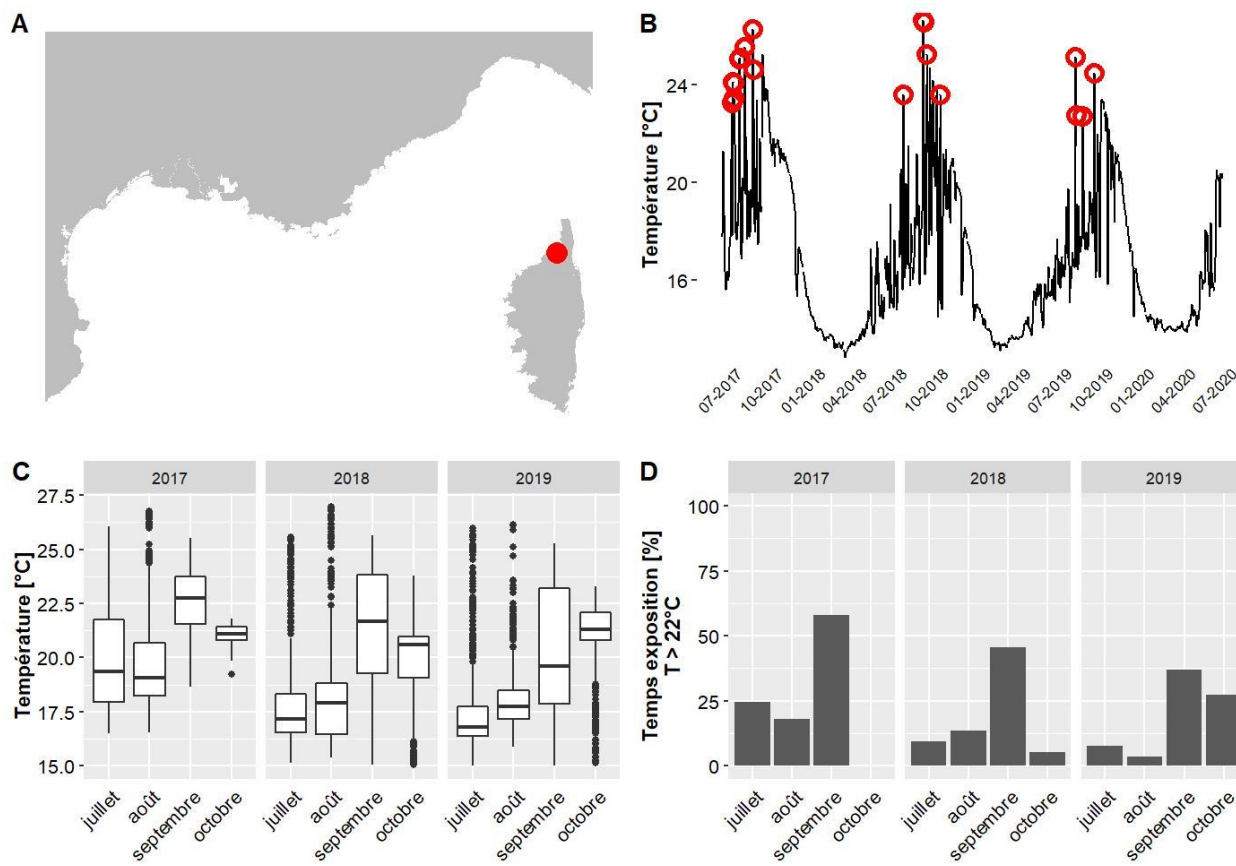
Les données de température pour le site Porto sud situé à 65 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 16.1 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 21.3 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.FF. Site: Punta Mortella - TEMPO

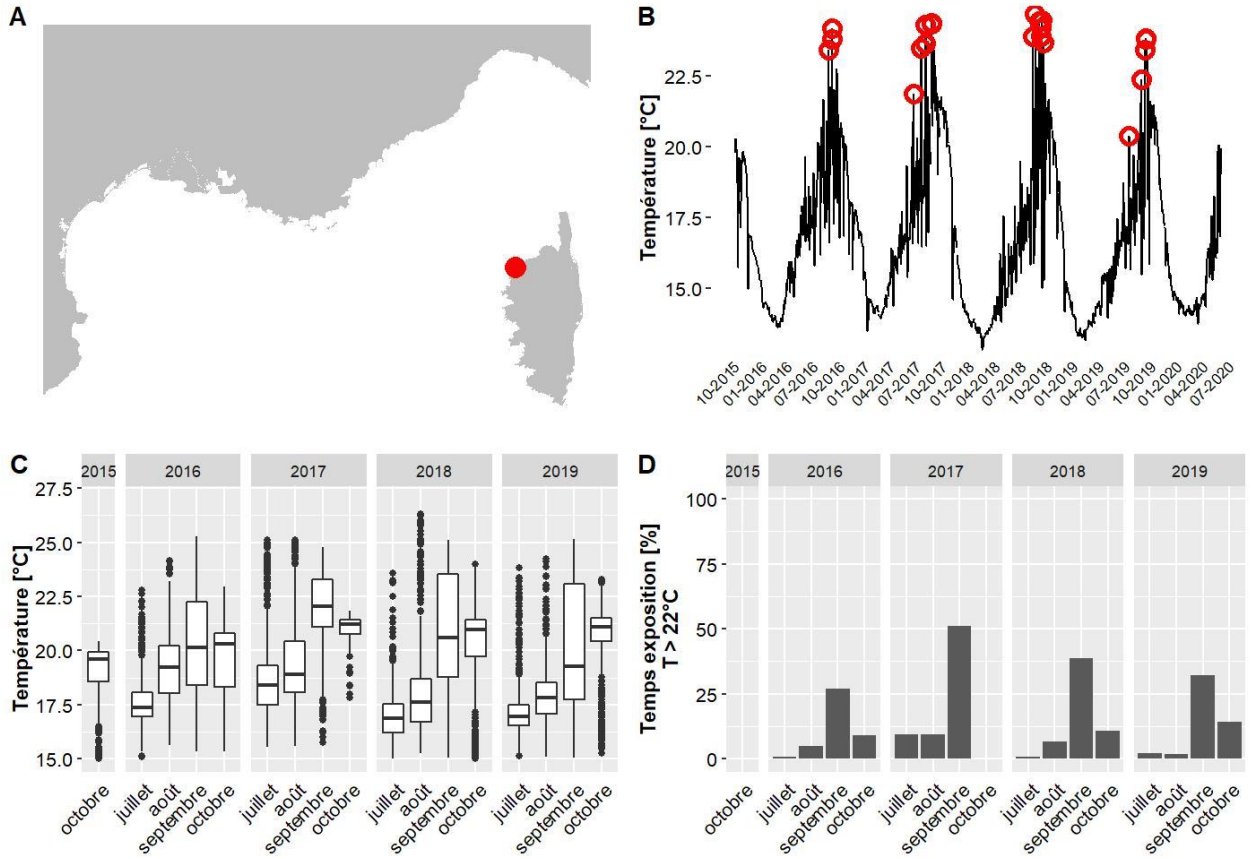
Les données de température pour le site Punta Mortella situé à 33.8 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 22.6 °C et 58 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.8 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.GG. Site: Punta Vaccaja - TEMPO

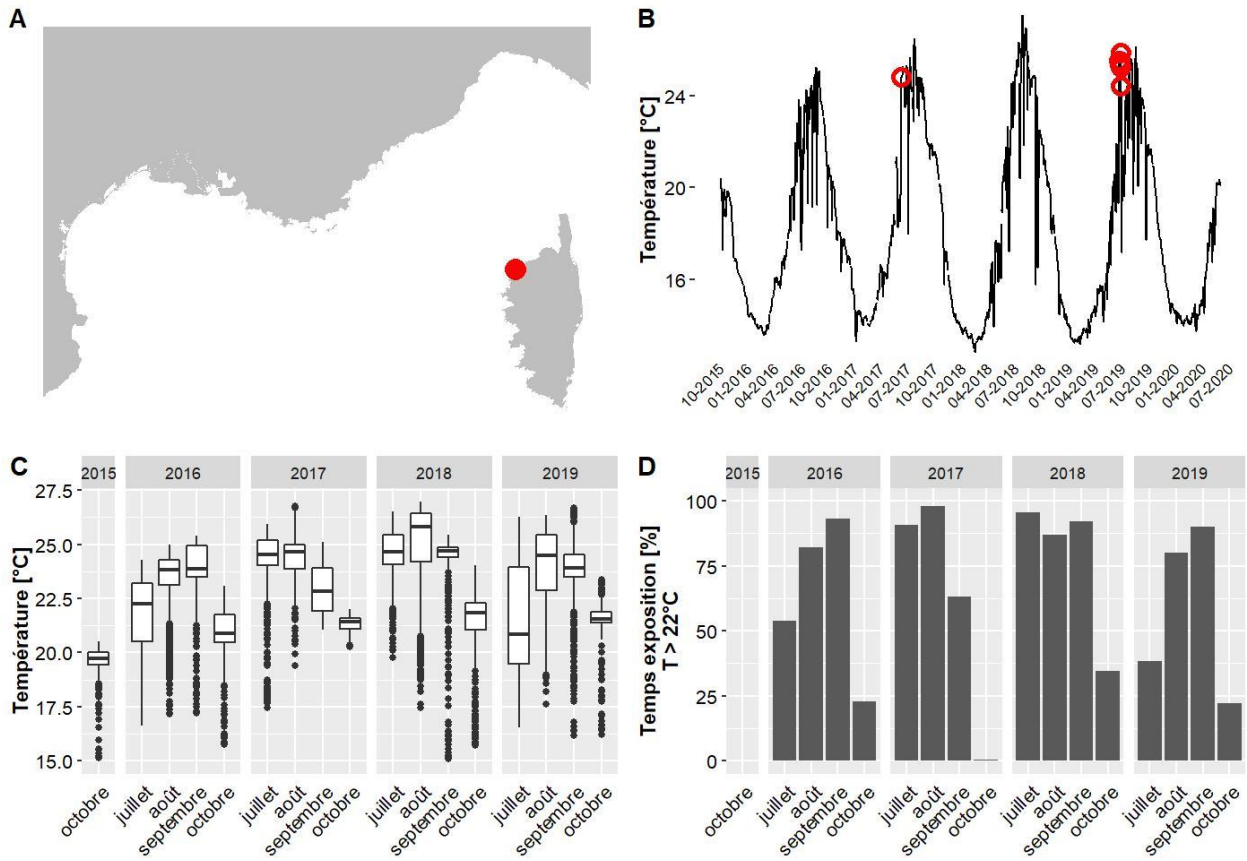
Les données de température pour le site Punta Vaccaja situé à 33.4 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 22 °C et 51 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 26.3 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

**IV.HH. Site: Punta Vaccaja PI - TEMPO**

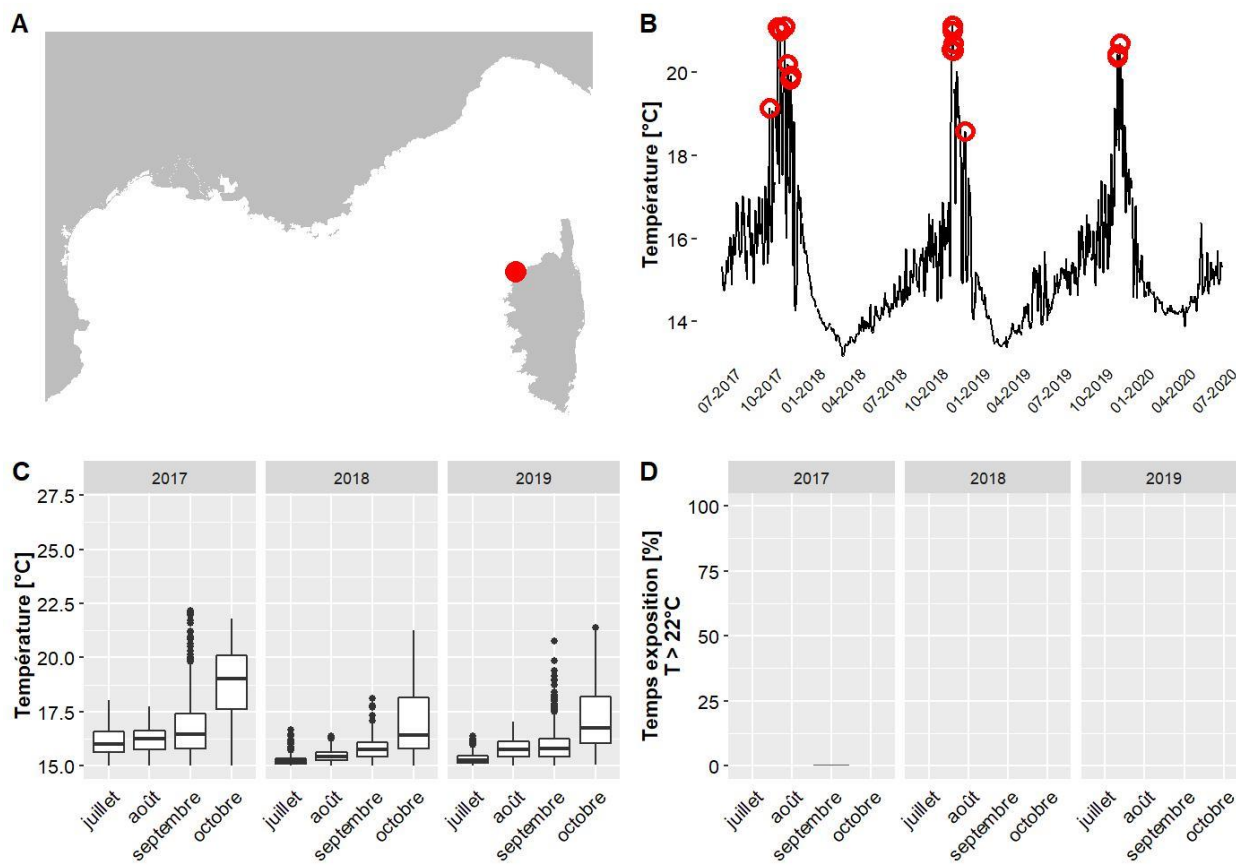
Les données de température pour le site Punta Vaccaja PI situé à 16 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 25.2 °C et 87 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.II. Site: Revelatta - RECOR

Les données de température pour le site Revelatta situé à 53.6 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 18.8 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 22.2 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).

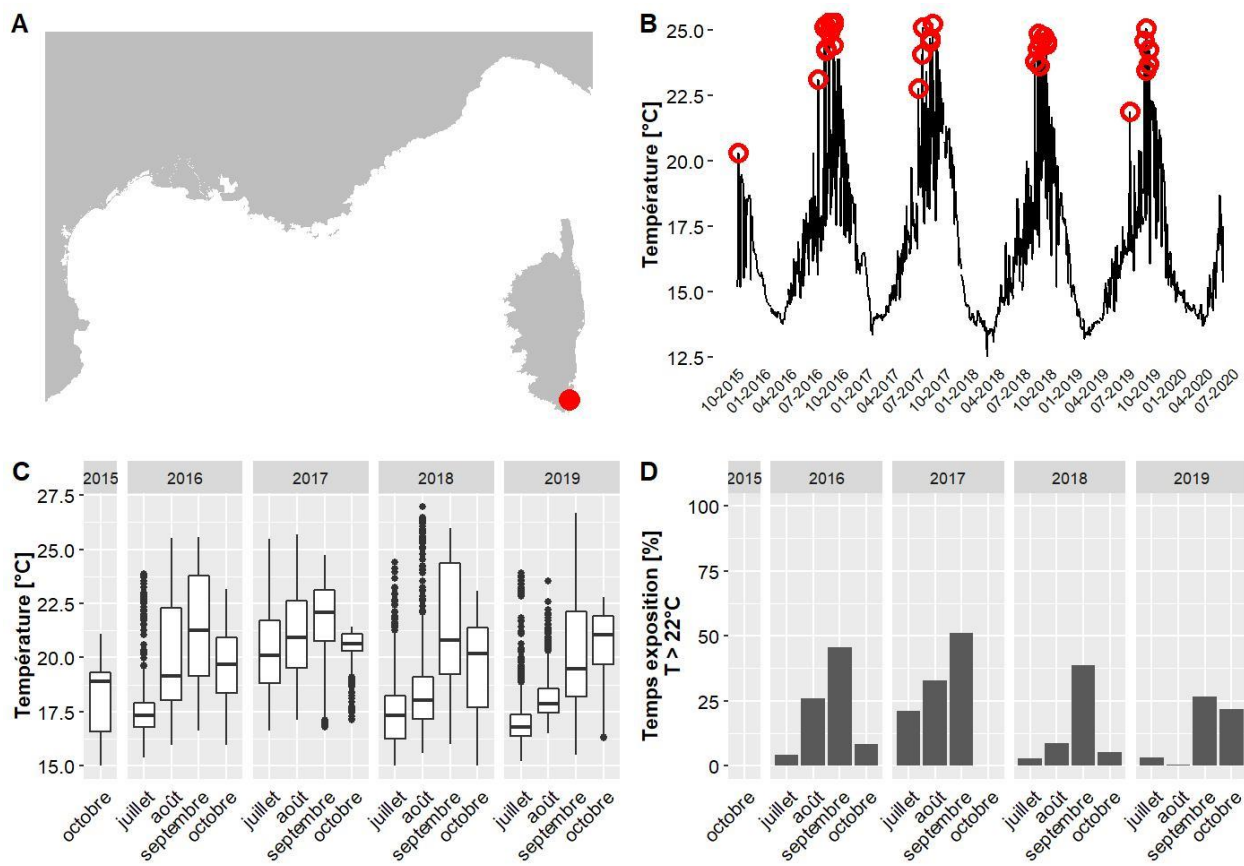


**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**



### IV.JJ. Site: Rondinara - TEMPO

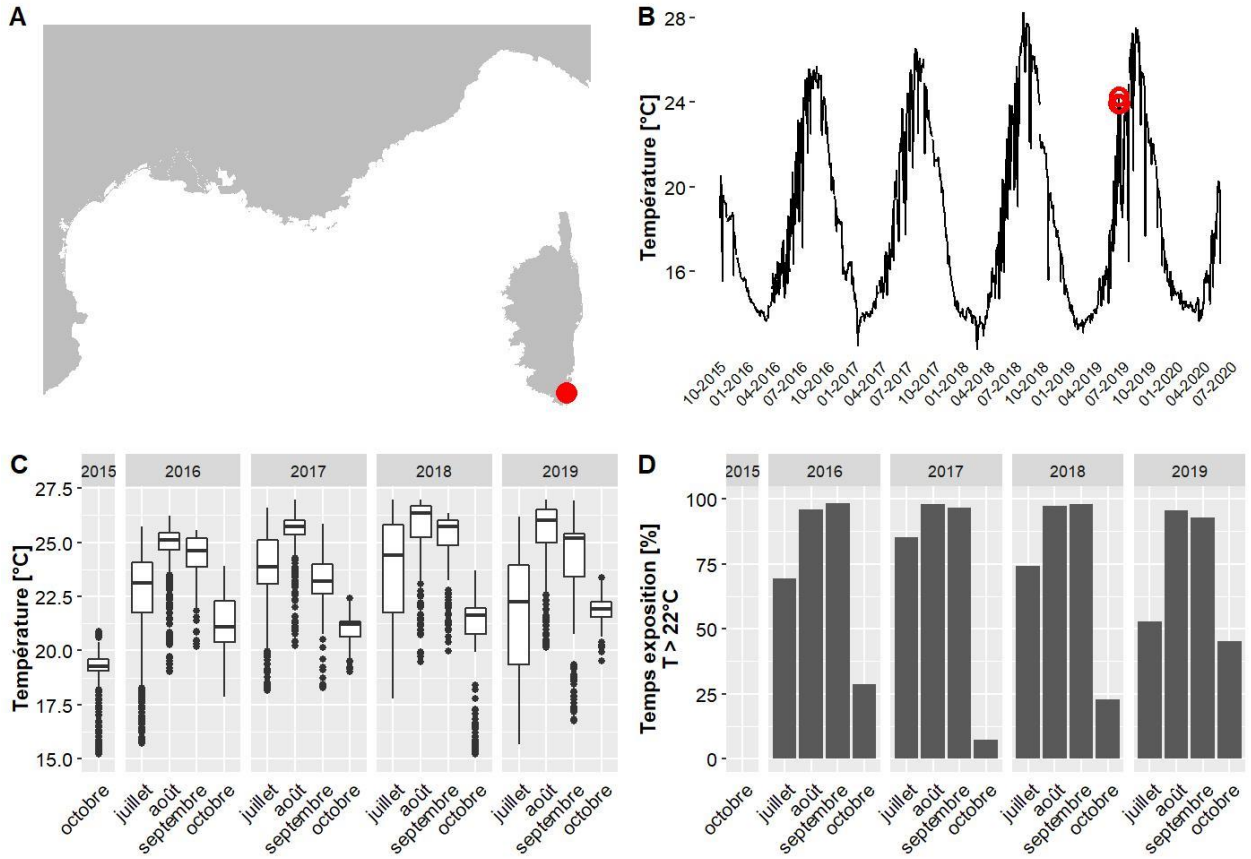
Les données de température pour le site Rondinara situé à 35 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de septembre 2017 avec une température moyenne de 21.7 °C et 51 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 27.5 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.KK. Site: Rondinara PI - TEMPO

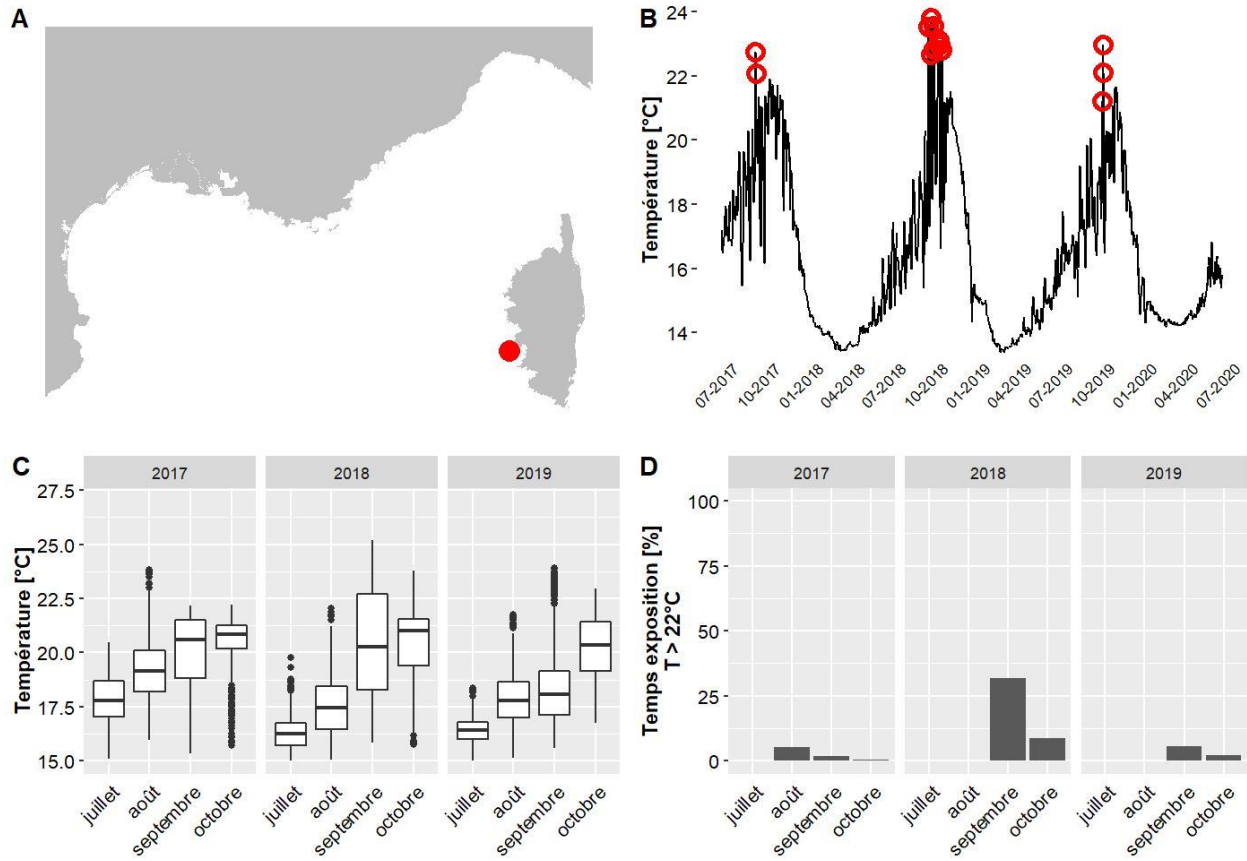
Les données de température pour le site Rondinara PI situé à 15 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de août 2018 avec une température moyenne de 26.8 °C et 97 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 28.6 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.LL. Site: Sanguinaires - TEMPO

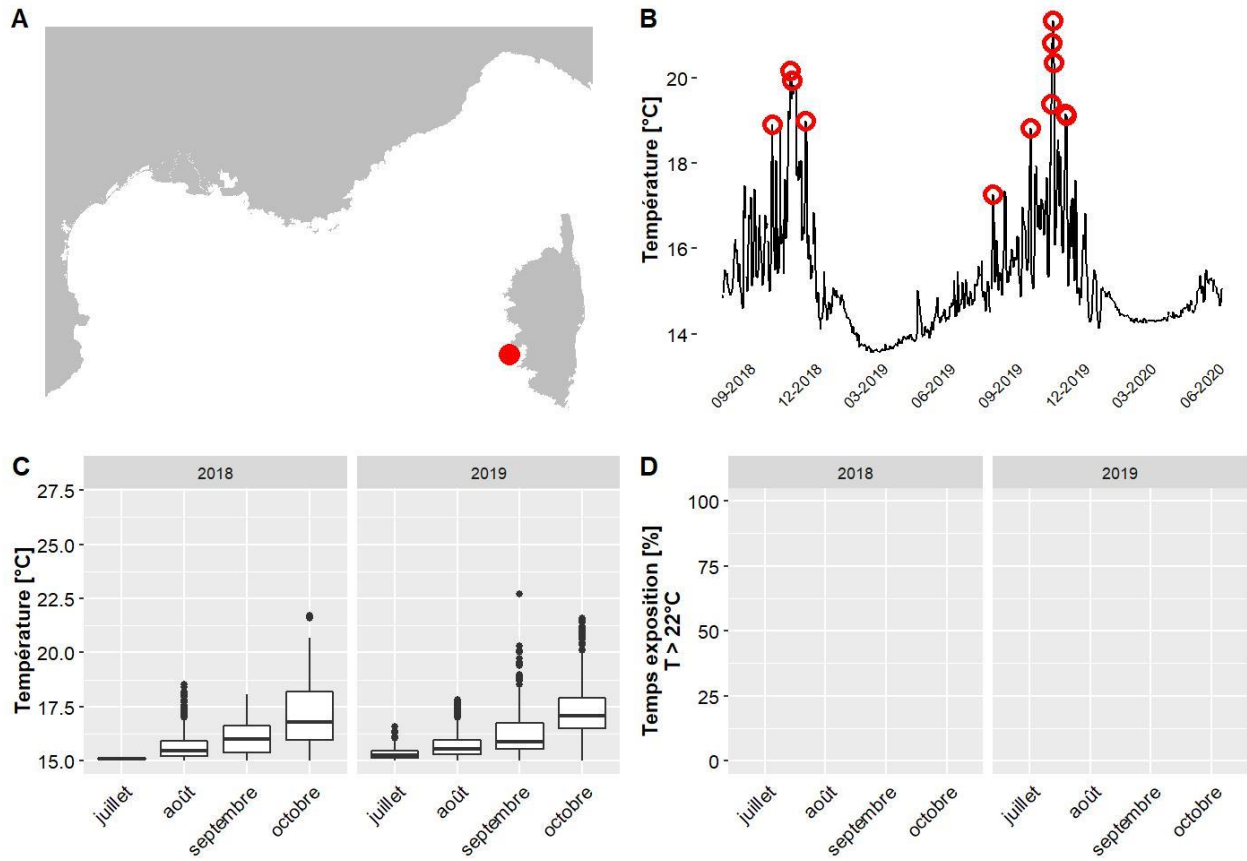
Les données de température pour le site Sanguinaires situé à 35 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 20.5 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 25.2 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.MM. Site: Sanguinaires - RECOR

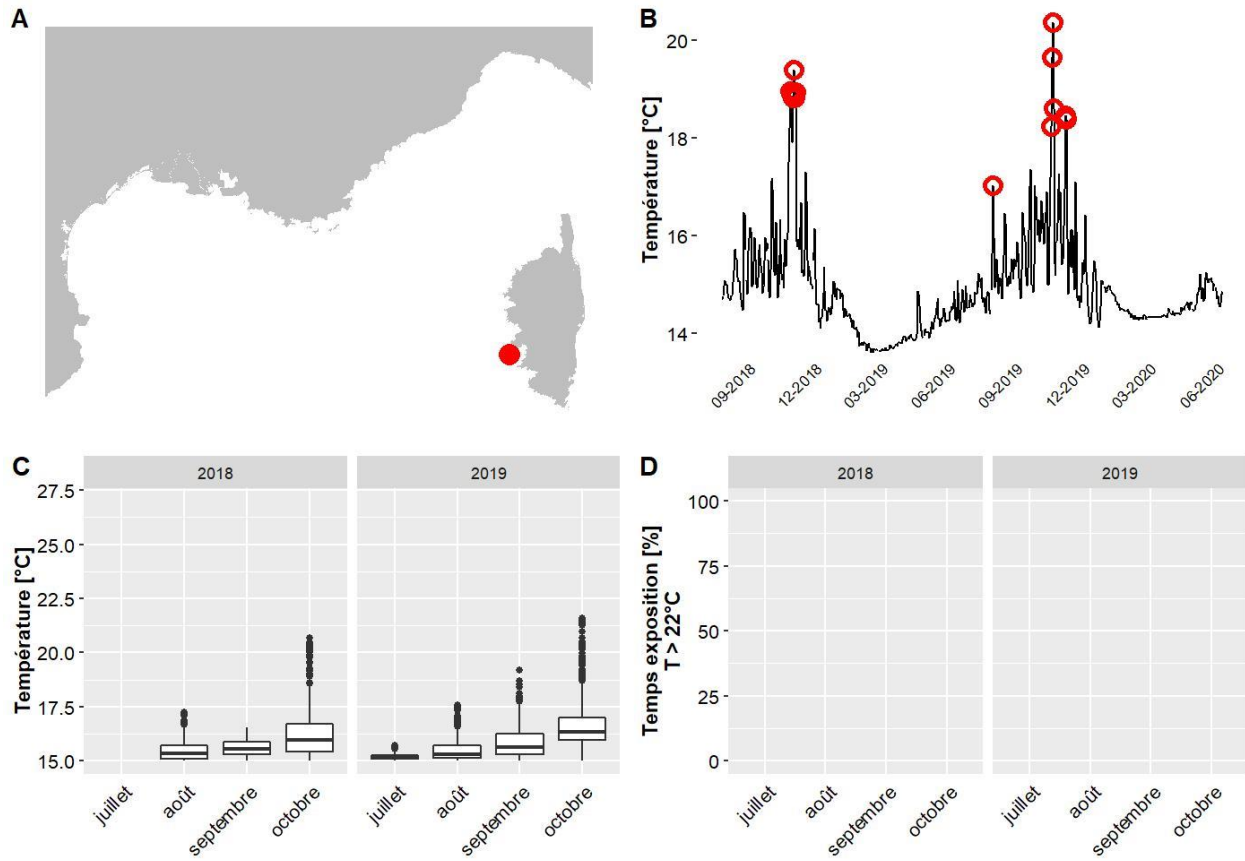
Les données de température pour le site Sanguinaires situé à 50 m de profondeur couvrent la période allant de juillet 2018 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de novembre 2018 avec une température moyenne de 17.6 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 22.7 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.NN. Site: Sanguinaires - RECOR

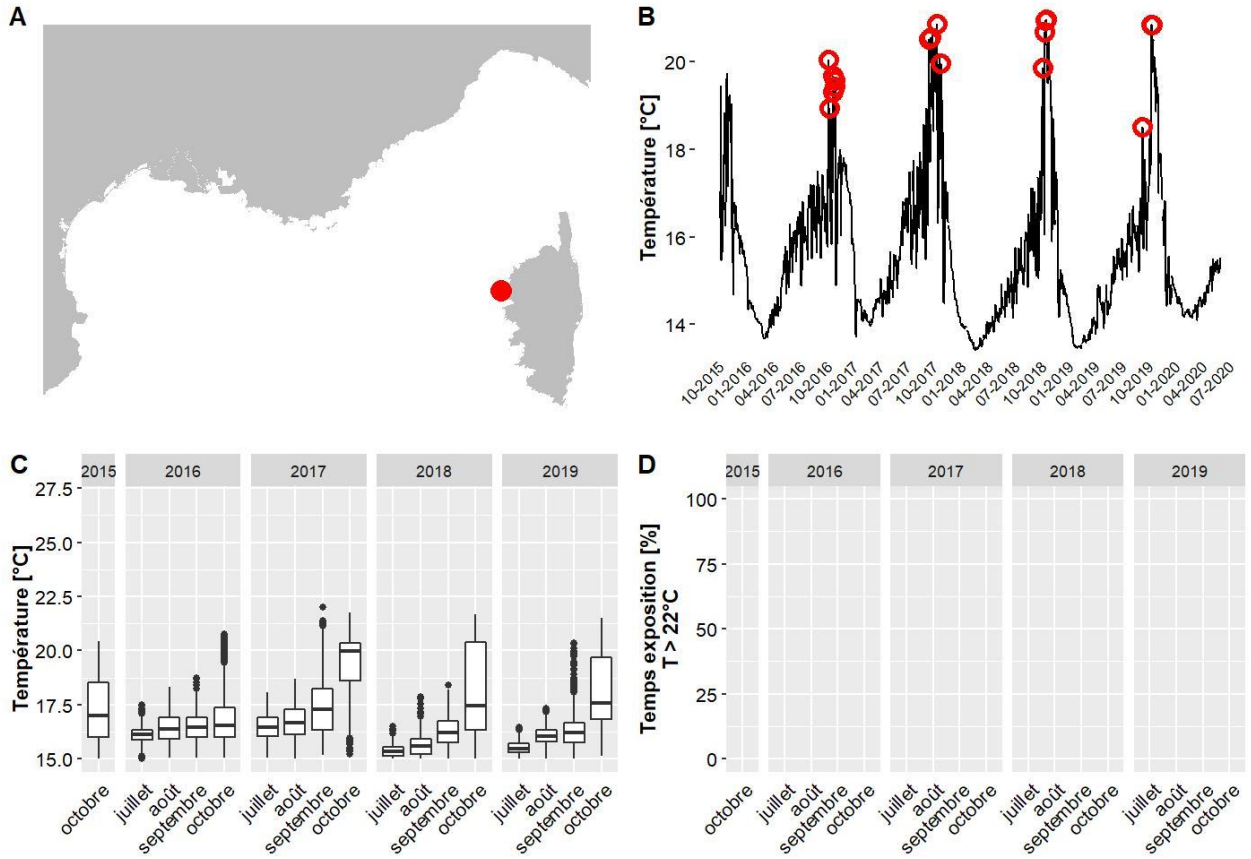
Les données de température pour le site Sanguinaires situé à 60 m de profondeur couvrent la période allant de juillet 2018 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2019 avec une température moyenne de 16.6 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 21.6 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## IV.OO. Site: Scandola-4 - RECOR

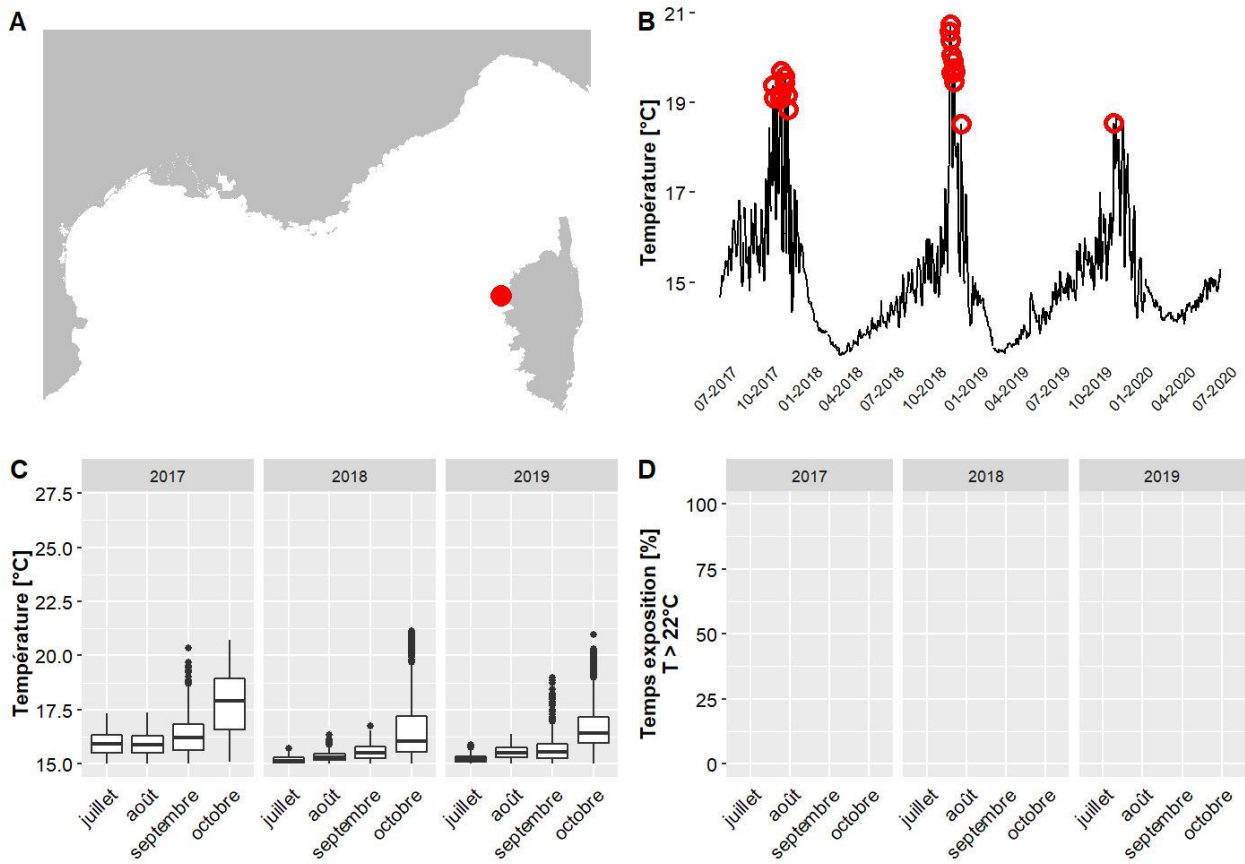
Les données de température pour le site Scandola-4 situé à 48 m de profondeur couvrent la période allant de octobre 2015 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 19.4 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 22 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

### IV.PP. Site: Scandola-4 - RECOR

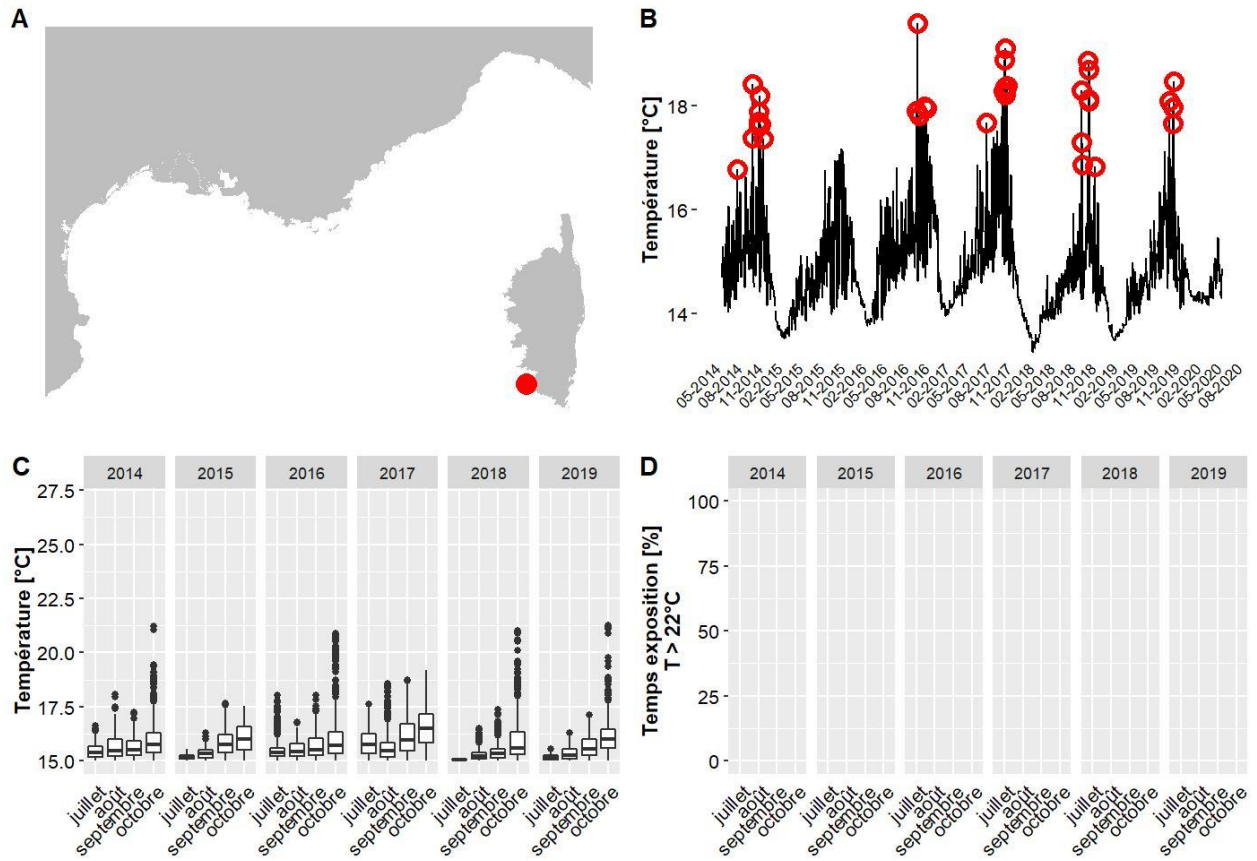
Les données de température pour le site Scandola-4 situé à 56 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2017 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 17.8 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 21.2 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.QQ. Site: Senetosa - RECOR

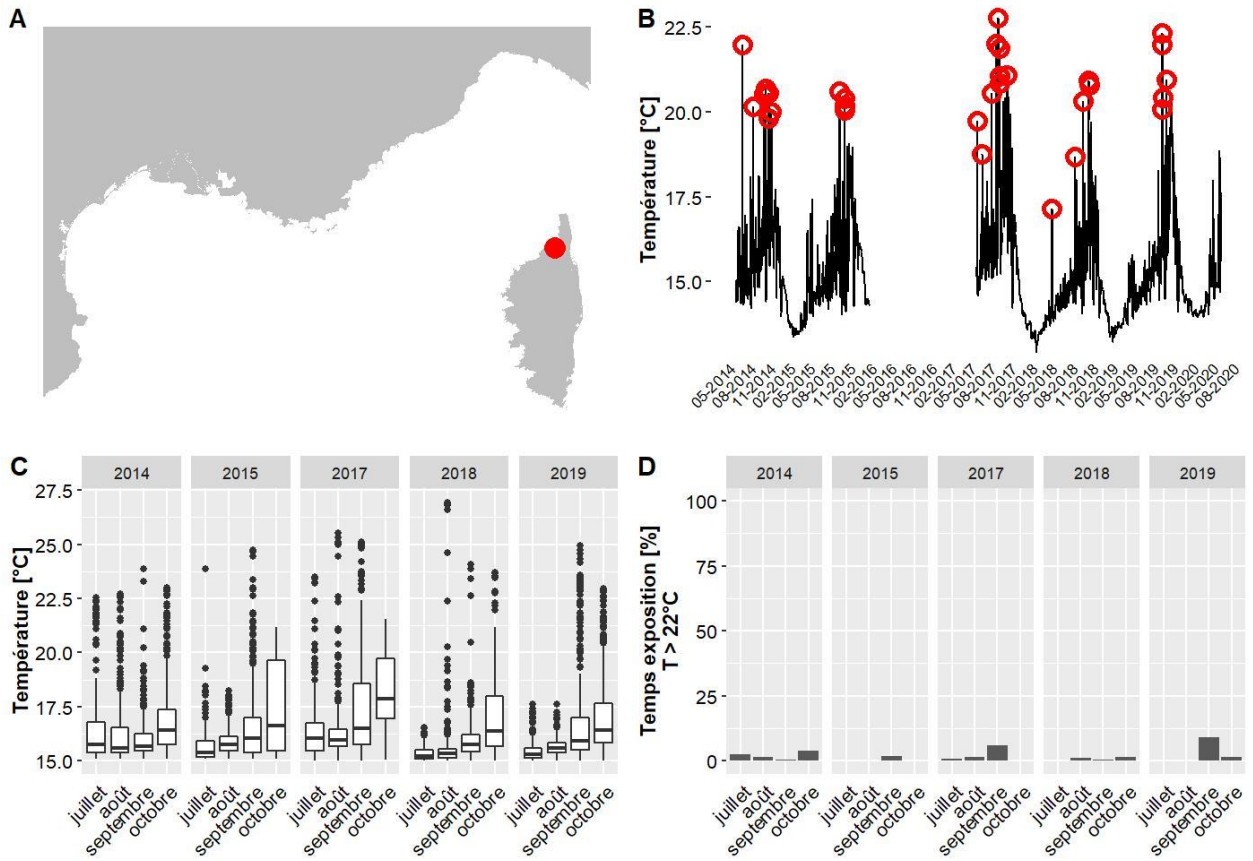
Les données de température pour le site Senetosa situé à 64 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2014 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 16.5 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 21.3 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

**IV.RR. Site: St Florent - RECOR**

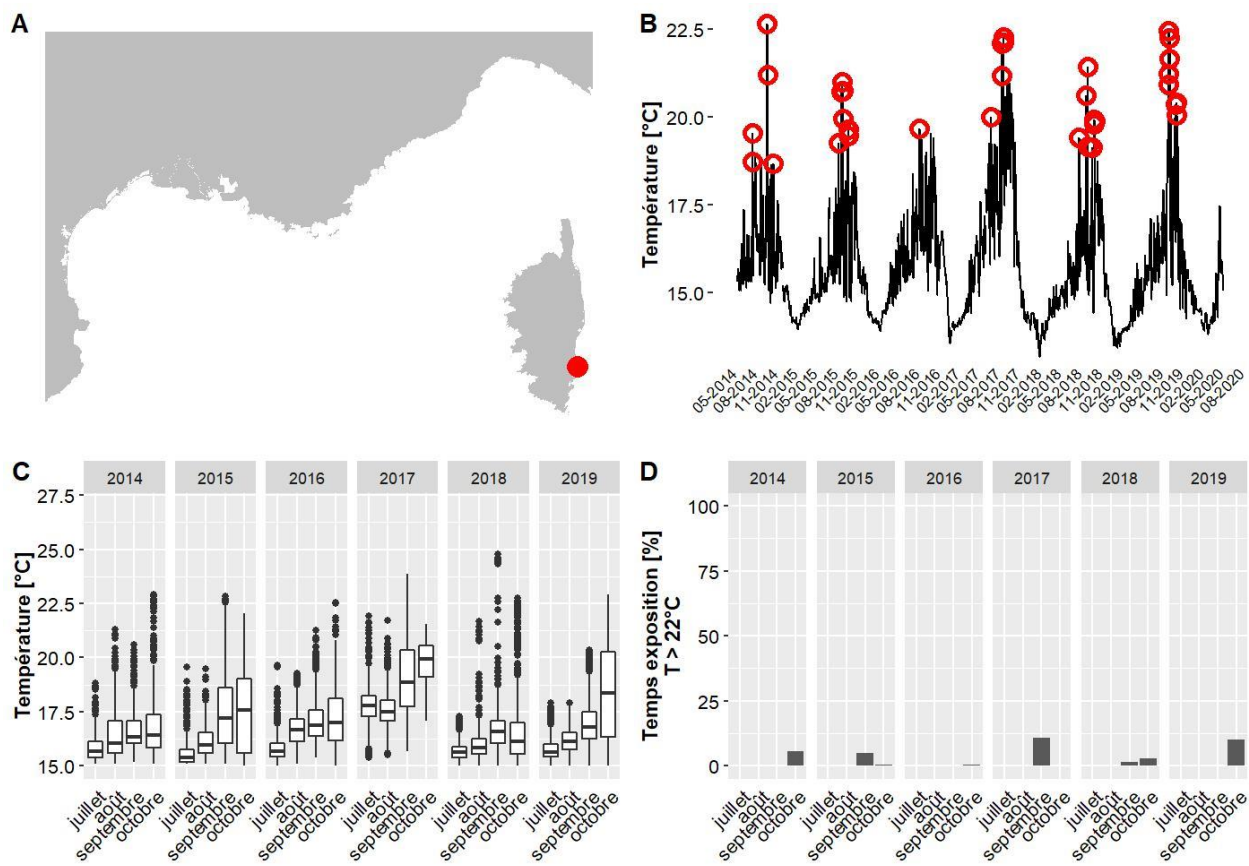
Les données de température pour le site St Florent situé à 60 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2014 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 18.3 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 26.9 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

#### IV.SS. Site: Tarco - RECOR

Les données de température pour le site Tarco situé à 52 m de profondeur couvrent la période allant de juin 2014 à juin 2020. Le mois globalement le plus chaud est le mois de octobre 2017 avec une température moyenne de 19.8 °C et 0 % du temps passé au-dessus de 22°C. La température maximale jamais observée sur ce site est de 24.8 °C (valeurs maximales observées entre 20.5 °C et 28.6 °C selon les sites).



**A. LOCALISATION, B. EVOLUTION TEMPORRELLE DE LA TEMPERATURE (MOYENNE JOURNALIERE), AVEC ANOMALIES DE TEMPERATURE EN ROUGE, C. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES TEMPERATURES, D. POURCENTAGE DE TEMPS PASSE AU-DESSUS DE 22 °C**

## V. Exploitation des données de température pour la surveillance

### V.A. Liens entre température et phénomènes biologiques observés

Certaines observations réalisées dans le réseau RECOR, comme les **nécroses** et l'apparition **d'algues filamenteuses**, peuvent être liées à des événements climatiques se traduisant par une augmentation de la température. En effet, nous observons une proportion croissante de nécroses des organismes du coralligène ces dernières années en Corse (voir figure suivante) :

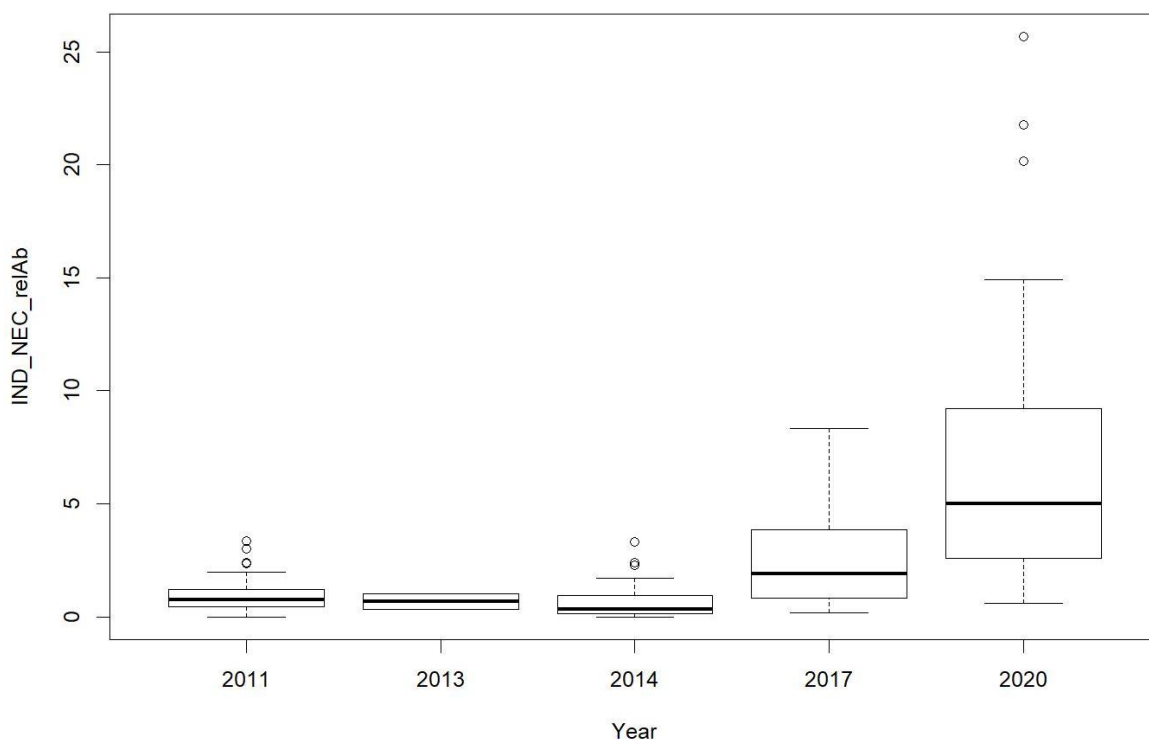


FIGURE 79 : ABONDANCE RELATIVE DE NECROSES DU CORALLIGENE POUR LES SITES CORALLIGENES, DE 2011 A 2020.

Des observations similaires ont été réalisées ces dernières années en région Occitanie et PACA, avec une forte augmentation des nécroses.

Des observations d'apparition d'algues filamenteuses ont été notées également sur certaines années :

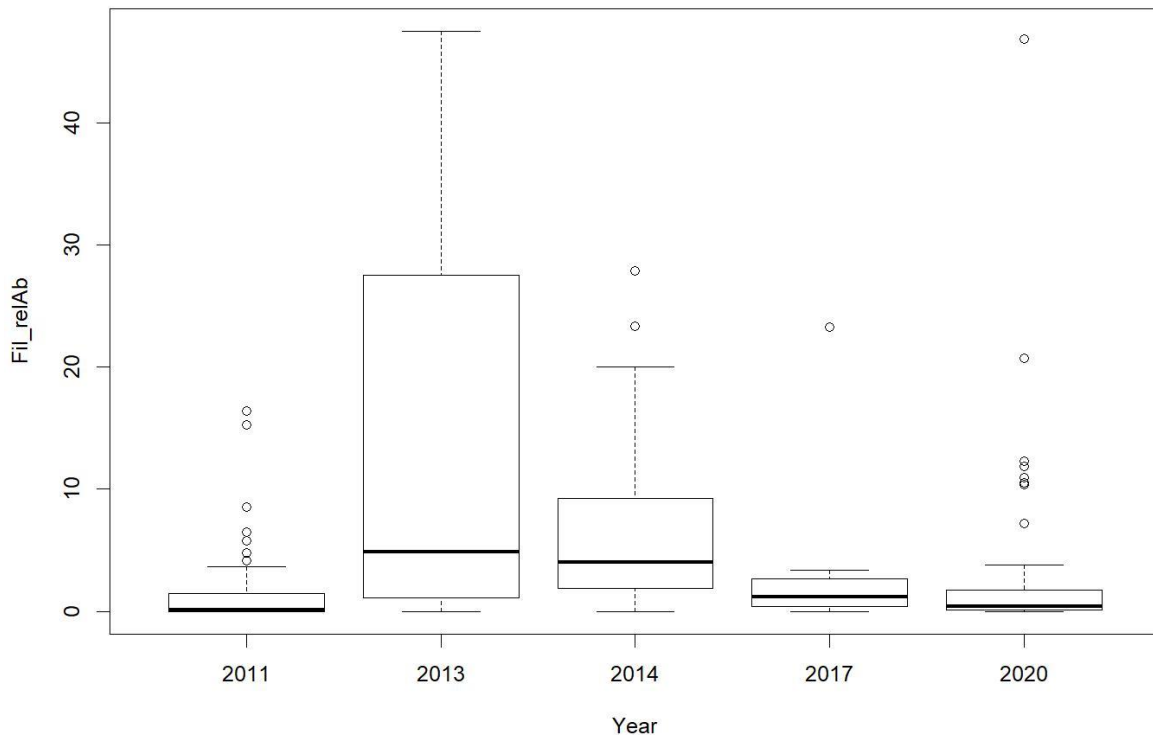


FIGURE 80 : ABONDANCE RELATIVE D'ALGUES FILAMENTEUSES POUR LES SITES CORALLIGENES, DE 2011 A 2020.

Si les liens entre la température, l'apparition d'algues filamenteuses et les nécroses du coralligène sont encore difficile à faire, il existe très certainement une relation de cause à effet, au moins partielle, entre ces observations et la température de l'eau. Les nécroses pourraient ne pas être simplement dues à des températures extrêmes, puisque certains travaux les relient d'ailleurs à l'apparition importante d'algues filamenteuses (Piazzini et al., 2018).

Andromède Océanologie a réalisé, en 2020, un travail d'investigation afin d'explorer l'impact des variations de température de fond sur les peuplements coralligènes en Méditerranée française. Les données de température de fond (réseau CALOR) ont été utilisées pour produire un ensemble d'indicateurs thermiques sur les trois dernières années de mesure (min, max, nombre de vagues de chaleur marines...). Ces indicateurs thermiques ont été comparés aux occurrences de nécroses des organismes coralligènes (réseau RECOR) et aux observations d'algues filamenteuses. Ces analyses ont permis la mise en avant de l'influence du nombre de vagues de chaleur marines sur la nécrose des organismes coralligènes. Ces résultats manquant encore de robustesse statistique, ces analyses seront affinées à l'avenir au fur et à mesure de l'enrichissement des bases de données de température et d'état de santé du coralligène.

La **bancarisation** de la **température de fond** permettra donc d'étudier les liens entre la température et l'apparition d'algues filamenteuses et de nécroses.

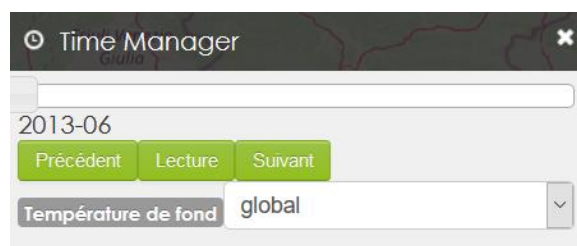


### V.B. Cartographie de la température de fond

Le réseau CALOR fournit des données de température de fond à haute résolution temporelle pour des sites ponctuels le long du littoral méditerranéen français. Afin d'obtenir une cartographie de la température de fond, il faut procéder à une interpolation de ces données dans l'espace. Par ailleurs, la mer est un milieu fortement anisotrope : la température de l'eau est très corrélée à la profondeur et varie beaucoup plus le long de l'axe vertical que sur le plan horizontal.

Pour établir les cartes de la température de fond, nous avons utilisé une méthode de géostatistique répandue, le krigeage, avec prise en compte de la corrélation entre la température et la profondeur. La résolution de la couche bathymétrique utilisée pour le krigeage est de 20 m x 20 m.

Ces cartes sont disponibles sur la plateforme [MEDTRIX](#) dans le projet CALOR. L'outil « Time manager » permet d'accéder aux cartes de la température de fond sur le littoral méditerranéen français, mois par mois. L'utilisateur peut suivre l'évolution de la température dans le temps et l'espace, en fixant l'échelle ou en l'adaptant au mois en cours pour étendre au plus la palette de couleurs.



Ce travail est complété chaque année grâce à la **densification du réseau de capteurs** qui permet d'affiner l'interpolation de la température de fond.

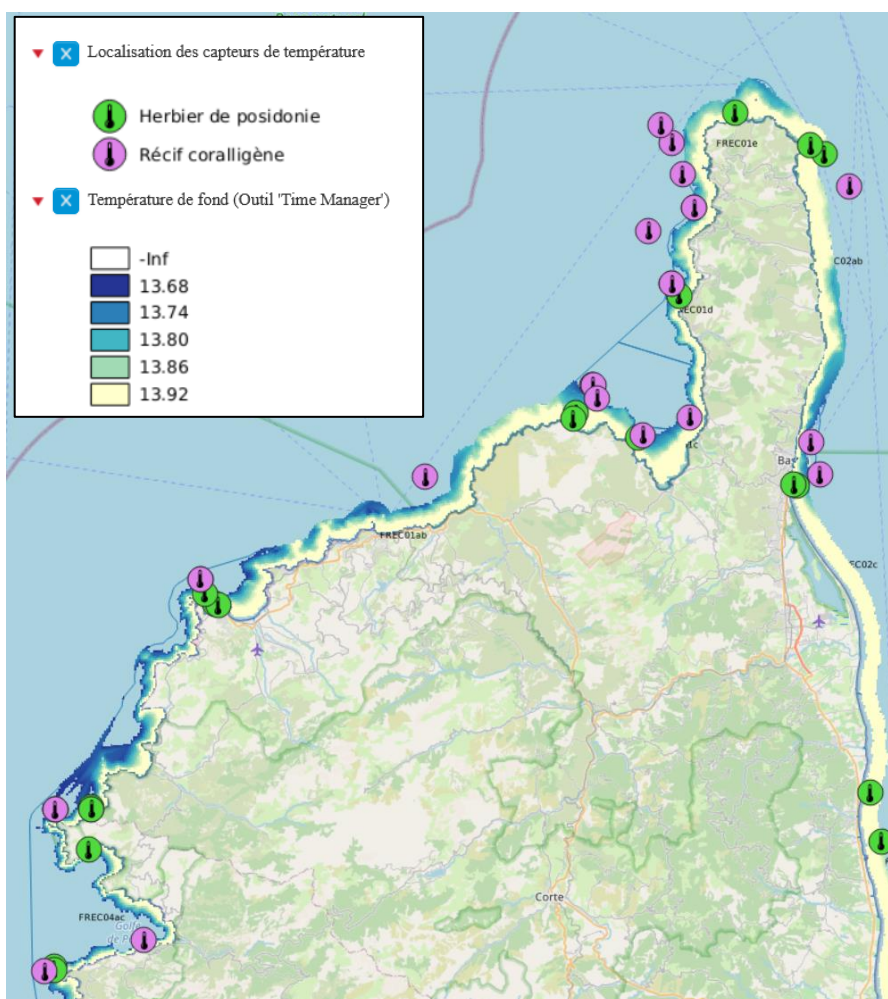


FIGURE 81 : CARTE PRESENTANT LA TEMPERATURE DE FOND ET LOCALISATION DES CAPTEURS DE TEMPERATURE EN HAUTE CORSE.

# Chapitre 5

Suivi des populations de poissons et évolutions méthodologiques



Ce chapitre présente les résultats des suivis des poissons par ADN environnemental réalisés en 2020 en région Corse regroupant 19 sites d'échantillonnage.



# Chapitre 5 : Suivi des populations de poissons et évolutions méthodologiques

## I. Contexte et objectifs

La Méditerranée est considérée comme un haut-lieu de biodiversité au vu du nombre et de la diversité d'espèces qu'elle accueille (Myers et al., 2000). On dénombre à ce jour plus de 600 espèces de poissons marins en mer Méditerranée, dont une partie majoritaire provient de l'Atlantique (Quignard and Tomasini, 2000). La partie orientale abrite plus de 66 % de cette diversité en raison du gradient thermo halin allant d'Est en Ouest (Malak et al., 2012). De même que l'Atlantique a approvisionné la partie occidentale de la Méditerranée, la partie orientale a été alimentée en espèces d'origine Indopacifique par le canal de Suez (George and Athanassiou, 1967; Golani, 2000, 2005). Parmi les 600 espèces de poissons de la mer Méditerranée, 74 sont considérées comme endémiques. Ces dernières peuplent en majorité la partie occidentale de la Méditerranée, notamment le long des côtes liguriennes, tyrrhéniennes et tunisiennes (Malak et al., 2012). La situation géographique de la Méditerranée, située entre l'Atlantique et la mer rouge, lui octroie un flux d'espèces exotiques agissant comme une « pompe à diversité ». Cette dernière augmente la biodiversité (Quignard and Tomasini, 2000).

L'organisation fonctionnelle et biogéographique des communautés ichtyologiques côtières méditerranéennes est peu connue (Bouchouca and Herve, 2013). Les études réalisées en France se sont essentiellement concentrées sur les Aires Marines Protégées ou ont concerné les espèces exploitées (Harmelin, 1987; Francour and Harmelin, 1989; Francour and Finelli, 1991; Bouchereau et al., 1992; Dufour et al., 2007; Lenfant et al., 2008; Seytre and Francour, 2008; Mouillot et al., 2011)

Le suivi des peuplements ichtyologiques nécessite de disposer d'une méthode non destructive, utilisable à large échelle et dans différentes situations, sur une gamme de profondeurs recouvrant une part importante de la zone côtière. Cette méthode doit être peu perturbatrice et sa mise en œuvre ne doit pas engendrer de coûts prohibitifs. Les méthodes jusqu'alors utilisées sont basées sur des captures (Lobry et al., 2006) et/ou des observations visuelles (Sale and Douglas, 1981) dont les plus communes (UVC, Underwater visual census) sont réalisées directement par des plongeurs (Harmelin-Vivien and Harmelin, 1975; Seytre and Francour, 2008) le long de transects ou en statique à partir d'un point d'observation. Les progrès technologiques et la diminution des coûts de matériel ont permis aux techniques basées sur la vidéo de se développer pour les suivis ichtyologiques. Ces techniques restent cependant limitées par les contraintes de visibilité et la nature mobile des organismes observés. La technologie de recherche de traces d'ADN dans l'environnement a fortement progressé ces dernières années et permet aujourd'hui un recensement non invasif et exhaustif des populations de poissons.

**Andromède Océanologie a démarré en 2015, en partenariat avec l'Agence de l'eau RMC, un réseau de surveillance des assemblages ichtyologiques marins côtiers de Méditerranée française (réseau PISCIS).** La première campagne océanographique (Juin 2015) a permis une évaluation globale des cortèges piscicoles, entre le delta du Rhône et la frontière maritime italienne, incluant la Corse. Un **programme d'acquisition vidéo** a ainsi été instauré. Lors des campagnes successives, des évolutions méthodologiques ont été apportées et une amélioration du protocole d'acquisition de données a été mise en place. **En 2020, la technique d'échantillonnage a évolué de la vidéo vers l'ADN environnemental.** Ce chapitre présente les résultats du réseau PISCIS pour la campagne 2020 en Corse, regroupant 19 sites d'échantillonnage.

Sur la base d'une méthode non invasive et exhaustive, l'ADN environnemental, **l'objectif est de décrire les cortèges ichtyologiques des fonds côtiers de la Corse.** Cette description est basée sur une analyse de la richesse spécifique, et de la répartition des groupes trophiques et des différents groupes d'espèces cibles en fonction des sites et des principaux habitats marins.

Les objectifs à moyen terme de cette étude sont d'identifier les relations qui existent entre ces descripteurs et les pressions anthropiques, les données acoustiques et les données de température.

Les objectifs à plus long terme sont d'évaluer la qualité des eaux côtières à travers une combinaison de descripteurs des communautés ichtyologiques afin de répondre aux objectifs environnementaux de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CU du 17 juin 2008, DCSMM).

## II. Méthodologie

### II.A. Protocole d'échantillonnage

Les sites échantillonnés en 2020 correspondent aux sites déjà suivis dans le cadre des réseaux de surveillance RECOR (récifs coralligènes) et TEMPO (herbiers de posidonie, sites en limite inférieure et sites à -15 mètres).



Tous les sites échantillonnés font l'objet d'une surveillance acoustique (réseau CALME) et sont équipés de capteurs de température (réseau CALOR). Des corrélations statistiques pourront ainsi être réalisées entre les données acoustiques, les données de température et les données biologiques.



La carte suivante présente les différents sites du réseau PISCIS en suivi en Corse en 2020, soit **19 stations (7 stations Coralligène, 8 stations Herbier à 15m, 1 station Herbier en limite inférieure et 3 transects surface)**.

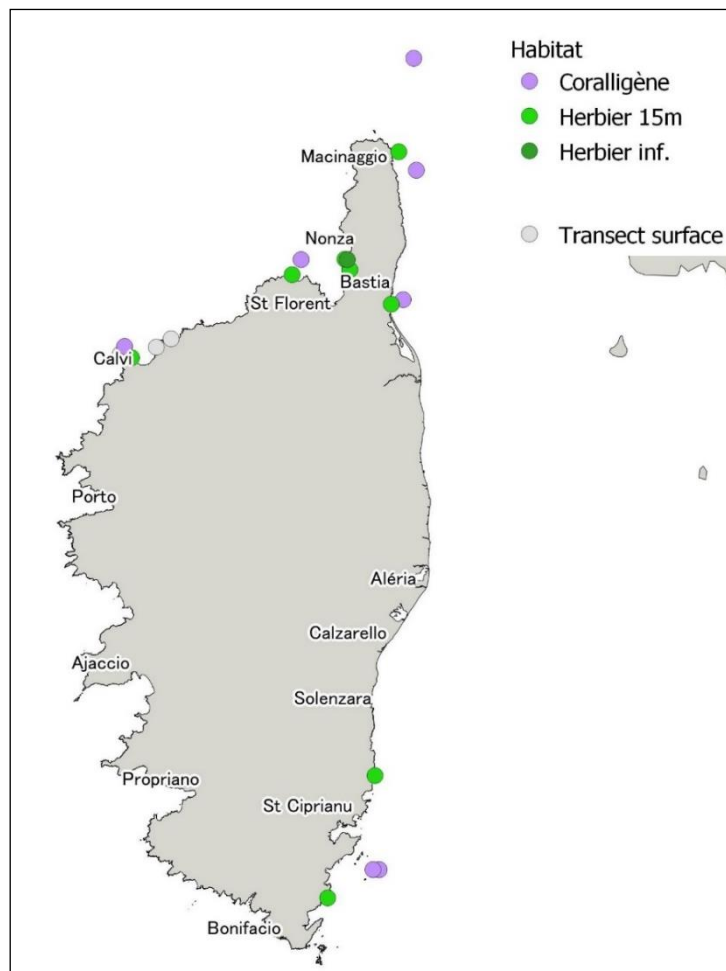


FIGURE 82 LOCALISATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU RÉSEAU PISCIS EN 2020 SELON L'HABITAT (19 STATIONS (7 STATIONS CORALLIGÈNE, 8 STATIONS HERBIER À 15M, 1 STATION HERBIER EN LIMITE INFÉRIEURE ET 3 TRANSECTS SURFACE)).



## II.B. Matériel de prélèvement et d'analyse

### Matériel de prélèvement

La collecte des échantillons d'ADN environnemental est réalisée à l'aide d'une technique développée par la société **SPYGEN** (<http://www.spygen.com/fr/>), permettant la filtration de 30 litres d'eau à travers une capsule de filtration à 0,2  $\mu\text{m}$ . Plus précisément, les kits **VigiDNA MW1** sont utilisés. Ces kits stériles intègrent les consommables nécessaires pour l'échantillonnage et notamment un tuyau, une crépine, une capsule de filtration à très faible porosité (0,2  $\mu\text{m}$ ) et un tampon de conservation de l'ADN (CL1). Ces kits sont stériles afin de prévenir toute contamination par de l'ADN humain ou autres ADN.

### Type de transects

Deux types de transects sont réalisés :

Les **transects en surface** sont réalisés avec une pompe péristaltique alimentée par une batterie 12V. L'échantillonnage se fait par filtration de 30 litres d'eau de mer, en surface, par transect, depuis le bateau. Les transects sont réalisés au plus proche de la côte sur une distance de 5 km (1 aller /retour). La vitesse du bateau doit être de 10 km/h, afin de filtrer 30 L en 30 min sur 5km. L'ADNe est prélevé dans la capsule de filtration.

Les **transects en plongée** sont réalisés à l'aide d'une pompe étanche fixée sur un scooter sous-marin. Ainsi, l'échantillonnage se fait par filtration de 30 litres d'eau de mer, directement sur le fond, au plus près du substrat, pour optimiser les chances de détecter les espèces.



FIGURE 83 SYSTEMES D'ÉCHANTILLONNAGE D'ADN ENVIRONNEMENTAL : POMPE PERISTALTIQUE (A GAUCHE) ET POMPE ETANCHE (A DROITE).

Dans cette étude, les résultats des transects surfaces seront comparés aux résultats des transects réalisés en plongée sur chacune des biocénoses échantillonnées, dans l'encart « comparaison par habitat ».

Notre système étanche de filtration de l'eau de mer (pour directement recueillir l'ADNe au plus près de l'habitat à partir de la technique VigiDNA) a fait l'objet d'une déclaration d'invention entre l'université de Montpellier et les entreprises Andromède océanologie, Spygen et Subspace.

Cette méthode maximise notre **efficacité de détection** de l'ADNe potentiellement rare en mer et **évite les contaminations** liées à l'usage de multiples contenants (sacs ou bouteilles niskin) obligeant une filtration en surface après la plongée (Mouillot, Comm. pers.). Positionnée sur un scooter la pompe permet de filtrer 30 L d'eau à la profondeur voulue. La réalisation de transects de prélèvement permet d'optimiser les prélèvements sur les sites.



FIGURE 84 : POMPE ETANCHE CONÇUE PAR SUBSPACE, ANDROMEDE OCEANOLOGIE ET L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER.

### Traitement des échantillons

L'extraction (réalisée en salle blanche), l'amplification, le séquençage de l'ADNe (technologie Miseq®) et les analyses bioinformatiques sont réalisés par SPYGEN, selon les protocoles présentés dans ces deux publications scientifiques : Valentini et al. 2016 et Pont et al. 2018. Les échantillons sont centrifugés à 15 000 g durant 15 min, à 6°C, après quoi le surnageant est éliminé et 360 µL de tampon ATL sont ajoutés. L'extraction est réalisée avec le kit d'extraction DNeasy Blood and Tissue (Qiagen). Avant la PCR, un tag est ajouté à chaque échantillon, afin de pouvoir l'identifier. Après l'amplification, les échantillons sont titrés par électrophorèse et purifiés. Le séquençage sera réalisé avec un séquenceur Illumina Miseq. 12 PCR seront réalisées sur chaque échantillon pour plus de robustesse, et une PCR de contrôle sera réalisée pour évaluer la contamination.

Afin de pouvoir assigner un taxon aux séquences génétiques amplifiées dans nos échantillons ADNe, il est nécessaire de construire une base de référence taxonomique au préalable avec les espèces pour lesquelles une séquence d'ADN de 12S contenant l'amorce utilisée est déjà connue. Nous utilisons pour cela la liste des poissons de la mer Méditerranée de FishBase (<http://fishbase.mnhn.fr>), et les informations taxonomiques trouvées sur NCBI ([www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov)), que nous comparons à la liste des séquences du fragment de gène mitochondrial 12S des Actinoptérygiens et Chondrichthyens de la base de données European Nucleotide Archive ([www.ebi.ac.uk/ena](http://www.ebi.ac.uk/ena)). Nous avons complété ces bases 12S récemment ; nous sommes donc en mesure d'identifier plus de 90% des espèces des côtes méditerranéennes occidentales.

Les séquences sont alignées avec le logiciel U-GENE. Pour chaque espèce, nous renseignons également son statut de conservation IUCN, son habitat et sa provenance (native, endémique, introduite). Les séquences de mauvaise qualité sont éliminées. Les séquences identiques sont regroupées en exemplaire unique afin de ne conserver qu'un seul exemplaire de chaque séquence.

La méthode d'assignation est réalisée avec la fonction ecotag du package ObiTools. Le programme utilise 3 entrées : les séquences devant être assignées, une base de données taxonomique renseignant les relations entre taxons, et la base de référence des poissons de méditerranée, dont l'identifiant unique permet de les relier à la taxonomie. Ecotag compare chaque séquence à la base de référence et calcule la similarité comme le ratio entre la longueur de la plus longue chaîne commune et la longueur du plus court alignement correspondant. Ecotag ne garde ensuite que les séquences qui ont la plus grande similarité et leur assigne le taxid du taxon



correspondant. Si l'assignation à l'espèce ne peut se faire précisément (>98%), le programme assignera à la séquence le genre (96-98%) ou la famille (90-96%) ou remontera au dernier ancêtre commun selon la base de référence.

Les différentes étapes du traitement de l'ADN environnemental sont présentées sur la figure ci-dessous :

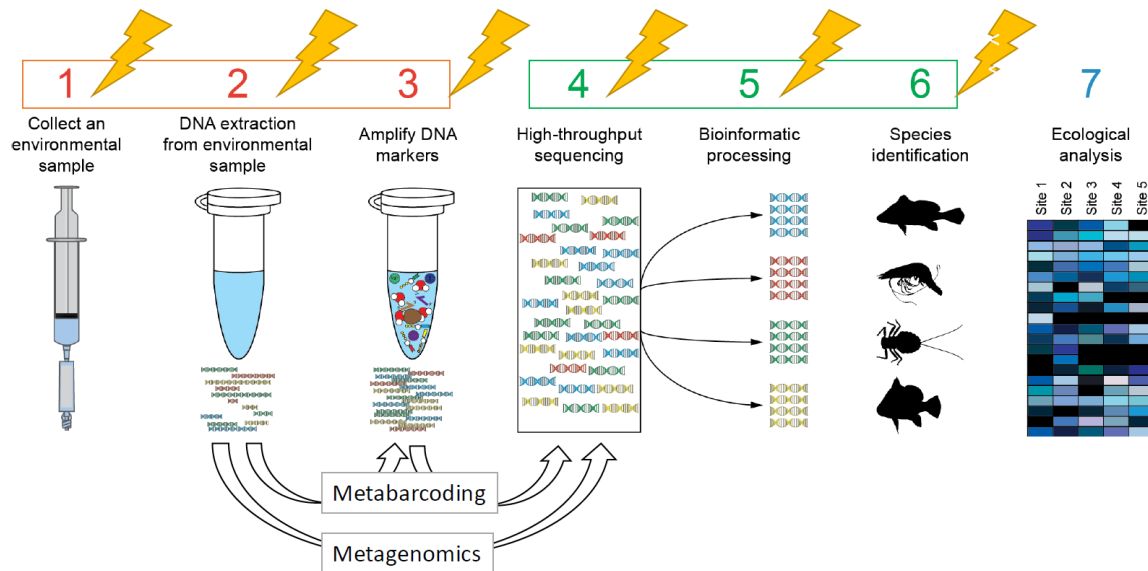







FIGURE 85 : SCHEMA RECAPITULATIF DE LA CHAINE DE TRAITEMENT DES ECHANTILLONS D'ADN.

## II.C. Analyse des données

L'analyse des échantillons d'ADN environnemental permet d'obtenir une liste des espèces observées.

Plusieurs informations ont été extraites de la base de données « FishBase » (Froese, R. and Pauly) pour les espèces de poissons identifiées dans les vidéos ou par ADNe :

-  Taille maximale d'un individu de l'espèce ;
-  Groupe trophique (régime alimentaire) : herbivore, zooplanctonivore diurne ou nocturne, macrocarnivore, mesocarnivore, piscivore ou omnivore.
-  Habitat préférentiel
-  Statut de protection UICN
-  Températures habituelles d'observation




### Description des assemblages

La base de données est manipulée et analysée avec le logiciel R (R Core Team, 2016). La première phase de l'analyse des données consiste à dresser une description des cortèges ichthyologiques des sites échantillonnés. Pour ce faire, nous avons retenu plusieurs **descripteurs et indices de diversité** dont la formule et la définition sont indiquées dans le tableau suivant :

TABLEAU 7 : DESCRIPTEURS DES ASSEMBLAGES ICHTYOLOGIQUES

Descripteurs	Formules	Composants	Finalités
Richesse spécifique			nombre d'espèces comptées sur un point d'échantillonnage
Indicateur de diversité fonctionnelle			diversité des traits écologiques (régime alimentaire, croissance, reproduction, taille etc..) au sein d'un site
Large Reef Fish Indicator			nombre d'espèces de poissons de récif de grande taille (20 cm ou plus à l'âge adulte)
Indicateur crypto-benthique			nombre d'espèces de poissons de récif de petite taille 10 cm ou moins à l'âge adulte)
Indicateur UICN			Nombre d'espèces présente sur la liste rouge de l'UICN
Indicateur non indigène			Nombre d'espèces invasives ou exotiques présentes sur le site échantillonné
Indicateur thermique			température "préférée" des espèces de poissons sur un site

Ces indicateurs sont calculés à différentes échelles :

-  **Site** (trois habitats confondus) ;
-  **Site-Habitat** (habitat pour chaque site) ;
-  **Habitat** (tous sites confondus).

Les données sont analysées à l'aide de modèles et de méthodes statistiques classiques (modèle linéaire, test de Fisher, test de Student, ...) pour faire ressortir les relations entre indicateurs et variables explicatives.

### La plateforme MEDTRIX

Les principaux résultats du réseau PISCIS pour les années 2015-2020 sont disponibles en ligne sur la plateforme MEDTRIX (réseau PISCIS, <https://plateforme.medtrix.fr/>) :

- la **localisation de l'ensemble de sites** d'échantillonnage ;
- les **principaux descripteurs** par site : pour les années 2015-2019 des indicateurs de biomasse sont présentés (analyse des caméras vidéos), pour 2020 d'autres indicateurs ont été développés.



### III. Résultats

Comme tout inventaire faunistique, un inventaire ichtyologique fait face à un défi majeur : la mobilité des espèces observées. Au-delà des caractéristiques de l'habitat et de la méthode de comptage employée, les espèces identifiées et leur abondance peuvent varier significativement en fonction de la saison, de l'heure, des conditions météorologiques, ... C'est pourquoi aucun inventaire, sauf cas très particulier (zone isolée et délimitée), ne peut se prétendre complètement exhaustif. Idéalement, il faudrait répéter ce type d'inventaire plusieurs fois, à différentes dates, à différentes heures, dans différentes conditions météorologiques, afin de consolider le jeu de données et de s'assurer qu'il soit bien représentatif des cortèges qui peuplent chacun des sites. Les résultats qui suivent sont donc à considérer avec prudence.

#### III.A. Description des assemblages ichtyologiques

L'objectif de cette partie est de fournir une vue d'ensemble des peuplements de poissons sur les sites échantillonnés lors des campagnes océanographiques, en présentant les valeurs des différents descripteurs (par site, par habitat, par groupe trophique) et en analysant leurs distributions.



FIGURE 86 : CARANGUES ET BARRACUDAS EN MEDITERRANEE © LAURENT BALLESTA.

#### Liste des taxons observés

**45 familles, 77 genres et 99 espèces différentes ont été détectés en Corse en 2020.** La liste des espèces détectées est disponible en annexe.

## Richesse spécifique

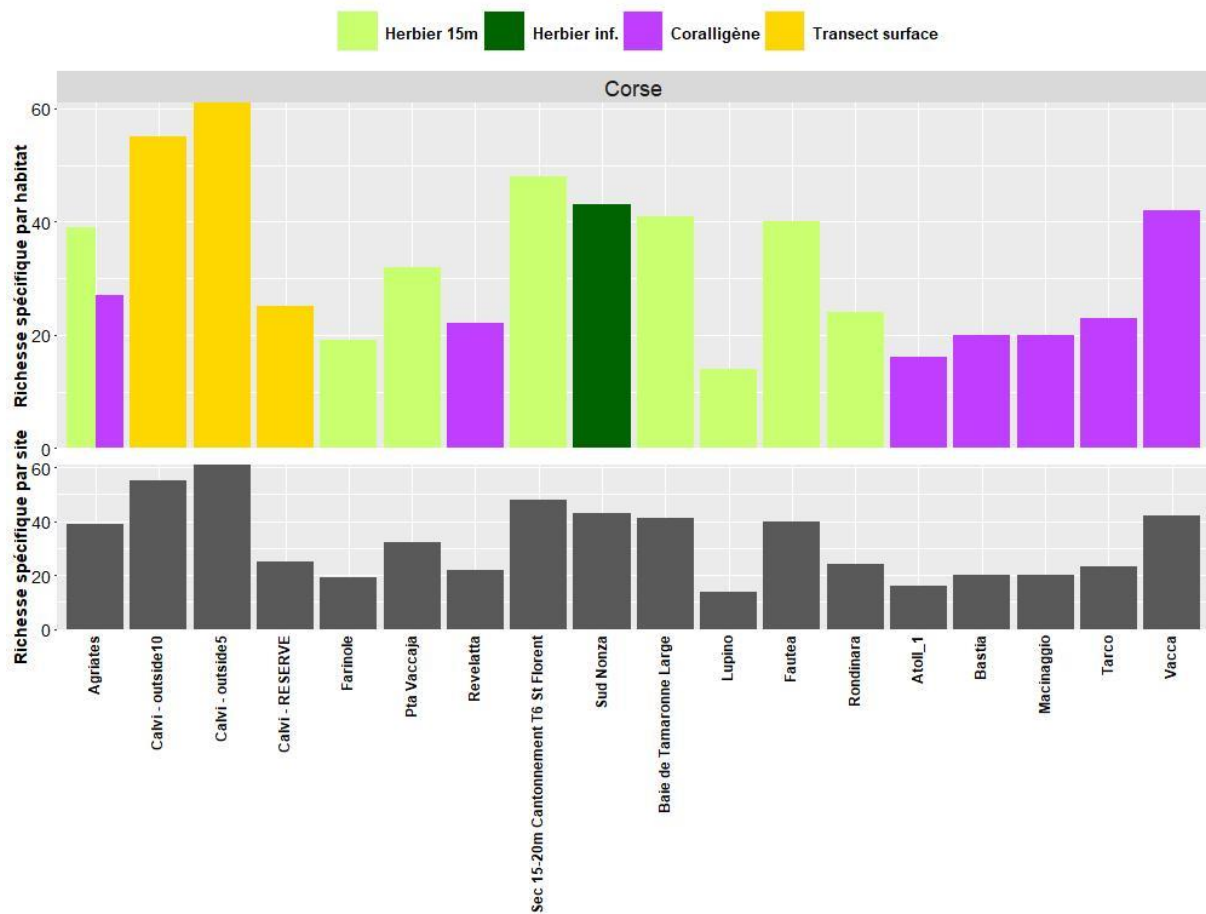


FIGURE 87 : RICHESSE SPECIFIQUE PAR SITE ET PAR HABITAT

La richesse spécifique est en moyenne légèrement supérieure sur l'herbier à 15 m et sur les transects surface (non significatif, ns).

Les sites présentant la plus forte richesse spécifique sont les sites de Calvi situés à l'extérieur et dans la réserve. Le site « Calvi Outside 5 » est le seul où a été détecté la Baudroie commune *Lophius piscatorius* en 2020. Les autres sites sont situés dans le golfe de St Florent : Sec 15-20m, Sud-Nonza.

On note que la richesse spécifique est inférieure à l'extérieur par rapport à l'intérieur de la réserve sur le site de Calvi.

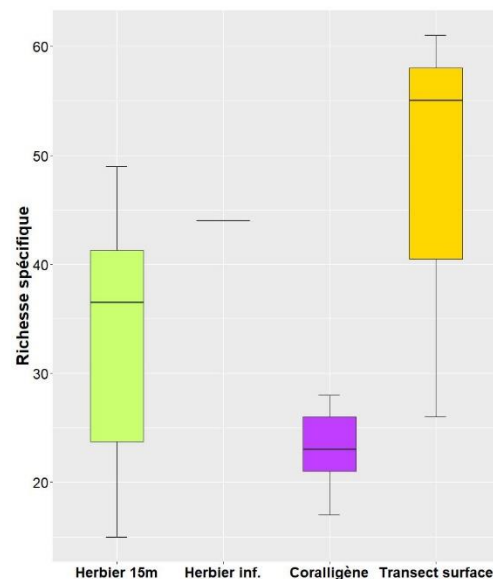


FIGURE 88 RICHESSE SPECIFIQUE PAR HABITAT EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE





FIGURE 89 : UNE BEAUDROIE, *LOPHIUS PISCATORIUS* (PROJET MER-VEILLE, ANDROMEDE OCEANOLOGIE)

## Indicateur de diversité fonctionnelle

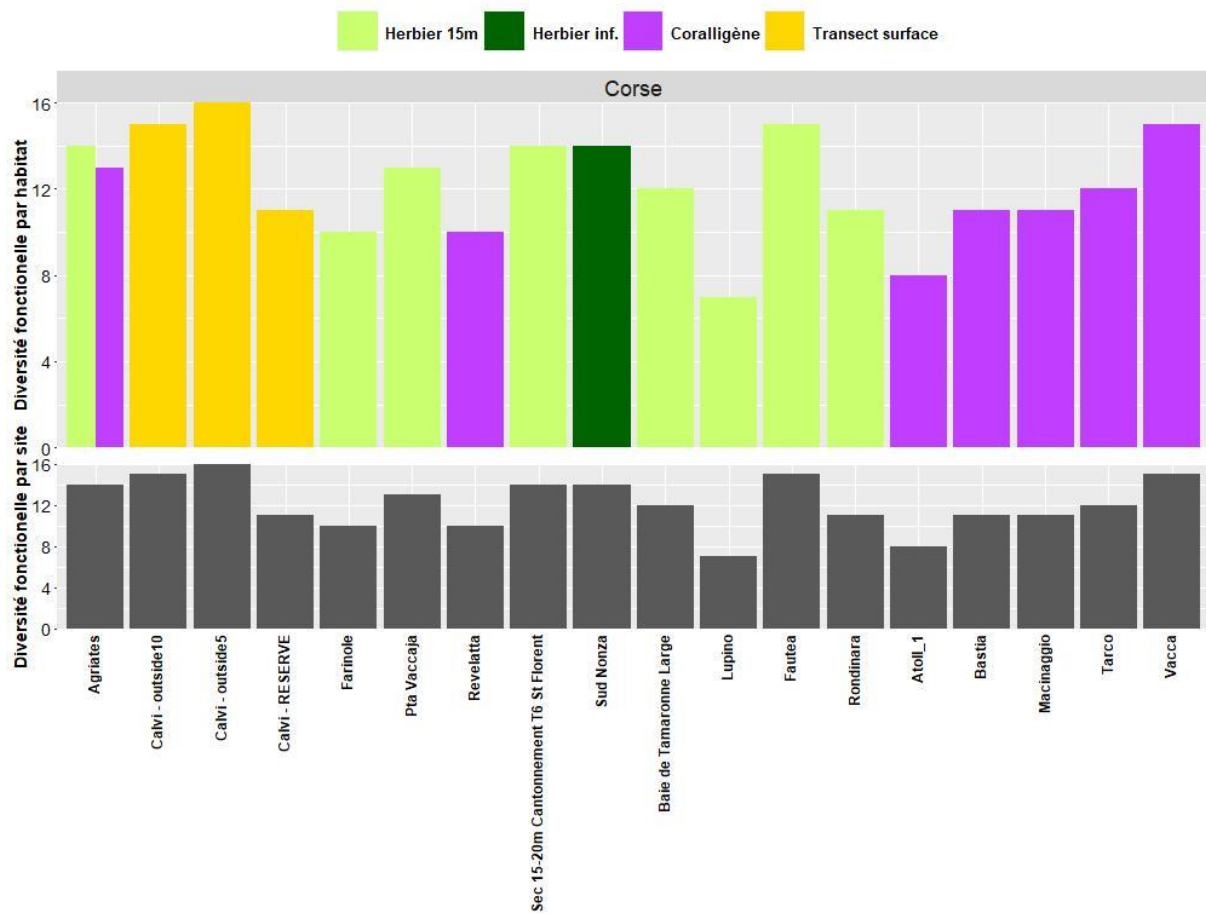


FIGURE 91 : INDICATEUR DE DIVERSITE FONCTIONNELLE PAR SITE ET PAR HABITAT

La diversité fonctionnelle est variable en fonction des sites et des habitats et est en moyenne **légèrement supérieure sur les transects surface** (ns).

Les sites présentant la plus forte diversité fonctionnelle sont à nouveau le site de Calvi (hors de la réserve), suivi par deux sites localisés sur la côte Est : Fautea (herbier – Nord du golfe de Porto-Vecchio) et Vacca (coralligène - au sud du golfe de Porto-Vecchio).

La diversité fonctionnelle semble aussi supérieure à l'extérieur de la réserve de Calvi comparé à l'intérieur.

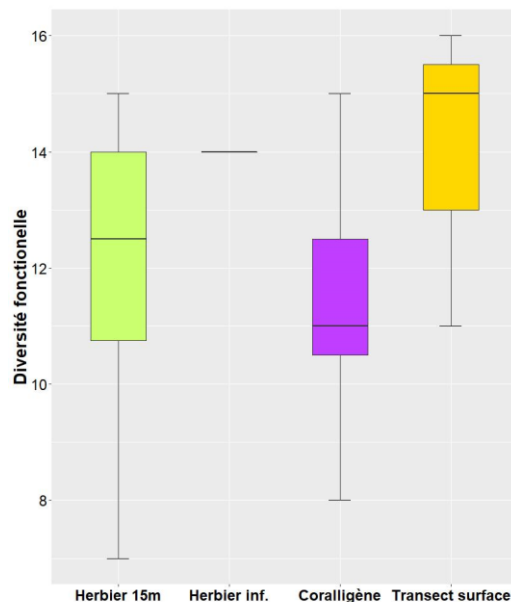


FIGURE 90 : INDICATEUR DE DIVERSITE FONCTIONNELLE PAR HABITAT EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE



## Indicateur des espèces de poissons de récif de grande taille (LRFI)

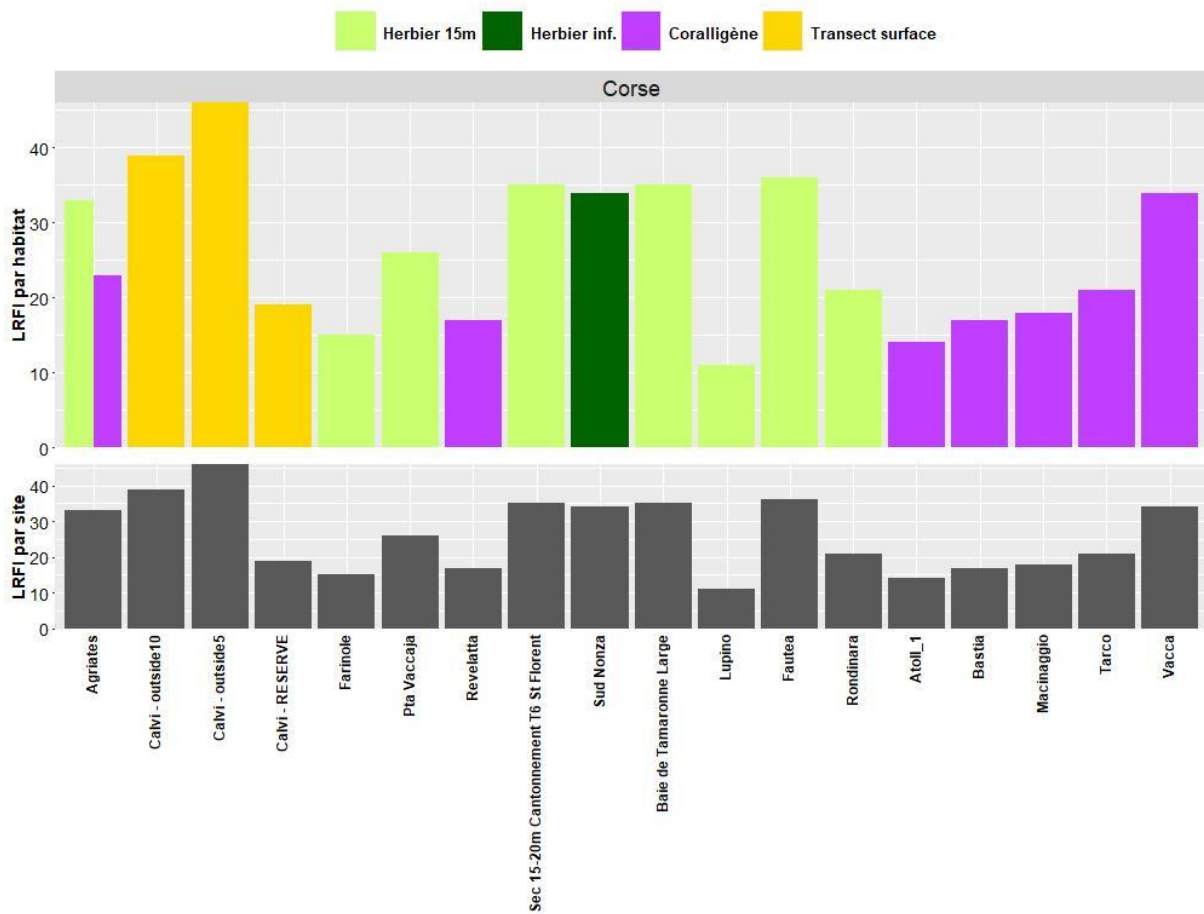


FIGURE 93 : INDICATEUR LRFI PAR SITE ET PAR HABITAT

L'indicateur des espèces de poissons de récif de grande taille est variable en fonction des sites et des habitats et est en moyenne **légèrement supérieur sur les transects surface** (ns).

Les sites présentant le plus fort LRFI sont à nouveau les sites de Calvi situés à l'extérieur et dans la réserve, suivis par les sites de Fautea, Baie de Tamaronne et du cantonnement de St Florent. Le site « Calvi Outside 5 » est le seul où ont été détectés, en plus de baudroie commune, les deux poissons de récifs de grande taille *Bothus podas* et *Pegusa nasuta*.

L'indicateur des espèces de poissons de récif de grande taille semble aussi supérieur à l'extérieur de la réserve de Calvi comparé à l'intérieur.

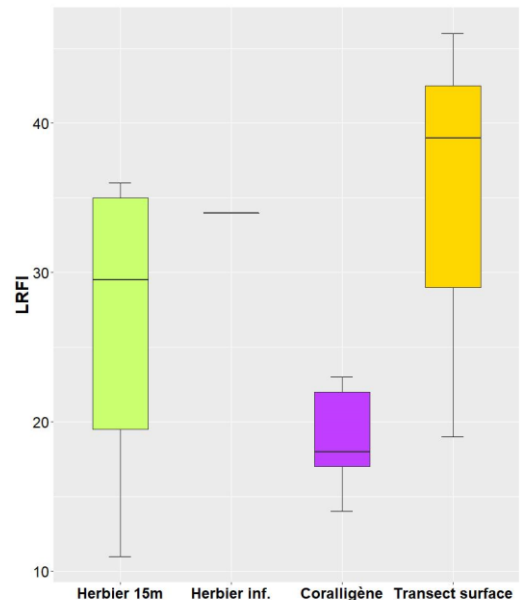


FIGURE 92 : INDICATEUR LRFI PAR HABITAT EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE



FIGURE 94 *BOTHUS PODAS* ET *PEGUSA NASUTA* (PROJET MER-VEILLE, ANDROMEDE OCEANOLOGIE)



## Indicateur crypto-benthique (CB)

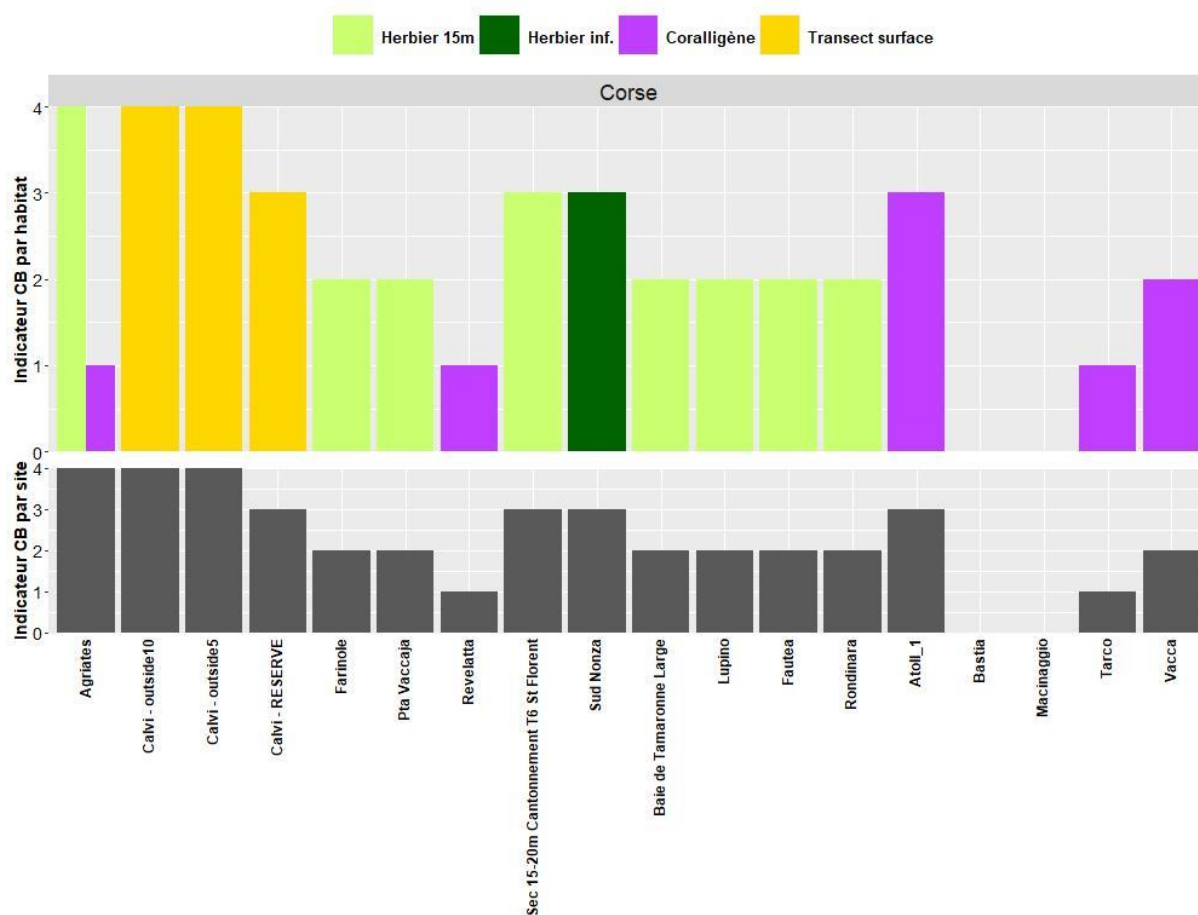


FIGURE 96 : INDICATEUR CRYPTO-BENTHIQUE PAR SITE ET PAR HABITAT

L'indicateur crypto-benthique est variable en fonction des sites et des habitats et en moyenne **légèrement supérieur sur les transects surface** ( $F=6.6$ ,  $p\text{-value}<0.005$ ).

Les sites présentant le plus fort indicateur crypto-benthique sont à nouveau les sites de Calvi situés à l'extérieur ou dans la réserve, ainsi que le site « Agriates ». Ces sites sont les seuls sur lesquels a été détectée l'espèce crypto-benthique *Gobius paganellus*.

L'indicateur crypto-benthique semble aussi supérieur à l'extérieur de la réserve de Calvi comparé à l'intérieur.

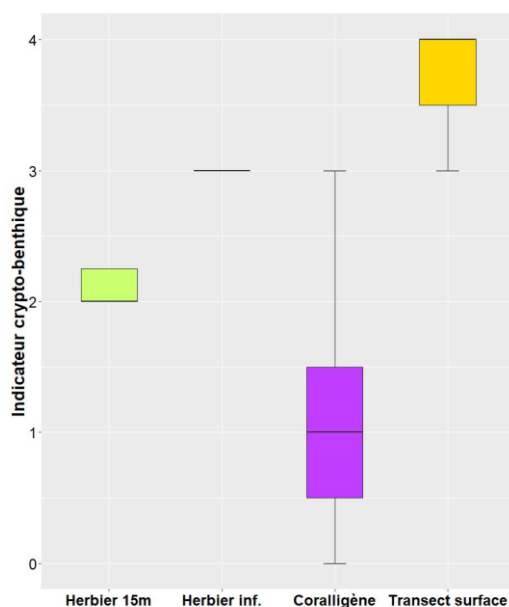


FIGURE 95 : INDICATEUR CRYPTO-BENTHIQUE PAR HABITAT EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE

## Indicateur liste rouge UICN

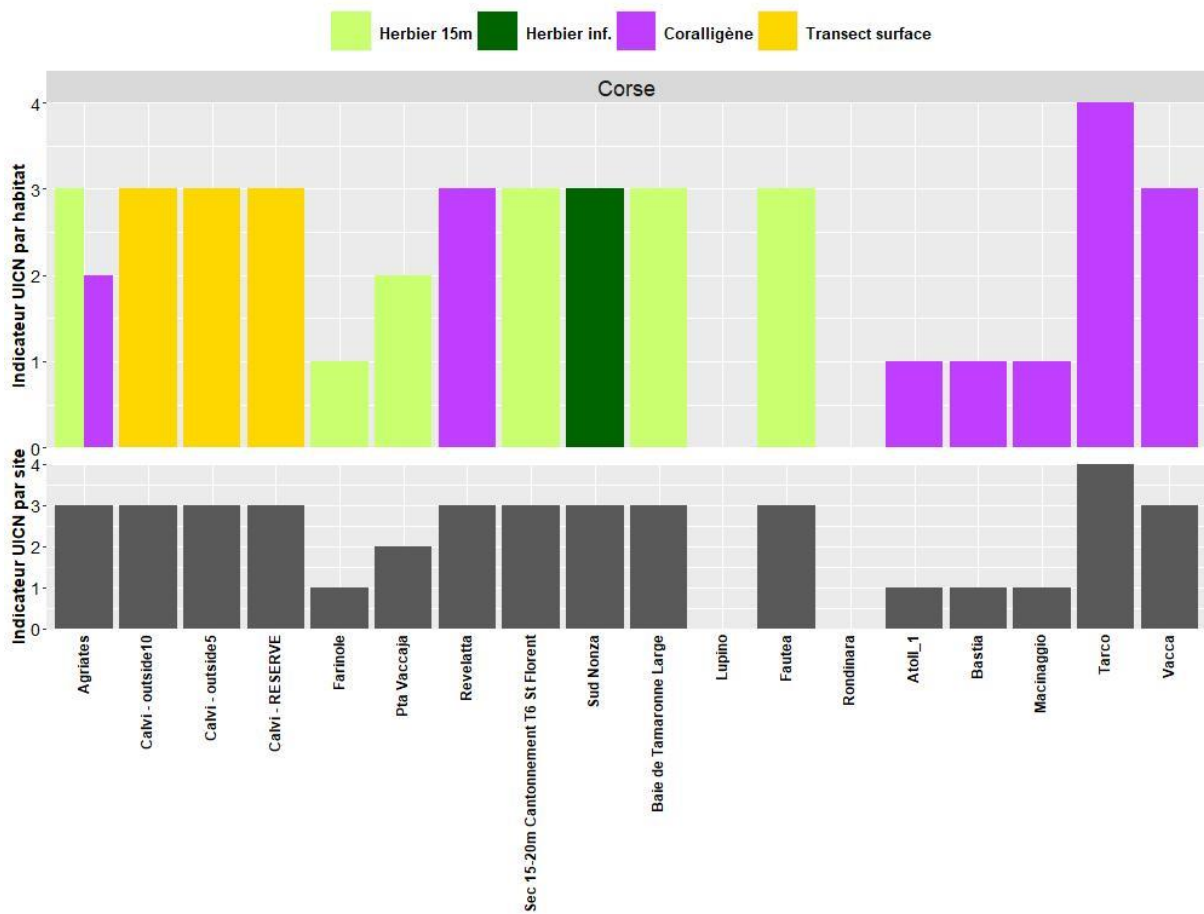


FIGURE 97 : INDICATEUR UICN PAR SITE ET PAR HABITAT

L'indicateur UICN est assez homogène en fonction des sites et des habitats (ns).

Le site de Tarco présente un indicateur UICN plus élevé que les autres car il s'agit du **seul site où a été observé en 2020 l'ange de mer (*Squatina squatina*)**, classé sur la liste rouge de l'IUCN en danger critique.

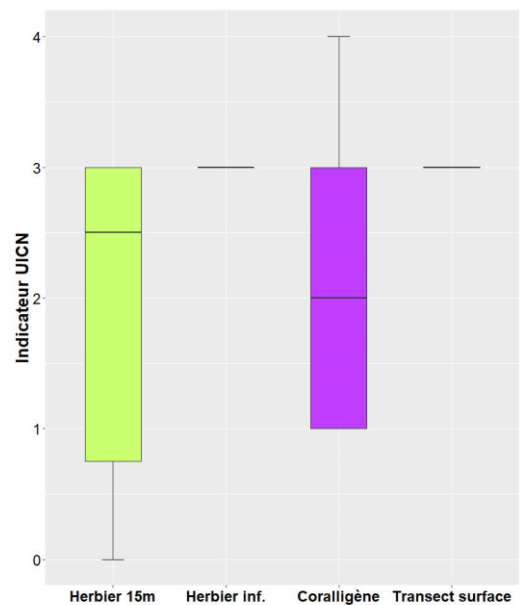


FIGURE 98 : INDICATEUR UICN PAR HABITAT EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE



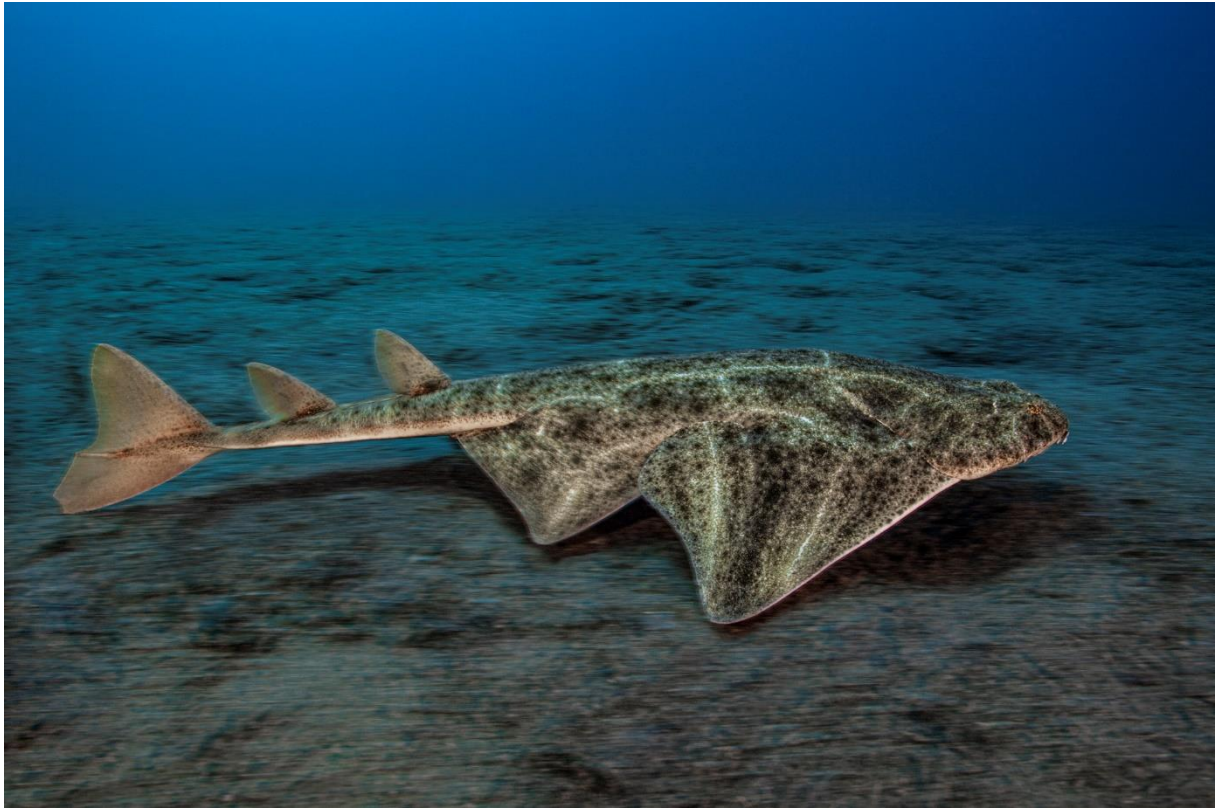


FIGURE 99 : ANGE DE MER (*SQUATINA SQUATINA*), BASTIA, -40 M (© LAURENT BALLESTA).

## Indicateur non indigène

Aucune espèce envahissante n'a été détectée sur la campagne PISCIS en Corse en 2020.

## Indicateur thermique

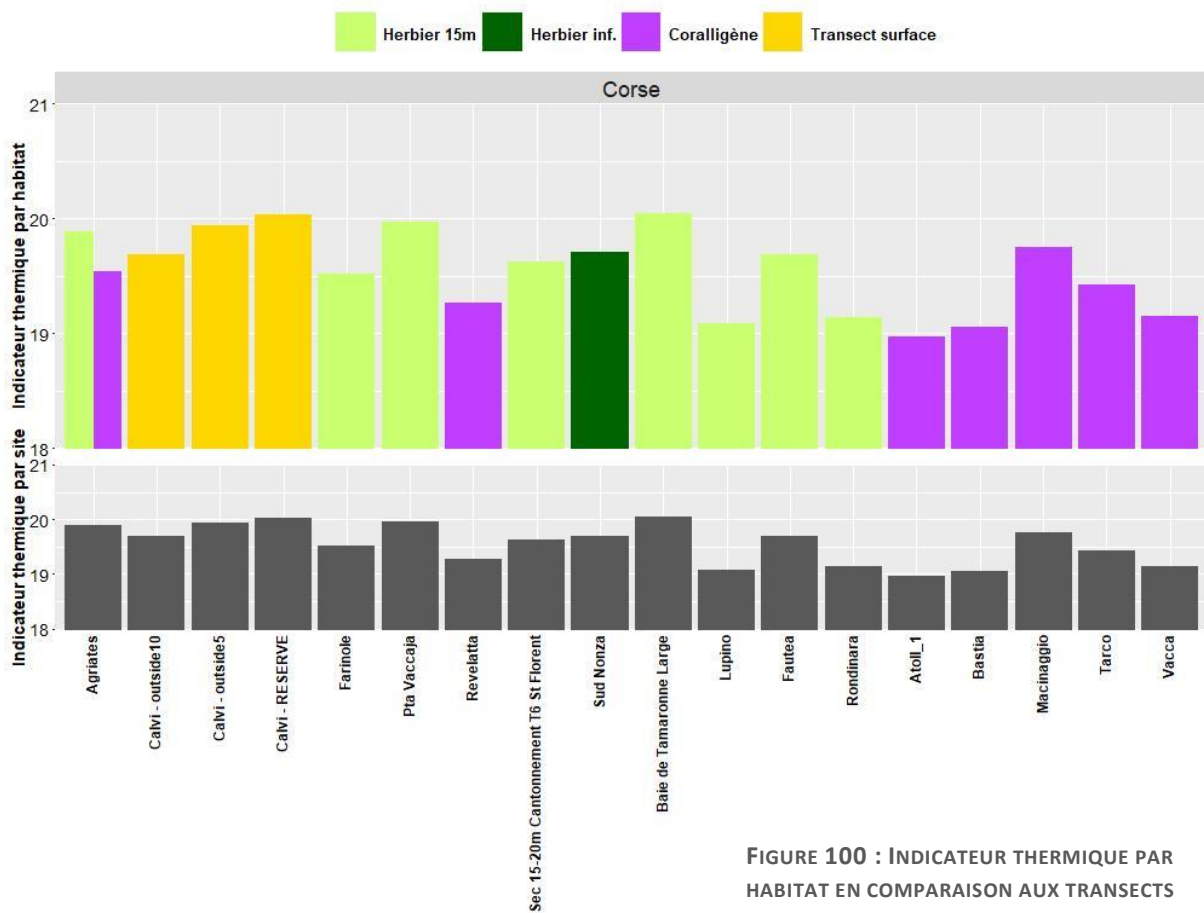
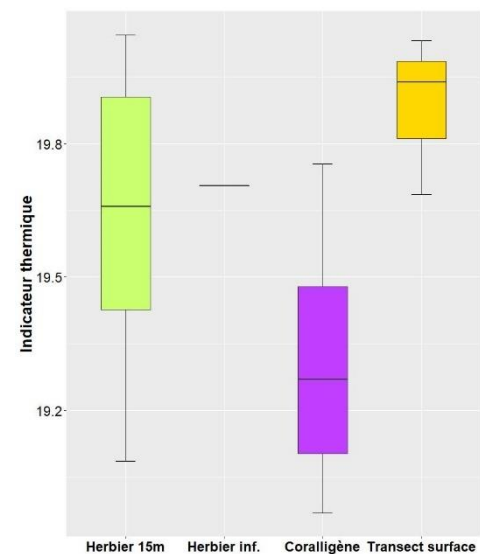


FIGURE 100 : INDICATEUR THERMIQUE PAR HABITAT EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE

FIGURE 101 : INDICATEUR THERMIQUE PAR SITE ET PAR HABITAT

L'indicateur thermique est variable en fonction des sites et des habitats (ns).

L'indicateur thermique est en moyenne inférieur pour l'habitat coralligène, ce qui est cohérent avec la profondeur moyenne plus importante pour cet habitat comparé aux autres habitats analysés.



### III.B. Comparaison ADN environnemental et Caméra

Nous comparons les méthodologies de suivi des populations de poissons entre la caméra 360° (2015 à 2019) et l'ADN environnemental (2020), sur la région Corse. Cette comparaison est réalisée sur les indicateurs communs aux deux méthodes (liste d'espèces observées/détectées et richesse spécifique).

#### Richesse spécifique

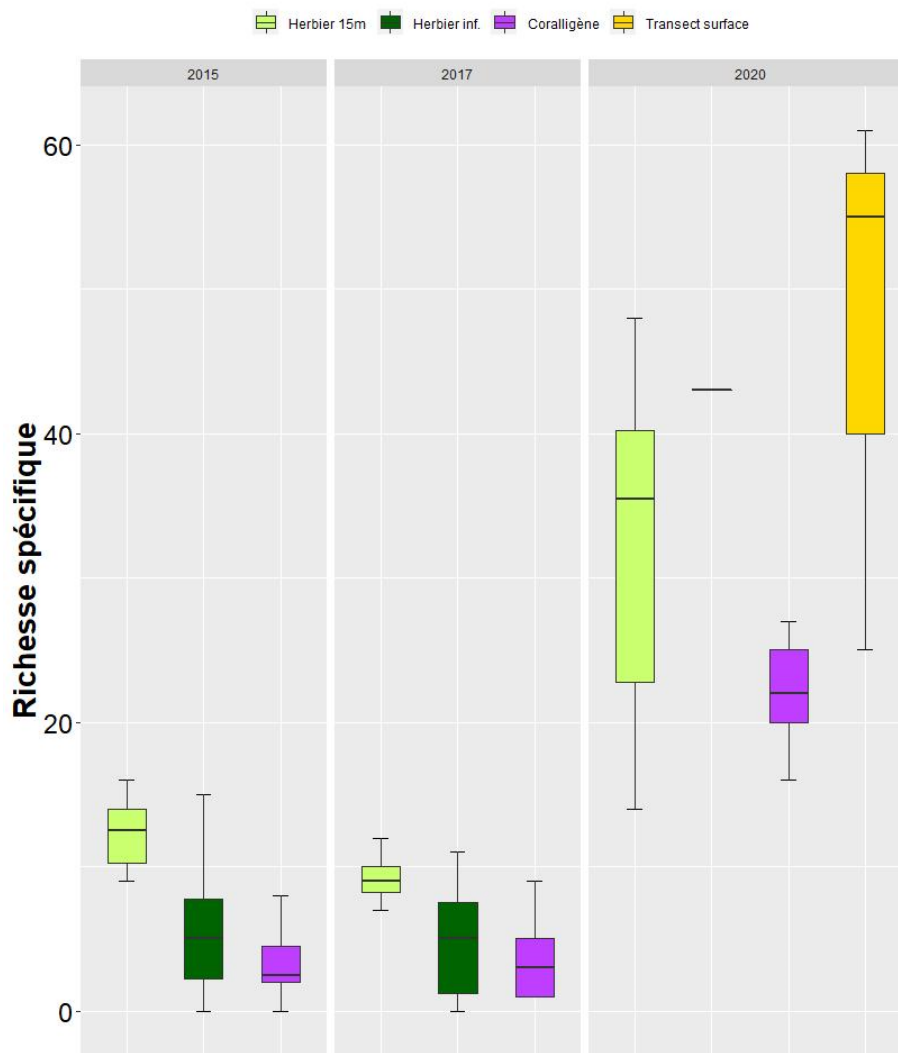


FIGURE 102 : RICHESSE SPECIFIQUE PAR HABITAT (EN COMPARAISON AUX TRANSECTS SURFACE EN 2020) ET ANNEE

La figure ci-dessus présente la richesse spécifique par habitat, année et méthode d'échantillonnage (caméra 360° en 2015 et 2017 et ADN en 2020).

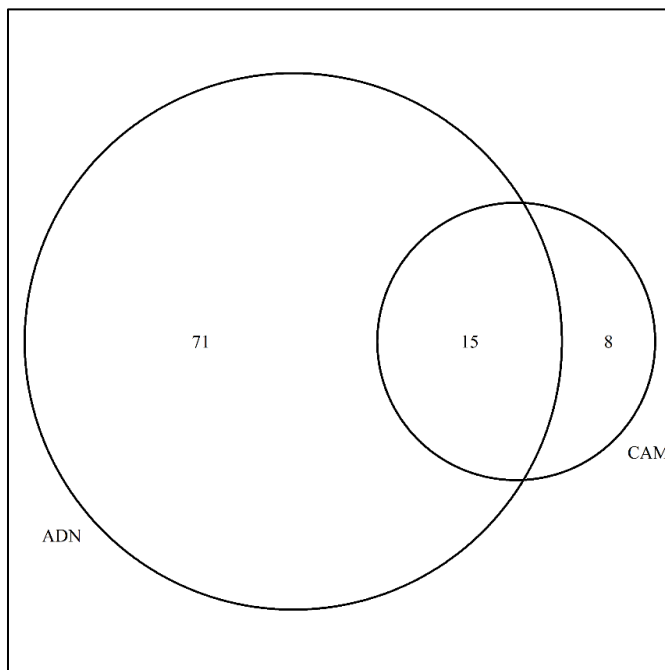
La richesse spécifique varie en fonction des habitats mais aussi en fonction de la méthode d'échantillonnage ( $F=149$ ,  $p<10^{-15}$ ). On observe en effet pour les années de 2015 à 2019, qui regroupent un plus grand nombre de stations, une plus forte richesse spécifique sur l'herbier et particulièrement à 15 m de profondeur. **Les observations de 2020 semblent montrer une richesse spécifique plus élevée par ADN que par caméra**, indépendamment de l'habitat. Cette observation est détaillée par l'analyse des listes d'espèces ci-dessous.

## Liste d'espèces

La figure précédente montre une part importante des transects surface dans la richesse spécifique observée. Ces transects sont donc écartés des analyses ci-dessous.

TABLEAU 8 : COMPARAISON DU NOMBRE DE TAXONS DETECTES

	Caméra 360°	ADNe
Nombre de familles	10	37
Nombre de genres	15	67
Nombre d'espèces	23	86



Le tableau 8 et la figure ci-contre montre la différence dans le nombre de taxons détectés par chaque méthode.

On observe une **différence importante dans le nombre d'espèces observées par chaque méthode**, avec 15 espèces observées en commun par chacune des méthodes, 8 espèces observées uniquement par la caméra (les 3 espèces les plus observées sont *Symphodus mediterraneus* et *rostratus*, et *Sphyaena viridensis*) et 71 espèces observées uniquement par l'ADN (les 3 espèces les plus observées sont *Gobius xanthocephalus*, *Scorpaena scrofa*, et *Epinephelus marginatus*).

FIGURE 103 : DIAGRAMME DE VENN REPRESENTANT LE NOMBRE DE TAXONS DETECTES/OBSERVES PAR CHAQUE METHODE

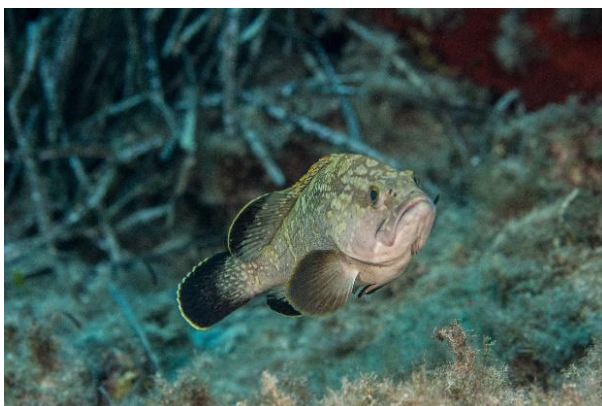


FIGURE 104 : *EPINEPHELUS MARGINATUS* ET *SYMPHODUS MEDITERRANEUS* (PROJET MER-VEILLE, ANDROMEDE OCEANOLOGIE)



## IV. Synthèse

En région Corse, cette première mission PISCIS a permis l'échantillonnage de **19 sites-habitat** par ADN environnemental. Au total, **45 familles, 77 genres et 99 espèces différentes ont été détectés** lors de cette campagne. Plusieurs indicateurs ont pu être calculés à différents niveaux : site, site-habitat, habitat. Pour la majorité des indicateurs, les transects en surface présentent des valeurs **légèrement plus élevées** et l'habitat coralligène des valeurs **légèrement moins élevées** en moyenne que les autres habitats (herbier de posidonie 15 m et limite inférieure), mais cette tendance reste faible.

D'un point de vue géographique, on observe une richesse spécifique et un indicateur crypto-benthique plus élevés dans les secteurs de Calvi et dans le cantonnement de pêche de St Florent, une diversité fonctionnelle plus élevée également dans le secteur de Calvi et dans le secteur du golfe de Porto-Vecchio. Les résultats des analyses menées à l'extérieur et à l'intérieur de la réserve de Calvi montrent une richesse spécifique, une diversité fonctionnelle, des espèces de poissons de récif de grande taille et des espèces crypto-benthiques plus importantes en dehors de la réserve. Ces résultats confirment ceux **publiés le 28 Avril dans la revue *Proceedings of the Royal Society B*** (Boulanger et al., 2021) qui montrent « *une augmentation de la biodiversité en poissons en fonction de la distance à la réserve* ». Ce résultat inédit et surprenant révèle un nouveau paradoxe en conservation. L'autre résultat marquant de cette étude est « *la différence de composition en espèces entre les réserves et leur extérieur. Malgré la proximité géographique, ces sites présentent des espèces très différentes avec notamment bien plus d'espèces crypto-benthiques comme les gobies à l'extérieur des réserves, alors que les espèces vulnérables restent plus présentes à l'intérieur des réserves* ».

En 2020, la méthode d'échantillonnage du réseau PISCIS est passée de la caméra 360° à l'ADN environnemental. La comparaison des deux méthodes montre que l'ADNe permet de détecter **une plus grande diversité d'espèces** que la caméra, et donc une **détection plus exhaustive des populations de poissons**. En 2020, sur le site Tarco, ces analyses ADNe ont notamment permis de détecter pour la première fois l'ange de mer (*Squatina squatina*). Ces données ont été à l'origine du projet ANGE porté par l'Université de Montpellier en partenariat avec Andromède Océanologie et le Parc naturel marin du Cap Corse et de l'Agriate visant à mieux connaître la biologie de l'ange de mer, son habitat et les pressions qui s'y exercent.

Le réseau PISCIS, avec des stations sur l'ensemble de la côte, réparties sur les deux habitats prioritaires que sont l'Herbier de posidonie et le Coralligène, représente une **base solide pour un suivi à long terme des assemblages ichtyologiques de Méditerranée française**. Elles complètent les données biologiques issues des réseaux TEMPO et RECOR et fournissent des informations ponctuelles sur le **fonctionnement de ces écosystèmes**, c'est-à-dire sur les fonctions que ces écosystèmes assurent comme par exemple la fonction d'habitat. Pour les campagnes de surveillance 2021 à 2023, la méthode d'ADNe est privilégiée à la vidéo. Le calcul des indicateurs sera effectué sur un nombre important de points de surveillance, et à différents pas de temps. Ces **nombreuses acquisitions de données prévues pour les années à venir** sont très encourageantes et laissent présager des résultats très intéressants à moyen terme vers une meilleure compréhension de la distribution des assemblages ichtyologiques en Méditerranée française, qui seront intégrés dans le prochain atlas de surveillance biologique.

Les données du réseau PISCIS permettront aussi de mettre à jour **les grilles d'interprétation des différents indicateurs de l'état écologique du coralligène et de l'herbier** développés pour l'[atlas cartographique](#) grâce à l'amélioration des connaissances et à l'acquisition de nouvelles données avec les campagnes postérieures à 2019. En effet, pour chaque indicateur nous avons réalisé un classement des valeurs en couvrant toute la distribution des valeurs observées pour cet indicateur sur l'ensemble des données de la surveillance. Le score attribué dépend donc de la distribution globale des valeurs sur toutes les données de surveillance.

# Bibliographie

- Airoidi, L. (2003). The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 41, 161–236.
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance: NON-PARAMETRIC MANOVA FOR ECOLOGY. *Austral Ecology* 26, 32–46. doi:10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x.
- Ballesteros, E. (2006). Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 44, 123–195.
- Beijbom, O., Edmunds, P. J., Kline, D. I., Mitchell, B. G., and Kriegman, D. (2012). Automated annotation of coral reef survey images. in *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (Providence, RI: IEEE), 1170–1177. doi:10.1109/CVPR.2012.6247798.
- Bouchereau, J.-L., Tomasini, J. A., Russ, C., and Jouvenel, J. Y. (1992). Inventaire des poissons peuplant la réserve naturelle des îles Lavezzi. *Travaux scientifiques du Parc naturel régional et des réserves naturelles de Corse*, 1–11.
- Bouchoucha, M., and Herve, G. (2013). Développement d'un indicateur poisson (DCSMM) : programmation 2012.
- Clarke, K. R., and Gorley, R. N. (2006). *PRIMER v6: User Manual/Tutorial*. Plymouth, UK: PRIMER-E.
- Darling, E. S., Graham, N. A. J., Januchowski-Hartley, F. A., Nash, K. L., Pratchett, M. S., and Wilson, S. K. (2017). Relationships between structural complexity, coral traits, and reef fish assemblages. *Coral Reefs* 36, 561–575. doi:10.1007/s00338-017-1539-z.
- Deter, J., Descamp, P., Ballesta, L., Boissery, P., and Holon, F. (2012a). A preliminary study toward an index based on coralligenous assemblages for the ecological status assessment of Mediterranean French coastal waters. *Ecological Indicators* 20, 345–352. doi:10.1016/j.ecolind.2012.03.001.
- Deter, J., Descamp, P., Boissery, P., Ballesta, L., and Holon, F. (2012b). A rapid photographic method detects depth gradient in coralligenous assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 418–419, 75–82. doi:10.1016/j.jembe.2012.03.006.
- Diaz, S., and Cabido, M. (2001). Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution* 16, 646–655. doi:10.1016/S0169-5347(01)02283-2.
- Dufour, F., Guidetti, P., and Francour, P. (2007). Comparaison des inventaires de poissons dans les aires marines protégées de Méditerranée: influence de la surface et de l'ancienneté. *Cybium* 31, 19–31.
- Ferrari, R., Bryson, M., Bridge, T., Hustache, J., Williams, S. B., Byrne, M., et al. (2016). Quantifying the response of structural complexity and community composition to environmental change in marine communities. *Global Change Biology* 22, 1965–1975. doi:10.1111/gcb.13197.
- Francour, P., and Finelli, F. (1991). Complément à l'inventaire des poissons marins de la réserve de Scandola (Corse, Méditerranée nord-occidentale). *Travaux scientifiques du Parc naturel régional et des réserves naturelles de Corse*, 35–53.
- Francour, P., and Harmelin, J. G. (1989). Inventaire de la faune ichthyologique marine de Port-Cros (Méditerranée occidentale). *Scientific Reports of the Port Cros National Park (France)*. no. 14.
- Froese, R. and Pauly, D. *FishBase*. World Wide Web electronic publication.
- George, C. J., and Athanassiou, V. (1967). A two year study of the fishes appearing in the seine fishery of St George Bay, Lebanon. *Annali Del Museo Civico Di Storia Naturale de Genova* 76, 237–294.



- Golani, D. (2000). First record of the bluespotted cornetfish from the Mediterranean Sea. *Zootaxa* 947 56, 1–90.
- Golani, D. (2005). Checklist of the Mediterranean fishes of Israel. *Zootaxa*, 1–90.
- Graham, N. A. J., Jennings, S., MacNeil, M. A., Mouillot, D., and Wilson, S. K. (2015). Predicting climate-driven regime shifts versus rebound potential in coral reefs. *Nature* 518, 94–97. doi:10.1038/nature14140.
- Graham, N. A. J., and Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 32, 315–326. doi:10.1007/s00338-012-0984-y.
- Harmelin, J.-G. (1987). Structure and variability of the ichthyofauna in a Mediterranean protected rocky area (National Park of Port-Cros, France). *Marine ecology*. Berlin 8, 263–284.
- Harmelin-Vivien, M. L., and Harmelin, J. G. (1975). Présentation d'une méthode d'évaluation in situ de la faune ichtyologique. *Travaux scientifiques du Parc national de Port-Cros* 1, 47–52.
- Ifremer (2019). MARS 3D: Model for Applications at Regional Scale. Available at: [http://tds1.ifremer.fr/thredds/dodsC/MARC-MENOR1200-MARS3D\\_F2\\_SN-FOR\\_FULL\\_TIME\\_SERIE.html](http://tds1.ifremer.fr/thredds/dodsC/MARC-MENOR1200-MARS3D_F2_SN-FOR_FULL_TIME_SERIE.html) [Accessed October 28, 2019].
- Johnson, M. P., Frost, N. J., Mosley, M. W. J., Roberts, M. F., and Hawkins, S. J. (2003). The area-independent effects of habitat complexity on biodiversity vary between regions. *Ecol Letters* 6, 126–132. doi:10.1046/j.1461-0248.2003.00404.x.
- Kemker, R., McClure, M., Abitino, A., Hayes, T. L., and Kanan, C. (2018). Measuring Catastrophic Forgetting in Neural Networks. in *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 9.
- Kipson, S., Fourt, M., Teixidó, N., Cebrian, E., Casas, E., Ballesteros, E., et al. (2011). Rapid Biodiversity Assessment and Monitoring Method for Highly Diverse Benthic Communities: A Case Study of Mediterranean Coralligenous Outcrops. *PLoS ONE* 6, e27103. doi:10.1371/journal.pone.0027103.
- Kovalenko, K. E., Thomaz, S. M., and Warfe, D. M. (2012). Habitat complexity: approaches and future directions. *Hydrobiologia* 685, 1–17. doi:10.1007/s10750-011-0974-z.
- Lenfant, P., Dalias, N., Pastor, J., and Saragoni, G. (2008). Suivi temporel du peuplement ichtyque au sein et à proximité de la Réserve Naturelle Marine de Cerbère-Banyuls. *UMR 5244 CNRS-EPHE-UPVD*.
- Liebovitch, L. S., and Toth, T. (1989). A fast algorithm to determine fractal dimensions by box counting. *Physics Letters A* 141, 386–390. doi:10.1016/0375-9601(89)90854-2.
- Lobry, J., Lepage, M., and Girardin, M. (2006). L'échantillonnage de la diversité piscicole en estuaires: stratégie et représentativité dans le contexte de la Directive cadre européenne sur l'eau. *Ingénieries-EAT*, p-3.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Malden, Ma: Blackwell Pub.
- Malak, D. A., Livingstone, S. R., Pollard, D., Polidoro, B. A., Cuttelod, A., Bariche, M., et al. (2012). Aperçu du statut de conservation des poissons marins présents en mer Méditerranée. *IUCN Gland, Suisse et Málaga, Espagne*.
- Mouchet, M., Guilhaumon, F., Villéger, S., Mason, N. W. H., Tomasini, J.-A., and Mouillot, D. (2008). Towards a consensus for calculating dendrogram-based functional diversity indices. *Oikos* 117, 794–800. doi:10.1111/j.0030-1299.2008.16594.x.
- Mouillot, D., Albouy, C., Guilhaumon, F., Ben Rais Lasram, F., Coll, M., Devictor, V., et al. (2011). Protected and threatened components of fish biodiversity in the Mediterranean sea. *Current biology*: CB 21, 1044–50. doi:10.1016/j.cub.2011.05.005.
- Myers, N., Mittermeier, R. a., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. a. B., and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. doi:10.1038/35002501.

Piazzì, L., Atzori, F., Cadoni, N., Cinti, M. F., Frau, F., and Ceccherelli, G. (2018). Benthic mucilage blooms threaten coralligenous reefs. *Marine Environmental Research* 140, 145–151. doi:10.1016/j.marenvres.2018.06.011.

Price, D. M., Robert, K., Callaway, A., Lo Iacono, C., Hall, R. A., and Huvenne, V. A. I. (2019). Using 3D photogrammetry from ROV video to quantify cold-water coral reef structural complexity and investigate its influence on biodiversity and community assemblage. *Coral Reefs* 38, 1007–1021. doi:10.1007/s00338-019-01827-3.

Quignard, J. P., and Tomasini, J. A. (2000). Mediterranean fish biodiversity. *Biol. Mar. Medit* 7, 1–66.

R Core Team (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available at: <http://www.R-project.org/>.

Sale, P. F., and Douglas, W. A. (1981). Precision and accuracy of visual census technique for fish assemblages on coral patch reefs. *Environmental Biology of Fishes* 6, 333–339.

Sartoretto, S., Schohn, T., Bianchi, C. N., Morri, C., Garrabou, J., Ballesteros, E., et al. (2017). An integrated method to evaluate and monitor the conservation state of coralligenous habitats: The INDEX-COR approach. *Marine Pollution Bulletin* 120, 222–231. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.05.020.

Sartoretto, S., Verlaque, M., and Laborel, J. (1996). Age of settlement and accumulation rate of submarine “coralligène” (-10 to -60m) of the northwestern Mediterranean Sea; relation to Holocene rise in sea level. *Marine Geology* 130, 317–331.

Seytre, C., and Francour, P. (2008). Is the Cape Roux marine protected area (Saint-Raphaël, Mediterranean Sea) an efficient tool to sustain artisanal fisheries? First indications from visual censuses and trammel net sampling. *Aquatic Living Resources* 21, 297–305.

Tzeng, E., Hoffman, J., Saenko, K., and Darrell, T. (2017). Adversarial Discriminative Domain Adaptation. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (Honolulu, HI: IEEE), 2962–2971. doi:10.1109/CVPR.2017.316.

Valisano, L., Palma, M., Pantaleo, U., Calcinaï, B., and Cerrano, C. (2019). Characterization of North–Western Mediterranean coralligenous assemblages by video surveys and evaluation of their structural complexity. *Marine Pollution Bulletin* 148, 134–148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.012>.

Willis, S. C., Winemiller, K. O., and Lopez-Fernandez, H. (2005). Habitat structural complexity and morphological diversity of fish assemblages in a Neotropical floodplain river. *Oecologia* 142, 284–295. doi:10.1007/s00442-004-1723-z.



## Annexe : Liste des espèces observées par ADNe

Famille	Genre	Espec
Apogonidae	Apogon	imberbis
Belonidae	Belone	belone
Blenniidae	Aidablennius	sphinx
Blenniidae	Blennius	ocellaris
Blenniidae	Lipophrys	trigloides
Blenniidae	Parablennius	incognitus
Blenniidae	Parablennius	gattorugine
Blenniidae	Salaria	pavo
Bothidae	Bothus	podas
Carangidae	Seriola	dumerili
Carangidae	Trachurus	mediterraneus
Centranchidae	Spicara	maena
Centranchidae	Spicara	flexuosa
Centriscidae	Macroramphosus	scolopax
Cepolidae	Cepola	macrophthalma
Chlorophthalmidae	Chlorophthalmus	agassizi
Clupeidae	Sardina	pilchardus
Clupeidae	Sardinella	aurita
Congridae	Conger	conger
Dasyatidae	Dasyatis	thetidis
Exocoetidae	Cheilopogon	heterurus
Gobiidae	Buena	affinis
Gobiidae	Corcyrogobius	liechtensteini
Gobiidae	Crystallogobius	linearis
Gobiidae	Deltentosteus	collonianus
Gobiidae	Gobius	xanthocephalus

Gobiidae	Gobius	cruentatus
Gobiidae	Gobius	geniporus
Gobiidae	Gobius	paganellus
Gobiidae	Gobius	bucchichi
Gobiidae	Lebetus	guilleti
Gobiidae	Leusueurigobius	suerii
Gobiidae	Millerigobius	macrocephalus
Gobiidae	Odondebuena	balearica
Gobiidae	Pseudaphya	ferreri
Gobiidae	Speleogobius	trigloides
Gobiidae	Zebrus	zebrus
Haemulidae	Pomadasys	incisus
Istiophoridae	Istiophorus	albicans
Labridae	Coris	julis
Labridae	Symphodus	ocellatus
Labridae	Symphodus	tinca
Labridae	Symphodus	melanocercus
Labridae	Thalassoma	pavo
Lophiidae	Lophius	piscatorius
Molidae	Mola	mola
Moronidae	Dicentrarchus	labrax
Mugilidae	Chelon	labrosus
Mugilidae	Chelon	auratus
Mugilidae	Chelon	ramada
Mugilidae	Oedalechilus	labeo
Mullidae	Mullus	barbatus
Mullidae	Mullus	surmuletus
Muraenidae	Muraena	helena
Myctophidae	Ceratoscopelus	maderensis



Myctophidae	Myctophum	punctatum
Myctophidae	Notoscopelus	elongatus_N.
Myliobatidae	Myliobatis	aquila
Pomacentridae	Chromis	chromis
Potamotrygonidae	Taeniura	meyeni
Rajidae	Raja	asterias
Salmonidae	Salmo	salar
Sciaenidae	Sciaena	umbra
Scombridae	Euthynnus	alletteratus
Scombridae	Sarda	sarda
Scorpaenidae	Scorpaena	scrofa
Scorpaenidae	Scorpaena	porcus
Scorpaenidae	Scorpaena	notata
Scyliorhinidae	Scyliorhinus	canicula
Serranidae	Epinephelus	marginatus
Serranidae	Serranus	scriba
Serranidae	Serranus	cabrilla
Serranidae	Serranus	hepatus
Soleidae	Pegusa	nasuta
Sparidae	Boops	boops
Sparidae	Dentex	dentex
Sparidae	Diplodus	annularis
Sparidae	Diplodus	sargus
Sparidae	Diplodus	puntazzo
Sparidae	Diplodus	vulgaris
Sparidae	Lithognathus	mormyrus
Sparidae	Oblada	melanura
Sparidae	Pagellus	erythrinus
Sparidae	Pagellus	bogaraveo

Sparidae	Pagellus	acarne
Sparidae	Sarpa	salpa
Sparidae	Sparus	aurata
Sparidae	Spondyliosoma	cantharus
Sphyraenidae	Sphyraena	sphyraena
Squatinaidae	Squatina	squatina
Syngnathidae	Syngnathus	acus
Synodontidae	Synodus	saurus
Torpedinidae	Torpedo	marmorata
Trachinidae	Trachinus	draco
Tripterygiidae	Tripterygion	delaisi
Tripterygiidae	Tripterygion	melanurum
Tripterygiidae	Tripterygion	tripteronotum
Uranoscopidae	Uranoscopus	scaber
Xiphiidae	Xiphias	gladius



# Contact

7, place Cassan – Carnon Plage  
34 130 Mauguio - France  
Tél. : 04.67.66.32.48 - [contact@andromede-ocean.com](mailto:contact@andromede-ocean.com)

[www.andromede-ocean.com](http://www.andromede-ocean.com)