

INGENIERIE EUROPE

GRUPE



GINGER SOPRONER

DEPARTEMENT ENVIRONNEMENT



AEL

Dossier n°A001-13007-0001



LE NICKEL - SLN

**Analyse des impacts des activités du bord de
mer et préconisations de gestion relatives au
wharf de chargement de THIO**

Rapport final

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



ISO9001 : FDT1_V1/10-10

• **NOUMEA** - BP 3583 - 98846 Nouméa

Tél (687) 28 34 80 - Fax (687) 28 83 44 - Email : soproner.noumea@soproner.nc

• **KONE** - BP 801 - 98860 Koné

Tél (687) 47 25 23 - Fax (687) 47 25 23 - Email : soproner.kone@soproner.nc

• **SIEGE SOCIAL** : 1 bis rue Berthelot - Doniambo - BP3583 - 98846 Nouméa - Nouvelle Calédonie - Site internet : www.soproner.nc

SAS au capital de 37 000 000 FCFP - RCS Nouméa 02 B 668731 - Ridet 668731.001 - Banque BNC N° 14889 00081 82817301015 22

ÉVOLUTION DU DOCUMENT

Ind.	Date	Chef de projet	Ingénieur d'études	Description des mises à jour
1	23/05/2013	Antoine GILBERT	Tom HEINTZ Nicolas Guillemot	Création du document
2	05/09/2013	Antoine GILBERT	Tom HEINTZ Nicolas Guillemot	Révision selon commentaires Claire NICOLAS

SOMMAIRE

EQUIPE D'INTERVENTION	5
INTRODUCTION	7
ANALYSE DU PROJET ET PRECONISATIONS	10
I. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS QUI DRAINENT LA ZONE D'EMPRISE DU WHARF.....	11
II. ACTIVITE DU BORD DE MER.....	12
II.1. Situation générale.....	12
II.2. Activités de la SLN.....	12
III. SOURCE, ENJEUX, RISQUES ET MESURES DE GESTION.....	15
III.1. Synthèse des risques et mesures de préventions	15
III.2. Zone de stockage du minerai	17
III.3. Wharf de chargement.....	17
III.4. Mouillage du minéralier.....	17
III.5. Trafic maritime.....	17
III.6. Roulage minier	18
III.7. Atelier mécanique.....	18
III.8. Stockage et distribution d'hydrocarbures	18
IV. PROPOSITION DES METRIQUES ET METHODES POUR LE SUIVI DU MILIEU MARIN NIVEAU ECO-SYSTEMIQUE ...	19
IV.1. Volet Ichtyofaune.....	19
IV.2. Volet Invertébrés.....	20
IV.3. Volet Substrat	22
IV.4. Tableau de synthèse du suivi écosystémique.....	24
V. PROPOSITION DES METRIQUES ET METHODES POUR LE SUIVI DU MILIEU MARIN NIVEAU PHYSICO-CHIMIQUE	26
V.1. Caractérisation des sédiments	26
V.2. Caractérisation de la colonne d'eau.....	28
V.3. Qualité écotoxicologique	30
V.4. Tableau de synthèse.....	32
SYNTHESE DES PRECONISATIONS DE SUIVI	34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	38

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

<i>Figure 1 : Plan de situation du wharf de chargement SLN (haut) sur la commune de Thio et disposition des différentes unités industrielles (bas).....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2 : Convoyeur (gauche) et zone de stockage (droite)</i>	<i>9</i>
<i>Figure 3: Bassins versants drainés au droit du wharf de Thio.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : Zone de bord de mer à Thio.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : Zone d'activité SLN sur le bord de mer à Thio (source : EMR).....</i>	<i>13</i>

TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Sources d'impacts potentiels, enjeux pour le milieu marin, risques associés en l'absence de mesures de gestion et risques résiduels consécutifs à l'application des mesures de gestion.....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 2 : Groupe échantillonnés dans le cadre des états de référence et nature des données associées.</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3: Catégorie de lésions échantillonnées.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 4 : synthèse des préconisations de suivi pour le volet éco-systémique.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 5 : Bilan par volet et par matrice des variables et fréquences associées idéales pour la réalisation d'un suivi du bord de mer de Thio.</i>	<i>35</i>

EQUIPE D'INTERVENTION

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 GINGER SOPRONER. Il a collecté et analysé les données sur la faune macro-benthique.

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

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.

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

Jean Christophe PREVERT patenté, capitaine 200 et CAH IIB. Il a piloté l'embarcation et assuré la sécurité en plongée.

INTRODUCTION

La Société Le Nickel (SLN) exploite actuellement une mine de nickel sur la commune de THIO sur la côte Est de la Nouvelle Calédonie depuis plusieurs décennies.

Dans le cadre de la loi de pays du 16 Avril 2009 qui implique une régularisation de tous les sites miniers, l'étude d'impact sur l'environnement (pièce C du dossier de régularisation) doit comporter un état initial du milieu marin ainsi que des mesures de suivi au droit des zones de bord de mer utilisées pour le chargement du minerai.

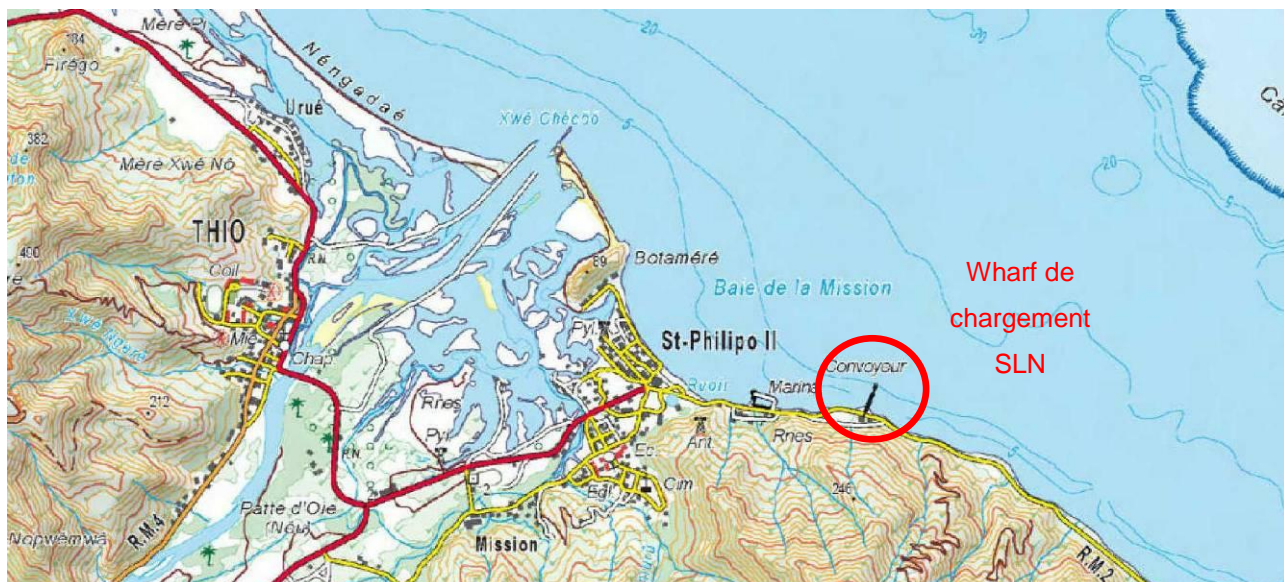


Figure 1 : Plan de situation du wharf de chargement SLN (haut) sur la commune de Thio et disposition des différentes unités industrielles (bas)



Figure 2 : Convoyeur (gauche) et zone de stockage (droite)

Sur le site de Thio, la zone de transfert de minerai par voie maritime comporte l'utilisation de différentes unités (zone de stockage du minerai, convoyeur, atelier et stockage d'engins) (Figure 1 et Figure 2). Cette zone est bordée d'un récif frangeant à l'Est et à l'Ouest du convoyeur qui constitue l'intérêt écologique majeur de la zone pour cette étude initiale.

La mission réalisée par GINGER-SOPRONER en collaboration avec AEL s'est déroulée du 02 au 04 avril 2013 avec pour objectif :

- 1) De définir l'état écologique du récif frangeant aux abords de la zone de chargement de minerai (habitats coralliens, invertébrés, poissons) sur deux stations « d'impact » et une station dite de « référence »
- 2) De définir l'état physico-chimique de la zone (qualité de l'eau, qualité des sédiments)

Ces deux premières parties font l'objet d'un rapport distinct, joint à ce rapport.

- 3) D'analyser les effets potentiels du projet sur l'environnement marin, de fournir des préconisations afin de limiter les impacts et proposer les métriques à suivre et ainsi que la fréquence idéale pour les échantillonner.

Cette dernière partie fait l'objet de ce rapport.

ANALYSE DU PROJET ET PRECONISATIONS

I. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS QUI DRAINENT LA ZONE D'EMPRISE DU WHARF

Actuellement les eaux pluviales de ruissellement se rejetant au niveau du wharf de Thio proviennent de différents petits bassins versants. Ceux-ci drainent des terrains de superficies relativement variables, comprises entre 4 et 50 Ha. Trois bassins versants trouvent leur exutoire sur le secteur d'étude.

Ces bassins versants sont présentés sur la Figure 3.



Figure 3: Bassins versants drainés au droit du wharf de Thio

D'après les images satellites du secteur, actuellement ces bassins versants sont restés à l'état naturel et présentent une végétation de type maquis minier assez dense. Seules quelques pistes minières ont été ouvertes, notamment sur la concession Le Mene Red.

Le Bassin versant Thio 2 culmine à l'altitude 650 m NGNC. Les différents versants sont d'une manière générale très pentus (pente >15%), les vitesses de transfert des eaux ruisselées vont donc être relativement importantes.

II. ACTIVITE DU BORD DE MER

II.1. SITUATION GENERALE

La zone littorale de Thio est bordée du village à l'Ouest, d'une Marina ouverte au public et de la zone d'activité de la SLN (Figure 4).



Figure 4 : Zone de bord de mer à Thio

II.2. ACTIVITES DE LA SLN

Afin d'acheminer le minerai extrait du site du Plateau de Thio vers Doniambo, la SLN dispose d'un groupe d'installations en bord de mer, à proximité du village de Thio Mission.

Ces installations sont composées :

- d'une zone de stockage du minerai ;
- d'un atelier de préparation d'échantillons de minerai pour analyse ;

- d'un atelier mécanique ;
- d'un wharf ;
- d'un dépôt et d'une aire de distribution d'hydrocarbures.

Ces unités sont présentées sur la Figure 5.

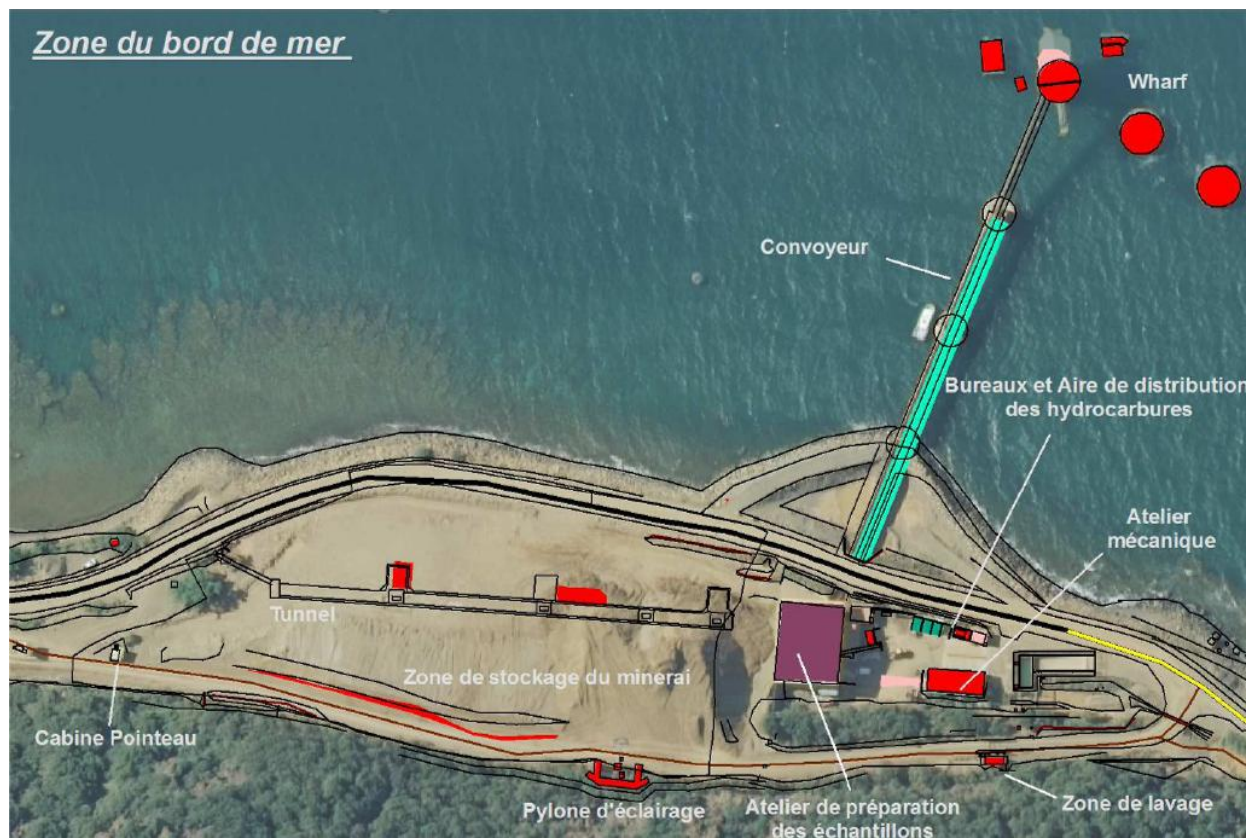


Figure 5 : Zone d'activité SLN sur le bord de mer à Thio (source : EMR)

Les éléments suivants ont été fournis par la SLN et proviennent du dossier ICPE de l'installation.

II.2.1. L'atelier de préparation du minerai

Au niveau de la zone de bord de mer, un atelier de préparation de minerai a été installé. Cet atelier permet de transformer la granulométrie du minerai. L'ensemble des échantillons ainsi constitué est destiné au laboratoire d'analyse de Doniambo pour le contrôle des caractéristiques physico-chimiques.

Les échantillons sont préparés par séchage et broyage.

II.2.2. Le wharf de chargement

Afin de transférer le minerai de la zone de stockage aux soutes des minéraliers, la SLN a mis en place un wharf de chargement. Des trappes localisées sur la dalle de stockage permettent de faire tomber le minerai

au niveau du tunnel de chargement. Au sein de ce tunnel, une série de convoyeurs a été mise en place afin d'assurer le cheminement du minerai jusqu'aux soutes des minéraliers.

II.2.3. L'atelier de mécanique

L'atelier de mécanique présent au sein des installations de bord de mer sert uniquement à l'entretien des installations fixes de l'atelier d'échantillonnage. Y sont réalisés :

- travaux de découpe au chalumeau,
- travaux de soudures,
- petites réparations.

Cet atelier présente une surface de 110 m². Le sol est composé d'une dalle bétonnée.

II.2.4. Le stockage et la distribution d'hydrocarbures

Au niveau des installations de bords de mer, une aire de stockage et de distribution des hydrocarbures est présente. Le stockage des hydrocarbures se fait à l'aide d'une cuve aérienne de 10 m³.

La distribution du gasoil est effectuée à l'aide d'une pompe de 3 m³/h. L'aire de distribution du carburant est composée d'une dalle bétonnée bidentée, dirigeant les eaux de ruissellement vers un caniveau central à grille. Ce caniveau est relié à un séparateur d'hydrocarbures, lui-même relié à deux bassins de décantation.

III. SOURCE, ENJEUX, RISQUES ET MESURES DE GESTION

III.1. SYNTHÈSE DES RISQUES ET MESURES DE PRÉVENTIONS

Les activités du bord de mer du site de Thio nous ont conduit à identifier 7 sources potentielles de pollutions (Tableau 1). En l'absence de mesures pour les limiter, les risques associés sont présentés au Tableau 1. Aussi 57% des risques identifiés sont qualifiés de fort, 29% de moyen et 14% de faible.

Le risque majeur identifié lié aux activités du bord de mer sur l'écosystème marin est consécutif à un impact sédimentaire. Ce risque passe d'un niveau fort (Zone de stockage de minerai et Wharf de chargement) à un niveau moyen par l'application de mesures de gestion.

L'application des bonnes pratiques et de l'ensemble des mesures de gestion préconisées permettent ainsi de réduire le risque pour le rendre acceptable. Ces bonnes pratiques et mesures sont détaillées lorsque nécessaires dans les chapitres suivants. Aussi le risque fort n'apparaît plus comme risque résiduel. Au final le risque résiduel est qualifié de moyen pour 43% des activités et de faible pour les 57% restantes.

L'ensemble des sources d'impacts potentiels, les enjeux pour le milieu récepteur, les risques associés en l'absence de mesures de gestion et les risques résiduels consécutifs à l'application des mesures de gestion sont présentés au Tableau 1.

.

Tableau 1 : Sources d'impacts potentiels, enjeux pour le milieu marin, risques associés en l'absence de mesures de gestion et risques résiduels consécutifs à l'application des mesures de gestion.

Source	Enjeux pour le milieu marin	Risque	Mesure pour limiter/réduire le risque	Risque résiduel
Zone de stockage de minerai	Lessivage et sédimentation sur le récif frangeant	Fort	Mise en place de bassins de gestion des eaux avec contrôle et entretien à minima annuel avant la saison des pluies	Moyen
Wharf de chargement	Echappement de minerai directement en mer et sédimentation sur le récif frangeant	Fort	Eviter les opérations en cas de fortes houles et réalisation d'un chargement précautionneux.	Moyen
Mouillage du minéralier	Impact des chaines de mouillage	Fort	Amarrage sur des installations de mouillage	Faible
Stockage et distribution d'hydrocarbures	Pollution de l'eau	Fort	Bassin de rétention sous les cuves. Séparateur d'hydrocarbures avant rejet	Moyen
Trafic maritime	Echouage-collision	Moyen	Pilotage sécurisé avec des manœuvres assurées avec des navires pilotes	Faible
Atelier mécanique	Pollution de l'eau	Moyen	Dalle bétonnée et couverte avec gestion des eaux	Faible à Nul
Roulage minier	Transfert éolien de poussières dans l'eau	Faible	Mouillage de la route	Faible à Nul

III.2. ZONE DE STOCKAGE DU MINERAI

Il convient de gérer durablement la quantité de minerai sur le site afin d'éviter tout débordement et lessivage massif en cas de pluie importante. Le rejet des eaux pluviales de cette zone est effectué à la mer par l'intermédiaire de deux bassins de décantation. Il est donc nécessaire de réaliser un entretien régulier de cet ouvrage afin d'assurer son efficacité maximale. Celui-ci sera réalisé à *minima* une fois par an préalablement à la saison des pluies. Le suivi régulier du niveau de dépôt pourra conduire à augmenter cette fréquence autant que nécessaire afin de garantir le bon fonctionnement de l'ouvrage.

III.3. WHARF DE CHARGEMENT

Il convient de réaliser le chargement des minéraliers par temps sec et à vent et houle faible afin d'éviter tout transfert de minerai vers le milieu marin. Ce dernier pourrait avoir lieu par voie hydraulique (eaux de pluie sur le convoyeur), par voie éolienne (en cas vents forts) ou par accident lors du chargement à cause de la houle. Une attention particulière est à porter lors du chargement afin d'éviter toute chute accidentelle de minerai entre le quai et le minéralier.

III.4. MOUILLAGE DU MINERALIER

Le mouillage du minéralier sera réalisé sur les mouillages dédiés mise en place par la SLN supprimant de fait limiter l'impact physique des chaines sur les habitats benthiques. De plus pour éviter tout échouage collision, les opérations de mouillage seront sécurisées par des navires pilote.

III.5. TRAFIC MARITIME

Les opérations d'accostage doivent être réalisées prudemment afin d'éviter toute collision d'embarcations. Un entretien des installations de chargement et des minéraliers doit être réalisé régulièrement afin d'éviter toute pollution de l'eau par les hydrocarbures. Une surveillance particulière doit être mise en place pour détecter tout déversement accidentel d'écoulement d'eaux de cale des minéraliers (et autres embarcations) dans le milieu récepteur (composition riche en hydrocarbures et métaux divers en forte concentration).

III.6. ROULAGE MINIER

Il convient d'arroser régulièrement les pistes d'accès ou de les goudronner afin d'éviter l'envol de poussières vers le milieu marin par temps sec.

III.7. ATELIER MECANIQUE

Dans le cas d'un atelier sur dalle bétonnée et couvert, aucune préconisation n'est proposée. Une récupération des déchets industriels doit être prévue afin d'éviter tout transfert accidentel vers la mer.

III.8. STOCKAGE ET DISTRIBUTION D'HYDROCARBURES

Les hydrocarbures sont stockés dans des cuves étanches et disposées sur un bac de rétention. La zone de distribution est reliée à un séparateur d'hydrocarbures afin d'éviter toute pollution. Il devra être entretenu afin de garantir son efficacité.

IV. PROPOSITION DES METRIQUES ET METHODES POUR LE SUIVI DU MILIEU MARIN NIVEAU ECO-SYSTEMIQUE

IV.1. VOLET ICTHYOFAUNE

L'état initial a permis d'établir les caractéristiques détaillées de l'ichtyofaune présente sur le site de Thio. Sur la base de ces caractéristiques écologiques, du contexte environnemental local et du déroulement de l'échantillonnage *in situ*, il a également été possible de mener une réflexion sur l'approche optimale à adopter pour leur suivi à long-terme.

En premier lieu, il a été constaté que les conditions de visibilité apparaissaient très souvent réduites. Ces conditions d'observation posent un problème pour l'observation des espèces mobiles et des espèces se tenant loin du plongeur, en induisant un biais dans leur identification, leur dénombrement et leur estimation. En ce sens, les estimateurs et indicateurs concernant ces espèces apparaissent faiblement pertinents et peu utiles dans le cadre de l'étude de l'ichtyofaune étant donné les conditions spécifiques observées sur les récifs frangeants suivis.

Par ailleurs, de nombreuses études ont montré que certaines familles de poissons fournissaient de bons indicateurs des principaux impacts associés aux activités minières (sur-sédimentation, apports terrigènes accrus), et notamment les Pomacentridae ou poissons-demoiselles (Roberts & Ormond 1987, Graham et al. 2006, Wilson et al. 2008) et les Chaetodontidae ou poissons-papillons (Reese 1981, Bouchon-Navaro et al. 1985, Hourigan et al. 1988, Jones et al. 2004). Ces deux familles étant constituées d'espèces sédentaires ou peu mobiles, fortement inféodées au substrat corallien, les biais engendrés par une visibilité réduite n'affectent que peu leur observation. Dans une moindre mesure, les familles des Apogonidae et des Labridae peuvent également fournir des informations complémentaires concernant l'évolution spatio-temporelle de l'ichtyofaune et son éventuelle perturbation.

Enfin, il est apparu que les peuplements ichtyologiques des récifs frangeants des sites d'étude étaient majoritairement constitués des familles suivantes, tant quantitativement (densité) que qualitativement (richesse spécifique) : Pomacentridae (jusqu'à 81% de la densité totale et 35% de la richesse spécifique totale), Chaetodontidae (18% et 27%), Labridae (11% et 19%), et Acanthuridae (9% et 15%). L'examen de ces familles, et notamment des Pomacentridae et Chaetodontidae, permet donc d'accéder à une part significative des peuplements ichtyologiques, tant concernant leur abondance que leur diversité.

En conséquence, et compte-tenu de l'ensemble de ces remarques, il apparaît raisonnable d'envisager un suivi à long terme de l'ichtyofaune fondé sur une liste restreinte de taxons. Cette liste devra à minima comprendre les Chaetodontidae et les Pomacentridae ainsi que, le cas échéant, les Labridae et Apogonidae. Il convient de noter que la restriction du nombre d'espèces observées diminue la qualité de l'étude d'impact dans le sens où celle-ci ne pourra pas prendre en compte l'ensemble de l'ichtyofaune et de

sa structuration écologique, ce qui est généralement préférable. Notamment, elle ne permettra pas d'étudier l'évolution de la biodiversité totale de l'ichtyofaune. Toutefois, cette perte d'information peut être considérée comme acceptable étant donné qu'elle concerne une partie de l'ichtyofaune :

- qui est assez peu informative écologiquement dans le cadre de l'étude d'impacts miniers localisés, et/ou ;
- qui est peu abondante et peu diversifiée, et donc moins adaptée à la conduite d'analyses statistiques robustes, et/ou ;
- dont l'observation est biaisée du fait des conditions environnementales au niveau des récifs frangeants suivis.

IV.2. VOLET INVERTEBRES

De la même façon que pour les poissons, les états initiaux réalisés ont permis d'établir les caractéristiques marco-benthiques présentes sur chacun des sites. Les investigations menées montrent que sur l'ensemble des groupes échantillonnés (Tableau 2), seuls 4 ont été échantillonnés quantitativement.

Tableau 2 : Groupe échantillonnés dans le cadre des états de référence et nature des données associées.

Groupe	Sous-groupe	Données quantitatives
Algues	Chlorophycées	NON
	Phéophycées	
	Rhodophycées	
Ascidies	Ascidies	NON
Cnidaire	Actiniales	NON
	Alcyonaires	
	Antipathaires	
	Zoanthaires	
Crustacés	Décapodes	OUI
Echinodermes	Crinoïdes	OUI
	Echinides	
	Holothurides	
Eponges	Eponges	NON
Mollusques	Bivalves	OUI
	Gastéropodes	
Vers	Annélides polychètes	OUI
	Platyhelminthes	

Aussi dans le cadre d'un réseau d'échantillonnage dont l'objectif est d'évaluer quantitativement un impact, l'échantillonnage des éponges, des ascidies, algues et cnidaires ne semble pas pertinent. Cela semble d'autant plus justifié que la méthode du LIT recense de façon simplifiée ces catégories et que celles-ci structurent globalement peu les zones échantillonnées.

Ainsi nous proposons de limiter l'échantillonnage aux 4 groupes suivants :

- Echinodermes
- Crustacés
- Mollusques
- Vers

Par ailleurs la structuration des peuplements benthique observée montre que celle-ci est généralement dominée en densité par un ou deux groupes eux-mêmes expliqués par quelques espèces. A l'issue de quelques campagnes *in situ* une liste optimisée restreinte pourra être proposée.

IV.3. VOLET SUBSTRAT

L'échantillonnage réalisé lors de l'état de référence a permis d'obtenir un nombre élevé d'informations grâce aux mesures suivantes:

- LIT général
- LIT au niveau générique
- Lésions/maladies coralliennes

Le recouvrement corallien est un indicateur clé et largement utilisé sur les suivis récifaux du monde entier. Il apporte une information sur l'état de santé général d'un récif (Wilkinson et al. 2008). L'étude des peuplements coralliens avec un niveau de description taxonomique supérieure apporte des informations d'expertise essentielles sur la vulnérabilité des peuplements. En effet, les différents genres coralliens ont une sensibilité variable aux changements de qualité de l'eau (Cooper et al. 2009, McClanahan et al. 2004, Guest et al. 2012). Il a été montré que certains genres coralliens ont des mécanismes adaptés à la vie en milieux turbides, notamment pour « souffler » les dépôts de sédiments liés au déchargement des cours d'eau (Sofonia et al. 2008, Fabricius et al. 2011). La richesse taxonomique ainsi que le recouvrement par genre corallien (et son évolution) constituent de précieux indicateurs dans le cadre d'une étude de suivi d'impacts que nous avons initiées sur les stations de Thio.

Tableau 3: Catégorie de lésions échantillonnées

Catégorie de Lésions	Sous catégories
Décoloration	Blanchissement total
	Blanchissement par patches
	Multiples spots blanchis
	Multiples spots roses
	Pigmentation rose
	Autre pigmentation
Malformation corallienne	
Prédation	Acanthaster
	Drupella
	Corallophyllia
	Poissons
	Autre prédation
Compétition	Sédimentation
	Algues
	Eponge
	Autre compétition
Maladie corallienne	Black Band Disease
	White Syndrome
	Ulcerative White Spot
	Autre maladie

Les maladies et lésions coralliennes complètent la série d'indicateurs intégrés. En effet, les maladies/lésions coralliennes font partie des perturbations majeures des récifs coralliens généralement accentuées par les activités anthropiques (Sutherland et al. 2004). En plus des maladies généralement d'origine pathogène (Black Band Disease, White Syndrome etc.), les lésions permettent en fonction de leur typologie (Tableau 3) et de leurs prévalences d'identifier les principales causes de perturbation d'une zone ainsi que l'intensité des perturbations. Aussi une prévalence élevée de lésions liées à la sédimentation traduira une qualité de l'eau médiocre, probablement liée à une turbidité excessive. Cette variable explique

de façon intégrée dans le temps la pression sédimentaire qui est une des principales menaces sur les récifs coralliens liée au développement minier. Rappelons que cette variable de pression sédimentaire est difficile à évaluer de façon directe et demande généralement la mise en place d'échantillonnage avec une fréquence élevée. L'étude des Lésions/maladies coralliennes a été initiée sur les stations de Thio dans le cadre de cet état de référence.

Ces mesures pourraient être complétées par une mesure annuelle de la dynamique corallienne qui n'a pas été réalisée lors de l'état de référence. Cette mesure, préconisée par le guide CNRT (Beliaeff et al. 2011), permet de caractériser une zone en termes de densité de colonies coralliennes par classes de taille. Cela permet d'évaluer:

- la structure démographique des coraux qui constituent le recouvrement corallien (beaucoup de petite colonies ou quelques grandes) qui permet de poser certaines hypothèses sur les perturbations et leurs effets ;
- de suivre le recrutement et la croissance des coraux indicateurs précieux et intégrés de l'évolution de la qualité du milieu

Ainsi, cette variable permettrait de compléter le panel des variables collectées et l'expertise sur l'analyse de la zone.

IV.4. TABLEAU DE SYNTHÈSE DU SUIVI ECOSYSTEMIQUE

Notre expertise appuyée par la bibliographie nous conduit à conseiller la réalisation d'une campagne annuelle de collecte des données sur la base des matrices et méthodes reprises dans le Tableau 4. On rappelle l'importance du risque sédimentaire et de son suivi. Celui-ci est particulièrement délicat à suivre. Le substrat corallien offre à travers les variables (et particulièrement l'étude des lésions coralliennes) présentées dans le tableau ci-dessous un choix de métriques qui permet de suivre la pression sédimentaire de façon idéale et intégrée.

Tableau 4 : synthèse des préconisations de suivi pour le volet éco-systémique

Matrice	Méthode optimisée	Variables	Fréquence	Réalisé au cours de l'état de référence	Nombre de stations par site
Corail	LIT avec niveau de description générique pour les coraux scléractiniaires et alcyonaires	Recouvrement de 32 catégories (algues, alcyonaires, éponges ; etc...), recouvrement par genre corallien et diversité corallienne	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Corail	Belt-transect	Fréquence d'occurrence de différentes lésions corallienne et maladies	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Corail	Belt-transect	Densité des colonies par classe de taille et par genre	Annuelle	Non mais option intéressante	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Invertébrés	Belt-transect sur 4 groupes	Densité/Diversité	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Ichtyofaune	Distance-variable sur liste restreinte	Densité/Biomasse	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données

V. PROPOSITION DES METRIQUES ET METHODES POUR LE SUIVI DU MILIEU MARIN NIVEAU PHYSICO-CHIMIQUE

Les forçages environnementaux identifiés sur le site de Thio directement liés aux activités du bord de mer permettent de dégager les sources de pressions physico-chimiques associées à ceux-ci tels **les apports sédimentaires, les flux en métaux et en contaminants organiques (ex. : HCT)**.

L'impact environnemental étant néanmoins potentiellement avéré avant la mise en place de l'état de référence, seule une « analyse géographique » est possible, comme le préconise le « *Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en NC* » (Bélieff et al, 2011) : il s'agit alors de comparer le/les sites impactés avec des sites de référence, présentant idéalement les mêmes configurations.

La proposition d'études qui suit consiste à suivre, au regard des impacts identifiés, des connaissances acquises à l'issue de l'état de référence et des préconisations (Bélieff et al, 2011), les paramètres physico-chimiques dans les matrices, sédiment, eau et biote.

La détermination des métaux dans la colonne d'eau ou associés aux sédiments demeure une technique efficace pour « photographier » à un instant t le niveau de contamination dans le milieu physique et évaluer dans le temps l'évolution de cette dernière.

Mais, d'un point de vu écotoxicologique, la seule connaissance des concentrations en contaminants dissous dans l'eau de mer et/ou associés aux particules sédimentaires (termes sources) ne permet pas d'évaluer de manière suffisante l'importance de leur transfert dans le compartiment biologique où ils peuvent alors s'accumuler et/ou y induire des effets toxiques (Hédouin, 2006 ; Breau et al, 2009)

La force de ce suivi, réalisé dans trois matrices (eau, sédiments et biote) réside dans une réelle et palpable complémentarité des méthodes qui permettent toutes ensemble de :

- quantifier les pressions chimiques et sédimentaires qui s'exercent sur le milieu ;
- définir le rôle du compartiment sédimentaire en termes de « source » ou de « puits » des métaux ;
- détecter les pressions et les impacts à différentes échelles de temps et d'espace ;
- estimer les impacts potentiels pour le compartiment biologique grâce à ces différents indicateurs géochimiques et physico-chimiques ;
- estimer les facteurs d'accumulation des principaux polluants dans des organismes sentinelles

V.1. CARACTERISATION DES SEDIMENTS

Les apports sédimentaires ont un impact sur la qualité de l'eau (augmentation de la turbidité, augmentation des concentrations en métaux...), sur la qualité des habitats et donc sur la faune et la flore (diminution de la

quantité de lumière disponible, étouffement des organismes benthiques, contamination des organismes, réduction des concentrations en oxygène dissous, ...).

La caractérisation des sédiments nécessite de déterminer des paramètres physiques et géochimiques qui vont permettre de suivre l'évolution des flux particuliers dans le temps et de définir leur extension dans l'espace : il est donc conseillé de prendre en compte les paramètres basiques comme la granulométrie (indicateur de la nature des apports) et la teneur en carbonate (indicateur de la composition des apports).

Dans le cadre des activités minières, les métaux constituent le principal indicateur à suivre pour caractériser les apports terrigènes d'origine latéritique (exploitation minière). Toutefois, des composés organiques comme les hydrocarbures doivent également faire l'objet d'une surveillance en raison de la mécanisation du site, des aires de stockage des carburants, du trafic maritime. Idéalement, ces suivis sont complétés par l'évaluation des taux d'accumulation (ou taux de sédimentation).

*Remarque : Dans la mesure où les sédiments sont considérés comme le réceptacle ultime des contaminants, la variation de ces derniers dans cette matrice demeure une information intégrée dans le temps. Un **suivi bisannuel** est proposé.*

- **Echantillonnage**

Les prélèvements sont effectués sur la couche centimétrique des sédiments de surface afin de fournir une information sur l'extension spatiale des influences terrigènes ; les prélèvements des sédiments de surface seront effectués à l'aide d'une benne de type Van-Veen en acier inoxydable (nuance 316L).

Chaque échantillon de sédiments sera conditionné dans des sachets en vinyle à usage unique (Whirl-pack), congelé puis lyophilisé. Tous les échantillons de sédiments destinés à l'analyse des métaux seront tamisés par voie humide à 40 µm (pélites) pour effectuer les diverses analyses géochimiques. Ce tamisage s'impose pour normaliser les analyses à des fins d'inter-comparaison et se suivi.

- **Mesure granulométrique**

Objet : la caractérisation des sédiments nécessite d'étudier la distribution des populations de grains afin, d'une part, de suivre l'influences des différents aménagements sur site et/ou opérations de terrassement (termes sources) et d'autre part, d'estimer le potentiel contaminant des particules les plus fines ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) reconnues depuis longtemps comme les plus problématiques (ex. : Mayer & Fink, 1979 ; Ackermann, 1980 ; Deely & Fergusson, 1994 ; He & Walling, 1996.)

L'étude de la granulométrie des sédiments marins est conduite selon la norme NF X31-107 (Analyse granulométrique par sédimentation ; les tamis utilisés sont de mailles 2 mm et de 500, 200, 50 µm.)

Brièvement, les sédiments, séchés à 105°C et pesés, sont tamisés sur une colonne de tamisage vibrante. Les fractions sont récupérées de chaque tamis et les pourcentages massiques sont alors exprimés pour chaque classe de taille.

- **Carbonates**

Objet : Outre les apports terrigènes issus de l'érosion des bassins versants ou par le transport du minerai, les particules ont également une origine marine carbonatée. Ces dernières peuvent être remises en suspension par des actions mécaniques diverses comme la houle du large et les clapots engendrés par les

régimes de vent, voire aussi l'activité humaine. Ce paramètre est pertinent pour mettre en évidence l'augmentation ou la diminution des influences marine ou terrestre, respectivement.

Les teneurs en carbonates sont déterminées par la méthode du « calcimètre de Bernard ». Cette méthode consiste en une attaque du sédiment grâce à une solution d'acide chlorhydrique qui génère la formation de CO₂. Le volume de gaz est titré et la concentration en carbonate de calcium est déterminée par relation stoechiométrique. Une autre approche consiste à analyser le calcium dans les sédiments et à calculer l'équivalent carbonates.

- **Dosage des hydrocarbures totaux**

Objet : les sédiments constituent à la fois un lieu d'accumulation et d'émission des polluants. Il est donc nécessaire de mesurer les concentrations en hydrocarbures contenues dans les sédiments pouvant avoir un impact sur la faune et la flore.

L'analyse des hydrocarbures totaux est effectuée selon la norme en vigueur DIN EN ISO 9377-2.

- **Dosage des métaux**

Objet : l'analyse des métaux contenus dans les sédiments fournit plusieurs types d'information : (i) le niveau de pollution potentielle du milieu notamment vis-à-vis des organismes marins benthiques t (ii) l'importance des termes sources et l'évolution spatiale et temporelle de leur domaine d'influence (signatures géochimiques permettant de tracer une source de matériel particulaire) et (iii) le potentiel de relargage des métaux stockés par les particules dans l'environnement.

Ces dosages sont conduits systématiquement sur les fractions pélitiques ($\varnothing < 63 \mu\text{m}$) des sédiments, soit aux acides forts, soit par fusion alcaline pour l'analyse des concentrations totales. Les éléments Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni (influence terrigène), Cd et Zn (influence anthropique) seront analysés par ICP-OES selon la norme ISO 11885.

V.2. CARACTERISATION DE LA COLONNE D'EAU

La détermination des concentrations pour les principaux métaux dissous doit faire l'objet d'une attention toute particulière compte tenu du contexte géologique et des aléas climatiques des aires tropicales (variations saisonnières) qui accélèrent les phénomènes de lixiviation des sols. Il s'agit avant tout d'obtenir une image la plus claire possible de la répartition spatiale et temporelle des concentrations et de distinguer les influences naturelles (influence notamment des bassins versants) de celles induites par l'activité humaine.

L'eau est le principal vecteur des contaminants et à ce titre la qualité géochimique du milieu doit être déterminée puisqu'elle influe directement sur l'équilibre des écosystèmes.

La caractérisation des eaux nécessite la détermination de paramètres physico-chimiques et géochimiques. Ces caractéristiques vont permettre de suivre l'évolution des influences terrigènes dans le temps et leur extension dans l'espace : il est donc conseillé de suivre en particulier la turbidité, les concentrations en métaux dissous et autres polluants comme les hydrocarbures. Pour estimer l'évolution de l'état de santé du

milieu, le dosage de la chlorophylle A est recommandé car elle reflète le niveau d'activité des organismes planctoniques et donc de la production primaire. La **fréquence conseillée est semestrielle**.

- **Echantillonnage**

Les principaux paramètres physico-chimiques (salinité, température, turbidité, fluorescence et oxygène dissous) seront pris en compte pour la caractérisation de base des masses d'eau. Leur acquisition s'effectuera en continu et *in-situ* le long d'un profil vertical dans la colonne d'eau à l'aide d'une sonde multiparamétrique immergeable (sonde SBE19 équipée de capteurs additionnels).

Les prélèvements d'eau complémentaires sont effectués par des bouteilles « *Niskin* » pour le dosage de la chlorophylle A; des bouteilles de type « *Go-Flo, Metal-Free* » seront utilisées pour les échantillons destinés au dosage des métaux dissous et des hydrocarbures totaux (HCT).

Les prélèvements sont réalisés à 3 m sous l'interface air-eau, maximum, pour prendre en compte les influences des cours d'eau.

Remarque : Dans l'objectif d'un suivi environnemental de la qualité des masses d'eau, la fréquence semestrielle est conseillée selon le Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en NC (Beliaeff, 2011). Cette fréquence permet de prendre en compte la variabilité saisonnière qui est une composante principale des zones tropicales, et ainsi définir l'amplitude du bruit de fond géochimique naturel. En effet, ces campagnes saisonnières permettent de disposer statistiquement des différentes conditions hydro-climatiques qui influencent fortement l'environnement, notamment en matière d'apports terrigènes naturels vers le lagon.

- **Paramètres physico-chimiques**

Objet : identification de la turbidité, conséquence de plusieurs phénomènes : apports sédimentaires terrigènes, remise en suspension, eutrophisation, ainsi que la fluorescence ainsi que la concentrations en oxygène dissous et des paramètres supports comme la température et la salinité.

Turbidité : La mesure de la turbidité qui constitue une bonne estimation de la transparence de l'eau, est un paramètre pertinent pour évaluer la conséquence des apports en matière en suspension, voire indirectement en nutriments (Bélieff et al., 2011). En effet, en cas d'eutrophisation, on assiste à une augmentation de la turbidité suite à l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique et l'accumulation de matériel organique détritique dans les couches turbides (néphéloïdes) de surface ou de fond.

Température et salinité : La mesure de la température et de la salinité permettent de mettre en évidence d'éventuelles stratifications des masses d'eau dessalées dues à l'apport des creeks et/ou des précipitations atmosphériques. Ces structures définissent les conditions de transport des polluants des particules, de leur dispersion et de leur sédimentation (couches turbides ou néphéloïdes).

La fluorescence totale et/ou chlorophylle A : Les apports en éléments nutritifs sont à la base des processus débouchant sur l'eutrophisation du milieu. Ces éléments enrichissent le milieu, et peuvent aboutir à des efflorescences algales (éventuellement toxiques). Impactant les peuplements présents (récifs coralliens ou herbiers). La fluorescence totale estimée par la sonde multiparamétrique est révélatrice **en première approximation** de la biomasse phytoplanctonique (pigments chlorophylliens).

La concentration en chlorophylle A (principal pigment photosynthétique des algues planctoniques dans la colonne d'eau) est un excellent estimateur de la biomasse phytoplanctonique, classiquement utilisée, pour fournir une bonne indication du statut trophique du milieu. Ce paramètre est fortement sensible aux perturbations et fournit également des indications précoces de dégradation de la qualité écologique de l'écosystème.

Oxygène dissous : L'oxygène est un élément vital qui gouverne la majorité des processus biologiques des écosystèmes aquatiques. La concentration de l'oxygène dissous dans l'eau de mer est la résultante de processus physiques, chimiques et biologiques. L'eutrophisation d'un milieu s'accompagne d'une plus forte consommation d'oxygène du fait de la prépondérance des activités biologiques.

- **Métaux dissous**

***Objet :** Les fractions dissoutes (inférieur à 0,45 µm) des métaux font partie des formes chimiques potentiellement bio-disponibles pour tous les organismes marins et notamment les poissons ou les algues dont ils se nourrissent. Par ailleurs les larves et/ou embryons sont des stades critiques de la vie et extrêmement sensibles aux concentrations en métaux dissous : les contaminations en métaux peuvent conditionner leur potentiel et développement et donc contraindre les populations. Enfin, les formes chimiques dissoutes contaminent les micro-organismes comme le phytoplancton, premier élément de la chaîne alimentaire. Les métaux d'intérêt dans le cadre de ce suivi sont d'une part les métaux d'origine terrigène liés aux activités minières tels Co, Fe, Mn, Ni, et d'autre part Cu, Zn et Cr VI liés aux activités anthropiques.*

Les échantillons prélevés sont filtrés (filtres Millipore®, qualité HA, prélavés) et préconcentrés le jour même sur des résines chélatantes selon Moreton et al (2010) et mesurés par ICP-OES (méthode validée selon NF T90-210).

Le Cr VI est dosé par voltamétrie ; technique électrochimique qui permet de mesurer le potentiel d'une espèce à la surface de l'électrode de travail. Le potentiel varie de manière systématique causant la réduction ou l'oxydation des espèces chimiques électro-actives à l'électrode. Les pics obtenus sont proportionnels à la concentration des espèces métalliques labiles.

- **Hydrocarbures totaux** :

***Objet :** l'eau constitue un des principaux vecteurs de la contamination de la faune et la flore. Il est donc nécessaire de mesurer les concentrations en hydrocarbures potentiellement présent dans la colonne d'eau.*

L'analyse des hydrocarbures totaux sera effectuée selon la norme DIN EN ISO 9377-2.

V.3. QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE

***Objet :** Le suivi dans le compartiment biotique fournit des informations supplémentaires importantes concernant la disponibilité biologique (ou biodisponibilité) des contaminants présents dans l'eau et dans les sédiments. En effet, la seule connaissance des concentrations en contaminants dissous dans l'eau de mer ou associés aux particules sédimentaires ne suffit pas pour évaluer de manière exhaustive l'importance des*

transferts vers le compartiment biologique. L'étude écotoxicologique de la bioaccumulation des contaminants fournit une représentation des fluctuations à court terme des concentrations de ces derniers dans le milieu ambiant.

La qualité écotoxicologique des masses d'eaux lagunaires peut être suivie selon des méthodes de biosurveillance passive ou active :

La méthode de transplantation (biosurveillance active) d'espèces dans des stations artificielles (cages) offre des avantages importants pour le suivi environnemental tels :

- La position exacte de la station à surveiller : contrairement à la surveillance passive, pour laquelle les spécimens à analyser sont récoltés directement sur le site à surveiller quand ils y sont présents, la surveillance active par transplantation permet à l'expérimentateur de choisir la position exacte de la station à surveiller indépendamment de la présence des espèces indicatrices
- Elle permet aussi de contrôler l'homogénéité biologique (même taille/poids, période du cycle reproducteur, périodes d'exposition aux contaminants) des spécimens transplantés, ceux-ci provenant d'une seule et même population. Cette avantage permet une réduction importante de la variabilité naturelle des concentrations en contaminants entre individus et permet d'éliminer le biais lié à l'adaptation physiologique.
- Elle autorise l'obtention de spécimens en quantité suffisante pour favoriser la sensibilité et la pertinence des tests statistiques de comparaison des résultats.
- Permet de fixer précisément une durée d'exposition commune à toutes les stations à surveiller, réduisant ainsi la variabilité des résultats. En effet, les concentrations des contaminants dans les spécimens résidents (biosurveillance passive) peuvent refléter une contamination passée mais pas forcément actuelle du milieu environnant.

En raison de ces avantages, cette méthodologie de transplantation est particulièrement recommandée dans le cadre de suivis environnementaux et a fait l'objet d'une standardisation et d'une normalisation sur le plan international, avec l'édition de la norme ASTM E2122-02 « Standard Guide for Conducting In-situ Field Bioassays With Caged Bivalves » (ASTM, 2002). De nombreux pays ont développé des réseaux de surveillance basés sur cette technique sous le terme générique de « Mussel Watch ».

Cette méthodologie assure donc l'obtention, pour chacune des stations étudiées, de résultats directement comparables entre eux : les résultats obtenus sont le reflet de la quantité moyenne de contaminant disponible pendant la période de transplantation pour l'organisme transplanté en fonction d'un ensemble de facteurs hydro-climatiques et/ou anthropiques.

Le suivi par la méthode de transplantation de bioindicateurs est proposé dans la mesure où les bivalves ont eu un caractère absent sur le site de Thio, l'étude par biosurveillance passive n'a pu donc être conduite dans le cadre de l'état de référence. Sur la base des travaux de recherche, précédemment cités (Hédouin, 2006 ; Breau et al, 2009) et conduits localement, l'huître *Isognomon isognomon* est retenue pour la réalisation de ce suivi écotoxicologique en Nouvelle-Calédonie. Les organismes collectés dans un milieu de référence sont transplantés dans des cages (« caging ») sur la zone d'impact à étudier pour une durée d'au moins trois mois. En effet le phénomène de bioaccumulation peut-être plus ou moins long et nécessite plusieurs mois

sur site pour que sa concentration en contaminant soit représentative de la contamination du milieu ambiant (atteinte de l'équilibre avec le milieu environnant). Un **suivi annuel** est proposé idéalement mais il pourrait, pour des raisons budgétaires, être envisagé tous les deux ans.

V.4. TABLEAU DE SYNTHÈSE

Le tableau suivant récapitule les paramètres sélectionnés et détaillés dans le paragraphe précédent, pour le suivi des activités du bord de mer sur le site de Thio.

Matrice	Méthode	Variables	Fréquence	Réalisé au cours de l'état de référence
Eau	Sonde multiparamétrique: (CTD)	Température Salinité Turbidité, Fluorescence Oxygène dissous	Semestrielle	Oui
Eau	Métaux dissous par préconcentration sur résine (Moreton, et al 2009) ISO 11885	Cobalt dissous (Co) Cuivre dissous (Cu) Fer dissous (Fe) Manganèse dissous (Mn) Nickel dissous (Ni)	Semestrielle	Non
Eau	Chlorophylle a	Chl a	Semestrielle	Non
Eau	Cr VI par voltamétrie (Méthode : Achterberg et Van den Berg 1994)	Cr(VI)	Semestrielle	Non
Sédiments	Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette (NF X31-107)	Sables grossiers (200<Ø<2000 µm) Sables fins (50<Ø<200 µm) Limons grossiers (20<Ø<50 µm): Limons fins (2<Ø<20 µm) Argiles (Ø<2µm)	bisannuelle	Oui
Sédiments	Métaux totaux par fusion alcaline et ICP-OES (NF ISO 11885)	Cadmium (Cd) Cobalt (Co) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Manganèse dissous (Mn) Nickel dissous (Ni) Plomb (Pb) Zinc (Zn)	bisannuelle	Oui
Sédiments	Hydrocarbures total (Mop C-4/39 V6 selon ISO 16703)	HCT	bisannuelle	Non
Sédiments	Détermination de la teneur en carbonate : Méthode volumétrique NF ISO 10693	CaCO3	bisannuelle	Oui
Tissu biologique	BIOACCUMULATION (<i>Isognomon isognomon</i> pour 1 station + 1 référence) (Méthode: interne minéralisation par four à micro-ondes / analyse par ICP-OES (ISO 11885))	Cadmium (Cd) Cobalt (Co) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Manganèse dissous (Mn) Nickel dissous (Ni) Plomb (Pb) Zinc (Zn)	annuelle	Absence d'organismes pour la biosurveillance passive

Tissu biologique	BIOACCUMULATION (<i>Isognomon isognomon</i> pour 1 station + 1 référence)	HCT	annuelle	Absence d'organismes pour la biosurveillance passive
------------------	--	-----	----------	--

SYNTHESE DES PRECONISATIONS DE SUIVI

Le Tableau 5 synthétise les préconisations de suivi pour le site de Thio.

Tableau 5 : Bilan par volet et par matrice des variables et fréquences associées idéales pour la réalisation d'un suivi du bord de mer de Thio.

Matrice	Méthode optimisée	Variables	Fréquence	Réalisé au cours de l'état de référence	Nombre de stations par site
VOLET ECOSYTEMIQUE					
Corail	LIT avec niveau de description générique pour les coraux scléractiniaires et alcyonaires	Recouvrement de 32 catégories (algues, alcyonaires, éponges ; etc...), recouvrement par genre corallien et diversité corallienne	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Corail	Belt-transect	Fréquence d'occurrence de différentes lésions corallienne et maladies	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Corail	Belt-transect	Densité des colonies par classe de taille et par genre	Annuelle	Non mais option intéressante	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Invertébrés	Belt-transect sur 4 groupes	Densité/Diversité	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données
Ichtyofaune	Distance-variable sur liste restreinte	Densité/Biomasse	Annuelle	oui	3 avec pour chaque station un triplicata de données

VOLET PHYSICO-CHIMIQUE					
Matrice	Méthode optimisée	Variables	Fréquence	Réalisé au cours de l'état de référence	Nombre de stations par site
Eau	Sonde multiparamétrique: (CTD)	Température Salinité Turbidité, Fluorescence Oxygène dissous	Semestrielle	oui	2
Eau	Métaux dissous par préconcentration sur résine (Moreton, et al 2009) ISO 11885	Cobalt dissous (Co) Cuivre dissous (Cu) Fer dissous (Fe) Manganèse dissous (Mn) Nickel dissous (Ni)	Semestrielle	non	2
Eau	Chlorophylle a	Chl a	Semestrielle	non	2
Eau	Cr VI par voltamétrie (Méthode : Achterberg et Van den Berg 1994)	Cr(VI)	Semestrielle	non	2

Sédiment	Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette (NF X31-107)	Sables grossiers (200<Ø<2000 µm) Sables fins (50<Ø<200 µm) Limons grossiers (20<Ø<50 µm): Limons fins (2<Ø<20 µm) Argiles (Ø<2µm)	Bisannuelle	Oui	2
Sédiment	Métaux totaux par fusion alcaline et ICP-OES (NF ISO 11885)	Cadmium (Cd) Cobalt (Co) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Manganèse dissous (Mn) Nickel dissous (Ni) Plomb (Pb) Zinc (Zn)	Bisannuelle	Oui	2
Sédiment	Hydrocarbures total (Mop C-4/39 V6 selon ISO 16703)	HCT	Bisannuelle	Non	2
Sédiment	Détermination de la teneur en carbonate : Méthode volumétrique NF ISO 10693	CaCO ₃	Bisannuelle	Oui	2

Tissu biologique	BIOACCUMULATION (<i>Isognomon isognomon</i> pour 1 station + 1 référence) (Méthode: interne minéralisation par four à micro-ondes / analyse par ICP-OES (ISO 11885))	Cadmium (Cd) Cobalt (Co) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Manganèse dissous (Mn) Nickel dissous (Ni) Plomb (Pb) Zinc (Zn)	annuelle	Absence d'organismes pour la biosurveillance passive	2
Tissu biologique	BIOACCUMULATION (<i>Isognomon isognomon</i> pour 1 station + 1 référence)	HCT	annuelle	Absence d'organismes pour la biosurveillance passive	2

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abele, L.G. & Patton, W.K. 1976. The size of coral heads and community biology of associated decapod crustaceans. *Journal of Biogeography* 3, 35–47.
- Alvarez-Filip L, Dulvy NK, Côté IM, Watkinson AR, Gill JA (2011) Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecol Appl* 21:2223–2231
- Alvarez-Filip L, Dulvy NK, Gill JA, Côté IM, Watkinson AR (2009) Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proc R Soc Lond B Biol* 276:3019–3025
- Beliaeff B, Bouvet G, Fernandez JM, David C, Laugier T (2011) Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT le nickel. 169p.
- Bellwood DR, Hughes TP, Folke C and Nystrom N (2004) Confronting the Coral Reef Crisis. *Nature* 429: 827-833
- Bellwood, D.R., Hoey, A.S. & Choat, J.H. 2003. Limited functional redundancy in high diversity systems resilience and ecosystem function in coral reefs. *Ecology Letters* 6, 281–285.
- 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.
- Bruno JF, Bertness MD (2001) Habitat modification and facilitation in benthic marine communities. In: Bertness MD, Gaines SD
- Buckland ST (1993) Distance sampling - Estimating abundance of biological populations. London: Chapman and Hall Editions.
- 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.
- Chabanet P, Ralambondrainy H, Amanieu M, Faure G & Galzin R (1997) Relationship between coral reef substrata and fish. *Coral Reefs* 16 : 93–102
- Choat, J.H. & Bellwood, D.R. 1991. Reef fishes: their history and evolution. In *The Ecology of Fishes on Coral Reefs*, P.F. Sale (ed.). San Diego, California: Academic Press, 39–68.
- Clua E (2004) Influence relative des facteurs écologiques et de la pêche sur la structuration des stocks de poissons récifaux dans six pêcheries du Royaume des Tonga (Pacifique Sud). Thèse de Doctorat EPHE, Perpignan, 201p.
- Cooper TF, Gilmour JP, Fabricius KE (2009) Bioindicators of changes in water quality on coral reefs: Review and recommendations for monitoring programmes. *Coral Reefs* 28: 589–606
- DALTO, A.G., GREMARE, A., DINET, A. and FICHET, D. (2006). Muddy-Bottom Meiofauna Responses to Metal Concentrations and Organic Enrichment in New Caledonia South-West Lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67 (4): 629-644.
- Emslie M, Pratchett M, Cheal A, Osborne K (2010) Great Barrier Reef butterflyfish community structure: the role of shelf position and benthic community type. *Coral Reefs* 29:705-715

English S, Wilkinson C, Baker V (1997) Survey manual for tropical marine resources. 2nd Edition. Australian institute of marine science publ., Townsville, Australia : 390p.

Erftemeijer, P.L.A., et al. (2012) Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: A review. Mar. Pollut. Bull.

Fabricius K, Cooper T, Humphrey C, Uthicke S, Death G, Davidson J, LeGrand H, Thompson A & Schaffelke B. (2012) A bioindicator system for water quality on inshore coral reefs of the Great Barrier Reef. Marine Pollution Bulletin 65: 320–332

Fabricius KE et al. (2011) A bioindicator system for water quality on inshore coral reefs of the Great Barrier Reef. Mar Pollut Bull doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.004

Fabricius KE, De'ath G, McCook L, Turak E, Williams DM (2005) Changes in algal, coral and fish assemblages along water quality gradients on the inshore Great Barrier Reef. Mar Pollut Bull 51:384 398

Fabricius KE, Golbuu Y and Victor S (2007) Selective mortality in coastal reef organisms from an acute sedimentation event. Coral Reefs. 26: 69.

Fabricius, K.E., 2005 Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. Marine pollution bulletin 50, 125-146

Froese R, Pauly D (1997) FishBase 97: concepts, design and data sources. ICLARM (éd.), Manila.

Garpe, K.C., Yahya, S.A.S., Lindahl, U. & Ohman, M.C. 2006. Long-term effects of the 1998 coral bleaching event on reef fish assemblages. Marine Ecology Progress Series 315, 237–247.

Glenn De'ath and Katharina Fabricius 2010. Water quality as a regional driver of coral biodiversity and macroalgae on the Great Barrier Reef. Ecological Applications 20:840–850. <http://dx.doi.org/10.1890/08-2023.1>

Graham NAJ and Nash KL (2012) The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. Coral reefs DOI 10.1007/s00338-012-0984-y

Graham NAJ, McClanahan TR, MacNeil MA, Wilson SK, Polunin NVC, Jennings S, Chabanet P, Clark S, Spalding MD, Letourneur Y, Bigot L, Galzin R, Ohman MC, Garpe KC, Edwards AJ, Sheppard CRC (2008) Climate warming, marine protected areas and the ocean-scale integrity of coral reef ecosystems. PLoS ONE 3:e3039

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.

Graham NAJ, Wilson SK, Pratchett MS, Polunin NVC, Spalding MD (2009) Coral mortality versus structural collapse as drivers of corallivorous butterflyfish decline. Biodivers Conserv 18:3325–3336

Gratwicke B and Speight MR (2005) The relationship between fish species richness, abundance and habitat complexity in a range of shallow tropical marine habitats. Journal of Fish Biology, 66: 650–667

Grigg RW (1994) Effects of sewage discharge, fishing pressure and habitat complexity on coral ecosystems and reef fish in Hawaii. Mar Ecol Prog Ser 103:25–34

Guest JR, Baird AH, Maynard JA, Muttaqin E, Edwards AJ, et al. (2012) Contrasting Patterns of Coral Bleaching Susceptibility in 2010 Suggest an Adaptive

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, 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.

Halford A, Cheal AJ, Ryan D et al. (2004) Resilience to large-scale disturbance in coral and fish assemblages on the Great Barrier Reef. Ecology 85:1892–1905

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.

Hughes T P et al. (2003) Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. Science 301: 929–933

Hughes TP, Connell JH (1999) Multiple stressors on coral reefs: a long-term perspective. Limnol Oceanogr 44:461–488

Hughes TP, Graham NAJ, Jackson JBC, Mumby PJ, Steneck RS (2010) Rising to the challenge of sustaining coral reef resilience. Trends Ecol Evol 25:633–642

Hughes, T.P., Bellwood, D.R. & Connolly, S.R. 2002. Biodiversity hotspots, centres of endemism, and the conservation of coral reefs. Ecology Letters 5, 775–784.

ISRS (2004) The effects of terrestrial runoff of sediments, nutrients and other pollutants on coral reefs. Briefing Paper 3, International Society for Reef Studies, pp: 18'

Jones CG, Lawton JH, Shachak M (1994) Organisms as ecosystemengineers. Oikos 69:373–386

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.

Kramarsky-Winter E and Loya Y (2000) Tissue regeneration in the coral *Fungia granulosa*: the effect of extrinsic and intrinsic factors. Mar Bio 137: 867-873

Kulbicki M (2006) Ecologie des poissons lagunaires de Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Laboratoire EPHE & IRD, Université de Perpignan.

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, Guillemot N, Amand M (2005) A general approach to length-weight relationships for New Caledonian lagoon fishes. Cybium 29(3): 235-252

- 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 Pomacantidae. *Aquatic Living Resources* 12 : 315-325.
- 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.
- Leray M, Béraud M, Anker A, Chancerelle Y, Mills SC (2012) *Acanthaster planci* Outbreak: Decline in Coral Health, Coral Size Structure Modification and Consequences for Obligate Decapod Assemblages. *PLoS ONE* 7(4): e35456. doi:10.1371/journal.pone.0035456
- 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
- Lieske, E. & Myers, R. 1994. *Coral Reef Fishes—Indo-Pacific and Caribbean*. London: Harper Collins.
- Lindahl U, Ohman MC, Schelten CK (2001) The 1997/1998 mass mortality of corals: effects of fish communities on a Tanzanian coral reef. *Mar Pollut Bull* 42:127–131
- McClanahan TR, Baird AH, Marshall PA, Toscano MA (2004) Comparing bleaching and mortality responses of hard corals between southern Kenya and the Great Barrier Reef, Australia. *Mar Poll Bull* 48: 327–335
- McCook LJ, Jompa J, Diaz-Pulido G (2001) Competition between corals and algae on coral reefs: a review of evidence and mechanisms. *Coral Reefs* 19:400–417
- McGill BJ, Enquist BJ, Weiher E, Westoby M (2006) Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution* 21: 178-185.
- Munday PL (2004). Habitat loss, resource specialization, and extinction on coral reefs. *Global Change Biology* 10, 1642–1647
- Öhman MC & Rajasuriya A (1998) Relationships between habitat structure and fish assemblages on coral and sandstone reefs. *Env. Biol. Fish.* 53: 19-31
- Paulay, G. 1997. Diversity and distribution of reef organisms. In *Life and Death of Coral Reefs*, C. Birkeland (ed.). New York: Chapman and Hall, 303–304.
- Petchey OL, Gaston KJ (2006) Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters* 9: 741-758.
- Philipp E, Fabricius K (2003) Photophysiological stress in scleractinian corals in response to short-term sedimentation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 287: 57–78
- Pratchett MS, Munday MS, Wilson SK, Graham NAJ, Cinner JE, Bellwood DR, Jones GP, Polunin NVC, McClanahan TR (2008) Effects of climate-induced coral bleaching on coral-reef fishes: ecological and economic consequences. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 46: 251-296

- Pratchett MS, Wilson SK, Baird AH (2006) Declines in the abundance of Chaetodon butterflyfishes (Chaetodontidae) following extensive coral depletion. *J Fish Biol* 69:1269-1280
- Pratchett, M; Hoey, A; Coker, D and Gardiner, N (2012) Interdependence between reef fishes and scleractinian corals, In *12th International Coral Reef Symposium*, Yellowlees, D and Hughes, TP, Editors. James Cook University: Cairns, Australia. p. 5.
- Province Sud (2013) Code de l'environnement de la province sud. 359p.
- 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.
- Reopanichkul, P., T. A. Schlacher, R. W. Carter, and S. Worachananant. (2009). Sewage impacts coral reefs at multiple levels of ecological organization *Marine Pollution Bulletin* 58:1356-1362.
- 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.
- Rosner BA (2000) Fundamentals of biostatistics. Fifth Edition. Brooks/Cole, Pacific Grove.
- Sano M, Shimizu M, Nose Y (1987) Long-term effects of destruction of hermatypic corals by *Acanthaster planci* infestation on reef fish communities at Iriomote Island, Japan. *Mar Ecol Prog Ser* 37:191–199
- Scherrer B (1984) Biostatistique. Gaetan Morin Editions.
- Schmitt R.J., and Osenberg C.W. (editors and contributing authors). (1996). Detecting ecological impacts: Concepts and applications in coastal habitats. Academic Press, San Diego.
- 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.
- Sofonia JJ, Anthony KRN (2008) High-sediment tolerance in the reef coral *Turbinaria mesenterina* from the inner Great Barrier Reef lagoon (Australia). *Estuarine, coastal and shelf science* 78, 748-752
- Stafford-Smith MG (1993) Sediment-rejection efficiency of 22 species of Australian scleractinian corals. *Marine Biology* 115: 229-243
- Stella J, Munday P and Jones G (2010). Effects of coral bleaching on the obligate coral-dwelling crab *Trapezia cymodoce*. *Coral Reefs* 30: 719-727.
- Stella JS, Pratchett MS, Hutchings PA, Jones GP (2011) Coral-associated invertebrates: diversity, ecology importance and vulnerability to disturbance. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 49: 43-104
- Stewart-Oaten, A., Murdoch, W.W., and K.R. Parker. (1986). Environmental impact assessment: "pseudoreplication" in time? *Ecology*. 67: 929-940
- Sutherland KP, Porter JW, Torres C (2004) Disease and immunity in Caribbean and Indo-Pacific zooxanthellate corals. *Mar Ecol Prog Ser* 266:273–302
- Sweatman HPA, Cheal AJ, Coleman GJ, Emslie MJ, Johns K, Jonker M, Miller IR and Osborne K (2008) Long-term Monitoring of the Great Barrier reef, Status Report. 8. Australian Institute of Marine Science. 369p.

Syms C, Jones GP (2000). Disturbance, habitat structure, and the dynamics of a coral-reef fish community. *Ecology* 81: 2714-2729.

Veron JEN (2000) Corals of the World. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia

Wantiez L (2006) Suivi temporel des récifs coralliens du Parc du Lagon Sud - Rapport 2006. Province Sud de la Nouvelle-Calédonie, Université de la Nouvelle-Calédonie, 93p.

Wenger AS; Johansen JL and Jones GP (2012) Increasing suspended sediment reduces foraging, growth and condition of a planktivorous damselfish. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 428: 43-48

Wilkinson C (2004) Status of Coral Reefs of the World: 2004. Global Coral Reef Monitoring Network and Australian Institute of Marine Science, Townsville

Wilkinson C (2008) Status of coral reefs of the world: 2008; Centre GCRMN, editor. Townsville. 296 p.

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.

Wilson SK, Burgess SC, Cheal AJ, Emslie M, Fisher R, Miller I, Polunin NVC, Sweatman HPA (2008a) Habitat utilization by coral reef fish: implications for specialists vs. generalists in a changing environment. *J Appl Ecol* 77:220–228

Wilson SK, Graham NAJ, Polunin NVC (2007) Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs. *Mar Biol* 151:1069–1076

Wilson SK, Graham NAJ, Pratchett MS, Jones GP and Polunin NVC (2006) Multiple disturbances and the global degradation of coral reefs: are reef fishes at risk or resilient? *Glob. Chang. Biol.* 12: 2220-2234

Zar JH (1999). Biostatistical Analysis, 4th Edition. Prentice Hall International, London.