



DEPARTEMENT
ENVIRONNEMENT

Dossier n° A001.16003



Suivi du milieu marin autour du site minier de Thio

Volet 1 : Résultats campagne annuelle 2018

Réalisé avec la participation logistique et technique



Le système qualité de GINGER SOPRONER est certifié ISO 9001-2008 par



ISO9001 : FDT1_V3/02-15

ÉVOLUTION DU DOCUMENT

Ind.	Date	Chef de projet	Ingénieur d'études	Description des mises à jour
1	07/09/2018	Antoine GILBERT	Tom HEINTZ, Nicolas GUILLEMOT, Shilpa KUMAR-ROINE	
2				

SOMMAIRE

RESUME.....	6
I. RESUME NON TECHNIQUE.....	7
II. GRILLE DE LECTURE	9
EQUIPE D'INTERVENTION	12
INTRODUCTION	14
MATERIEL ET METHODES.....	16
I. CONTEXTE PARTICULIER DE LA CAMPAGNE 2018.....	17
II. ZONE D'ETUDE ET STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE	19
<i>II.1. Situation générale.....</i>	<i>19</i>
<i>II.2. Zone d'échantillonnage.....</i>	<i>19</i>
III. SUIVI BIOLOGIQUE	22
<i>III.1. Caractérisation du substrat.....</i>	<i>22</i>
<i>III.2. Caractérisation des peuplements ichtyologiques.....</i>	<i>25</i>
<i>III.3. Caractérisation de la faune macrobenthique de fonds durs</i>	<i>31</i>
<i>III.4. Caractérisation de la faune macrobenthique de fonds meubles.....</i>	<i>32</i>
IV. SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE	34
<i>IV.1. Qualité des eaux.....</i>	<i>34</i>
<i>IV.2. Qualité des sédiments.....</i>	<i>35</i>
<i>I.2. Flux sédimentaires</i>	<i>40</i>
<i>I.3. Bioaccumulation dans les organismes vivants.....</i>	<i>41</i>
RESULTATS	42
I. EVOLUTION DE LA QUALITE DU SUBSTRAT	43
<i>I.1. Eléments de contexte.....</i>	<i>43</i>
<i>I.2. Analyse de type Contrôle-Impact.....</i>	<i>43</i>
<i>I.3. Evolution temporelle entre 2013 et 2018 sur la zone du convoyeur (Thio_W)</i>	<i>48</i>
II. EVOLUTION DE LA PREVALENCE DE LESIONS CORALLIENNES	49
<i>II.1. Analyse de type contrôle-impact.....</i>	<i>49</i>
<i>II.2. Evolution temporelle sur Thio_W depuis 2013</i>	<i>51</i>
III. CARACTERISATION DES PEUPEMENTS ICTHYOLOGIQUES.....	54
<i>III.1. Caractérisation générale de l'ichtyofaune par zone en 2018.....</i>	<i>54</i>
<i>III.2. Modélisation BACI pour la détection de signaux de changements de l'ichtyofaune de 2016 à 2018.....</i>	<i>56</i>
IV. CARACTERISATION DE LA FAUNE MACROBENTHIQUE DE FONDS MEUBLES	62
V. EVOLUTION DES COMMUNAUTES MACROBENTHIQUES DE FONDS DURS.....	63

V.1.	<i>Evolution à l'échelle des communautés</i>	63
V.2.	<i>Evolution de la diversité</i>	64
V.3.	<i>Evolution de la densité par groupe</i>	64
V.4.	<i>Evolution de la densité par sous-groupe</i>	67
V.5.	<i>Evolution de la densité d'espèces remarquables</i>	69
V.6.	<i>Evolutions sur la zone Thio_W depuis 2013</i>	70
VI.	QUALITE DES EAUX	72
VII.	QUALITE DES SEDIMENTS	76
VII.1.	<i>caractérisation des sédiments</i>	76
VII.2.	<i>contaminants dans les sédiments</i>	78
VIII.	FLUX SEDIMENTAIRES	84
IX.	BIOACCUMULATION DANS LES ORGANISMES	87
SYNTHESE ET DISCUSSION		89
I.	CONTEXTE	90
I.1.	<i>Contexte de la mise en place du suivi</i>	90
I.2.	<i>Historique des phénomènes naturels extrêmes</i>	90
II.	SUIVI BIOLOGIQUE DU MILIEU	92
II.1.	<i>Substrat et lésions coralliennes</i>	92
II.2.	<i>Macrobenthos de fonds meubles</i>	93
II.3.	<i>Macrobenthos de fond dur</i>	94
II.4.	<i>Ichtyologie</i>	94
III.	SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE	96
III.1.	<i>Contrôle qualité</i>	96
III.2.	<i>Qualité des eaux</i>	96
III.3.	<i>Qualité des sédiments</i>	96
III.4.	<i>Flux de particules</i>	97
III.5.	<i>Bioaccumulation</i>	97
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		98
ANNEXES		102
ANNEXE I: DESCRIPTIF DES STATIONS		103
I.1.	<i>THIO – ST01</i>	103
I.2.	<i>THIO – ST02</i>	105
I.3.	<i>THIO – ST06</i>	107
I.4.	<i>THIO – ST07</i>	109
I.5.	<i>THIO – ST08</i>	111
I.6.	<i>THIO – ST09</i>	113
I.7.	<i>THIO – ST10</i>	115
I.8.	<i>THIO – ST11</i>	117
ANNEXE II: EVOLUTION DU SUBSTRAT PAR STATION		119
ANNEXE III : PREVALENCE DE LESIONS CORALLIENNES PAR STATION		121
ANNEXE IV : VARIATIONS TEMPORELLES DE L'ENSEMBLE DES PARAMETRES DECRIVANT LES PEUPELEMENTS ICHTYOLOGIQUES SUR CHAQUE ZONE ENTRE 2016 ET 2018. LES BARRES D'ERREUR INDIQUENT LES INTERVALLES DE CONFIANCE (95%) POUR LES MOYENNES		123
ANNEXE V : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU MACROBENTHOS DE FONDS DURS PAR STATION		126
I.9.	<i>Richesse spécifique</i>	126
I.10.	<i>Densité par groupe</i>	127
I.11.	<i>Densité par sous-groupe</i>	128
ANNEXE VI : RESULTATS D'ANALYSES DANS LES SEDIMENTS EN 2018		129

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Trajectoire du cyclone Cook au 10-11 Avril 2017 (source : météofrance.nc).....	17
Figure 2 : Modélisation de la hauteur significative des vagues pendant le passage du cyclone Cook (source : IRD-IFREMER)	18
Figure 3 : Plan de situation – mines de Thio.....	19
Figure 4 : Plan des stations de suivi – mine de Thio. (HC : Habitats coralliens, ICH : Ichtyofaune, MFD : Macrobenthos fonds durs, FS : Flux sédimentaires, PE : Profil Eau, QS : Qualité sédiments, MFM : Macrobenthos fonds meubles, Bioacc : Bioaccumulation dans les organismes vivants)	21
Figure 5 : Plongeur effectuant des relevés LIT et maladies.....	22
Figure 6 : Déroulement schématique d'un comptage en plongée selon la méthode des transects à largeur variable (Source : Labrosse et al. 2001).	26
Figure 7 : Système de carottier utilisé pour le prélèvement de fonds meubles (source : EMR)	33
Figure 8 : Photo-transect sur ST06 (zone devant la mine) en 2016 (gauche) et 2018 (droite). Ces photos illustrent la disparition totale des <i>Acropora branchus</i>	44
Figure 9 : Photo-transect sur ST01 (zone devant le convoyeur) en 2016 (gauche) et 2018 (droite). Ces photos illustrent la disparition totale des <i>Acropora branchus</i> et tabulaires, remplacés par un mix de débris et d'algues du genre <i>Bornetella</i>	45
Figure 11 : Evolution de la couverture corallienne par formes, au sein de chaque zone	47
Figure 13 : Evolution de la prévalence de lésions par zone (Blanchi : blanchissement ; Malfor : Malformations coralliennes ; Pigm : Pigmentation ; Pred : prédation ; Sed.compet : lésions de sédimentation et/ou compétition avec des algues ; WS : White syndrome)	49
Figure 14 : Prévalence (%) de lésions coralliennes par zone et par famille en 2016 (haut) et 2018 (bas) (Blanchi : blanchissement ; Malfor : Malformations coralliennes ; Pigm : Pigmentation ; Pred : prédation ; Sed.compet : lésions de sédimentation et/ou compétition avec des algues ; WS : White syndrome)	52
Figure 15 : illustration des lésions coralliennes fréquemment rencontrées : A : <i>Porites sp. blanchi</i> , B : Pigmentation sur <i>Porites sp.</i> , C : Malformation sur <i>Porites sp.</i> , D : Compétition entre <i>Porites sp.</i> et des algues, E : sédimentation sur <i>Pachyseris sp.</i> , F : Prédation d' <i>Acanthaster</i> sur <i>Acropora sp.</i> , G : White syndrome sur <i>Acropora sp.</i>	53
Figure 16 : Variations temporelles globales de la densité, de la biomasse et de la richesse spécifique toutes espèces entre 2016 et 2018, sur chacune des zones. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance (95%) pour les moyennes.	56
Figure 17 : Zone Thio_W (sous influence du wharf) - Profils des variations spatio-temporelles pour lesquelles un effet significatif de l'interaction « zone x année » a été détecté à l'issue des modèles. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance (95%) pour les moyennes.	60
Figure 18 : Evolution de la diversité d'invertébrés (Mollusques, Echinodermes, Crustacés et Vers) par zone d'impact et entre 2013 (Thio_W uniquement), 2016 et 2018.....	64
Figure 20 : Photographies des genres <i>Trapezia</i> , <i>Calcinus</i> et <i>Nobia</i> (source : google-image).....	68
Figure 23 : Le réseau hydrographique du site de Thio	73
Figure 24 : Profils de température et de salinité pour les stations de Thio	74
Figure 25 : Profils de fluorescence et de turbidité pour les stations de Thio	74
Figure 26 : Paramètres physico-chimiques mesurés aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018	75
Figure 27 : Comparaison des pourcentages massiques (%) des différentes classes granulométriques pour les sédiments prélevés aux stations de Thio.....	76
Figure 28 : Teneurs en carbonates dans les sédiments prélevés aux stations de Thio	76
Figure 29 : Moyennes des pourcentages massiques des différentes classes granulométriques pour les sédiments échantillonnés dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 5) et du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio.....	77
Figure 30 : Moyennes des teneurs en carbonates mesurées dans les sédiments échantillonnés dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 5) et du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio	77
Figure 31 : Distributions granulométriques et teneurs en carbonate mesurées aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018.....	78
Figure 32 : Moyennes des pourcentages massiques des différentes classes granulométriques et des teneurs en carbonates dans les sédiments échantillonnés dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 5) et du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio lors du suivi en 2016 et 2018.....	78

Figure 33 : Concentrations en métaux mesurées dans les sédiments prélevés aux stations de Thio	79
Figure 34 : Moyennes des concentrations pour les différents métaux mesurées dans les sédiments échantillonnés dans les zones d'impact (Thio_M ; n = 5 et Thio_W ; n = 2) et de contrôle (Thio_C ; n = 3) du site de Thio	80
Figure 35 : Teneurs en métaux mesurées aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018	81
Figure 36 : Moyennes des concentrations pour les différents métaux mesurées dans les sédiments échantillonnés dans les zones d'impact (Thio_M ; n = 5 et Thio_W ; n = 2) et de contrôle (Thio_C ; n = 3) du site de Thio lors du suivi en 2016 et 2018	82
Figure 37 : Teneurs en HCT mesurées aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018	83
Figure 38 : Moyennes des teneurs en HCT mesurées dans les sédiments échantillonnés dans les zones d'impact (Thio_M ; n = 5 et Thio_W ; n = 2) et de contrôle (Thio_C ; n = 3) du site de Thio lors du suivi en 2016 et 2018	83
Figure 39 : Flux de particules terrigènes et carbonatées mesurés aux stations de Thio	85
Figure 40 : Moyennes des densités des flux mesurées dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 4) et d'impact du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio	85
Figure 41 : Flux de particules terrigènes et carbonatées mesurés aux stations de Thio lors du suivi en 2016, 2017 et 2018	86
Figure 42 : Moyennes des densités des flux mesurées dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 4) et d'impact du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio lors du suivi en 2016, 2017 et 2018	86
Figure 43 : Pluviométrie lors de la période d'immersion des « tubes à sédiments » aux stations de Thio en 2016, 2017 et 2018	86
Figure 44 : Concentrations en métaux bioaccumulés dans les perroquets prélevées dans la zone de contrôle (Thio_C ; n = 1) et dans la zone d'impact de la mine (Thio_M ; n = 2) du site de Thio	87
Figure 45 : Chronologie des phénomènes naturels extrêmes sur la période 2016/2018 et campagne d'échantillonnage des écosystèmes coralliens pour la SLN	90
Figure 46 : Diagramme présentant les impacts pouvant potentiellement survenir (isolément ou cumulativement) sur les écosystèmes coralliens (Source : Richards & Day 2018)	91
Figure 47 : Photographie d'une colonie massive de <i>Porites</i> renversée probablement à la suite du cyclone Cook face au convoyeur (gauche) et des signaux de récupération de coraux branchus, en forte compétition avec les algues du genre <i>Bornetella</i> qui ont colonisé la zone suite à la perte de couverture corallienne (droite)	93

RESUME

I. RÉSUMÉ NON TECHNIQUE

En 2015, la Société Le Nickel (SLN) a mis en place un suivi environnemental du milieu marin de l'ensemble des sites du bord de mer sous l'influence de ses activités. Dans ce contexte, la zone de Thio, commune de la côte Est où la SLN exploite les mines de Plateau, Do-Thio et du camp des sapins depuis 1880, a fait l'objet d'une campagne d'échantillonnage en 2016 et en 2018 suivant une stratégie d'échantillonnage comprenant une zone de contrôle (Thio_C) et deux zones d'impact : Thio_M influencée par les bassins versants miniers et Thio_W influencée par le convoyeur de chargement. L'expertise des données collectées permet d'examiner l'évolution des caractéristiques de l'écosystème récifal (habitat corallien, lésions coralliennes, ichtyofaune et macrobenthos) et de certaines caractéristiques physico-chimiques du milieu lagunaire (profils CTD, sédiments, flux sédimentaires et bioaccumulation) depuis 2016. Il est à noter que la campagne d'échantillonnage de 2018 intervient consécutivement à l'occurrence de phénomènes naturels extrêmes, avec en 2016 une anomalie thermique à l'origine d'un épisode de blanchissement massif suivi en 2017 par le passage du cyclone Cook qui a traversé la Grande Terre d'Est en Ouest en créant de très fortes houles.

Un signal d'impact lié à une dégradation significative des substrats coralliens est observé entre 2016 et 2018 dans les deux zones d'impact (Thio_M et Thio_W), en comparaison avec la zone de contrôle qui a également subi une dégradation mais dans une moindre mesure, sa couverture initiale en 2016 étant beaucoup plus faible. La diminution de couverture corallienne (46% à 17% sur Thio_M et 58% à 12% sur Thio_W) est principalement liée aux coraux du genre *Acropora* et de formes branchues, digitées et tabulaires. En 2016, la couverture de coraux blanchis lié à l'épisode massif de blanchissement était respectivement de 2% et 8% sur Thio_M et Thio_W, indiquant qu'une autre perturbation est intervenue pour engendrer la dégradation observée. La forte perte de coraux dont les formes sont sensibles aux perturbations physiques (branchus, tabulaires) semble montrer un fort impact du cyclone Cook (Avril 2017) dont la trajectoire est passée sur la côte Est au niveau de Ponerihouen. L'analyse de prévalence des lésions coralliennes montre une augmentation générale de prévalence des lésions liées à la sédimentation en 2018 sur les 3 zones, particulièrement sur Thio_W, indiquant l'existence d'une forte pression sédimentaire qui s'ajoute aux pressions ayant potentiellement impacté les coraux. Enfin, aucun développement de maladies coralliennes de l'Indo-Pacifique n'a été observé sur chacune des zones et des signaux de récupération post-blanchissement sont apparus en 2018 en zone de contrôle.

Vis-à-vis des communautés ichtyologiques, l'état initial de 2016 avait fait apparaître des caractéristiques écologiques satisfaisantes, similaires entre les deux zones d'impact (Thio_W et Thio_M) et légèrement plus pauvre en zone de contrôle (Thio_C). L'approche Contrôle/Impact réalisée en 2018 n'a pas montré de signal d'impact sur Thio_M dont les caractéristiques n'ont pas montré de grands changements. Sur Thio_W, seules les densités, biomasse et richesse spécifiques de Chaetodontidae (poissons papillons) ont obtenu un signal d'impact probablement lié à la forte dégradation de l'habitat corallien dont ils dépendent. Cette tendance sera à surveiller lors de la prochaine campagne d'échantillonnage.

Vis-à-vis des communautés d'invertébrés, aucune évolution significative de la diversité n'est observée dans chaque zone entre 2016 et 2018. L'analyse des données de densité par groupe ne montre pas de signal d'impact sur les Mollusques, Echinodermes, Crustacés et Vers sur Thio_M. En revanche, un signal d'impact est détecté entre 2016 et 2018 pour les Crustacés sur Thio_W. Ce signal est lié à une forte diminution de densité provenant des sous-groupes Maxillopoda (genre *Nobia* exclusivement) et Décapodes (genre *Trapezia* et *Calcinus* principalement), fortement inféodés aux coraux. Toutefois, ce signal d'impact est à relativiser à la lumière des données disponibles sur Thio_W datant de 2013 qui montraient un niveau de densité de décapodes (avant dégradation de l'habitat corallien) similaire à celui de 2018 (après dégradation de l'habitat corallien).

Vis-à-vis de l'analyse du macrobenthos de fonds meubles, les résultats obtenus lors de cette campagne confirment que le couple méthode/stratégie d'échantillonnage n'est pas adapté. En effet, bien qu'une augmentation de densité d'organismes soit observée entre 2016 et 2018 sur le site de Thio, les prélèvements sont pour la majorité exempts de faune benthique chaque année et lorsque des organismes sont prélevés et identifiés, la diversité par carotte apparaît comme limitée avec au maximum une seule espèce. En l'état, la stratégie d'échantillonnage du cahier des charges n'apporte pas d'éléments quantitatifs pertinents sur les zones de récifs frangeant échantillonnés.

Au niveau physico-chimique, les mesures ponctuelles par temps sec de qualité d'eau (température, salinité, pH, turbidité, fluorescence) correspondent à un état « normal » pour un milieu côtier et/ou fond de baie en 2016 et 2018. L'analyse d'une mesure de flux sédimentaire intégrée sur un mois en 2016, 2017 et 2018 montre que les particules récoltées sont principalement terrigènes, et reflètent un niveau de perturbation « normal » chaque année selon le guide CNRT (< 36 mg/cm²/j) sauf exception. Les deux stations situées à l'embouchure de la Thio (ST04) et de la Do-Thio (ST05) dépassent largement ce seuil en 2018 avec des flux 2 à 4 fois plus élevés liés à une forte pluviométrie sur la période. L'analyse des sédiments montre une diminution ou absence d'évolution des concentrations sur les stations pour chaque métal hormis le Hg qui a légèrement augmenté sur chaque station et hormis pour ST02 dont de nombreuses concentrations ont augmenté (Cu, Cr, Co, Ni, Zn et Pb). En comparaison avec les valeurs guides du CNRT, la zone de contrôle obtient des concentrations inférieures aux seuils pour chaque métal alors que les deux zones d'impact sont proches ou dépassent les seuils chaque année pour les métaux miniers Ni, Co et Mn. Concernant les hydrocarbures, les valeurs sont proches ou inférieures aux seuils de détection de la méthode chaque année sur chaque station. Enfin l'analyse des métaux dans les chairs d'organismes consommés du fait des contraintes coutumières, d'accessibilité et de disponibilité des ressources ne permettent pas de réaliser les prélèvements en abondance tout en respectant une stratégie contrôle/Impact, limitant de ce fait la représentativité des échantillons et la portée des conclusions. Vis-à-vis des métaux dits prioritaires (Cd, Pb et Hg) les concentrations mesurées sont très inférieures aux seuils sanitaires réglementaires européens pour la consommation humaine dans les chairs en 2016 et 2018.

II. GRILLE DE LECTURE

Afin de qualifier les résultats obtenus en 2016 et 2018, une première grille de lecture est proposée (Tableau 1). Elle s'appuie lorsque cela est possible sur l'existence de seuils. Ainsi les données relatives à la physico-chimie sur les flux de particules, de qualité d'eau (fluorescence, turbidité et oxygène dissous), de qualité des sédiments (Co, Cr, Mn et Ni) sont comparées aux valeurs de références proposées dans le guide CNRT (Beliaff *et al*, 2011). Concernant la bioaccumulation, les quelques échantillons analysés sont comparés aux seuils sanitaires réglementaires européens (CE 1881/2006) pour trois métaux prioritaires (Cd, Pb et Hg).

Remarque : Pour les paramètres physico-chimiques, la lecture de la grille du Guide CNRT présente plusieurs obstacles. En effet, pour permettre son utilisation, un découpage a été établi, soit selon la géomorphologie de la zone, soit selon l'influence que celle-ci peut subir. De surcroît, ce découpage peut diverger entre les différents paramètres physico-chimiques considérés. En effet, pour les flux de particules, les seuils sont caractérisés selon la station qu'elle soit localisée à l'embouchure d'un creek, au fond d'une baie ou aux abords d'un récif frangeant. Pour la qualité des eaux, ce découpage diverge puisque les seuils sont caractérisés par rapport à la position de la station soit, en fond de baie, en milieu côtier ou au niveau du récif barrière. Pour la qualité des sédiments ce classement diffère une fois de plus puisque les seuils sont alors définis, non pas par la géomorphologie, mais par un critère d'influence terrigène ou marine que les stations pourraient subir. Ces trois découpages sont, assez subjectifs car aucune donnée analytique n'est fournie dans le Guide pour appuyer ces classifications. D'autre part, les découpages du Guide ne sont pas extrapolables à ceux qui sont proposés dans le rapport du suivi marin des sites de la SLN ; ce dernier étant basé sur les zones d'impact et contrôles et/ou sur les biotopes. Par conséquent, ces divergences dans les découpages rendent l'attribution d'un seuil unique difficile pour certaines des stations du suivi de THIO. Malgré ces difficultés, un effort de rapprochement avec les seuils énoncés par le Guide a été effectué, selon les classements décrits ci-dessous.

Station	Découpage selon SLN		Découpage selon le GUIDE CNRT		
	Biotope	Contrôle/Impact	SEDIMENT	FLUX	CTD
ST01		Impact wharf	Influence terrigène	Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral
ST02			Influence terrigène	Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral
ST04		Impact mine	Influence terrigène	Embouchure creeks	Fond de baie, littoral
ST05			Influence terrigène	Embouchure creeks	Fond de baie, littoral
ST06			Influence terrigène	Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral
ST07			Influence terrigène	Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral
ST08			Influence terrigène	Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral
ST09			Contrôle	Influence terrigène	Abords récifs frangeant
ST10		Influence terrigène		Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral
ST11		Influence terrigène		Abords récifs frangeant	Fond de baie, littoral

En l'absence de seuils ou de valeurs de référence formelles disponibles, cette évaluation d'état pour l'ichtyofaune et la couverture corallienne est essentiellement réalisée à dire d'expert et s'appuie sur les niveaux habituellement observés sur des récifs aux caractéristiques équivalentes de Nouvelle Calédonie.

Pour le recouvrement corallien trois classes ont été définies afin de qualifier la couverture en coraux de chaque zone : < 10% Faible (rouge); 10% < x < 40% : Moyen (orange); et > 40% : Fort (vert).

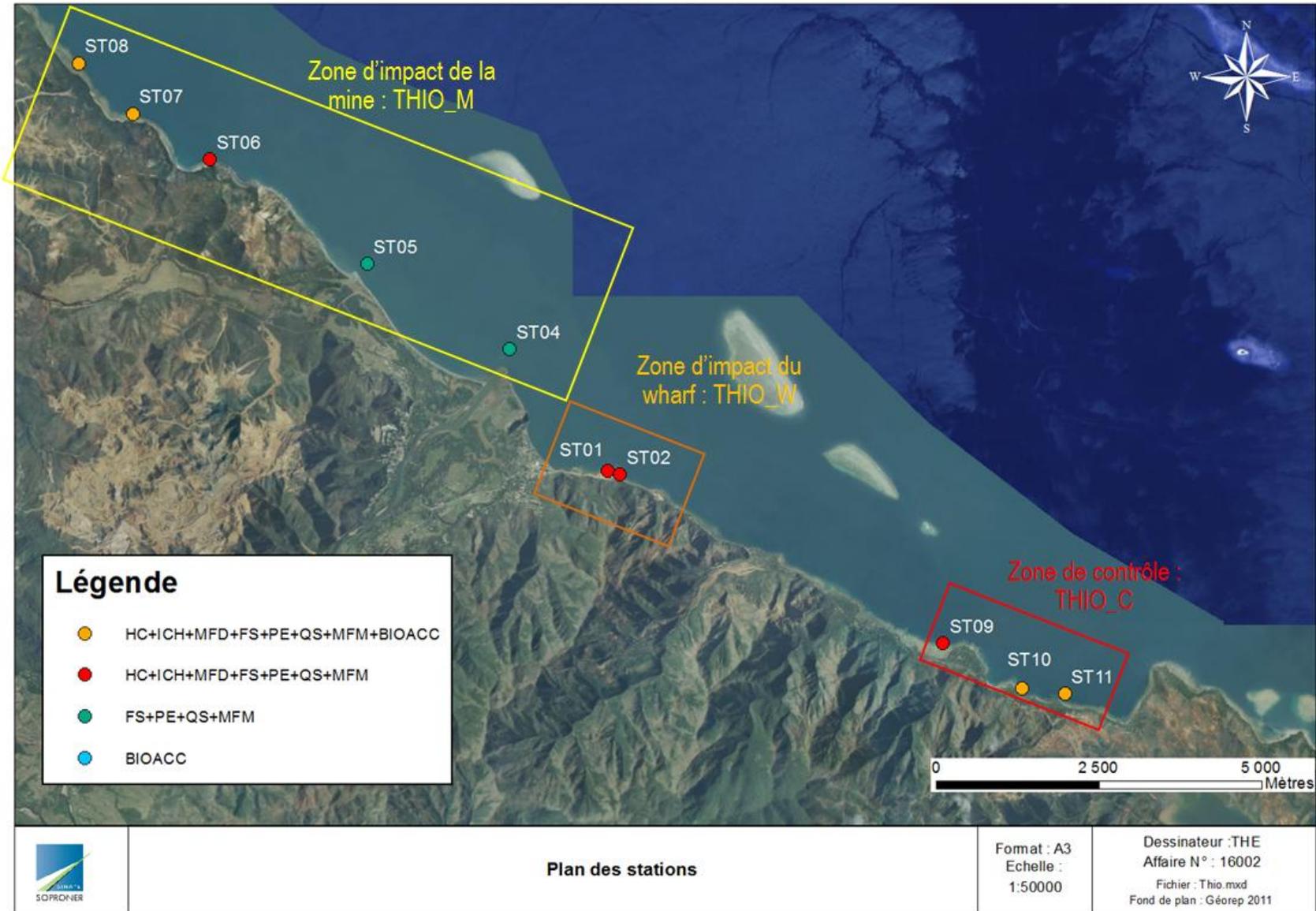
Pour les invertébrés, une qualification d'état vis-à-vis du niveau de densité de populations d'espèces corallivores (Acanthasters et Drupella) est réalisée.

Le code couleur suivant est proposé pour chaque variable étudiée (hors blanchissement corallien) :

-  Bon état, bonne qualité
-  Etat moyennement perturbé, moyenne qualité
-  Etat perturbé, mauvaise qualité

Tableau 1 : Grille de lecture – site de Thio

	Date d'échantillonnage	Thio_W		Thio_M		Thio_C		Valeur guide CNRT (Beliaff et al. 2011)	Norme CE 1881/2006)	Dire d'expert
		Mai 2016	Mai 2018	Mai 2016	Mai 2018	Mai 2016	Mai 2018			
Physico-chimie	Qualité de l'eau	Fluorescence	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	< 1mg/m3 Chl a	
		Turbidité	Etat non perturbé	Etat non perturbé	Etat non perturbé	Etat non perturbé	Etat non perturbé	Etat non perturbé	< 4 NTU	
		Oxygène dissous	Bon	-	Bon	-	Bon	-	> 5 mg/l	
	Qualité des sédiments	Co	244 µg/g	334 µg/g	300 µg/g	207 µg/g	144 µg/g	124 µg/g	176,3 µg/g	
		Cr	2869 µg/g	2462 µg/g	3776 µg/g	1503µg/g	1902 µg/g	1303 µg/g	7820 µg/g	
		Mn	1616 µg/g	1948 µg/g	1954 µg/g	1809 µg/g	1287 µg/g	1101 µg/g	1668 µg/g	
		Ni	4318 µg/g	6792 µg/g	4403 µg/g	2380 µg/g	2183 µg/g	1604 µg/g	2300 µg/g	
	Flux de particules	Flux	6,55 mg/cm ² /j	7,87 mg/cm ² /j	16,54 mg/cm ² /j	68,9 mg/cm ² /j	3,9 mg/cm ² /j	14,8 mg/cm ² /j	35,9 mg/cm ² /j	
	Bioaccumulation (toutes espèces)	Cd	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence		poisson: <0,25 µg/g; Crustacé: <2,5 µg/g; Mollusques: <5,0 µg/g
		Pb	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence		poisson: <1,5 µg/g; Crustacé: <2,5µg/g; Mollusques: <7,5µg/g
Hg		< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence	< valeur de référence		poisson: <2,5 µg/g; Crustacé: <2,5µg/g; Mollusques: <2,5µg/g	
Biologie	Substrat	Couverture corallienne	58%	12%	47%	18%	11%	6%		Faible: <10%; 10%<Moyen<40%, Fort>40%
		Proportion de blanchissement au sein de la couverture corallienne	15%	0%	5%	0%	18%	11%		
	Ichtyofaune	Densité, biomasse et richesse spécifique	Etat de santé satisfaisant	Etat de santé satisfaisant (mais amorce diminution Chaetodontidae à surveiller)	Etat de santé satisfaisant	Etat de santé satisfaisant	Etat de santé satisfaisant	Etat de santé satisfaisant		
	Macrobenthos espèces corallivores	Densité	Absence de pullulation	Absence de pullulation	Absence de pullulation	Absence de pullulation	Absence de pullulation	Absence de pullulation		
	Biodiversité	n genres coralliens total	30	28	32	29	35	34		
		n espèces macrobenthos total	35	50	41	57	54	64		
		n espèces ichtyofaune total	92	90	113	119	123	128		



Plan des zones d'influence – mine de Thio. (HC : Habitats coralliens, ICH : Ichtyofaune, MFD : Macrobenthos fonds durs, FS : Flux sédimentaires, PE : Profil Eau, QS : Qualité sédiments, MFM : Macrobenthos fonds meubles, Bioacc : Bioaccumulation dans les organismes vivants)

EQUIPE D'INTERVENTION

Mission biologique

Antoine GILBERT Ingénieur Halieute de l'ENSAR spécialisé en gestion des ressources récifales et Chef de projet en environnement marin au sein de la société SOPRONER. Il a analysé les données sur la faune macro-benthique. Il est le superviseur scientifique du volet biologique et coordinateur de l'étude.

Tom HEINTZ Ingénieur en écologie marine tropicale diplômé de l'Université James Cook (Townsville - Australie), chargé d'études au sein de la société SOPRONER. Il a collecté et analysé les données sur le substrat et les lésions coralliennes. Il a également analysé les données sur la faune macro-benthique.

Daisy GOROPARAWA : Taxonomiste des invertébrés ayant pratiqué sur de nombreux suivis dont celui pour KNS ou la zone classée pour le patrimoine mondial de l'UNESCO. Elle a collecté les données sur la faune macro-benthique

Pierre LABOUTE Consultant, issu de l'ORSTOM et auteur de nombreux ouvrages sur la faune marine de Nouvelle Calédonie. Il a réalisé les relevés sur l'ichtyofaune et la détermination de la faune macrobenthique de fonds meubles.

Nicolas GUILLEMOT Consultant, Ingénieur Halieute de l'ENSAR et docteur en halieutique. Il a réalisé l'analyse des données ichthyologiques.

Mission physico-chimique

Jean-Michel Fernandez Docteur en Géochimie, Gérant-Directeur du laboratoire AEL, superviseur scientifique

Shilpa Kumar-Roiné Ingénieur en analyses et métrologie, a réalisé l'analyse des données en physico-chimie et la rédaction du rapport.

L'ensemble des opérations de terrain ont été conduites sous la supervision de SOPRONER et avec l'aide logistique et technique de la société EGLE pour la réalisation de l'ensemble des missions physico-chimiques.

INTRODUCTION

Pour faire suite à la loi de pays du 16 Avril 2009 relative au code minier ¹ et les états initiaux réalisés consécutivement entre fin 2012 et début 2013, La Société Le Nickel (SLN) a souhaité mettre en place un suivi environnemental du milieu marin de l'ensemble de sites du bord de mer sous l'influence de ses activités.

Les zones à proximité des wharfs de chargement et celles en aval des bassins versants exploités ont été identifiées afin de faire l'objet d'un suivi environnemental. Ce suivi a pour objectif d'évaluer d'une part l'état écologique et physico-chimique des zones identifiées et d'autre part d'étudier leurs évolutions en différenciant autant que possible celles liées à des phénomènes naturels de celles liées aux activités de l'industriel.

Le suivi est donc focalisé sur l'analyse de données complémentaires avec :

- pour le volet biologique : une caractérisation du substrat corallien, des lésions coralliennes, des peuplements ichtyologiques et macrobenthiques;
- pour le volet physico-chimique : une caractérisation des flux sédimentaires, de la bioaccumulation dans certains organismes consommés, de la qualité des eaux et des sédiments.

Suite à la mise en place en 2016 d'un réseau opérationnel de 10 stations sur la zone de Thio, où la SLN exploite les mines Thio-Plateau, Do-Thio et du camp des sapins depuis 1880, ce rapport présente les résultats de la mission de 2018, réalisée 2 ans après la mise en place des stations.

Dans une première partie du document, les méthodes et protocoles mis en œuvre lors de la collecte des données et les méthodes de traitements et d'analyses statistiques sont présentées. Une seconde partie détaille l'évolution des résultats biologiques et physico-chimiques du réseau entre 2016 et 2018. Une troisième partie synthétise et discute les résultats obtenus. Enfin une première grille de lecture synthétique relative à la qualité des matrices suivies est proposée.

¹ <https://dimenc.gouv.nc/sites/default/files/download/13076455.pdf>

MATERIEL ET METHODES

I. CONTEXTE PARTICULIER DE LA CAMPAGNE 2018

La première mission du suivi a été réalisée en Mars 2016, en plein épisode de blanchissement corallien lié au réchauffement anormal des masses d'eaux dues au phénomène El Nino. Cet épisode d'ampleur mondiale et lié au réchauffement climatique, a impacté de nombreux récifs Calédoniens dont ceux de la côte Est, comme l'ont montré les résultats de la première mission de suivi en 2016.

La période 2016-2018 a également été marquée par le passage de deux cyclones (Cook et Donna) en 2017. Si la trajectoire du cyclone Donna n'a pas directement impacté la côte Est, le cyclone Cook a traversé la grande terre au niveau de Ponerihouen, créant une forte houle au niveau de Kouaoua-Poro ou encore Thio (Figure 1).

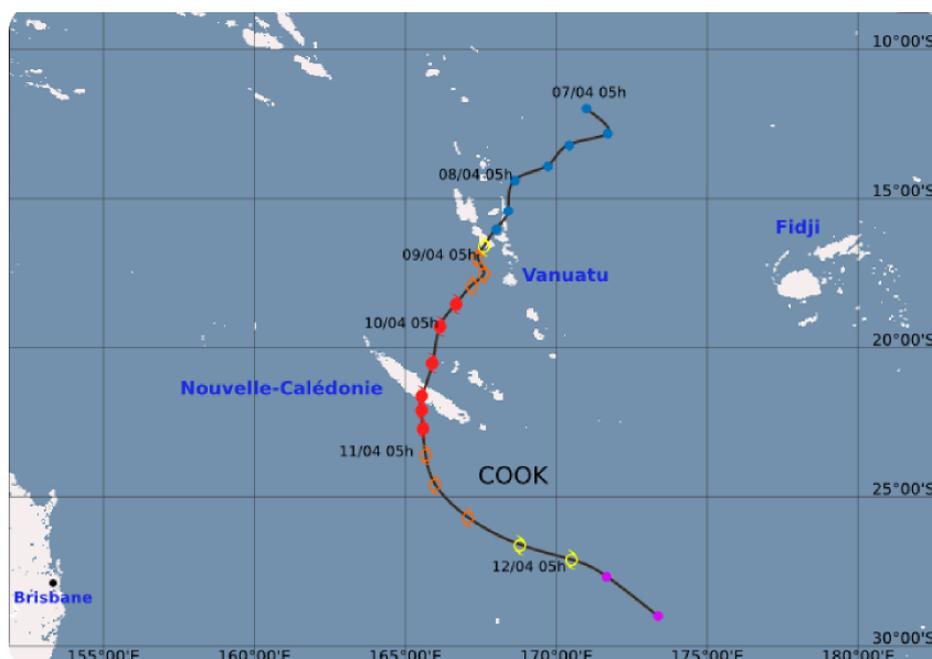


Figure 1: Trajectoire du cyclone Cook au 10-11 Avril 2017 (source : météofrance.nc)

L'IRD et l'IFREMER ont réalisé, dans le cadre du projet OBLIC (Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie), une modélisation des hauteurs significatives de vagues au niveau de Kouaoua pendant le passage du cyclone Cook. La hauteur significative (H_s) représente la moyenne des hauteurs mesurées entre crête et creux, du tiers des plus fortes vagues. La modélisation a montré des H_s atteignant plus de 12m au niveau de la barrière corallienne à Kouaoua (Figure 2).

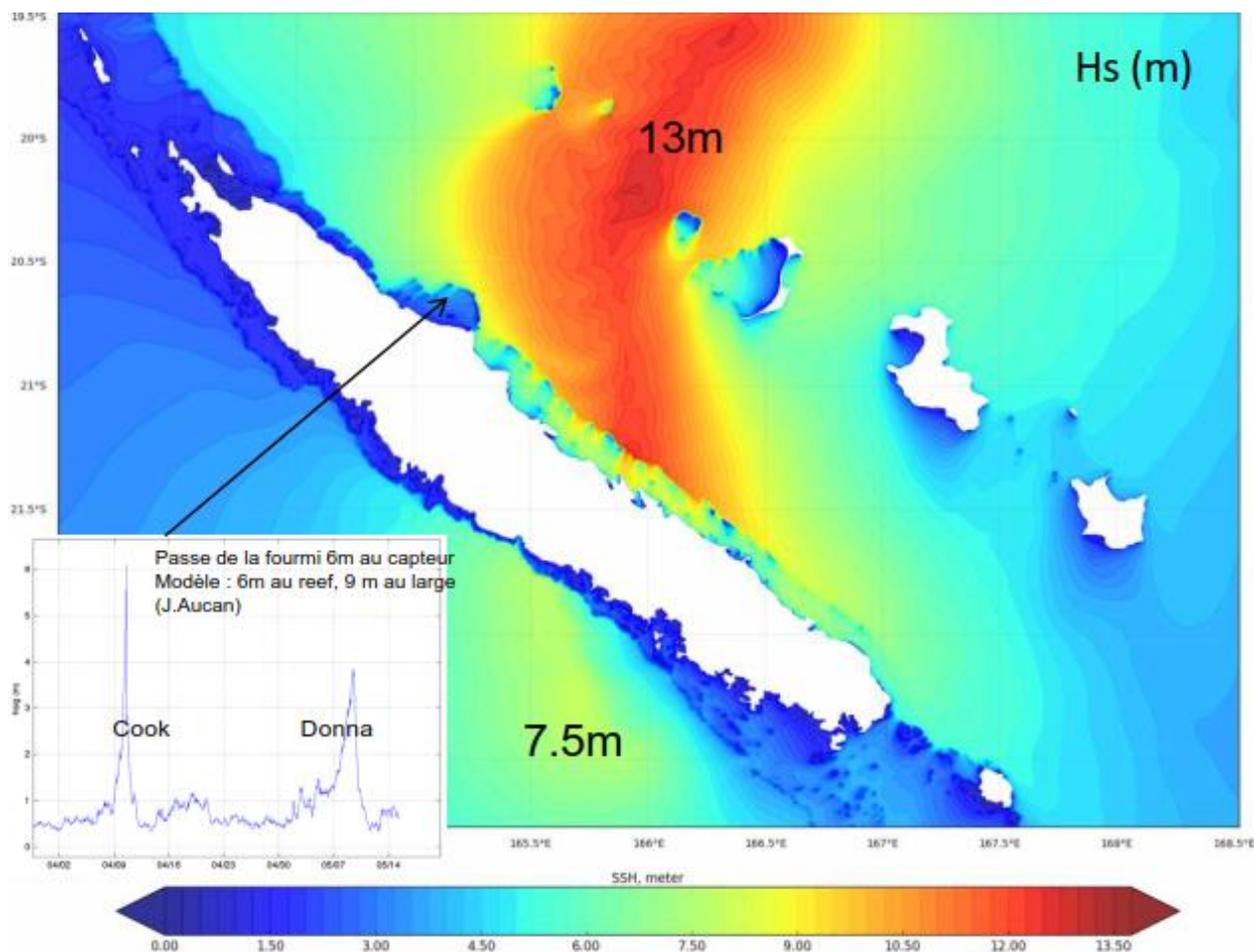


Figure 2 : Modélisation de la hauteur significative des vagues pendant le passage du cyclone Cook (source : IRD-IFREMER)

La houle et les vents violents générés par le cyclone sont susceptibles d'impacter les récifs, par impact mécanique sur les coraux dont les formes particulièrement sensibles sont branchues, tabulaires ou foliaires.

Ainsi, ces phénomènes (blanchissement corallien et cyclones) constituent des éléments de discussion dans l'évolution de l'état de santé du milieu entre 2016 et 2018.

II. ZONE D'ÉTUDE ET STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

II.1. SITUATION GÉNÉRALE

La zone d'étude concerne l'activité des mines de Thio Plateau, Do-Thio et du camp des sapins, ainsi que le wharf de chargement de minerai (Figure 3).



Figure 3 : Plan de situation – mines de Thio

II.2. ZONE D'ÉCHANTILLONNAGE

II.2.1. Relevés écologiques et physico-chimiques

La zone échantillonnée est présentée sur la Figure 4.

Elle comporte 10 stations de suivi réparties en 3 zones d'influence et décrites dans le Tableau 2:

- Zone de contrôle (Thio_C) : ST09, ST10 et ST11
- Zone d'influence du wharf de chargement (Thio_W) : ST01 et ST02
- Zone d'influence des mines de Thio-plateau et Do-Thio (Thio_M) : ST04, ST05, ST06, ST07, ST08

Tableau 2 : Liste des stations de suivi – mine de Thio

Station	Zone	Echantillonnage biologique	Echantillonnage physico-chimique
ST01	Impact du wharf (THIO_W)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST02	Impact du wharf (THIO_W)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST04	Impact de la mine (THIO_M)	MFM	FS; PE; QS
ST05	Impact de la mine (THIO_M)	MFM	FS; PE; QS
ST06	Impact de la mine (THIO_M)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST07	Impact de la mine (THIO_M)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST08	Impact de la mine (THIO_M)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST09	Contrôle (THIO_C)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST10	Contrôle (THIO_C)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS
ST11	Contrôle (THIO_C)	HC; MFD; ICH	FS; PE; QS

Biologique: HC: Habitat corallien+maladies; MFM: macrofaune de fond meuble; MFD:macrofaune de fond dur; ICH: ichtyofaune

Physico-chimique: FS: Flux sédimentaires; PE: Profil colonne d'eau; QS: qualité des sédiments

II.2.2. Bioaccumulation dans des organismes vivants

Les prélèvements biologiques ont été échantillonnés aux abords des stations de façon opportuniste en fonction de la présence et de l'abondance d'organismes consommés tels que la loche saumonée. L'absence de participation des populations locales n'a pas permis de compléter l'échantillonnage avec des prélèvements réalisés sur les zones et espèces ciblées dans le cadre de leur alimentation (crabes de palétuviers dans l'embouchure de la Thio notamment).

En fonction de la disponibilité des organismes sur le terrain, 4 stations ont pu être échantillonnées (Tableau 3).

Tableau 3 : Liste des stations de bioaccumulation – mine de Thio

Station	Zone	Espèce	Nombre
ST07	THIO_M	Poissons perroquet (<i>Scarus rivulatus</i>)	1
ST08	THIO_M	Poissons perroquet (<i>Scarus rivulatus</i>)	1
ST10	THIO_C	Un picot (<i>Acanthurus dussumieri</i>)	1
ST11	THIO_C	Deux poissons perroquet (<i>Scarus rivulatus</i>)	2
ST11	THIO_C	Un loche saumonée (<i>Plectropomus leopardus</i>)	1

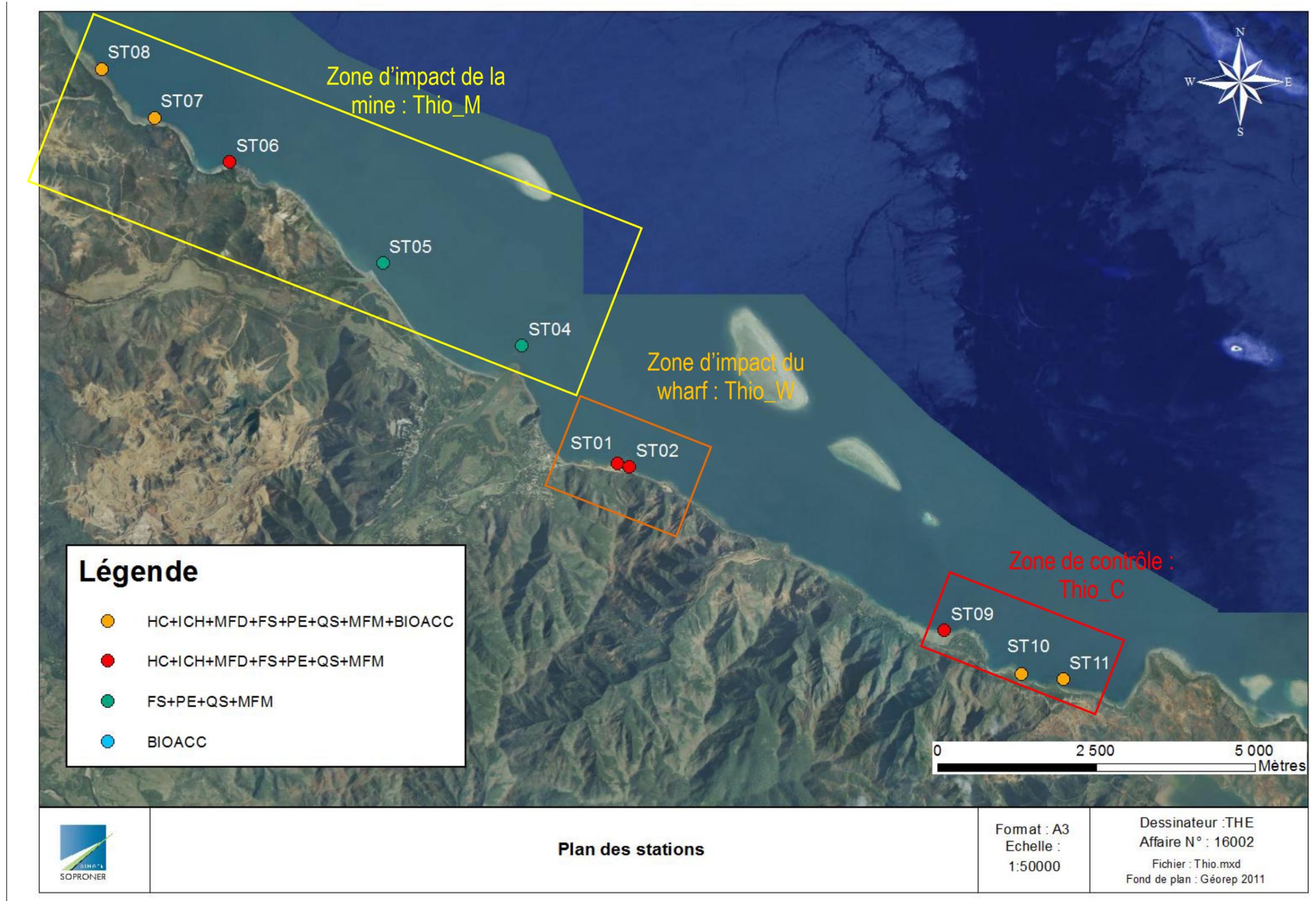


Figure 4 : Plan des stations de suivi – mine de Thio. (HC : Habitats coralliens, ICH : Ichtyofaune, MFD : Macrobenthos fonds durs, FS : Flux sédimentaires, PE : Profil Eau, QS : Qualité sédiments, MFM : Macrobenthos fonds meubles, Bioacc : Bioaccumulation dans les organismes vivants)

III. SUIVI BIOLOGIQUE

III.1. CARACTÉRISATION DU SUBSTRAT

La caractérisation du substrat a été effectuée à l'aide de deux méthodes :

- Le Line Intercept Transect (LIT) donnant des informations de couverture de substrat;
- Le comptage des lésions coralliennes donnant des informations sur le type de stress corallien présent sur la zone

III.1.1. Echantillonnage

III.1.1.1. LIT

La méthode du LIT est largement utilisée pour la description des habitats coralliens et fournit des données en pourcentage de couverture de différentes catégories de substrat sur une longueur donnée.

Sur chacune des stations échantillonnées, 3 transects fixes de 20m sont numérotés de T01 à T03.

Sur chacun des 3 transects linéaires LIT de 20m de long, un ruban métré est déployé et la distance au dessus de chaque type de substrat a été mesurée afin d'obtenir un pourcentage de substrat sur une distance de 20m (Figure 5). Les catégories définies par English et al. (1997) ont été retenues pour caractériser le substrat sous le ruban (Tableau 4).



Figure 5 : Plongeur effectuant des relevés LIT et maladies

Afin d'affiner la qualité des données et d'apprécier la diversité et la sensibilité corallienne des stations, chaque colonie corallienne a été relevée au niveau du genre. La totalité des transects a été relevée par photographie numérique et vidéo afin de garder une archive illustrative en cas de changement notable.

Chaque station est illustrée par une série de photographies présentée en ANNEXE I.

Tableau 4 : Catégories de substrat retenues pour l'échantillonnage en LIT (English et al. 1997)

Codes	Signification	Description
dc	Corail mort récemment	Couleur blanche
dca	Corail mort en place recouvert d'algues	Corail mort recouvert d'algues
acb	Acropora branchu	Au moins 2 niveaux de branches
acs	Acropora submassif	
acd	Acropora digité	Branches en forme de doigts
act	Acropora tabulaire	Branches aplaties horizontalement
ace	Acropora encroûtant	
cb	Corail branchu	Au moins 2 niveaux de branches
ce	Corail encroûtant	
cf	Corail foliaire	Corail en forme de feuille
cm	Corail massif	
cs	Corail submassif	
cmr	Fungia spp.	Corail solitaire
cme	Millepora spp.	Corail de feu
sc	Corail mou	
sp	Eponge	
zo	Zoanthaires	
ot	Autres organismes	Ascidies, anémones, gorgones, bénitiers
aa	Assemblage d'algues	
ma	Macrophyte	
ta	Turf algaires	
ca	Algues calcaires	
ha	Halimeda spp.	
s	Sable	Particules < 2 cm
r	Débris	2 cm = particules < 10 cm
si	Vase	
wa	Crevasses	Crevasse de plus de 50 cm
rck	Roches et dalle corallienne	

III.1.1.2. Lésions coralliennes

Pour déterminer la prévalence de maladies et lésions coralliennes, les transects utilisés pour le LIT ont été utilisés en échantillonnant une zone de 1m de large, le long du ruban, côté océan. Dans cette zone de 20m², chaque colonie corallienne a été recensée au niveau du genre et classifiée soit en bonne santé, soit comportant un type de lésion.

Les types de lésions observées ont été classés comme suit :

- Blanchissement
- Pigmentation (décoloration, spots)
- Malformations coralliennes
- Prédation (Etoile de mer Acanthaster, Drupella/Corallophyllia, poissons, autre)
- Lésion liée à la sédimentation/compétition avec les algues
- Maladie corallienne (White syndrome)

III.1.2. Analyse des données

III.1.2.1. LIT

Pour l'analyse des données obtenues selon English et al. (1997), un regroupement par type de substrat a été effectué comme suit :

- Coraux scléactiniaires
- Coraux Acroporidae
- Coraux Non-Acroporidae
- Coraux morts
- Coraux blanchis
- Coraux mous
- Autres organismes
- Algues calcaires
- Algues
- Coraline
- Substrat abiotique

• Les coraux blanchis, étant encore vivants, sont également inclus dans les catégories coraux scléactiniaires, Acroporidae et non-Acroporidae.

III.1.2.1.1. Evolution temporelle entre 2016 et 2018

Pour les zones Thio_C et Thio_M, l'évolution de la couverture des différents substrats est étudiée entre 2016 et 2018. Pour Thio_W, qui a bénéficié d'une campagne d'échantillonnage en 2013, l'évolution est étudiée entre 2013, 2016 et 2018.

Des analyses de variance (ANOVA) à deux facteurs (Campagne et Zone) à mesures répétées entre les zones Thio_C et Thio_M, puis entre Thio_C et Thio_W. Ces analyses ont été réalisées sur chaque type de substrat afin d'évaluer la significativité de chacun des facteurs individuellement mais également de l'interaction entre ces deux facteurs. Les données ont été transformées (racine carrée) afin de remplir les conditions de normalité des données et d'homogénéité des variances exigées pour ce type de test (Zar 1999).

L'apparition d'une interaction « Zone x campagne » significative correspond à l'apparition d'une l'évolution (positive ou négative) d'au moins une zone entre les campagnes. Cette interaction traduit donc la présence d'évolutions différentes dans le temps selon les zones. Dans le reste du document on utilisera le terme signal d'impact pour parler de l'interaction significative « Zone x campagne ».

Le facteur « campagne » correspond à l'analyse comparée entre les campagnes de terrain. Une évolution significative de ce facteur traduit d'une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les campagnes toutes stations confondues. Ces différences témoignent d'évolutions temporelles.

Le facteur « station » correspond à l'analyse comparée des stations au sein de la zone étudiée. Une évolution significative de ce facteur traduit d'une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les stations, toutes campagnes confondues. Ces différences témoignent de différences spatiales.

Dans le cas différences significatives ($p < 0,05$), un test post-hoc de Tuckey a été réalisé afin de déceler quelles éléments sont à l'origine des différences observées.

Les évolutions temporelles du substrat par station sont fournies en ANNEXE II.

III.1.2.2. Caractérisation des lésions coralliennes

III.1.2.2.1. Evolution temporelle entre 2013 et 2016

Les données de lésions coralliennes permettent d'obtenir une prévalence de chaque type de lésion pour tous les coraux, ou pour chaque famille en %. Cette prévalence est calculée en divisant le nombre de colonies comportant des lésions par le nombre total de colonies (tous taxa confondus ou au sein d'une famille).

Comme pour le LIT, une étude de l'évolution des prévalences entre 2016 et 2018 (et 2013 pour Thio_W) par zone est proposée. Une analyse statistique identique à celle du LIT est réalisée.

Les évolutions temporelles de prévalence de lésions par station sont fournies en ANNEXE III.

III.2. CARACTÉRISATION DES PEUPEMENTS ICTHYOLOGIQUES

III.2.1. Protocole d'échantillonnage et observations visuelles en plongée

Sur chaque transect de comptage de 20m, les peuplements ichthyologiques ont été évalués par observation visuelle en plongée (*Underwater Visual Census* : UVC). La méthode de comptage utilisée est l'échantillonnage par transect à largeur variable (*Distance Sampling*, Buckland et al. 1993).

Lors de l'échantillonnage, un plongeur ichthyologue progresse le long du transect et recense l'ensemble des poissons observés. Toutes les espèces de poissons observables sont prises en compte.

Pour chaque observation, le plongeur note (Figure 6) :

- l'espèce ;
- le nombre d'individus observés ;
- la taille moyenne des individus (longueur à la fourche, en cm) ;
- la distance (en m) du poisson au transect. Dans le cas d'un banc monospécifique, le plongeur note la distance du poisson le plus proche (d1) et du poisson le plus éloigné (d2).

Suite à l'échantillonnage de chaque station, les données collectées sont saisies par le plongeur dans une base de données standardisée, puis contrôlées et archivées en vue de leur traitement.

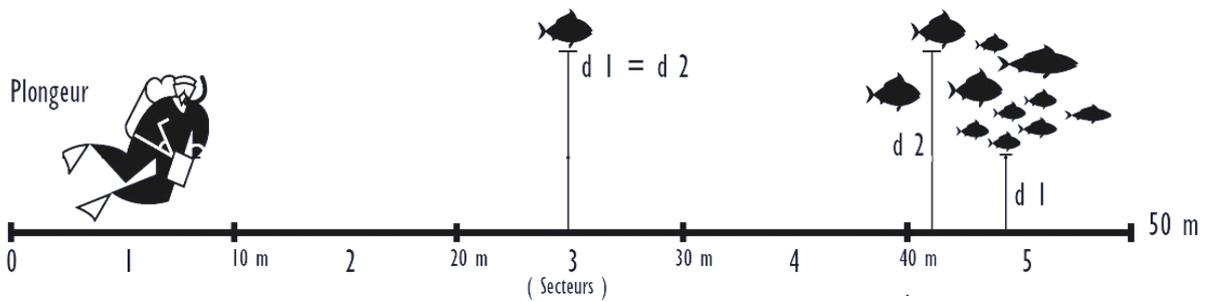


Figure 6 : Déroulement schématique d'un comptage en plongée selon la méthode des transects à largeur variable (Source : Labrosse et al. 2001).

III.2.2. Calcul des niveaux de densité, biomasse, et richesse spécifique

Pour chaque transect, les données issues des observations visuelles en plongée permettent de calculer les principaux paramètres décrivant l'ichtyofaune locale : densité, biomasse et richesse spécifique.

Les densités (notées D , en nombre de poissons/m²) et les biomasses (notées B , en g de poissons/m²) caractérisant chaque espèce ont été calculées selon les algorithmes propres à la méthode des distances moyennes pondérées (Kulbicki & Sarramegna 1999, également rappelés dans Chabanet et al. 2010).

- La densité D d'une espèce est donnée par la formule :

$$D = \frac{\sum_i n_i}{2 \times dm \times L}$$

Où,

- n_i est le nombre de poissons notés pour l'observation i (i.e. un ou plusieurs dans le cas d'un banc)
- L est la longueur du transect (ici, 20m)
- dm est la distance moyenne pondérée de l'espèce sur la station, elle est donnée par la formule :

$$dm = \frac{\sum_i n_i \times \left(\frac{d1_i + d2_i}{2} + 0,5\right)}{\sum_i n_i}$$

Où, $d1_i$ et $d2_i$ sont les distances d'observation de l'observation i

- La biomasse B d'une espèce est donnée par la formule :

$$B = \frac{\sum_i n_i \times P_i}{2 \times dm \times L}$$

Où,

- n_i est le nombre de poissons notés pour l'observation i (i.e. un ou plusieurs dans le cas d'un banc)
- dm est la distance moyenne pondérée de l'espèce sur la station (même formule que précédemment)
- L est la longueur du transect (ici, 20m)
- P_i est le poids des individus de l'observation i . Ce poids peut être obtenu à partir de la taille observée T_i des individus, selon la formule longueur-poids suivante :

$$P_i = a \times (T_i)^b$$

Où, a et b sont deux coefficients morphométriques, dont les valeurs pour les espèces considérées proviennent de Kulbicki et al. (2005a).

- La richesse spécifique (notée RS, en nombre d'espèces/station) est directement donnée par le nombre d'espèces observées sur une station.

III.2.3. Description détaillée des peuplements ichthyologiques

Les formules précédentes permettent d'obtenir les niveaux de densité, de biomasse et de richesse spécifique pour l'ensemble du peuplement observé sur une station, et fournissent ainsi de premiers éléments de caractérisation. En vue d'analyser la structure écologique et fonctionnelle de l'ichtyofaune locale, une décomposition de ces descripteurs selon différentes catégories d'intérêt est indispensable, notamment selon les critères suivants : groupes taxonomiques, groupes trophiques, et potentiel commercial.

Taxonomie - La décomposition des paramètres décrivant les peuplements selon les familles, genres et espèces qui les composent fournit des informations sur leur structure écologique et son évolution. La nature des taxons présents sur une station donnée est en effet reliée à la nature des habitats et aux conditions environnementales propres à cette station, et donc à leur éventuelle perturbation. Lors des analyses, un focus particulier sera notamment réalisé sur les Chaetodontidae et les Pomacentridae, qui constituent des indicateurs reconnus du niveau de perturbation des habitats coralliens et des peuplements biologiques qui y sont liés (Pomacentridae : Roberts & Ormond 1987, Jones 1991, Graham et al. 2006, Wilson et al. 2008 ; Chaetodontidae : Reese 1981, Bouchon-Navaro et al. 1985, Hourigan et al. 1988, Roberts et al. 1992, Jones et al. 2004).

Groupes trophiques - Décrire et analyser les peuplements ichthyologiques selon une approche fonctionnelle, en parallèle d'une approche taxonomique classique, fournit des informations complémentaires et directement reliées au fonctionnement et à la dynamique de l'écosystème observé (Hooper et al. 2002, McGill et al. 2006, Petchey & Gaston 2006). Ce type d'approche permet en effet d'aborder la structure des peuplements sous l'angle des fonctions que remplissent les différentes espèces au sein de l'écosystème (Steele 1991, Schwartz et al. 2000, Petchey & Gaston 2002a et 2002b, Guillemot et al. 2011). Parmi les différentes fonctions possibles, la fonction trophique des peuplements ichthyologiques permet en particulier d'apporter des informations précieuses pour expliquer d'éventuelles variations anormales de richesse spécifique, de densité ou de biomasse. Afin de permettre ce type d'analyse, les espèces observées ont été classées selon quatre grands groupes trophiques : carnivores, herbivores, piscivores et planctonophages, sur la base d'informations tirées de FishBase® (Froese & Pauly 1997), FISHEYE (Labrosse et al. 1999), Kulbicki et al. (2005b), et Kulbicki (comm. pers. 2016).

Potentiel commercial - Tel que suggéré dans le cahier des charges du suivi environnemental marin, une liste restreinte d'espèce dite « commerciales » a été utilisée lors des comptages (cf. protocole ci-dessus). Cette liste, historiquement utilisée dans le cadre des suivis marins en Nouvelle-Calédonie, regroupe les espèces présentant un potentiel commercial dans le Pacifique Sud. Bien que toutes ces espèces ne soient pas systématiquement consommées en Nouvelle-Calédonie, il est intéressant de prendre en compte cette distinction lors de l'étude de la structure des peuplements ichthyologiques, notamment afin de distinguer une éventuelle perturbation sélective des peuplements.

Pour chacune des catégories taxonomiques, trophiques et commerciales décrites précédemment, les niveaux de densité, de biomasse et de richesse spécifique ont été recalculés à partir des formules susmentionnées, afin de produire un panel détaillé et complet de variables descriptives de l'ichtyofaune. Les compilations de données et calculs nécessaires à la construction des différentes variables ont été réalisés avec les logiciels Microsoft Excel® et R software®.

Le Tableau 5 présente de manière synthétique les grands types de variables qui constitueront la base des analyses descriptives et statistiques utilisées par la suite.

Il convient enfin de noter que lors des estimations de densité et de biomasse, certaines observations ponctuelles ont été écartées des calculs en raison du très fort biais d'estimation qu'elles auraient induit, faussant la recherche de signaux de perturbation de l'ichtyofaune. Il s'agit essentiellement des requins et raies occasionnellement observés et dont l'occurrence sur un transect reste très aléatoire au moment du comptage.

Tableau 5 : Types de variables utilisés pour la caractérisation, l'analyse et la modélisation des peuplements ichthyologiques et de leurs variations spatio-temporelles.

Paramètre	Catégorie
	Toutes espèces
	Potentiel commercial
	Espèces "commerciales"
	Espèces "non-commerciales"
Densité ; biomasse ; richesse spécifique	Groupe trophique
	Herbivores
	Carnivores
	Planctonophages
	Piscivores
	Chaetodontidae
	Pomacentridae

III.2.4. Démarche analytique pour l'étude des peuplements ichthyologiques et de leurs variations

III.2.4.1. Approche analytique générale

La campagne 2016 sur Thio avait marqué le lancement d'un suivi temporel opérationnel plus étendu que le premier état initial réalisé en 2013 et permettant désormais, de par son plan d'échantillonnage et les méthodes utilisées, la détection de signaux de perturbation des peuplements biologiques.

Les données de la campagne de 2016 avaient permis de réaliser un état initial détaillé de l'ichtyofaune et de sa structuration spatiale sur les trois zones (Thio_M, Thio_W, Thio_C) du plan de suivi nouvellement mis en place. La campagne 2018, en fournissant un second jeu de données deux ans plus tard, permet donc d'obtenir la première série temporelle de données sur l'ensemble des stations. Bien que cette série temporelle (2 années) reste encore restreinte, des modélisations statistiques selon un schéma BACI (*Before-After-Control-Impact*, cf. détails ci-dessous) peuvent être réalisées dès à présent à partir de la série de données nouvellement disponible sur l'ensemble des stations du plan de suivi (zones d'impact et de référence), en vue de rechercher d'éventuels signaux de perturbations sur l'ichtyofaune.

Contrairement aux deux autres sites de la côte Est (Kouaoua et Poro), la constance des protocoles et de l'approche d'échantillonnage entre 2013 et 2016 avaient permis de réaliser des comparaisons temporelles rigoureuses. Toutefois, seules les deux stations de la zone Thio_W avaient été échantillonnées en 2013. En l'absence de données en zone de référence en 2013, il n'apparaît pas possible d'intégrer ces données partielles collectées en 2013 dans une approche BACI (qui concernera donc uniquement la période 2016-2018). Les données 2013 sur Thio_W seront malgré tout représentées à titre indicatif dans les graphiques d'évolution sur cette zone². Sans donnée de référence en 2013, il ne sera cependant pas possible de déterminer si les variations éventuellement observées entre 2013 et la période 2016-2018 sont reliées aux activités de la SLN sur Thio_W ou si elles relèvent de fluctuations naturelles sans lien avec les activités locales.

Pour chaque paramètre d'ichtyofaune, la description d'une zone est fondée sur la valeur moyenne des stations qu'elle contient (prenant en compte l'ensemble des répliquats constituant chaque station). Ceci permet de fournir une image pertinente des peuplements présents dans chaque zone, incluant notamment une mesure de la variabilité spatiale à petite échelle existant sur chaque zone. L'utilisation de cette réplification est de plus indispensable à la réalisation d'analyses statistiques étudiant la structure spatiale et temporelle des peuplements locaux.

Pour l'ensemble de la phase analytique, le risque de première espèce α a été fixé à 0,05. La réalisation et la validation des analyses, les transformations éventuellement appliquées aux données, l'ensemble des tests afférents, et les représentations des résultats ont été effectuées à l'aide des logiciels Microsoft Excel[®] et R Software[®].

III.2.4.2. Modélisations BACI 2016-2018

De même que pour les autres compartiments biologiques, la détection de signaux d'impact sur des peuplements biologiques se heurte à la difficulté de distinguer les effets respectifs des nombreux facteurs naturels et anthropiques qui influencent ces peuplements (Osenberg et al. 1994, Pitcher et al. 1998). Ce problème est particulièrement important s'agissant des écosystèmes coralliens, qui sont caractérisés par une grande diversité et une hétérogénéité spatiale et temporelle importante, répondant à un déterminisme complexe (Sale et al. 1984, Connell & Kingsford 1998, Kulbicki et al. 2007, Guillemot et al. 2010). Dans le cas présent, l'objectif est donc de pouvoir dissocier au mieux les éventuels effets de l'activité de la SLN sur le site de Thio des fluctuations naturelles de fond de l'ichtyofaune (Roset et al. 2007, Guillemot 2009).

² Les valeurs des paramètres d'ichtyofaune de 2013 qui sont fournis dans la présente étude avaient été intégralement recalculés simultanément aux résultats 2016 afin d'assurer une parfaite cohérence dans les modes de traitements, filtres, et formules de calculs utilisées entre les différents jeux de données. Les résultats 2013 correspondent donc strictement au plan analytique et aux calculs réalisés en 2016 puis 2018 (cf. Matériels & Méthodes), sans considération des éventuels traitements réalisés et choix analytiques faits dans le cadre des rendus des états initiaux de 2013.

Dans cette optique, il apparaît indispensable d'adopter une approche de type BACI (*Before-After-Control-Impact*), rendue possible par l'existence d'une zone de référence dans le plan d'échantillonnage du site de Thio mis en place en 2016. Selon ce type d'approche, qui fait foi internationalement et depuis de nombreuses années pour la définition de plans de surveillance environnementaux (Underwood 1992 ; Underwood 1994 ; Osenberg et al. 1994), une détection fiable des changements écologiques doit s'effectuer par analyse de l'évolution des différences entre zones impactées et zones de référence. Examiner le différentiel de variation temporelle entre ces deux zones (nommé interaction « zone x année ») permet seul de détecter de manière rigoureuse des signaux de perturbation (i.e. de déterminer si les variations observées en zone d'impact peuvent effectivement être attribuées à l'impact étudié ou si elles sont la conséquence d'autres phénomènes).

D'un point de vue analytique, la mise en œuvre de cette démarche doit s'appuyer sur des modèles statistiques permettant de prendre en compte simultanément plusieurs facteurs explicatifs afin d'en dissocier les effets et les interactions. En particulier, les modèles linéaires généralisés (GLM, *Generalized Linear Models*) sont classiquement utilisés pour modéliser des données de comptage portant sur les peuplements ichtyologiques, dont les caractéristiques et la structuration se prêtent bien à ce type de méthode statistique. Typiquement, la forme générique d'un modèle comprenant deux variables explicatives est de la forme :

$$Y \sim X1 + X2 + X1*X2 + \epsilon$$

Avec,

Y : variable à expliquer (ex. densité totale, biomasse des Chaetodontidae, etc.)

X1 et X2 : variables explicatives (ex. zone, année, etc.)

X1*X2 : facteur d'interaction entre les variables explicatives X1 et X2

ϵ : résidus du modèle statistique

Dans le cas présent, les modèles mis en œuvre seront donc de la forme :

$$Y \sim \text{zone} + \text{année} + \text{zone*année} + \epsilon$$

Pour chacune des 27 variables ichtyologiques considérées (Tableau 5), des modèles de ce type ont été construits puis exécutés. Lorsqu'un signal potentiel de perturbation a été détecté sur l'un des paramètres décrivant l'ichtyofaune (i.e. réponse significative du facteur d'interaction « période*zone »), un examen approfondi des données est réalisé. Notamment, un ensemble de graphiques est produit afin de préciser l'amplitude et le profil de cette variation, et d'en discuter les implications vis-à-vis des objectifs de surveillance.

Concernant le site de Thio, l'ensemble de la démarche a été menée deux fois, séparément pour les zones Thio_M d'une part et Thio_W d'autre part (toutes deux comparées à la même zone de référence Thio_C), afin de distinguer les éventuels effets des activités SLN propres à ces deux zones.

Nota bene - La série temporelle utilisée pour cette première mise en œuvre du BACI (qui sera utilisé par la suite à long terme) ne comporte à ce stade que deux années (2016 et 2018). Il convient donc de souligner l'aspect préliminaire des résultats et interprétations auxquels elle donnera lieu pour la présente expertise. Il est communément considéré qu'un minimum de trois années est en effet nécessaire pour déterminer correctement des tendances, deux années de données restant donc insuffisant pour rendre un diagnostic solide. Si les résultats présentés fournissent de premières indications, il conviendra donc que celles-ci soient confirmées suite aux campagnes et expertises ultérieures.

III.3. CARACTÉRISATION DE LA FAUNE MACROBENTHIQUE DE FONDS DURS

III.3.1. Protocole in situ

La faune macrobenthique a été inventoriée par la méthode du *Belt Transect* (Hill *et al.* 2004). Les recensements par comptage visuel sont faits sur les 3 transects de 20m sur une largeur totale de 2m (1m de chaque côté du ruban soit 40m² par transect).

Le plongeur note, pour chaque observation, l'espèce et le nombre d'individus observés. La détermination des organismes n'est pas toujours possible jusqu'au niveau spécifique. Dans ce cas la meilleure résolution taxonomique est estimée. L'échantillonnage du benthos s'est focalisé sur 4 groupes taxonomiques : Vers, Crustacés, Mollusques et Echinodermes.

Suite à l'échantillonnage de chaque station, les données collectées sont saisies par le plongeur dans une base de données standardisée, puis contrôlées et archivées en vue de leur traitement.

III.3.2. Calcul des niveaux d'abondance, de densité et de richesse taxonomique

L'ensemble des données de 2016 et 2018 ont fait l'objet d'une compilation dans une base de données commune et spécifique aux analyses de données.

Cette base de données est utilisée par différentes routines d'analyse et de représentations graphiques développées sous le logiciel R.

L'ensemble des observations *in situ* présent dans les bases est dans un premier temps filtré sur les groupes retenus pour les analyses et puis les métriques de densité et de biodiversité sont calculées pour différentes échelles d'agrégation spatiales (zones, regroupement de stationS).

Les densités sont calculées en prenant comme unité de base le transect et sont exprimées en ind/ha. Les données de richesse spécifique sont exprimées en prenant comme unité de base le transect et sont donc exprimées en nombre d'espèce par transect.

III.3.1. Analyse de l'évolution temporelle

III.3.1.1. Evolution à l'échelle des communautés

Une analyse statistique de type PERMANOVA (Analyse de la variance par permutation) (Anderson 2001) est un type d'analyse statistique non paramétrique permettant d'évaluer la significativité d'une évolution, à l'échelle des communautés. Dans notre cas, une analyse PERMANOVA sur les densités par sous-groupes a été réalisée à deux facteurs : Campagne et Zone. L'interprétation de chacun des facteurs individuellement ainsi que de leur interaction est décrite dans le paragraphe suivant (III.3.1.2).

Cette analyse est complétée par une analyse SIMPER à deux facteurs également, basée sur les similarités de Bray-Curtis, permettant de savoir quels sous-groupes contribuent (en %) aux différences observées lors de la PERMANOVA.

La PERMANOVA et l'analyse SIMPER ont été réalisées en utilisant le logiciel PRIMER. Le risque de première espèce α a été fixé à 0,05.

III.3.1.2. Evolution par groupe et sous-groupe

Pour chaque zone (Thio_C, Thio_M et Thio_W), l'évolution de la richesse spécifique et de la densité d'invertébrés par groupe (Mollusques, Echinodermes, Vers, Crustacés) et sous-groupe est étudiée entre 2016 et 2018.

Des analyses de variance (ANOVA) à deux facteurs (Campagne et Zone) à mesures répétées ont été réalisées sur chaque variable (richesse spécifique ou densité par groupe ou sous-groupe) afin d'évaluer la significativité de chacun des facteurs individuellement mais également de l'interaction entre ces deux facteurs. Les données ont été transformées (racine carrée) afin de remplir les conditions de normalité des données et d'homogénéité des variances exigées pour ce type de test (Zar 1999).

L'apparition d'une interaction « Zone x campagne » significative correspond à l'apparition d'une l'évolution (positive ou négative) d'au moins une zone entre les campagnes. Cette interaction traduit donc la présence d'évolutions différentes dans le temps selon les zones. Dans le reste du document on utilisera le terme signal d'impact pour parler de l'interaction significative « Zone x campagne ».

Le facteur « campagne » correspond à l'analyse comparée entre les campagnes de terrain. Une évolution significative de ce facteur traduit d'une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les campagnes toutes zones confondues. Ces différences témoignent d'évolutions temporelles.

Le facteur « Zone » correspond à l'analyse comparée des deux zones. Une évolution significative de ce facteur traduit une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les zones, toutes campagnes confondues. Ces différences témoignent de différences spatiales.

Dans le cas différences significatives ($p < 0,05$), un test post-hoc de Tuckey a été réalisé afin de déceler quelles éléments sont à l'origine des différences observées.

III.3.1.3. Evolution par genre remarquable

Enfin, l'évolution temporelle des densités d'invertébrés remarquables (genres *Acanthaster*, *Coralliophila*, *Drupella*, *Trapezia* et *Tridacna*) est étudiée de façon succincte. Les profils de ces genres sont présentés ci-dessous (Tableau 6).

Tableau 6 : Profil des 4 genres d'invertébrés remarquables

Acanthaster	Coralliophila	Drupella	Trapezia	Tridacna
Etoile de mer corallivore responsable de la destruction de nombreux récifs dans toute la région Indo-Pacifique	Gatropode corallivore de la famille Coralliophilidae	Gatropode corallivore de la famille Muricidae. Se regroupe en forte densité et peut impacter de large surfaces de corail	Petit crabe fortement lié à son habitat corallien (colonie de Pocilloporidae). Défend son habitat de prédation par les <i>Acanthaster</i> notamment	Bénitier inscrit sur l'annexe II de la liste CITES
				

III.4. CARACTÉRISATION DE LA FAUNE MACROBENTHIQUE DE FONDS MEUBLES

III.4.1. Prélèvement

Sur chaque station de fonds meubles, 3 prélèvements ont été réalisés au pied du piquet à ailette à l'aide d'un carottier en PVC de diamètre 9cm (Figure 7). Le prélèvement a été réalisé sur une profondeur de 10cm puis tamisé à 2 mm. Le matériel récupéré a été stocké en pilulier dans une solution de formaldéhyde (5%) tamponnée au borate de sodium. De

retour au laboratoire, les organismes prélevés ont été identifiés à la loupe binoculaire ou à l'œil nu puis classés selon leur groupe, sous groupe ou famille dans le meilleur des cas.

Le travail d'identification des organismes a été réalisé par Pierre Laboute.

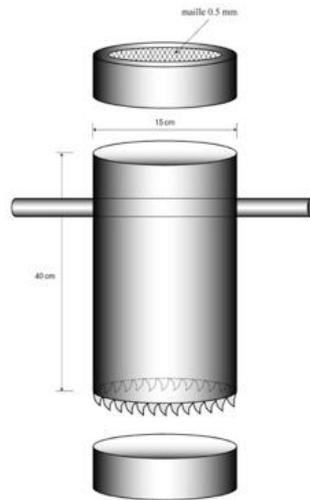


Figure 7 : Système de carottier utilisé pour le prélèvement de fonds meubles (source : EMR)

III.4.2. Analyse des données

Les données obtenues permettent théoriquement de calculer une densité d'organismes par transect en divisant le nombre d'individus par la surface du prélèvement soit : $\pi \times (0,045)^2 \text{ m}^2$.

La présence d'un individu au sein d'une carotte lui apporte une densité de 157,3 indiv/m² sur une profondeur de 10cm.

Compte tenu du très faible nombre d'individus récoltés sur les stations, les densités n'ont pas été calculées puisqu'elles n'apportent pas d'information pertinente pour cette étude.

IV. SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE

IV.1. QUALITÉ DES EAUX

IV.1.1. Méthode d'analyse

La structuration verticale des masses d'eau sur chacune des stations échantillonnées a été obtenue par des profils verticaux réalisés à l'aide d'une sonde CTD SBE19-Plus équipée de capteurs additionnels ; la fréquence d'acquisition des données étant de 0,25 secondes et la vitesse de descente située entre 0,25 et 0,5 m/s.

Les paramètres mesurés par la sonde CTD sont les suivants :

- la pression permettant de calculer la profondeur (m) ;
- la salinité exprimée en PSU (*Practical Salinity Unit*) déduite de la mesure de la conductivité ;
- la température (°C) ;
- la turbidité par mesure de la néphélométrie exprimée en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) ;
- la fluorescence *in-situ* exprimée en unité mg/m³ de chlorophylle totale ;
- la concentration en oxygène dissous exprimée en pourcentage de saturation de l'eau de mer.

La spécification de chaque paramètre enregistré par la sonde CTD est présentée dans le Tableau 7 .

Tableau 7 : Spécification de chaque paramètre de la sonde CTD 19 plus V2

Paramètre	Gamme	Précision initiale	Résolution
Conductivité (S/m)	0 - 9	0,0005	0,0007
Température (°C)	-5 à +35	0,005	0,0001
Pression (db)	0 – 350	0,35	0,007
Turbidité (NTU)	0 - 25	NA	0,01
Fluorescence (mg/m ³)	0 - 50	NA	0,025

NA : Donnée non disponible, les capteurs sont calibrés en usine.

IV.1.2. Contrôle Qualité

La vérification et la calibration des sondes sont effectuées par le fabricant ; la fréquence de contrôle dépend de plusieurs facteurs incluant la fréquence d'utilisation, la qualité de la maintenance, le nettoyage, etc. La dernière vérification et calibration de la sonde CTD SBE19-Plus effectuée par le fabricant date de Décembre 2017.

IV.2. QUALITÉ DES SÉDIMENTS

IV.2.1. Méthode d'échantillonnage

La collecte des sédiments de surface a été effectuée avec une benne de type Van-Veen en acier inoxydable. Pour chaque échantillon, la couche centimétrique de surface a été prélevée et conditionnée dans des sachets en vinyle (Whirl-Pack®) référencés à usage unique pour l'ensemble des analyses et dans des flacons en verre calcinés pour le dosage des HCT.

IV.2.2. Granulométrie des sédiments

Les sédiments sont tamisés par voie humide sur une colonne de tamisage vibrante. Les fractions sont récupérées entre chaque tamis, puis séchées à 105 °C et ensuite pesées. Les pourcentages massiques sont alors exprimés pour chaque classe de taille. Les classes de taille sont les suivantes :

- $\varnothing > 2000 \mu\text{m}$: sable grossier ;
- $63 \mu\text{m} < \varnothing < 2000 \mu\text{m}$: sable grossier, silts grossiers à moyens ; et
- $\varnothing < 63 \mu\text{m}$: silts moyens à fins et argile.

IV.2.3. Teneur en carbonates de calcium

IV.2.3.1. Méthode d'analyse

La fraction $< 63 \mu\text{m}$ des sédiments, séchée, est mise en solution par la méthode dite « minéralisation à l'eau-régale » et analysée par ICP-OES selon NF 11 885 afin de déterminer les concentrations en calcium (Ca). Ces dernières sont ramenées par calcul à des concentrations équivalentes de carbonates de Ca.

I.1.1.1. Contrôle qualité

I.1.1.1.1. Répétabilité des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse

Trois aliquotes des sédiments prélevés à la station ST04 (mis dans des contenants différents), constituant un **duplicata** et un « **fantôme** » (i.e. dont la provenance est inconnue du laboratoire jusqu'à la fin de l'analyse), ont été préparés et analysés afin de déterminer la **répétabilité** des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse, et donc de s'assurer de l'homogénéité de l'échantillon.

Le coefficient de variation (CV%), calculé à partir des concentrations mesurées sur les trois échantillons (duplicata + « fantôme »), est estimé à 34 %. L'écart relatif calculé entre la moyenne du duplicata et l'échantillon « fantôme » est évalué à 36 % (Tableau 8).

Ces résultats du contrôle qualité présentent un écart important qui semble *à priori* lié au faible pourcentage des carbonates mesurés à cette station.

Tableau 8: Résultats du « Contrôle Qualité » de répétabilité pour l'analyse des carbonates dans les sédiments(a) à partir du duplicata et (b) de l'échantillon « fantôme » de terrain

(a)	
Paramètres	CaCO ₃
ST04-répliat 1 (%)	2
ST04-répliat 2 (%)	1
ST04-fantôme (%)	2
Moyenne (%)	1
Ecart Type (%)	0
CV%	34

(b)	
Paramètres	CaCO ₃
ST04-(n=2) (%)	1
ST04-fantôme (%)	2
Ecart relatif %	36

I.1.1.1.2. Comparaison inter-laboratoire

Un échantillon « **contrôle inter-laboratoire** » prélevé à la station ST04 a été envoyé à un laboratoire d'analyse différent de celui réalisant les analyses de la série d'échantillons. De ce fait, ce « contrôle » renseigne, sur la qualité des analyses dans **des conditions de reproductibilité** (système de mesure différent, opérateurs différents, lieu différent), en admettant seulement que les échantillons mesurés par les deux laboratoires soient homogènes.

L'écart relatif estimé, entre les deux laboratoires, à 0 % permet de valider une excellente reproductibilité des méthodes d'analyses (Tableau 9).

Tableau 9: Résultats de la comparaison inter-laboratoire pour l'analyse des carbonates dans les sédiments

Paramètres	CaCO ₃ *
ST04-AEL (n=3) (%)	1
ST04-IRD (%)	1
Ecart relatif (%)	15

*L'exercice inter laboratoire a été réalisé entre le laboratoire AEL et IRD par deux méthodes d'extraction différentes, respectivement, « minéralisation eau régale » et « minéralisation fusion alcaline » et dosage par ICP-OES.

I.1.2. Métaux totaux

I.1.2.1. Méthode d'analyse

La détermination des métaux sur les fractions brutes n'est pas directement interprétable car les concentrations dépendent fortement de la granulométrie et des propriétés physico-chimiques du sédiment. Afin de normaliser les résultats, l'analyse porte sur une fraction granulométrique fine (< 63 µm), plus homogène permettant d'obtenir un reflet plus exact de la contamination. Un aliquote de cette fraction < 63 µm séché est mis en solution par la méthode dite « minéralisation à l'eau-régale ». Il s'agit de solubiliser les éléments traces dans l'échantillon de sédiment par une solution d'acide (HCl/HNO₃) à haute température en conditions hyperbares. Le dosage des métaux (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn), ainsi dissous, s'effectue par ICP-OES (Marque Varian®, modèle Vista) selon la norme NF 11 885.

Un aliquote de cette solution est analysé par AFS pour la détermination du Hg selon NF ISO 16 772, réalisée par le laboratoire IRD.

I.1.1.1. Contrôle Qualité

I.1.1.1.1. Justesse de la méthode de préparation et d'analyse

Un contrôle qualité des méthodes de préparation et d'analyse a été effectué en insérant dans la série analytique des matériaux de référence certifiés d'origine marine (MESS 3 et PACS 2) afin de déterminer la justesse du processus analytique. Les biais de justesse estimés sont soit inférieurs, soit proches des tolérances fixées par le laboratoire à 20 % (Tableau 10).

Tableau 10: Résultats du « Contrôle Qualité » de la justesse des méthodes de préparation et d'analyse pour la détermination des métaux dans les sédiments sur l'échantillon de référence certifié MESS 3 et PACS 2

Paramètres	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Valeurs obtenues (mg/kg MS)	2,28	13,7	71,5	28,7	251	37,7	18,5	300	0,093
Ecart-type (n=2) (mg/kg MS)	0,16	0,5	4,5	0,8	3	3,4	0,9	6	0,004
Valeurs certifiées (mg/kg MS)	2,11	14,4	90,7	33,9	324	46,9	21,1	364	0,091
Ecart-type (mg/kg/MS)	0,15	2,0	4,6	1,6	12	2,2	0,7	23	0,009
Biais (%)	8	-5	-21	-15	-23	-20	-13	-18	2
Limite de quantification (mg/kg MS)	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	10,0	0,010

I.1.1.1.2. Répétabilité des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse

Trois aliquotes des sédiments prélevés à la station ST04 (mis dans des contenants différents), constituant un **duplicata** et un « **fantôme** » (i.e. dont la provenance est inconnue du laboratoire jusqu'à la fin de l'analyse), ont été préparés et analysés afin de déterminer la **répétabilité** des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse, et donc de s'assurer de l'homogénéité de l'échantillon.

Les coefficients de variation (CV%) et les écarts relatifs sont tous très largement inférieurs à 20 % sauf le Cd dont l'écart important semble *a priori* lié aux concentrations proches de la limite de quantification de la méthode d'analyse utilisée. Ces résultats du contrôle qualité permettent de mettre en évidence une **excellente répétabilité** des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse (Tableau 11).

Tableau 11 : Résultats du « Contrôle Qualité » de répétabilité, pour la détermination des métaux dans les sédiments, (a) à partir du duplicata et (b) de l'échantillon « fantôme » de terrain

(a)									
Paramètres	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
ST04-répliat 1 (mg/Kg MS)	2,00	265,0	2271	26,0	2001	3862	16,0	109,0	0,151
ST04-répliat 2 (mg/Kg MS)	1,00	261,0	2057	26,0	2107	3764	14,0	95,0	0,154
ST04-fantôme (mg/Kg MS)	1,00	266,0	2181	24,0	2095	3912	16,0	88,0	0,163
Moyenne (mg/Kg) MS	1,33	264	2170	25,3	2068	3846	15,3	97,3	0,156
Ecart Type (mg/Kg) MS	0,58	3	107	1,2	58	75	1,2	10,7	0,006
CV%	43	1	5	5	3	2	8	11	4
(b)									
Paramètres	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
ST04 (n=2) (mg/Kg MS)	1,50	263	2164	26,0	2054	3813	15,0	102,0	0,153
ST04-fantôme (mg/Kg MS)	1,00	266	2181	24,0	2095	3912	16,0	88,0	0,163
Ecart relatif %	40	1	1	8	2	3	6	15	7

I.1.1.1.3. Comparaison inter-laboratoire

Un échantillon « **contrôle inter-laboratoire** » a été prélevé à ST04 et envoyé au laboratoire réalisant les analyses de la série d'échantillons. De ce fait, ce « contrôle » renseigne, sur la qualité des analyses dans **des conditions de reproductibilité** (système de mesure différent, opérateurs différents, lieu différent), en admettant seulement que les échantillons mesurés par les deux laboratoires soient homogènes.

Les écarts relatifs sont supérieurs à 20 % sauf pour le Hg et Ni. Ces écarts s'expliquent soit par une erreur aléatoire, soit par une hétérogénéité spatiale reconnue de la dynamique sédimentaire du milieu côtier. En effet, un léger décalage géographique lors du prélèvement de l'échantillon ST04-réplikat 4 pouvant être à l'origine des variations observées (Tableau 12).

Tableau 12: Résultats de la comparaison inter-laboratoire pour la détermination des métaux dans les sédiments

Paramètres	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg*
ST04-AEL (n=3) (mg/Kg MS)	1,33	264	2170	25,3	2068	3846	15,3	97,3	0,156
ST04-IRD (mg/Kg MS)	-	420	2772	32,00	3093	4581	-	172	0,180
Ecart relatif (%)	-	46	24	23	40	17	-	55	14

* Excepté Hg, l'exercice inter laboratoire a été réalisé entre le laboratoire AEL et IRD par deux méthodes d'extraction différentes, respectivement, « minéralisation eau régale » et « minéralisation fusion alcaline » et dosage par ICP-OES. Pour l'Hg, l'exercice inter laboratoire a été réalisé entre le laboratoire IRD et Alpa Chimie par la même méthode d'extraction « minéralisation eau régale » et dosage par AFS.

- La méthode d'extraction par fusion alcaline ne permet pas d'analyser le Cd et Pb.

A titre de comparaison, les biais évalués lors d'un exercice inter-laboratoire international (organisé par Quasimeme) auquel AEL a participé en Octobre 2015 sont réunis dans le Tableau 13 (en rappelant que ceux-ci n'intègrent pas les biais dus à l'échantillonnage puisque ce dernier est fourni).

Tableau 13: Performance de justesse du laboratoire AEL, évalué lors de l'exercice inter-laboratoire Quasimeme (Octobre 2015), pour la détermination des métaux dans les sédiments

Paramètres	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Valeur de référence (mg/Kg MS)	1944	5,45	58	9,45	530	53,8	25,2	665
Valeur obtenue par AEL (mg/Kg MS)	2416	6,00	66	11,0	457	53,0	23,0	653
Biais (%)	24	10	14	16	-14	-1	-9	-2

I.1.2. Hydrocarbures totaux

I.1.2.1. Méthode d'analyse

Les HCT sont extraits du sédiment et analysés par chromatographie en phase gazeuse selon la norme ISO 16 703, les analyses ont été réalisées par le laboratoire Micropolluant.

I.1.2.2. Contrôle qualité

I.1.2.2.1. Répétabilité des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse

Trois aliquotes des sédiments prélevés à la station ST04 (mis dans des contenants différents), constituant un **duplicata** et un « **fantôme** » (i.e. dont la provenance est inconnue du laboratoire jusqu'à la fin de l'analyse), ont été préparés et analysés afin de déterminer la **répétabilité** des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse, et donc de s'assurer de l'homogénéité de l'échantillon.

Le coefficient de variation (CV%), calculé à partir des concentrations mesurées sur les trois échantillons (duplicata + «fantôme»), est estimé à 0 %. L'écart relatif calculé entre la moyenne du duplicata et l'échantillon « fantôme » est évalué à 0 %.

Ces résultats du contrôle qualité permettent de mettre en évidence une excellente répétabilité des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse (Tableau 14).

Tableau 14 : Résultats du « Contrôle Qualité » de répétabilité pour la détermination des hydrocarbures totaux dans les sédiments, (a) à partir du duplicata et (b) de l'échantillon « fantôme » de terrain

(a)	
Paramètres	HCT
ST04-répliat 1 (mg/Kg MS)	<15
ST04-répliat 2 (mg/Kg MS)	<15
ST04-fantôme (mg/Kg MS)	<15
Moyenne (%)	15
Ecart Type (%)	0
CV%	0

(b)	
Paramètres	HCT
ST04-(n=2) (mg/Kg MS)	<15
ST04-fantôme (mg/Kg MS)	<15
Ecart relatif %	0

1.1.2.2.2. Comparaison inter-laboratoire

Un échantillon « contrôle inter-laboratoire », prélevé à ST04, a été envoyé à un laboratoire d'analyse différent de celui réalisant les analyses de la série d'échantillons. De ce fait, ce « contrôle » renseigne sur la qualité des analyses dans **des conditions de reproductibilité** (système de mesure différent, opérateurs différents, lieu différent), en admettant seulement que les échantillons mesurés par les deux laboratoires soient homogènes.

Note : Etant donné que les deux laboratoires de l'exercice inter-laboratoire a déterminé la teneur en HCT inférieure à la limite de quantification de leur méthode, les résultats sont difficilement comparables (Tableau 15).

Tableau 15: Résultats de la comparaison inter-laboratoire pour la détermination des hydrocarbures totaux dans les sédiments

Paramètres	HCT
ST04-Micropolluant (n=3) (mg/Kg MS)	<15
ST04-Alpa Chimie (mg/Kg MS)	<13
Ecart relatif (%)	18

I.2. FLUX SÉDIMENTAIRES

I.2.1. Méthode d'échantillonnage

Les « tubes à sédiments » collectent les particules présentes dans la colonne d'eau, qui se déposent naturellement par gravité. Chaque station « tubes à sédiments » est constituée d'un dispositif comportant 4 tubes en PVC fixés sur un piquet métallique implanté sur le substrat. Les tubes à sédiments se situent à 1,5 m au-dessus du fond et présentent les dimensions suivantes : L = 33,5 cm et Ø = 4,5 cm, soit une surface de 63,59 cm² (pour les 4 tubes).

A chaque station, le contenu des quatre tubes est regroupé dans un flacon de 1 L afin de disposer d'un échantillon composite pour les analyses.

Deux types de détermination ont été conduits sur les matières en suspension (MES) collectées : le calcul des densités de flux verticaux de matière sédimentaire totale (mg/cm²/j) et de leurs teneurs en carbonates (%).

I.2.2. Méthode d'analyse

I.2.2.1. Teneurs en carbonates

La méthode utilisée pour le dosage des carbonates dans les MES suit la norme NF ISO 10 693 (méthode volumétrique utilisant un « calcimètre Bernard »). Celle-ci consiste à solubiliser totalement les carbonates présents dans l'échantillon sédimentaire par ajout d'acide chlorhydrique. Le volume du dioxyde de carbone dégagé est alors mesuré à l'aide du calcimètre et est comparé au volume de gaz produit par la solubilisation d'un échantillon standard de carbonate de calcium pur.

Les teneurs en carbonates sont exprimées en pourcentage massique par rapport à la masse totale de MES collectée.

I.2.2.2. Flux de particules

Pour chaque station, de retour à terre et après décantation des MES dans les flacons de 1 L, l'eau de mer surnageante est soustraite et l'échantillon est rincé à l'eau douce afin d'éliminer la matrice saline. Après agitation, remise en suspension puis décantation à nouveau, l'eau de rinçage surnageante est éliminée : cette opération est renouvelée deux fois.

Après un séchage à 40 °C, les masses de MES collectées sont pesées pour chaque station.

Les flux de particules sont exprimés en tant que masse totale sèche par unité de surface et par unité de temps (mg/cm²/j), selon l'expression suivante :

$$\text{Flux} = m / (n \times S \times j)$$

Avec **m** : masse sèche du matériel sédimentaire (mg) ;
n : nombre de tubes ;
S : section des tubes (cm²) ;
j : nombre de jours d'immersion.

I.3. BIOACCUMULATION DANS LES ORGANISMES VIVANTS

I.3.1. Méthode d'analyse

Pour chaque station, les chairs de tissus biologiques, réceptionnées congelées au laboratoire, sont lyophilisées. Pour les poissons et Crustacés, seuls les muscles sont analysés tandis que pour les bivalves l'analyse porte sur l'animal entier après une déuration préalable de 48 h. Ces échantillons séchés sont ensuite :

- minéralisés à haute température en conditions hyperbares (four micro-ondes) avec une solution d'acide nitrique concentré et de peroxyde d'hydrogène (qualité supra-pure) afin de solubiliser les métaux accumulés dans 0,5 g de tissus selon la méthode décrite dans Breau (2003) et Breau *et al.* (2009), puis analysés par ICP-OES selon ISO 11 885 afin de déterminer les concentrations en As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn.
- minéralisés et analysés par AFS selon la norme NF EN ISO 17 852 pour la détermination du mercure (Hg).

I.3.2. Contrôle qualité de la méthode de préparation et d'analyse

Un contrôle qualité des méthodes de minéralisation et d'analyse a été effectué en insérant dans la série analytique, des matériaux de référence certifiés, d'origine marine (DORM 4 et TORT 3) afin de déterminer la justesse du processus analytique. Les résultats du contrôle qualité sont présentés, pour chaque élément, dans le Tableau 16.

Tableau 16: Résultats du « Contrôle Qualité » des méthodes de minéralisation et d'analyses des métaux dans les tissus biologiques pour DORM 4 et TORT 3

Paramètres	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Valeurs obtenues (µg/g ps)	6,60	0,307	0,274	1,57	13,4	288	2,61	4,19	-	46,0	0,353
Ecart-type (n=4) (µg/g ps)	0,06	0,022	0,025	0,06	0,1	6	0,05	1,34	-	1,3	0,024
Valeurs certifiées (µg/g ps)	6,87	0,299	0,250	1,87	15,7	343	3,17	5,30	-	51,6	0,412
Ecart-type (µg/g ps)	0,44	0,018	*	0,18	0,5	20	0,26	0,24	-	2,8	0,036
Biais (%)	-4	3	9	-16	-14	-16	-18	-21	-	-11	-14
Limite de quantification (µg/g ps)	1,0	0,10	0,20	0,10	0,20	20	0,10	0,40	1,0	10	0,001

Les biais de justesse estimés sont tous inférieurs ou proches aux limites de tolérance fixées par le laboratoire à 20 %.

RESULTATS

I. EVOLUTION DE LA QUALITÉ DU SUBSTRAT

I.1. ELÉMENTS DE CONTEXTE

Ce chapitre présente l'évolution de la couverture de substrats entre 2016 et 2018. Cette période a été marquée par un épisode de blanchissement corallien massif lié au réchauffement des masses d'eau entre Février et Avril 2016 (SOPRONER 2016) mais également par le passage du cyclone tropical Cook sur la côte Est en Avril 2017.

Ces phénomènes constituent des perturbations majeures des habitats coralliens qui ont touché les récifs échantillonnés. Ces facteurs se rajoutent aux pressions pouvant s'exercer sur les récifs en lien avec les activités socio-économique de la zone telles que celles de la SLN.

La chronologie de l'échantillonnage, avec une mission tous les deux ans (2016 : pendant le blanchissement - 2018 : après le cyclone Cook), ne permet malheureusement pas d'appréhender la part de l'impact liée au blanchissement. Aussi, les évolutions temporelles mises en évidence conjuguent les effets combinés de ces phénomènes extrêmes, associés aux éventuels autres pressions.

I.2. ANALYSE DE TYPE CONTRÔLE-IMPACT

I.2.1. Zone située face à la mine (Thio_M)

Les résultats de l'analyse de variance à mesures répétées font apparaître un signal d'impact (interaction Campagne × Zone) sur la couverture de coraux et de coraux Acroporidae (Tableau 17).

Ce signal d'impact traduit un impact différentiel avec un impact important et significatif dans la zone sous l'influence de la mine (Thio_M : 46% à 17%) en comparaison à la zone de contrôle (Thio_C : 11 à 6%) qui ne présente pas de variations significatives malgré la perte d'habitat corallien constatée.

L'impact constaté apparaît donc proportionnellement plus intense là où le recouvrement est élevé et composé de genres (Figure 12) et/ou de formes coralliens (Figure 11) sensibles aux stress thermique et mécaniques. Ainsi l'impact est d'avantage prononcé sur la zone Thio_M dont la couverture corallienne était 4 fois plus élevée et dont les assemblages coralliens étaient dominés par les Acroporidae et de coraux aux formes branchus, digités et tabulaires.

Si le signal statistique laisse supposer d'un possible impact minier, la perte d'habitat corallien en % relatif à la couverture de 2016 de 45% et 63% respectivement en zone de contrôle et en zone d'impact démontre que l'impact est avéré sur l'ensemble de la zone.

Ainsi, si on ne peut formellement écarter la contribution de la SLN à travers la pression sédimentaire constatée au chapitre suivant, celle-ci ne pourrait à elle seule expliquer l'ampleur du phénomène constaté (Figure 8) qui trouve plus probablement son origine dans les perturbations thermiques et mécaniques liées au phénomène de blanchissement suivi du passage du cyclone Cook.

Ce constat montre ainsi que les perturbations constatées ont impacté l'ensemble de la zone et ne constituent pas de fait un signal fort qui serait lié aux activités de la SLN (Figure 10).

Tableau 17 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs à mesures répétées (Campagne et zone) sur la zone de Contrôle (Thio_C) et la zone face à la mine (Thio_M) sur les couvertures de substrats coralliens entre 2016 et 2018. NS : Non significatif, * : significatif avec $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,001$**

	Coraux scléractiniaires		Coraux Acroporidae		Coraux Non-Acroporidae		Corail mort		Coraux blanchis		Coraux mous	
	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc
Campagne	***	2016>2018	***	2016>2018	NS		NS		NS		**	2016>2018
Zone d'impact	***	Thio_m>Thio_c	***	Thio_m>Thio_c	NS		NS		NS		NS	
Campagne × Station	*	Diminution plus forte sur Thio_m que Thio_c	*	Diminution plus forte sur Thio_m que Thio_c	NS		NS		NS		NS	

Les coraux mous montrent une diminution de couverture significative, toutes zones confondues, entre 2016 et 2018 mais celle-ci est restée faible chaque année, proche de 5%. Celle de coraux morts récemment est restée très faible chaque année dans chaque zone. La couverture d'algues a fortement augmenté dans les deux zones entre 2016 et 2018, en compensation de la perte de coraux observée.



Figure 8 : Photo-transect sur ST06 (zone devant la mine) en 2016 (gauche) et 2018 (droite). Ces photos illustrent la disparition totale des Acropora branchus

1.2.2. Zone située face au convoyeur (Thio_W)

Globalement, les observations faites sur cette zone sont identiques à celles sur la zone située face à la mine.

Les résultats de l'analyse de variance à mesures répétées font apparaître un signal d'impact (interaction Campagne × Zone) sur la couverture de coraux et de coraux Acroporidae (Tableau 17).

Ce signal d'impact traduit un impact différentiel avec un impact important et significatif dans la zone sous l'influence de la mine (Thio_W : de 58% à 12%) en comparaison à la zone de contrôle (Thio_C : 11 à 6%) qui ne présente pas de variations significatives malgré la perte d'habitat corallien constatée.

L'impact constaté apparaît donc proportionnellement plus intense là où le recouvrement est élevé et composé de genres (Figure 12) et/ou de formes coralliens (Figure 11) sensibles aux stress thermique et mécanique. Ainsi l'impact est d'avantage prononcé sur la zone Thio_W dont la couverture corallienne était 5 fois plus élevée et dont les assemblages coralliens étaient dominés par les Acroporidae et de coraux aux formes branchus, digités et tabulaires.

Si le signal statistique laisse supposer d'un possible impact minier, la perte d'habitat corallien en % relatif à la couverture de 2016 de 45% et 79% respectivement en zone de contrôle et en zone d'impact démontre que l'impact est avéré sur l'ensemble de la zone.

Ainsi, si on ne peut formellement écarter la contribution de la SLN à travers la pression sédimentaire constatée au chapitre suivant, celle-ci ne pourrait à elle seule expliquer l'ampleur du phénomène constaté (Figure 9) qui trouve plus probablement son origine dans les perturbations thermiques et mécaniques liées aux phénomènes de blanchissement suivi du passage du cyclone Cook.

Ce constat montre ainsi que les perturbations constatées ont impactées l'ensemble de la zone et ne constituent pas de fait un signal fort qui serait lié aux activités de la SLN (Figure 10).

Tableau 18 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs à mesures répétées (Campagne et zone) sur la zone de Contrôle (Thio_C) et la zone face au convoyeur (Thio_W) sur les couvertures de substrats coralliens entre 2016 et 2018. NS : Non significatif, * : significatif avec $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,001$**

	Coraux scléactiniaires		Coraux Acroporidae		Coraux Non-		Corail mort		Coraux blanchis		Coraux mous	
	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc
Campagne	***	2016>2018	***	2016>2018	NS		NS		**	2016>2018	NS	
Zone d'impact	***	Thio_w>Thio_c	***	Thio_w>Thio_c	NS		NS		NS		NS	
Campagne × Station	**	Diminution plus forte sur Thio_w que Thio_c	**	Diminution plus forte sur Thio_w que Thio_c	NS		NS		*	Absence d'évolution sur Thio_C : Diminution sur Thio_w	NS	

Les coraux mous et les coraux morts sont peu présents chaque année sur Thio_W et la couverture d'algues a augmenté en compensation de la perte de couverture corallienne (Figure 9).



Figure 9 : Photo-transect sur ST01 (zone devant le convoyeur) en 2016 (gauche) et 2018 (droite). Ces photos illustrent la disparition totale des Acropora branchus et tabulaires, remplacés par un mix de débris et d'algues du genre Bornetella

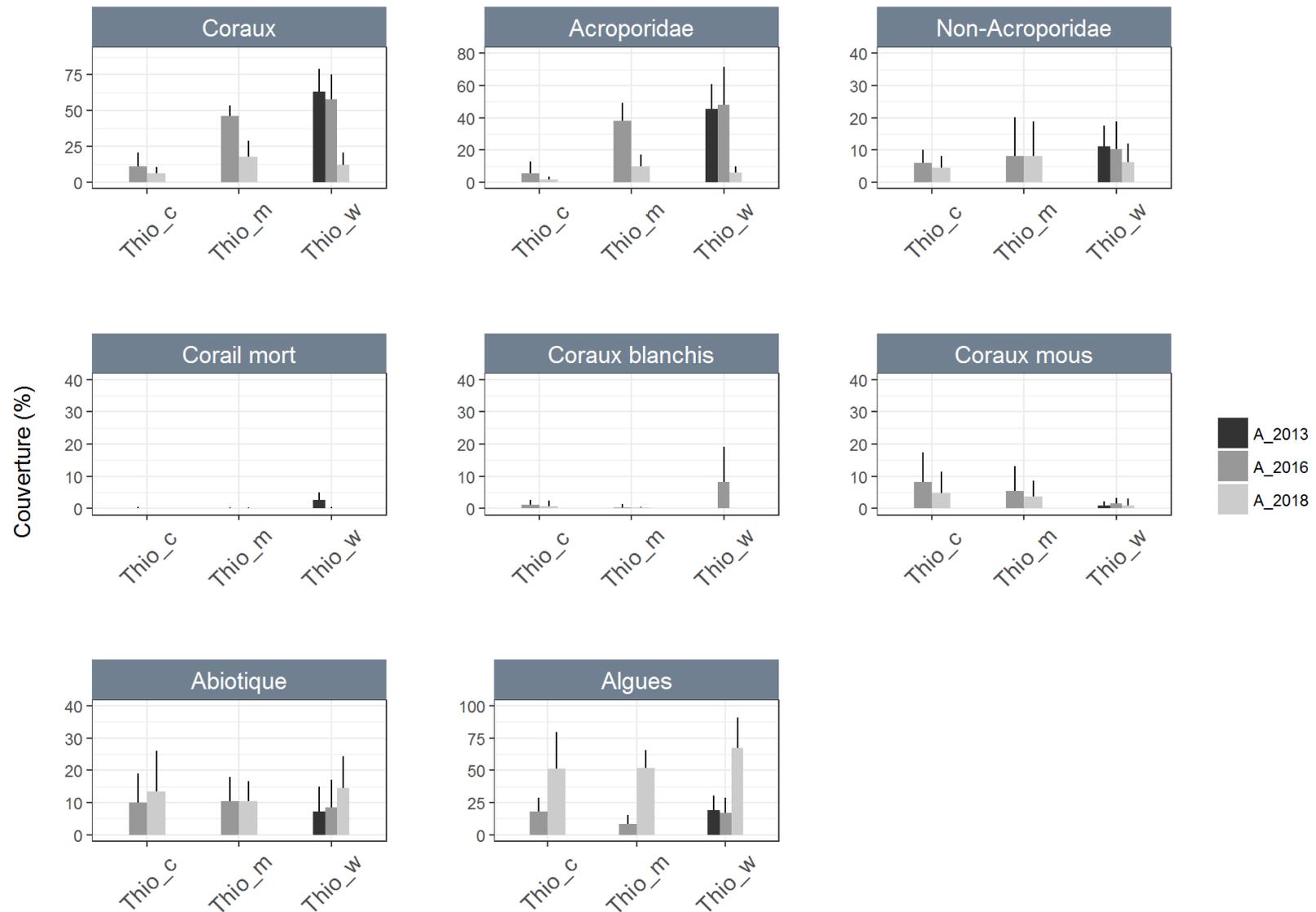


Figure 10 : Evolution de la couverture des différents substrats par zone entre 2013 (noir), 2016 (gris foncé) et 2018 (gris clair)

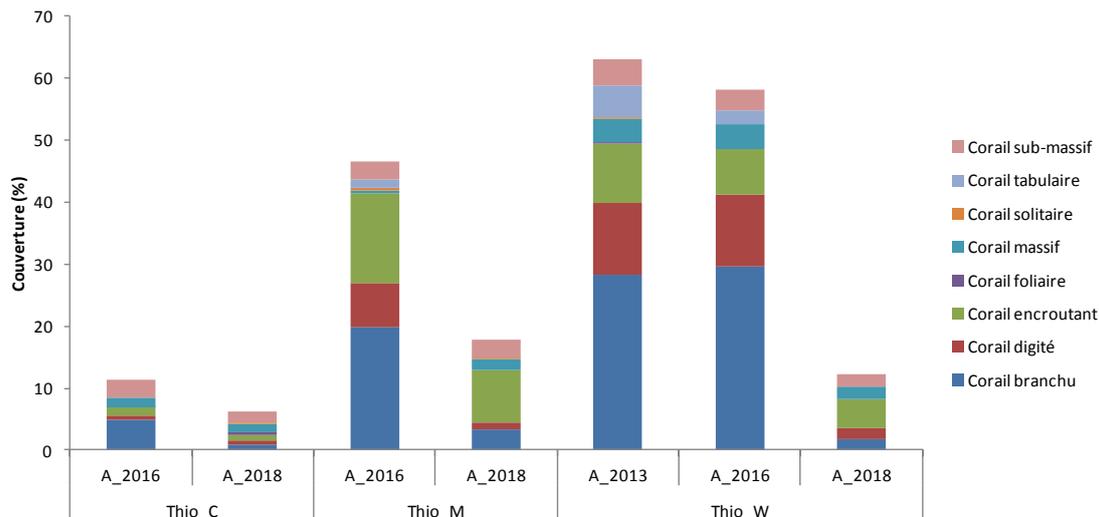


Figure 11 : Evolution de la couverture corallienne par formes, au sein de chaque zone

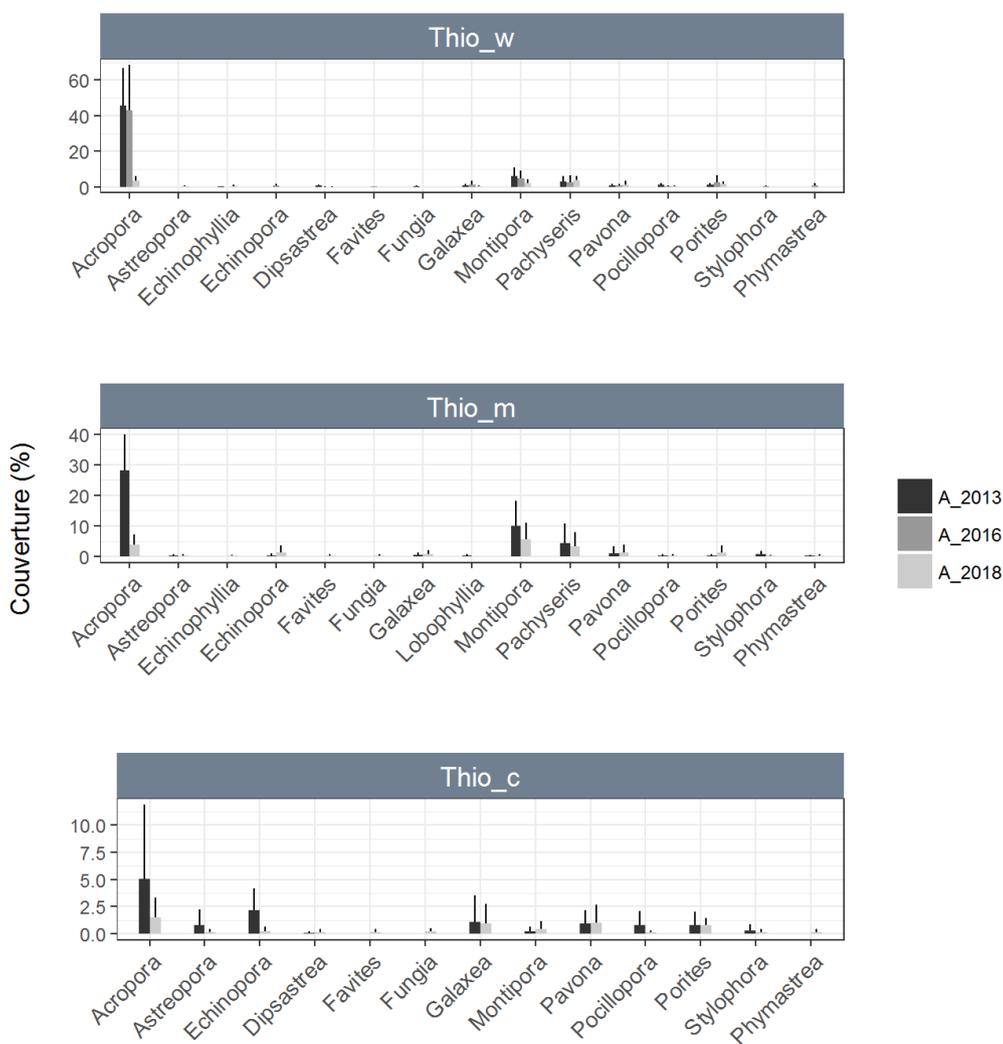


Figure 12 : Evolution de la couverture par genre corallien et par zone entre 2013 (pour Thio_W uniquement), 2016 et 2018

Les graphiques qui détaillent les résultats par station sont fournis en ANNEXE II.

I.3. EVOLUTION TEMPORELLE ENTRE 2013 ET 2018 SUR LA ZONE DU CONVOYEUR (THIO_W)

La zone située face au convoyeur a bénéficié d'un échantillonnage en 2013 lors de la réalisation de l'état initial face aux installations de bord de mer de la SLN (SOPRONER 2013). Une analyse de l'évolution temporelle au sein de cette zone (deux stations) est ainsi réalisée (voir graphique en Figure 10).

La couverture corallienne n'a pas montré d'évolution entre 2013 et 2016 (proche de 60%) pour chuter significativement en 2018 (12%). Les Acroporidae et les Non-Acroporidae montrent tous deux une baisse significative de couverture entre 2016 et 2018 alors qu'une certaine stabilité était observée entre 2013 et 2016. L'analyse des données par genre (Figure 12) montre que les Acropora qui dominaient la station en 2013 et 2016 (couverture > 40%) sont les plus touchés, les autres genres étant peu présents sur la zone (couverture <5%).

La couverture de coraux blanchis était significativement supérieure en 2016 (8% environ) à la suite de l'épisode de blanchissement massif, comparée aux autres années (couverture nulle) ; et celle de coraux morts récemment était supérieure en 2013 qu'aux autres années mais ne dépassait pas 3%.

Ainsi, si la qualité du substrat sur cette zone n'avait pas montré de forte évolution entre 2013 et 2016, la période 2016-2018 a été marquée par une forte dégradation de la couverture de coraux dans cette zone, liée principalement aux Acroporidae de formes sensibles aux perturbations physiques (tabulaires, branchus, digités).

Tableau 19 : Résultats de l'ANOVA à un facteur à mesures répétées (Campagne) au sein de la zone du convoyeur (Thio_W) sur les couvertures de substrats coralliens entre 2013 et 2018. NS : Non significatif, * : significatif avec $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,001$**

	Coraux scléactiniaires		Coraux Acroporidae		Coraux Non-Acroporidae		Corail mort		Coraux blanchis		Coraux mous	
	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc
Campagne	**	2018<2013,2016	**	2018<2013,2016	**	2018<2013, 2016	*	2013>2016,2018	*	2016>2013,2018		NS

II. EVOLUTION DE LA PRÉVALENCE DE LÉSIONS CORALLIENNES

Ce chapitre présente l'évolution de la prévalence de lésions coralliennes entre 2016 et 2018 pour les zones Thio_M et Thio_C et entre 2013 et 2018 pour Thio_W. Les graphiques des lésions coralliennes par station sont fournis en ANNEXE III. Une planche photographique des types de lésions potentiellement présentes est présentée sur la Figure 15.

II.1. ANALYSE DE TYPE CONTRÔLE-IMPACT

La prévalence (en %) des différents types de lésions sur chaque zone en 2013 (Thio_W uniquement), 2016 et 2018 est présentée sur la Figure 13.

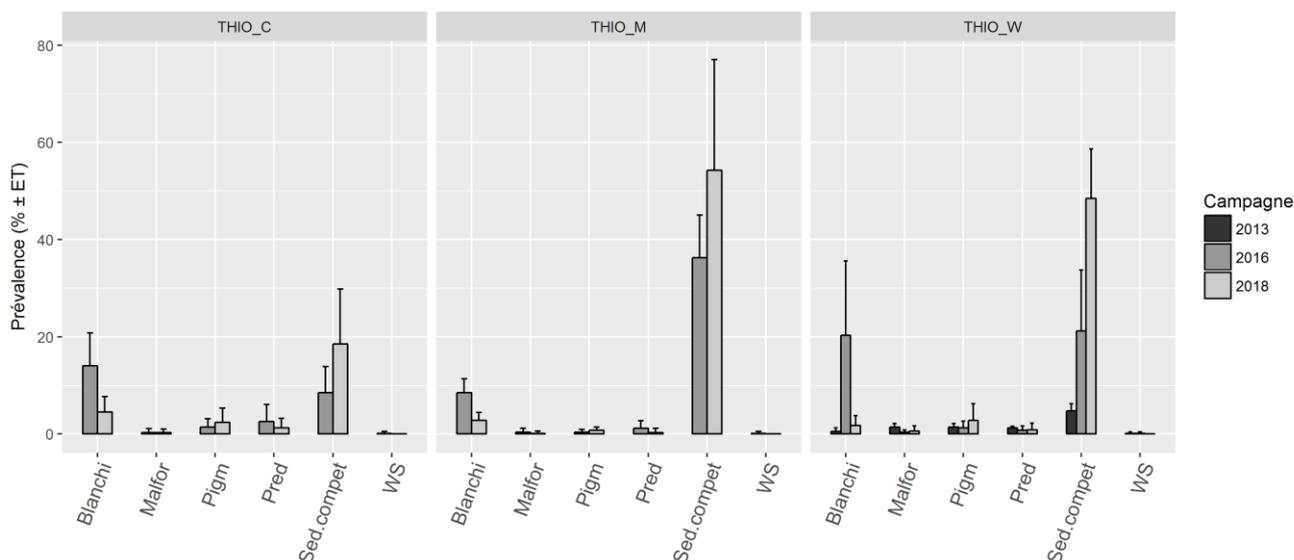


Figure 13 : Evolution de la prévalence de lésions par zone (Blanchi : blanchissement ; Malfor : Malformations coralliennes ; Pigm : Pigmentation ; Pred : prédation ; Sed.compet : lésions de sédimentation et/ou compétition avec des algues ; WS : White syndrome)

II.1.1. Zone située face à la mine (Thio_M)

D'après les résultats de l'ANOVA, aucun type de lésion ne présente de signal d'impact lié à une interaction Campagne × Zone significative (Tableau 20). On observe cependant une évolution significative de la prévalence du blanchissement, toutes zones confondues, qui était plus élevée en 2016 qu'en 2018. L'examen des données par famille montre que la majorité des familles étaient touchées par ce phénomène en 2016, particulièrement en zone de contrôle.

Les lésions de pigmentation et prédation sont restées peu fréquentes chaque année et ne montrent pas d'évolutions particulières entre 2016 et 2018. En revanche, les lésions de sédimentation/compétition montrent une évolution temporelle significative entre 2016 et 2018, toutes zones confondues. La présence d'assemblages d'algues sur les stations en 2018, liés à la forte mortalité corallienne observée entre 2016 et 2018, renforce ce phénomène de compétition. De plus, on observe également une différence significative de la prévalence de ce type de lésions entre les deux zones, toutes années confondues. En effet, des lésions de sédimentation/compétition avec les algues sont nettement plus fréquentes face à la mine (Thio_M) qu'en zone de contrôle (Thio_C) chaque année, indiquant une plus forte pression sédimentaire d'origine terrigène face à Thio_M.

Concernant les maladies coralliennes typiques de la région Indo-pacifique, la malformation corallienne est présente avec une prévalence inférieure à 0,5% chaque année et le White Syndrome a été observé uniquement en 2016 dans les deux zones à une très faible occurrence (0,13%). Les autres maladies du type black band disease, brown band disease ou skeletal eroding band n'ont pas été observées.

Tableau 20 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs à mesures répétées (Campagne et zone) sur les lésions coralliennes pour les zones Thio_C et Thio_M. NS : Non significatif, * : significatif avec $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,001$**

	Blanchi		Pigm		Malfor		Pred		Sed.compet		WS	
	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc
Campagne	***	2016>2018	NS		NS		NS		*	2018>2016	NS	
Zone d'impact	NS		NS		NS		NS		***	Thio_m>Thio_c	NS	
Campagne × Station	NS		NS		NS		NS		NS		NS	

II.1.2. Zone située face au convoyeur (Thio_W)

D'après les résultats de l'ANOVA, aucun type de lésion ne présente de signal d'impact lié à une interaction Campagne × Zone significative (Tableau 20). On observe cependant une évolution significative de la prévalence du blanchissement, toutes zones confondues, qui était plus élevée en 2016 qu'en 2018. L'examen des données par famille montre que les Poritidae, Acroporidae et Pocilloporidae étaient majoritairement touchés face au convoyeur. Les lésions de pigmentation et prédation sont restées peu fréquentes chaque année et ne montrent pas d'évolutions particulières entre 2016 et 2018. En revanche, les lésions de sédimentation/compétition montrent une évolution temporelle significative entre 2016 et 2018, toutes zones confondues. La présence d'assemblages d'algues sur les stations en 2018, liée à la forte mortalité corallienne observée entre 2016 et 2018 particulièrement face au convoyeur, renforce ce phénomène de compétition qui a plus que doublé en 2018 sur Thio_W. De plus, on observe également une différence significative de la prévalence de ce type de lésions entre les deux zones, toutes années confondues. En effet, des lésions de sédimentation/compétition avec les algues sont plus fréquentes face au convoyeur qu'en zone de contrôle (Thio_C) chaque année, indiquant une plus forte pression sédimentaire d'origine terrigène face à Thio_W.

Concernant les maladies coralliennes typiques de la région Indo-pacifique, la malformation corallienne est présente avec une prévalence inférieure à 0,5% chaque année et le White Syndrome a été observé uniquement en 2016 dans les deux zones à une très faible occurrence (0,135%). Les autres maladies du type black band disease, brown band disease ou skeletal eroding band n'ont pas été observées.

Tableau 21 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs à mesures répétées (Campagne et zone) sur les lésions coralliennes pour les zones Thio_C et Thio_W. NS : Non significatif, * : significatif avec $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,001$**

	Blanchi		Pigm		Malfor		Pred		Sed.compet		WS	
	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc
Campagne	***	2016>2018	NS		NS		NS		**	2018>2016	NS	
Zone	NS		NS		NS		NS		**	Thio_w>Thio_c	NS	
Campagne × Station	NS		NS		NS		NS		NS		NS	

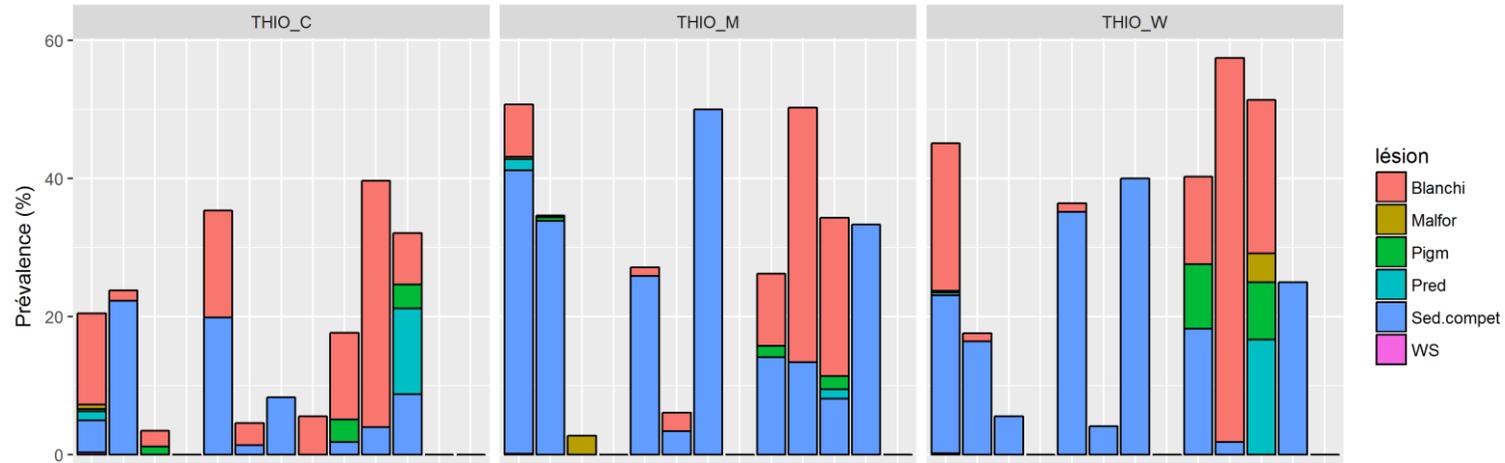
II.2. EVOLUTION TEMPORELLE SUR THIO_W DEPUIS 2013

L'étude de la zone du convoyeur qui a été échantillonnée en 2013, 2016 et 2018 montre que la prévalence de blanchissement était significativement supérieure en 2016 qu'aux autres années, du fait de l'épisode de blanchissement massif. Les autres types de lésions ne montrent pas d'évolutions particulières hormis la sédimentation/compétition avec les algues dont la prévalence a augmenté régulièrement sur la période. Elle était d'environ 5% en 2013 pour atteindre environ 50% en 2018, suite à la forte mortalité corallienne dans la zone, dont l'état est largement dominé par des algues dorénavant.

Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA à un facteur à mesures répétées (Campagne et zone) sur les lésions coralliennes pour la zone de Thio_W. NS : Non significatif, * : significatif avec $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,001$**

	Blanchi		Pigm		Malfor		Pred		Sed.compet		WS	
	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc	Significativité	post-hoc
Campagne	***	2016>2018, 2013	NS		NS		NS		**	2013<2016<2018	NS	

2016



2018

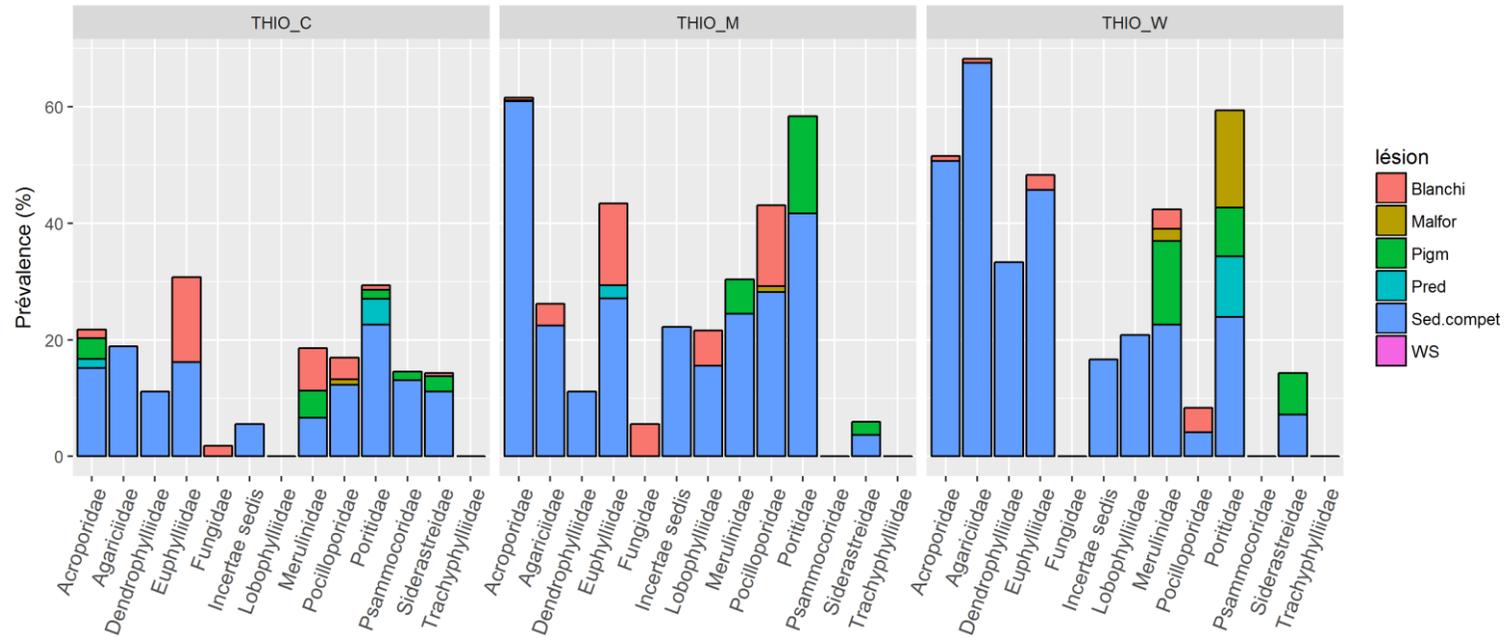


Figure 14 : Prévalence (%) de lésions coralliennes par zone et par famille en 2016 (haut) et 2018 (bas) (Blanchi : blanchissement ; Malfor : Malformations coralliennes ; Pigm : Pigmentation ; Pred : prédation ; Sed.compet : lésions de sédimentation et/ou compétition avec des algues ; WS : White syndrome)

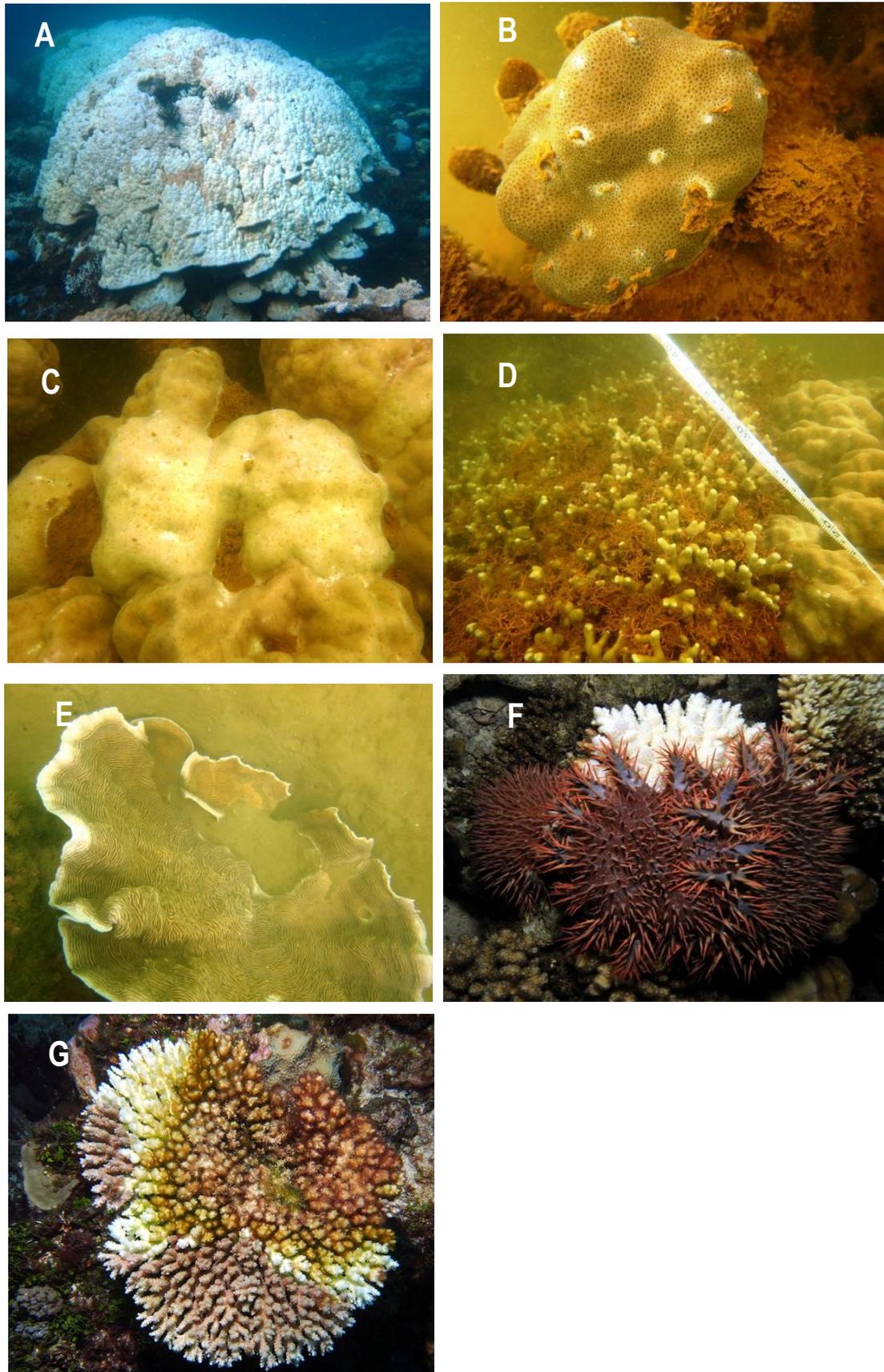


Figure 15 : illustration des lésions coralliennes fréquemment rencontrées : A : *Porites* sp. blanchi, B : Pigmentation sur *Porites* sp., C : Malformation sur *Porites* sp., D : Compétition entre *Porites* sp. et des algues, E : sédimentation sur *Pachyseris* sp., F : Prédation d'*Acanthaster* sur *Acropora* sp., G : White syndrome sur *Acropora* sp.

III. CARACTÉRISATION DES PEUPEMENTS ICHTYOLOGIQUES

III.1. CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DE L'ICHTYOFAUNE PAR ZONE EN 2018

III.1.1. Caractéristiques des peuplements en 2018

Sur l'ensemble du site de Thio, un total de 171 espèces correspondant à 83 genres et 30 familles de poissons a été recensé en 2018.

La densité moyenne observée est de 3,8 individus/m², avec une densité maximum de 8,4 individus/m² atteinte sur le transect 1 de la station 1. La biomasse moyenne observée est de 113,2 g/m², avec une biomasse maximum de 276,6 g/m² sur le transect 1 de la station 11. La richesse spécifique moyenne observée est de 34,8 espèces, avec une richesse maximum de 51 espèces sur le transect 1 de la station 11.

Le Tableau 23 présente les niveaux moyens de densité, biomasse et richesse spécifique au sein des trois zones du plan de suivi.

La densité totale apparaît maximale en 2018 dans la zone de Thio_M (5,0 ind./m²), comparativement aux deux autres zones où elle est d'un ordre de grandeur équivalent et sensiblement inférieur (2,9 et 3,1 ind./m²). Sur Thio_M, la densité est très fortement conditionnée par les espèces non-commerciales et particulièrement les Pomacentridae. La structuration en densité sur Thio_C et Thio_W apparaît très similaire entre ces deux zones, et est caractérisée par une importance relative des espèces commerciale plus marquée que sur Thio_M (et consécutivement une dominance des espèces non-commerciales, et en particulier des Pomacentridae, moins marquée). De manière générale et malgré des niveaux d'abondances contrastés, ces trois zones présentent une structure en densité comparable et caractéristique de récifs frangeants exposés, en cohérence avec les observations réalisées lors de l'état initial de ce site en 2016.

En termes de biomasse, la zone Thio_M présente les niveaux maximaux sans toutefois que les différences soient très marquées entre zones (allant de 92 g/m² à 127 g/m²), bien que ce paramètre puisse classiquement être sujet à de très fortes variations spatiales et/ou temporelles. La déclinaison de la biomasse selon les principaux groupes apparaît similaire entre zones, avec une forte dominance des espèces commerciales. Cette structuration reste cependant indicative et nettement moins informative que les structures en densité et en richesse spécifique.

Concernant la richesse spécifique, elle est maximale sur Thio_M mais les trois zones présentent des niveaux totaux très proches (allant de 33 à 37 espèces en moyenne). La structuration générale de la richesse spécifique apparaît remarquablement similaire entre les trois zones, confirmant un profil écologique assez stable spatialement sur ce site principalement constitué de récifs frangeants exposés.

Tableau 23 : Niveaux moyens de densité, de biomasse et de richesse spécifique observés en 2018 sur chacune des zones. Les écart-types pour les moyennes sont fournis entre parenthèses.

		Thio_C	Thio_M	Thio_W
Densité (ind./m²)	Toutes espèces	3,1 (±1,1)	5 (±0,9)	2,9 (±0,2)
	Commerciaux	0,5 (±0,2)	0,5 (±0,1)	0,7 (±0,3)
	Non-commerciaux	2,5 (±1,1)	4,6 (±0,8)	2,2 (±0,3)
	Chaetodontidae	0,1 (±0)	0,1 (±0)	0,1 (±0)
	Pomacentridae	1,6 (±0,6)	3,7 (±0,9)	1,3 (±0,2)
Biomasse (g/m²)	Toutes espèces	114 (±41)	127 (±44)	92 (±24)
	Commerciaux	97 (±41)	102 (±41)	70 (±26)
	Non-commerciaux	16 (±5)	25 (±8)	22 (±8)
	Chaetodontidae	1 (±0)	2 (±1)	1 (±1)
	Pomacentridae	6 (±2)	8 (±1)	7 (±3)
Richesse spécifique	Toutes espèces	33 (±4)	37 (±3)	34 (±3)
	Commerciaux	10 (±3)	11 (±2)	9 (±2)
	Non-commerciaux	23 (±3)	26 (±3)	25 (±4)
	Chaetodontidae	2 (±0)	4 (±1)	3 (±1)
	Pomacentridae	9 (±2)	10 (±2)	10 (±1)

III.1.1. Evolutions temporelles historiques générales

La Figure 16 présente les variations 2016-2018 des niveaux de densité, biomasse, et richesse spécifique totaux (toutes espèces confondues), pour chacune des trois zones considérées. Ces variations feront l'objet d'analyses statistiques et seront examinées en détail dans la suite des résultats, l'objectif n'étant ici que de présenter les profils généraux des évolutions pour les paramètres « toutes espèces ».

En termes de densité, on constate une évolution des niveaux totaux très cohérente sur les zones Thio_C et Thio_W entre 2016 et 2018, indiquant une légère diminution des valeurs moyennes. Cette diminution est toutefois à mettre en regard des niveaux de variabilité de la densité sur ces zones (illustrés par les intervalles de confiance), qui restent d'un ordre de grandeur équivalent voire supérieur à l'amplitude de la variation temporelle observée. Par ailleurs, la densité totale en zone Thio_M montre une tendance inverse avec une légère augmentation en 2018. L'examen des données de comptage montre que cette augmentation est quasi-exclusivement due à l'observation de quelques grands groupes (plusieurs centaines d'individus par groupes) de *Neopomacentrus nemurus* de petites tailles sur la station ST06 en 2018. Ces groupes très homogènes, visiblement issus d'un épisode de recrutement et dont la présence sur les transects fait partie des fluctuations naturelles (d'autant plus dans le cadre d'un échantillonnage bisannuel), n'avaient pas été observés en 2016. Hormis ce phénomène, le reste de la densité reste équivalent aux niveaux de 2016. Là encore l'amplitude de cette variation reste d'un même ordre de grandeur que la variabilité du paramètre et ne constitue pas à première vue une évolution atypique.

Concernant la biomasse, les niveaux relativement disparates en 2016 convergent vers des valeurs moyennes proches en 2018 sur les trois zones. Ceci se traduit par un maintien du niveau de 2016 pour Thio_C, par une légère augmentation sur Thio_W, et par une diminution sensible sur Thio_M. Dans ce dernier cas, il convient de noter la très importante variabilité associée au niveau de biomasse constaté en 2016. Il avait notamment été identifié que cette ceci était dû à un nombre important de Scaridae observé sur l'un des transects (notamment l'espèce *Scarus rivulatus* avec de nombreux individus de taille 20 à 40 cm). Cette observation, non réitérée en 2016, avait nettement contribué à la valeur haute relevée lors de la première campagne. En ce sens, la diminution moyenne constatée en 2018 correspond davantage à l'expression d'une variabilité naturelle importante pour ce paramètre qu'à une indication de changement de caractéristiques ichtyofaunistiques. Plus précisément, la prise en compte de la variabilité des observations et des fluctuations naturelles de certains groupes d'ichtyofaune dans la recherche de signaux d'impact aura lieu *via* la mise en œuvre d'analyses statistiques spécifiques en partie suivante.

Les courbes d'évolution de la richesse spécifique montrent une remarquable stabilité des niveaux totaux de 2016 à 2018, accentuée par des valeurs absolues de diversité très proches entre zones. La stabilité de ce paramètre, qui présente un potentiel indicateur supérieur aux paramètres quantitatifs que sont la densité et surtout la biomasse, permet également de relativiser les quelques fluctuations mentionnées précédemment.

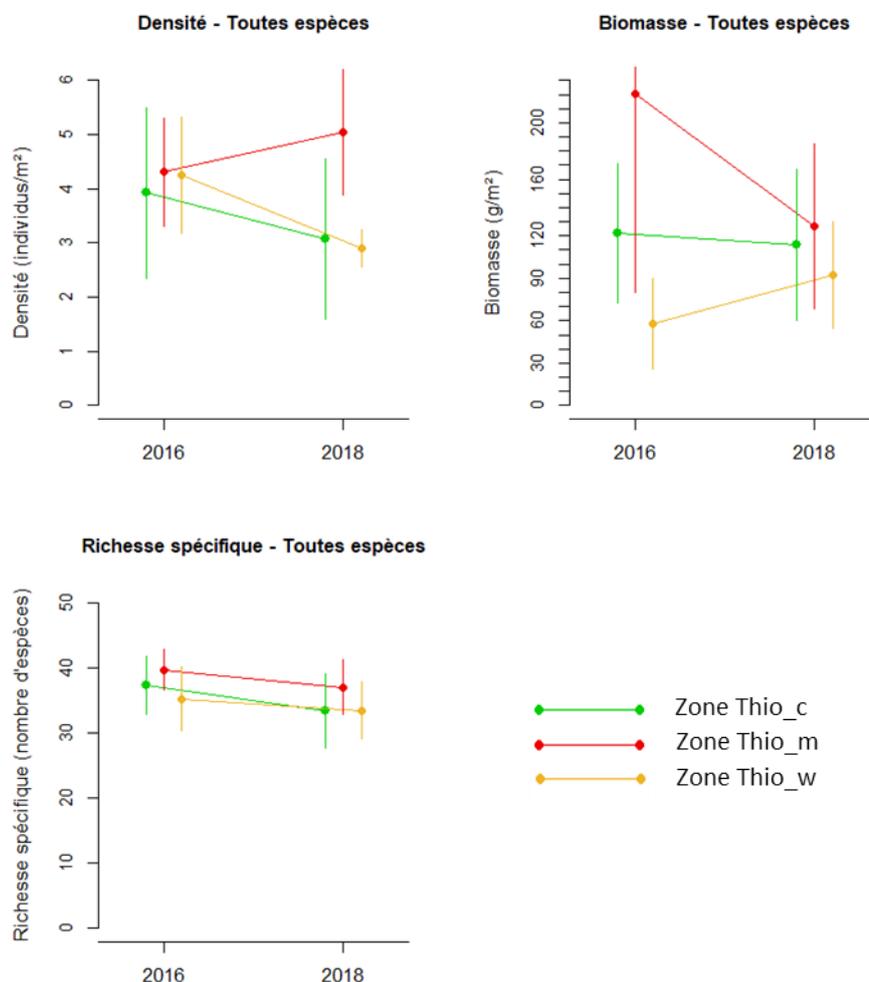


Figure 16 : Variations temporelles globales de la densité, de la biomasse et de la richesse spécifique toutes espèces entre 2016 et 2018, sur chacune des zones. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance (95%) pour les moyennes.

III.2. MODÉLISATION BACI POUR LA DÉTECTION DE SIGNAUX DE CHANGEMENTS DE L'ICHTYOFAUNE DE 2016 À 2018

Cette partie présente les résultats des analyses qui constitueront désormais le point focal des diagnostics d'impact pour l'ichtyofaune sur le long terme (au fur et à mesure du prolongement de la série temporelle de données selon le plan d'échantillonnage mis en place en 2016), à savoir les modélisations de type BACI (*Before-After-Control-Impact*).

Les résultats sont détaillés pour chacune des deux zones considérées comme étant sous impact d'activités SLN : Thio_M (mine) et Thio_W (wharf).

III.2.1. Zone Thio_M (sous influence de la mine)

Le Tableau 24 présente les résultats des modèles statistiques réalisés sur les variables décrivant les peuplements ichtyologiques des deux zones. La colonne « Effet zone » indique s'il existe une différence significative entre zone d'impact et zone de référence (toutes années confondues). La colonne « Effet année » indique s'il existe des variations temporelles significatives (toutes zones confondues). Enfin, la colonne « Interaction zone x année » indique s'il existe une évolution différentielle entre zone d'impact et zone de référence, pouvant alors indiquer un effet spécifique à l'une de ces zones. Bien que les deux premières colonnes de résultats soient commentées car elle participe à la compréhension de la structuration de l'ichtyofaune dans la zone d'étude, c'est bien sur la dernière colonne que se fonde la détection éventuelle de signaux d'impact.

A titre indicatif, tous les graphiques d'évolution 2016-2018 pour les différentes zones et pour l'ensemble des paramètres (totaux et déclinaisons selon le potentiel commercial, le groupe trophique, et les familles indicatrices) sont fournis en Annexe IV³.

Concernant la zone Thio_M, aucune interaction « zone x année » n'est apparue significative à l'issue des modèles, indiquant une absence d'évolution différentielle notable entre les deux zones et donc une absence de signaux potentiels d'impact sur ce site entre 2016 et 2018.

³ Il convient ici de noter que certains graphiques semblent parfois faire apparaître des évolutions différentielles entre zones pour certains paramètres pourtant non significatifs à l'issue des modèles. A ce titre, il s'avère primordial de considérer la variabilité (illustrée par l'intervalle de confiance) associée aux valeurs étudiées, et notamment son amplitude par rapport à l'amplitude des variations observées, afin de comprendre pourquoi ce type de variation n'indique pas nécessairement un signal de perturbation.

Tableau 24 : Zone Thio_M (sous influence de la mine) - Résultats des modèles pour la détection de signaux d'impact potentiels sur l'ichtyofaune (représentés par le facteur d'interaction « zone x année ») ; NS : non-significatif ; * : significatif avec P<0,05 ; ** : P<0,01 ; * : P<0,001.**

Paramètre	Variable	Thio_M					
		Effet zone		Effet année		Interaction zone x année	
		Significativité	Détail	Significativité	Détail	Significativité	Détail
Densité	Toutes espèces	ns		ns		ns	
	Commerciaux	ns		ns		ns	
	Non-commerciaux	ns		ns		ns	
	Herbivores	ns		ns		ns	
	Carnivores	** (p=0,007)	impact > référence	ns		ns	
	Planctonophages	ns		ns		ns	
	Piscivores	ns		ns		ns	
	Chaetodontidae	*** (p<0,001)	impact > référence	ns		ns	
	Pomacentridae	ns		ns		ns	
Biomasse	Toutes espèces	ns		ns		ns	
	Commerciaux	ns		ns		ns	
	Non-commerciaux	ns		ns		ns	
	Herbivores	ns		ns		ns	
	Carnivores	ns		ns		ns	
	Planctonophages	ns		ns		ns	
	Piscivores	ns		ns		ns	
	Chaetodontidae	** (p=0,002)	impact > référence	* (p=0,042)	2016 > 2018	ns	
	Pomacentridae	ns		ns		ns	
Richesse spécifique	Toutes espèces	ns		ns		ns	
	Commerciaux	ns		ns		ns	
	Non-commerciaux	ns		ns		ns	
	Herbivores	ns		ns		ns	
	Carnivores	** (p=0,003)	impact > référence	ns		ns	
	Planctonophages	ns		ns		ns	
	Piscivores	ns		ns		ns	
	Chaetodontidae	** (p=0,002)	impact > référence	ns		ns	
	Pomacentridae	ns		ns		ns	

III.2.2. Zone Thio_W (sous influence du wharf)

Le Tableau 24 présente, selon le même schéma que celui décrit précédemment pour la zone Thio_M, les résultats des modèles statistiques réalisés sur les variables décrivant les peuplements ichtyologiques des zones Thio_W et Thio_C. Similairement, c'est sur la dernière colonne de résultats (interaction « zone x année ») que se fonde la détection éventuelle de signaux d'impact en zone Thio_W.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre graphiquement les valeurs et le profil des variables pour lesquelles une différence significative a été détectée dans le facteur d'interaction « zone x année » à l'issue des modèles. A titre indicatif, tous les graphiques d'évolution 2016-2018 pour les différentes zones et pour l'ensemble des paramètres (totaux et déclinaisons selon le potentiel commercial, le groupe trophique, et les familles indicatrices) sont fournis en Annexe IV.

Bien que cela ne fournisse pas d'information directement pertinente à une recherche de signaux d'impact sur la période suivie, on peut noter que seules quelques variables (6 sur 27) présentent une différence significative entre zone d'impact et référence, indiquant des peuplements relativement peu contrastés entre celles-ci à l'échelle de la période suivie. La plupart de ces différences (dont la moitié concerne les Chaetodontidae) indiquent des moyennes supérieures en zone d'impact. Parallèlement, seules deux variables présentent un effet année significatif (la densité des Pomacentridae et la biomasse des Chaetodontidae), avec des niveaux supérieurs en 2016 à l'échelle de l'ensemble du site.

Trois paramètres présentent un effet significatif de l'interaction « zone x année » :

- la densité des Chaetodontidae ;
- la biomasse des Chaetodontidae ;
- la richesse spécifique des Chaetodontidae.

Les profils des trois variations différentielles détectées entre Thio_W et Thio_C sont quasi-identiques : tendance à la diminution en zone Thio_W entre 2016 et 2018, par opposition à des niveaux pouvant être considérés comme stables en zone de référence Thio_C sur cette période.

Dans le cas de la densité et de la biomasse des Chaetodontidae, les amplitudes de variations sont très faibles en valeur absolue, en lien avec des niveaux très bas pour ces deux paramètres. Les phénomènes illustrés par ces variations, bien que significatifs, restent donc de magnitude très limitée. Concernant la richesse spécifique, l'amplitude de variation, bien que relativement restreinte à l'échelle de la diversité totale de l'ichtyofaune locale, apparaît un peu plus notable étant donnée la stabilité reconnue de ce paramètre en l'absence de perturbation, et notamment concernant les Chaetodontidae.

Les trois signaux détectés présentent globalement des amplitudes de variations modérées, toutefois ils portent sur une famille à forte valeur indicatrice et présentent des profils suggérant l'amorce d'une trajectoire négative, possiblement reliée à une perturbation de l'ichtyofaune échantillonnée sur Thio_W. On peut par ailleurs noter que, graphiquement, ces trois paramètres suivent des tendances similaires en zone Thio_M, bien que non-significatives statistiquement et ne pouvant donc être considérées comme des signaux formels.

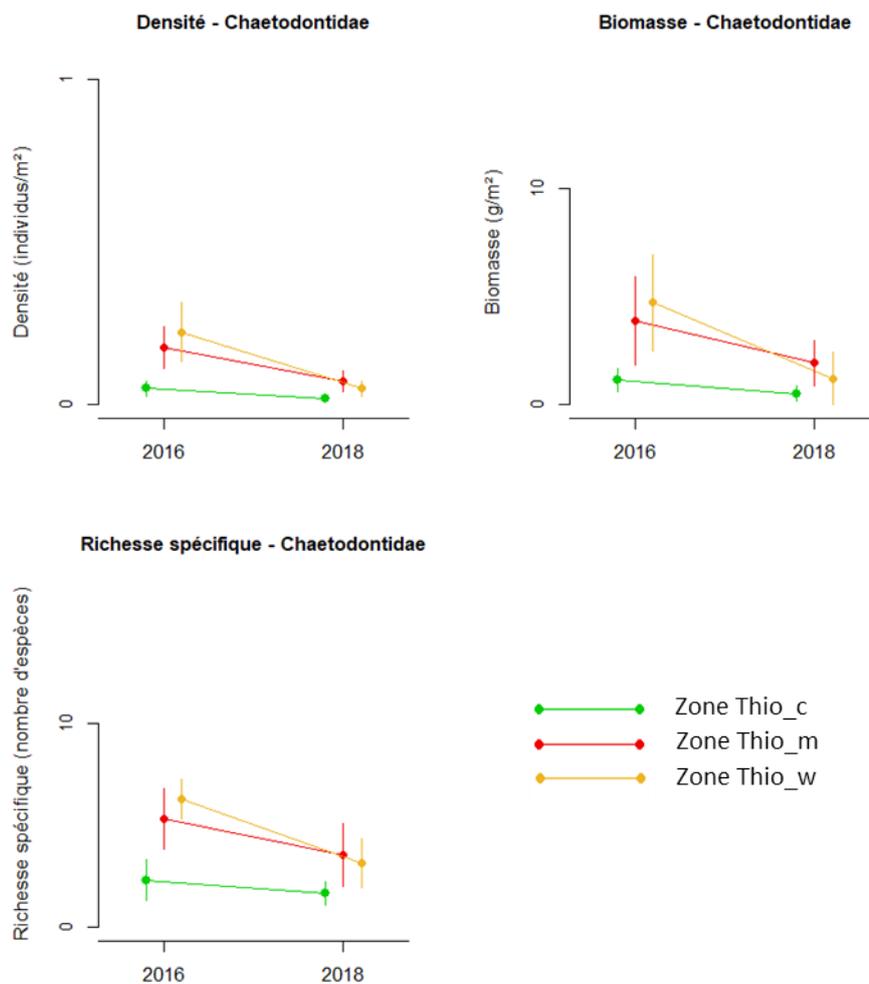


Figure 17 : Zone Thio_W (sous influence du wharf) - Profils des variations spatio-temporelles pour lesquelles un effet significatif de l'interaction « zone x année » a été détecté à l'issue des modèles. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance (95%) pour les moyennes.

Tableau 25 : Zone Thio_W (sous influence du wharf) - Résultats des modèles pour la détection de signaux d'impact potentiels sur l'ichtyofaune (représentés par le facteur d'interaction « zone x année ») ; NS : non-significatif ; * : significatif avec P<0,05 ; ** : P<0,01 ; * : P<0,001.**

Paramètre	Variable	Thio_W					
		Effet zone		Effet année		Interaction zone x année	
		Significativité	Détail	Significativité	Détail	Significativité	Détail
Densité	Toutes espèces	ns		ns		ns	
	Commerciaux	ns		ns		ns	
	Non-commerciaux	ns		ns		ns	
	Herbivores	ns		ns		ns	
	Carnivores	* (p=0,011)	impact > référence	ns		ns	
	Planctonophages	ns		ns		ns	
	Piscivores	ns		ns		ns	
	Chaetodontidae	*** (p<0,001)	impact > référence	ns		** (p=0,002)	Diminution en impact plus importante que la diminution en référence
	Pomacentridae	ns		* (p=0,043)	2016 > 2018	ns	
	Biomasse	Toutes espèces	ns		ns		ns
Commerciaux		ns		ns		ns	
Non-commerciaux		ns		ns		ns	
Herbivores		* (p=0,048)	référence > impact	ns		ns	
Carnivores		ns		ns		ns	
Planctonophages		ns		ns		ns	
Piscivores		ns		ns		ns	
Chaetodontidae		*** (p<0,001)	impact > référence	** (p=0,003)	2016 > 2018	* (p=0,015)	Diminution en impact plus importante que la diminution en référence
Pomacentridae		ns		ns		ns	
Richesse spécifique		Toutes espèces	ns		ns		ns
	Commerciaux	* (p=0,023)	référence > impact	ns		ns	
	Non-commerciaux	ns		ns		ns	
	Herbivores	ns		ns		ns	
	Carnivores	ns		ns		ns	
	Planctonophages	ns		ns		ns	
	Piscivores	ns		ns		ns	
	Chaetodontidae	*** (p<0,001)	impact > référence	ns		* (p=0,014)	Diminution en impact plus importante que la diminution en référence
	Pomacentridae	ns		ns		ns	

IV. CARACTÉRISATION DE LA FAUNE MACROBENTHIQUE DE FONDS MEUBLES

En 2016, 77% (23/30) des prélèvements étaient exempts de tout organisme vivant et pour les 23% restants (7/30), un seul organisme d'une seule espèce a été observé, hormis sur une carotte où 5 individus ont été observés. La richesse spécifique ne dépassait pas 1 espèce par carotte (Tableau 26).

En 2018, la fréquence de rencontre d'organismes vivants était plus élevée avec 57% (17/30) des carottes exemptes d'organismes vivants. Les 43% restants (13/30) contiennent généralement une à trois espèces à une densité de 1 individu par carotte, rarement identifiées au-delà du sous groupe.

Tableau 26 : Résultats sur les prélèvements de carottes dans les fonds meubles

	Station	Carotte	Zone	Groupe	Sous-groupe	Famille	Genre	Espèce	Nombre	
2016	ST02	B	Thio_W	Mollusques	Bivalve	Tellinidae	Tellina	sp.	1	
	ST04	B	Thio_M	Mollusques	Gastéropodes	Conidae	Conus	quercinus	1	
	ST07	B	Thio_M	Echinodermes	Ophiure	Ophiotrichidae	Ophiothela	sp.	1	
	ST09	A	Thio_C	Mollusques	Bivalve	Tellinidae		indét.	sp.	5
		B	Thio_C	Mollusques	Gastéropodes	Naticidae	Natica	sp.	1	
	ST10	C	Thio_C	Vers	Indéterminé	indéterminé	Indéterminé	indéterminé	1	
	ST11	C	Thio_C	Mollusques	Bivalve	indéterminé	indéterminé	sp.	1	
2018	ST01	A	Thio_W	Brachiopode	indéterminé	indéterminé			1	
		B	Thio_W	Brachiopode	indéterminé	indéterminé			1	
	ST02	B	Thio_W	Crustacés	Crabe	indéterminé	indéterminé		1	
		C	Thio_W	Brachiopode	indéterminé	indéterminé			1	
	ST04	A	Thio_M	Vers	Sipunculidae	indéterminé			1	
	ST05	A	Thio_M	Crustacés	Pagure	indéterminé	indéterminé		1	
		A	Thio_M	Crustacés	Crabe	indéterminé	Indéterminé		1	
			Thio_M	Crustacés	Pagure	indéterminé	indéterminé		1	
	ST06	A	Thio_M	Mollusque	Bivalve	Tellinidae	Tellina	sp.	1	
			Thio_M	Brachiopode	indéterminé	indéterminé			1	
	ST07	B	Thio_M	Mollusque	Bivalve	Tellinidae	Tellina	sp.	1	
			Thio_M	Vers	Polychète	indéterminé			1	
	ST08	A	Thio_M	Vers	Polychète	indéterminé			1	
	ST09	A	Thio_C	Brachiopode	indéterminé	Indéterminé			1	
ST10	B	Thio_C	Vers	Polychète	indéterminé			1		
		C	Thio_C	Brachiopode	indéterminé	indéterminé			1	
	ST11	C	Thio_C	Brachiopode	indéterminé	indéterminé			1	

Ainsi, si ces résultats montrent une légère augmentation de la densité d'organismes vivants dans les carottes entre 2016 et 2018, le faible nombre d'organismes et la faible diversité observées sur les autres stations ne permettent pas de réaliser une analyse statistique de type Contrôle-Impact. La méthode de prélèvement et la stratégie d'échantillonnage utilisées pour cette étude avec 3 carottes semble peu appropriée pour caractériser les fonds meubles des récifs frangeants et fait l'objet de recommandations dans le rapport préconisations.

V. EVOLUTION DES COMMUNAUTÉS MACROBENTHIQUES DE FONDS DURS

Dans ce chapitre, les données obtenues par SOPRONER sur la zone Thio_W lors de l'état initial pour l'étude d'impact des sites de bord de mer en 2013 (SOPRONER 2013) sont présentées pour information. Elles ne sont pas prises en compte dans l'analyse statistique de type Contrôle/Impact car la zone de contrôle n'a pas été échantillonnée en 2013.

V.1. EVOLUTION À L'ÉCHELLE DES COMMUNAUTÉS

L'analyse PERMANOVA à deux facteurs (Campagne et Zone) sur les densités par sous-groupe a montré l'absence d'interaction significative de ses facteurs, écartant de fait tout signal d'impact lié à la SLN sur la densité d'invertébrés à l'échelle des communautés.

En revanche, des différences spatiales entre zones (toutes campagnes confondues) et entre campagnes (toutes zones confondues) sont détectées. Ces analyses ont été réalisées dans un premier temps en incluant les données sur Thio_C et Thio_W, puis dans un deuxième temps entre Thio_C et Thio_M.

- Comparaison entre Thio_C et Thio_W :

Les facteurs Campagne et Zones sont individuellement significatifs indiquant une différence de densité, toutes zones confondues entre les deux années et, toutes années confondues entre les deux zones.

Dans le premier cas, les différences observées entre campagnes sont principalement expliquées par :

- Aux Maxillopoda et Décapodes, plus denses en 2016 que 2018
- Aux bivalves et Crinoïdes, légèrement plus denses en 2016 que 2018

Dans le second cas, les différences observées entre zones sont principalement expliquées par ::

- Aux Maxillopoda plus denses sur Thio_C que Thio_W
- Aux décapodes, bivalves et gastéropodes plus denses sur Thio_W que Thio_C

- Comparaison entre Thio_C et Thio_M :

Les facteurs Campagne et Zones sont individuellement significatifs indiquant une différence de densité, toutes zones confondues entre les deux années et, toutes années confondues entre les deux zones.

Dans le premier cas, les différences observées entre campagnes sont principalement expliquées par :

- Aux Maxillopoda et Décapodes, plus denses en 2016 que 2018
- Aux Astérides et Crinoïdes, plus denses en 2018 que 2016

Dans le second cas, les différences observées entre zones sont principalement expliquées par ::

- Aux Décapodes et bivalves plus denses sur Thio_M que Thio_C
- Aux Maxillopoda et Crinoïdes plus denses sur Thio_C que Thio_M

V.2. EVOLUTION DE LA DIVERSITÉ

L'ANOVA à 2 facteurs (Campagne et Zone) à mesures répétées sur la richesse spécifique montre l'absence d'interaction significative des deux facteurs ($p > 0,05$), écartant tout signal d'impact lié à la SLN sur la diversité d'invertébrés de fonds durs. On note également l'absence de significativité des facteurs Campagne et Zone individuellement ($p > 0,05$).

La richesse spécifique (Mollusques, Echinodermes, Crustacés et Vers) est donc stable dans l'espace et dans le temps. Sans que cela soit significatif, la richesse a légèrement augmenté entre 2016 et 2018 dans chaque zone hormis Thio_W où elle est restée particulièrement stable (environ 16 espèces en moyenne). Sur cette zone, la richesse spécifique était plus faible (11 espèces en moyenne) en 2013 lors de l'état initial.

Sur Thio_C, la richesse spécifique est passée de 15,7 en 2016 à 17,9 espèces en 2018 en moyenne et sur Thio_M, elle est passée 16,8 à 19,2.

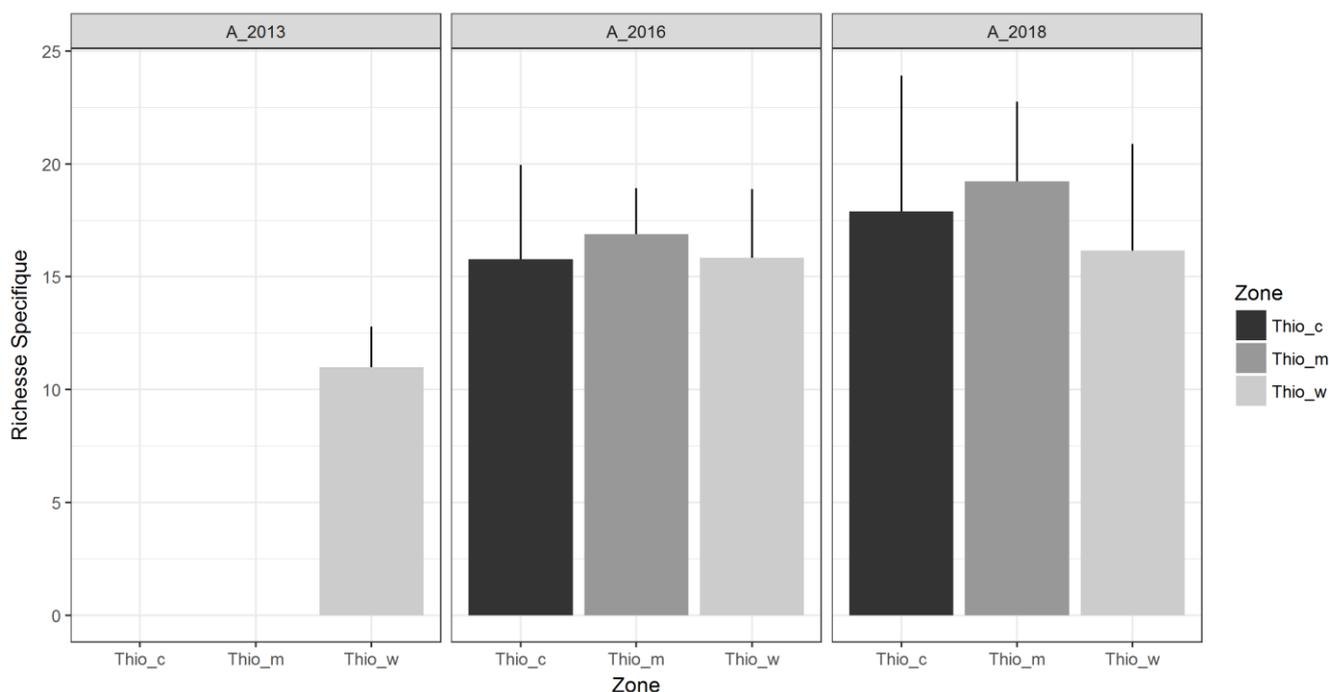


Figure 18 : Evolution de la diversité d'invertébrés (Mollusques, Echinodermes, Crustacés et Vers) par zone d'impact et entre 2013 (Thio_W uniquement), 2016 et 2018

La richesse spécifique par Station est présentée en ANNEXE V.

V.3. EVOLUTION DE LA DENSITÉ PAR GROUPE

Les densités par groupe et par station sont présentées en ANNEXE V.

V.3.1. Comparaison de Thio_C et Thio_M

A l'exception du groupe des Echinodermes, aucun signal d'impact (interaction Campagne × Zone significative - Tableau 27) n'est détecté sur les densités par groupe. Pour les Echinodermes, les statistiques traduisent une augmentation de densité sur Thio_M, (694 à 3472 indiv/ha) comparée à une absence d'évolution sur Thio_C (Tableau 27 et Figure 19).

Globalement et tous groupes confondus, on observe une forte stabilité des densités en zone de contrôle (Thio_C). Sur Thio_M, ces densités sont plus variables avec une diminution non significative entre 2016 et 2018 des densités de Mollusques (4583 à 2861 indiv/ha) et Crustacés (12277 à 7333 indiv/ha). A l'inverse comme précisé précédemment une forte augmentation de la densité d'Echinodermes est observée.

Tableau 27: Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les densités d'invertébrés par groupe à deux facteurs (Campagne et Zone) suivie d'un test Post-hoc de Bonferroni pour les couples Thio_M et Thio_C

Paramètre	THIO_M Variable	Effet Campagne		Effet Zone		Intéraction Zone x Campagne	
		Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc
Densité	Mollusques	NS		*p<0,05	Thio_m>Thio_c	NS	
	Echinodermes	**p<0,01	2018>2016	*p<0,05	Thio_c>Thio_m	**p<0,01	forte augmentation sur Thio_m, absence d'évolution sur Thio_c
	Crustacés	**p<0,01	2016>2018	*p<0,05	Thio_m>Thio_c	NS	
	Vers	NS		*p<0,05	Thio_m>Thio_c	NS	

V.3.2. Comparaison de Thio_C et Thio_W

Seuls les Crustacés présentent un signal d'impact, lié à une interaction Zone x Campagne significative, sur leurs densités (Tableau 28 et Figure 19). On observe en effet une forte diminution de densités entre 2016 et 2018 sur cette zone (15250 à 3333 indiv/ha) comparée à une absence d'évolution sur Thio_C.

La densité de chaque groupe étant plutôt stable en zone de contrôle, cette diminution de densité pour les Crustacés sur Thio_W est à l'origine d'un facteur campagne significatif (toutes zones confondues). Toutes campagnes confondues, des différences entre zones sont observées pour les Mollusques et les Echinodermes.

Tableau 28: Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les densités d'invertébrés par groupe à deux facteurs (Campagne et Zone) suivie d'un test Post-hoc de Bonferroni pour les couples Thio_W et Thio_C

Paramètre	THIO_W Variable	Effet Campagne		Effet Zone		Intéraction Zone x Campagne	
		Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc
Densité	Mollusques	NS		*** p<0,001	Thio_w>Thio_c	NS	
	Echinodermes	NS		**p<0,01	Thio_c>Thio_w	NS	
	Crustacés	*** p<0,001	2016>2018	NS		**p<0,01	forte diminution sur Thio_w, absence d'évolution sur Thio_c
	Vers	NS		NS		NS	

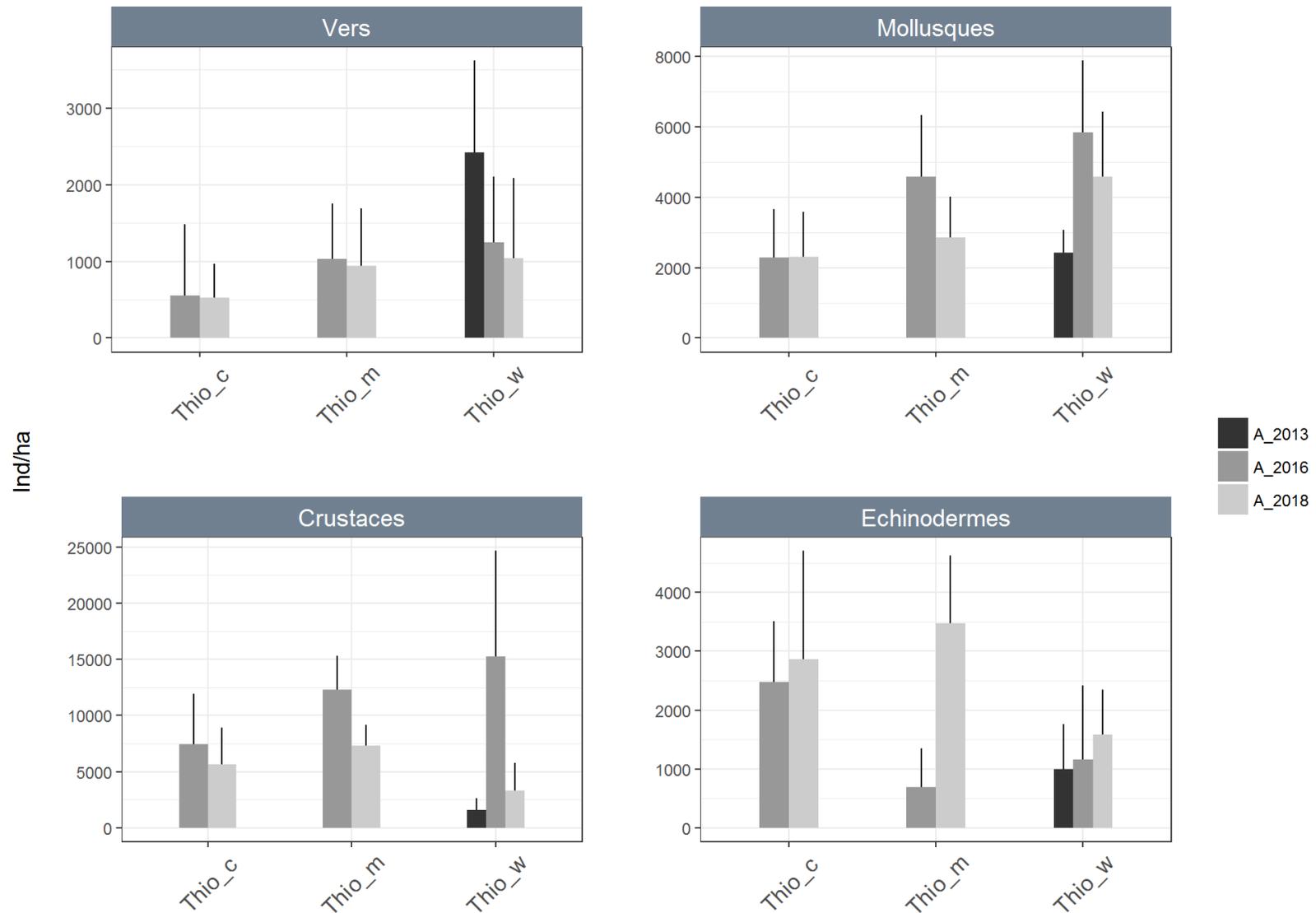


Figure 19 : Evolution de la densité de chaque groupe d'invertébrés par zone entre 2013 (Thio_W uniquement), 2016 et 2018. En noir : la campagne de 2013, en gris foncé la campagne de 2016 et en gris clair la campagne de 2018

V.4. EVOLUTION DE LA DENSITÉ PAR SOUS-GROUPE

V.4.1. Comparaison de Thio_C et Thio_M

A l'exception des Astérides et Crinoïdes, du sous-groupe des Echinodermes, aucun signal d'impact (interaction Campagne × Zone significative - Tableau 29), n'est détecté sur les densités par sous-groupe.

Pour Astérides et Crinoïdes, les statistiques traduisent globalement d'une augmentation de densité sur Thio_M, (Tableau 29 et Figure 21)

Le Tableau 29 détaille les sous-groupes bénéficiant de facteurs Campagnes ou Zones significatifs. Globalement et bien qu'aucun signal d'impact soit identifié, on observe une diminution de densité de gastéropodes et bivalves et une diminution de moitié de la densité de décapodes.

Tableau 29 : Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les densités d'invertébrés par sous-groupe à deux facteurs (Campagne et Zone) suivie d'un test Post-hoc de Bonferroni pour les couples Thio_M et Thio_C

Groupe	THIO_M Variable	Effet Campagne		Effet Zone		Intéraction Zone × Campagne	
		Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc
Mollusques	Gastéropodes	NS		NS		NS	
	Bivalves	NS		** p<0,01	Thio_m>Thio_c	NS	
	Asterides	** p<0,01	2018>2016	NS		*p<0,05	forte augmentation sur Thio_m, absence d'évolution sur Thio_c
Echinodermes	Crinoïdes	NS		** p<0,01	Thio_c>Thio_m	*p<0,05	diminution sur Thio_c, augmentation sur Thio_m
	Echinides			D<200indiv/ha soit 1 individu/transect			
	Holothuridae			D<200indiv/ha soit 1 individu/transect			
Crustacés	Décapodes	NS		NS		NS	
	Maxillopoda	NS		NS		NS	
Vers	Annelides Polychetes	NS		*p<0,05	Thio_m>Thio_c	NS	

V.4.1. Comparaison de Thio_C et Thio_W

Un signal d'impact, lié à une interaction significative des facteurs Campagne et Zone, est observé sur la densité de décapodes qui a fortement diminué sur Thio_W (10625 à 2500 indiv/ha), comparée à une densité stable sur Thio_C. Un second signal est observé pour les crinoïdes mais celui-ci est positif avec une augmentation de densité sur Thio_W.

Le Tableau 30 détaille les sous-groupes bénéficiant de facteurs Campagnes ou Zones significatifs. Globalement, et bien qu'aucun signal d'impact soit observé pour ces sous-groupes, une forte diminution de densité est observée pour les Maxillopoda (4625 à 833 indiv/ha) entre 2016 et 2018.

Ainsi le signal d'impact observé sur la densité de Crustacés semble lié aux deux sous groupes les composant (Décapodes et Maxillopoda) avec toutefois une plus forte contribution des décapodes dans la baisse de densité observée (Figure 21). Concernant les décapodes, la baisse de densité est principalement orchestrée par les crabes du genre Trapezia et le genre Calcinus, très fidèles aux colonies coralliennes qui constituent leur habitat (Figure 20). Les Maxillopoda sont représentés par un seul genre : Nobia (Figure 20).



Figure 20 : Photographies des genres Trapezia, Calcinus et Nobia (source : google-image)

Tableau 30 : Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les densités d'invertébrés par sous-groupe à deux facteurs (Campagne et Zone) suivie d'un test Post-hoc de Bonferroni pour les couples Thio_W et Thio_C

Groupe	THIO_W Variable	Effet Campagne		Effet Zone		Intéraction Zone x Campagne	
		Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc	Significativité	Post Hoc
Mollusques	Gastéropodes	NS		* p<0,05	Thio_w>Thio_c	NS	
	Bivalves	NS		* p<0,05	Thio_w>Thio_c	NS	
Echinodermes	Asterides	* p<0,05	2018>2016	* p<0,05	Thio_c>Thio_w	NS	
	Crinoïdes	NS		* p<0,05	Thio_c>Thio_w	* p<0,05	diminution sur Thio_c, augmentation sur Thio_w
	Echinides			D<200indiv/ha soit 1 individu/transect			
	Holothuridae			D<200indiv/ha soit 1 individu/transect			
Crustacés	Decapodes	*** p<0,001	2016>2018	NS		*** p<0,001	stabilité sur Thio_c, diminution sur Thio_w
	Maxillopoda	* p<0,05	2016>2018	NS		NS	
Vers	Annelides Polychetes	NS		* p<0,05	Thio_w>Thio_c	NS	

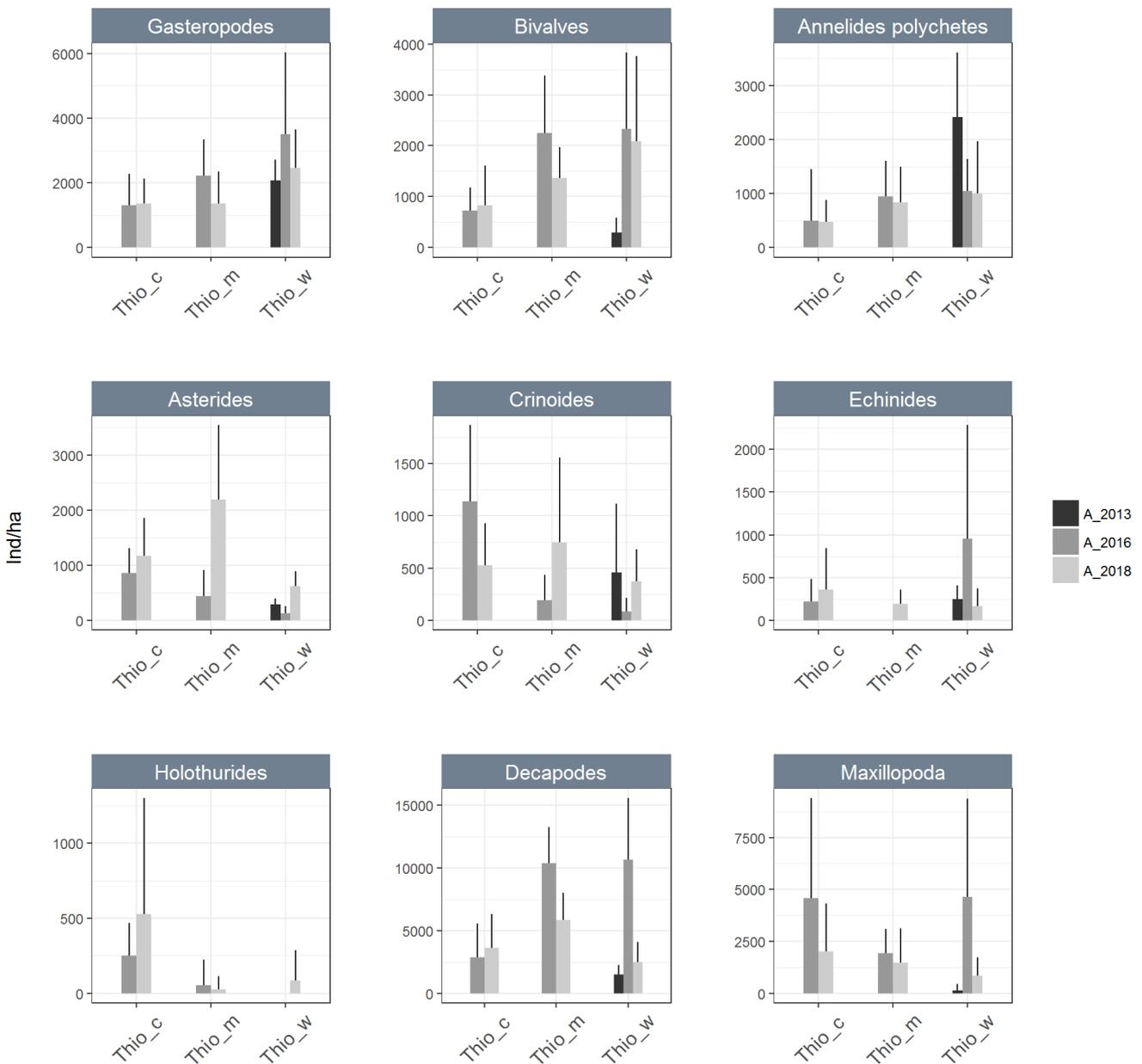


Figure 21 : Evolution de la densité de chaque sous-groupe d'invertébrés par zone entre 2013 (Thio_W uniquement), 2016 et 2018. En noir : la campagne de 2013, en gris foncé la campagne de 2016 et en gris clair la campagne de 2018

V.5. EVOLUTION DE LA DENSITÉ D'ESPÈCES REMARQUABLES

Parmi les espèces corallivores, aucune *Acanthaster* n'a été observée en 2018 et la densité de *Coralliophila* et *Drupella* est proche ou inférieure à 1000 indiv/ha à chaque campagne sur chaque zone, montrant l'absence de prolifération (Figure 22). Comme montré dans la partie précédente sur les sous-groupes, les crabes du genre *Trapezia* ont vu leur densité diminuer fortement sur Thio_M et Thio_W. Celle-ci a diminué de moitié sur Thio_M (3027 à 3166 indiv/ha) et elle a été divisée par 5 sur Thio_W (3916 à 708 indiv/ha) en lien avec la dégradation d'habitats coralliens observés dans les deux zones. Les bédouilles sont très peu présents voir absents sur chaque zone.

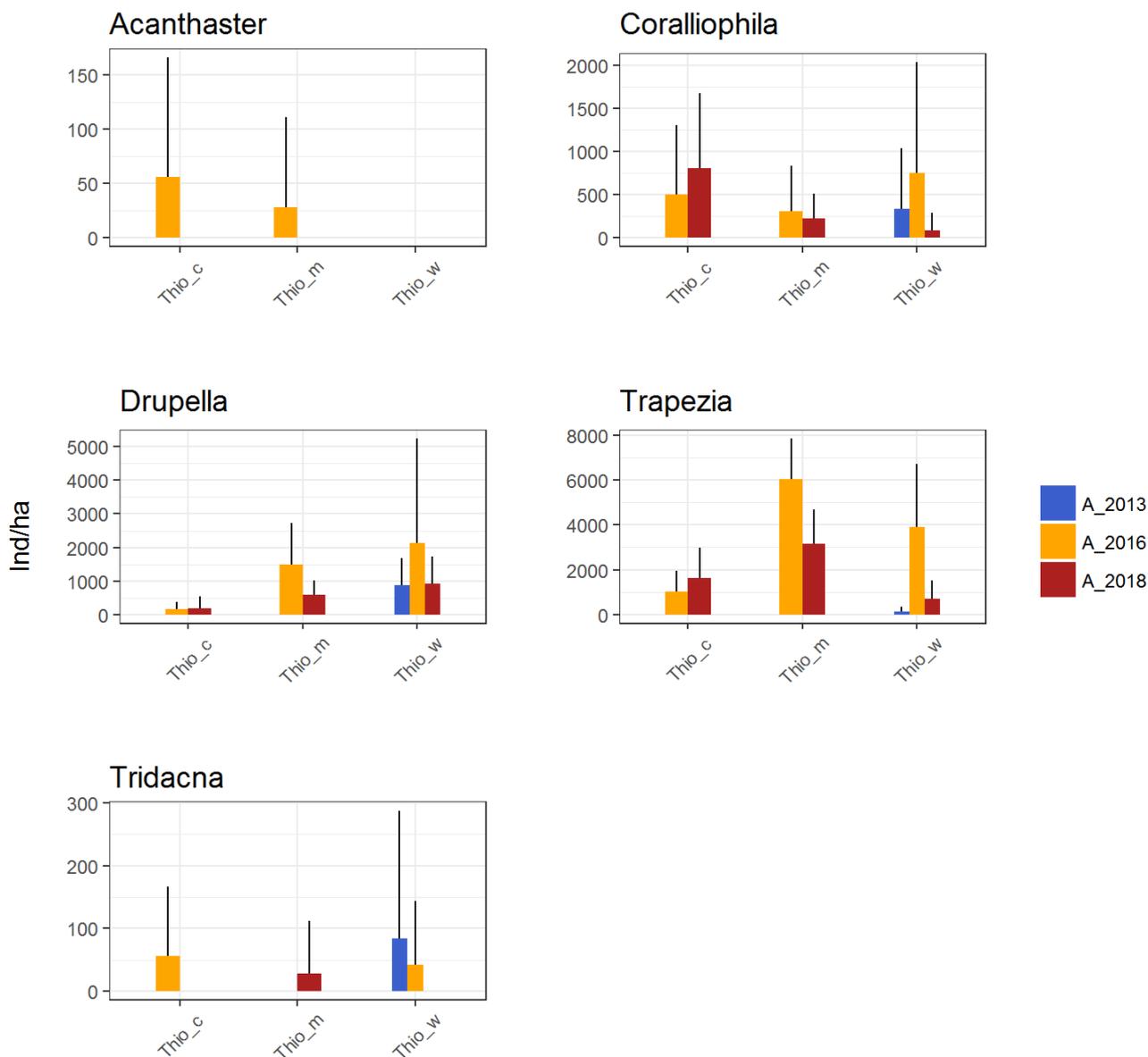


Figure 22 : Evolution de la densité d'espèces remarquables par zone

La densité d'espèces remarquables par station et par campagne est présentée en ANNEXE V.

V.6. EVOLUTIONS SUR LA ZONE THIO_W DEPUIS 2013

La zone du wharf (Thio_W) est la seule zone ayant été échantillonnée en 2013, permettant une analyse de l'évolution par groupe et par sous-groupe entre 2013 et 2018. Les graphiques associés aux résultats statistiques (Tableau 31, Figure 19 et Figure 20) ne montrent pas de baisse de densité significative dans le temps sur la période échantillonnée.

Tableau 31 : Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les densités d'invertébrés par groupes et sous-groupe à un facteur (Campagne) suivie d'un test Post-hoc de Bonferroni sur Thio_W

Paramètre	THIO_W Variable	Effet Campagne	
		Significativité	Post Hoc
Densité	Mollusques	*p<0,05	2013<2016,2018
	Echinodermes	NS	
	Crustacés	***p<0,001	2016>2013,2018
	Vers	NS	
Mollusques	Gastéropodes	NS	
	Bivalves	*p<0,05	2013<2016, 2018
Echinodermes	Asterides	***p<0,001	2018>2013,2016
	Crinoïdes	NS	
	Echinides	NS	
	Holothuridae	NS	
Crustacés	Decapodes	***p<0,001	2016>2013, 2018
	Maxillopoda	NS	
Vers	Annelides Polychetes	NS	

La densité d'espèces remarquables par station et par campagne est présentée en ANNEXE V.

VI. QUALITE DES EAUX

Les grandeurs physico-chimiques moyennes mesurées entre 0,5 et 2 m de la colonne d'eau sont rassemblées dans le Tableau 32.

Note : Un problème technique inhérent au fonctionnement du capteur d'oxygène dissous est survenu pendant cette campagne. Les valeurs de celui-ci étant visiblement erronées, ne nous permettant pas de fournir la totalité des données pour cette étude.

Tableau 32 : Synthèse des paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* entre 0,5 et 2 m de profondeur par sonde multiparamétrique pour les stations du site de Thio

Température (°C)										
	ST01	ST02	ST04	ST05	ST06	ST07	ST08	ST09	ST10	ST11
Minimum	26,4	26,5	26,3	26,1	26,4	26,5	26,6	26,6	26,7	26,6
Maximum	26,6	26,5	26,6	26,4	26,5	26,6	26,7	26,7	26,7	26,7
Moyenne	26,5	26,5	26,5	26,3	26,4	26,5	26,7	26,7	26,7	26,7
Ecart-type	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CV%	0,1	0,0	0,3	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Salinité (PSU)										
	ST01	ST02	ST04	ST05	ST06	ST07	ST08	ST09	ST10	ST11
Minimum	34,3	34,4	31,1	28,3	33,9	34,4	34,5	34,5	34,5	34,5
Maximum	34,6	34,6	34,6	33,8	34,4	34,5	34,6	34,6	34,6	34,6
Moyenne	34,4	34,5	33,9	32,1	34,2	34,5	34,6	34,5	34,5	34,5
Ecart-type	0,1	0,0	1,1	2,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CV%	0,2	0,1	3,3	6,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fluorescence (mg/m ³)										
	ST01	ST02	ST04	ST05	ST06	ST07	ST08	ST09	ST10	ST11
Minimum	0,16	0,17	0,16	0,22	0,09	0,12	0,07	0,12	0,15	0,06
Maximum	0,3	0,31	0,29	0,33	0,20	0,23	0,26	0,38	0,36	0,18
Moyenne	0,22	0,23	0,22	0,27	0,15	0,19	0,13	0,22	0,23	0,13
Ecart-type	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,05	0,03
CV%	16	16	17	13	18	18	28	30	20	25
Turbidité (NTU)										
	ST01	ST02	ST04	ST05	ST06	ST07	ST08	ST09	ST10	ST11
Minimum	0,58	0,56	0,52	0,58	0,65	0,49	0,48	0,38	0,99	0,45
Maximum	0,98	0,74	0,72	1,58	0,84	0,65	0,58	0,92	4,15	0,55
Moyenne	0,67	0,61	0,62	0,94	0,72	0,55	0,51	0,51	2,74	0,50
Ecart-type	0,08	0,05	0,06	0,4	0,05	0,04	0,03	0,11	1,35	0,02
CV%	12	8	10	43	7	8	6	21	49	5

Ces valeurs montrent peu de variations entre les différentes stations du site de Thio (Figure 24), sauf pour les stations ST04 et ST05 à proximité de l'embouchure de la rivière Thio dont les moyennes mesurées de la salinité sont les plus basses, et pour la station ST10 située au sud de la zone d'étude vers la Pointe Désiré avec une turbidité plus élevée.

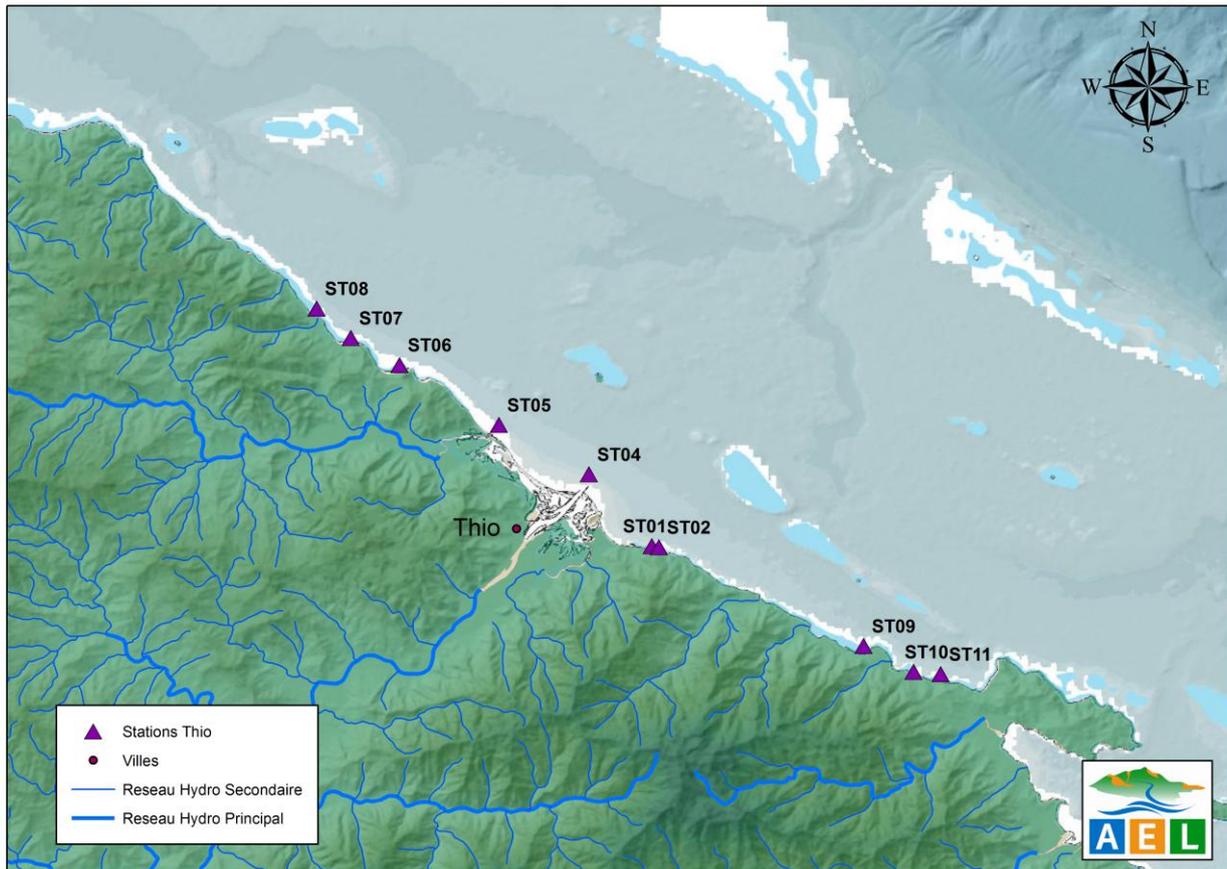


Figure 23 : Le réseau hydrographique du site de Thio

Température (Figure 24) : Les profils de température varient peu entre les stations. Avec le CV% moyen le plus fort mesuré à la station ST05, les eaux de surface de cette dernière, situées à l'embouchure de la rivière Dothio, sont légèrement plus fraîches que le reste de la colonne d'eau. Par comparaison, les températures aux autres stations demeurent les plus stables tout le long de la colonne d'eau.

Salinité (Figure 24) : Marqueur des apports d'eau douce en mer, la salinité se situe autour de 35 g/L pour toutes les stations sauf à la station ST04 et notamment la ST05. En effet, une importante dessalure est relevée à la ST05 où elle atteint une épaisseur de 3 m de surface. Dans une moindre ampleur, le premier mètre de la colonne d'eau de la station ST04 est également moins salé.

Fluorescence (Figure 25) : Les profils de fluorescence ne se différencient pas entre les stations. Par conséquent, aucune tendance n'est dégagée pour ce paramètre si ce n'est qu'elle demeure très faible sur l'ensemble de ce réseau de suivi et les profondeurs échantillonnées ($< 0,40 \text{ mg/m}^3$).

Turbidité (Figure 25) : Seul le profil de turbidité à la station ST10 se distingue avec des valeurs significatives plus élevées sur l'ensemble de la colonne d'eau par rapport aux autres stations.

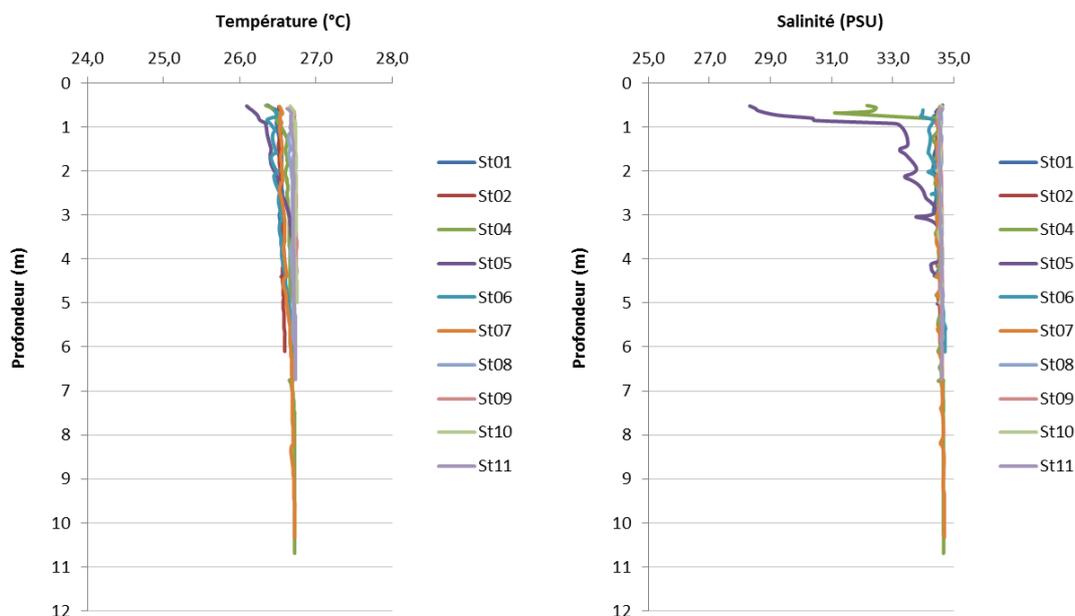


Figure 24 : Profils de température et de salinité pour les stations de Thio

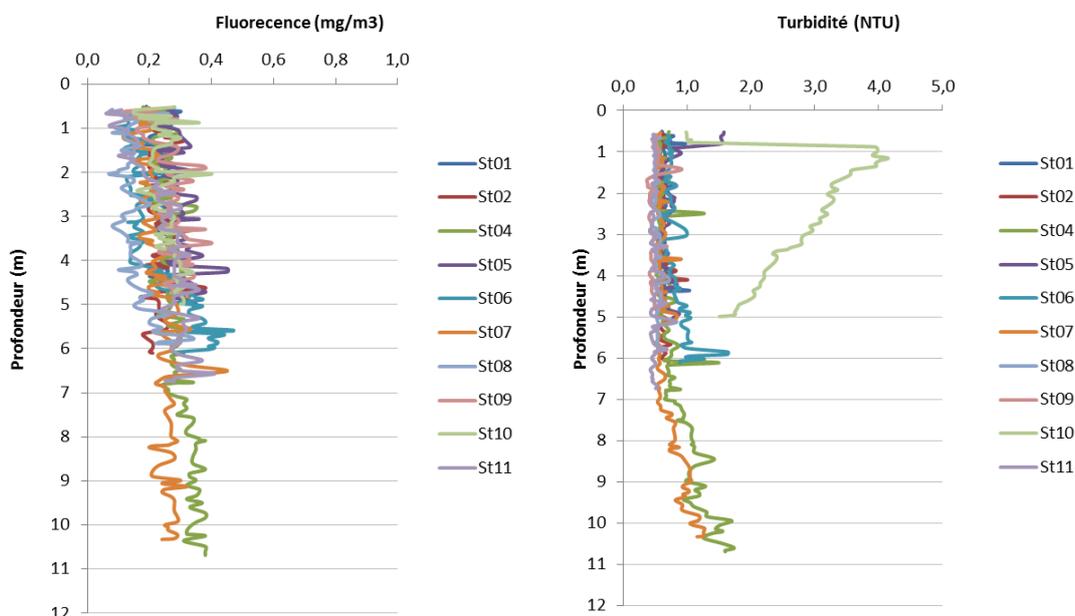


Figure 25 : Profils de fluorescence et de turbidité pour les stations de Thio

Dans les présentes conditions de prélèvements, les valeurs moyennes de turbidité enregistrées dans les deux premiers mètres de la colonne d'eau permettent de considérer que les eaux de toutes les stations de Thio pour cette campagne 2018 sont dans les gammes habituellement attribuables au milieu littoral (Tableau 33).

TUBIDITE (FTU)	Milieu considéré comme non perturbé
Fond de baie, littoral	1.5 – 8*
Lagon en milieu côtier	[0.5 – 1.5[
Proche récif barrière	< 0.5

* valeur pouvant être atteinte seulement durant quelques heures après plus de 100 mm de pluies.

Tableau 33: Valeurs de référence pour la turbidité habituellement mesurées dans les trois différents types de milieux du lagon de Nouvelle-Calédonie (Béliciaeff et al., 2011)

Note : Lors de la campagne de 2016, sur les 10 stations échantillonnées, suite à un problème technique, les données physico-chimiques des CTD des stations ST04 et ST05 n'ont malheureusement pas été enregistrées

La comparaison des profils physico-chimiques relevés dans les deux premiers mètres de la colonne d'eau pour le site de Thio en 2016 et 2018 montre notamment que les salinités mesurées en 2018 sont en baisse pour toutes les stations. C'est également le cas pour les fluorescences et les turbidités bien que les écarts soient moins marqués. L'exception est tout de même faite pour la turbidité à la station ST10 qui, inversement se démarque par une augmentation importante en 2018. Par comparaison, sur toutes les stations, les températures enregistrées en 2018 sont en hausse (Figure 26).

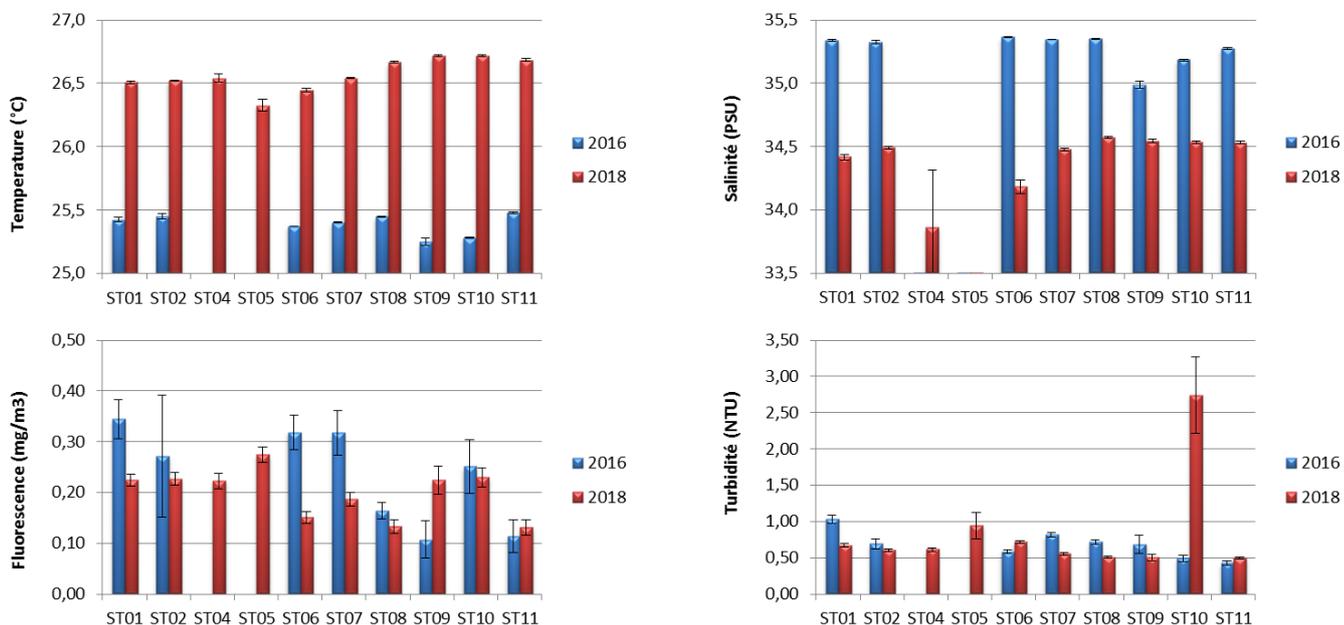


Figure 26 : Paramètres physico-chimiques mesurés aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

VII. QUALITE DES SEDIMENTS

VII.1. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS

Remarque : Dans les sédiments, les concentrations en contaminant dépendent de la nature des particules et de leur granulométrie ; les contaminants ont de grandes capacités d'adsorption sur les particules fines qui montrent les surfaces spécifiques les plus importantes.

Les sédiments sont caractérisés par une analyse granulométrique permettant de différencier les classes de grains qui les composent (Figure 27) et, par une teneur en carbonates de calcium (Figure 28) qui permet de déterminer leur origine (terrestre et/ou marine). Les résultats sont détaillés en Annexe VI.

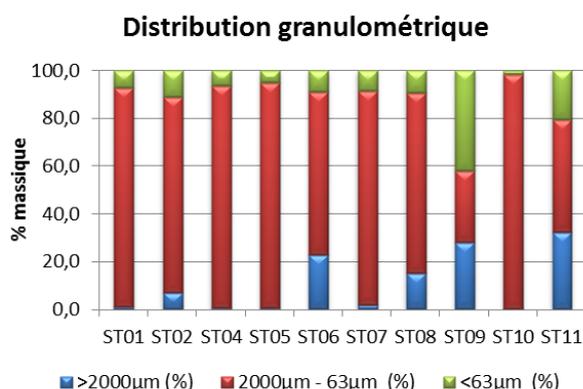


Figure 27 : Comparaison des pourcentages massiques (%) des différentes classes granulométriques pour les sédiments prélevés aux stations de Thio

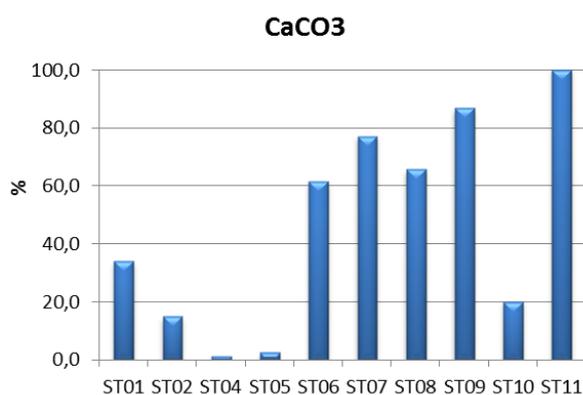


Figure 28 : Teneurs en carbonates dans les sédiments prélevés aux stations de Thio

Les stations de Thio présentent des distributions de populations de grains relativement homogènes. Avec une composition moyenne de $10,9 \pm 12,6$ de débris grossiers ($>2000 \mu\text{m}$) et $12,2 \pm 11,7$ % de fractions fines ($<63 \mu\text{m}$; sables fins et argile), les sables grossiers à moyens ($2000 - 63 \mu\text{m}$), prédominent dans ce site ($76,8 \pm 22,6$ %). En effet, les sédiments de plusieurs stations ST01, ST04, ST05, ST07 et ST10 sont composés quasi-exclusivement de sables grossiers à moyens (90-98 %). Seuls, les sédiments provenant de la station ST09 se différencient avec leurs compositions en fractions fines à 42 % (Figure 27).

Les teneurs en carbonates de calcium obtenues pour le site de Thio montrent des concentrations infimes pour les stations ST04 et ST05 situées à proximité de l'embouchure des rivières Thio et Dothio (Figure 23). Les apports terrigènes à ces stations sont par conséquent très dominants contrairement aux stations ST09 et ST11 dont les teneurs

en carbonates avoisinent les 100 %. Il est à noter que les sédiments prélevés aux stations ST01, ST02 et ST10 sont également peu carbonatés (Figure 28).

Rappel : L'interprétation des données est réalisée selon les biotopes en moyennant, d'une part, les valeurs obtenues des stations ST04, ST05, ST06, ST07 et ST08 caractérisant la zone d'impact minière (Thio_M_i) et, d'autre part, les stations ST09, ST10 et ST11 caractérisant la zone de contrôle (Thio_C). A cela s'ajoute, la zone d'impact liée aux activités portuaires (Thio_W_i) caractérisée par les stations ST01 et ST02.

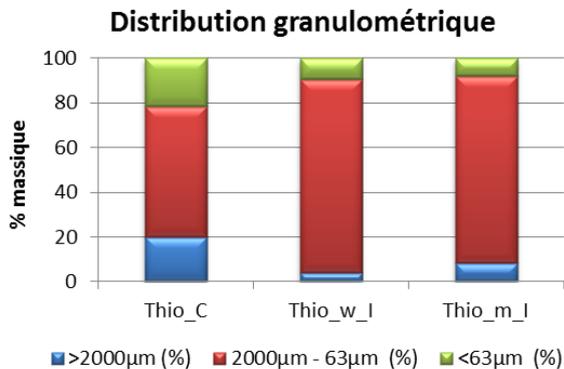


Figure 29 : Moyennes des pourcentages massiques des différentes classes granulométriques pour les sédiments échantillonnés dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M_i ; n = 5) et du wharf (Thio_W_i ; n= 2) du site de Thio

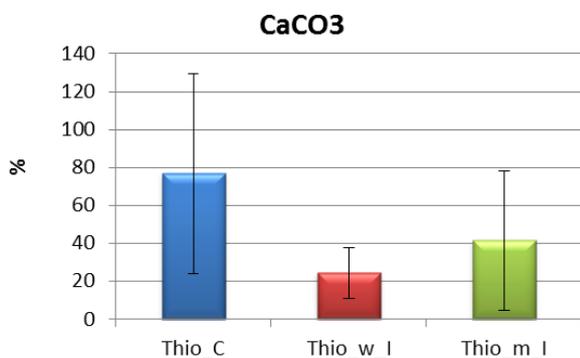


Figure 30 : Moyennes des teneurs en carbonates mesurées dans les sédiments échantillonnés dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 5) et du wharf (Thio_W ; n= 2) du site de Thio

La composition des sédiments et la teneur en carbonate montre des variations entre la zone d'impact et de contrôle. Comme attendu, les teneurs en carbonate mesurées dans les deux zones d'impact sont 2-3 fois moins importantes par rapport à celles relevées dans la zone de contrôle (Figure 30). En ce qui concerne les compositions granulométriques, les sédiments provenant de la zone de contrôle présentent moins des sables grossiers à moyens (Figure 29).

La comparaison temporelle des compositions granulométriques pour le site de Thio montre globalement une hausse de sables grossiers à moyens en 2018 par rapport à 2016, au détriment de fractions fines aux stations situées dans la zone d'impact. Seules aux stations ST09 et ST11 (zone de contrôle) la tendance s'inverse par une hausse de fractions fines. En ce qui concerne les teneurs en carbonate, l'on constate globalement une augmentation de 2016 à 2018 sauf aux stations ST02, ST04, ST05 et ST10 où les teneurs demeurent comparables entre les 2 campagnes, ne dépassant pas le seuil 20 % (Figure 31 et Figure 32).

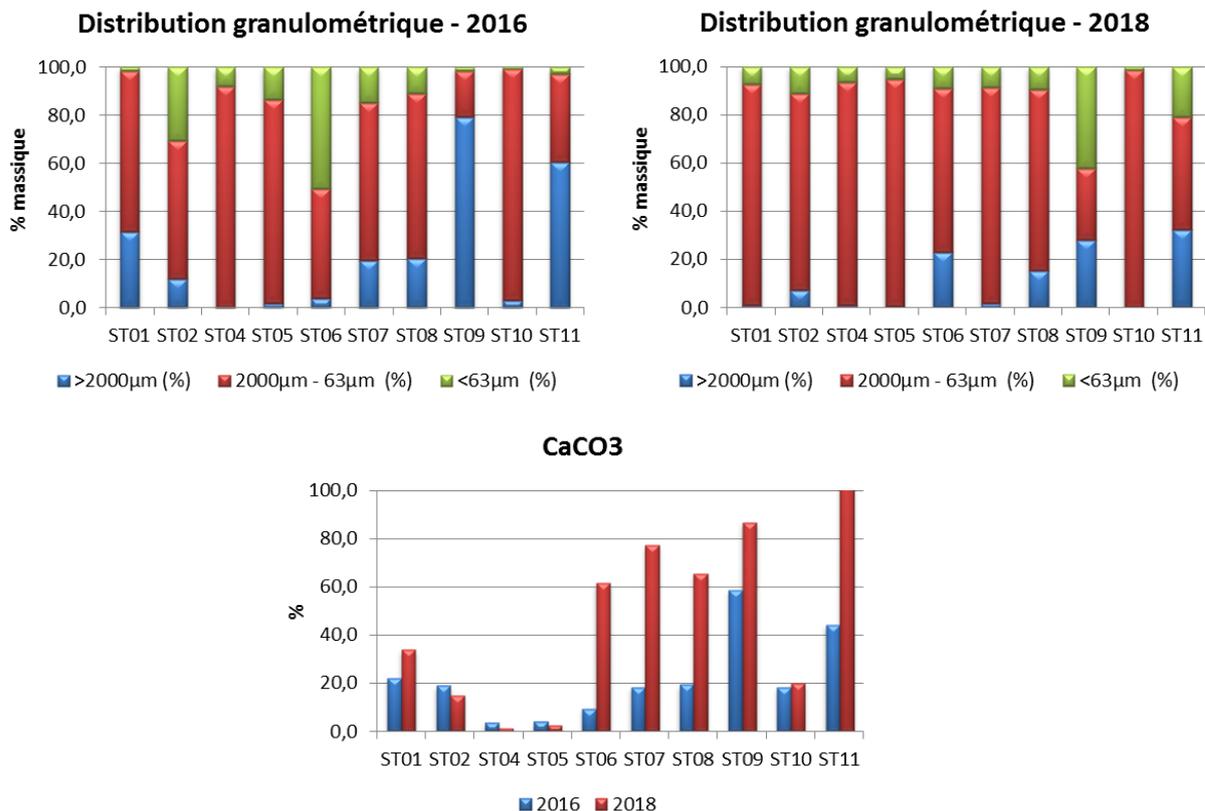


Figure 31 : Distributions granulométriques et teneurs en carbonate mesurées aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

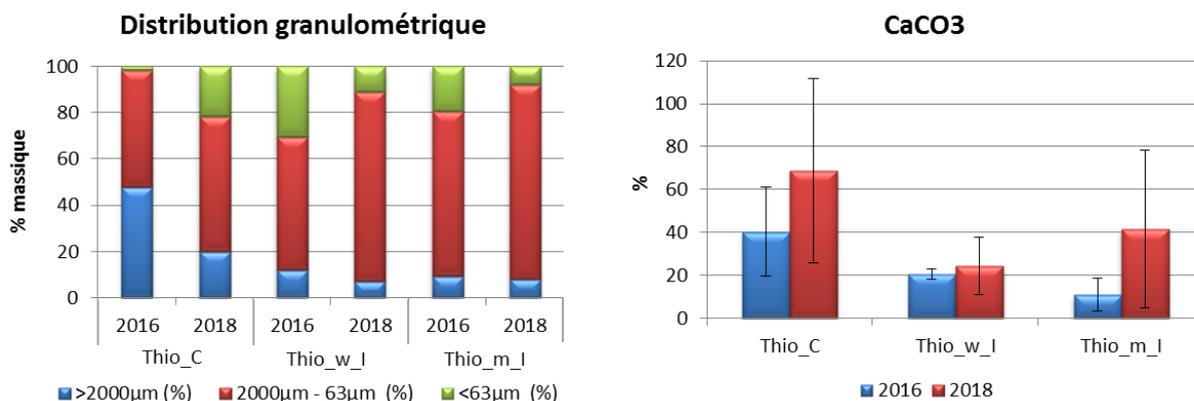


Figure 32 : Moyennes des pourcentages massiques des différentes classes granulométriques et des teneurs en carbonates dans les sédiments échantillonnés dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 5) et du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

VII.2. CONTAMINANTS DANS LES SÉDIMENTS

VII.2.1. Teneurs en métaux

Un atlas des planches cartographiques annexé au présent rapport présente de façon synthétique les concentrations de métaux dans les sédiments par zone échantillonnée.

De manière globale, les niveaux de concentrations mesurées permettent de classer les métaux selon l'ordre : Ni > Cr = Mn >>> Co >> Zn > Pb ≥ Cu >> Cd > Hg avec des variations spatiales bien établies (Tableau 34).

Parmi les 10 stations suivies, les concentrations maximales ont invariablement été mesurées à la station ST02. Pour certains éléments, par exemple Co, et Mn voire Cr et Ni, des concentrations aussi importantes ont également été relevées aux stations ST01, ST04 et ST05 et de manière étonnante à la ST10. Les minimales ont invariablement été relevées en ST09 et ST11. Les stations reliquats, quant à elles, présentent des concentrations comprises entre les valeurs extrêmes (Figure 33 ; Annexe VI).

Ces observations sont en accord les activités minières du site ; le littoral de Thio est concerné par les bassins versant miniers du Camp des Sapins (ST04), du Plateau (ST05) et de Dothio (ST06, ST07 et ST08). En revanche, pour la station ST10, à notre connaissance, les apports de métaux à cette station semblent liés à l'érosion naturelle des sols. Les impacts des activités du stockage du minerai et son transfert par voie maritime semblent être confirmés par les concentrations en Ni exceptionnellement hautes mesurées aux stations ST01 et ST02 en comparaison avec celles relevées aux autres stations du réseau du suivi (Figure 23).

Tableau 34 : Synthèse des concentrations en métaux pour les sédiments prélevés dans les stations du site de Thio

	Eléments (mg/Kg MS)								
	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Minimum	1,00	25	150	3,0	557	211	2	10	0,014
Maximum	2,00	376	3542	50,0	2381	6984	149	168	0,184
Moyenne	1,33	208	1635	16,0	1624	3030	26	65	0,082
Ecart-type	0,47	133	1294	14,4	598	2435	44	55	0,055
CV%	35	64	79	90	37	80	167	84	68

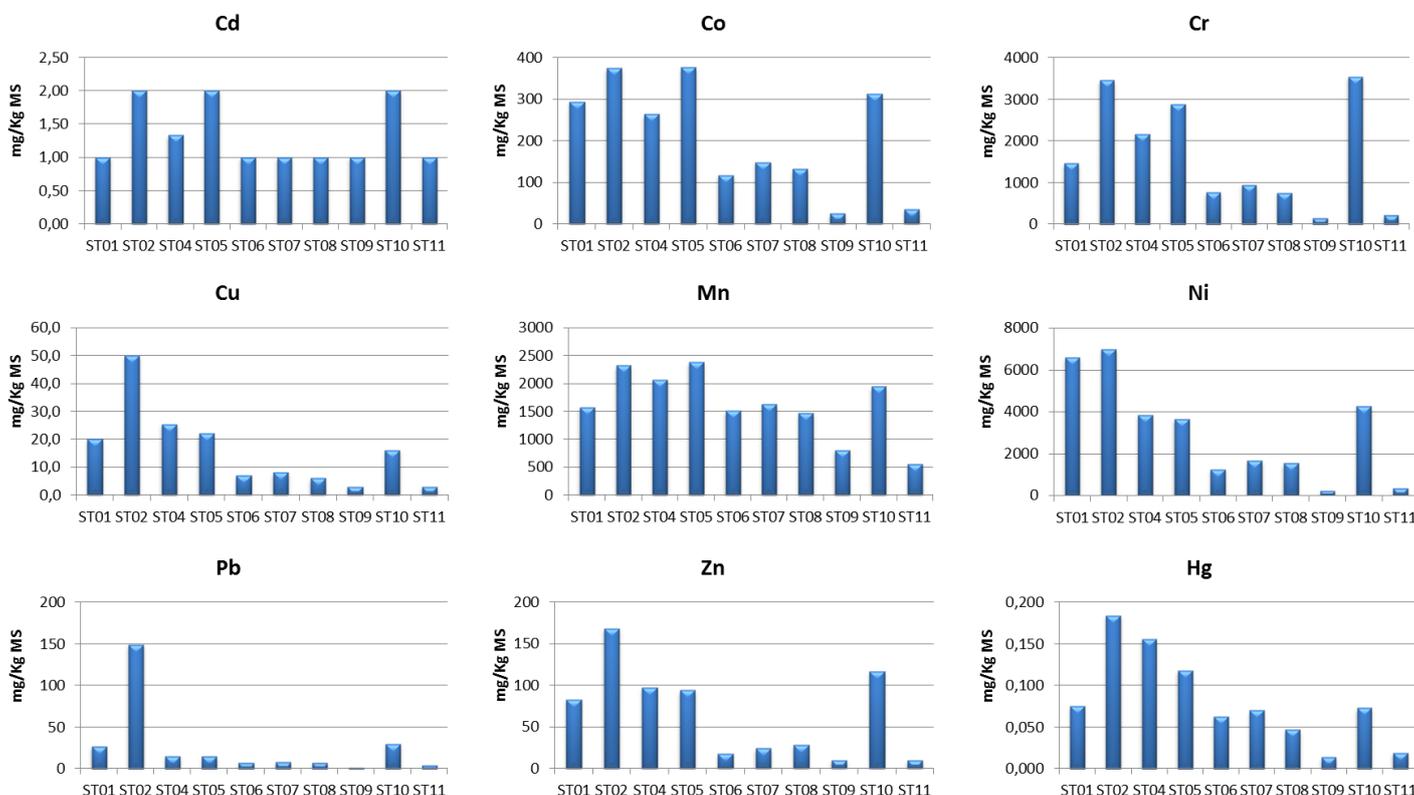


Figure 33 : Concentrations en métaux mesurées dans les sédiments prélevés aux stations de Thio

Rappel : L'interprétation des données est réalisée en moyennant, d'une part, les teneurs des stations ST04, ST05, ST06, ST07 et ST08 caractérisant la zone d'impact (Thio_M) et, d'autre part, les stations ST09, ST10 et ST11 caractérisant la zone de contrôle (Thio_C). A cela s'ajoute, la zone d'impact du wharf (Thio_W) caractérisée par les stations ST01 et ST02.

Sauf le Cd, dont les concentrations mesurées sont proches voire en dessous de la limite de quantification de la méthode d'analyse, les sédiments prélevés dans la zone d'impact du wharf montrent des concentrations en métaux plus élevées que celles des sédiments provenant de la zone de contrôle, notamment pour le Ni, tandis que celles mesurées dans la zone d'impact de la mine demeurent globalement comparables à celles de la zone de contrôle. Il est à noter que la zone de contrôle présente une variabilité importante des concentrations mesurées. Ces écart-types calculés sont attribués aux concentrations à minima 3 à 16 plus élevées à la station ST10 qu'aux ST09 et ST11 ; ces 3 stations caractérisant la zone de contrôle. (Figure 34).

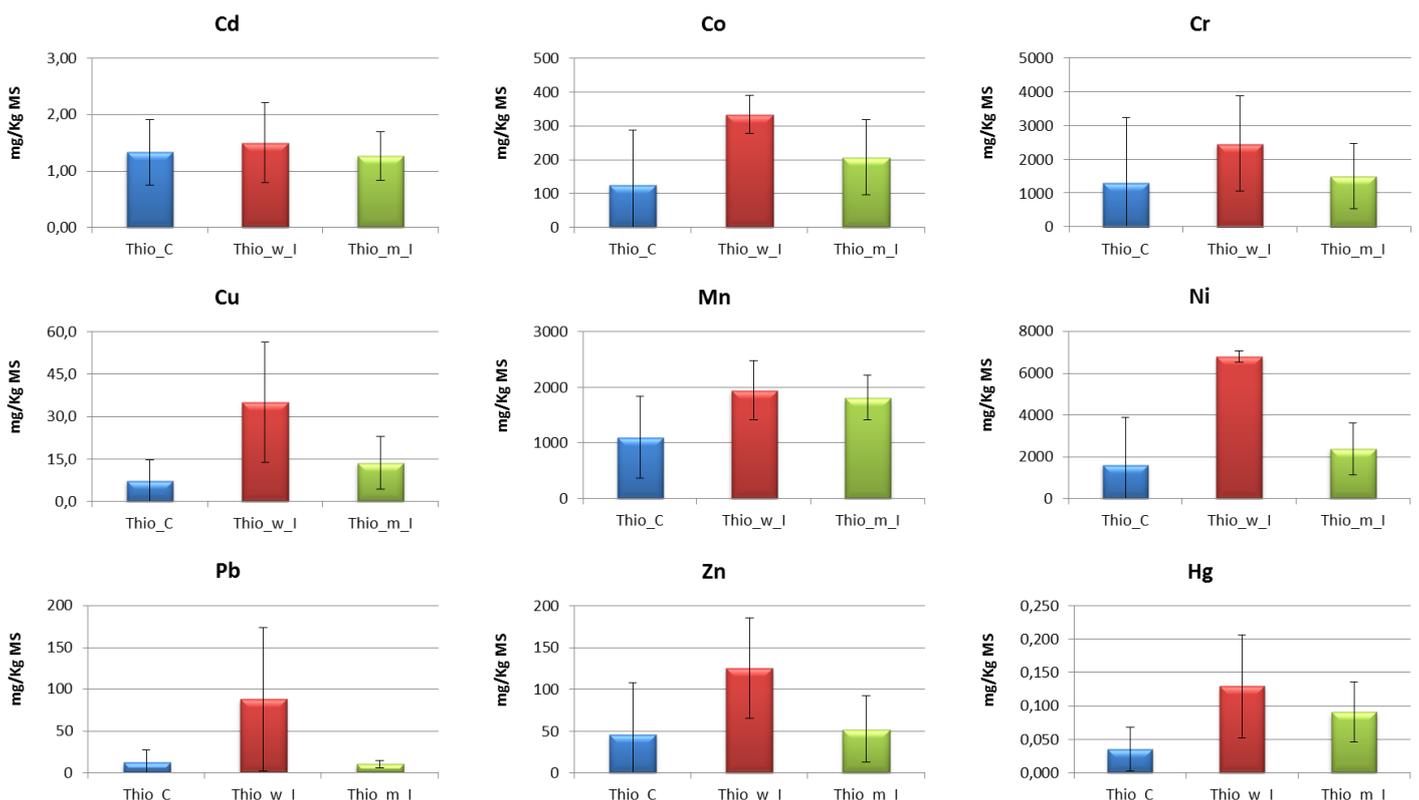


Figure 34 : Moyennes des concentrations pour les différents métaux mesurés dans les sédiments échantillonnés dans les zones d'impact (Thio_M ; n = 5 et Thio_W ; n = 2) et de contrôle (Thio_C ; n = 3) du site de Thio

Etant donné la nature géologique particulière de la Nouvelle-Calédonie, les teneurs en métaux dans les sédiments ne peuvent être comparées à des seuils de toxicité fixés dans d'autres pays. En revanche et à titre de comparaison, selon le Guide du CNRT (Beliiff *et al.*, 2011 ; Tableau 35 ; Annexe I), les teneurs en Co, Cr, Mn et Ni observées, correspondent :

- à des niveaux de concentrations inférieurs pour les stations ST06, ST07, ST08, ST09 et ST11 à ceux habituellement rencontrés dans les zones soumises à des influences terrigènes modérées ;
- à des niveaux de concentrations largement supérieurs pour la station ST01 à ceux habituellement rencontrés dans les zones soumises à des influences terrigènes modérées pour Co et Ni ; et
- à des niveaux de concentrations largement supérieurs pour la station ST02, ST04, ST05 et ST10 à ceux habituellement rencontrés dans les zones soumises à des influences terrigènes modérées pour Co, Mn et Ni.

Métaux dans les sédiments (µg/g)	Influence marine	Influence terrigène modérée
Co	73,0 ±8,9	176,3 ±7.7
Cr	2608 ±1014	7820 ±3520
Fe	86280 ±37080	193900 ±74900
Mn	662,5 ±6,4	1668 ±83
Ni	1080 ±50	2300 ±535

Tableau 35 : Valeurs de référence pour les concentrations en métaux dans les sédiments de surface dans les deux différentes zones d'influence du lagon de Nouvelle-Calédonie (Bélieff et al., 2011)

Note : En 2016, les concentrations des métaux dans les sédiments ont été déterminées par la méthode dite « fusion ». En 2018, la méthode dite « minéralisation à l'eau-régale », offrant plus de sensibilité et donc des limites de quantification plus basse, elle a été adoptée. Par conséquent, pour les éléments Cd, Pb et Zn dont les concentrations mesurées sont souvent faibles (proches ou en dessous de la limite de quantification), la divergence de ces limites ne permet pas d'effectuer une comparaison temporelle des concentrations entre les deux campagnes, excepté pour la station ST02 où les concentrations importantes du Pb et Zn ont été relevées en 2018. Les données obtenues en 2016 et 2018 sont tout de même fournies dans la Figure 35 à titre d'information.

Les comparaisons temporelles montrent une augmentation des concentrations de Hg quasi-globale en 2018 par rapport à 2016 pour le site de Thio, excepté pour les stations ST09 et ST11. Pour les métaux latéritiques, quelle que soit la zone (impact ou contrôle) les concentrations mesurées en 2018 sont, soit comparables, soit en baisse par rapport à 2016. Cette diminution est très significative aux stations ST06, ST07 et ST08 situées au nord vers la Pointe Putée pour le Co, Cr, et Ni et aux stations ST04 et ST05 situées aux embouchures des rivières Thio et Dothio pour le Mn ; ces stations constituant la zone d'impact de la mine. Seules les concentrations de Ni et dans une moindre mesure de Co ont augmenté dans les sédiments prélevés provenant de la zone d'impact du wharf (stations ST01 et ST02). Cette dernière présente également une augmentation significative pour les métaux anthropiques Cu, Pb et Zn ; hausse que l'on peut attribuer à la station ST02 (Figure 35 et Figure 36).

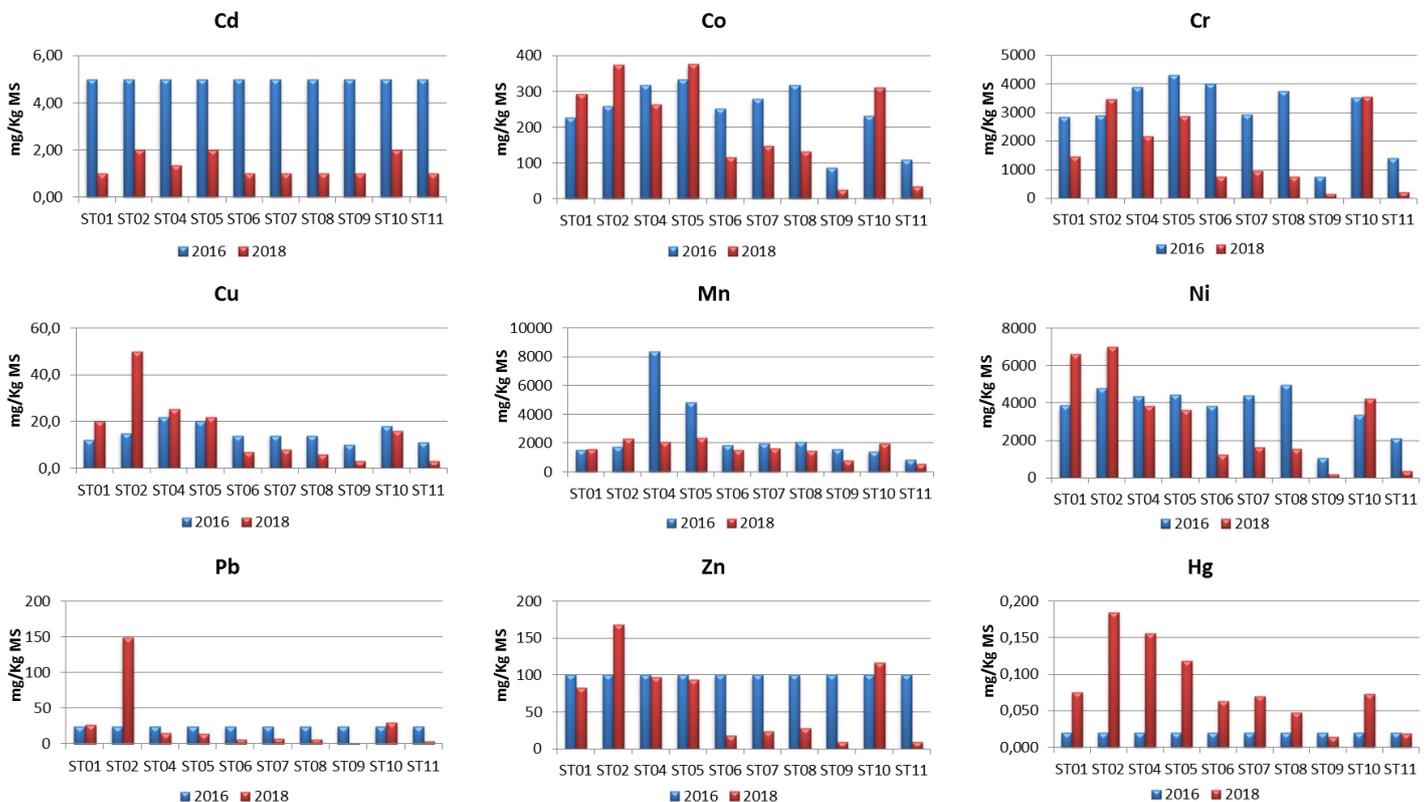


Figure 35 : Teneurs en métaux mesurées aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

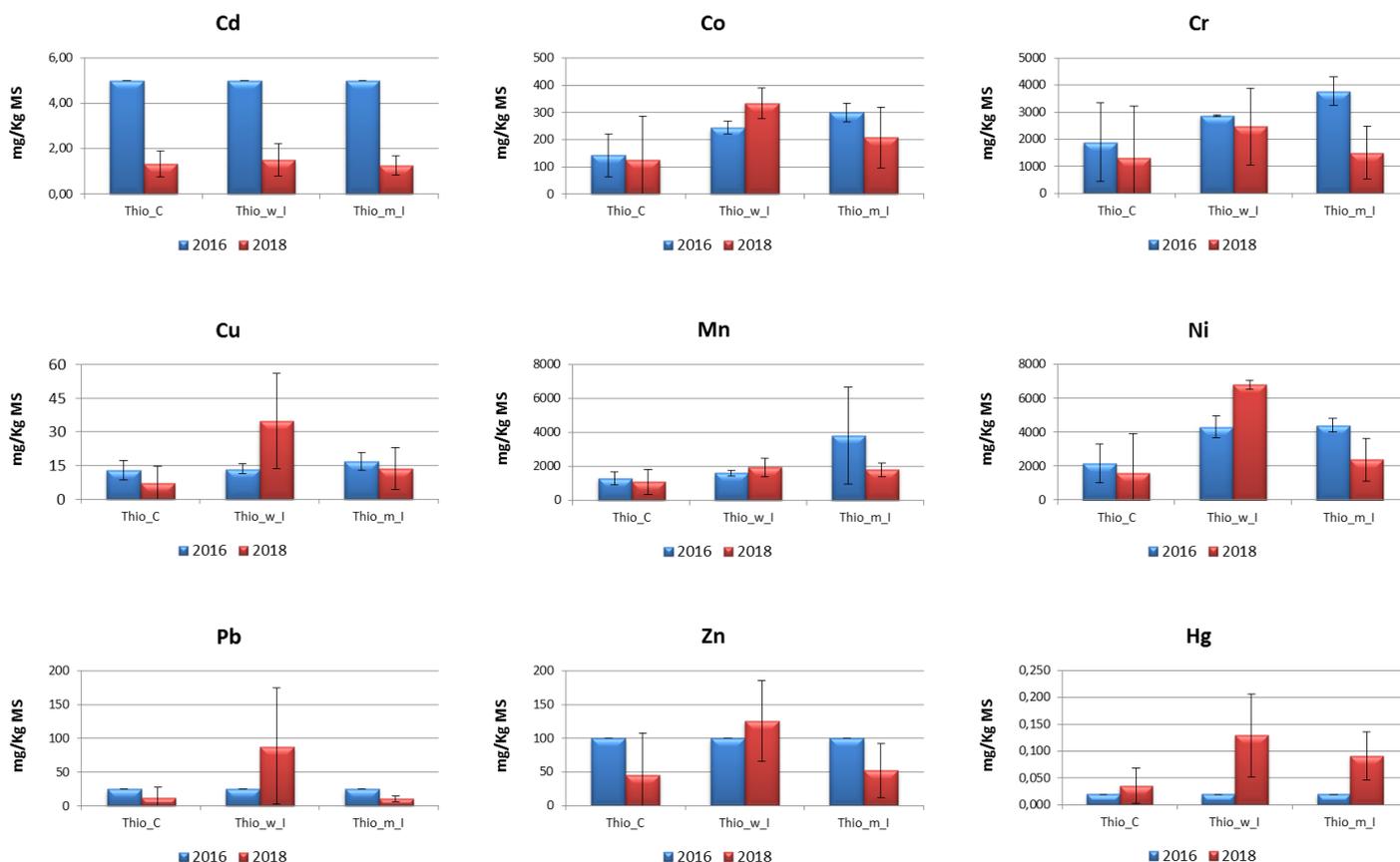


Figure 36 : Moyennes des concentrations pour les différents métaux mesurés dans les sédiments échantillonnés dans les zones d'impact (Thio_M ; n = 5 et Thio_W; n = 2) et de contrôle (Thio_C ; n = 3) du site de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

VII.2.2. Teneur en hydrocarbure

Les teneurs en HCT sont toutes inférieures à la limite de quantification de la méthode d'analyse, sauf pour la station ST02 située au niveau du wharf de chargement du minéral. Mis à part la station ST02 (zone d'impact du wharf) où une légère hausse de la concentration de HCT est constatée en 2018, aux autres stations du réseau du suivi, aucune évolution significative n'est observée depuis 2016 (Tableau 36, Figure 37 et Figure 38).

Rappel : L'interprétation des données est réalisée en moyennant, d'une part, les teneurs des stations ST04, ST05, ST06, ST07 et ST08 caractérisant la zone d'impact (Thio_M) et, d'autre part, les stations ST09, ST10 et ST11 caractérisant la zone de contrôle (Thio_C). A cela s'ajoute, la zone d'impact du wharf (Thio_W) caractérisée par les stations ST01 et ST02.

Tableau 36 : Teneurs en HCT aux stations de Thio

Stations	HCT (mg/Kg) MS
ST01	<15
ST02	21
ST04	<15
ST05	<15
ST06	<15
ST07	<15
ST08	<15
ST09	<15
ST10	<15
ST11	<15

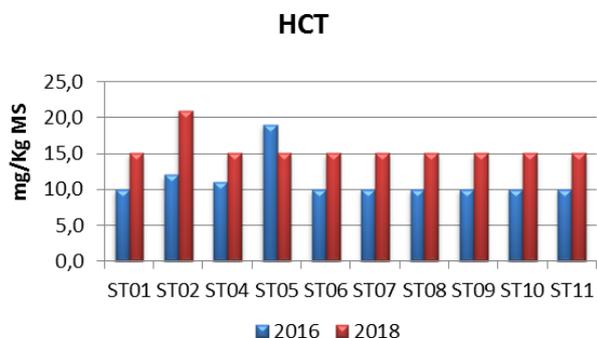


Figure 37 : Teneurs en HCT mesurées aux stations de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

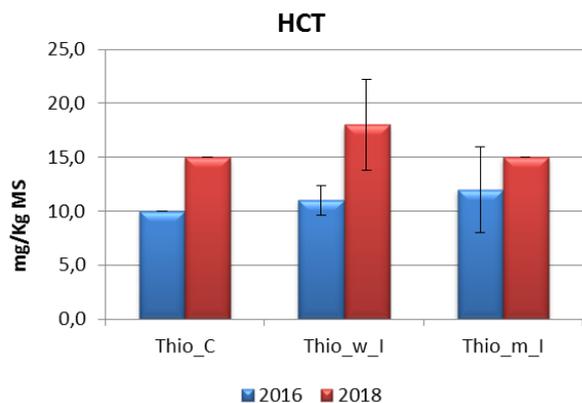


Figure 38 : Moyennes des teneurs en HCT mesurées dans les sédiments échantillonnés dans les zones d'impact (Thio_M ; n = 5 et Thio_W ; n = 2) et de contrôle (Thio_C ; n= 3) du site de Thio lors du suivi en 2016 et 2018

VIII. FLUX SEDIMENTAIRES

Les flux totaux particulaires et les teneurs en carbonates associées sont présentés dans le Tableau 37. La répartition des flux d'origines terrigène et marine est représentée dans la Figure 39.

Un atlas des planches cartographiques annexé au présent rapport présente de façon synthétique les flux d'origines terrestre et marine par zone échantillonnée.

Tableau 37 : Flux de particules et teneurs en carbonates dans les particules sédimentaires aux stations de Thio

Stations	Flux totaux (mg/cm ² /jour)	Taux CaCO ₃ (%)
ST01	9	22
ST02	7	22
ST04	82	3
ST05	167	0
ST06	-	-
ST07	9	19
ST08	18	22
ST09	8	44
ST10	33	38
ST11	4	33

Note : Les « tubes à sédiments » implantés à la station ST06 n'ont pas été retrouvés.

Les particules collectées, dans les conditions de prélèvement, montrent que ces dernières sont en très importantes quantités aux stations ST04 et ST05. Globalement, les particules d'origine terrigène dominent les MES collectées (> 56 %) et plus particulièrement aux stations ST04 et ST05 où la composition en carbonates est < 3%. Ainsi, les plus fortes densités de flux totaux et flux terrigènes sont enregistrées aux stations ST04 et ST05. Aux stations ST09, ST10 et ST11, cette influence terrigène est toujours dominante mais est toutefois amoindrie par les apports carbonatés plus importants (44, 38 et 33 %, respectivement) (Figure 39).

Rappel : L'interprétation des données est réalisée en moyennant, d'une part, les densités de flux des stations ST01 et ST02 caractérisant la zone d'impact du wharf (Thio_W) et, d'autre part, ST04, ST05, ST07 et ST08 caractérisant la zone d'impact de la mine (Thio_M). Les stations ST09, ST10 et ST11 sont identifiées comme correspondant à la zone de contrôle (Thio_C).

Comme le montre la Figure 40, les densités de flux carbonatés et terrigènes entre les deux zones d'impact et celle de contrôle montrent une différence notable avec toutefois des écart-types importants attribués aux stations ST04 et ST05 (impact mine) et à la station ST10 (contrôle). Néanmoins, ces résultats montrent l'importance des apports terrigènes dans la zone dite impactée par les activités minières sur le bassin versant.

A titre de comparaison, les densités de flux particulaires totaux observées correspondent, selon le Guide du CNRT (Beliiff *et al.*, 2011 ; Tableau 38 ; Annexe I) :

- à des niveaux de densités largement supérieurs aux maximas habituellement rencontrés à l'embouchure de creeks pour les stations ST04 et ST05 ; et
- à des niveaux de concentrations inférieurs aux maximas habituellement rencontrés aux abords de récifs frangeants pour les autres stations.

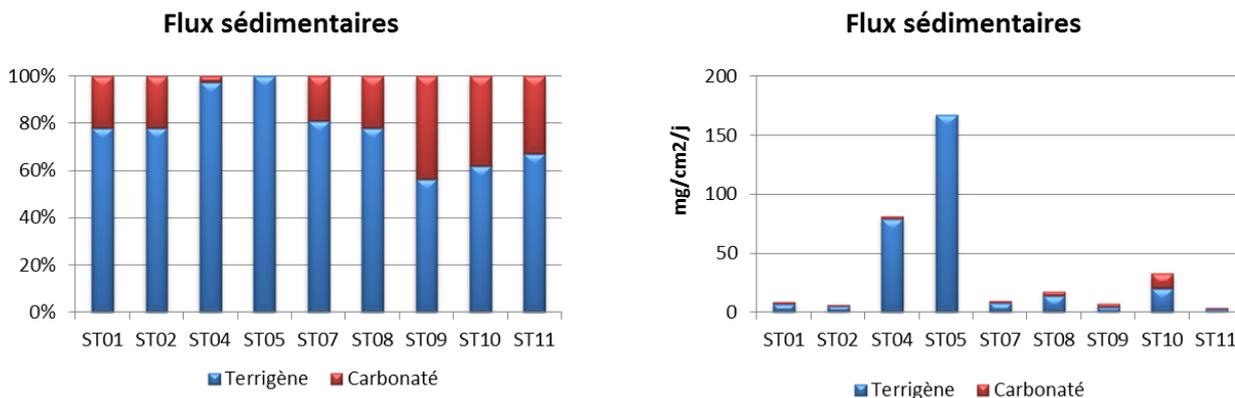


Figure 39 : Flux de particules terrigènes et carbonatées mesurés aux stations de Thio

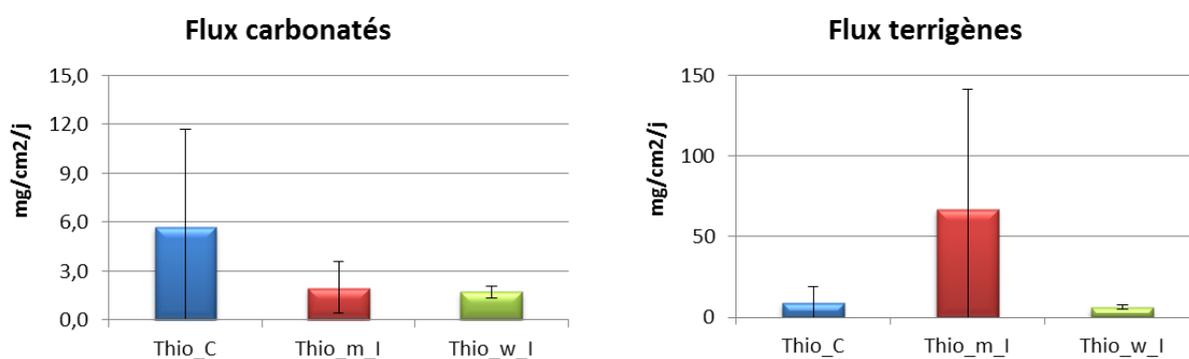


Figure 40 : Moyennes des densités des flux mesurées dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n = 4) et d'impact du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio

Flux (g/m²/j)	Fond de baie		Embouchure creeks		Abords récifs frangeants
	Saison sèche	S. humide	Saison sèche	S. humide	
Moyennes calculées	1,0 ± 0,6	1,6 ± 1,4	14,6 ± 7,4	46,1 ± 43,1	35,9 ± 33,3

Tableau 38: Valeurs de référence pour les flux de particules dans les trois différents types de milieux du lagon de Nouvelle-Calédonie (Bélieff *et al.*, 2011)

La comparaison temporelle des flux particulaires pour le site de Thio montre que les densités des flux totaux et terrigènes mesurées en 2018 sont en forte augmentation par rapport à 2016 et 2017, notamment aux stations ST04 et ST05 situées dans la zone de l'impact mine, et dans une moindre mesure à la station ST10 dite de contrôle (Figure 41 et Figure 42).

Les flux sédimentaires sont étroitement conditionnés par les régimes hydro-climatiques ayant régné pendant les périodes de collectes ; les apports terrigènes induits par les précipitations atmosphériques sur les bassins versants et la resuspension des sédiments sous l'action du vent et de la houle, voire la combinaison des deux. Il est à noter que la hauteur des précipitations en 2018, mesurée à la station Thio Plateau (98829101), est 4 et 60 fois plus élevée qu'en 2016 et 2017, respectivement (Figure 43). L'influence des précipitations sur les flux terrigènes est manifeste aux stations ST04 et ST05 situées dans l'aire d'expansion de la rivière Thio et Dothio, respectivement.

Note : Le suivi des flux de particules au moyen des « tubes à sédiment », méthode intégratrice, nécessiterait une étude détaillée (journalière) de l'évolution des conditions météorologiques, notamment pour les vents ayant régnés pour des périodes d'exposition strictement équivalente et notamment sur un plus grand jeu de données temporelles.

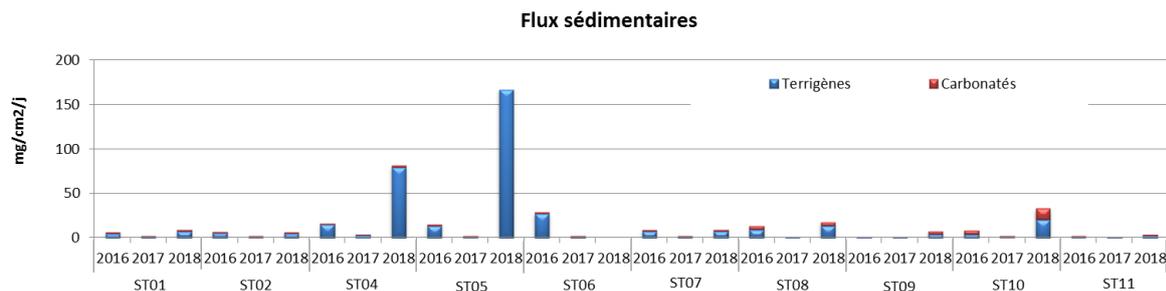


Figure 41 : Flux de particules terrigènes et carbonatées mesurés aux stations de Thio lors du suivi en 2016, 2017 et 2018

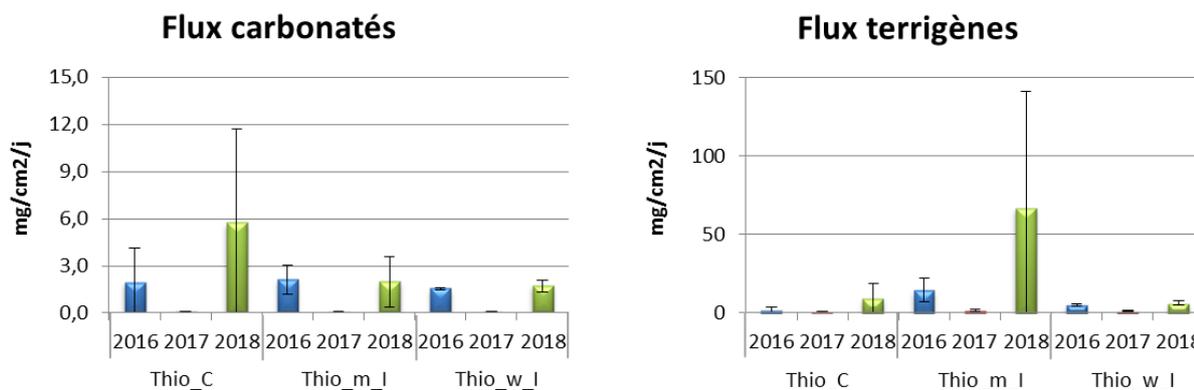


Figure 42 : Moyennes des densités des flux mesurées dans les zones de contrôle (Thio_C ; n = 3) et d'impact de la mine (Thio_M ; n= 4) et d'impact du wharf (Thio_W ; n = 2) du site de Thio lors du suivi en 2016, 2017 et 2018

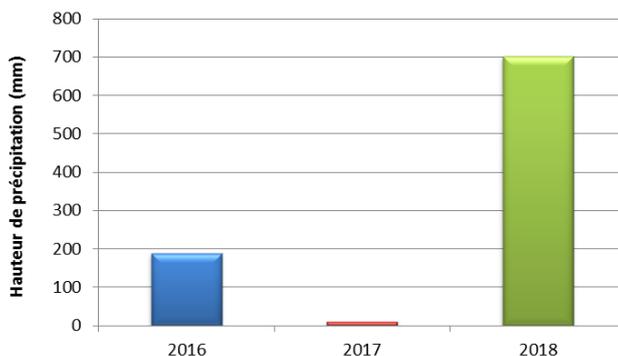


Figure 43 : Pluviométrie lors de la période d'immersion des « tubes à sédiments » aux stations de Thio en 2016, 2017 et 2018

IX. BIOACCUMULATION DANS LES ORGANISMES

L'ensemble des concentrations en métaux obtenues est présenté dans le Tableau 39. L'amplitude des niveaux de concentrations mesurés peut varier significativement selon l'espèce, l'élément et/ou la zone considérés.

Pour cette campagne à Thio, seuls les poissons ont été échantillonnés. Les métaux peuvent être classés selon leur niveau moyen de concentration de la manière suivante :

- Poisson (n=5): (Fe) > (Zn) > (As) > (Ni) = (Mn) > (Cr) > (Co) =(Cu) > (Hg) ; les concentrations de Cd, et Pb sont toutes en-dessous de la limite de quantification de la méthode utilisée.

En comparant les données obtenues entre les différentes espèces, *a priori*, la loche saumonée, un carnivore, accumulerait beaucoup plus l'Hg que les autres poissons qui sont herbivores de régime (Tableau 39).

Tableau 39 : Tableau des teneurs métalliques mesurées dans les organismes bio-accumulateurs prélevés aux stations de Thio

Station	Espèce	Nom commun	Métaux (µg/g MS)										
			As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
ST07	<i>Scarus rivulatus</i>	Perroquet	3,28	<0,100	0,28	0,33	0,960	20,0	0,58	<0,40	<1,00	10,0	0,020
ST08	<i>Scarus rivulatus</i>	Perroquet	3,80	<0,100	0,64	1,72	0,620	77,4	1,79	3,26	<1,00	11,1	0,038
ST10	<i>Acanthurus dussumier</i>	Picot kanak	2,07	<0,100	1,73	0,32	0,340	<20,0	0,59	0,44	<1,00	<10,0	0,009
ST11	<i>Scarus rivulatus</i>	Perroquet	3,17	<0,100	0,25	0,28	0,420	<20,0	0,43	<0,40	<1,00	10,9	0,018
ST11	<i>Plectropus leopardus</i>	Loche saumonée	3,27	<0,100	<0,20	0,65	0,350	35,6	0,86	0,44	<1,00	12,3	0,798

Note : Parmi les poissons échantillonnés, l'espèce *Scarus rivulatus* montre une meilleure représentativité avec des spécimens prélevés sur 3 des 4 sites ciblés. De ce fait, seules les données obtenues avec ce poisson sont interprétées pour la distribution des concentrations en métaux selon les zones d'impact et de contrôle. Ainsi, les teneurs mesurées dans le perroquet provenant de la station ST11 caractérisent la zone de contrôle (Thio_C ; n=1) et celles de perroquets prélevés aux stations ST07 et ST08 la zone d'impact de la mine (Thio_M_i ; n=2).

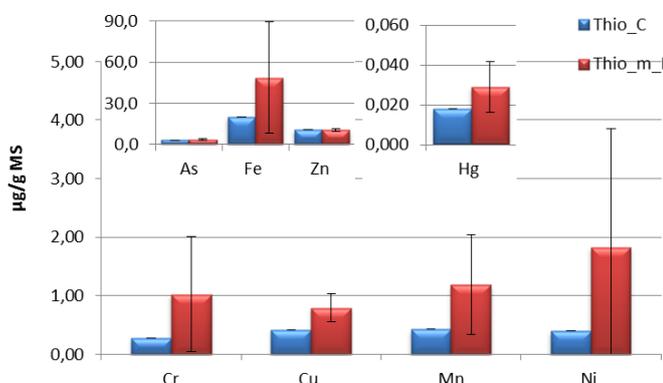


Figure 44 : Concentrations en métaux bioaccumulés dans les perroquets prélevés dans la zone de contrôle (Thio_C ; n = 1) et dans la zone d'impact de la mine (Thio_M ; n = 2) du site de Thio

Il apparaît que, excepté As et Zn, dont les concentrations dans les chairs des perroquets sont comparables entre les zones d'impact et de contrôle, celles d'autres métaux varient au détriment de la zone d'impact. En effet, les deux individus prélevés dans cette zone présentent des concentrations plus élevées notamment pour Cu, Hg et Mn. Quant à Cd et Pb, qu'elle que soit la zone, ils sont mesurés à des niveaux inférieurs aux limites de quantification de la méthode.

Plus globalement, les contaminants prioritaires d'un point de vue toxique (Cd, Pb et Hg), sont généralement rencontrés en faibles concentrations dans l'environnement latéritique de Nouvelle-Calédonie, et sont majoritairement d'origine anthropique. Au regard des seuils sanitaires réglementaires européens fixés pour les denrées alimentaires (CE 1881/2006) (Tableau 39) :

- les concentrations moyennes de Cd, Hg et Pb mesurées dans les chairs des poissons récoltés sont toutes suffisamment faibles pour être **inférieures aux seuils sanitaires**.

Tableau 40 : Teneurs maximales, des contaminants métalliques prioritaires, fixées pour les denrées alimentaires (CE 1881/2006)

Organisme	Seuil de toxicité (µg/g MS)		
	Cd	Pb	Hg
Chair de poisson	0,25	1,5	2,5
Crustacé	2,5	2,5	2,5
Mollusque	5,0	7,5	2,5

SYNTHESE ET DISCUSSION

I. CONTEXTE

I.1. CONTEXTE DE LA MISE EN PLACE DU SUIVI

Dans le cadre de la régularisation de ses sites miniers vis-à-vis de la loi de pays du 16 Avril 2009, la SLN a fait réaliser un état initial du milieu marin face à ses installations du bord de mer à Thio en 2013. En 2016, la SLN a mandaté SOPRONER afin de mettre en place un réseau de suivi à long terme sur la base d'un cahier des charges détaillé (SLN, 2015). Le réseau de suivi comporte 10 stations réparties en 3 zones définies selon leur influence minière : une zone face aux installations de bord de mer (Thio_W), une zone face aux mines (Thio_M) et une zone de contrôle (Thio_C).

Ce rapport constitue le second rapport d'étape suivant la mise en place du suivi, basé sur la campagne réalisée en 2018. Il comporte une évaluation de l'évolution temporelle du milieu entre 2016 et 2018, mais également entre 2013, 2016 et 2018 pour la zone de Thio_W uniquement.

I.2. HISTORIQUE DES PHÉNOMÈNES NATURELS EXTRÊMES

La période de réalisation de nos campagnes de terrain est marquée par l'occurrence de phénomènes naturels extrêmes (Figure 45) avec :

- en 2016 une anomalie thermique à l'origine d'un épisode massif de blanchissement corallien ;
- le passage de deux cyclones (Cook et Donna) en 2017, dont Cook qui a traversé la grande terre au niveau de Ponerihouen, créant une forte houle sur toute la côte Est.

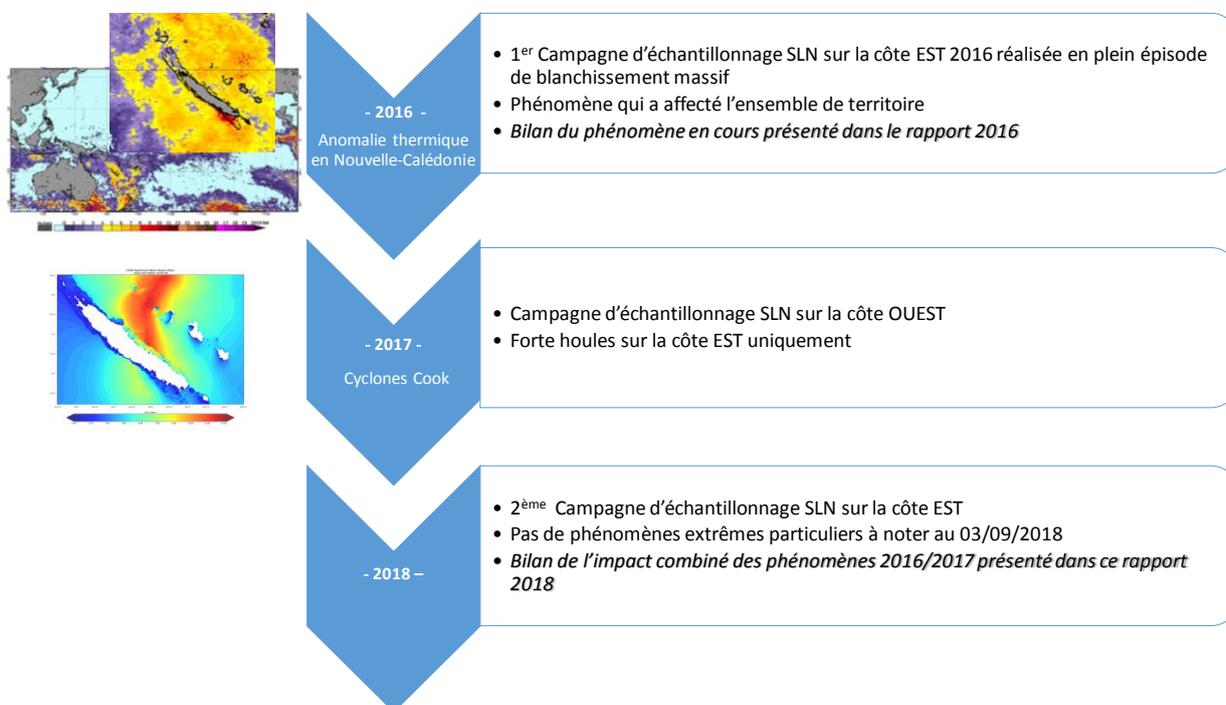


Figure 45 : Chronologie des phénomènes naturels extrêmes sur la période 2016/2018 et campagne d'échantillonnage des écosystèmes coralliens pour la SLN

Ainsi ces phénomènes constituent des perturbations majeures des habitats coralliens qui ont touché les récifs échantillonnés. Ces phénomènes se rajoutent aux pressions (Figure 46) pouvant s'exercer sur les récifs en lien avec les activités socio-économique de la zone telles que celles de la SLN.

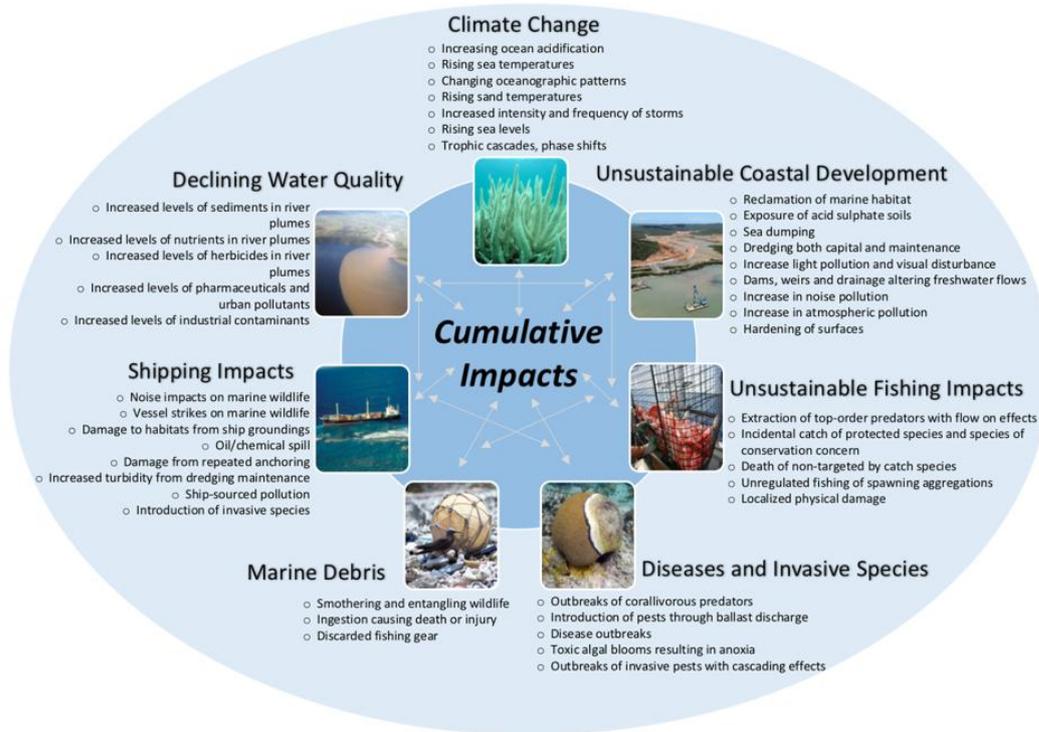


Figure 46 : Diagramme présentant les impacts pouvant potentiellement survenir (isolément ou cumulativement) sur les écosystèmes coralliens (Source : Richards & Day 2018)

La chronologie de l'échantillonnage (Figure 45), avec une mission tous les deux ans, ne permet malheureusement pas d'appréhender la part de l'impact liée au blanchissement. Aussi, les évolutions temporelles mises en évidence conjuguent les effets combinés des répercussions de ces phénomènes extrêmes.

Il convient aussi de souligner que d'un point de vue statistique ces phénomènes extrêmes et leurs impacts sont de nature à réduire la puissance statistique de détection d'impacts chroniques, plus subtiles, tels que ceux pouvant être induits par l'exploitation minière qui constitue la principale motivation du suivi.

II. SUIVI BIOLOGIQUE DU MILIEU

Concernant le suivi biologique, la zone d'étude a été classée en 3 zones d'influence en fonction de leur situation géographique vis-à-vis des différents bassins versants miniers et structures industrielles de la SLN:

- La zone d'impact liée à la mine de Thio-Plateau et Do-Thio nommée Thio_W
- La zone d'impact liée au convoyeur de minerai, nommée Thio_M
- La zone de contrôle au sud, nommée Thio_C

II.1. SUBSTRAT ET LÉSIONS CORALLIENNES

Le rapport de campagne de 2016 avait souligné la faible couverture corallienne présente en zone de contrôle comparativement à celle présente au niveau des deux zones sous l'influence des activités de la SLN. Aussi ces différences sont de nature à engendrer de « faux signaux d'impact » comme ceux constatés ci-dessous du fait d'une plus forte sensibilité aux actions mécaniques d'assemblages coralliens au recouvrement élevé, de surcroît dominés par le genre *Acropora*.

La comparaison de la zone de contrôle (Thio_C) et de la zone face à la mine (Thio_M) entre 2016 et 2018 fait apparaître un signal d'impact sur la zone d'impact au niveau des couvertures de coraux totaux et *Acroporidae* liés à une plus forte dégradation de la couverture de coraux totaux et *Acroporidae* face à la mine qu'en zone de contrôle. Elle passe de 11 à 6% en contrôle (Thio_C) et de 46 à 17% face à la mine (Thio_M) en grande partie à cause de la perte de coraux *Acroporidae* du genre *Acropora* de forme branchus, digités et tabulaires. En 2016, pendant l'épisode de blanchissement massif, la couverture de coraux blanchis était inférieure à 2% dans chaque zone, montrant ainsi l'implication d'autres perturbations dans cette perte de couverture corallienne. La forte perte de coraux dont les formes sont sensibles aux perturbations physiques (houle, vagues) semble montrer un fort impact du cyclone Cook (Avril 2017) dont la trajectoire est passée sur la côte Est au niveau de Ponerihouen.

Sur la zone du convoyeur (Thio_W), la même dégradation est observée en 2018 avec une forte baisse de couverture corallienne (de 58% en 2016 à 12% à 2018) et la disparition quasiment totale de coraux *Acroporidae* (47% à 5%), principalement de forme branchues, digitées et tabulaires du genre *Acropora*. Si la couverture de coraux blanchis sur ces stations était plus élevée que face à la mine en 2016 (environ 8% à proximité du convoyeur), les observations faites en 2018, avec la présence de coraux massifs de grande taille retournés (Figure 47), confirment également l'implication du cyclone Cook dans la dégradation observée. La zone du convoyeur avait été échantillonnée en 2013 lors de l'état initial face aux installations du bord de mer (SOPRONER 2016) et peu d'évolutions avaient été observées entre 2013 et 2016, avec une couverture corallienne élevée, florissante et stable à ces deux années.

L'analyse des lésions coralliennes est cohérente avec celles issues du LIT avec une prévalence de blanchissement plus élevée en 2016 dans chaque zone qu'en 2018. Si les lésions de prédation, pigmentation, malformations coralliennes et white syndrome ne montrent pas d'évolutions significatives au sein des zones, celles liées à la sédimentation/compétition avec les algues ont augmenté dans chaque zone, et plus particulièrement au niveau du convoyeur. La colonisation des coraux morts, suite à l'épisode de blanchissement et au cyclone Cook, par de la turf alguaire et des macrolagues du genre *Bornetella* (Figure 47) explique cette augmentation. Indépendamment de cela la plus faible prévalence des lésions liées à la sédimentation en zone de contrôle est cohérente avec le zonage réalisé.

Ainsi, l'analyse de type Contrôle-Impact réalisée entre 2016 et 2018 sur les substrats fait apparaître un fort impact en zone d'influence des activités de la SLN ((Thio_M) & (Thio_W)) qui ne trouve pas son origine dans les activités de l'industriel. Ces impacts différentiels sont plus à relier aux impacts conjugués de l'épisode de blanchissement corallien et au cyclone Cook qui ont agi de manière plus intense sur les habitats sensibles, bénéficiant d'une couverture corallienne élevée et dominée par le genre *Acropora*.

Enfin, la prévalence élevée de lésions liées à la sédimentation, confirmée par un taux de sédimentation élevé dans les tubes, particulièrement à l'embouchure de la rivière Kua (Poro_RF_KUA) et face au village de Poro (Poro_RF), témoigne d'une pression sédimentaire qui s'ajoute aux pressions ayant impacté les coraux.



Figure 47 : Photographie d'une colonie massive de Porites renversée probablement à la suite du cyclone Cook face au convoyeur (gauche) et des signaux de récupération de coraux branchus, en forte compétition avec les algues du genre Bornetella qui ont colonisé la zone suite à la perte de couverture corallienne (droite)

Quelques signaux de récupération « post blanchissement et cyclone Cook » ont été observés, notamment sur la station ST01, avec la présence de quelques colonies de petite taille (15cm environ) d'*Acropora* branchus (Figure 47). Sans la répétition de perturbations majeures dans les années à venir (blanchissement, cyclones, *Acanthaster*), ces récifs pourront évoluer lentement vers une récupération de leur couverture corallienne.

II.2. MACROBENTHOS DE FONDS MEUBLES

Les prélèvements de carottes de sédiments dans le champ proche des stations ne permettent pas la réalisation d'une expertise pertinente dans le cadre du suivi. En 2016, 77% (23/30) des prélèvements sont exempts de tout organisme vivant et les 23% restants ne sont généralement constitués que d'un seul organisme identifié au niveau du genre. En 2018, une légère augmentation de la présence d'organismes dans les carottes est observée avec 57% (17/30) des échantillons exempts d'organismes vivants, le restant contenant généralement une seule espèce à faible densité.

Malgré cette légère augmentation de densité, ces résultats confirment une certaine pauvreté de la faune benthique dans les carottes et montrent que la stratégie d'échantillonnage pour ce type d'étude n'est pas adaptée. En effet, ces prélèvements ont été réalisés à proximité du point de départ de chacune de nos stations, qui pour la grande majorité d'entre elles, sont installées dans des zones coralliennes où les cuvettes sédimentaires sont souvent rares et difficilement pénétrables avec le carottier du fait des nombreux débris coralliens.

De plus, les récifs frangeants de Thio abritent de grandes quantités d'algues du genre *Halimeda* qui sont connues pour terminer leur vie en déposant leurs feuilles calcaires qui se mélangent aux sédiments. Ce mélange est curieusement très stérile et ne favorise pas du tout la présence d'une grande diversité, que l'on peut trouver sans la présence de ces algues.

Par ailleurs, les organismes récoltés vivants sont le plus souvent indéterminables aux delà du Groupe par des experts locaux (Laboute comm. pers.) et probablement même par des experts internationaux.

Ces nombreuses contraintes sur l'étude du macrobenthos de fonds meuble remettent en question sa pertinence pour ce type de suivi sur la côte Est et induisent des recommandations étayées dans le rapport préconisations.

II.3. MACROBENTHOS DE FOND DUR

Dans un premier temps, une analyse de l'évolution sur les densités entre 2016 et 2018 des assemblages d'invertébrés à l'échelle de la communauté macrobenthique (Mollusques, Vers, Crustacés et Echinodermes) a été réalisée. Les résultats ont montré, d'une part, l'absence de signal d'impact de la SLN. Les résultats mettent, d'autre part, en évidence l'existence d'une évolution temporelle significative de ces peuplements sur toute la zone. Ces évolutions trouvent probablement leur origine du fait de la perte d'habitat constatée entre 2016 et 2018, notamment la baisse des densités des Crustacés sur l'ensemble des récifs échantillonnés. Ce constat d'évolution temporelle ne se retrouve pas au niveau de la diversité qui ne présente pas d'évolution significative sur la période.

L'analyse des données de densité par groupe ne montre pas de signal d'impact de la SLN à l'exception :

- des Crustacés sur Thio_W, où une forte diminution de densité (15250 à 3333 indiv/ha) expliquée par le sous-groupe des Maxillopoda (genre *Nobia* exclusivement) et des Décapodes (genre *Trapezia* et *Calcinus* principalement). Toutefois, ce signal d'impact est à relativiser puisque ces sous-groupes retrouvent des niveaux de densités similaires à ceux estimés en 2013.
- des Echinodermes sur Thio_M du fait d'une augmentation de densités sur cette zone expliquée par le sous-groupe des Astérides et des Crinoïdes qui ne saurait être interprété comme un réel signal d'impact.

Les évolutions temporelles significatives mises en évidence par l'analyse des groupes et sous-groupes sont en cohérence avec celle identifiées à l'échelle des communautés notamment les diminutions des densités des Crustacés qui trouvent une explication dans la perte d'habitat corallien.

Enfin, les espèces corallivores (*Acanthaster*, *Drupella*, *Coralliophila*) ne montrent pas de signes de prolifération et aucune évolution particulière de densité n'est observée sur les bénitiers.

Aussi si la dégradation de l'habitat corallien sur l'ensemble de la zone (consécutif au blanchissement combiné au passage du cyclone Cook) semble s'être répercutée sur les communautés macrobenthiques, la prochaine campagne apparaît primordiale pour mieux appréhender la trajectoire conjointe des habitats et de la communauté d'invertébrés échantillonnés.

II.4. ICTHYOLOGIE

L'état initial du site de Thio réalisé en 2016 avait fait apparaître que les zones de Thio_M et Thio_W (zones sous influence) présentaient des caractéristiques écologiques et des profils fonctionnels similaires et typiques des peuplements ichthyologiques de récifs frangeants exposés, tels que ceux retrouvés sur l'ensemble du site. Ces caractéristiques suggéraient *a priori* un état écologique satisfaisant.

La zone Thio_C (zone de référence) avait montré de légères différences dans la structuration écologique de son ichtyofaune, notamment concernant les Chaetodontidae (densité, biomasse et richesse spécifique inférieures) et les herbivores (richesse spécifique supérieure, se répercutant sur les niveaux en espèces commerciales), en lien avec les caractéristiques des habitats dans cette zone (recouvrement algal supérieur et recouvrement en coraux vivants inférieur aux deux autres zones).

Les résultats issus des observations réalisées en 2018 et permettant à présent d'appréhender des évolutions temporelles à plan d'échantillonnage constant, ont pu être analysés *via* une série de modélisations de type BACI (*Before/After-Control/Impact*). Cette approche statistique, rendue possible par la structuration de l'échantillonnage sur ce site (présence d'une zone de référence dédiée et réplification suffisante), a pu être effectuée pour la première fois depuis la mise en place du plan de suivi actuel en 2016. Tel que mentionné dans les méthodologies, et bien que des résultats intéressants aient pu être examinés dès maintenant, disposer de seulement deux années de données ne génère qu'une puissance de diagnostic limitée, et une campagne supplémentaire devra *a minima* être nécessaire afin de rendre les analyses de détection d'impact pleinement opérationnelles. Ceci est d'autant plus vrai concernant les peuplements biologiques mobiles (tels que l'ichtyofaune et une partie du macrobenthos) qui sont souvent caractérisées par une importante variabilité temporelle et impliquent de disposer de séries temporelles plus longues pour permettre une étude rigoureuse des tendances.

S'agissant de **Thio_M**, les résultats obtenus à l'issue des modélisations BACI suggèrent une absence de signal d'impact notable sur cette zone, où aucun paramètre n'a montré une significativité de l'interaction « zone x année ».

Pour toute variable et sur tout biotope, l'absence de variation statistique significative au cours d'une période de suivi suggère que la variable en question est restée stable, tant concernant de possibles variations ponctuelles que concernant des tendances générales continues à la hausse ou à la baisse. Dans certains cas, l'examen graphique peut certes suggérer des variations apparentes entre les valeurs moyennes des différentes années, mais il convient alors de considérer le niveau de variabilité spatio-temporelle correspondant à ces valeurs (illustré par les écart-types ou les intervalles de confiance pour les moyennes). En ce sens, l'absence de significativité statistique signifie que les évolutions éventuellement observées ne reflètent pas de réel changement et que le paramètre peut être considéré comme stable en regard de ses fluctuations naturelles.

Concernant **Thio_W**, trois paramètres ont présenté une significativité de l'interaction « zone x année », tous concernant directement les Chaetodontidae (densité, biomasse, et richesse spécifique de cette famille indicatrice). Bien que l'amplitude de ces variations soit limitée, notamment dans les cas de la densité et de la biomasse, leur concomitance sur l'ensemble des paramètres de cette famille et leur profil d'évolution laisse suggérer un signal d'impact.

Ne se répercutant pas sur les autres caractéristiques de l'ichtyofaune (l'ensemble des autres paramètres ont montré une absence de significativité du facteur « zone x année »), le niveau de perturbation peut être considéré, dans l'état actuel du suivi, comme faible. Il conviendra toutefois de surveiller l'évolution de cette tendance dès la prochaine campagne sur ce site (l'obtention d'un troisième point d'observation sera alors plus propice à l'interprétation d'une possible tendance de perturbation sur ce groupe).

Ces résultats sont à mettre en perspective des résultats obtenus concernant les habitats coralliens. Ceux-ci ont en effet subi des dégradations très significatives entre 2016 et 2018, notamment suite à un épisode extrême de blanchissement coralliens et au cyclone Cook sur cette période (en particulier en zones sous influence Thio_M et Thio_W). A ce titre, le niveau de répercussion constaté sur l'ichtyofaune apparaît plus limité que ce qui aurait pu être attendu, étant donné les liens forts existant entre ichtyofaune et habitats coralliens (Ohman & Rajasuriya 1998, Syms & Jones 2000). Là encore, l'obtention d'une troisième année de données permettra de disposer d'une série temporelle plus informative pour étudier la trajectoire conjointe des habitats et de l'ichtyofaune sur ce site, et d'évaluer avec davantage de recul la relative résistance de l'ichtyofaune locale vis-à-vis de la récente dégradation de son habitat.

III. SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE

III.1. CONTRÔLE QUALITÉ

La justesse et la fidélité (dans les conditions de répétabilité et de reproductibilité) des méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse des sédiments ont été vérifiées par diverses procédures de contrôle qualité. Ainsi l'interprétation des données analytiques, dans le cadre de cette étude, a pu se baser sur des données fiables.

III.2. QUALITÉ DES EAUX

D'après le Guide du CNRT (Beliiff *et al.*, 2011), dans les conditions de prélèvements rencontrées, les mesures de la qualité des masses d'eau suggèrent que pour les paramètres de turbidité, les stations de Thio montrent un niveau de perturbation « normal ».

Cette analyse de la **qualité des eaux**, faisant l'objet de la deuxième évaluation de ce suivi (campagnes 2016 et 2018), elle ne permet pas d'établir une relation de causalité ; l'interprétation des résultats à ce stade du suivi est donc pauvre quant à l'évolution spatio-temporelle d'un impact potentiel.

III.3. QUALITÉ DES SÉDIMENTS

Les sédiments de Thio sont caractérisés, en moyenne, par des sables grossiers à moyens (2000 – 63 µm) dominants. Les compositions sédimentaires aux stations ST02, ST04 et ST05 et ST10 voire ST01 sont très peu carbonatées ce qui dénote une influence majoritairement terrigène à ces stations. Les analyses des métaux confirment cette observation ; les sédiments sont plus riches en métaux. En ce qui concerne les mesures de HCT, elles sont toutes en-dessous de la limite de quantification sauf pour la station ST02.

Cette analyse de la **qualité des sédiments**, faisant l'objet de la deuxième évaluation de ce suivi (campagnes 2016 et 2018), elle ne permet pas d'établir une relation de causalité, l'interprétation des résultats est donc pauvre quant à l'évolution spatio-temporelle d'un impact potentiel. Les seules observations pertinentes que l'on peut mettre en évidence, à ce stade du suivi, sont :

- une hausse quasi-globale en Hg de 2016 à 2018.
- une hausse des concentrations en Co, Cu, Ni, Pb et Zn Ni de 2016 à 2018 à la station ST02 de 2016 à 2018 ;
- une hausse en Co et Ni mesurée à la station ST01 de 2016 à 2018 ; et
- une baisse très significative aux stations ST06, ST07 et ST08 en Co, Cr, et Ni et aux ST04 et ST05 pour le Mn de 2016 à 2018.

D'après le Guide du CNRT (Beliiff *et al.*, 2011), dans les conditions de prélèvements rencontrées, les mesures réalisées pour définir la qualité des sédiments suggèrent que, pour les concentrations de Co, Cr, Mn et Ni, 5 stations sur 10 montrent un niveau de perturbation « normal » pour des stations sous influence terrigène modérée tandis que les concentrations de Co, et Ni mesurées à la station ST01 et de Co, Mn et Ni mesurées aux ST02, ST04, ST05 et ST10 dépassent ces seuils établis.

III.4. FLUX DE PARTICULES

L'analyse des **flux sédimentaires**, faisant l'objet de la troisième évaluation de ce suivi (campagnes 2016 , 2017 et 2018) au moyen des « tubes à sédiment », méthode intégratrice (nombre de jour de collecte cumulant entre 31 à 43 jours selon la station échantillonnée et campagne), et dont la fréquence d'échantillonnage reste faible (1 fois par an sur 3 ans), elle ne permet pas d'établir une relation de causalité, l'interprétation des résultats est donc pauvre quant à l'évolution spatio-temporelle. Les seules observations mises en évidence, à ce stade du suivi, sont que :

- d'une part, les particules récoltées sont quasi-exclusivement d'origine terrigène, notamment aux stations ST04 et ST05. Les plus fortes densités de flux terrigènes sont relevées à ces stations qui sont en cohérence avec les fortes concentrations des métaux latéritiques et les faibles teneurs en carbonates enregistrées dans les sédiments ;
- inversement, sur la période de prélèvement, les flux totaux et terrigènes sont relativement faibles aux stations ST01, ST02 et ST10, pourtant les analyses en métaux des sédiments de ces stations ont montré des concentrations aussi hautes que celles des stations ST04 et ST05 ; et
- d'autre part, les flux sédimentaires enregistrés en 2018 sont en augmentation par rapport à ceux obtenus en 2016 et 2017, notamment aux stations ST04 et ST05. Ces dernières étant situées dans l'aire d'expansion de l'embouchure de la rivière Thio et Dothio, respectivement, les précipitations de 2018, 4 et 60 fois plus élevées qu'en 2016 et 2017, respectivement, ont probablement influencé les MES collectées.

D'après le Guide du CNRT (Beliaff *et al.*, 2011), dans les conditions de prélèvements, les mesures des flux des particules suggèrent que, pour les densités de flux totaux, toutes les stations de Thio aux abords de récifs frangeants montrent un niveau de perturbation « normal ». Les stations ST04 et ST05 quant à elles dépassent le seuil établi pour les stations à l'embouchure de creeks.

III.5. BIOACCUMULATION

Les contraintes d'accessibilité et de disponibilité des ressources halieutiques n'ont pas permis de réaliser les prélèvements biologiques nécessaires pour toutes les espèces. Ces contraintes ont également conduit à la réalisation d'échantillons avec un nombre restreint de spécimens, limitant de ce fait la représentativité des échantillons et la portée des conclusions.

L'étude de **bioaccumulation des éléments** réalisée a tout de même permis de mettre en évidence que :

- la loche saumonée (*P. leopardus*), un carnivore, accumulerait beaucoup plus l'Hg que les autres poissons qui sont herbivores de régime (*S. rivulatus* et *A. dussumier*).
- les métaux dits prioritaires d'un point de vue sanitaire (**Cd, Pb et Hg**), pour lesquels des seuils de toxicité ont été fixés par la directive cadre européenne, sont pour toutes les espèces et zones confondues, **très inférieurs aux seuils sanitaires** réglementaires pour la consommation humaine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adjeroud M. (2012) Prolifération de l'étoile de mer corallivore *Acanthaster planci* dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie : état de lieux en juin 2012 et impacts sur les communautés coralliennes. Rapport IRD pour l'CEIL. 48pp.
- Beliaff *et al* (2011) Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle Calédonie. Zoneco, CNRT Nickel.
- Bouchon-Navaro Y, Bouchon C, Harmelin-Vivien M (1985) Impact of coral degradation on chaetodontid fish assemblage (Moorea, French Polynesia). *Proceedings of the 5th International Coral Reef Symposium* 5: 427-32.
- Breau L, 2003. Etude de la bioaccumulation des métaux dans quelques espèces marines tropicales : Recherche de bioindicateurs de contamination et application à la surveillance de l'environnement côtier dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. *Thèse de Doctorat de l'Université de la Rochelle, Spécialité « Océanologie Biologie et Environnement Marin »*, La Rochelle, France, 318 p.
- Breau L, Moreton B, Gérard P (2009) Evaluation des apports en métaux dans l'environnement marin tropical par transplantation d'organismes bioaccumulateurs. Rapport Final du Volet 2 « Ecotoxicologie », 2ème Partie, Programme « Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans le lagon sud de la Nouvelle Calédonie, Convention de Recherche IRD/Goro Nickel n°1124, 17/08/09, IRD-Nouméa, 60 p.
- Buckland ST (1993) Distance sampling - Estimating abundance of biological populations. London: Chapman and Hall Editions.
- Chabanet P, Ralambondrainy H, Amanieu M, Faure G, Galzin R (1997) Relationships between coral reef substrata and fish. *Coral Reefs* 16:93-102.
- Chabanet P, Guillemot N, Kulbicki M, Sarraména S, Vigliola L (2010) Baseline study of the spatio-temporal patterns of reef fish communities prior to a major mining project in New Caledonia (South Pacific). *Marine Pollution Bulletin* 61 : 598-611.
- English S, Wilkinson C, Baker V (1997) Survey manual for tropical marine resources. 2nd Edition. Australian institute of marine science publ., Townsville, Australia : 390p.
- Froese R, Pauly D (1997) FishBase 97: concepts, design and data sources. ICLARM (éd.), Manila.
- Galzin R (1987) Structure of fish communities of French Polynesian coral reefs. I: Spatial scales. *Mar Ecol Prog Ser* 41:129-136.
- Ginger-Soproner (2011) Suivi environnemental du milieu marin de la zone Voh-Koné-Pouembout - Surveillance biologique et physico-chimique, Rapport semestriel 2011, 180p.
- Ginger-Soproner (2013) Suivi environnemental du milieu marin de la zone Voh-Koné-Pouembout - Surveillance biologique et physico-chimique, Rapport annuel 2013.
- Graham NAJ, Wilson SK, Jennings S, Polunin NVC, Bijoux JP, Robinson J (2006) Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103(22): 8425-8429.
- Guillemot N (2005) Analyse des peuplements de poissons récifaux dans la zone de Koné (Nouvelle-Calédonie) et optimisation du plan d'échantillonnage pour le suivi d'un impact anthropique sur les ressources halieutiques. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, 71p.
- Guillemot N (2009) Les peuplements de poissons récifaux et leur exploitation dans la zone de Voh-Koné-Pouembout (Nouvelle-Calédonie) : caractérisation, indicateurs et enjeux de suivi. Mémoire de doctorat, 350p.
- Guillemot N, Chabanet P, Le Pape O (2010) Cyclone effects on coral reef habitats in New Caledonia (South Pacific). *Coral Reefs* 29(2): 445-453.
- Guillemot N, Kulbicki M, Chabanet P, Vigliola L (2011) Functional redundancy patterns reveal non-random assembly rules in a species-rich marine assemblage. *PLoS ONE* 6(10): e26735.
- Harmelin-Vivien ML, Harmelin JG, Chauvet C, Duval C, Galzin R, Lejeune P, Barnabé G, Blanc F, Chevalier R, Duclerc J, Lasserre G (1985). Evaluation visuelle des
- Hooper DU, Solan M, Symstad A, Diaz S, Gessner MO, Buchmann N, Degrange V, Grime P, Hulot F, Mermillod-Blondin F, Roy J, Spehn E, van Peer L (2002) Species diversity, functional diversity and ecosystem functioning. In: *Biodiversity and ecosystem functioning. Synthesis and perspectives*. Oxford University Press.

- Hourrigan T, Tricas T, Reese E (1988) Coral reef fishes as indicators of environmental stress in coral reefs. In: Soule D, Kleppel G (eds) *Marine organisms as indicators* 6:107-35.
- Hourrigan T, Tricas T, Reese E (1988) Coral reef fishes as indicators of environmental stress in coral reefs. In: Soule D, Kleppel G (eds) *Marine organisms as indicators* 6:107-35.
- Jones GP (1991) Post-recruitment processes in the ecology of coral reef fish populations: a multi-factorial perspective. In: Sale PF (éd.) *The ecology of fishes on coral reefs*. Academic Press, San Diego.
- Jones GP, McCormick MI, Srinivasan M, Eagle JV (2004) Coral decline threatens fish biodiversity in marine reserves. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 101: 8251-8253.
- Kulbicki M (2006) *Ecologie des poissons lagunaires de Nouvelle Calédonie*. Thèse Doctorat EPHE, Université de Perpignan : 189 pages + annexes 500 pages
- Kulbicki M, Sarramégna S (1999) Comparison of density estimates derived from strip transect and distance sampling for underwater visual census: a case study of Chaetodontidae and Pomacanthidae. *Aquatic Living Resources* 12: 315-325.
- Kulbicki M, Chabanet P, Guillemot N, Sarramégna S, Vigliola L, Labrosse P (2004) Les poissons de récifs dans la région de Koné. Premiers résultats comparatifs des évaluations en plongée menées par l'IRD, la CPS et Falconbridge entre 1996 et 2002. Rapport technique IRD. 106p.
- Kulbicki M, Guillemot N, Amand M (2005a) A general approach to length-weight relationships for New Caledonian lagoon fishes. *Cybiurn* 29(3): 235-252.
- Kulbicki M, Bozec Y-M, Labrosse P, Letourneur Y, Mou Tham G, Wantiez L (2005b) Diet composition of carnivorous fishes from coral reef lagoons of New Caledonia. *Aquatic Living Ressources* 18(3): 231-250.
- Kulbicki M, Sarramégna S, Letourneur Y, Wantiez L, Galzin R, Mou-Tham G, Chauvet C, Thollot P (2007) Short-term temporal changes in the structure of a coral reef fish assemblage in a New Caledonian protected area: relative influence of opening to fishing. *Journal of Experimental Ecology and Biology* 353: 145-163.
- Labrosse P, Letourneur Y, Kulbicki M, Magron F (1999) Fisheye: A new database on the biology and ecology of lagoon and reef fishes of the South Pacific. Example of its use on the ecology of commercial herbivorous fishes. *Proceedings of the 5th Indo-Pacific Fish Conference* 1: 657-672.
- Letourneur Y, Galzin R, Harmelin-Vivien M (1996) Temporal variations in the diet of the damselfish *Stegastes nigricans* (Lacepède) on a Réunion fringing reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 217: 1-18.
- Li XiuBao, Huang Hui, Lian JianSheng et al. Coral community changes in response to a high sedimentation event: A case study in southern Hainan Island[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(9):1037
- McGill BJ, Enquist BJ, Weiher E, Westoby M (2006) Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution* 21: 178-185.
- Öhman MC, Rajasuriya A, Svensson S (1998) The Use of Butterflyfishes (Chaetodontidae) as Bio-Indicators of Habitat Structure and Human Disturbance. *Ambio* 27(8): 708-716.
- Osenberg CW, Schmitt RJ, Holbrook SJ, Abu-Saba KE, Flegal AR (1994) Detection of Environmental Impacts: Natural Variability, Effect Size, and Power Analysis. *Ecological Applications* 4(1): 16-30.
- Petchey OL, Gaston KJ (2002a) Functional diversity (FD), species richness and community composition. *Ecology Letters* 5:402-411.
- Petchey OL, Gaston KJ (2002b) Extinction and the loss of functional diversity. *Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences* 269:1721-1727.
- Petchey OL, Gaston KJ (2006) Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters* 9: 741-758.
- Pitcher JT, Hart PJB, Pauly D (1998) Reinventing fisheries management. *Fish Fish. Ser.* 23. Reese ES (1981) Predation on corals by fishes of the family Chaetodontidae: implications for conservation and management of coral reef ecosystems. *Bulletin of Marine Science* 31: 594-604.
- Reese ES (1981) Predation on corals by fishes of the family Chaetodontidae: implications for conservation and management of coral reef ecosystems. *Bulletin of Marine Science* 31: 594-604.

- Roberts CM, Ormond RF (1987) Habitat complexity and coral reef diversity and abundance on Red Sea fringing reefs. *Marine Ecology Progress Series* 41: 1-8.
- Roberts CM, Dawson Shepherd AR, Ormond RF (1992) Large-scale variation in assemblage structure of Red Sea butterfly fishes and angel fishes. *Journal of Biogeography* 19: 239-50.
- Roset N, Grenouillet G, Goffaux D, Pont D, Kestemont P (2007) A review of existing fish assemblage indicators and methodologies. *Fisheries Management and Ecology* 14: 393–405.
- Richards ZT, Day JC (2018) Biodiversity of the Great Barrier Reef—how adequately is it protected ? *PeerJ* 6:e4747 <https://doi.org/10.7717/peerj.4747>
- Sale PF, Doherty PJ, Eckert GJ, Douglas WA, Ferrell DJ (1984) Large scale spatial and temporal variation in recruitment to fish populations on coral reefs. *Oecologia* 64(2): 191-198.
- Scherrer B (1984) *Biostatistique*. Gaetan Morin Editions.
- Schwartz MW, Brigham CA, Hoeksema JD, Lyons KG, Mills MH, van Mantgem PJ (2000) Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia* 122(3):297-305.
- Steele JH (1991) Marine functional diversity. *Bioscience* 41:470-474.
- Syms C, Jones GP (2000) Disturbance, habitat structure, and the dynamics of a coral-reef fish community. *Ecology* 81: 2714-2729.
- Tittensor DP, Micheli F, Nyström M, Worm B (2007). Human impacts on the species–area relationship in reef fish assemblages. *Ecology Letters* 10 (9): 760-772.
- Underwood AJ (1992) Beyond *BACI* : The Detection of Environmental Impacts on Populations in the Real, but Variable, World. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 161(2): 145-178.
- Underwood AJ (1994) On beyond *BACI*: Sampling designs that might reliably detect environmental disturbances. *Ecological Applications* 4(1): 3-15.
- Wantiez L (2006) Suivi temporal des récifs coralliens du Parc du Lagon Sud - Rapport 2006. Province Sud de la Nouvelle-Calédonie, Université de la Nouvelle-Calédonie, 93p.
- Wilson SK, Burgess SC, Cheal AJ, Emslie M, Fisher R (2008) Habitat utilization by coral reef fish: implications for specialists vs. generalists in a changing environment. *Journal of Animal Ecology* 77: 220–228.
- Zar JH (1999). *Biostatistical Analysis*, 4th Edition. Prentice Hall International, London.

ANNEXES

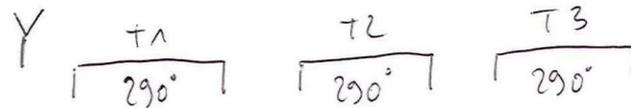
ANNEXE I: DESCRIPTIF DES STATIONS

I.1. THIO – ST01



Bassin
de Conception
Buse

littoral



2016

2018

T1



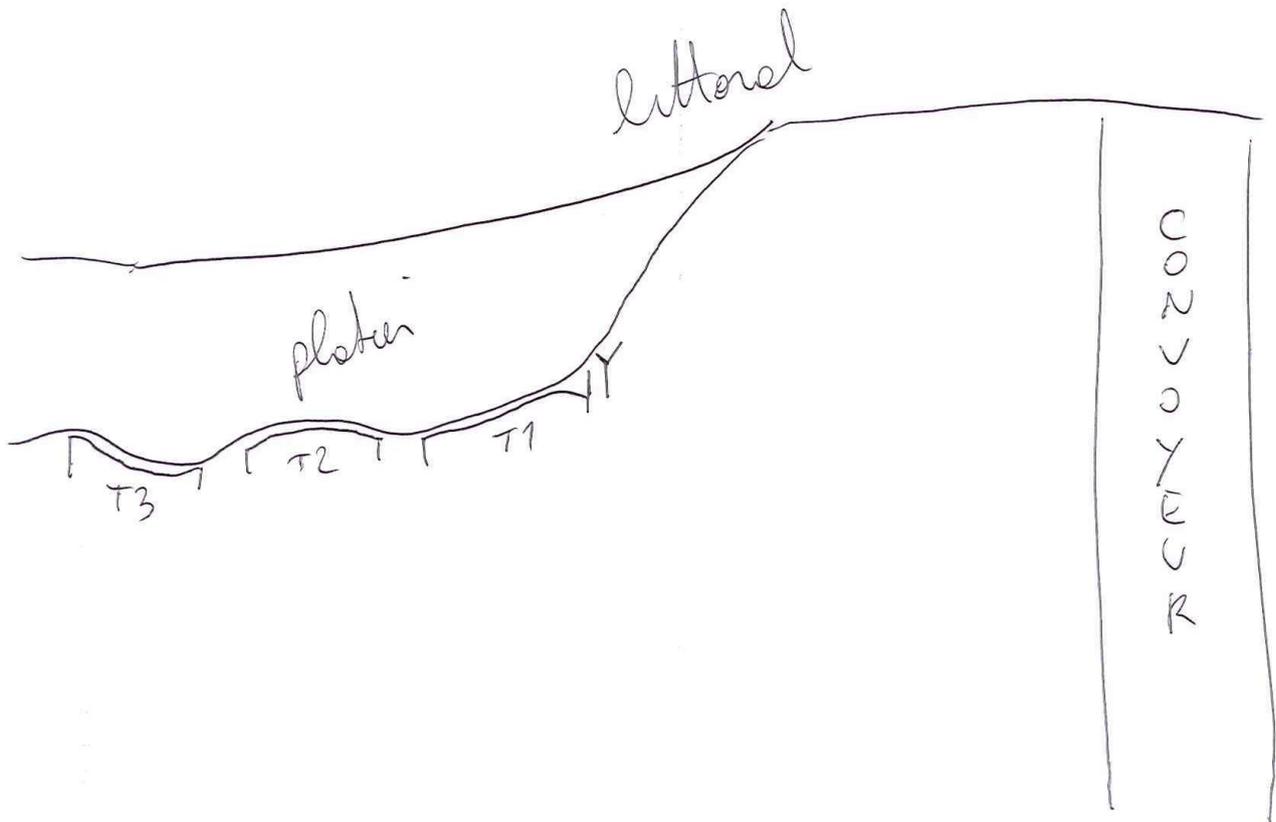
T2



T3



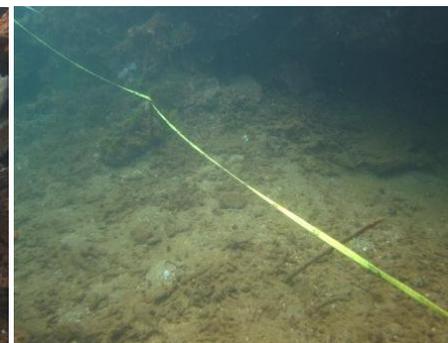
I.2. THIO - ST02



2016

2018

T1



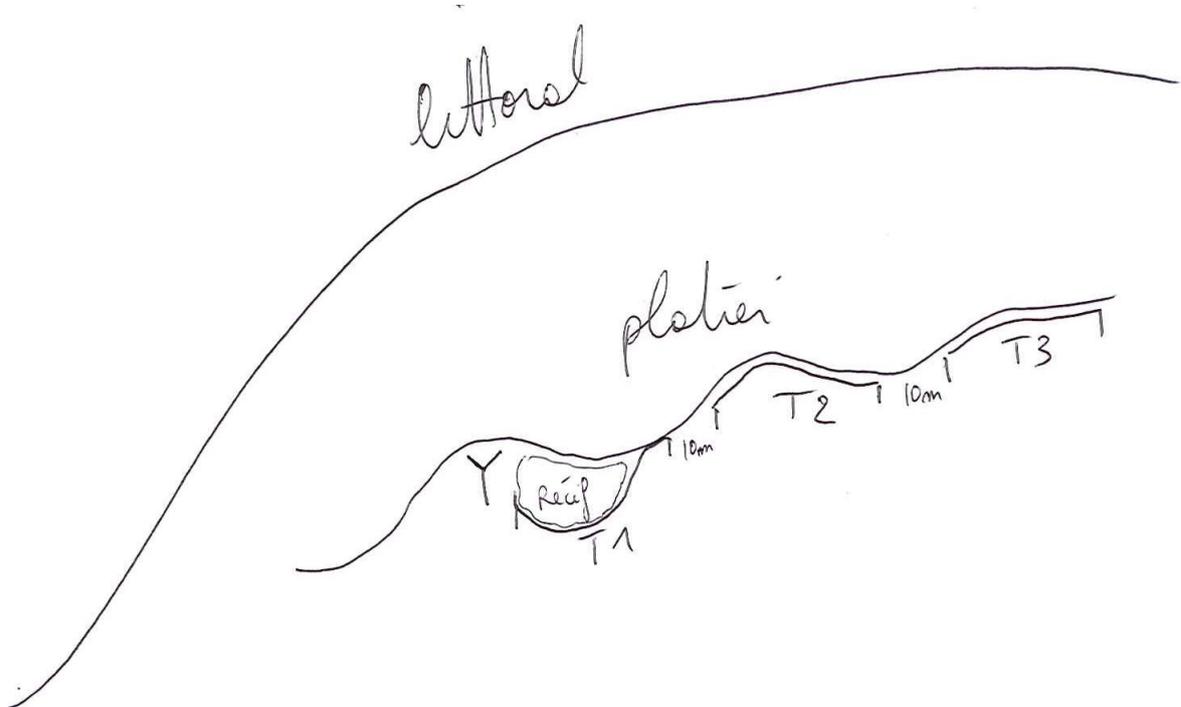
T2



T3



I.3. THIO – ST06



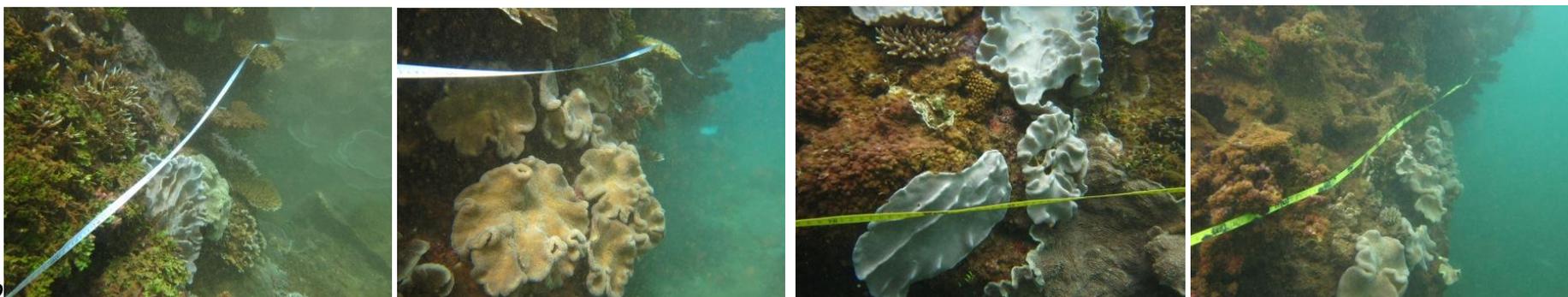
2016

2018

T1



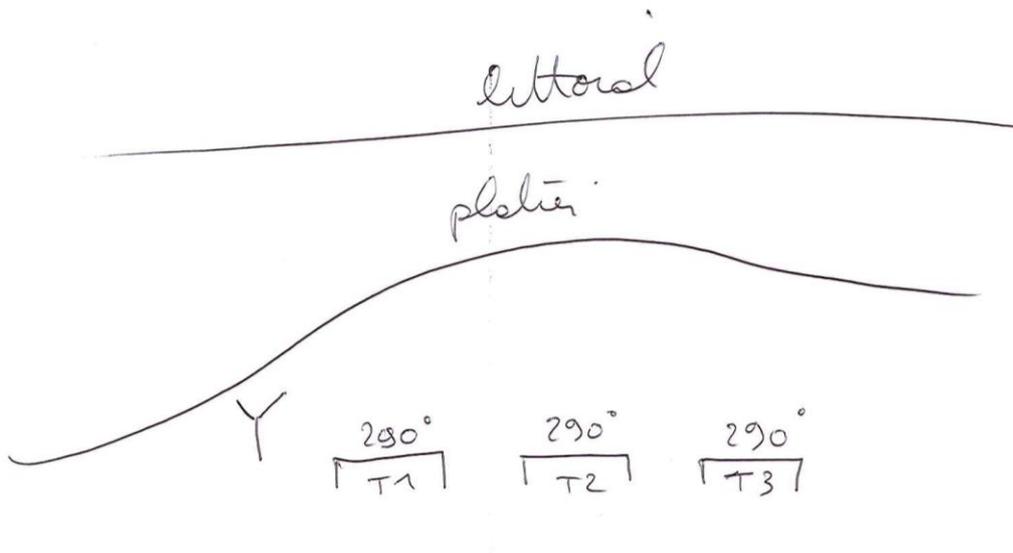
T2



T3



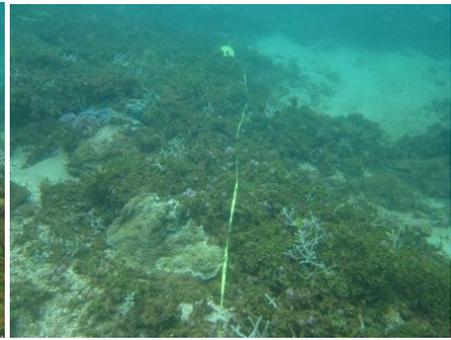
I.4. THIO - ST07



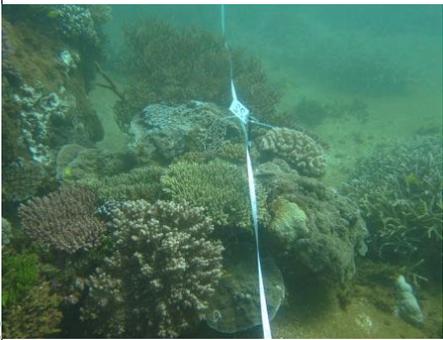
2016

2018

T1



T2



T3



I.5. THIO - ST08



littoral

Reef frangeant.

Y $\frac{310^\circ}{T1}$ 10_m $\frac{310^\circ}{T2}$ 10_m $\frac{310^\circ}{T3}$

2016

2018

T1



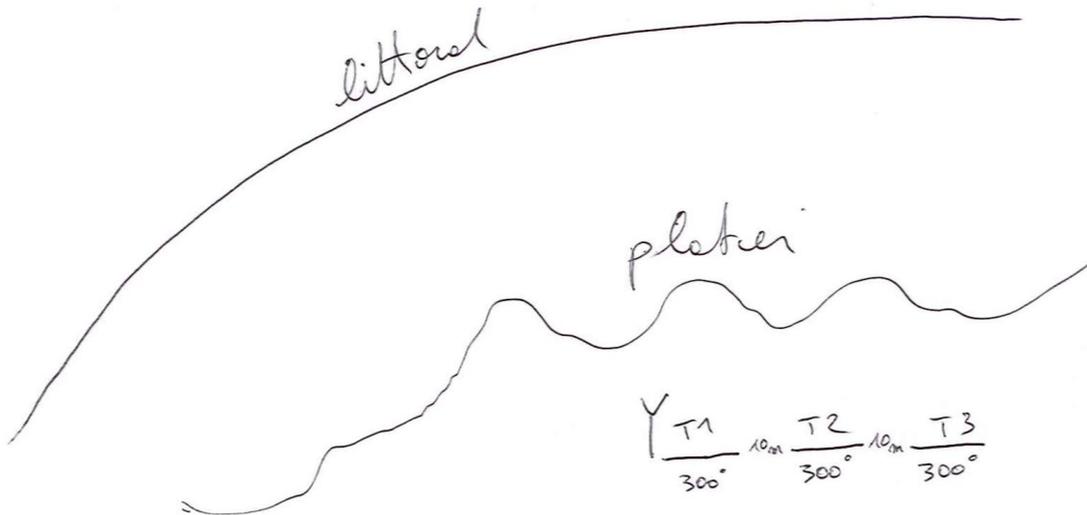
T



T3



I.6. THIO - ST09



2016

2018

T1



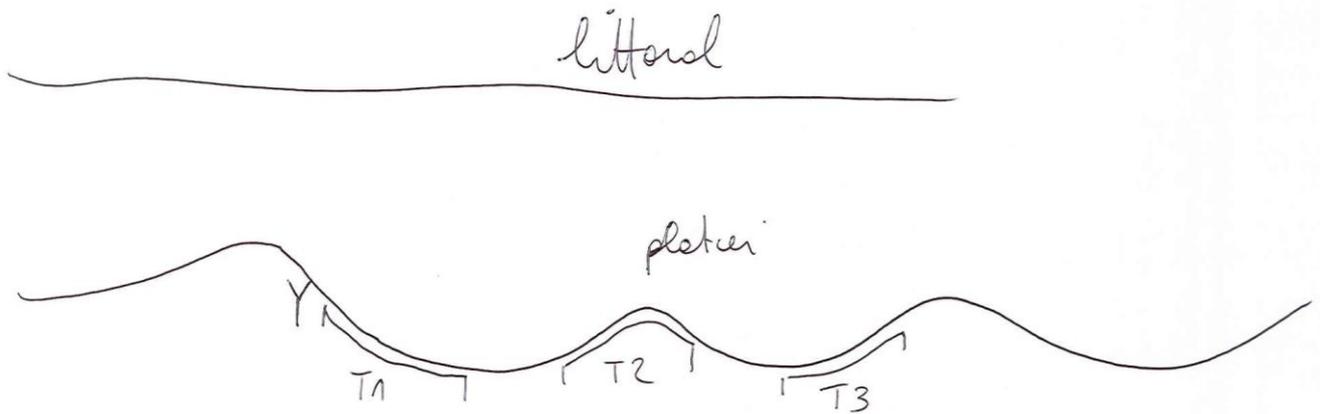
T2



T3



I.7. THIO - ST10



2016

2018

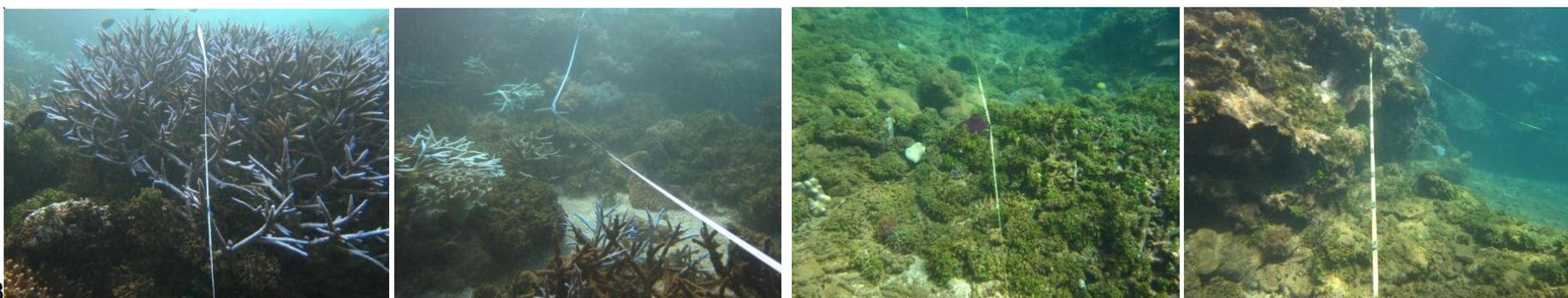
T1



T2



T3



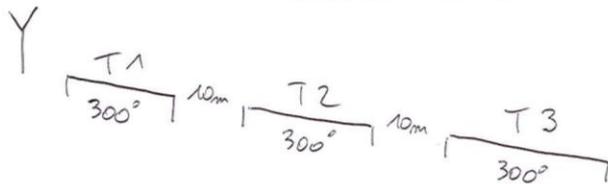
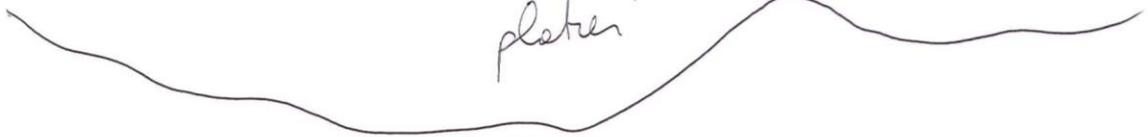
I.8. THIO - ST11



littoral



plateau



2016

2018

T1



T2



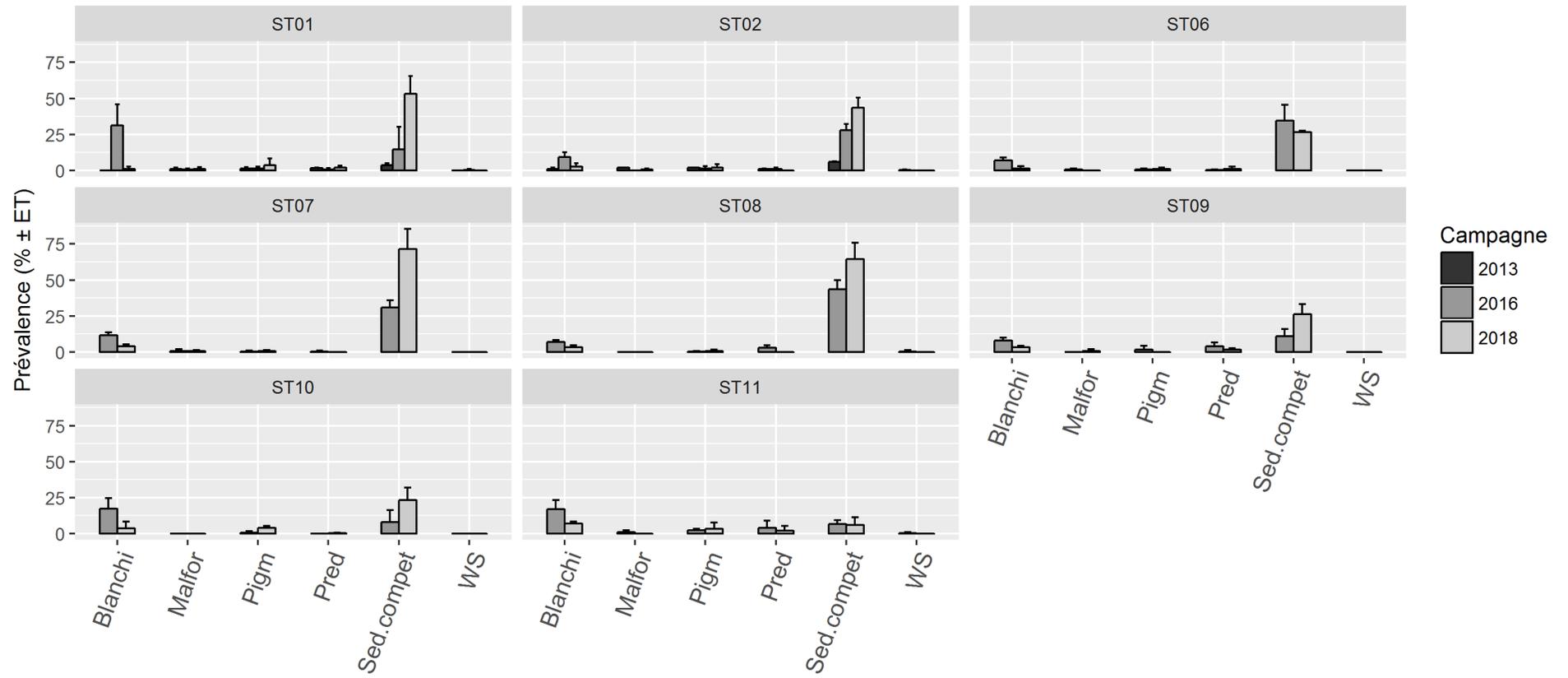
T3



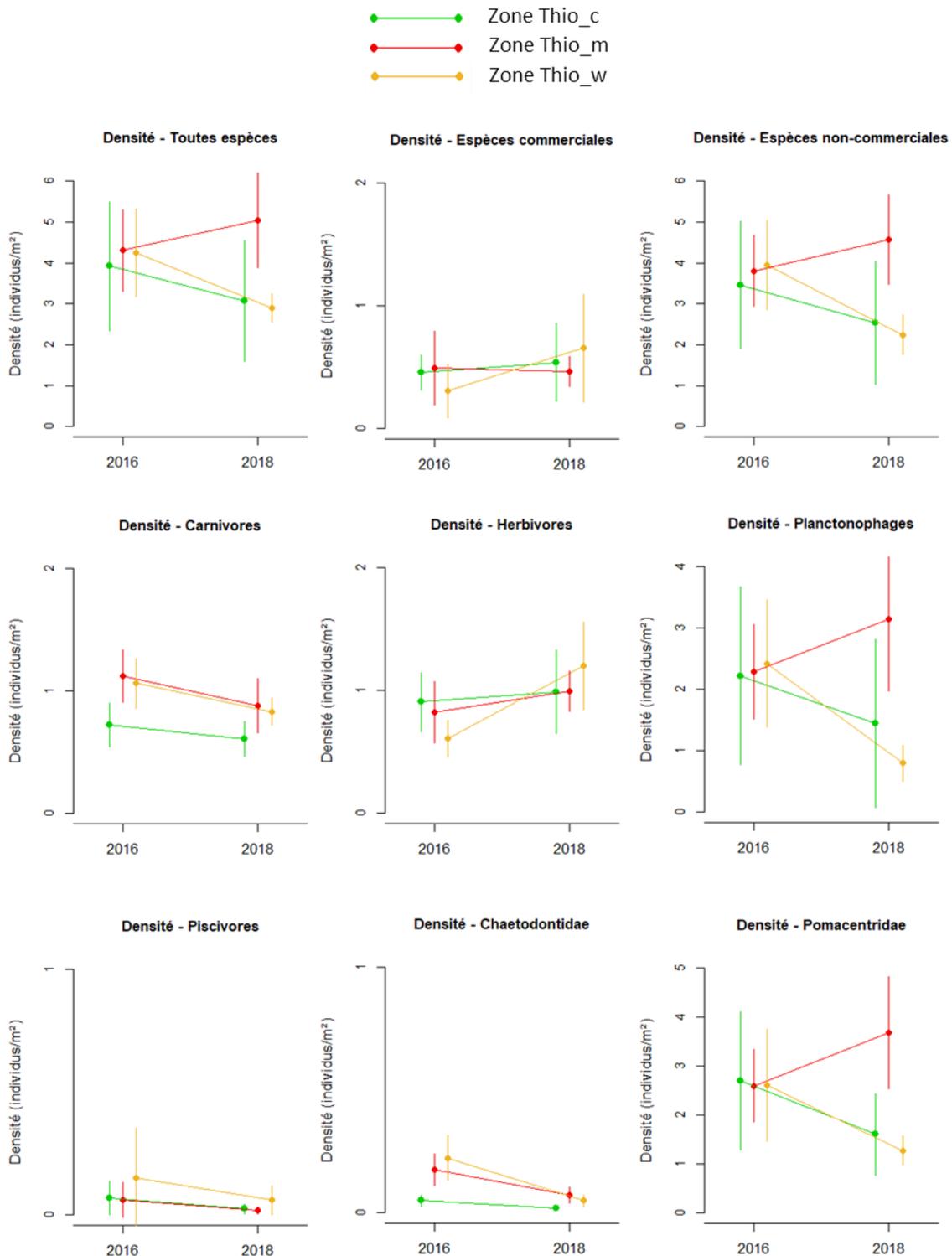
ANNEXE II: EVOLUTION DU SUBSTRAT PAR STATION

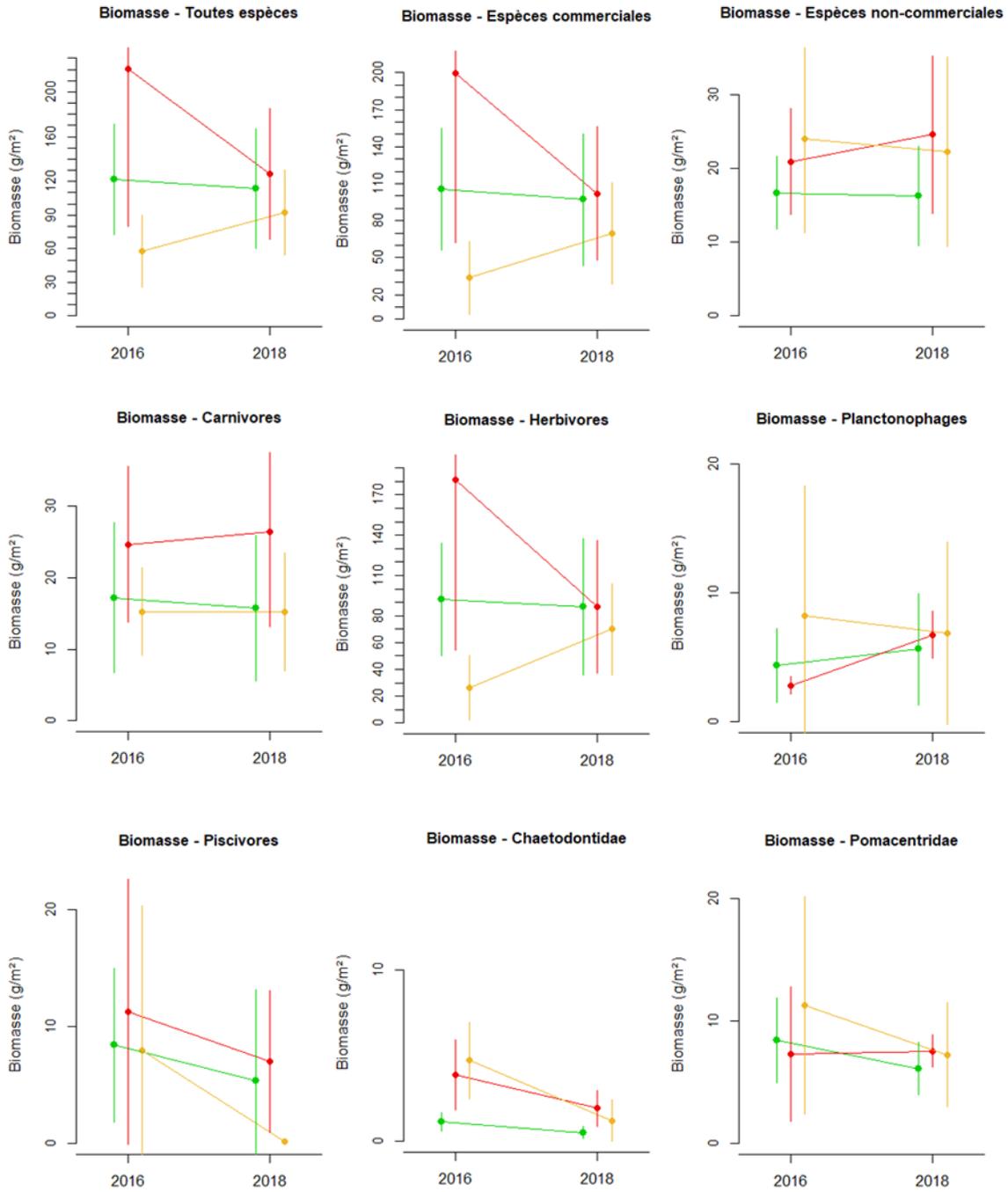


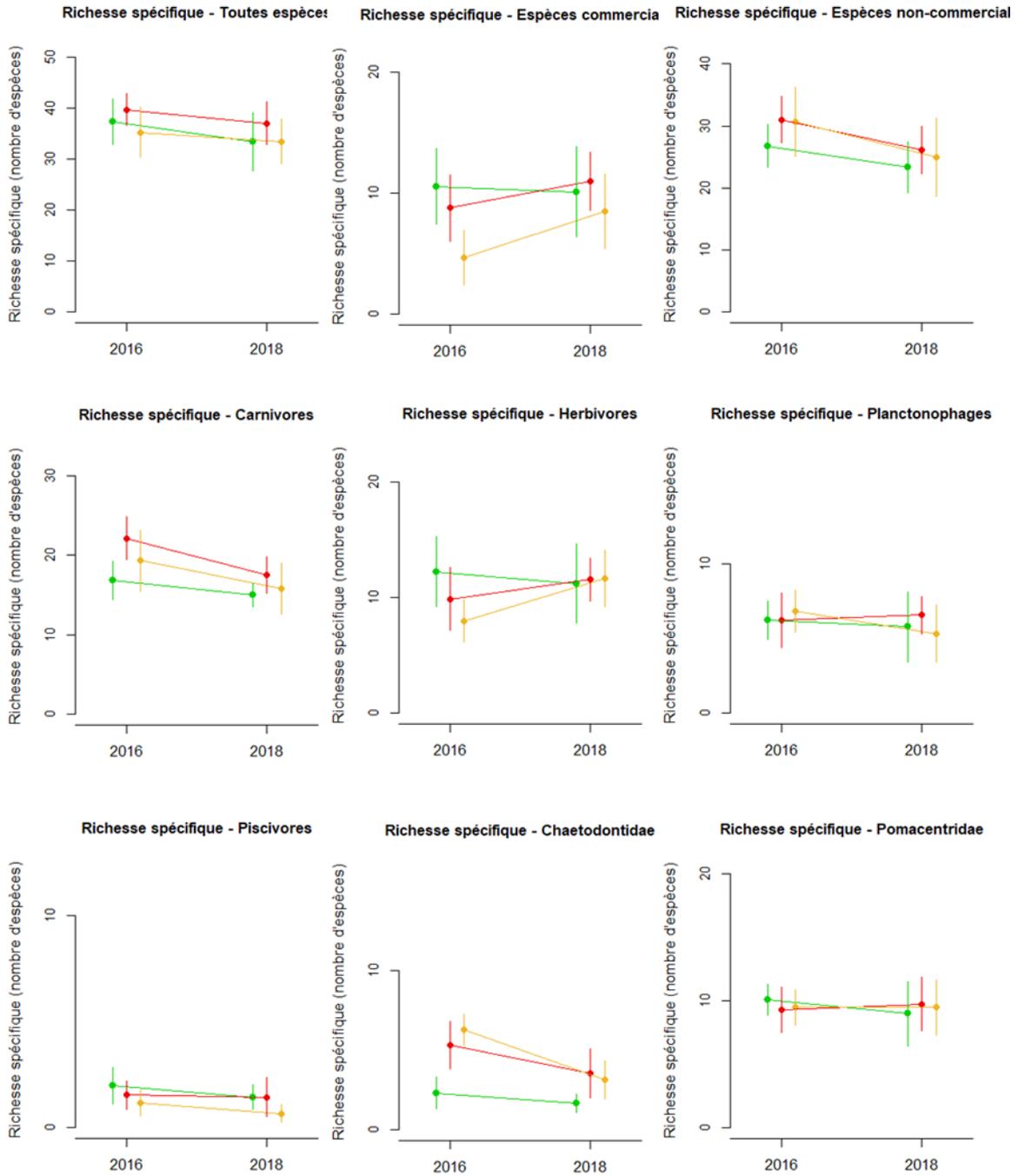
ANNEXE III : PREVALENCE DE LESIONS CORALLIENNES PAR STATION



ANNEXE IV : VARIATIONS TEMPORELLES DE L'ENSEMBLE DES PARAMÈTRES DÉCRIVANT LES PEUPELEMENTS ICHTYOLOGIQUES SUR CHAQUE ZONE ENTRE 2016 ET 2018. LES BARRES D'ERREUR INDIQUENT LES INTERVALLES DE CONFIANCE (95%) POUR LES MOYENNES

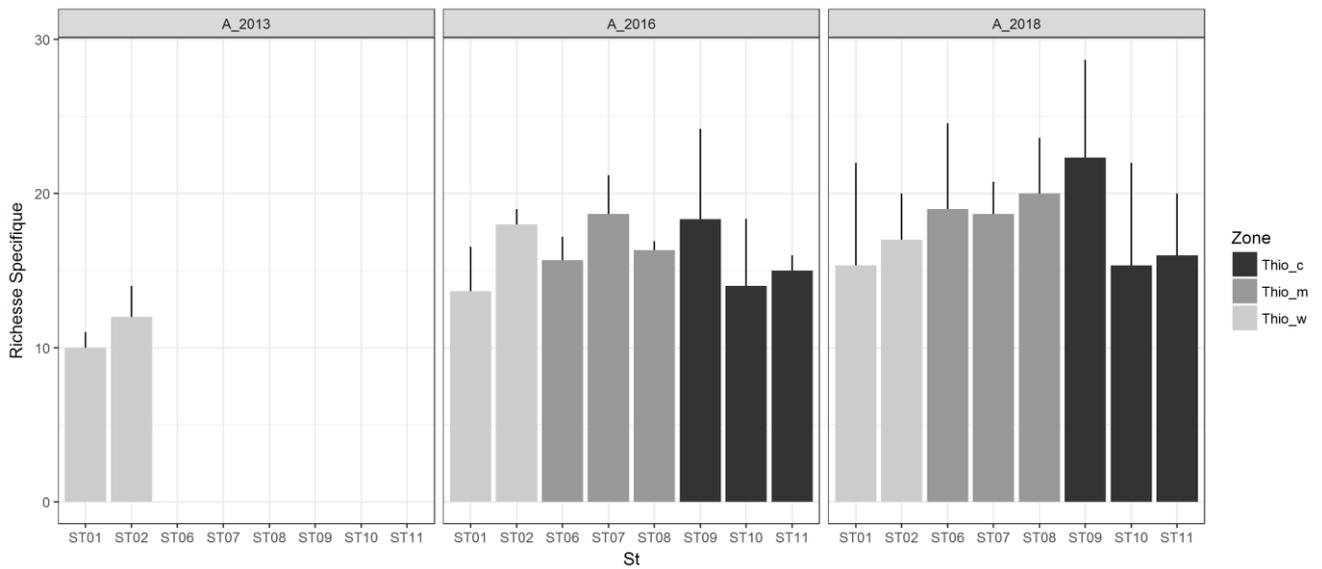




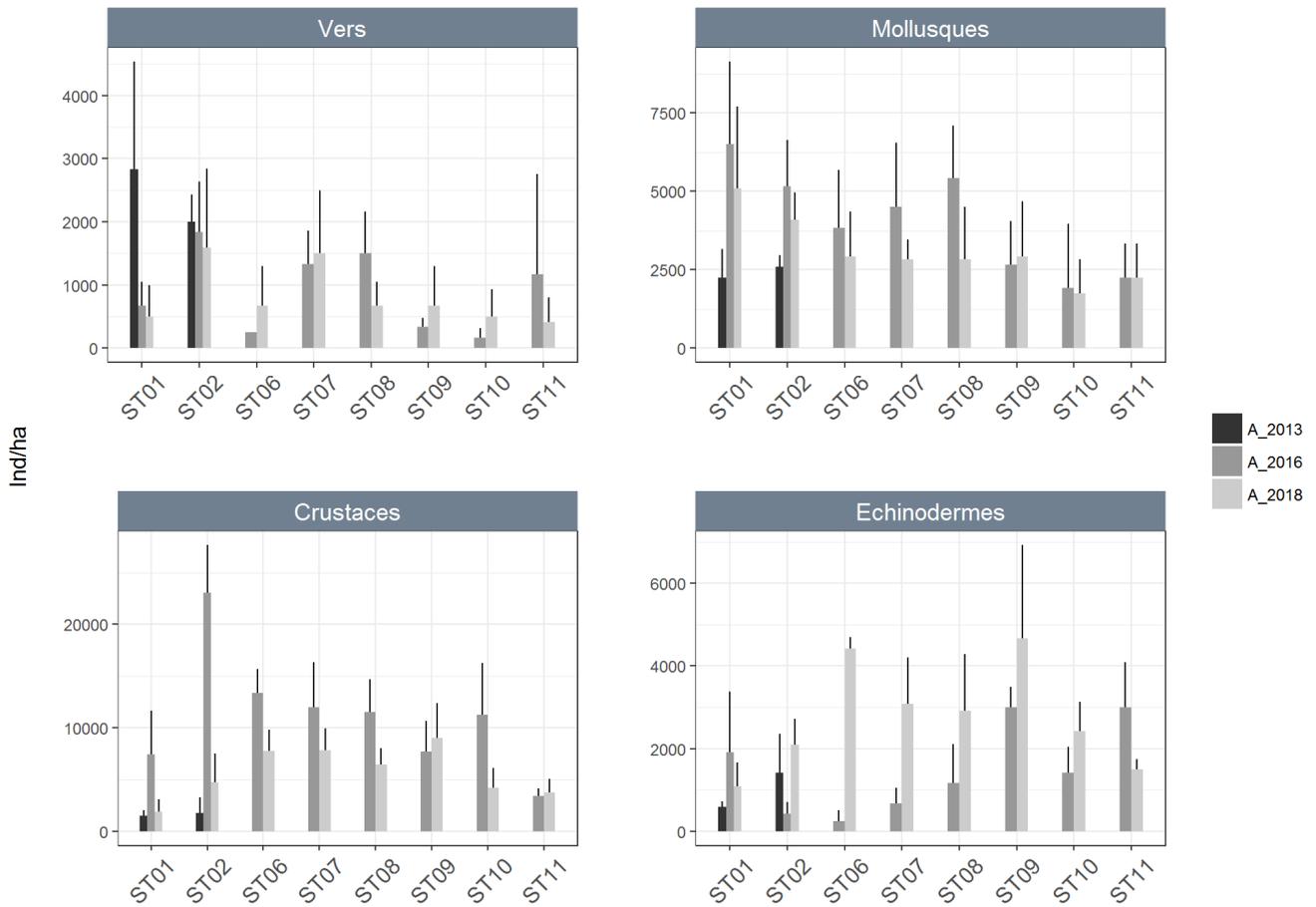


ANNEXE V : EVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU MACROBENTHOS DE FONDS DURS PAR STATION

I.9. RICHESSE SPÉCIFIQUE



I.10. DENSITÉ PAR GROUPE



I.11. DENSITÉ PAR SOUS-GROUPE



ANNEXE VI : RÉSULTATS D'ANALYSES DANS LES SÉDIMENTS EN 2018

Fractions granulométriques des sédiments de Thio

Station	% massique		
	>2000 µm	2000 µm -63 µm	<63 µm
ST01	0,9	91,7	7,3
ST02	7,2	81,5	11,2
ST04	0,7	92,7	6,5
ST05	0,5	94,4	5,1
ST06	22,8	68,1	9,1
ST07	1,8	89,5	8,8
ST08	15,0	75,4	9,6
ST09	28,1	29,7	42,2
ST10	0,1	98,3	1,6
ST11	32,1	47,1	20,8

Teneurs en carbonates dans les sédiments de Thio

Station	CaCO3%
ST01	33,9
ST02	15,0
ST04	1,4
ST05	2,7
ST06	61,5
ST07	77,2
ST08	65,6
ST09	86,9
ST10	20,0
ST11	100

Teneurs en métaux dans les sédiments de Thio

Station	Métaux (mg/kg MS)								
	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
ST01	1,00	294	1462	20,0	1573	6600	27,0	83,0	0,075
ST02	2,00	374	3462	50,0	2323	6984	149,0	168,0	0,184
ST04	1,33	264	2170	25,3	2068	3846	15,3	97,3	0,156
ST05	2,00	376	2881	22,0	2381	3637	15,0	94,0	0,118
ST06	<1,00	117	759	7,0	1510	1235	7,0	18,0	0,063
ST07	<1,00	147	947	8,0	1622	1645	8,0	24,0	0,07
ST08	<1,00	132	756	6,0	1463	1536	7,0	28,0	0,047
ST09	<1,00	25	150	3,0	803	211	<2,0	<10,0	0,014
ST10	2,00	312	3542	16,0	1942	4246	30,0	117,0	0,073
ST11	<1,00	35	218	3,0	557	356	4,0	<10,0	0,019