

ANNEXE 1

Méthodes pour les suivis marins

Actualisation 2017

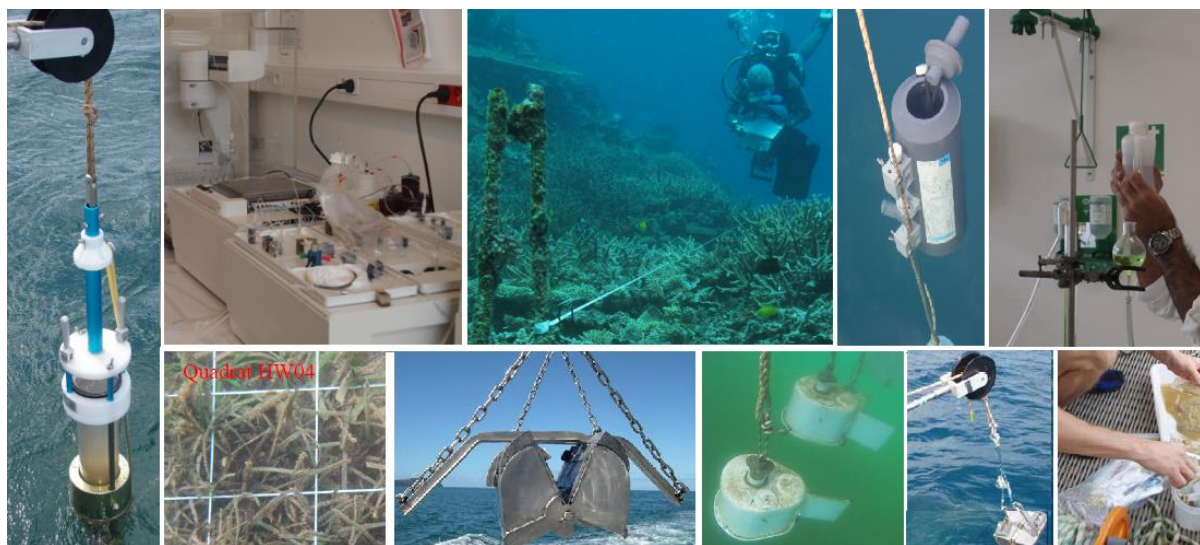


Table des matières

1. Qualités physico chimiques de l'eau de mer

1.1. Structure de la colonne d'eau

1.2. Qualité chimique de l'eau

1.3. Sels nutritifs

1.4. Hydrocarbures

1.5. Métaux

1.6. Résultats

1.7. Données météorologiques

2. Ecosystèmes coralliens et populations associées

2.1. Liste des types de substrats suivis par méthode LIT

2.2. Liste des poissons comptabilisés selon le plan de suivi CCB-

2.3. Recommandations

2.4. Journal de plongée

2.5. Minimisation des biais

2.6. Missions avec entretiens des stations sous- marines

a)-Entretien

b)-Evaluation (LIT ; Benthos, poissons)

3. Herbier

4. Flux de sédiments

5. Qualité des sédiments

6. Taux de sédimentation

7. Evolution temporelle des indicateurs et synthèse

8. Bibliographie

1. QUALITE DES EAUX MARINES : STRUCTURE DE LA COLONNE D'EAU ET PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les paramètres mesurés ou analysés dans les échantillons d'eau prélevés donnent des indications instantanées et ponctuelles.

► Les mesures et les prélèvements doivent être positionnés par rapport :

- aux cycles des marées et
- aux conditions météorologiques du jour et de la semaine précédant la mission (cumul des pluies).
- à la saison elle-même qui doit être prise en compte.

► Les méthodes de prélèvements des échantillons d'eau et l'utilisation des sondes doivent garantir une absence de biais par des contaminations extérieures (exemples : par la coque du bateau et son *antifouling* ; la remise en suspension du substrat lors des prélèvements profonds ; les manipulations des échantillonneurs ; la qualité des flacons appropriés et leur transport /stockage, notamment pour les analyses des métaux et la recherche des hydrocarbures qui demandent des flacons spécifiques.)

► **Une certification du laboratoire cocontractant qui effectue les prélèvements, en matière de métrologie environnementale est un atout recommandé.**

Vale NC recommande l'accréditation aux laboratoires sous-traitants concernés, ou/et une insertion dans les circuits internationaux d'inter-calibration ainsi qu'une démarche de normalisation notamment à l'égard d'un management de la qualité ISO 9001-2008. Le laboratoire Vale NC est quant à lui accrédité COFRAC 17 025.

► Les missions de suivi sont sous-traitées et consistent à :

- Prélever les échantillons.
 - Sur le point de référence le plus exactement possible d'où la nécessité d'un bateau capable de se maintenir en statique sur place et en zones agitées
 - Deux stations homologues (impact et témoins) doivent être échantillonnées le même jour et le plus proche possible en temps l'une de l'autre.
- Transporter et stocker les échantillons la plus courte durée de temps possible et dans des conditions garantissant leur intégrité.
- Analyser les échantillons.
- Effectuer les rapports qui doivent comprendre :
 - une analyse raisonnée des résultats ;
 - une étude de leur évolution spatiale et temporelle ;
 - une base de données.

Ces missions sont confiées par Vale Nouvelle-Calédonie à un (ou plusieurs) bureaux d'études, instituts et/ou laboratoires externalisés. Ceux-ci doivent être techniquement équipés pour effectuer ce travail en toute sécurité, notamment en moyens navigants, dans des délais compatibles avec les fréquences des suivis et **avec des techniques d'analyses permettant des limites de quantification adaptées** pour respecter les plans de suivi et permettre une validation et une comparaison temporelle des résultats, notamment sur des métaux concentrés de façon infinitésimale en eau de mer.

1.1. Structure physique de la colonne d'eau

Les paramètres suivis en sub-surface (à moins de 2 m de profondeur), à mi- profondeur et au fond (sans toucher le fond) de la colonne d'eau, sur chacune des 14 stations, sont les suivant :

- **Température,**
- **Salinité,**
- **Fluorescence,**

- **Turbidité.**

- + Un capteur d'oxygène dissous est envisagé.

Pour alerter en cas d'hypoxie, le suivi de la concentration en oxygène dissous sur l'ensemble de la colonne d'eau, par l'ajout d'un détecteur dédié sur la sonde CTD, est envisagé.

Les mesures de température, salinité, fluorescence et turbidité sont nécessaires pour déterminer la stratification verticale des masses d'eau et pour détecter la présence (ou pas) d'une thermocline ou d'une halocline.

- Température : elle dépend de la saison, des apports d'eau douce et de l'hydrodynamisme du milieu selon les marées et les « cisaillements » entre masses d'eau, notamment à l'approche d'une passe lagon/mer de fort hydrodynamisme. Une **thermocline** peut être enregistrée (ou pas) grâce aux relevés instantanés des sondes multiparamétriques.
La température peut aussi être enregistrée en continue durant plusieurs semaines sur certains points.
- Salinité : En milieu côtier et estuarien, la salinité est un traceur des apports d'eaux douces. Une **halocline** très marquée peut être enregistrée, ou pas, en fonction du débit permanent ou saisonnier des creeks. En fonction des courants, des vents et de l'hydrodynamisme de la zone, les eaux dessalées de moindre densité peuvent restées cantonnées en surface durant plusieurs jours et affecter les zones peu profondes des fonds de baies lorsqu'elles y restent confinées. Ce phénomène dépend de la pluviométrie, notamment sous un régime météorologique sujet à fortes dépressions tropicales (qui peuvent dépasser 400 mm de pluie /24 h), de la topologie d'embouchure des rivières et du régime des vents qui accentuent le confinement ou pas, ainsi que des courants de marées.
Remarque : La salinité est exprimée en unité $^{\circ}/_{\text{‰}}$ (exemple : 37 grammes pour 1000) le plus communément et pour une compréhension aisée des lecteurs, cependant elle est déduite d'un rapport entre deux conductivités selon la technique des sondes CTD, elle devrait donc être exprimée sans unité, certains logiciels fournissent une courbe sans unité mais la plupart indiquent la salinité en $^{\circ}/_{\text{‰}}$.
- Turbidité : La turbidité est définie comme étant la « *réduction de transparence d'un liquide due à la présence de substances non dissoutes* ». (Aminot et Kérouel 2004). Elle peut indiquer l'existence d'apports en particules (MES) provenant des rivières (Exemples : apports terrigènes caractéristiques de la baie de Prony, des stations côtières du Nord du canal de la Havannah et du canal Woodin), ou bien une remise en suspension de dépôts sédimentaires du fond (par exemple en baie Kué par vents de secteur Sud de plus de 25 nœuds), elle peut aussi être due à la fluorescence planctonique.
La mesure NTU de la turbidité est une méthode néphélométrique normalisée pour mesurer la turbidité de l'eau. La turbidité est obtenue par la mesure de la lumière diffusée par les particules à 700 nm. Le turbidimètre mesure l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 140 degrés par rapport au trajet de la lumière incidente.
La linéarité de la réponse permet de calibrer le capteur avec une solution de Formazine et de l'exprimer en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).
Cette diffusion est surtout liée aux matières en suspension (MES) et elle dépend de la taille, de la forme et de l'indice de réfraction des particules ainsi que de la longueur d'onde de la lumière incidente.
 - Les substances dissoutes agissent très peu sur ce coefficient de diffusion (dans le cas d'une eau sans particules).
 - La transparence de l'eau, quant à elle, dépend de la coloration de l'eau (liée à la présence de substances dissoutes) et aussi de sa teneur en MES, de l'érosion des fonds marins et de l'activité biologique.
- La fluorescence permet d'estimer la concentration en chlorophylle-a, et donc de quantifier globalement la biomasse du phytoplancton. Un éventuel pic de biomasse au sein de la colonne d'eau peut être détecté. La concentration en chlorophylle-a est obtenue par excitation des pigments à la longueur de 470 nm qui en retour fluoresce. La linéarité de la réponse

permet de calibrer le capteur avec une solution de *Thalassiosira weissflogii* (culture de phytoplancton) et de l'exprimer en CEC (Concentration équivalente en chlorophylle).

La structuration verticale des masses d'eau, sur chacune des stations échantillonnées, est obtenue par des profils verticaux réalisés à l'aide d'une sonde CTD SBE19 équipée de capteurs.

La fréquence d'acquisition des données étant de 0,5 secondes et la vitesse de descente d'environ 0,5 m/s, une série d'acquisition est générée tous les 25 cm.

Les données des capteurs sont stabilisées avant la descente de la sonde et l'enregistrement est uniquement effectué lors de la descente de la sonde.

L'étalonnage de la sonde est réalisé régulièrement conformément aux prescriptions du fabricant et aux préconisations AQ/CQ avec audit ISO du laboratoire. Les fiches de calibrations sont disponibles au laboratoire concerné.

Les paramètres mesurés par la sonde CTD et les unités correspondantes sont les suivants :

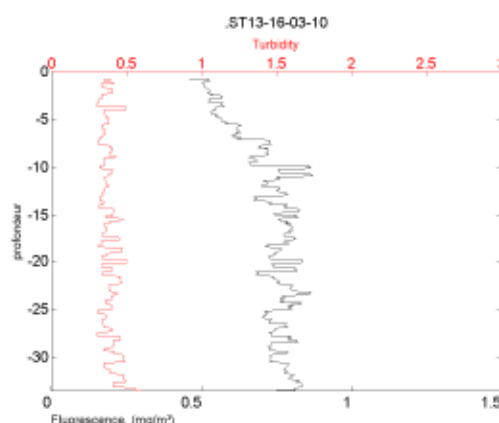
- La pression (elle permet de calculer la profondeur, une fois convertie en unités métriques de profondeur) ;
- La salinité (déduite de la mesure de la conductivité, sans unité, ou bien convertie en ‰) ;
- La température (°C) ;
- La turbidité : elle est obtenue par mesure de la néphélométrie exprimée en NTU (Méthode EPA) ;
- La fluorescence in-vivo est exprimée en concentration équivalente en chlorophylle (CEC) L'unité est donnée en mg/m³.

Tableau 1: Méthodes et limites de détection pour le suivi de la structure de la colonne d'eau de mer avec des sondes multiparamétriques

PARAMETRES	GAMME	PRECISION	RESOLUTION
Conductivité (S.m ⁻¹)	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 (µg.L ⁻¹ Chl)	0 - 50	NA*	0,025

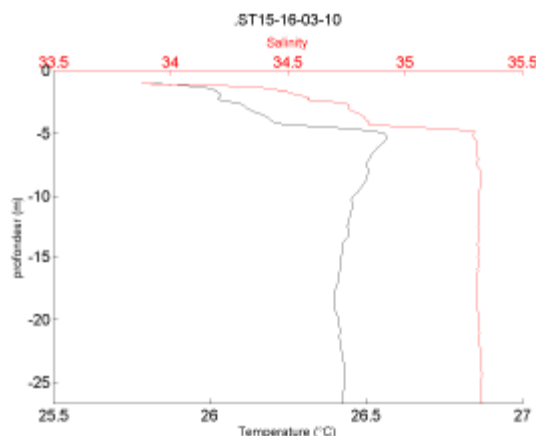
Pour chacune des stations suivies des profils verticaux obtenus sont présentés selon les schémas suivants qui permettent une lecture rapide adaptée à cette méthodologie (cf. figures suivantes) :

Figure 1 : Structure de la colonne d'eau sur la station ST13, le 16-03-10
Turbidité (rouge) et fluorescence (noire) de la surface (0) jusqu'au fond (-36m)



La figure ci-dessus indique que la turbidité et la fluorescence ont été enregistrées par une sonde multiparamétrique, entre 0 et 36 m de fond, (à -37 m le fond du lagon est atteint), sur la station St13 le 16/03/2010 (pour cet exemple) ; l'état de la marée et la pluviométrie au moment précis de ces relevés ont été notés. Une telle structure est dite « verticalement homogène », elle est caractéristique du centre du canal de la Havannah ; par opposition à la structure suivante qui montre que la colonne d'eau n'est pas homogène car une couche d'eau moins salée et plus fraîche est présente en surface (influence de l'eau douce des creeks). Cela est caractéristique de la baie du Prony, une thermocline et une halocline cisailent la colonne d'eau.

Figure 2 : Structure de la colonne d'eau sur la station ST15, le 16-03-10, salinité et température, de la surface jusqu'au fond



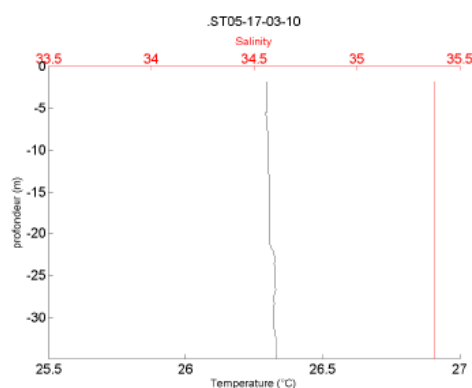
La figure ici dessus signifie que la salinité et la température entre 0 et 26 m de profondeur ont été enregistrées par la sonde multiparamétrique CTD sur la station St15 (en face le creek de la Baie Nord en baie du Prony, le 13/03/2010). Le fond du lagon est à -27 m. L'eau de surface véhiculée par le creek permanent est nettement détectée et indiquée sur le profil des courbes par une dessalure sur des 5 premiers mètres d'eau. Cette couche dessalée est aussi à une température plus basse de 1°C.

Les prélèvements d'échantillons d'eau de surface (-2m) capteront donc bien cette couche superficielle de forte empreinte terrigène, en hydro région de fonds de baie.

L'état de la marée au moment de ce relevé a été noté, ainsi que la pluviométrie durant la journée de la mission et les 5 jours précédents. Ils sont corrélés à la structure de la colonne d'eau.

Dans le canal de la Havannah le profil vertical est homogène et non influencé par l'effluent ou par des eaux douces de creeks côtiers (courbe verticalement rectiligne) Cf. exemple ci-dessous .

Figure 3 : Structure de la colonne d'eau sur la station ST05, le 17-03-10, salinité et température, de la surface jusqu'au fond



1.2. Qualité chimique de la colonne d'eau

Les paramètres analysés dans les échantillons d'eau donnent des indications instantanées et ponctuelles.

Les prélèvements doivent être positionnés par rapport aux cycles des marées et aux conditions météorologiques de la saison et de la semaine précédant la mission (cumul des pluies).

-Les prélèvements d'eau sont réalisés à l'aide de bouteilles Niskin. Le flaconnage utilisé pour le stockage des prélèvements d'eau est en PEHD (sauf exigence spécifique de la substance à analyser). **Les échantillons sont conditionnés directement à bord, après le prélèvement, puis conservés au froid (4 °C) jusqu'à leur analyse en laboratoire qui se fait le jour même du prélèvement** pour les paramètres non conservables suivants : la mesure du pH, prétraitement pour l'analyse de MES, des éléments majeurs dissous.

Sur le terrain les prélèvements sont effectués en portant la plus grande attention aux manipulations par un ingénieur ou un technicien formé, afin d'éviter toute contamination par la coque du bateau, les fonds marins qui ne doivent pas être mis en suspension lors des prélèvements profonds, ou par les échantillonneurs eux-mêmes (fumée de cigarette, échappement du moteur).

Pour déterminer la qualité chimique de la colonne d'eau les paramètres suivants : pH, matières en suspension (MES), calcium, potassium, magnésium, sodium, chlore, et sulfates sont analysés et indiqués à 3 profondeurs différentes pour chacune des stations.

-La mesure des matières en suspension (MES) est importante dans les milieux côtiers et estuariens car elle reflète l'importance des apports terrigènes et la remise en suspension de sédiments sous l'influence des conditions météorologiques. Les MES influencent également la production primaire (chlorophyllienne): une charge particulaire élevée peut modifier l'épaisseur de la couche euphotique.

Cependant : Lors des mesures instantanées sur des échantillons d'eau, le volume d'eau de mer nécessaire pour atteindre une quantité de matière cohérente pour les pesées de MES (en fonction du seuil de sensibilité des balances) est considérable ; la turbidité affichée grâce aux sondes CTD donne une information plus « parlante ». D'autre part :

Le prélèvement instantané d'échantillons d'eau avec analyse de la concentration en MES ne doit pas être confondu avec le suivi intégrateur des flux de particules dont la méthodologie est détaillée plus loin.

-Pour le pH la mesure en laboratoire doit être effectuée le soir même du prélèvement. La fiabilité de la mesure ne peut être assurée que quelques heures après le prélèvement. Le pH-mètre WTW est calibré aux valeurs de 4,7 et 8.

-Les ions majeurs : le suivi de la minéralisation de l'eau de mer par les ions majeurs (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et Cl^- , SO_4^{2-} , ...) revêt une importance moindre, voire optionnelle. Le suivi de la salinité sur toute la colonne d'eau est déjà informatif et un suivi du degré de minéralisation de l'eau de mer par échantillonnages ponctuels semestriels ne détectera pas des modifications significatives. Il est cependant effectué selon les prescriptions réglementaires 2008 du plan de suivi du milieu marin.

Le tableau suivant présente les méthodes et les limites de détections de chaque paramètre analysé pour déterminer la structure chimique de la colonne d'eau suivie.

Tableau 2 : Méthodes et limites de détection pour le suivi de la qualité de l'eau de mer

Paramètres	Analyses en laboratoire		Limites de détection
pH	pH mètre WTW		0,01 UpH
MES	Filtre Nucleopore	0,45 µm de porosité	0,1 mg/L
Ca	ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy, marque Varian, modèle 730 ES	(Varian-SpectrAA-300/400).	0,050µg/L
K			
Na			
Mg			
SO ₄ ²⁻	Chromatographie ionique capillaire (Waters, CIA) ;		-
Cl	Méthode de Mohr		-

1.3. ► Sels nutritifs

Les prélèvements d'eau sont réalisés à l'aide de bouteilles Niskin. Le flaconnage utilisé pour le stockage des prélèvements d'eau est en PEHD ou verre borosilicaté, en fonction des exigences spécifique de la substance à analyser. **Les échantillons sont conditionnés directement à bord, après le prélèvement, puis conservés au froid (4 °C ou congelés à -20°C) jusqu'à leur analyse au laboratoire.**

Sur le terrain, les opérations suivantes sont réalisées **le jour même** du prélèvement pour les paramètres non conservables suivants: (i) prétraitement pour l'analyse de la chlorophylle-a, des nutriments NOP, POP et COP et (ii) analyse de l'ammonium (NH₄).

Les paramètres suivants sont suivis sur chacune des 14 stations et aux 3 profondeurs (sub-surface, médiane et de fond), cela représente 488 données /an :

- **L'ammonium (NH₄⁺)** : dans le milieu marin, la forme prépondérante de l'azote ammoniacal est l'ammonium (NH₄⁺). Naturellement, il provient des **excrétions animales et de la dégradation bactérienne des composés organiques azotés**. Dans les régions tropicales les teneurs sont généralement très faibles, de l'ordre de quelques dizaines de nano-moles.
- **Les nitrate et les nitrites (NO₃ et NO₂)** : l'ion nitrate NO₃ est la forme oxydée stable de l'azote en solution aqueuse. Les ions nitrates entrent dans le cycle de l'azote comme **support principal de la croissance du phytoplancton** qui, une fois dégradé par les bactéries, restitue au système l'azote sous forme minérale (NO₃). Si la vitesse de régénération est différente de la vitesse d'utilisation, il en résulte des concentrations en nitrates variables qui peuvent être un facteur influençant la croissance du phytoplancton.
- **Les phosphates (PO₄²⁻)** : dans l'eau de mer, le phosphore dissous est essentiellement présent sous forme d'ions ortho-phosphates (PO₄²⁻). Leur concentration dépend de phénomènes physiques et biologiques ou chimiques. **Les teneurs sont généralement très faibles en surface et augmentent avec la profondeur au-dessous de la zone euphotique.** En milieu côtier, une augmentation des concentrations est un signe d'influence terrigène, le plus souvent sous **pression agricole ou urbaine**.
- **L'azote organique dissous NOD et le phosphore organique dissous POD** : la contribution naturelle de l'azote et du phosphore provient de la dégradation de matière de nature biogénique, qu'elle soit d'origine océanique ou terrestre. D'une manière générale, la concentration en composés dissous est très faible, particulièrement dans l'océan.

Ces paramètres sont liés à des rejets de matières organiques et peuvent être considérés comme optionnels lors de suivis de rejets minéraux et en dehors de l'influence d'agglomérations, hôtels, zones agricoles...

Pour alerter en cas d'hypoxie, **le suivi de la concentration en oxygène dissous** sur l'ensemble de la colonne d'eau, par l'ajout d'un détecteur dédié sur la sonde CTD, est envisagé car plus pertinent.

- **Azote, phosphore et carbone particuliers** : la distinction entre la matière dissoute et particulaire est arbitraire ; cependant, les études environnementales considèrent généralement que la limite de taille est de 0,45 µm pour les séparer (*Strickland & Parsons, 1972*). La fraction particulaire de ces éléments N, P et C constitue des matières en suspension de tailles diverses transportées au sein des masses d'eau. Leur origine est océanique, terrestre voire éolienne. Les concentrations présentent d'ordinaire un gradient côte-large et peuvent montrer des discontinuités verticales en fonction de l'existence ou non de couches turbides.
- **Chlorophylle et phéo-pigments** : la chlorophylle est indispensable à la photosynthèse des algues, son dosage permet donc d'estimer la biomasse phyto-planctonique et de ce fait le niveau trophique (oligotrophie/ eutrophie) du milieu. Sa dégradation donne de nombreux composés, dont principalement les phéo-pigments.
- **Les silicates** : ils constituent l'essentiel des **squelettes de divers organismes marins**. Leur concentration dans l'eau de mer, sous forme de silicates (SiO_4^{4-}), qui peut devenir insuffisante en raison de sa très faible solubilité, varie en fonction de l'origine et de la nature des eaux. Les concentrations en surface sont généralement très faibles, mais elles augmentent progressivement à mesure que l'on se rapproche des côtes (ou des fonds abyssaux).

Tableau 3: Méthodes et limites de détection pour le suivi des éléments nutritifs et autres paramètres suivis en milieu marin

Paramètres	Méthodes : adaptées spécifiquement au milieu oligotrophe marin	Normes et publications	Limite de détection
NH_4	Fluorimètre de terrain	Homes et Al 1999	1,5 nmol/L
NOD	Auto analyser Technicon		0,02 µmol/L
POD	Auto analyser Technicon	Raimbault et Al 1999	10 µmol/L
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$	Auto analyser Technicon	Outot 1988	0,002 µmol/L
PO_4	Auto analyser Technicon	Murphy et Riley 1962	0,01 µmol/L
SiO_4	Auto analyser Technicon	Fanning et Pilson 1973	0,05 µmol/L
POP	Auto analyser Technicon	Raimbault et Al 1999	10 µmol/L
CHN	Auto analyser Technicon		0,05 µg/L
Chlorophylle a	Fluorimètre		0,05 µg/L
MES	Filtration sur membrane spécifique		0,1 mg/L
pH	Electrode au Calomel		0,01 unité de pH

La méthodologie des analyses avec une pré-concentration a été développée à l'IRD de Nouméa afin de permettre une analyse des métaux en concentrations traces en matrice saline, Vale NC encourage une démarche AQ/CQ et une certification, et/ou une accréditation des laboratoires sur le territoire. Certains paramètres suivis demandent l'exportation des échantillons en métropole ou en Australie ce qui retarde la parution des résultats.

1.4. ► Hydrocarbures totaux(HT)

Des sous-échantillons sont collectés à partir des prélèvements en bouteilles General Oceanics, modèle Go-Flo (Coating interne en Teflon®). L'utilisation de ce type de flaconnage est nécessaire.

Les prélèvements sont effectués à trois profondeurs mais la couche de surface est privilégiée à **moins de 1 m de profondeur**.

Les eaux sont conditionnées dans des flacons en verre afin d'éviter tout contact prolongé avec des matières plastiques pouvant induire une contamination potentielle.

L'analyse des hydrocarbures totaux est effectuée d'après la norme NF T90-203 ou DINEN ISO 9377-2. La définition de l'indice en hydrocarbure dissous revient au dosage des hydrocarbures des **chaînes carbonées comprises entre C10 et C40** par chromatographie gazeuse (GC/FID). Cette méthode permet de doser **0,1 mg/l d'hydrocarbures**. Elle est cependant moins sensible que l'ancienne

norme NF T90-114 utilisant la méthode au CCl₄ aujourd'hui interdite en raison de la très haute toxicité du solvant organique.

Tableau 4: Méthodes et limites de détection pour la détection d'hydrocarbures

Paramètres	Méthode	Normes et publications	Limite de détection
HT	Du laboratoire : Micropolluants Technologie S.A., Thionville, France	Norme NF T90-203 ou bien DINEN ISO 9377-2	0,1mg/L

1.5. ► Métaux

Des sous-échantillons sont collectés à partir des prélèvements en bouteilles General Oceanics, modèle Go-Flo (Coating interne en Teflon®). L'utilisation de ce type de flaconnage est nécessaire car des biais seraient engendrés sur des concentrations aussi infimes en métaux si le flaconnage n'était pas adapté. **Le flaconnage doit avoir été préalablement décontaminé avec soins aux acides forts puis rincé à l'eau ultra pure. Les échantillons doivent être immédiatement placés à 4°C.**

Les éléments métalliques suivants sont analysés : Nickel (Ni), cobalt (Co), manganèse (Mn), fer (Fe), chrome total Cr et Cr (VI), arsenic (As), cadmium (Cd), cuivre (Cu), plomb (Pb), zinc (Zn).

Le plan de suivi de la qualité de l'eau de mer a sélectionné ces métaux parce que la concentration des éléments métalliques naturellement contenus dans les roches latéritiques du Sud est distribuée selon un gradient côte-large très net, notamment pour : **Mn, Ni, Co et Cr**, ce gradient est un bon indicateur du niveau d'influence terrigène.

Tandis que : **As, Cu et Fe** montrent un comportement inverse. Le cuivre suit cependant un comportement moins prévisible que le fer.

Les stations influencées par les masses d'eau océaniques se distinguent toujours clairement des stations côtières ou de la baie de Prony, avec une concentration d'influence marine particulièrement homogène.

Les concentrations **en Cd et Pb** sont le plus souvent inférieures aux limites de détection compte tenu des très basses teneurs de ces métaux dans les roches latéritiques du Sud calédonien, cependant ils sont recherchés.

D'après le guide des suivis marin Zoneco / CNRT 2011, (En cours de réactualisation en 2018) il est conseillé de suivre les métaux suivant :

- Activité minière : Co, Cr, Ni et Mn
- Activité portuaire : Cu et Zn,
- Activité urbaine : Ag, Cd, Pb, Hg, Zn, Cu

Vale NC présente des activités portuaires, industrielles et d'extractions minières, Vale NC suit par arrêté: Co, Cr, Ni, Mn, Cu, Zn, CrVI, As, Fe, Pb et Cd. Le Hg a été ajouté ponctuellement ponctuellement en 2014.

La corrélation avec la pluviométrie de la semaine antérieure au prélèvement est effectuée systématiquement.

Les difficultés liées à la mesures de métaux en concentrations traces dans une matrice saline ont conduit au développement de nouvelles techniques par l'IRD de Nouméa, afin de déceler des variations infimes.

Une méthode de pré concentration (X250) a été mise en place dans cet objectif par le laboratoire de l'IRD puis AEL., cette pré-concentration permet de doser Co, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn par ICP-OES.

Tableau 5 : Méthodes et limites de détection pour le suivi des métaux en milieu marin (2018)

Analyses en laboratoire Paramètre	Méthode et normes -Publication	Limite de quantification
Co	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	0,027 µg/L
Cd	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	0,025 µg/L
Cu	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	0,025 µg/L
Fe	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	0,068 µg/L
Mn	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	0,028 µg/L
Ni	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES	0,022 g/L
Pb	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	0,150 µg/L
Zn	Pré-concentration en labo de terrain puis élution en labo – ICP OES/ Moreton et Al (2009)	1 µg/L
Cr/CrVI	Achterberg et Van den Berg 1994	0,050 µg/L
As	Piech et Kubiak 2006	0,033 µg/L
+ Hg	NF EN ISO 17852	0,005µg/L

AQ/CQ : Le laboratoire démontre que des échantillons certifiés pour le dosage des éléments traces (TM-26.3 et TM DA-61) délivrés par la société Environnement Canada sont intercalés dans chaque série d'analyses pour valider la calibration. Les résultats de cette calibration sont donnés en annexe de chaque rapport.

Un travail de vérification métrologique et AQ/CQ est entrepris (avec double ou triple analyses des métaux par plusieurs laboratoires respectant des méthodologies comparables) ; et avec des prélèvements d'échantillons en double sur une même station.

Les concentrations analysées sont infimes (de l'ordre de 0,000001 g/Litre) aussi il est très important d'éviter toute contamination, en manipulant les échantillons, en touchant la coque du bateau (antifouling), en se rapprochant d'un gaz d'échappement du moteur ou en fumant etc. Cette méthodologie validée par la direction de l'environnement de la Province Sud et l'IRD de Nouméa est très sensible et garantit une surveillance optimale du milieu marin. Ne pas contaminer les échantillons lors des prélèvements et du flaconnage est essentiel avec de telles concentrations de métaux extrêmement basses.

A cet égard la formation des échantillonneurs est nécessaire avec un niveau d'ingénieur ou technicien supérieur qui correspond à ce type de prélèvements marin.

Le rapport doit présenter le nom et les compétences des échantillonneurs de terrain.

1.6. ► Les résultats semestriels

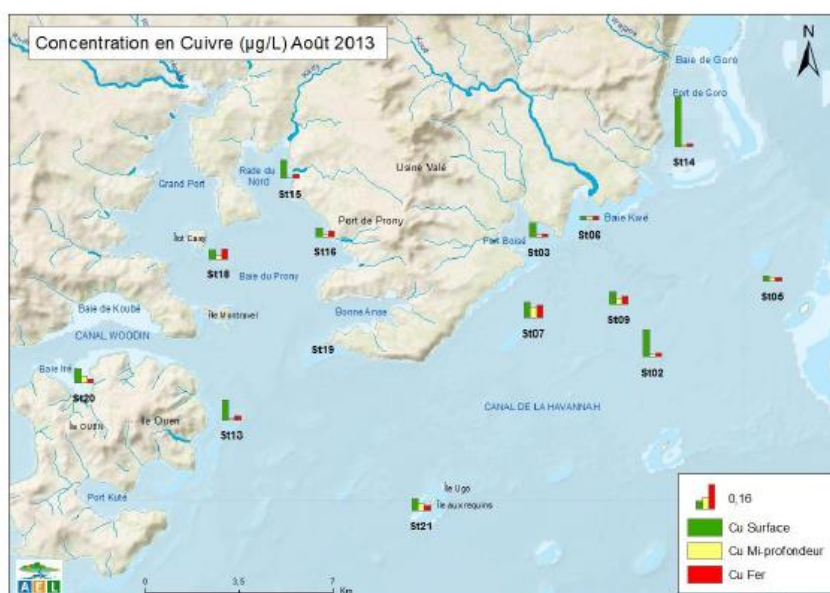
Ils sont schématisés et synthétisés pour chaque paramètre selon l'exemple donné sur les figures suivantes. La présentation des rapports doit être pérennisée car elle permet une lecture facilitée.

A minima, seuls certains paramètres « clefs » sont présentés par leur répartition spatiale et par leur évolution temporelle, afin de ne pas alourdir un rapport qui concerne > 36 paramètres suivis sur 3 profondeurs et 14 stations.

Les comparaisons spatiales et temporelles doivent être présentées de façon synthétique et formatée, rapport après rapport. Exemple ci-dessous.

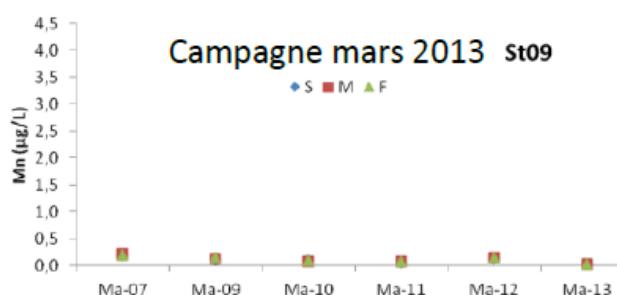
Figure 4 : Concentrations spatiales instantannées en cuivre dissous (Cu) dans la colonne d'eau - Echantillonnage en sub-surface, à mi- profondeur et au fond, canal de la Havannah et baie de Prony

- Comparaisons spatiales au temps t : Paramètre suivi, date de la mission, stations, 3 profondeurs et unités des concentrations,



- Comparaisons temporelles sur une station (St09 sur l'exemple) pour détecter une évolution temporelle significative

Figure 5 : Concentration en manganèse dissous (Mn) dans la colonne d'eau - Echantillonnage en sub-surface (S) , à mi- profondeur (M) et au fond (F) , évolution temporelle sur la station St09 depuis les premiers suivis en saison chaude (mars)



Les prélèvements en saison chaude et les prélèvements en saison fraîche sont effectués en dehors de tout épisode climatique intense : fortes pluies ou tempête tropicale,

- pour une protection HS des travailleurs ;
- afin d'uniformiser la méthodologie et de l'affranchir le plus possible des biais dus aux différentes pressions météorologiques,
- cependant il est logistiquement impossible de toujours prélever les mêmes stations au même moment de la marée.

Les comparaisons temporelles des données de saison fraîche et les comparaisons temporelles des données de saisons chaudes ne sont pas confondues (Cf. exemples ici dessous), cependant, au port ou pour une vérification ponctuelle supplémentaire, l'ensemble des données toutes saisons confondues peuvent être comparées afin de rechercher une tendance évolutive.

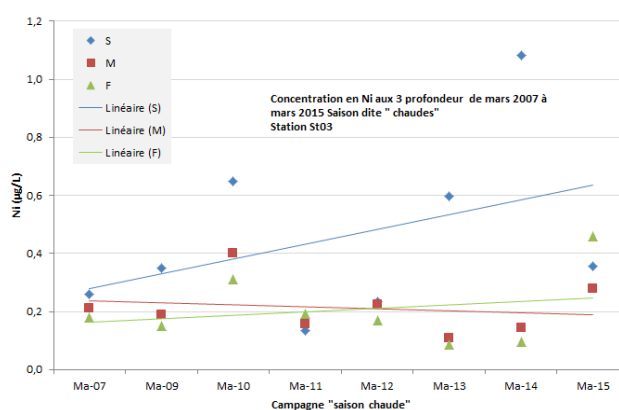
Ce choix de suivre les tendances évolutives en séparant les données selon les 2 saisons a été effectué après discussion des experts, afin de suivre des caractéristiques dans des conditions relativement comparables.

En cas de conditions météorologiques exceptionnelles les suivis réguliers ne sont pas effectués mais des missions d'évaluation ponctuelle dédiées à cet événement sont enclenchées.

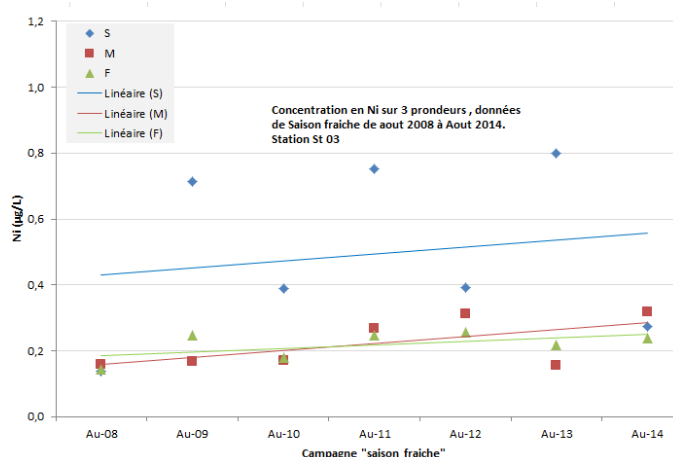
Figure 6 : Suivi de l'évolution temporelle de la concentration en Ni, sur la station St03, entre 2017 et 2015

Par saisons séparée pour garder une homogénéité des conditions météorologiques

A)- Saisons CHAUDES : Prélèvements en mars de 2007 à 2015. Sur St 03. (Baie de Port Boisé) Suivi des concentrations en nickel aux 3 profondeurs : S=surface, M=Mi profondeur, F= au fond

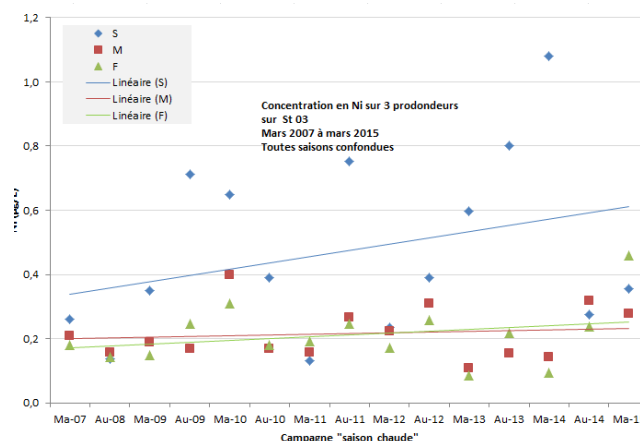


B)- Saisons FRAICHES en aout de 2008 à 2014. Sur St03. (Baie de Port Boisé) Suivi des concentrations en nickel.



Ou bien :

C)- Toutes les données confondues sur St03, (Baie de port Boisé), Concentrations en nickel entre 2007 et mars 2015.
Plus grande dispersion des données.



1.7. ► Relevés météorologiques associés

Les données météorologiques sont obtenues par la station météo du site Vale NC et/ou par Météo France, en complément. Elles accompagnent chaque mission d'échantillonnage.

Figure 7 : Pluviométrie durant une mission d'échantillonnage et les cinq jours précédents afin de corrélérer les résultats de la qualité de l'eau de mer aux effets des ruissellements terrigènes

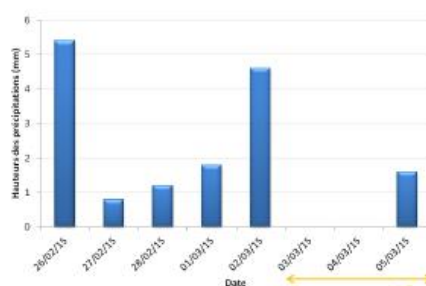


Figure 2 : Hauteurs des précipitations enregistrées 5 jours précédant (26/03/15 au 02/03/15) la campagne et pendant la campagne semestrielle (03/03/15 au 05/03/15).

L'état de la marée doit être indiqué pour chaque station au moment de l'échantillonnage, la figure suivante montre que la plupart des stations lors de cette mission ont été échantillonnées à marée descendante et 4 stations à l'étale de marée haute.

Figure 8 : Moment d'échantillonnage de chaque station en fonction de l'état de la marée

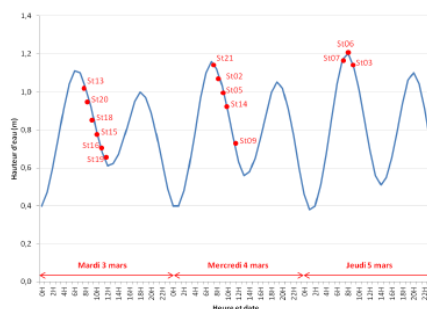


Figure 3 : Chronologie des événements de la campagne semestrielle de mars 2015 reportée sur le marégramme du 03 au 05 mars 2015.

Les missions ne sont pas effectuées lors de conditions météorologiques extrêmes voire difficile pour des raisons de sécurité et d'homogénéité. Cependant en raison de la forte pluviométrie de la région, les missions d'échantillonnages qui durent 3 ou 4 jours ne peuvent pas être effectuées hors-pluies et les 5 journées avant un échantillonnage influencent aussi celui-ci ; il est donc important de bien corréler les résultats à la pluviométrie même si l'on essaye de s'affranchir des conditions extrêmes.

Pour les suivis en continue par appareillages immergés plusieurs semaines, les fortes pluies sont enregistrées et influencent les séquences de relevés associées.

2. PARAMETRES BIOLOGIQUES INDICATEURS DE L'ETAT DES PEUPELEMENTS RECIFAUX ET DES POPULATIONS ASSOCIEES

Ils sont suivis selon les prescriptions établies par la DENV (Direction de l'Environnement) de la Province Sud, suite à l'atelier dédié aux suivis marins de mars 2006 (il réunissait les experts en la matière en Nouvelle-Calédonie) et validées dans la Convention pour la Conservation de la Biodiversité établie en 2008. (Cf. Tableaux suivants).

Ils font parties des suivis conventionnels; sauf au niveau de la station de suivi de la baie Kwé et du suivi de l'herbier de la baie Kwé qui sont réglementaires via l'arrêté AEM.2016.

Vale NC s'y conforme exactement depuis le début des suivis suite au démarrage des activités.

- **Le substrat** selon la méthode des *transects* fixes (3 *transects* de 20 m de longueur sur 3 profondeurs différentes par station). Méthode classique dite : « LIT ». La liste imposée des catégories de substrats donne 28 catégories distinctes. (Cependant parmi ces catégories certaines sont de type Benthos).
- **Le macro - épi-benthos** selon des couloirs de 5 m de large et 20 m de long qui suivent les *transects*, les taxons cibles sont listés. (Très sommairement dans le plan de suivi initial, ce chapitre a été étoffé par les experts qui veulent donner un avis pertinent sur l'état de santé global du récif)
- **Les poissons** selon la méthode des TLV (transect à largeur variable), les taxons cibles sont donnés par une liste restreinte imposée (fournie par la DENV en 2007) afin de calculer la densité et la biomasse. Le poids des individus est estimé d'après leur taille en utilisant des relations d'allométrie taille-poids – $W = aL^b$ – (Kulbicki et al. 1993). La liste restreinte indique une centaine de taxons identifiés au niveau du genre ou de l'espèce.

Tableau 6: Méthodologie pour le suivi des écosystèmes marins (Convention CCB 2008)

Paramètres et variables	Substrat (Habitats)	28 classes se substrat et benthos
	Epi benthos : macro invertébrés	
	Poissons : Espèces cibles	Liste restreinte de poissons cibles imposée
Prélèvements	Pas de prélèvement. Observations et photographies + vidéo associées	
Méthode	Définie lors de l'atelier du 03 mars 2006 DRN (devenue la DENV) Noumea	Transects ou couloirs d'observation sur 3 profondeurs et sans réplica à une même profondeur
Normes et Publications	Line Intercept Transect LIT de English et Al (1994-1997) et transects à largeur variable (Kulbicki et Al 1994 ; 1995 et Kulbicki Sarramégna 1999)	
Analyses	Aucune N/A	
Paramètre	Méthode	Limites de détection
Substrat	LIT fixe sous un ruban de 20 m de long et 28 classes identifiées	10cm
Benthos	LIT fixe sur couloir 100m2	100m ²
Poissons	Comptage sur <i>transect</i> à largeur variable	Vision du plongeur et visibilité de l'eau

2.1. Compositions codifiées des taxons suivis et méthode de suivi par transects

➤ Le substrat

Tableau 7 : Composition du substrat. Les 28 Catégories imposées par le plan de suivi CCB 2008

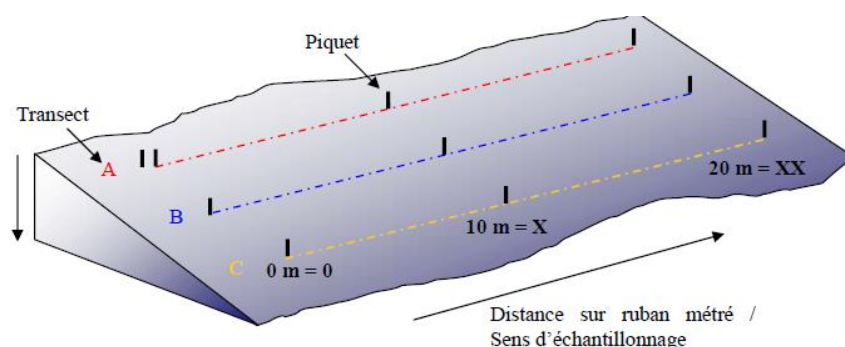
COMPOSANTES : 12 catégories et 28 codes de description				
Coraux (corail dur, 11 items codifiés)	Autres coraux(2)	Autres org. Vivants (3)	Algues (6)	Substrat Abiotique (6)
Scléractiniaires Acropora Branchu ACB Au moins 2 niveaux de branches Acropora Encroûtant ACE Acropora Submassif ACS Acropora Digité ACD Branches en forme de doigts Acropora Tabulaire ACT Branches aplaties horizontalement Non-Acropora Branchu CB Au moins 2 niveaux de branches NB : les non acropora digité ont été placés ici Non-Acropora Encroûtant CE Non-Acropora Foliaire CF Corail en forme de feuille Non-Acropora Massif CM Non-Acropora Submassif CS Fungia CMR Corail solitaire	Millepora CME ou Corail de feu Corail mou SC	Éponges SP Zoanthaires ZO Autres OT dont Ascidiés, Anémones, Gorgones, Bénétières	Assemblages AA Calcaire CA Halimeda HA Macroalgue MA Filamenteuse F NB : les cyanobactéries ont été placées ici en F Corail mort avec algues DCA (Corail mort recouvert d'algues)	Corail mort DC de Couleur blanche Sable S avec Particules < 2 cm Débris R avec Particules > 2 cm Vase SI Eau W si Crevasse de plus de 50 cm Roche Dalle - Roche RC

Remarque : Selon cette méthodologie les 3 transects (couloirs de suivi) du LIT sont situés à 3 profondeurs différentes, ils présentent des faciès différents et ne peuvent pas être statistiquement des répliques l'un de l'autre. Il ne peut pas être effectué de moyenne des résultats des LIT (substrat) des 3 transects d'une station.

Il n'y a aucune variable aléatoire par station, le suivi temporel effectué par comparaison d'une station à chaque suivi, transect par transect, est la variable aléatoire. Vale NC a évoqué ce sujet depuis 2007. La différence annuelle est la variable aléatoire.

Cette méthodologie est suivie avec attention depuis 2007 sur les mêmes stations et les mêmes transects exactement.

Il est recommandé de positionner les transects sur des zones qui présentent entre 30% et 60% de recouvrement corallien. Un transect profond sur une zone quasi abiotique ne donne pas d'indications significative et ne pourra détecter qu'une hausse de la biodiversité, pour cette raison certaines stations ne présentent que 2 transects. Ils sont le plus souvent parallèles à la cote sur une ligne iso-bathymétrique. (Mais pas toujours en cas de topologie des fonds en éperons transversaux à la cote, par exemple).

Figure 9 : Schéma d'une station sous-marine avec 3 transects à 3 profondeurs différentes

➤ **L'épi-macro benthos**

Evaluation sur un couloir de 2,5 m de chaque côté du *transect* (i.e. 100 m²) :

Présence / Absence d'algues et phanérogames à l'échelle du genre.

Densité en bénitiers, Troquas, et certains échinodermes (au niveau de l'espèce pour les étoiles de mer, les oursins et les holothuries, et en présence/absence pour les crinoïdes) et en clones.

Le plan de suivi imposé par la Convention CCB 2008 ne va pas au-delà de ces indications. Le chapitre suivant (chapitre 2.2 et notamment 2.2.3) indique les recommandations Vale NC et des experts afin de cadrer cette surveillance du benthos qui doit cibler les taxons sessiles sensibles et indicateurs ainsi que les espèces corallivores et les algues.

Il est aussi remarqué que les classes du LIT sont nombreuses et font interférence avec le suivi du benthos, cela tient à l'historique du LIT qui n'était pas dédié au substrat seul mais à des observateurs débutants qui devaient caractériser un récif par les seuls LIT, sans une étude du benthos derrière.

Ce doublon gagnerait à être optimisé.

➤ **L'ichtyo faune**

Le plan de suivi (CCB- 2008) imposé par les autorités compétentes, impose une liste restreinte de poissons cibles: celle-ci est présentée ci-dessous ainsi que dans chaque rapport de suivi.

Cependant, afin d'alimenter une base de donnée exhaustive représentant la biodiversité réelle de la station, Vale Nouvelle-Calédonie demande la liste exhaustive des poissons observés, elle est fournie en annexe de chaque rapport semestriel. Les recherches supplémentaires effectuées par l'ichtyologue qui effectue les suivis, (ex : structure des populations, biodiversités α , β , γ , indices « poissons »...) sur liste exhaustive des poissons observés, sont de son fait, elles s'ajoutent aux exigences du plan de suivi et Vale NC ne se permet pas de censurer les ajouts et commentaires des experts

2.2. Liste des poissons comptabilisés selon le plan de suivi CCB-2008

Tableau 8 : Liste des poissons comptabilisés selon le plan de suivi CCB-

Liste de poissons retenus pour l'évaluation de la faune ichthyologique		
Famille	Genre	espèce
Requins		spp
Raies		spp
Scorpaenidae	Rascasses "poules"	spp
Serranidae	<i>Anthias</i> et	
	<i>Pseudanthias</i>	spp
	<i>Cromileptes</i>	<i>altivelis</i>
	<i>Epinephelus</i>	<i>cyanopodus</i>
	Autres loches	spp
	<i>Plectropomus</i>	spp
Pseudochromidae	<i>Pictichromis</i>	<i>coralensis</i>
Carangidae		spp
Lutjanidae	<i>Aphareus</i>	<i>furca</i>
	<i>Aprion</i>	<i>virescens</i>
	<i>Lutjanus</i>	<i>adeti</i>
	<i>Lutjanus</i>	<i>sebae</i>
	<i>Lutjanus</i>	spp
	<i>Symphorus</i>	<i>nematophorus</i>
Caesionidae		spp
Haemulidae	<i>Diagramma</i>	<i>pictum</i>
	<i>Plectorhinchus</i>	spp
Lethrinidae	<i>Lethrinus</i>	<i>nebulosus</i>
	Autres bossus et bec	spp
Nemipteridae	<i>Scolopsis</i>	<i>bilineatus</i>
Mullidae		spp
Kyphosidae		spp
Ephippidae	<i>Platax</i>	spp
Chaetodontidae	<i>Chaetodon</i>	<i>auriga</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>baronessa</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>bennetti</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>citrinellus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>ephippium</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>flaviviridis</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>kleinii</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>lineolatus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>lunula</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>melanotus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>mertensii</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>ornatissimus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>pelewensis</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>plebeius</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>rafflesi</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>reticulatus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>speculum</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>semeion</i>

	<i>Chaetodon</i>	<i>trifascialis</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>humulatus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>ulietensis</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>unimaculatus</i>
	<i>Chaetodon</i>	<i>vagabundus</i>
	<i>Coradion</i>	<i>altivelis</i>
	<i>Forcipiger</i>	<i>flavissimus</i>
	<i>Forcipiger</i>	<i>longirostris</i>
	<i>Hemitaurichthys</i>	<i>polylepis</i>
	<i>Heniochus</i>	<i>acuminatus</i>
	<i>Heniochus</i>	<i>chrysostomus</i>
	<i>Heniochus</i>	<i>monoceros</i>
	<i>Heniochus</i>	<i>singularis</i>
	<i>Heniochus</i>	<i>varius</i>
Pomacanthidae	<i>Centropyge</i>	<i>bicolor</i>
	<i>Centropyge</i>	<i>bispinosus</i>
	<i>Centropyge</i>	<i>flavissima</i>
	<i>Centropyge</i>	<i>heraldi</i>
	<i>Centropyge</i>	<i>tibicen</i>
	<i>Centropyge</i>	<i>vroliki</i>
	<i>Chaetodontoplus</i>	<i>conspicillatus</i>
	<i>Pomacanthus</i>	<i>imperator</i>
	<i>Pomacanthus</i>	<i>semicirculatus</i>
	<i>Pomacanthus</i>	<i>sextriatus</i>
	<i>Pygoplites</i>	<i>diacanthus</i>
Pomacentridae	<i>Abudefduf</i>	spp
	<i>Amphiprion</i>	<i>perideraion</i>
	<i>Amphiprion</i>	spp
	<i>Chromis</i>	<i>viridis</i>
	<i>Chromis</i>	<i>fumea</i>
	<i>Chrysiptera</i>	<i>taupou</i>
	<i>Chrysiptera</i>	<i>rollandi</i>
	<i>Dascyllus</i>	<i>aruanus</i>
	<i>Dascyllus</i>	<i>reticulatus</i>
	<i>Dascyllus</i>	<i>trimaculatus</i>
	<i>Neopomacentrus</i>	<i>azysron</i>
	<i>Neopomacentrus</i>	<i>violascens</i>
	<i>Pomacentrus</i>	<i>coelestis</i>
	<i>Pomacentrus</i>	<i>moluccensis</i>
	<i>Pomacentrus</i>	<i>aurifrons</i>
	<i>Stegastes</i>	spp
Labridae	<i>Bodianus</i>	<i>loxozonus</i>
	<i>Bodianus</i>	<i>perditio</i>
	<i>Cheilinus</i>	<i>chlorourous</i>
	<i>Cheilinus</i>	<i>trilobatus</i>
	<i>Cheilinus</i>	<i>undulatus</i>
	<i>Choerodon</i>	<i>graphicus</i>
	<i>Coris</i>	<i>aygula</i>
	<i>Coris</i>	<i>gaimard</i>
	<i>Gomphosus</i>	<i>varius</i>
	<i>Halichoeres</i>	<i>hortulanus</i>
	<i>Halichoeres</i>	<i>margaritaceus</i>
	<i>Halichoeres</i>	<i>trimaculatus</i>

	<i>Hemigymnus</i>	<i>melapterus</i>
	<i>Labroides</i>	<i>dimidiatus</i>
	<i>Novaculichthys</i>	<i>taeniourus</i>
	<i>Stethojulis</i>	<i>bandanensis</i>
	<i>Stethojulis</i>	<i>strigiventer</i>
	<i>Thalassoma</i>	<i>amblycephalum</i>
	<i>Thalassoma</i>	<i>hardwicke</i>
	<i>Thalassoma</i>	<i>lunare</i>
	<i>Thalassoma</i>	<i>lutescens</i>
Scaridae	<i>Bolbometopon</i>	<i>muricatum</i>
	<i>Scarus</i>	<i>ghobban</i>
	<i>Chlorurus</i>	<i>microrhinos</i>
Blennidae	Scaridae	spp
	<i>Ecsenius</i>	<i>bicolor</i>
	<i>Meicanthus</i>	<i>atrodorsalis</i>
Gobbiidae	<i>Amblygobius</i>	<i>phalaena</i>
Ptereleotridae	<i>Ptereleotris</i>	<i>evides</i>
	<i>Ptereleotris</i>	<i>microlepis</i>
Acanthuridae	<i>Acanthurus</i>	<i>dussumieri</i>
	<i>Acanthurus</i>	<i>blochii</i>
	<i>Acanthurus</i>	<i>triostegus</i>
	<i>Acanthurus</i>	spp
	<i>Ctenochaetus</i>	spp
	<i>Naso</i>	<i>unicornis</i>
	<i>Naso</i>	spp
Siganiidae	<i>Zebrasoma</i>	spp
	<i>Siganus</i>	<i>argenteus</i>
	<i>Siganus</i>	spp
Zanclidae	<i>Zanclus</i>	<i>cornutus</i>
Scombridae	<i>Scomberomorus</i>	<i>commerson</i>
Balistidae	<i>Balistoides</i>	<i>conspicillum</i>
	<i>Oxymonacanthus</i>	<i>longirostris</i>
	<i>Rhinecanthus</i>	<i>aculeatus</i>
	<i>Rhinecanthus</i>	<i>rectangulus</i>
Tetraodontidae	<i>Canthigaster</i>	spp

2.3. Recommandations de base pour le suivi des écosystèmes marins

Les suivis éco-systémiques sont extériorisés auprès d'un ou plusieurs bureaux d'études ou instituts.

Vale Nouvelle-Calédonie demande (via son cahier des charges) que l'entretien des stations n'interfère pas avec les observations des espèces mobiles (poissons) et qu'il **ne soit pas effectué plus de deux stations complètes par journée d'évaluation**, l'expérience montrant qu'une plus grande rapidité d'expertise nuit à la qualité des évaluations ^{(1)*}.

Le journal de plongée et les briefings journaliers avec les biologistes -plongeurs permettent de valider cette exigence de rigueur méthodologique. Ces liens relationnels entre le bureau d'étude en charge de la mission et Vale NC sont obligatoires pour le contrôle Qualité.

La forte courantologie de la zone du canal interfère avec les évaluations et il est demandé de « cibler » le moment de l'étalement de marée en période de mortes eaux. La courte période de l'étalement ne permet pas d'effectuer convenablement plus de deux missions par jour dans le canal de la Havannah ni de travailler en périodes de vives eaux et hors étal. **Trop de stations inventoriées en trop peu de jours ne sont pas acceptées par les contrôles Qualité effectués par Vale NC.**

(1) *L'expérience montre que l'effort d'évaluation pour une station de suivi éco systémique telle que définie dans le plan de suivi est le suivant :

Pour une station bien connue (non pas en évaluation de l'état des lieux mais en suivi régulier)

- En zone abritée : 3 plongeurs ayant chacun sa spécialité : 1 heure à minima en plongée
- En zone de courantologie forte (canal de la Havannah et canal Woodin) : 3 plongeurs ayant chacun sa spécialité : 1 heure à minima en plongée au moment de l'étalement et marées de mortes eaux.
- Pour une station remise en état ou nouvellement explorée : 2 heures (2 bouteilles par plongeur)

Le trajet entre les stations et la nécessité de viser les moments d'étalement de marée implique : 1 seule station par jour en zone de fort courant + 1 station en zone abritée.

2.4. Journal de plongée

Le journal de plongée doit contenir :

- le numéro de la station,
- le nom du site,
- les coordonnées de la station en degrés, minutes et dixièmes de minute pour la longitude et pour la latitude,
- la date de la plongée,
- l'heure du début de la plongée sur la station,
- les conditions météorologiques lors de cette mission (vent, force et direction, pluie ou ensoleillement),
- la profondeur maximale et le temps de plongée,
- l'horaire des marées et les coefficients,
- le courant, la force approximative et la direction,
- la houle ou les vagues et le ressac qui peuvent gêner la mission,
- la visibilité,
- l'état de la station, la maintenance effectuée et les difficultés ou remarques éventuelles,
- la tâche effectuée par l'équipe et par chaque personne.

2.5. Minimisation des biais

Afin de minimiser les biais Vale NC demande que:

- ✓ Le plongeur-évaluateur soit la même personne qui, par la suite, rédige le rapport et qu'il ait la **compétence requise** pour effectuer les analyses d'évolutions spatiales et temporelles en fonction de l'indicateur qu'il suit (substrat, benthos, corail ou poissons);

- ✓ Les plongeurs-évaluateurs varient le moins possible d'une mission à l'autre, leur nom et leur qualification (degré d'expertise) doit figurer dans le rapport.
- ✓ Le **délai** entre la mission de plongée et la remise du rapport d'analyse des données soit le plus bref possible (< 3 mois) ;
- ✓ Chaque rapport présente une synthèse et une analyse de l'évolution spatiale et temporelle des indicateurs suivis, synthèse effectuée par les experts qui ont participé aux plongées évaluatrices (eux-même). Plongeurs et analystes ne peuvent pas être des personnes différentes ni des cocontractants ou patentés (en cascade de sous- traitants).
- ✓ Les missions soient effectuées dans des conditions météorologiques comparables qui excluent les événements extrêmes, pas de plongée par plus de 20 nœuds de vent dans le canal, si fortes pluies, et lors des marées de vives eaux. C'est une obligation HS et de qualité.
- ✓ Le ruban de 20 mètres soit bien tendu, ce qui est possible sur 20 m (mais pas toujours sur 50 m et qu'il ne soit pas constitué par une matière trop lourde (acier par exemple) qui pourrait affecter les coraux fragiles.
- ✓ Des photographies des colonies géo référencées caractéristiques soient effectuées et archivées.
- ✓ Qu'il n'y ait aucun prélèvement effectué.
- ✓ Que l'évaluation de la station en réserve Merlet ne soit pas effectuée sans autorisation de la DENV/PS préalable, la demande est à la charge des biologistes.

Ces recommandations vont dans le sens d'une meilleure puissance statistique afin d'augmenter la probabilité de détecter une variation (tendance évolutive du milieu). A cette fin la variabilité des évaluations et du *reporting* de ces évaluations doivent être minimisés.

Optimiser la puissance statistique pour **éviter** :

- **le risque β de ne pas détecter un impact de faible ampleur,**
- **et le risque α de conclure à tort trop hâtivement à un impact.**

2.6. Entretien de la station éco-systémique sous-marine et considérations méthodologiques :

Les missions d'évaluation sur site sont séparées en deux grandes phases :

a)- La localisation des stations sur le terrain (coordonnées GPS) et leur vérification/entretien sous l'eau, avec au final la mise en place du ruban qui matérialise le transect.

b)- L'évaluation Substrat, Benthos, Poissons (sans prélèvement).

Phase a)-

Le bateau est mouillé sur fond non corallien à une vingtaine de mètres de la station. Une reconnaissance en PMT (palmes / masque / tuba, de la surface) est effectuée afin de repérer les piquets marquants sur les transects de la station qui a déjà été située par GPS. Aucune bouée de repérage de surface ne peut rester à poste entre deux missions car elle serait perdue ou attirerait des curieux qui altéreraient la station.

Les plongeurs emmènent à l'occasion de leur mission une bouée qu'ils attachent au 1er piquet (0 m) du 1er transect haut (le transect A), afin de permettre la prise (et la vérification par la suite) des coordonnées exactes par GPS. Lorsque les transects sont éloignés les uns des autres, cette manœuvre est répétée pour chacun d'entre eux. Cette bouée est retirée en fin de mission.

La suite de la mission doit être conduite en scaphandrier autonome.

Le parfait état du marquage des stations est primordial pour un suivi temporel. Les piquets absents, tombés, branlants, etc. sont systématiquement remplacés, pour cela des piquets doivent être préalablement affinés sur une de leur pointe avant la mission et donc prêts à l'emploi, ils sont stockés sur le bateau. Pour « planter » un piquet, les consignes importantes à respecter sont :

- de choisir obligatoirement un substrat abiotique,
- d'enfoncer suffisamment le piquet pour que celui-ci ne puisse plus bouger. Il n'est pas nécessaire de le cimenter à sa base.

Pour la résistance à l'oxydation et faciliter leur perception visuelle sous l'eau, les piquets employés sont en acier galvanisé avec :

- une pointe effilée.
- une longueur de 2 mètres,

- un diamètre : 12 mm,
- une peinture de protection grise et une bande de marquage visuel (20 cm) en haut orange fluo, sont utilisées optionnellement.

Pour placer à bonne distance les piquets, un ruban métré est déroulé.

Le ruban qui matérialise le transect est tendu de façon forte entre les piquets, il ne doit pas dévier dans le courant, il sera retiré en fin de mission sur cette station. Les photographies suivantes montrent que cela est tout à fait possible.

Les mouvements des plongeurs et le bruit occasionné par les coups sur les piquets perturbent la faune pélagique (attraction ou, au contraire, fuite). Par ailleurs, selon le substrat, cet effort peut rendre la visibilité très mauvaise du fait de la mise en suspension des sédiments fins du fond.

Pour éviter de fausser les données d'échantillonnage les opérations de maintenance nécessaires doivent être réalisées au moins une heure avant la phase d'évaluation. Le plus souvent, une fois une station « A » remise en état, elle est laissée « au repos » ; la station « B » voisine est évaluée et par la suite le retour sur la première station « A » conduit à son évaluation.

Figure 10 : Phase a) du suivi des écosystèmes coralliens et populations associées

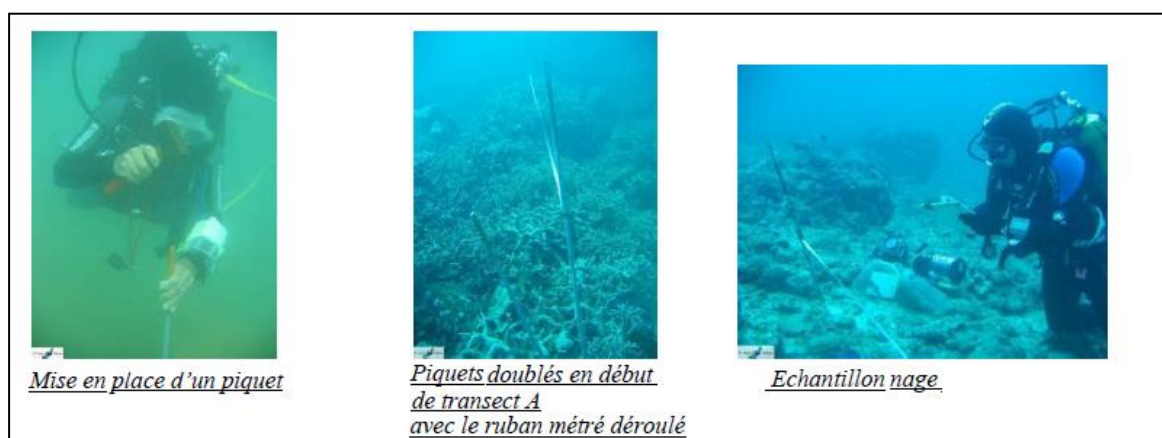
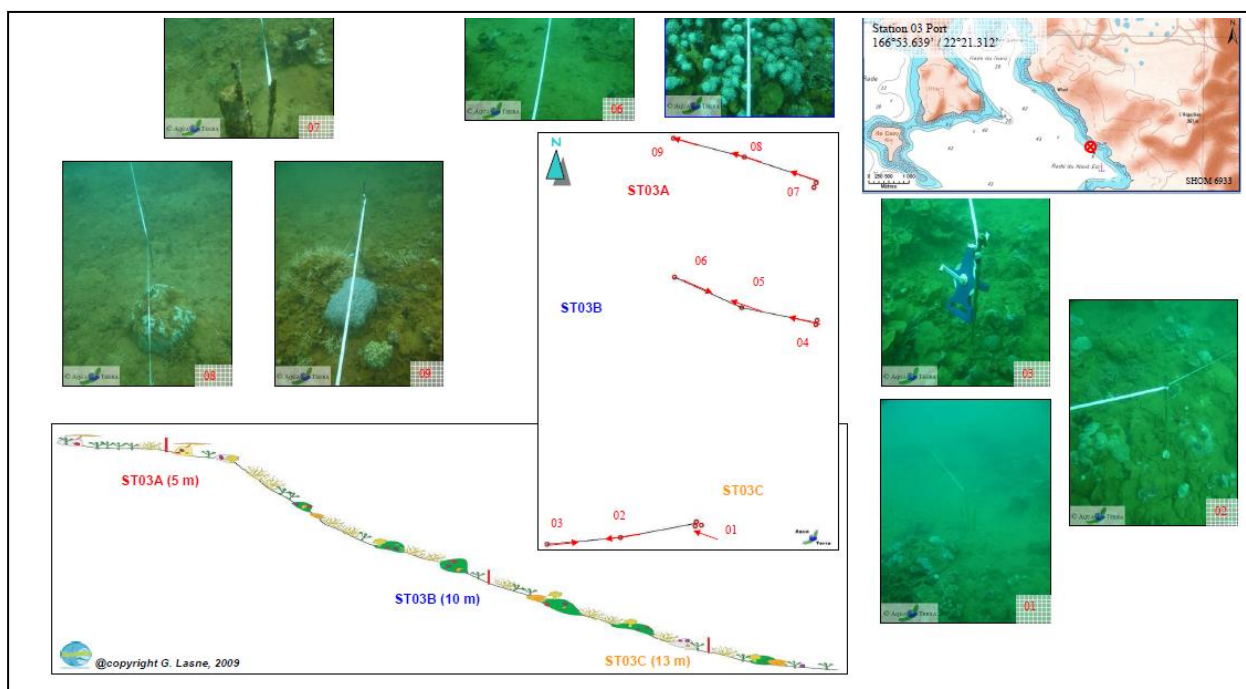


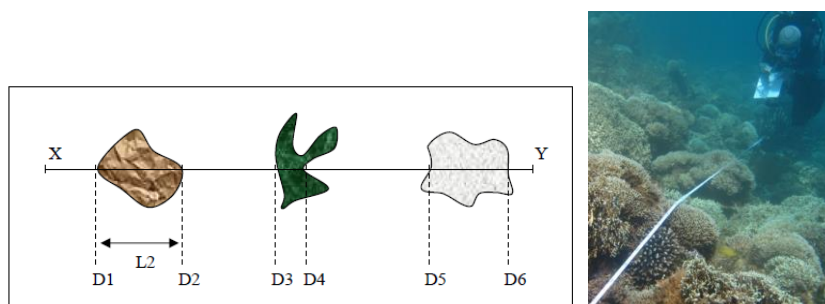
Figure 11 : Schéma d'une station sous-marine de surveillance des massifs coralliens et des populations associées (Ici ST03 Port de Prony) et des 3 transects



Phase b)-**▲ LIT**

Seul le substrat situé sous le transect (matérialisé par un ruban de 20 m de long parfaitement tendu entre les piquets fixes) est noté. Cette méthode permet d'évaluer la variabilité du substrat, cependant le LIT n'est pas représentatif de la biodiversité de la zone. (Il n'y a aucun réplica selon la méthode imposée. Des éléments du benthos sont mélangés à des éléments du substrat. Une révision et un affinement des 28 classes qui constitue le suivi par LIT serait un plus.)

L'évaluation du substrat sous le ruban est effectuée selon le principe des classes continues, avec une résolution de 10 cm. Le principe est de noter à chaque changement de catégorie de substrat (= classe) la distance donnée par le ruban, comme schématisé dans la figure suivante : le diagramme montre les points de transition (D) de chaque catégorie de substrat rencontré sous le transect (le ruban). La différence entre deux points de transition est la "longueur" correspondante à cette catégorie. Les classes retenues sont au nombre de 28 (Cf. tableau 7). Le traitement des données brutes consiste à faire le calcul du pourcentage de recouvrement de chaque classe, qui est obtenu par la somme de "ses longueurs" divisée par la longueur du substrat multipliée par 100, comme montré dans l'exemple ici dessous.

Figure 12 : Schéma d'un transect pour relever le substrat par LIT**Tableau 9 : Exemple de calcul pour le recouvrement du substrat**

DISTANCE	LONGUEUR	CLASSE
X - D1	L1 = D1-0	S
D1 - D2	L2 = D2-D1	RC
D2 - D3	L3 = D3-D2	S
D3 - D4	L4 = D4-D3	MA
D4 - D5	L5 = D5-D4	S
D5 - D6	L6 = D6-D5	DC
D6 - Y	L7 = Y-D6	S

Le pourcentage % de couverture en sable
 $(S) = (L1+L3+L5+L7) / XY \times 100$

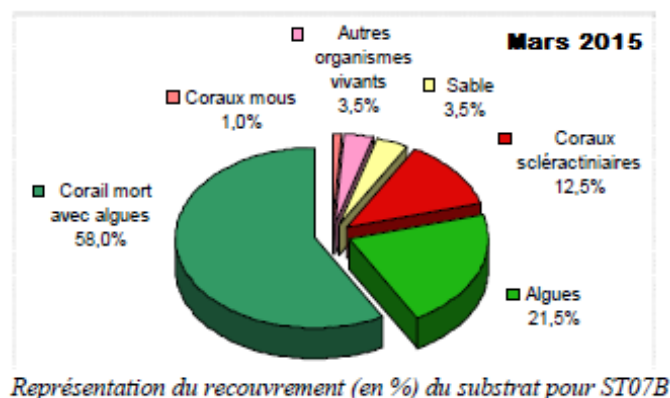
Figure 13 : Illustration photographique d'un suivi évaluatif du Substrat méthode LIT

Remarquer que le
 ruban est bien tendu
 et peu flexible

Les 28 classes imposées (Tableau 7 du chapitre 2.1) ont été regroupées afin de pouvoir simplifier les interprétations.

Ces composantes reprennent les groupes faunistiques (coraux Scléractiniaires, autres coraux, alcyonaires, autres organismes, algues, algues sur corail mort) ainsi que le matériel composant le substrat (corail mort, débris, sable, dalle, vase, eau). Elles sont alors exprimées en pourcentages pour chaque transect et présentées sous forme de graphiques pour permettre une comparaison visuelle rapide, comme le présentent les figures suivantes. La couleur des classes ne doit pas varier au fil des chapitres et des rapports pour plus de facilité de lecture (Algues en vert, corail dur en rouge, vase en marron et sable en jaune...)

Figure 14 : Evaluation du substrat sur le transect de mi-profondeur (B) de la station ST07 (Basse Chambeyron)
Mission de mars 2015



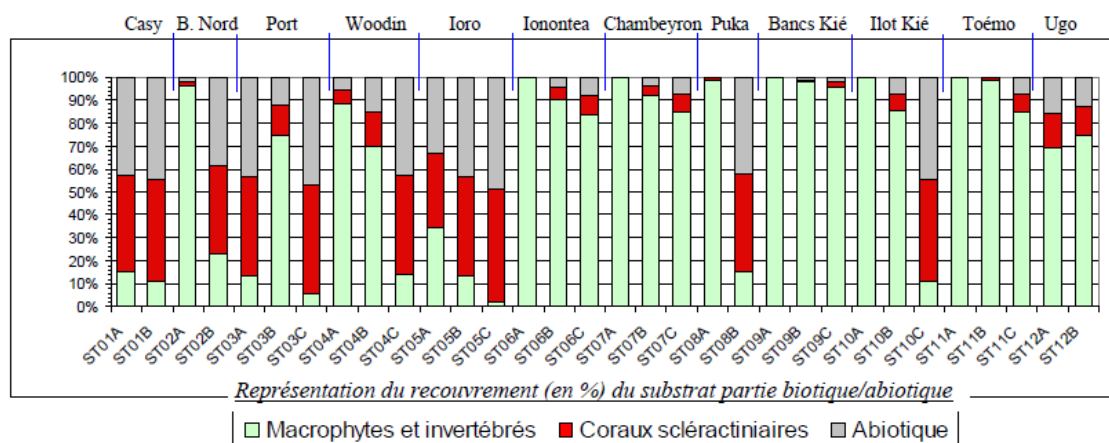
Les comparaisons spatiales et temporelles insistent sur les rapports :

- Corail vivant /Corail mort
- Corail vivant/ Algues et autres Invertébrés
- Abiotique total/ Biotique total
- Abiotique total/ Biotique hors coraux durs/ Coraux durs (cf. figure suivante)

La figure ci-dessous, récapitule les pourcentages de couverture du substrat aux différents transects de chaque station pour une comparaison spatiale, mission de mars 2015.

- **La partie biotique**, qui est divisée en deux groupes : les coraux Scléractiniaires et le reste (C'est-à-dire, les Macrophytes, invertébrés, autres coraux, etc. regroupés sous « macrophytes & invertébrés »),
- **La partie abiotique**.

Figure 15 : représentation du substrat sur l'ensemble des transects lors de la mission- exemple de mars 2015



▲ BENTHOS

La méthode d'observation sur couloirs est appliquée. Le couloir fait une largeur de 5 mètres (2.5 mètres de part et d'autre de chaque transect de 20 mètres de longueur).

Cette méthode donne une bonne représentation des communautés benthiques (inventaires faunes et flores) car une zone importante est prospectée et étudiée (100 m² pour chaque transect soit 300 m² par station). De plus 3 étages du récif sont évalués.

L'échantillonnage des stations comprend les communautés biotiques (les coraux scléractiniaires, les macrophytes et les invertébrés) et une description géomorphologique. Les taxons cibles retenus par la CCB 2008 sont :

- les algues et phanérogames (présence / absence), à déterminer au niveau du genre,
- les étoiles de mer, les oursins et les holothuries (abondance), à déterminer au niveau de l'espèce,
- les crinoïdes (présence / absence),
- les cliones (abondance),
- les bénitiers et les trocas (abondance).

Une échelle d'abondance a dû être mise en place, (Gregory Lasne BIOCEÑOSE) car le plan de suivi ne proposait aucune méthodologie de comptabilisation hormis « absence / présence » et pas de méthode d'évaluation de l'abondance, cette échelle d'évaluation de l'abondance est une adaptation de l'échelle de English & Al 1997 ; ainsi le taux de recouvrement dans le couloir de 100m² est explicité par des indices d'abondance (numérotée de 1 à 5) pour les coraux durs (Scléractiniaires, les Macrophytes et les autres Invertébrés).

Tableau 10 : Echelle d'abondance au niveau de taxons cibles du Benthos

ECHELLE	RECOUVREMENT	ABONDANCE (nb individus ou colonies / 100 m ²)
1	Rare	1
2	Faible	2 à 10
3	Moyen	11 à 20
4	Fort	21 à 41
5	Important	plus de 41

Cependant, certains coraux durs édifient de très grandes colonies de plusieurs mètres carrées, parfois de plus de 10 mètres de diamètre, dans ce cas précis, indiquer le nombre de colonies de cette espèce n'a pas de sens car une seule colonie peut recouvrir plus de 70% du couloir, une autre échelle paramétrée de 1 à 5 est alors utilisée par l'expert en coraux.

Tableau 11 : Echelle d'abondance au niveau de grandes colonies coralliennes du Benthos

ECHELLE	RECOUVREMENT	ABONDANCE (surface / 100 m ²)
1	Rare	< 0.5% (soit < 0.5 m ² / 100 m ²)
2	Faible	> 0.5% (soit > 0.5 m ² / 100 m ²)
3	Moyen	> 5% (soit > 5 m ² / 100 m ²)
4	Fort	> 10% (soit > 10 m ² / 100 m ²)
5	Important	> 15% (soit > 15 m ² / 100 m ²)

La pérennisation de la méthode et la fidélisation du plongeur-évaluateur permettent de réduire les biais et les incertitudes lors des comparaisons pour évaluer l'évolution temporelle du couloir inventorié.

Vale Nouvelle-Calédonie complète ce suivi réglementaire (à son initiative) par :

- **La surveillance d'éventuelles espèces exogènes** (les EEE) : les autorités compétentes en la matière en Nouvelle-Calédonie n'ont pas établi de méthodologie ni d'état des lieux du lagon à l'égard des éventuelles EEE. Vale NC fait confiance dans les connaissances des experts pour signaler toute découverte qui engendrerait un doute. Une liste de taxons potentiellement à

craindre a été établie sur la demande de Vale NC et ceux-ci sont pris en compte lors des missions de suivis (notamment au niveau des algues). Cependant aucune recherche exhaustive d'éventuels EEE et aucun état des lieux EEE ne sont effectués sur le lagon calédonien.

- **Le suivi des Cyanobactéries** et de l'évolution saisonnière et pluriannuelle de leur couverture.
- **Le suivi des algues macroscopiques et de leur évolution saisonnière** : leur couverture est quantifiée (chapitre benthos). Algues et cyanobactéries peuvent être des indicateurs d'eutrophisation, ce risque n'est pas relié aux effets éventuels du projet Vale NC dont les eaux des stations d'épuration (de la base vie) ne sont pas rejetées en baie du Prony mais via l'effluent marin, cependant les fortes variations saisonnières naturelles des couvertures algales méritent attention. En 2014 ce risque a été identifié en baie de Port Boisé sous l'influence de rejets (hôtel) qui ne sont en pas imputables à Vale NC. En 2018 le cas de la prolifération d'algues dans le domaine Deva montre que le suivi des algues ne peut pas être oublié.
- **Le suivi du corail et de son blanchissement** : Le corail est considéré comme **un taxon sentinelle et un « proxy »**. Son suivi est renforcé (par rapport au plan de suivi CCB), notamment après les fortes dépressions tropicales.
- **Le suivi des étoiles de mer ravageuses du corail** qui sont comptées une à une (et signalée, notamment les Acanthaster et les Culcita). Leur évolution temporelle est suivie sur toutes les stations.
- **Le suivi avec iconographie associée** de certaines colonies coralliennes remarquables et géo-référencées et l'évaluation de leur croissance, mission après mission ;
- **Les maladies coralliennes.**
- **Le blanchiment corallien.** Lui aussi doit être évalué selon une échelle d'abondance.

Tableau 12 : degré de blanchiment corallien sur une échelle de 1 à 5

ECHELLE	DEGRE DE BLANCHISSEMENT	ABONDANCE (nb individus ou colonies / 100 m²)
B1	Présence de blanchissement	1
B2	Blanchissement faible	2 à 10
B3	Blanchissement moyen	11 à 20
B4	Blanchissement fort	21 à 40
B5	Blanchissement important	41 et plus

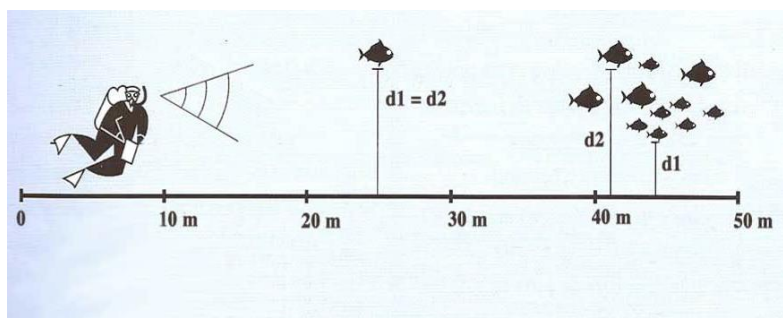
▲ POISSONS

Le biologiste responsable de l'échantillonnage des poissons doit avoir une compétence reconnue en matière d'ichtyologie en lagons tropicaux. La nomenclature et l'orthographe des espèces, des genres et des familles sont celles de Randall J.E.2005.

Les poissons sont échantillonnés par comptage visuel avec un plongeur qui progresse le long du ruban et compte de part et d'autre de celui-ci. (Cf. Le schéma ci-dessous). Sont notés pour chaque espèce le nombre d'individus et une estimation de la taille est effectuée ainsi que leur distance perpendiculaire au transect. Lorsque des individus sont en banc, le biologiste marin note la distance au poisson le plus proche et celle au plus éloigné.

La turbidité de l'eau est un facteur de biais, elle est notée dans le journal de plongée et en cas de trop faible visibilité la mission est annulée et reportée sur une autre station. La station sans visibilité sera inventoriée un jour meilleur. La rencontre d'un individu exceptionnel (un requin blanc ou une raie de très grande taille) est rare mais elle notée car elle modifie la biomasse de façon très forte. De plus les périodes de frais ou le passage d'un banc provoquent des variations fortes de densité et les explications de l'expert sont nécessaires, il indique ces faits et ses conclusions en tiennent compte.

Figure 16 : Comptage des poissons. Méthode TLV (Selon le plan de suivi CCB 2008 le transect fait 20m)



Le poids des individus est estimé d'après leur taille en utilisant des relations d'allométrie taille-poids – $W = aL^b$ – (Kulbicki et al.). La liste restreinte imposée (tableau 8) indique une centaine de taxons identifiés au niveau du genre ou de l'espèce.

La biodiversité réelle ne peut pas être connue par ce travail sur liste restreinte (bien qu'indiquée par VNC sur liste complète), les indicateurs sont :

- l'abondance (nombre d'individus, transects / liste restreinte),
- la densité (en poisson/m², transects /liste restreinte)
- la biomasse (en g/m², transects /liste restreinte),
- la biodiversité « 1 » (espèces observées sur les transects et de la liste restreinte),

Équation 1 : Equations de calcul de la densité et de la biomasse selon la méthodologie CCB2008

$$\text{- Densité (poissons/m}^2\text{)} = D = (2L)^{-1} \sum_{i=1}^p n_i d_i^{-1}$$

$$\text{- Biomasse (g/m}^2\text{)} = W = (2L)^{-1} \sum_{i=1}^p w_i d_i^{-1}$$

L : longueur du transect (20 m)

n_i : nombre d'individus de l'espèce i

w_i : poids de l'espèce i (g) (de l'espèce i : donc de tous les individus i de cette espèce)

d_i : distance moyenne de l'espèce i au transect (m)

p : nombre d'espèces.

Le poids des individus (en g) a été estimé d'après leur taille en utilisant une relation d'allométrie taille-poids, du type : $w_i = a l_i^b$ l_i = longueur du poisson
 a et b = variables

Ces variables sont des coefficients mis au point par Kulbicki & al. pour environ 350 poissons du lagon.

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

La biomasse et la densité sont analysées par

- Comparaison spatiale de chaque station, entre elles, pour la mission donnée
- Variations temporelles de densité et de biomasse totales, par famille, par transect, et par station.

3. HERBIER

Bien que cité dans les états initiaux de l'étude d'impact ICPE relative à l'usine Vale NC, l'herbier de la baie Kwé n'a jamais donné lieu à un suivi régulier qui lui soit spécifiquement dédié, (la station de suivi du milieu marin positionnée en baie Kwé n'est pas située sur cet herbier). Le plan de suivi du milieu marin élaboré par les autorités compétentes en 2008 ne cite pas cet herbier, ni le volet « Suivis » de la convention CCB-2009. Le manque de connaissances de cet écosystème a été en partie comblé par une étude qui lui a été spécifiquement dédiée, demandée par Vale NC en 2014 ^{*(1)} ; l'étude EMR de 2010^{*(2)} cite aussi cette formation de phanérogames.

**(1) : HERBIER DE LA BAIE KWE - DESCRIPTIF GENERAL, CARTOGRAPHIE- ETAT DES LIEUX INITIAL- Avril 2014. Aquaterra/Biocénose/Acrem.*

**(2) : Etude de l'engrèvement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie. EMR 2010.*

La méthodologie de suivi de l'herbier s'appuie sur :

- le Guide pour le suivi du milieu marin en Nouvelle-Calédonie (CNRT / ZoNeCo- 2011- Fiche 21 –E. Fontan) ;
- l'étude de E. Fontan: « Les herbiers subtidiaux de Nouvelle-Calédonie » (2009) et le travail de l'IRD : « Mise au point d'outils de caractérisation et de suivi des herbiers subtidiaux de Nouvelle-Calédonie » par E. Fontan, P.Dumas, C.Payri et D.Ponton (2010) ;
- les préconisations de « Seagrass-Watch. Guidelines for Community Groups & Volunteers » (QDPI Cairns 1998) ;
- le rapport : Herbiers et phanérogames marines de l'Outre-Mer français et les écosystèmes associés aux récifs coralliens. Par Hily C., Duchêne J., Bouchon C., Bouchon-Navaro Y., Gigou A., Payri C., Védie F. IFRECOR 2010. (Pages 83/90 Herbiers en Nouvelle-Calédonie)
- le rapport sur l'optimisation du plan de suivi marin, INERIS 2016.

► **Période de suivi** : Février ou mars (en saison chaude où les conditions sont optimales pour les phanérogames).

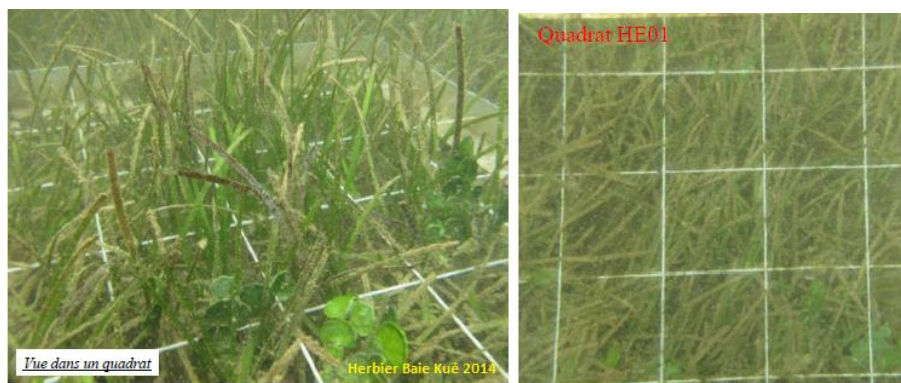
► **Fréquence** : triennale

► **Indicateurs suivis** :

Δ- **Paramètres quantitatifs** (sur chaque station) :

- **Nombre d'espèces** (Biodiversité en phanérogames). Indication de faible portée car seulement 2 espèces dominantes et 1 ou 2 espèces plus rares ont été identifiées en 2011 et 2014. *Cymodocea serrulata*, *Halodule uninervis*, *Halophila ovalis*.
- **% Recouvrement du substrat**. Le recouvrement du substrat est proche de 100 %, très peu de « trous » de substrat sont visibles si bien qu'une grille d'évaluation basée sur le % de recouvrement ne serait pas, à elle seule, un indicateur très sensible. Un changement significatif, peut-être cyclique, pourrait montrer un recouvrement de classes inférieures.
- **Densité de chaque espèce**: nombre de stolons au mètre carré.

Le comptage se fait sur des quadrats installés puis retirés par les plongeurs biologistes



- **Quadra : 50 cm X 50 cm** (un format plus grand serait mal manipulable en plongée) soit $\frac{1}{4} \text{ m}^2$

- **25 Carrés dans 1 quadra** : 25 carrés de 10 cm de côté (10 cm x 10 cm soit $\frac{1}{100} \text{ m}^2$)

Comptages (en répliques) dans chaque carré : du nombre de pieds de phanérogame, à minima 9 carrés par quadra.

- **Autour du point fixe qui représente une station** : 5 quadras sont positionnés de façon aléatoire dans un rayon de 10m

Au total le comptage pour une station est effectué sur $9 \times 4 = 36$ carrés

Le nombre de pieds (par espèce, ici : deux à trois espèces maximum) permet d'estimer la densité de l'herbier.

Exemple : en 2014. Densité au m^2

	Cymodocea s.	Halodule u.	Observations
Station HO1	256	1822	
Station HE1	0	1411	

Δ-Photographies : La densité des herbiers présents ne se prête pas à un comptage photographique aisé. Cependant chaque rapport présent des prises de vue pour archivages.

Δ- Paramètre surfacique par cartographie : Détourage par cartographie effectuées par télédétection via des images aériennes ou satellitaires et vérifications par des points terrain. Tous les 10 ans à minima.

4. FLUX SEDIMENTAIRES

Une campagne d'étude des **flux verticaux des particules en circulation dans l'eau de mer est conduite sur 48 jours à minima, l'indicateur est de type intégrateur**. Le séquençage des 48 jours permet une approche plus découpée du temps intégrateur et une étude plus fine.

► **Les pièges à particules de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3)** sont dotés d'une section efficace de $0,050 \text{ m}^2$, ils sont équipés de carrousels de 12 godets pour permettre la collecte d'une série temporelle de particules sédimentées. La collecte des particules est programmée pour débuter tel jour à 00h00 avec **un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours)** ; elle se termine tel jour à 00h00. Au total : 12 échantillons de matériel particulaire sont prélevés pour chacun des sites d'immersion, 12 X 4 jours par godet exposé= **48 jours de campagne**.

Les tubes à sédiments sont bien moins performants que ce dispositif de pièges séquentiels, ils ne sont **pas recommandés pour un suivi moderne**, en effet les tubes immergés agrègent les informations durant toute leur immersion, sans discrimination, tandis que les pièges séquentiels sont programmés

sur un pas de temps décidé et permettent de séquencer les informations et de mieux les corrélérer à la pluviométrie ou d'autres événements. Poissons et animaux fixés ne doivent pas perturber le piégeage des sédiments, ce qui arrive avec des tubes déposés trop longtemps, tous les dispositifs immergés plus de 1 mois doivent être visités et entretenus.

Tableau 13 : Exemple de collectes de sédiments dans les flux d'eau de la baie Kwé au premier semestre 2015

Echantillon	Période de collecte
St06-KW1-1	23-26 janvier 2015
St06-KW1-2	27-30 janvier 2015
St06-KW1-3	31 janvier-3 février 2015
St06-KW1-4	4-7 février 2015
St06-KW1-5	8-11 février 2015
St06-KW1-6	12-15 février 2015
St06-KW1-7	16-19 février 2015
St06-KW1-8	20-23 février 2015
St06-KW1-9	24-27 février 2015
St06-KW1-10	28 février- 3 mars 2015
St06-KW1-11	4-7 mars 2015
St06-KW1-12	8-11 mars 2015

► **Le mouillage (pour le suivi des flux de MES)**, est constitué d'une ligne équipée du piège à particules séquentiel, d'un lest associé à un largueur acoustique et d'un flotteur de sub-surface (non visible de la surface), il est immergé sur le point de suivi puis récupéré 48 jours plus tard. Le largueur acoustique est nécessaire car aucune bouée ne doit être visible en surface, lors du largage par déclenchement acoustique, l'appareillage remonte en surface grâce au flotteur tandis que lest est perdu ou bien récupéré par un plongeur si la profondeur le permet. En cas de dysfonctionnement des largueurs acoustiques ou pour entretenir le matériel immergé, un plongeur est toujours nécessaire à bord du bateau.

- **Dans le canal de la Havannah : Le dispositif de collecte est placé à 3 mètres au-dessus du fond.** Cette cote de profondeur est particulièrement importante à respecter pour les pièges mouillés à proximité du diffuseur afin que les orifices de collecte demeurent en contact avec l'effluent, même lorsque les conditions hydrodynamiques des marées de vive-eau s'exercent. Ce prérequis est conforme aux résultats des modélisations de la dispersion de l'effluent et du traçage réalisé à la rhodamine-WT; la couche affectée par l'effluent n'étant que d'environ 5 m d'épaisseur en période de vive-eau, et de 10 m par courants faibles (marées de morte-eau). Les godets doivent être placés dans la zone la plus propice à la collecte des flux d'effluent.
- **Au niveau de la baie Kué,** le dispositif ne peut pas être placé en eaux trop peu profondes, il demande à minima 15m d'eau (Fichez et al 2005 et guide CNRT) et pour cela il est placé au centre de la baie, dans le chenal de sortie des eaux et de brassage avec les flux entrants selon les marées et le régime des vents. (Il n'est pas adapté à une zone d'estuaire très peu profonde ou en zone intertidale) Le suivi temporel des apports terrigènes issus des bassins versants de la Baie Kwé, est donc effectué dans un secteur de profondeur supérieure à 15m parce qu'il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage de grosses particules sur le fond, il n'est pris en compte dans les pièges que les fractions fines en suspension potentiellement transportables sur de longues distances par les courants, comme le suggère la modélisation.

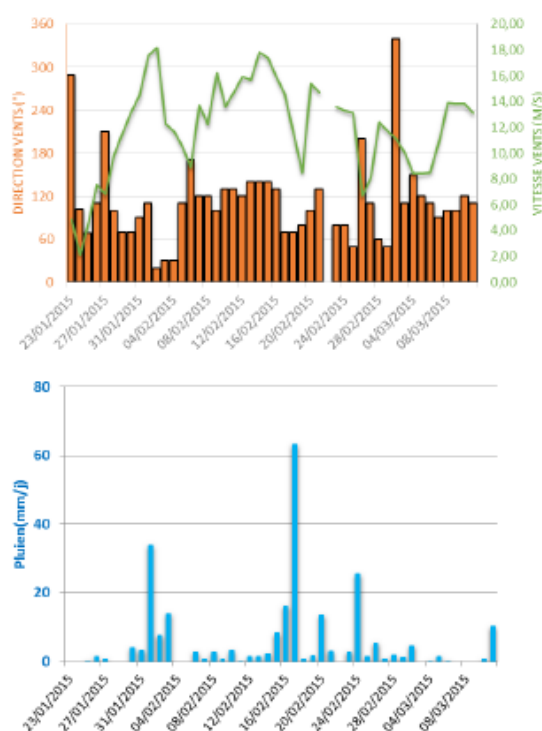
- Ce dispositif fait partie du plan de suivi du milieu marin, du lagon et des baies, mais pas de celui d'une embouchure de rivière. (15 m d'eau sont nécessaires).
- Il ne faut pas confondre les flux de MLES en circulation (ici présenté) et le taux de sédimentation, (suivi par carottage). Le dépôt sédimentaire peut être différent des flux.

► Les échantillons de MES (matière en suspension) collectés dans les godets des pièges séquentiels, sont conservés au frais (4°C) jusqu'à la phase de traitement. Ils sont traités au laboratoire et conditionnés dans des sachets à usage unique puis analysés.

- Les MES sont caractérisées de manière à évaluer les fractions d'origines terrigènes et celles d'origines marines (carbonates).
- Les flux sont estimés (g/m²/j) et confrontés aux différents régimes météorologiques.

► **Les paramètres météorologiques** (pluie journalière, direction et vitesse moyenne du vent) sont donnés par la station météo de l'usine-pilote Vale-NC ou par la station météo installée sur le récif loro, ils sont absolument nécessaires. (Cf. figure suivante). La direction des vents (et leur force) est corrélée avec la remise en suspension des sédiments fins d'origine marine à l'entrée des baies ouvertes sur le Sud, la pluviométrie n'explique pas à elle seule les flux de MES.

Figure 17 : Enregistrement journalier des taux de précipitations, de la direction des vents moyens et de la vitesse des vents moyens pour la période du 23 janvier au 11 mars 2015, durant la campagne de suivi des flux de MES



Les missions ne sont pas effectuées lors de conditions météorologiques extrêmes voire difficile pour des raisons de sécurité et d'homogénéité. Cependant en raison de la forte pluviométrie de la région, les missions d'échantillonnages qui durent 3 ou 4 jours ne peuvent pas être effectuées hors-pluies et les 5 journées avant un échantillonnage influencent aussi celui-ci ; il est donc important de bien corréler les résultats à la pluviométrie même si l'on essaye de s'affranchir des conditions extrêmes. Pour les suivis en continue par appareillages immergés plusieurs semaines, les fortes pluies sont enregistrées et influencent les séquences de relevés associées.

► Les analyses

Le laboratoire qui effectue les analyses est externalisé comme explicité dans le chapitre 1 (qualité de l'eau de mer) Vale NC recherche des laboratoires pouvant présenter les meilleures garanties de rigueur de contrôle qualité (Certification ISO, accréditation, duplicatas d'échantillons et analyses...).

Afin d'éviter les biais, les mêmes recommandations s'appliquent au niveau des échantillonneurs de terrain, que précédemment : leur niveau de compétence, leur implication dans la suite des traitements et analyses des échantillons et leur capacité à analyser les résultats, sont importantes pour la cohérence du suivi sur toutes ses phases. Une implication des mêmes acteurs du début du processus à la fin de celui-ci permet une meilleure attention et évite des biais, l'analyse finale est plus fine et pertinente.

Sont effectués :

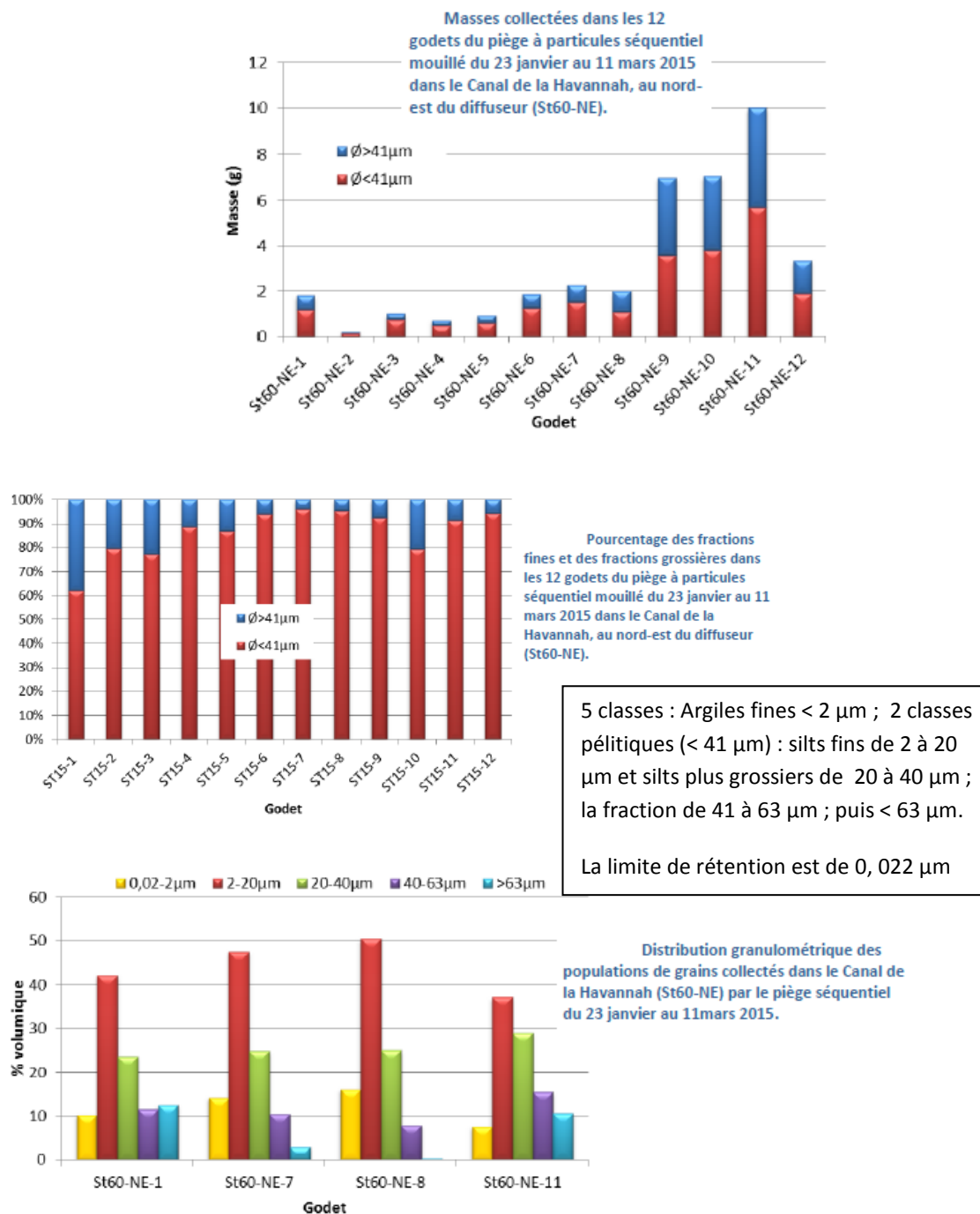
- **Teneur en carbonate** : La teneur en carbonates est calculée par relation stœchiométrique à partir des concentrations de Ca et Mg établies en mg/kg après attaque totale (fusion alcaline) des fractions pélitiques (fraction < 41µm) de MES.
- **Granulométrie** : L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction < 41 µm. La détermination de la distribution de ces populations est réalisée sur quatre échantillons par granulométrie laser (*Malvern master Sizer 2000*) sur la fraction inférieure à 41µm. La granulométrie laser est réalisée à **l'Université de Nouvelle-Calédonie**.
- **Minéralogie** : Les sources et l'évolution temporelle des matériaux sont estimées en fonction des espèces minérales décelées. Les déterminations de ces espèces sont effectuées par diffraction de rayons X (DRX) sur quatre échantillons. Cette analyse est confiée à **l'Université d'Auckland** (*School of Environment*), Nouvelle-Zélande.
- **Dosage des métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni), et du Ca dans les MES** : Le dosage des métaux, du Ca et Mg, nécessaire pour le suivi des flux de polluants, est conduit par attaque totale des fractions pélitiques (Ø < 41 µm) MES par fusion alcaline. Seuls, Ca, Mg et 5 métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont analysés par ICP-OES. Des échantillons de référence (MESS-3 et PACS-2) sont attaqués selon le même protocole pour la validation des résultats de mesures.
- **Dosage du soufre** : Le dosage du soufre est conduit par minéralisation des fractions pélitiques (Ø < 41 µm) des MES, il s'agit d'une attaque acide à haute température en conditions hyperbares. L'analyse du soufre est effectuée par ICP-OES. Ce dosage est effectué pour déterminer les éventuelles formations de gypse lors du rejet de l'effluent.
- **Dosage des HCT** : L'analyse des hydrocarbures totaux est effectuée sur le sédiment brut par la norme NF EN ISO 9377-2.

► Les résultats

- **Masse et la granulométrie de MES**

Par stations et par godets (4 jours en continue de prélèvements) sont enregistrées la masse globale de MES collectée mais aussi la différenciation par fractions entre les pélites les plus fines et des éléments plus grossiers, (tout en restant dans le domaine des matières en suspension de passage).

Figure 18 : Exemple de présentation des résultats : masses collectées par godets (périodes de 4 jours) et fractions des déments fins et plus grossiers



➤ **Composition minéralogique**

- -Calcite et aragonites qui sont des indicateurs d'influence marine ;
- -Goethite qui est un indicateur d'influence terrigène.

➤ **Teneur en carbonate**

Elle indique la fraction d'origine marine des MES récoltées et corrobore la composition minéralogique afin d'évaluer le % d'influence terrigène et le % d'influence marine, ce dernier étant corrélé aux secteurs du vent et à la force de celui-ci, notamment en baie Kwé.

➤ **Composition géochimique des MES**

- Concentrations en Ni, Co, Cr, Mn et Fe + Ca
- Calculs des coefficients de corrélation : Corrélations Ni, Co, Mn et Fe (indicateurs terrigènes) et anti corrélation avec le Ca (indicateur marin)
- Ratio Ca / Fe : Il est un bon indicateur intégrateur, son évolution temporelle à la hausse ou à la baisse indique le ratio : influence marine / influence terrigène. Il ne peut pas indiquer si l'influence terrigène est naturelle, anthropique historique ou due à une activité en cours, sa corrélation avec la pluviométrie et le régime des vents est aussi nécessaire.

Les résultats doivent être présentés de façon synthétique explicite, avec un visuel permettant la corrélation avec la météorologie. Un exemple est proposé en figure suivante.

➤ **Calculs des flux de matières**

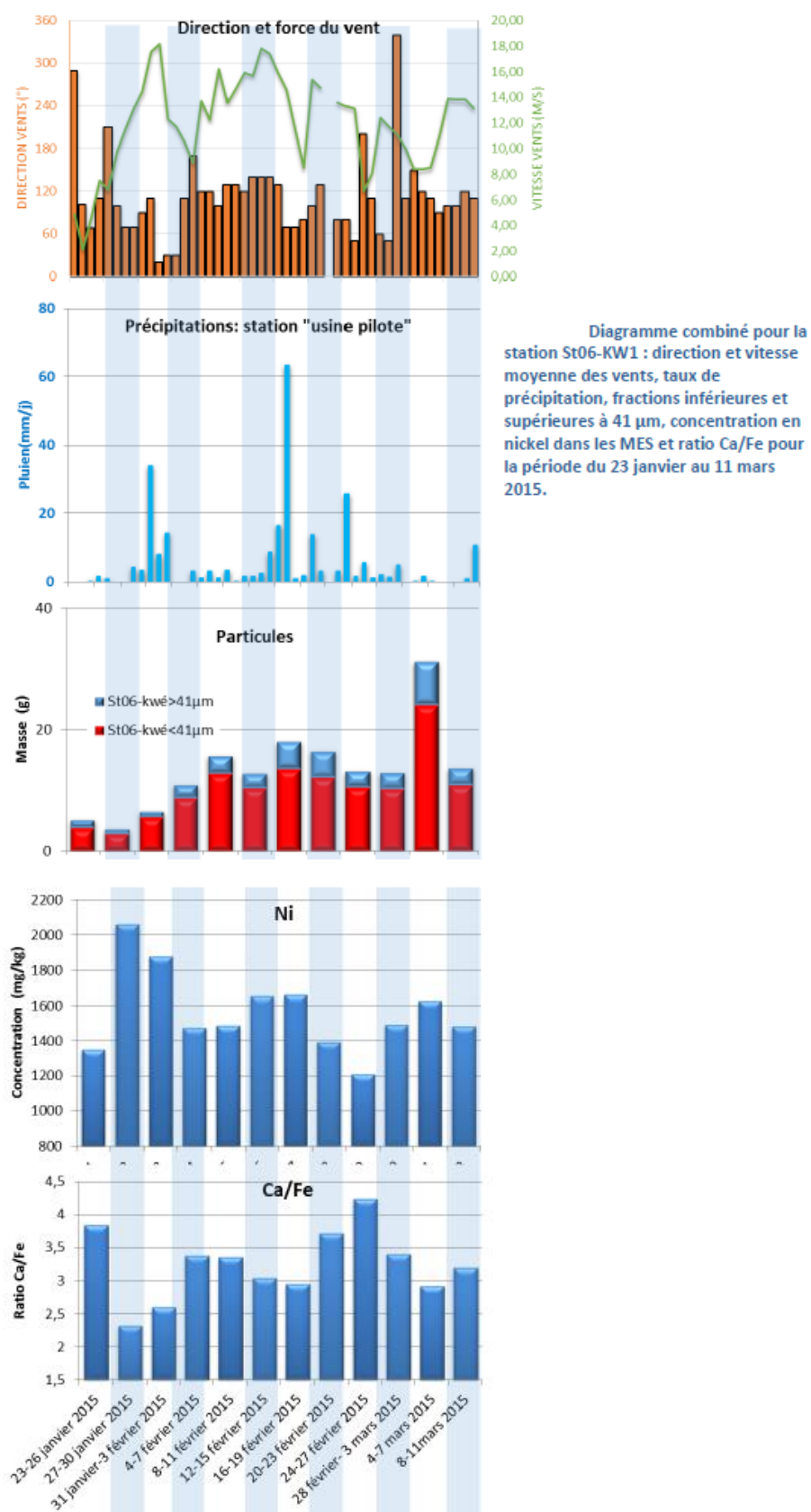
- Flux en MES (en grammes/m²/jour)
- Flux en éléments métalliques (en milligrammes/m²/jour)
- Comparaison depuis les états initiaux et l'ensemble des campagnes de suivi de ce type.
- Tendances évolutives.

Remarque :

- **Les flux de matières ne sont pas toujours corrélés au taux de sédimentation sur un même lieu.** Ces deux types d'indicateurs ne doivent pas être confondus. Par exemple en milieu côtier en saison humide un flux de particules de 45 g/m²/jour est courant, hors phénomène pluvieux exceptionnel et hors impact, pour un taux d'accumulation qui sera de 1,80 g/cm²/an.
- La pluviométrie n'est pas toujours corrélée immédiatement avec les flux de particules en aval d'un creek, en effet un décalage dans le temps peut avoir lieu, en fonction des volumes de rétention ou du relargage de lentilles de sédimentations en amont dans le lit d'un creek.
- La direction des vents et la houle remettent en suspension des matières d'origine marine (calcaire) dans de nombreuses baies. Un « coup de houle » fera grimper les flux de MES, en dehors d'un apport terrigène.

Les diagrammes tels que ceux présentés ci-dessous montrent ces phénomènes complexes, seule une analyse d'expert peut en tirer des conclusions.

Figure 19 : Station de la baie Kwé : St06. Direction et vitesse du vent, pluviométrie et flux de MES : masse par godets de 4 jours de prélèvements et sur 48 jours, concentration en nickel dans les MES et Ratio Ca/Fe.



5. QUALITE DES SEDIMENTS PRELEVES

La collecte des sédiments de surface est effectuée par benne Van-Venne en acier inoxydable de nuance 316L. Pour chaque échantillon, la couche centimétrique de surface est prélevée et conditionnée dans des sachets en vinyle à usage unique (Whirl-Pack) référencés. Les sédiments ainsi conditionnés sont conservés à 4°C, puis de retour au laboratoire ils sont rapidement congelés et lyophilisés.

Une séparation granulométrique des sédiments est effectuée par voie humide (Eau Milli-Q 18.6 $\mu\text{S.cm}^{-1}$) afin de récupérer la fraction sédimentaire chimiquement la plus réactive (pélites = particules < 40 μm). Les tamisages sont conduits sur les aliquotes sédimentaires comprises entre 10 et 100 g selon nécessité et les fractions récoltées sont séchées à l'étuve (40°C) puis conditionnées pour leur conservation jusqu'à l'analyse des métaux.

► Analyse des compositions granulométrique

La caractérisation des sédiments est conduite par analyse granulométrique aux seuils de coupures standards pour séparer, le cas échéant, les sables moyens et grossiers ($\varnothing > 500 \mu\text{m}$), les sables fins ($500 < \varnothing < 250 \mu\text{m}$), les silts grossiers ($250 < \varnothing < 125 \mu\text{m}$), les silts moyen ($125 < \varnothing < 63 \mu\text{m}$) et les silts fins plus les argiles ($\varnothing < 63 \mu\text{m}$).

L'étude de la distribution des populations de particules composant la fraction fine (silts plus argiles inférieurs à 40 μm) est nécessaire car elles déterminent à elles seules 90% des capacités géochimiques d'échange du sédiment qui sont à relier au potentiel toxique de celui-ci.

La distribution de ces populations de particules fines est réalisée par granulométrie laser après remise en suspension des sédiments, ajout d'agent dispersant (Pyrophosphates de Na/K) et agitation aux ultrasons. **Cette analyse est confiée à l'Université d'Auckland (School of Environment), Nouvelle-Zélande.**

► Analyse des compositions minéralogique

Les espèces minérales sont déterminées par diffraction de rayons X (DRX) sur des échantillons séparés à 40 μm (pélites) modérément broyés. L'appareil utilisé est un Philips (PW1050/25) équipé d'une anticathode Cu. La recherche des minéraux est réalisée avec le code UPDSM.

Cette analyse a été confiée à l'Université d'Auckland (School of Environment), Nouvelle-Zélande.

► Dosage des métaux liés aux fractions géochimiques

Pour le suivi triennal, des extractions séquentielles sur les sédiments sont conduites de manière à séparer 4 phases géochimiques. Cette méthodologie permet de mieux appréhender les effets de l'impact d'une contamination métallique potentielle dans le milieu. Les deux premières étapes du protocole permettent de mettre en évidence les conditions sédimentaires et les influences anthropiques, les deux dernières reflètent l'évolution géochimique naturelle.

Pour chaque échantillon, les 4 formes géochimiques suivantes des métaux Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn ainsi que de Ca ont été extraites :

- **formes oxydables** : Cette fraction représente les métaux liés à la matière organique du sédiment. Leur extraction est conduite par un oxydant fort en milieu acide ;

- **formes acido-solubles** : C'est une fraction facilement solubilisable par l'utilisation d'un acide faible tamponné en solution qui attaque en particulier la matrice carbonatée du sédiment. Elle contient également des éléments très faiblement liés aux autres phases géochimiques ; -

-formes réductibles : Elles sont associées aux oxy-hydroxydes de fer et manganèse principalement. Leur extraction s'opère avec un agent réducteur puissant en milieu faiblement acide ;

-formes réfractaires : Elles représentent les éléments métalliques fortement liés ou constituant la matière minérale tels que les silicates et aluminosilicates. L'analyse des métaux réfractaires a été conduite après attaque de la matrice géochimique par fusion alcaline à haute température puis solubilisation de l'amalgame avec un acide dilué.

Après mise en solution (séquentielle ou totale), les métaux et le calcium sont dosés par spectrométrie d'émission optique couplée à une torche plasma (ICP-OES Varian, modèle Vista).

Tableau 14: Méthodologie pour le suivi des sédiments

Description	Distribution des métaux dans les sédiments disponibles : granulométrie, minéralogie et concentration en métaux		
Normes et publication	Tessier et Al 1979		
Prélèvements			
Méthode	Benne à sédiments ou carottier		
Nombre de stations	14		
Fréquence	Tous les 3 ans sauf au port où le suivi est annuel		
Analyses	Méthode	Normes	Limites de détection
Granulométrie	Diffraction laser		0,01µm
Minéralogie	Diffraction aux rayons x		
Extraction séquentielle des phases organiques	Dissolution fractionnée et dosage ICP-OES	Tessier et Al 1979	Entre 0,005 et 0,02µg/L selon le métal
Métaux As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn.*	Attaque totale et dosage par ICP-OES		Entre 0,005 et 0,02µg/L selon le métal

* + Hg en 2014/2015

6. TAUX DE SEDIMENTATION

La méthodologie déployée dans le cadre de cette étude a été spécifiquement développée pour les niveaux de concentration à l'état de traces dans les milieux lagunaires tropicaux et les techniques ont été validées par des publications à comité de lecture. Les techniques analytiques estampillées NF ou ISO, ne sont pas directement applicables dans le contexte des milieux lagunaires de la Nouvelle-Calédonie. En outre, pour répondre spécifiquement aux objectifs annoncés, il a été nécessaire de mettre en œuvre des techniques de carottage adaptées pour individualiser les couches sédimentaires d'épaisseur centimétrique.

Le taux d'accumulation des sédiments dans le milieu naturel, au fond, ne doit pas être confondu avec les flux de matière (chapitre précédent).

► Les prélèvements des carottes

Ils sont effectués avec un carottier conçu pour les faibles profondeurs (< 50 m) afin que la mise en œuvre puisse s'effectuer à partir d'une embarcation à faible tirant d'eau. (Si non les zones d'embouchure et peu profondes du lagon ne pourraient pas être suivies).

Le carottier est composé de tubes amovibles de 0,60 m ou 1,20 m de longueur pour un diamètre externe de 8 cm. Des tubes en plexiglass sont utilisés afin de conserver l'intégrité géochimique des sédiments. Par ailleurs, ce type de carottier présente l'avantage d'assurer une très bonne conservation de l'interface « eau-sédiments ».

Le point de prélèvement est le plus précisément ciblé au GPS et par une position statique du bateau, cependant sur une même station, l'hétérogénéité du fond marin, à un ou deux mètres près, peut être forte et ce fait doit être pris en compte dans la variabilité des carottes.

Des carottes de 14 à 26 cm de profondeur sont extraites afin de déterminer les taux d'accumulation, **une carotte de 35 cm** est prélevée en Baie de Kwé pour estimer les apports relatifs au front de mine.

Après extraction, chaque carotte est maintenue verticalement jusqu'à son découpage intégral en **différents horizons d'une épaisseur égale à 1 cm**.

Une prise d'essai d'un volume de 10 mL de sédiment est aussi effectuée à l'aide d'une seringue dans chaque horizon pour les déterminations des densités et de la porosité des sédiments nécessaires au calcul des taux d'accumulation.

Les horizons de carotte échantillonnés sont conditionnés dans des sachets en vinyle à usage unique (Whirl-pack), congelés puis lyophilisés.

► **Les opérations réalisées sur les différents horizons sont les suivantes :**

- Détermination de la concentration totale des métaux après attaque des sédiments par fusion alcaline et analyse par spectrométrie d'émission (ICP-OES) ;
- **Détermination des taux d'accumulation** par la méthode dite du « 210Pb en excès ». Dans cet objectif, la radioactivité des radionucléides naturels 210Pb et 226Ra a été déterminée par « spectrométrie gamma basse énergie » dans chaque horizon de sédiment brut.
- Sur 4 horizons sélectionnés après un examen visuel de la carotte, une analyse des populations de grains par granulométrie laser et une détermination de la composition minéralogique par diffraction de rayons X (DRX) sont conduites.

Tableau 15 : Méthodologie pour le suivi des sédiments : Taux d'accumulation

Description	Rapidité du taux de sédimentation		
Normes et publication	Godberg ED 1963, Geochronologie with Pb-210 in radioactive dating. Internat atom Energy Agency 121-131		
Prélèvements	Carottier piston		
Analyses	Méthode	Normes	Limites de détection
Datation	Spectrométrie Gamma basse énergie 46, 54 KeV (pour Pb ²¹⁰)	Faure 1986	0,003 Bq/g
Densité	Teneur en eau		0,01 mg/L
Granulométrie et minéralogie	Diffractomètre laser et Diffraction rayons x		0,1µm Traces
Métaux : Géo- chimie : As, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Zn	Attaque totale ICP-OES		Entre 0,001 et 0,02µg/L selon les éléments

► **Les analyses supplémentaires réalisées seulement sur la carotte St16 du port de Prony sont les suivantes**

- Analyse de la concentration en métaux associés aux différentes phases géochimiques composant les horizons. Cette étape a été conduite par extraction séquentielle (Tessier et al.,

1979 ; Quevauvillier et al., 1997), l'analyse ayant été effectuée par spectrométrie d'émission (ICP-OES) ;

- **Analyse du soufre**, dont la concentration permet le suivi du niveau d'impact des activités portuaires sur le milieu marin (opérations de déchargement).

Tous les échantillons de sédiments destinés au dosage des métaux ont été tamisés par voie humide afin de récupérer les fractions pélitiques (particules de diamètre inférieur à 40 µm) ; la fraction pélitique étant considérée de longue date, comme la fraction la plus réactive en matière d'échanges géochimiques avec les métaux (Mayer and Fink, 1979; Ackerman, 1980; Deely and Fergusson, 1994; He and Walling, 1996).

► **Méthode d'analyses :**

- **Dosage des carbonates** : Les teneurs en carbonate sont déterminées par la méthode dite du « calcimètre de Bernard ». Elle consiste en une attaque du sédiment par 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 stœchiométrique.
- **Granulométrie** : L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction < 2000 µm. La distribution de ces populations est réalisée par granulométrie laser (Malvern), après remise en suspension des sédiments, ajout d'agent dispersant (Pyrophosphates de Na/K) et agitation aux ultrasons.
- **Minéralogie (DRX)** : Les espèces minérales sont déterminées par diffraction de rayons X (DRX) sur des échantillons broyés. L'appareil utilisé est un Philips (PW1050/25) équipé d'une anticathode Cu. La recherche des minéraux est réalisée avec le code UPDSM.
- **Dosage de la concentration totale des métaux** : L'analyse de la concentration totale des métaux, contenus dans les horizons des différentes carottes, est conduite par attaque totale des sédiments par fusion alcaline (voir protocole « dosage des métaux dans les phases géochimiques »). Après mise en solution, les métaux Co, Cr, Fe, Mn, Ni et Ca sont dosés par ICP-OES.
- **Dosage des métaux dans les phases géochimiques** : Les étapes d'extraction séquentielles sont conduites avec un protocole modifié de type Tessier et al. (1979) comprenant 4 phases géochimiques. Pour chaque échantillon, 2 g de pélites sont nécessaires pour extraire les métaux des 4 phases géochimiques afin de séparer les formes suivantes :
 - **Formes oxydables** : Cette fraction représente les métaux liés à la matière organique ainsi aux sulfures du sédiment. Leur extraction est conduite par un oxydant fort (H₂O₂, 110 vol) en milieu acide ;
 - **Formes acido-solubles** : C'est une fraction facilement solubilisable par l'utilisation d'un acide faible tamponné en solution (CH₃COOH/CH₃COONH₄) qui attaque en particulier la matrice carbonatée du sédiment. Elle contient également des éléments très faiblement liés aux autres phases géochimiques ;
 - **Formes réductibles** : Elles sont associées aux oxy-hydroxydes de fer et manganèse principalement. Leur extraction s'opère avec un agent réducteur puissant (NH₂OH, HCl) en milieu faiblement acide ;
 - **Formes réfractaires** : Elles représentent les éléments métalliques fortement liés au constituant la matière minérale tels que les silicates et aluminosilicates. L'analyse des métaux réfractaires a été conduite après attaque de la matrice géochimique par fusion

alcaline, selon le protocole en vigueur à l'IRD. Il s'agit de faire réagir du tétraborate de lithium et du sédiment à haute température (1100°C) puis, après refroidissement partiel, de dissoudre les billes d'amalgame formées dans une solution acide (HCl).

Tous les réactifs utilisés sont de marque Merck, qualité ProAnalysis. Les béchers et ustensiles sont soit en PEHD ou en Teflon®.

Après mise en solution, les huit éléments suivants sont analysés par ICP-OES : Ca, Cu, Co, Cr, Fe, Mn, Ni et Zn.

- **Dosage du soufre lixiviable** : L'extraction du soufre lixiviable est réalisée par agitation mécanique de 1g de sédiment dans 100 mL d'eau ultra-pure pendant 16 heures. Les échantillons sont ensuite centrifugés à 3000 RPM puis filtrés à 0,45 µm avant d'être analysés à l'ICP-OES.
- **Dosage du soufre échangeable selon la procédure d'extraction BCR** : L'attaque est conduite sur 1 g de sédiment sec avec 40 ml d'acide acétique 0,11 M pendant 16 h à température ambiante ; l'échantillon est ensuite centrifugé à 1500 RPM pendant 20 minutes puis filtré à 0,45 µm avant d'être analysé par ICP-OES.
- **Géochronologie : La datation des horizons sédimentaires nécessaire à l'évaluation des taux d'accumulation est obtenue par l'analyse de la radioactivité d'un radio-isotope, le ²¹⁰Pb**, naturellement présent dans les sédiments.
La technique consiste à déterminer :
 - le ²¹⁰Pb « atmosphérique » qui provient indirectement de la désintégration du ²²²Rn, descendant gazeux du ²²⁶Ra contenu dans les roches qui se dégage dans l'atmosphère. Intégré aux aérosols, en quantités importantes selon un flux supposé constant, le ²¹⁰Pb est d'abord entraînés par les pluies, puis transporté par les rivières jusqu'à la mer, où il va sédimenter avec les particules.
 - le ²¹⁰Pb « supporté » qui apparaît au sein même de la roche (ou du sédiment) et qui ne subit donc pas le cycle atmosphérique. Son apport aux sédiments découle de l'érosion des sols et de son transport fluvial vers le bassin de sédimentation.

Le ²¹⁰Pb constitue un excellent outil permettant la datation des carottes sédimentaires sur une échelle de temps de l'ordre de 100 ans (He & Walling, 1996 ; Valette-Silver, 1993). Dans les couches sédimentaires, la radioactivité du ²¹⁰Pb d'origine atmosphérique décroît de manière exponentielle en fonction du temps à un taux fixé par sa période de demi-vie ($T_{1/2} = 22,26$ ans). A une profondeur donnée, sous l'interface eau-sédiment, la radioactivité du ²¹⁰Pb dépend donc de la durée écoulée depuis sa déposition et du taux d'accumulation. La radioactivité propre du ²¹⁰Pb en excès est calculée en soustrayant à la radioactivité totale du ²¹⁰Pb celle du ²¹⁰Pb « supporté », mesurée dans les niveaux les plus profonds, où la contribution atmosphérique est négligeable.

L'âge t du sédiment A est alors obtenu selon les équations suivantes (modèles CIC et CRS):

$$t_{CIC} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{210}\text{Pb}^0}{{}^{210}\text{Pb}} \right)_A \quad \lambda = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ an}^{-1};$$

$$t_{CRS} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left(\frac{A(\infty)}{A(\infty) - A(t)} \right) \quad ({}^{210}\text{Pb})_A = \text{la radioactivité dans le niveau de surface } (h = 0);$$

$$A(\infty) = \text{le flux total de Pb-210}; \quad ({}^{210}\text{Pb})_A = \text{la radioactivité à la profondeur } h;$$

$$A(t) = \text{le flux de Pb-210 pour l'instant } t.$$

Le taux d'accumulation « a » ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) est alors : $a = h/t$

La radioactivité du ²¹⁰Pb a été déterminée par spectrométrie gamma basse énergie à 46.54 keV. La chaîne de mesures utilisée est composée d'un spectromètre ORTEC X et d'un détecteur au béryllium de 80 % de rendement.

► Résultats

Les résultats sont donnés par les experts en océanographie, sous une présentation pédagogique et avec des résumés relativement synthétiques. Vale NC ne se permet aucune censure et une fois le cahier des charges rempli, l'expert peut exprimer ses recommandations, ses réflexions ou parfois ses

recherches propres plus approfondies pour mieux cerner un point de suivi. Le rapport intégral d'expertise est en donné annexe des bilans des suivis communiqués par Vale NC aux autorités de tutelle.

Comme pour les suivis précédents la capacité des échantillonneurs à traiter les échantillons et analyser les résultats est un plus en implication pour une rigueur méthodologique maîtrisée sur toutes les phases du processus.

Dans l'exemple ci-dessous : La composition minéralogique des sédiments reste constante le long du profil vertical jusqu'à l'horizon 17-18 cm : les minéraux comme la calcite, l'aragonite et la calcite magnésienne sont largement majoritaires et marquent la forte influence marine, par contre la présence de goethite signe l'influence d'apports terrigènes d'origine latéritique et ceux-ci sont présents même dans les sédiments les plus anciens (profonds : horizon 33/34 cm).

La composition minéralogique évolue en profondeur, avec à l'horizon 33-34 cm où la présence de kaolinite est fortement marquée.

Tableau 16 : Composition minéralogique des sédiments pour les horizons (0-1 cm), (1-2 cm), (17-18 cm) et (33-34 cm) de la carotte St06 de la baie Kué

HORIZON	MINERAL					
	Mg- Calcite	Calcite	Aragonite	Goethite	Kaolinite	autres
0 - 1 cm	-	▲	▲	▲	Δ	-
1 - 2 cm	▲	▲	▲	▲	Δ	-
17 - 18 cm	▲	▲	-	▲	Δ	-
33 - 34 cm	-	▲	▲	▲	▲	Δ

▲ = présence ; Δ = Probabilité de présence à l'état de traces (minimum 5% massique)

La présentation suivante montre les métaux dans les sédiments en fonction de la profondeur de ceux-ci, l'horizon le plus ancien étant le plus profond et en surface il s'agit des dépôts quasi actuel.

Figure 20 : Profils des concentrations totales en métaux (Co, Cr, Fe, Mn, Ni) et du calcium dans la fraction pélitique des sédiments de la carotte St16 du port de Prony

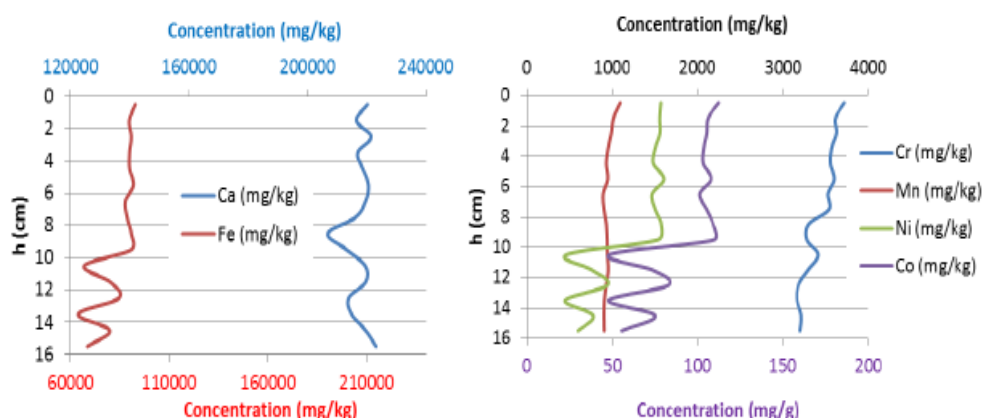
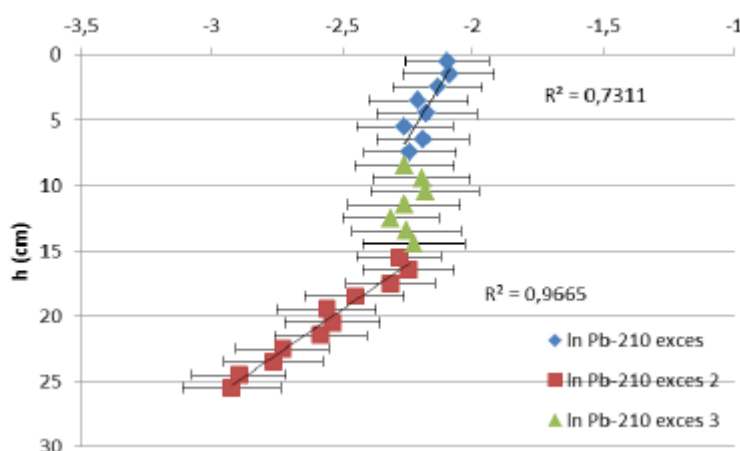


Figure 21 : Profil vertical de la radioactivité du « 210Pb en excès » dans les sédiments de la carotte St06.

Le premier épisode est constitué par les horizons de 0 à 8 cm, il présente un taux de décroissance radioactive rapide et équivaut à un taux d'accumulation de 1,23 g/cm²/an ($R^2=0,780$).

Pour le second épisode, le plus ancien, qui est identifié entre les horizons 15 et 25 cm, le taux d'accumulation calculé est de 0,37 g/cm²/an.

Ces deux épisodes de sédimentation continue sont séparés par un horizon de 7 cm d'épaisseur dont la radioactivité est relativement constante ce qui signifie un apport sédimentaire chaotique et fort en peu de temps, La présence de cette couche est la démonstration de l'irrégularité des phénomènes sédimentaires.

La datation des couches est délicate et demande plusieurs méthodologies couplées et avis d'experts, par deux modèles théoriques CIC (Robbins et Edgington, 1975) et CRS (Appleby et Oldfield, 1978) puis par une troisième approche développée sur la base du système CRS (noté CRS/MV),

7. ANALYSE TEMPORELLE DES INDICATEURS ET SYNTHESE

Les bilans de suivis comportent :

1. Une première partie : celle des résultats bruts et/ou agrégés au niveau de l'ensemble des indicateurs sur l'ensemble des stations imposées, au temps t de la mission.
2. Une seconde partie, exigée auprès des cocontractants spécialistes dans leur domaine : celle des analyses comparatives et des évolutions. (**Stratégie de suivi BACI = Before / After & Control / Impact**) :

2.1. **Les évolutions spatiales comparent les stations entre elles au temps t** le plus souvent par des cartes présentant un indicateur sur l'ensemble du domaine surveillé. Les stations sous influence Vale NC et leur station de contrôle homologue (témoins) doivent être

analysées de pair, autant que possible. Cela fait partie de la stratégie de suivi : Impact/Control

2.2. Les tendances évolutives temporelles : Les états initiaux et les données de référence comparatives sont rappelés dans chaque bilan semestriel. Les courbes de l'évolution d'un indicateur sur une station, depuis les états de référence jusqu' au temps t de la mission en cours, permettent de dégager (ou pas) des tendances évolutives. Cela fait partie de la stratégie de suivi : Before/After. Il est nécessaire de définir de façon de plus en plus précise, au fil des campagnes, la variabilité naturelle, saisonnière (extension de la couverture algale par exemple) ou cyclique (blanchissement corallien par exemple, en fonction des dépressions et cyclones ou des épisodes « El niño ») afin de pouvoir discerner une modification qui soit supérieure à la variabilité naturelle de l'indicateur.

2.3. Il est essentiel de raisonner en termes de tendances évolutives significatives. Il n'est pas rigoureux de tirer des conclusions uniquement à partir d'une donnée ponctuelle ; ou par seulement une comparaison avec une grille de lecture car il n'existe aucun seuil en milieu naturel et les hydro-régions marines sont nombreuses et très différentes entre elles.

2.3.1. Comme le souligne le guide CNRT/ZoNeCo (2011, en réactualisation en 2018) pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie : *Il est impossible de donner une grille de lecture de valeurs seuils*, seules des fourchettes indicatives sont proposées.

2.3.2. Une seule donnée dans une hydro-région de type a)-, ne peut pas être comparée à une donnée dans une hydro-région de type b)-, cela va à l'encontre de la méthode « Control /Impact ».

2.3.3. Un seul indicateur sur la cinquantaine d'indicateurs suivis ne peut pas à lui seul permettre de conclure sur le « bon » ou « mauvais » état global d'une zone. La santé même excellente d'un écosystème sur une zone donnée, n'exclue pas la présence d'un indice de stress (par exemple en réserve Merlet, il y a toujours un % de blanchissement corallien et des maladies sur certains coraux, en bruit de fond naturel, cela ne permet pas de dire que cette réserve est en mauvaise santé).

3. L'ensemble des indicateurs physiques, chimiques, biologiques, ponctuels et intégrateurs, doivent être conjointement analysés, pour cela une communication et une synergie sont nécessaires entre les différents spécialistes qui assurent les campagnes de surveillance : océanographes, chimistes de laboratoire, ichthyologues, spécialistes du corail, biologistes et plongeurs... doivent partager leurs connaissances et leurs questionnements. A cette fin, et sous la demande de l'ingénieur coordinateur des suivis marins, des réunions ont lieu avec l'ensemble de ces scientifiques, pour chaque campagne semestrielle. Si une alerte est donnée sur une station, cette alerte est due à une réflexion conjointe est intégrée suite à la prise en considération de tous les indicateurs. (Ex : la station sur la pointe Puka en 2013, campagnes supplémentaires conjointes physico chimie et biologie).

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES PRINCIPALES

8.1. Qualité de l'eau de mer

- Achard R, Kumar-Roiné S, Kaplan H, Pluchino S, Haddad L, Laurent A, et Fernandez JM (2015). Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony : mission janvier-mars 2015. Contrat Vale-NC/AEL n° 3052-2013, 68p.
- Ambatsian, P., Fernex, F., Bernant, M., Parron, C., Lecolle, J., 1997. High metal inputs to close seas : the New-Caledonia Lagoon. *Journal of Geochemical Exploration*. 59, 59-74.
- Atlas de Nouvelle-Calédonie et dépendances (1981). Editions de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris, 53p.
- Aminot A, Kérouel (2004). Hydrologie des systèmes marins. Paramètres et Analyses. Ed. Ifremer, 336 p.
- Bird, E.C.F., Dubois, J.P., Iltis, J.A., 1984. The impact of opencast mining on the rivers and coasts of New Caledonia. The United Nation University, NRTS-25/UNUP-505.
- Breau L, Senia A, Pangrani K, Garcia JP et Debenay JP (2009). Développement de méthodes d'évaluation de la toxicité et analyse du risque chimique de l'effluent pour l'environnement marin. Convention IRD/Goro-Ni, n°1124, « Ecotoxicologie », 117p.
- Douillet, P., Ouillon, S., Cordier, E., 2001. A numerical model for fine suspended sediment transport in the south-west lagoon of new Caledonia. *Coral Reefs*. 20, 361–372.
- Douillet P et Fernandez JM (2009). Modélisation et simulation du transport des formes particulières d'origine naturelle : Simulation annuelle de la sédimentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. Convention IRD/Goro-Ni, n°1124, « Modélisation hydrodynamique », 55p.
- Dugas, F., 1974. La sédimentation en baie de St Vincent (Côte ouest de la Nouvelle-Calédonie). *Cah. ORSTOM, ser.Géol.* VI, 1, 41-62.
- Fanning GO, Pilson MEQ, 1973. On the spectrophotometric determination of dissolved silica in natural waters, *Analytical Chemistry*, 45 : 136-140.
- Fernandez, J-M., Ouillon, S., Chevillon, C., Douillet, P., Fichez, R., Le Gendre, R., 2006. A combined modelling and geochemical study of the fate of terrigenous inputs from mixed natural and mining sources in a coral reef lagoon (New Caledonia). *Marine Pollution Bulletin*. 52, 320-331.
- Fernandez JM, Dolbecq M, Damien P et Le Grand H (2009). Validation du modèle de transport en phase dissoute par traçage à la rhodamine-WT. Convention IRD/Vale-Inco, N° 2131, 2009, 152p.
- Fernandez JM, Moreton B, Gérard P, Dolbecq M, Belhandouz A (2007). Etat de référence : Qualité physico-chimique des eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony (saison humide). Convention n°1312.
- Fernandez JM, Le Grand H, Moreton B, Dolbecq M, Damien P (2010). Suivi environnemental 2009: Qualité physico-chimique et concentrations en métaux dissous des eaux. Convention n°C2284/E13517.
- Fichez R, Moreton B, Pringault O et Viret H, 2005. Fiche : Caractéristiques physicochimiques des eaux. Convention IRD/Goro-Nickel n° 9104, 56p.
- Fichez R, Adjeroud M, Bozec YM, Breau L, Chancerelle Y, Chevillon C, Douillet P, Fernandez JM, Frouin P, Kulbicki M, Moreton B, Ouillon S, Payri C, Perez T, Sasal P, Thébaud J (2005). A review of selected indicators of particle, nutrient and metals inputs in coral reef lagoon systems. *Aquatic Living Resources* 18 : 125-147.

Holmes RM, Aminot A, Kérouel R, Bethanie A, Hooher A, Peterson BJ (1999). A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 56 : 1801-1808.

Le Grand H, Dolbecq M, Moreton B, Goyaud A, Fernandez JM (2010). Suivi environnemental colonne d'eau 2010-2012 : Qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous. Suivi saison humide (mars 2010). Convention n  C2445.

Le Grand H, Dolbecq M, Kerbrat AS, Goyaud A, Haddad L, Creuzil J, Fernandez JM (2011). Suivi environnemental colonne d'eau 2010-2012 : Qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous. (St15 et St16 : mars, avril, août et novembre 2011). Convention n  C2445.

Le Grand H, Moreton B, Dolbecq M, Haddad L, Roupsard F, Douchin C, Dubuc A, Creuzil J, Fernandez JM (2011). Suivi environnemental colonne d'eau 2010-2012 : Qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous. (1er semestre 2011). Convention n  C2445.

Lorenzen CJ (1966). A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Research*, 13 : 223-227.

Mullin JB, Riley JP (1955). The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters, *Analytica Chimica Acta*, 12: 162-176.

Murphy J, Riley JP, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.

Oudot C, Montel Y, 1988. A high sensitivity method for the determination of nanomolar concentrations of nitrate and nitrite in seawater with a Technicon Autoanalyzer II, *Marine Chemistry*, 24: 239-252.

Ouillon, S, Douillet, P, Lefebvre, JP, Le Gendre, R, Jouon, A, Bonneton, P, Fernandez, JM, Chevillon, C., Magand, O., Lefèvre, J., Le Hir, P., Laganier, R., Dumas, F., Marchesiello, P., Bel Madani, A., Andrefou  t, S., Panch  , J.Y., Fichez, R., 2010. Circulation and suspended sediment transport in a coral reef lagoon: the southwest lagoon of New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin*, Special issue PNEC New-Caledonia.

Raimbault P, Coste B, Fry J (1990). Feasibility of measuring an automated colorimetric procedure for the determination of seawater nitrate in the 0 to 100 nM range: examples from field and culture. *Marine Biology* 104 : 347-351.

Strickland JDH, Parsons TR (1972). A practical handbook of sea water analysis. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 167:207-211.

8.2. Sédiments marins

Mayer LM, Fink LK, 1979. Granulometric control of chromium accumulation in estuarine sediments in Maine. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11, pp 491  503.

Ackermann F, 1980. A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of estuarine and coastal sediments. *Environment Technology Letters* 1, pp 518  527.

Deely, JM, Fergusson, JE, 1994. Heavy metal and organic matter concentrations and distribution in dated sediments of a small estuary adjacent to a small urban area. *Science of the Total Environment*, 153, pp 97  111.

He Q, Walling, DE, 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of Cs-137 and unsupported Pb-210 by mineral soils and sediments. *J. Environ. Radioac.*, 30 (2), pp 117-137.

Tessier A, Campbell PGC, Bisson M, 1979. Sequential procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51, pp. 844-851.

8.3. Suivis des écosystèmes coralliens et des populations associées

Aeby G.S., Tribollet A., Lasne G., Work T.M., in press. Assessing threats from coral and CCA disease on the reefs of New Caledonia. *Journal of Marine and Freshwater Research*

Adjeroud M. et Lasne G., 2011. Fiche n° 19 : Abondance des colonies coralliennes. In Beliaeff B., Bouvet G., Fernandez J.-M., David C., Laugier T. Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT Nikel et son environnement, pages 152-153

Adjeroud M. et Lasne G., 2011. Fiche 20 : Recouvrement corallien. In Beliaeff B., Bouvet G., Fernandez J.-M., David C., Laugier T. Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT Nikel et son environnement, pages 154-155

Andréfouët S., Torres-Pulliza D., 2004. Atlas des récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie, IFRECOR Nouvelle-Calédonie, IRD, Nouméa, Avril 2004, 26p + 22 planches

Arias-González J.E., Legendre P., Rodríguez-Zaragoza F. A., 2008. Scaling up beta diversity on Caribbean coral reefs *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 366, 28–36

Avias J., 1959. Les récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie et quelques-uns de leurs problèmes. Extrait du *Bul. Soc. Géo. Fr*, 7è série, t.I, p 424-430

Baker et Collier, 1966. Some empirical results on variance ratios under permutation in the completely randomized design. *J. Amer. Statist. Ass.* 61, 813-820

Baudry et Baudry-Lavel, 1982. La mesure de la diversité spatiale. Relation avec la diversité spécifique, utilisation dans les évaluations d'impact. *Acta Oecologica, Oecol. Applic.*, 3(2), 177-190

Bellwood D.R., Hughes T.P., 2001. Regional-scale assembly rules and biodiversity of coral reefs. *Science* 292, 1532–1534

Bellwood D.R., Hughes T.P., Connolly S.R., Tanner J., 2005. Environmental and geometric constraints on Indo-Pacific coral reef biodiversity. *Ecology Letters* 8, 643–651

Bemvenuti C. E., Rosa-Filho J. S., Elliott M., 2002. Changes in soft-bottom macrobenthic assemblages after a sulphuric acid spill in the Rio Grande Harbor (RS, Brazil). *Braz. J. Biol.*, 63(2): 183-194, 2003. 12p

Benzoni F., Lasne G., Pichon M., Payri C., 2008. Patterns of zooxanthellate scleractinia biodiversity in New Caledonia Biodiversity and Diversification of Reef Organisms. *Coral reef symposium 2008*

Box et Andersen, 1955. Permutation theory in the derivation of robust criteria and the study of departures from assumption. *J. Roy. Statist. Soc., Ser. B* 26, 211-252

Cabioch G., Payri C. & Pichon M., 2002. Mission Nouvelle-Calédonie. Octobre–novembre 2001. Forages îlot Bayes. Morphologie générale et Communautés algo-coralliennes. In : Cabioch G., Payri C., Pichon M., Corrège T., Butscher J., Dafond

N., Escoubeyrou K, Ihilly C., Laboute P., Menou J.L. & Nowicki L., 2002. Forages sur l'îlot Bayes sur le récif barrière de Poindimié (côte Est de Nouvelle-Calédonie) du 7 septembre au 27 octobre 2001. Rapports de mission, Sciences de la Terre, Géologie - Géophysique, Centre de Nouméa, n° 47 : 22 p. + annexes

Chevalier J.P., 1964. Compte-rendu des missions effectuées dans le Pacifique en 1960 et 1962 (Mission d'étude des récifs coralliens de Nouvelle Calédonie). *Cah. Pac.*, 6 : 172-175

Chevalier J.P., 1968. Géomorphologie de l'île Maré. Les récifs actuels de l'île Maré. Les Madréporaires fossiles de Maré. in : *Expéd. fr. sur les récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie*. Paris : Singer-Polignac. 3 : 1-155

Chevalier J.P., 1971. Les Scléractiniaires de la Mélanésie française (Nouvelle-Calédonie, "les Chesterfield", "les Loyauté, Nouvelles Hébrides). 1ère partie. in : *Expéd. fr. sur les récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie*. Paris : Singer-Polignac. 5 : 307 p

- Chevalier J.P., 1973. Coral reefs of New Caledonia. in : JONES O.A, ENDEAN R. (ed.) : Biology and geology of coral reefs. New York : Acad. Press. Vol 1, Geol. 1 : 143-166
- Chevalier J.P., 1975. Les Scléractiniaires de la Mélanésie française. 2ème partie. in : Expéd. fr. sur les récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie. Paris : Singer-Polignac. Vol. 7 : 407 p
- Chevalier J.P., 1980. Les coraux du lagon de la Nouvelle-Calédonie. in : DUGAS F., DEBENAY J.P. Carte sédimentologique et carte annexe du lagon de Nouvelle-Calédonie à 1/50 000. Feuille la Tontouta. Paris : ORSTOM. Not. Explic., 86 : 17-22
- Chorus I. & Bartram J., 1999. Toxic Cyanobacteria in Water : A guide to their public health consequences, monitoring and management. Geneva : World Health Organization, 416
- Clua E., Legendre P., Vigliola L., Magron F., Kulbicki M., Sarramegna S., Galzin, R., 2006. Medium scale approach (MSA) for improved assessment of coral reef fish habitat. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 333(2), 219–230
- Cochran W.G., 1947. Some consequences when the assumptions for the analysis of variance are not satisfied. Biometrics 3, 22-
- Cochran W. G., 1951. Testing a linear relation among variances. Biometrics 7: 17-32
- Condit R., Pitman N., Leigh Jr. E.G., Chave J., Terborgh J., Foster R.B., Núñez, P., Aguilar S., Valencia R., Villa G., Muller-
- Landau H.C., Losos E., Hubbell S.P., 2001. Beta-diversity in tropical forest trees. Science 295, 666–669
- Dagnelie P., 1975. Théorie et méthodes statistiques, Les Presses Agronomiques de Gembloux, (Vol II) 463 p
- Donaldson, 1968. Robustness of the F-test to error of both kinds and the correlation between the numerator and denominator of the F-ratio. J. Amer. Statist. Ass. 63. 660-676
- Douillet P. et Fernandez J.M., 2009. Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans le lagon sud de la NC. Modélisation et simulation du transport des formes particulières d'origine naturelle. Simulation annuelle de la sédimentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. Convention IRS/Goro-Ni n°1124, 55p
- English S. and al., 1997. Survey manual for tropical marine resources (2nd Edition). Australian Institute of Marine Science. 390p
- Faure G., Thomassin B., Vasseur P., 1981. Reef coral assemblages on the windward slopes in the Noumea Lagoon (New Caledonia). Proc. 4th int. Coral Reef Symp., Manila, 18-22 May 1981. 293-301
- Fernandez J-M. et Moreton B., 2013. Rade Nord : physico-chimie de la colonne d'eau consécutivement au passage du cyclone Fréda. Rapport AEL A130117-V-002, contrat Vale-NC/AEL n°E54930, 33p
- Fisk D., 2009. Best practice for LIT survey. Coral list Vol4 Issue 28
- Fogg G.E., 1975. Algal cultures and Phytoplankton ecology. 2e éd., Univ. Wisconsin in Press.. Madison and Milwaukee, 3-175
- Friedman M., 1937. The use of ranks to avoid the normality implicit in the analysis of variance. J. Amer. Statist. Ass. (32) 675-701p
- Frontier S., 1982. Réflexions pour une théorie des écosystèmes. Bull. Ecol. 8 (4) : 445-464
- Gabriel C., Cros A., Chevillon C., Downer A. 2005. Analyse Eco-régionale marine de Nouvelle-Calédonie. Atelie d'identification des aires de conservation prioritaire. 112p
- Gabriel C., Garrigue C., Kulbicki M., Laboute P., Lebigre J.M., Lasne G., Payri C., Pichon M., Richer de Forges B., Spaggiari J., Renoux R., Dec 2008. Analyse Eco-régionale Marine de la Nouvelle-Calédonie

- Garrigue C., 1985. Répartition et production organique et minérale de macrophytes benthiques du lagon de Nouvelle Calédonie. Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 270 pp
- Garrigue C. & Tsuda R.T., 1988. Catalog of marine benthic algae from New Caledonia. *Micronesica*, 21, 53-70
- Garrigue C. & Di Matteo A., 1991. La biomasse végétale benthique du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Résultats bruts : liste taxonomique, biomasses, pigments chlorophylliens. *Arch. Sci. Mer, Biol. Mar.*, ORSTOM, Nouméa, 1, 143 pp
- Geary, 1956. Test de la normalité. *Ann. Inst. Poincaré* 15, 35-65
- Ginger Soproner, 2013. Avis sur les mortalités observées en juillet 2013, Rapport final, 29p
- Goldman J.C. & Carpenter E.J., 1974. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. *Limnol. Oceanogr.* 19: 756-66
- Guille A., Menou J. L., Laboute P., 1986. Guide des étoiles de mer, oursins et autres échinodermes du lagon de Nouvelle-Calédonie. Édition de l'ORSTOM. 238p
- Hack, 1958. An empirical investigation into the distribution of the F-ratio in samples from two non-normal populations. *Biometrika* 45, 260-265
- Harborne A.R., Mumby P.J., Zychaluk K., Hedley J.D., Blackwell P.G., 2006. Modeling the beta diversity of coral reefs. *Ecology* 87, 2871–2881
- Harmelin-Vivien M.L., J.G. Harmelin, C. Chauvet, C. Duval, R. Galzin, P. Lejeune, G. Barnabé, F. Blanc, R. Chevalier, J.
- Duclerc, G. Lasserre, 1985 – Evaluation visuelle des peuplements et populations de poissons : méthodes et problèmes. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, vol. 40 : 80p
- Hatcher B.G., 1997. Coral reef ecosystems: how much greater is the whole than the sum of the parts? *Coral Reefs* 16, S77–S91
- Hawkins Sigrid V., 2006. "Feeding Preference of the Cushion Star, *Culcita novaeguineae* in Mo'orea" (December 1, 2006). Water Resources Center Archives. Biology and Geomorphology of Tropical Islands (ESPM 107/IB 158)
- Kinne O., 1980. Introduction to the treatise and to Volume 1, in: Kinne, O. (1980). *Diseases of marine animals: 1. General aspects, Protozoa to Gastropoda*. pp. 1-11
- Kinne O., 1980. *Diseases of marine animals: general aspects*, in: Kinne, O. (1980). *Diseases of marine animals: 1. General aspects, Protozoa to Gastropoda*. pp. 13-73
- Kruskal W., Wallis W.A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47 (260): 583–621
- Kulbicki M., Guillemot N., Amand M., 2005 - A general approach to length-weight relationships for New Caledonian lagoon fishes. *Cybium* 2005, 29 (3): 235-252
- Kulbicki M., Sarramagna S., 1999. Adequacy of several density estimates obtained from underwater visual censuses: a case study of Chaetodontidae and Pomacanthidae. *Aquatic Living Resources* 12, 315±325
- Laboute P., 1988. The presence of scleractinian corals and their means of adapting to a muddy environment: the "Gail Bank", p. 107-111, graph., phot. - International Coral Reef Symposium, 1988/08/8-12, Townsville
- Laboute P., Grandperrin R., 2000. Poissons de Nouvelle-Calédonie, Nouméa : Catherine Ledru, 519p
- Laboute P. et Magnier Y., 1978. Guide sous-marin de Nouvelle-Calédonie. Ed. du Pacifique, Papeete (Polynésie Française) : 160p

- Labrosse P., Kulbicki M., Ferraris J., 2001. Comptage de poissons en plongée. Conditions d'utilisation et de mise en oeuvre. Ed. SPC Nouméa, Nouvelle-Calédonie. 54p
- Lasne G., 2006. Synthèse bibliographique des coraux de Nouvelle-Calédonie. C. de coord. CRISP / IRD p93
- Lasne G., 2007. Les coraux de Nouvelle-Calédonie : Synthèse bibliographique. Cellule de coordination CRISP, IRD, WWF, MNHN, EPHE. 93p
- Lasne G., 2009. Inventaire des coraux scléactiniaires du Grand Lagon Nord – Mission CoRalCal 3-IRD. (CRISP). 119p
- Lasne G., 2010. Inventaire des coraux scléactiniaires du Grand Lagon Nord de la Nouvelle-Calédonie – Campagne CORALCAL III, 10-30 mars 2009. 122p / Cellule de coordination CRISP, IRD. 120p
- Lasne G., 2014. Estimation temporelle de la colonisation biotique sur la partie rompue de l'émissaire marin et évaluation de l'état de santé des communautés récifales aux abords de cette rupture. Rap 135-2014_V02. 19p
- Lasne G. in Clua E., McKenna S., Vieux C., 2011. Contribution à l'inventaire biologique et à l'évaluation des ressources des récifs des Chesterfield – Apia, Samoa : SPREP
- Legendre P., Borcard D. and Peres-Neto R.P., 2005. Analysing Beta Diversity : Ecological Monographs, 75 (4) :435-50
- Legendre P. et Legendre L., 1998. Numerical Ecology. Ed. : Elsevier. p 852
- Le Grand H., Kaplan H., Raynal A., Fernandez J.M., 2014. Suivi renforcé de la qualité physico-chimique de l'eau de mer de la station Puka A. 46p
- Levi C., Bargibant G., Menou J.L., Laboute P., 1998. Sponges of the New Caledonian Lagoon. Edition de l'ORSTOM. 214p
- Météo France, 2013. Bulletin météorologique exceptionnel. <http://www.meteo.nc/actualites/364-episode-pluvieux-debut-juillet-> 2013
- Mundy C., 1985. These about accuracy and precision of the LIT method. James Cook University Townsville
- Ormond R.F.G., Roberts C., 1997. The biodiversity of coral reef fishes. In: Ormond, R.F.G., Gage, J.D., Angel, M.V. (Eds.), Marine Biodiversity: Patterns and Processes. Cambridge University Press, pp. 216–257
- Ornellas A.B. and Coutinho R., 1998. Spatial and temporal patterns of distribution and abundance of a tropical fish assemblage in a seasonal Sargassumbed, Cabo Frio Island, Brazil. J. Fish Biol, 53 (A): 198-208
- Parrish J. D., 1989. Fish communities of interacting shallow-water habitats in tropical oceanic regions. Mar. Ecol. Prog. Ser. 58 : 143-160
- Payri C.E., 1988. Halimeda contribution to organic and inorganic production in a Tahitian reef system. Coral Reefs, 6,251-262
- Payri C.E. & N'Yeurt A.D.R., 1997. A revised Checklist of Polynesian benthic Marine Algae, Australian Systematic Botany, 10: 867-910
- Payri C., N'Yeurt A.R. & Orempüller J., 2001. Algae of french Polynesia -Algues de Polynésie Française. Edition Au Vent des îles - Tahiti, 320pp
- Payri C. et Richer de Forges B., 2006. Compendium of marine species from New Caledonia. Doc. Sci. Tech. II7 volume spécial, IRD
- Payri C., Petek S., Menou J.L., Lasne G., Butscher J., 2007. Biodiversité et substances marines des îles Fidji (Algues, Eponges, Ascidies, Echinodermes)
- Pearson E.S. et Hartley H.O., 1966. Biometrika tables for statisticians (Vol I) University Press, Cambridge, 264p

- Pichon M., 2006. Biodiversité des coraux scléractiniaires de Nouvelle-Calédonie. Rapport sur la mission effectuée à Nouméa/Nouvelle-Calédonie du 4 au 21 mai 2006. Rapports de mission confidentiels
- Pichon M. 2006. Scleractinia of New-Caledonia. Check list of reef dwelling species. Rapports de mission confidentiels
- 5 Pichon M., 2006. Scleractinia of New-Caledonia. in Payri C. et Richer de Forges B., (eds). Compendium of marine species from New Caledonia. Doc. Sci. Tech. II7 volume spécial, IRD : 148-155
- Pichon M. et al., 2007. Biodiversité des coraux scléractiniaires de Nouvelle-Calédonie. Rapport de mission confidentiel du Diahot du 17 novembre au 12 décembre 2006 (EPHE), 26p
- Randall J.E., Allen G.R. and R.C. Steene, 1990. Fishes of the Great Barrier Reef and Coral Sea. University of Hawaii Press, Honolulu, Hawaii. 506p
- Randall J.E., 2005. Reef and shore fishes of the South Pacific. University of Hawaii, Press book. 707 p
- Richer de Forges B., 1998. Thèse : La diversité du Benthos marin de Nouvelle-Calédonie : de l'espèce à la notion de patrimoine. Muséum national d'histoire naturelle. 326p
- Richer de Forges B., Laboute P., 2004. Lagons et récifs de Nouvelle-Calédonie, 1600 espèces. Edition Catherine Ledru-IRD
- Risk M.J., Risk A.C., 1997. Reef surveys as an aid in management. Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym. 2, 1471±1474.
- Sato M., 1984. Mortality and growth of juvenile coral *Pocillopora damicornis* (Linnaeus) Univ. Ryukyus, dep. marine sci., Okinawa 903 01, JAPON
- SLE 1995. Projet Goro Nickel, Nouvelle-Calédonie. Etude de caractérisation de l'environnement. Rapp. SNC-Lavalin/INCO
- Soubeyran Y., Meyer J.Y. et le Groupe de travail « Espèces Exogènes », 2011. Expertise du « Plan opérationnel pour la maîtrise des espèces exogènes » de la société Vale Nouvelle-Calédonie. Rapport final. 34p
- Spalding M.D., Ravilious C. & Green E.P., 2001. World atlas of coral reefs. University of California Press, 424 p
- Srivastava, 1959. Effect of non-normality on the power of the analysis of variance test. Biometrika 46, 114-122
- Thollot P., 1992. Les poissons de mangrove du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Ecologie des peuplements. Relations avec les communautés ichtyologiques côtières. Thèse Doct. : Univ. Aix-Marseille II (France) : 406p
- Thollot P. et Wantiez L., 1996. Evaluation des impacts du projet Goro Nickel sur les communautés biologiques marines de la Baie Kwé et de la zone portuaire de Prony. 38p
- Trescases J.J., 1969. Premières observations sur l'altération des péridotites en Nouvelle-Calédonie. Pédologie, géochimie et géomorphologie. Cah. ORSTOM, Ser. Géol. 1 : 27-57
- UICN, 2001. Catégories et Critères de l'UICN pour la Liste Rouge : Version 3.1. Commission de la sauvegarde des espèces de l'UICN. UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. ii + 32pp
- Veron J.E.N., Pichon M., 1980. Scleractinia of Eastern Australia. Part 3. Families Agaricidae, Siderastreidae, Fungiidae, Oculinidae, Merulinidae, Mussidae, Pectinidae, Caryophyllidae, Dendrophylliidae. Mem. Austral. Inst. Marine Sci. 4. 422 pp
- Veron J.E.N., Wallace C.C., 1984. Scleractinia of eastern Australia. IV Family Acroporidae. Aust. Inst. Mar. Sci. Monogr. Ser. 6. 485p
- Veron J.E.N., 1986. Coral of Australia and the Indo-Pacific. Angus and Robertson Publishers. 644p

- Veron J.E.N., 1995. Corals in space and time, the biogeography and evolution of the Scleractinia. UNSW Press, Sydney. 321p
- Veron J.E.N., 2000. Corals of the world. Australian Institute of Marine Science, Townsville, 1410pp
- Wallace C., 1994. New species and a new species-group of the coral genus *Acropora* (Scleractinia: Astrocoeniina: Acroporidae) from Indo-Pacific locations. *Invert. Tax.* 8: 961–88
- Wallace C., 1997. New species of the coral genus *Acropora* and new records of recently described species from Indonesia. *Zool. J. Linn. Soc.* 120: 27–50
- Wallace C., 1999. Staghorn Corals of the World. A revision of the Genus *Acropora*. (ed) CSIRO Publishing pp. 422p
- Wallace C. & Willis B.L., 1994. Systematics of the coral genus *Acropora*: implications of new biological findings for species concepts. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 25: 237-262
- Wallace C. et Wolstenholme J., 1998. Revision of the coral genus *Acropora* in Indonesia. *Zool. J. Linn. Soc.* 123: 199–384
- Wells J.W., 1959. Notes on Indo-Pacific Scleractinian corals. Part 1 and 2. *Pac. Sci.*, 13 (3) : 286-290
- Wells J.W., 1961. Notes on Indo-Pacific Scleractinian corals, Part 3. A new reef coral from New Caledonia. *Pac. Sci.*, 15 : 189- 191
- Wells J.W., 1964. The recent solitary Mussid Scleractinian corals. *Zool. Meded., Leiden*, 39 : 375-384
- Wells J.W., 1968. Notes on Indo-Pacific Scleractinian corals. Parts 5 and 6. *Pac. Sci.*, 22 (2) : 274-276
- Wells J.W., 1971. Notes on Indo-Pacific Scleractinian corals. Part 7. *Pac. Sci.*, 25 (3) : 368-371
- Wells J.W., 1984. Notes on Indo-Pacific Scleractinian corals. Part 10. *Pac. Sci.*, 38 (3) : 205-219
- Whittaker R.H., 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs* 30, 279–338
- Whittaker, R. H., 1972. Evolution and measurement of species diversity *Taxon* 21 : 213-251
- Whittaker R.H., 1977. Species diversity in land communities. *Evolutionary Biology* 10, 1–67
- Wiebe W.J., 1987. Nutrient pools and dynamics in tropical, marine, coastal environments, with special reference to the Caribbean and Indo-west Pacific regions. *UNESCO Rep. Mar. Sci.*, 46 : 19-42
- Wijsman-Best M., 1972. Systematics and ecology of New Caledonia Faviidae (Coelenterata, Scleractinia). *Bijdr. Dierk.*, 42 (1) : 1-90
- Wijsman-Best M., 1973. A new species of the Pacific coral genus *Blastomussa* from New Caledonia. *Pac. Sci.*, 27 (2) : 154-155
- Wijsman-Best M., 1974. Habitat-induced modification of reef corals (Faviidae) and its consequences for taxonomy. In: *Proceedings of the Second international coral reef symposium* (Cameron-A-M editor), Volume 2; coral settlement and growth : 217-228
- Wilcoxon F., 1945. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin* 1 (6): 80–83

8.4. Herbier

E. Fontan. 2010. « Les herbiers subtidaux de Nouvelle-Calédonie » (2009) et le travail de l'IRD : « Mise au point d'outils de caractérisation et de suivi des herbiers subtidaux de Nouvelle-Calédonie » par E. Fontan, P.Dumas, C.Payri et D.Ponton (2010) ;

« Seagrass-Watch. Guidelines for Community Groups & Volunteers » (QDPI Cairns 1998) ;

Herbiers et phanérogames marines de l'Outre-Mer français et les écosystèmes associés aux récifs coralliens. Par Hily C., Duchêne J., Bouchon C., Bouchon-Navaro Y., Gigou A., Payri C., Védie F. IFRECOR 2010. (Pages 83/90 Herbiers en Nouvelle-Calédonie)