Méthodologies pour les suivis marins

Actualisation 2019

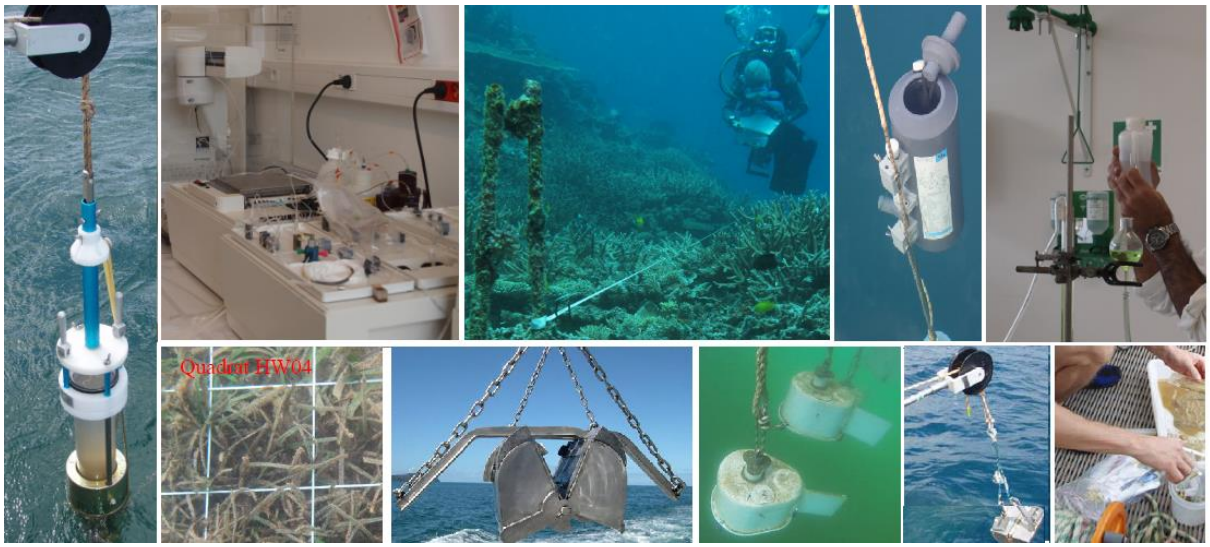


Table des matières

1. Qualités physico chimiques de l'eau de mer

1.1. Structure physique de la colonne d'au
1.2. Qualité chimique de l'eau
1.3. Sels nutritifs
1.4. Hydrocarbures
1.5. Métaux dissous
1.6. Résultats
1.7. Données météorologiques

2. Ecosystèmes coralliens et populations associées

2.1. Substrat. Liste des types de substrats suivis par méthode LIT
2.2. Poissons. Liste des poissons comptabilisés selon le plan de suivi CCB-2009
2.3. Recommandations
2.4. Journal de plongée
2.5. Minimisation des bais
2.6. Missions sur les stations sous- marines
a)-Entretien
b)-Evaluations (LIT ; benthos ; poissons)

3. Herbier

4. Flux de sédiments

5. Qualité des sédiments

6. Taux de sédimentation

7. Capteurs passifs DGT

8. Analyses des indicateurs (évolutions spatiales et temporelles) et synthèse

9. Bibliographie

10. Acronymes

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

Les paramètres mesurés (par une sonde) ou analysés (dans les échantillons d'eau prélevés) donnent des informations instantanées et ponctuelles.

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

- aux cycles des marées ;
- 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 nécessitent des flacons spécifiques.)

► **La certification du laboratoire externe qui effectue les prélèvements et les analyses est recommandée**, en matière de métrologie environnementale en milieu marin.
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 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 même en conditions de mer agitée ;
  - 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 durant la plus courte durée 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 leurs évolutions : 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 d'atteindre les limites de quantification (LQ) demandées.** Ceci dans le but de respecter le plan de suivi du mieux marin VNC (Cf. sa version 2019). Une analyse de l'évolution temporelle des résultats, notamment sur des métaux concentrés de façon infinitésimale en eau de mer, est demandée à chaque prestatire.

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 multiparamétrique 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.

- 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 rester 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 (notamment les vents de secteurs Sud sur la zone concernée par ce travail), ainsi que des courants de marées.
  Remarque : La salinité est exprimée en unité °/°° (exemple : 37 grammes pour 1000) le plus communément, 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 °/°°.

- 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), dans les stations côtières du Nord du canal de la Havannah et dans le canal Woodin), ou bien une remise en suspension de dépôts sédimentaires du fond (par exemple en baie Kwé par vents de secteur Sud de plus de 25 nœuds), elle peut aussi être due à la florescence 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), 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 et la turbidité (dans le cas d'une eau sans particules).Par contre elles peuvent colorer l'eau.
  - La transparence de l'eau 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.

- Fluorescence : elle permet d'estimer la concentration en chlorophylle-a, et donc de quantifier globalement la biomasse du phytoplancton. Un 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 fluorescent. La linéarité de la réponse permet de calibrer le capteur avec une solution de *Thalassiosiria weissflogii* (culture de phytoplancton) et de l'exprimer en 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 fabriquant 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 :

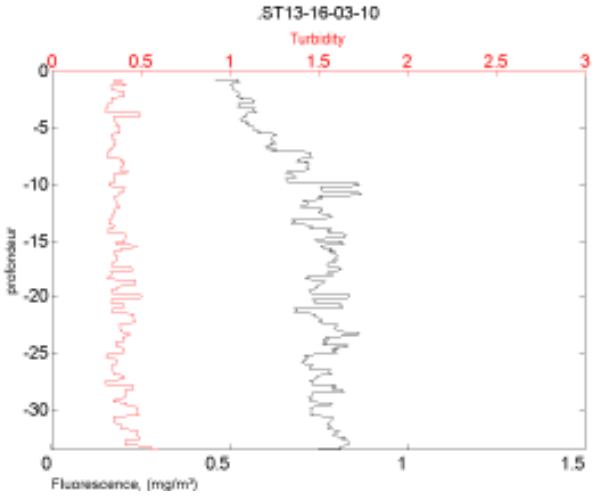
- La pression (elle permet de calculer la profondeur, une fois convertie en unités métriques de profondeur) ;
- La salinité (déduite de la mesure de la conductivité, sans unité ou bien convertie en °/°°)
- La température (°C) ;
- La turbidité : elle est obtenue par mesure de la néphélométrie exprimée en NTU (Méthode EPA) ;
- La fluorescence in-vivo est exprimée en concentration équivalente en chlorophylle (CEC) L'unité est donnée en mg/m^3.

Tableau 1: Méthodes et limites de détection pour le suivi de la structure de la colonne d'eau de mer avec une sonde multiparamétrique CTD

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.

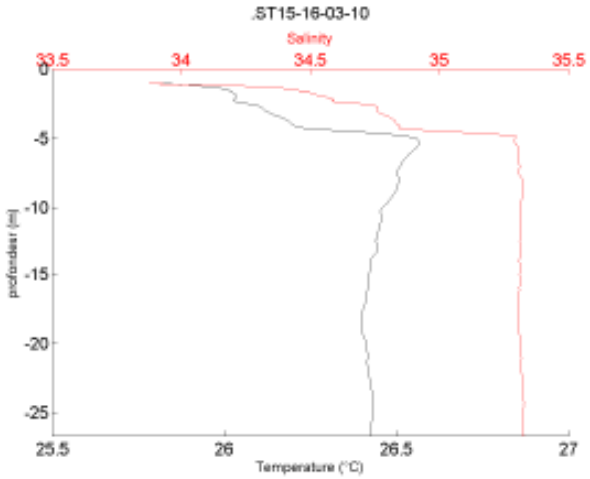
Figure 1 : Structure de la colonne d'eau sur la station ST13, le 16-03-10
Turbidité (rouge) et fluorescence (noire) de la surface (0) jusqu'au fond (-36m)



La figure ci-dessus indique que la turbidité et la fluorescence ont été enregistrées par une sonde multiparamétrique, entre 1m et 36 m de prondeur, (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 contre, les courbes suivantes montrent que la colonne d'eau n'est pas homogène car une couche d'eau moins salée et plus fraiche est présente en surface (influence de l'eau douce des creeks). Cela est caractéristique de la baie du Prony ou de la baie Kwé une thermocline et une halocline cisaillent la colonne d'eau qui est dite de structure « stratifiée ».

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

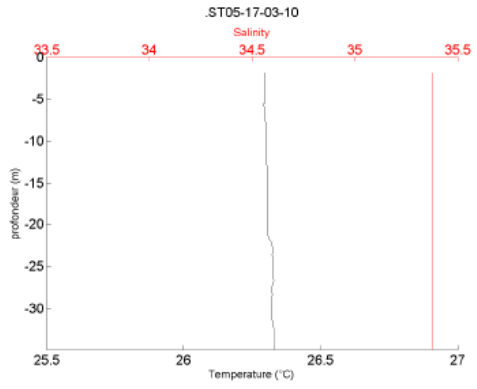


La figure ici dessus signifie que la salinité et la température entre 1 et 26 m de profondeur ont été enregistrées par la sonde multiparamétrique CTD sur la station St15 (en face le creek de la Baie Nord en baie du Prony, le 13/03/2010). Le fond du lagon est à -27 m. L'eau de surface véhiculée par le 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 caractérisée par 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



Les courbes de salinité et température selon l'homogénéité de la colonne d'eau (ou la présence de veines différentes), permettent de caractériser des hydro-régions différentes. Une station témoins et une station «à surveiller» doivent présenter un même type de profil vertical de stratification naturelle de la colonne d'eau.

1.2. Qualité chimique de la colonne d'eau

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

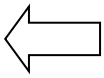
Les prélèvements doivent être positionnés par rapport aux cycles des marées et aux conditions météorologiques de la saison et de la semaine précédant la mission (cumul des pluies).

- Les caractéristiques météorologiques globales de l'année ou de la saison (bilan de Météo France NC) ne sont pas suffisantes, une saison dite « sèche » peut présenter de fortes pluies durant les trois jours avant la mission de prélèvement et leur influence est déterminante. **Il est pris en compte la pluviométrie le jour de la mission et les 5 jours qui la précèdent.** (Données des stations météo du Grand Sud, St Ioro et/ou St Usine).

- **Il n'y a pas de mission lors des intempéries** (Vent > 20 nœuds ; forte houle ; dépression tropicale ; cyclone ; inondation) mais en raison de la forte pluviométrie sur le site, il ne peut pas être exemptés de mission tous les jours de pluies. De plus, connaitre les qualités chimiques de l'eau de mer après une période de pluies permet de bien appréhender les conséquences des épisodes pluvieux, l'efficacité des bassins de décantation etc.

- 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 à cette mission, 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).Le travail d'échantillonnage ne doit pas être sous traités à un personnel non qualifié.



Les échantillons sont prélevés en :

- Sub- surface (moins de 2 m de profondeur) Cette veine d'eau est proche de celle des creeks (dessalée) en zone côtière, cette couche est celle qui véhiculera les indicateur terrigènes et, si pollution, les HT, elle est donc très importante.
- Mi- profondeur, l'eau de compartiment marin exprime sa qualité
- Au fond (sans toucher le fond)

Il y a donc 3 prélèvements par station de suivi.

Pour déterminer la qualité de la colonne d'eau les paramètres suivants : pH, matières en suspension (MES), calcium, potassium, magnésium, sodium, chlore, et sulfates sont analysés en premier lieu.

-La mesure des matières en suspension (MES) : Les MES sont toujours plus concentrées en milieux côtiers et estuariens car elles reflètent l'importance des apports terrigènes et la remise en suspension de sédiments sous l'influence des conditions météorologiques. (En cas de ressac dus au vent et à la houle, les MES seront importantes). Les MES influencent la production

primaire (chlorophyllienne): une charge particulaire très 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 ; cette mesure instantanée est de faible signification. La turbidité affichée grâce aux sondes CTD donne une information plus « parlante ». Il est pertinent de recouper ces deux informations lors des analyses des résultats. 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 MES 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 par la sonde CTD est déjà informatif et un suivi du degré de minéralisation de l'eau de mer par échantillonnages ponctuels ne détectera pas des modifications pourtant significatives. Il est cependant effectué selon les prescriptions réglementaires 2008 du plan de suivi du milieu marin VNC.

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 chlorphylle-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), de façon semestrielle sur 13 stations ou trimestrielle (au port). Cela représente à minima 720 données /an et un ciblage plus précis (sélectif) sur les indicateurs clefs serait souhaitable.

- **L'ammonium (NH_4^+) :** dans le milieu marin, la forme prépondérante de l'azote ammoniacal est l'ammonium (NH_4^+). 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, d'où la nécessité de limites de quantification (LQ) très basses.

- **Les nitrate et les nitrites (NO_3 et NO_2)** : l'ion nitrate NO_3 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 (NO_3). 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 (PO_4^{2-}) :** dans l'eau de mer, le phosphore dissous est essentiellement présent sous forme d'ions ortho-phosphates ($PO4^{2-}$). 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 en $PO4^{2-}$ 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, il serait rapide et plus pertinent.
- **Azote, phosphore et carbone particulaires (NOP, POP, COP) :** 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.
    - Ces données seraient intéressantes pour une étude des cycles trophiques du type thèse ou/et recherche. Dans le cas d'un suivi industriel et portuaire, leurs fluctuations sont moins utilisables, (elles n'ont pas indiqué de tendance significative après 10 ans de suivis Vale NC).
- **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.
    - Elle pourrait indiquer un bloom phyto-planctonique en cas de forte hausse indépendante de la saison, il faut relier/recouper l'information qu'elle donne au suivi algal associé et aussi à la courbe de fluorescence obtenue par les sondes CTD. (Après 10 ans de suivi la zone Vale NC n'a jamais présenté de risque d'eutrophie ni de prolifération algale).
- **Les silicates** : ils constituent l'essentiel des **squelettes de divers organismes marins**. Leur concentration dans l'eau de mer, sous forme de silicates ($SiO4^{4-}$), 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).
    - Les données obtenues sont de faible pouvoir indicateur d'éventuelle pollution en suivi industriel.

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
NO_2 + 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 contractions 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 et 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 11 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 naturel est un bon indicateur du niveau d'influence terrigène**. (Pas pour le fer dissous).
- Tandis que **: As, Cu et Fe montrent un comportement inverse**. Le cuivre suit cependant un comportement moins prévisible que le fer.
- **Le fer dissous fait partie intégrante de la biochimie des chaînes trophiques** et ne peut pas être considéré comme un indicateur terrigène fort. (Contrairement à Co, Ni, Cr et Mn. Ne pas confondre avec le Fer dans les sédiments, on est ici en fer dissous dans l'eau de mer).

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, l'As est associé à cette influence marine du large.

- **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 2019/2020) il est conseillé de suivre les métaux suivant :

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

Vale NC présente des activités portuaires, industrielles et d'extractions minières, Vale NC est tenu par arrêté de suivre les métaux suivants: Co, Cr, Ni, Mn, Cu, Zn, CrVI, As, Fe, Pb et Cd. L'Hg a été ajouté ponctuellement en 2014, il peut faire l'objet d'analyses ponctuelles.
Nombre d'analyses : 14 stations, suivi semestriel ou trimestriel à 3 profondeurs ; minimum : 990 données/an.

La corrélation avec la pluviométrie de la semaine antérieure au prélèvement est effectuée systématiquement.
Rappel : Ce n'est pas la pluviométrie globale de la saison qui influence les résultats d'un prélèvement ponctuel, mais celle de la journée de prélèvements et des jours précédents.

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.

L'ICP, abréviation de "Inductively Coupled Plasma", est une technique analytique à plasma à couplage inductif permettant de mesurer la teneur d'un élément inorganique présent dans un échantillon. Cette technique est applicable à tout type d'éléments chimiques élémentaires.
L'analyse d'échantillon par ICP est composée de plusieurs étapes : premièrement, l'échantillon solide doit être mis en solution grâce à un acide fort ou à un mélanges d'acides forts ou par microondes. On parle alors de minéralisation. La préparation est ensuite introduite par vaporisation au plasma d'argon puis placée à très hautes températures. Ces excitations thermiques entraînent des phénomènes d'ionisation et de séparation des éléments, permettant ainsi de caractériser et de détecter chaque élément selon les analyseurs utilisés.
Plusieurs types d'analyseurs :

- **ICP couplés à des Spectromètres à Emission Atomique** (**ICP-AES ou ICP-OES)** mesurant les longueurs d'ondes émises par les ions.

- **ICP couplés à des Spectromètres de Masse (ICP-MS)** via lesquels les éléments sont analysés selon leurs charges et leur masse.

La combinaison la pré-concentration puis de l'ICP-AES et de l'ICP-MS permet de déterminer un large éventail d'éléments inorganiques et d'impuretés élémentaires, en une seule fois, avec une fiabilité et une précision extrême (de l'ordre du ppt au ppb en fonction des matrices).

Tableau 5 : Méthodes et limites de quantification 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 TMDA-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.

Rappel : 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.

Rappel : 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.

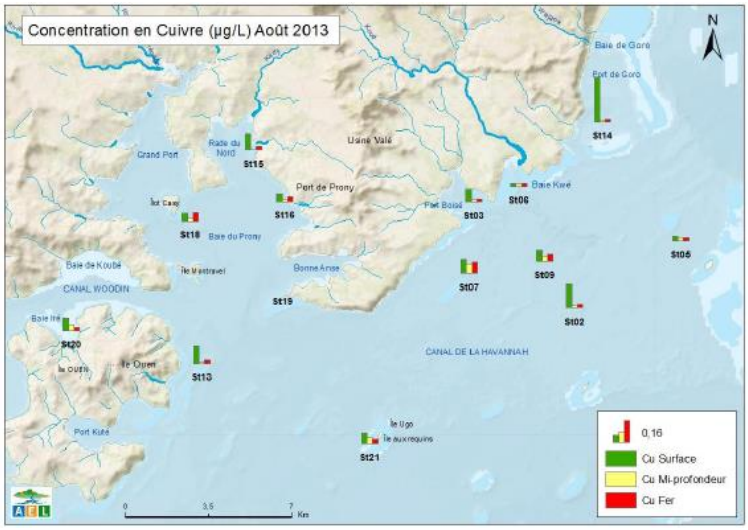
Le rapport final doit présenter le nom et les compétences des échantillonneurs de terrain.

1.6. Les résultats

Ils sont schématisés et synthétisés pour chaque paramètre selon l'exemple donné sur les figures suivantes. La présentation des rapports (fréquence semestrielle) doit être pérennisée car elle permet une lecture facilitée.
Seuls certains paramètres « clefs » sont présentés par cartographie de 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.

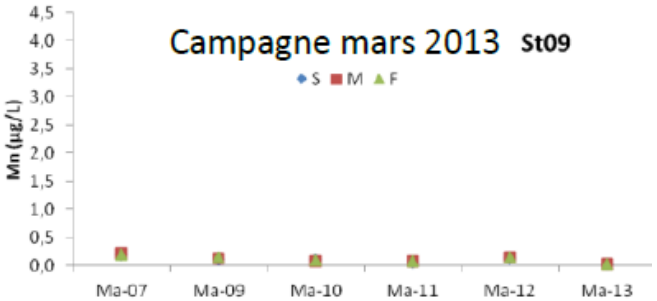
- Comparaisons spatiales au temps t : Paramètre suivi, date de la mission, N° des stations, 3 profondeurs et unités des concentrations, sont notés. Ite décelée. Une variation (Ici en baie de Goro) est vite décelée.

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 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 permiers suivis en saison chaude (mars)



Les prélèvements en saison chaude et les prélèvements en saison fraiche sont effectués en dehors des épisodes climatiques intenses : très fortes pluies ou tempête tropicale,

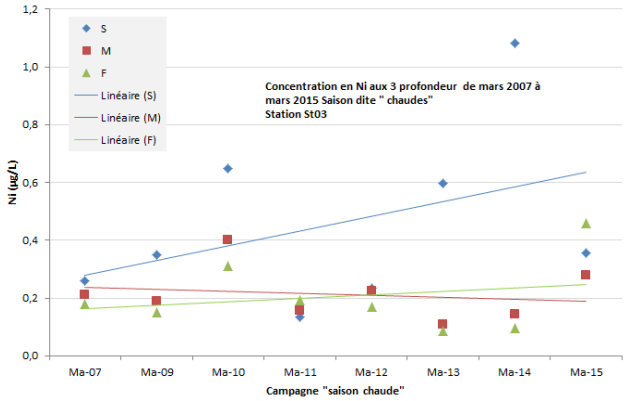
- pour une protection HS des échantillonneurs en mer ;
- afin d'uniformiser la méthodologie et de l'affranchir le plus possible des biais dus aux différentes pressions météorologiques,
- cependant il est impossible d'exclure tout épisode pluvieux (et si c'était le cas cela ne serait pas représentatif de la réalité locale)
- il est logistiquement impossible de toujours prélever les mêmes stations au même moment de la marée.
- Pour les suivis en continue par appareillages immergés plusieurs semaines, les fortes pluies sont enregistrées et influencent les séquences de relevés associées.

Les comparaisons temporelles des données de saison fraiche 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 toujours dans le but 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 (cyclone, dépression exceptionnelle entrainant des inondations…) les suivis réguliers ne sont pas effectués mais des missions d'évaluation ponctuelle dédiées à cet évènement sont enclenchées rapidement par la suite.

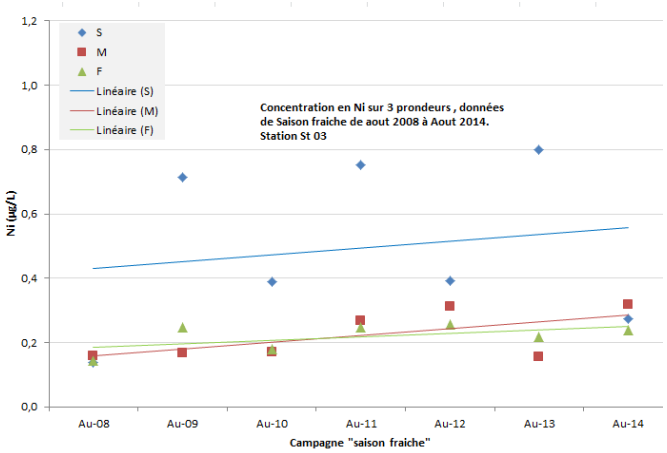
Figure 6 : Suivi de l'évolution temporelle de la concentration en Ni, sur la station St03, entre 2017 et 2015

Par saisons séparée pour garder une homogénéité des conditions météorologiques

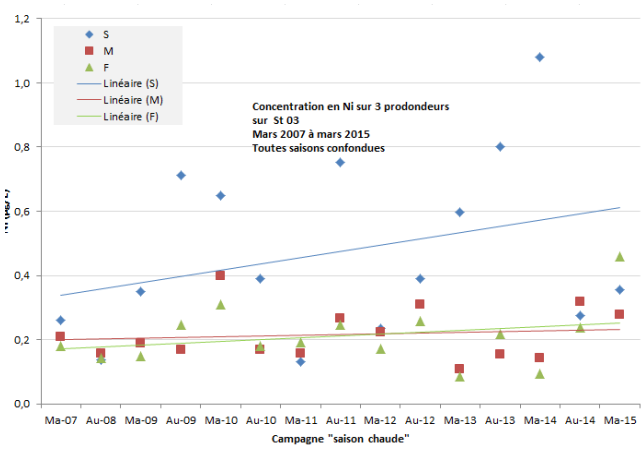
A)- Saisons CHAUDES : Prélèvements en mars de 2007 à 2015. Sur St 03. (Baie de Port Boisé) Suivi des concentrations en nickel aux 3 profondeurs : S=surface, M=Mi profondeur, F= au fond



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



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 sur 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 corréler les résultats de la qualité de l'eau de mer aux effets des ruissellements terrigènes

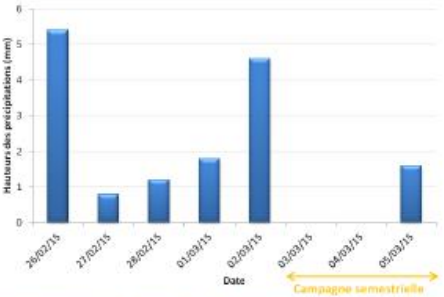


Figure 2 : Hauteurs des précipitations enregistrées 5 jours précédant (26/03/15 au 02/03/15) la campagne et pendant la campagne semestrielle (03/03/15 au 05/03/15).

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

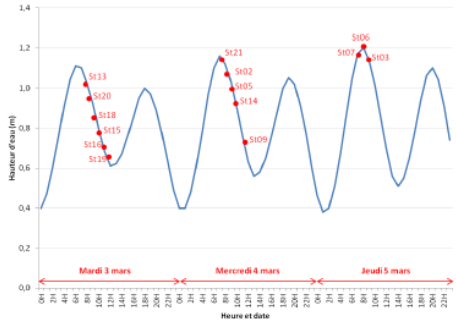


Figure 3 : Chronologie des évènements de la campagne semestrielle de mars 2015 reportée sur le marégramme du 03 au 05 mars 2015.

2. PARAMETRES BIOLOGIQUES INDICATEURS DE L'ETAT DES PEUPLEMENTS 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 validés dans la Convention pour la Conservation de la Biodiversité CCB) établie en 2009. (Cf. Tableaux suivants).
Ils font parties des suivis conventionnels; sauf au niveau de la station du port de Prony, de la baie Kwé et pour le suivi de l'herbier en baie Kwé qui sont, eux, réglementaires via l'arrêté AEM.2016.
Vale NC s'y conforme exactement depuis le début des suivis 2008, 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).

  Remarque : Il y a redondance entre les items suivis par LIT-Substrat et ceux du benthos, parce que le suivi LIT (tel qu'imposé) était dédié à des surveillances de vaste zones sur lesquelles toute autre type de suivi n'était pas effectué. Le LIT se suffit en lui-même. Avoir ajouté un paramètre : Benthos sans en définir le contenu a ajouté de la confusion, les scientifiques ont clarifié les méthodes dans leur rapport, faisant beaucoup plus que le minimum indiqué.

  Etoiles de mer prédatrices des coraux (Acanthaster), blanchissement corallien, algues, sont suivis façon quantifiée.

- **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 = aLb – (Kulbicki et al. 1993). La liste restreinte indique une centaine de taxons identifiés au niveau du genre ou de l'espèce.

  Remarque : Cette restriction rend impossible de suivre l'indicateur très pertinent : **biodiversité.** Afin de remédier à cela, les scientifiques qui effectuent les suivis depuis 2008 ajoutent un travail d'observation des poissons sur liste exhaustive et la biodiversité est donc suivie de façon quantifiée.

Tableau 6: Méthodologie pour le suivi des écosystèmes marins (d'après la Convention CCB 2008)

Paramètres et variables	**Substrat** (Habitats) par méthode LIT	28 classes de substrat
	Epi benthos : macro invertébrés	-
	Poissons : Espèces cibles	**Liste restreinte** de poissons cibles imposée
Prélèvements	Pas de prélèvement. Observations et photographies + vidéo associées	*Transects* ou couloirs d'observation sur 3 profondeurs et sans réplica à une même profondeur
Méthode	**Définie lors de l'atelier du 03 mars 2006 DRN (devenue la DENV) Noumea**	
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 *transect* 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 2008/2009

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 Ascidies, Anémones, Gorgones, Bénitiers	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**

Les 28 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 effectuer une du benthos en plus). Les experts recommandent une simplification du nombre de ces classes et de ne pas faire doublon avec le suivi benthos.

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 réplicas l'un de l'autre. Il ne peut pas être effectué de moyenne des résultats des LIT (substrat) des 3 *transects* d'une station.

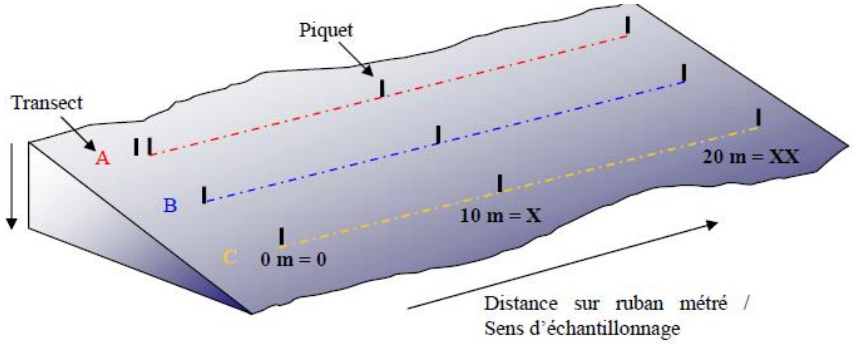
Il n'y a aucune variable aléatoire par station, le suivi temporel effectué par comparaison d'une station à chaque suivi, *transect* par *transect*, est la variable aléatoire. La différence annuelle est la variable aléatoire. (*Vale NC a évoqué ce sujet depuis 2007)*

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 Cliones.

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 de 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 28 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 supplémentaire).

Ce doublon gagnerait à être optimisé et le nombre de classe réduit.

- ***L'ichtyo faune***

Le plan de suivi (CCB- 2008) imposé par les autorités compétentes, impose de de limiter à 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 analyses 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 un travail volontariste supplémentaire, elles s'ajoutent aux exigences minimale du plan de suivi (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 ichtyologique

Famille	Genre	espèce
Requins		spp
Raies		spp
Scorpaenidae	Rascasses "poules"	spp
Serranidae	*Anthias* et *Pseudanthias*	spp
	Cromileptes	*altivelis*
	Epinephelus	*cyanopodus*
	Autres loches	spp
	Plectropomus	spp
Pseudchromidae	*Pictichromis*	*coralensis*
Carangidae		spp
Lutjanidae	*Aphareus*	*furca*
	Aprion	*virescens*
	Lutjanus	*adetii*
	Lutjanus	*sebae*
	Lutjanus	spp
	Symphorus	*nematophorus*
Caesionidae		spp
Haemulidae	*Diagramma*	*pictum*
	Plectorhinchus	spp
Lethrinidae	*Lethrinus*	*nebulosus*
	Autres bossus et bec	spp
Nemipteridae	*Scolopsis*	*bilineatus*
Mullidae		spp
Kyphosidae		spp
Ephippidae	*Platax*	spp
Chaetodontidae	*Chaetodon*	*auriga*
	Chaetodon	*baronessa*
	Chaetodon	*bennetti*
	Chaetodon	*citrinellus*
	Chaetodon	*ephippium*
	Chaetodon	*flavirostris*
	Chaetodon	*kleinii*
	Chaetodon	*lineolatus*
	Chaetodon	*lunula*
	Chaetodon	*melannotus*
	Chaetodon	*mertensii*
	Chaetodon	*ornatissimus*
	Chaetodon	*pelewensis*
	Chaetodon	*plebeius*
	Chaetodon	*rafflesi*
	Chaetodon	*reticulatus*
	Chaetodon	*speculum*
	Chaetodon	*semeion*

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

	Hemigymnus	*melapterus*
	Labroides	*dimidiatus*
	Novaculichthys	*taeniourus*
	Stethojulis	*bandanensis*
	Stethojulis	*strigiventer*
	Thalassoma	*amblycephalum*
	Thalassoma	*hardwicke*
	Thalassoma	*lunare*
	Thalassoma	*lutescens*
Scaridae	*Bolbometopon*	*muricatum*
	Scarus	*ghobban*
	Chlorurus	*microrhinos*
	Scaridae	spp
Blennidae	*Ecsenius*	*bicolor*
	Meicanthus	*atrodorsalis*
Gobbidae	*Amblygobius*	*phalaena*
Ptereleotridae	*Ptereleotris*	*evides*
	Ptereleotris	*microlepis*
Acanthuridae	*Acanthurus*	*dussumieri*
	Acanthurus	*blochii*
	Acanthurus	*triostegus*
	Acanthurus	spp
	Ctenochaetus	spp
	Naso	*unicornis*
	Naso	spp
	Zebrasoma	spp
Siganidae	*Siganus*	*argenteus*
	Siganus	spp
Zanclidae	*Zanclus*	*cornutus*
Scombridae	*Scomberomorus*	*commerson*
Balistidae	*Balistoides*	*conspicillum*
	Oxymonacanthus	*longirostris*
	Rhinecanthus	*aculeatus*
	Rhinecanthus	*rectangulus*
Tetraodontidae	*Canthigaster*	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'étale de marée en période de mortes eaux. La courte période de l'étale 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 seraient pas acceptables 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'étale 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'étale 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 participés eux-mêmes aux plongées évaluatrices. Plongeurs-observateurs 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 évènements 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 ß de ne pas déceler 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) 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 altèreraient 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 :

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

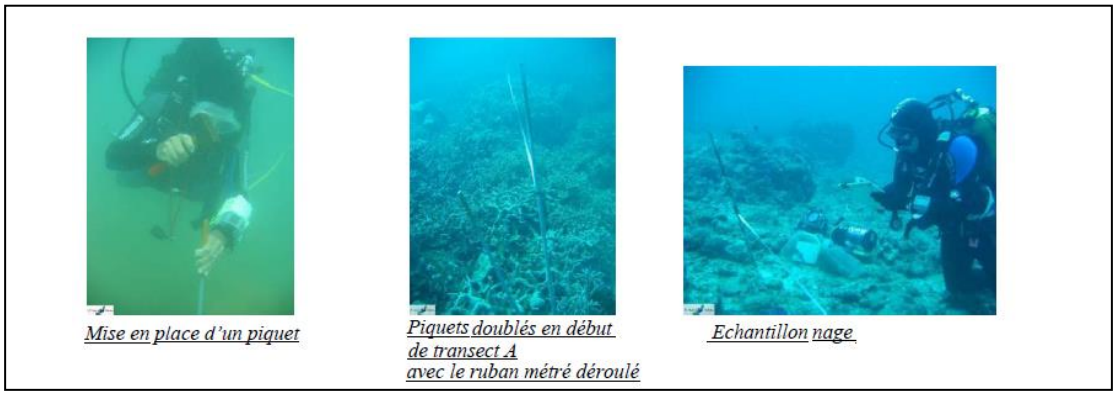
Pour la résistance à l'oxydation et faciliter leur perception visuelle sous l'eau, les piquets employés sont en acier galvanisé avec :

- 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. Le retour d'expériences et 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

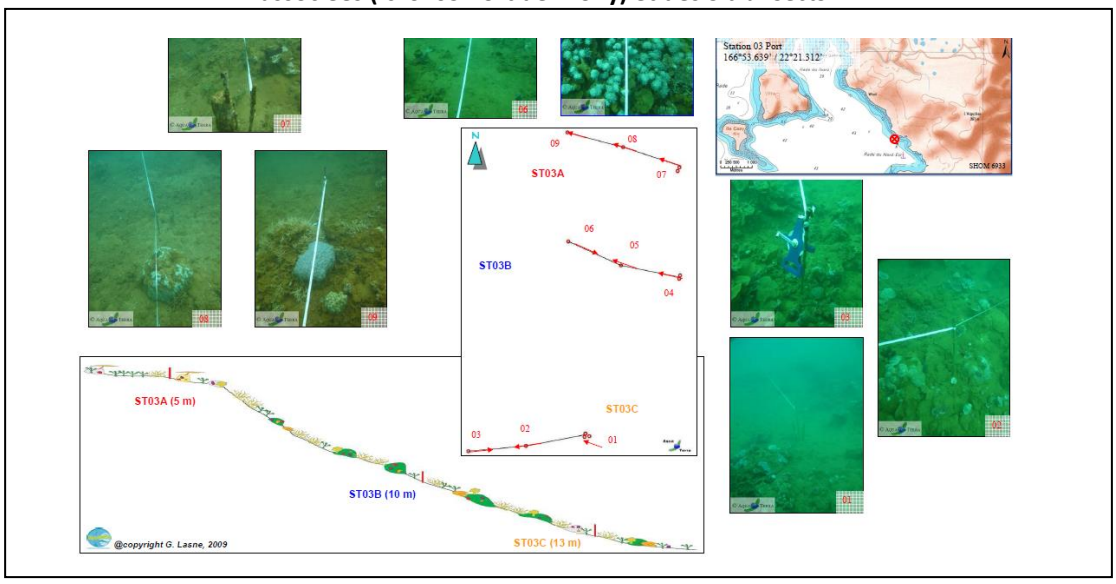


Mise en place d'un piquet

Piquets doublés en début de transect A avec le ruban métré déroulé

Echantillon nage

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 donné 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

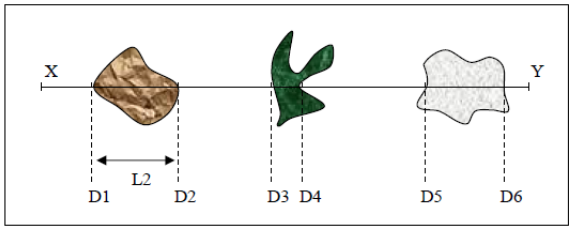


Tableau 9 : Exemple de calcul pour le recouvrement du substrat

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 x 100

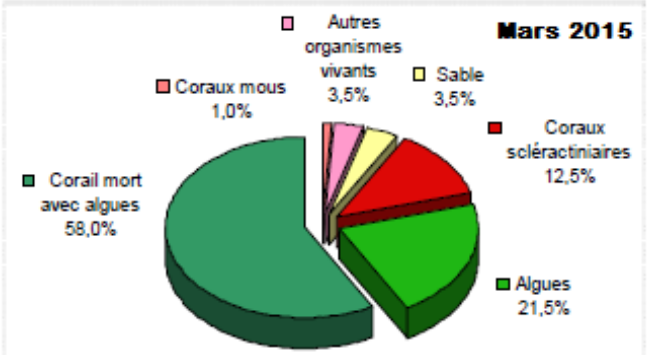
Figure 13 : Illustration photographique d'un suivi évaluatif du Substrat méthode LIT

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



Représentation du recouvrement (en %) du substrat pour ST07B

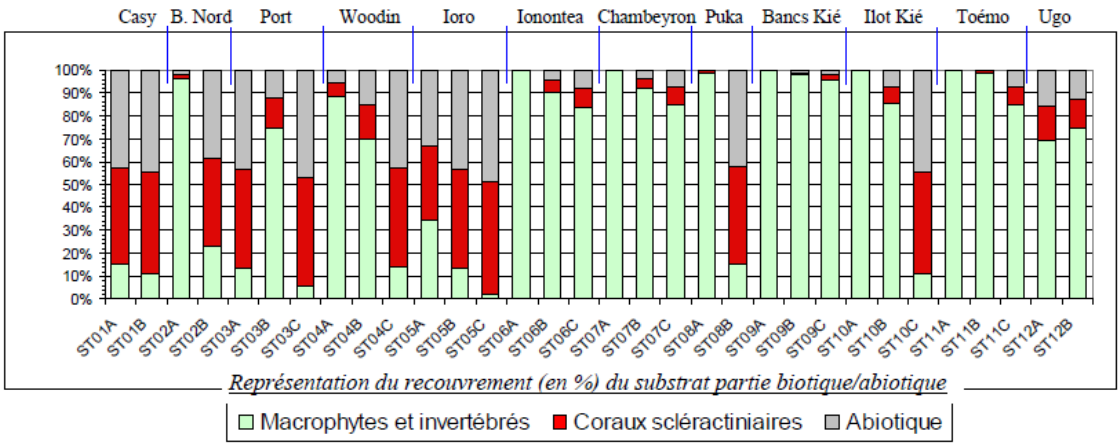
Les comparaisons spatiales et temporaires insistent sur les rapports :

- Abiotique total/ Biotique total
- Corail vivant /Corail mort
- Corail vivant/ Algues et autres Invertébrés
- 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, exemple : mission de mars 2015.

- **La partie biotique**, 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 (notamment les Acantasther), 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 BIOCENOSE), 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 (Scléractinaires, 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 m²)
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 m²)
1	Rare	< 0.5% (soit < 0.5 m² / 100 m²)
2	Faible	> 0.5% (soit > 0.5 m² / 100 m²)
3	Moyen	> 5% (soit > 5 m² / 100 m²)
4	Fort	> 10% (soit > 10 m² / 100 m²)
5	Important	> 15% (soit > 15 m² / 100 m²)

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 :

- **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. En 2018 VNC a lancé une alerte à leur sujet en baie du Prony (hors zone d'influence VNC)

- **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 traité, cependant les fortes variations saisonnières naturelles des couvertures algales méritent attention.
    - En 2014 ce risque a été identifié comme « potentiel et à surveiller » 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 intense d'algues dans le domaine Deva (hôtel et golf, cote Est NC, hors zone d'influence VNC) montre que le suivi des algues ne doit pas être négligé.
- **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 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, cet effort volontariste dépend du spécialiste des coraux.

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

- La surveillance d'éventuelles espèces exogènes (ou exotiques - 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.

▲POISSONS

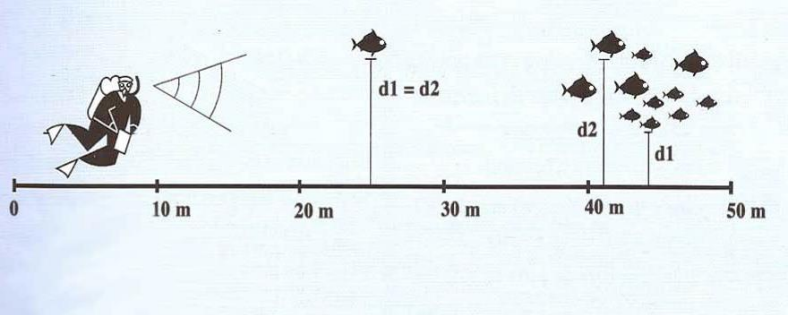
Le biologiste responsable de l'échantillonnage des poissons doit avoir une compétence reconnue en matière d'ichtyologie en lagons tropicaux. La nomenclature et l'orthographe des espèces, des genres et des familles sont celles de Randall J.E.2005.

Les poissons sont échantillonnés par comptage visuel par un plongeur qui progresse le long du ruban et qui les compte de part et d'autre du ruban. (Cf. Le schéma ci-dessous). Sont notés pour chaque espèce le nombre d'individus, 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 = aLb – (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 par *transects* / s'ils font partie de la liste restreinte),
- la densité (en poisson/m², *transects* / s'ils font partie de la liste restreinte),
- la biomasse (en g/m², *transects* /liste restreinte),
- la biodiversité « 1 » (espèces observées sur les *transects* et de la liste restreinte),
  + A titre volontaire, le biologiste suit aussi la biodiversité réelle et établit aussi la liste exhaustive des poissons observés.

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

- Densité (poissons/m²) = $\mathbf{D = (2L)^{-1} \sum_{i=1}^{p} n_i \, d_i^{-1}}$

- Biomasse (g/m²) = $\mathbf{W = (2L)^{-1} \sum_{i=1}^{p} w_i \, d_i^{-1}}$

L : longueur du transect (20 m)
ni : nombre d'individus de l'espèce i
wi : poids de l'espèce i (g) (de l'espèce i : donc de tous les individus i de cette espèce)
di : 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 : $wi = a li^{b}$ *li = 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. Cybium 2005, 29 (3): 235-252

La biomasse, la densité et la biodiversité) sont analysées par
-Comparaison spatiale de chaque station, entre elles, pour la mission donnée
-Variations temporelles par *transect*, et par station.

Ne pas changer d'évaluateur durant de nombreuses missions permet d'éviter des biais. Tout changement des plongeurs scientifiques, notamment pour l'évaluation des poissons, lors d'une mission doit être notifié.

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'engravement 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 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) ;
- 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** : Missions de suivi triennale (tous les 3 ans) et détourage surfacique tous les 10 ans.

► **4 stations** à l'Est et à l'Ouest du chenal d'entrée en baie Kwé

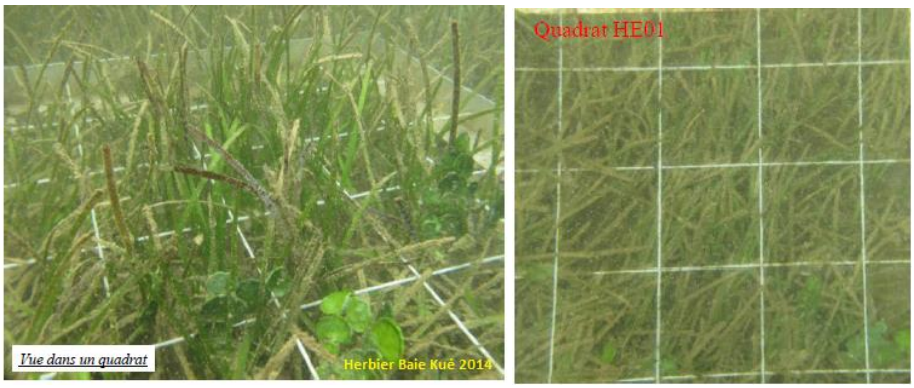
► **Indicateurs suivis :**

Δ- Paramètres quantitatifs (sur chacune des 4 stations) :

- **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 basées 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 quadras installés puis retirés par les plongeurs biologistes

Figure 17 : Quadras de suivi d'un herbier



- Quadra : 50 cm X 50 cm (un format plus grand serait mal manipulable en plongée) soit ¼ m^2
- 25 Carrés dans 1 quadra : 25 carrés de 10 cm de côté (10 cm x 10 cm soit 1/100 m^2)
Comptages (en réplicas) 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 x 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 (MES) 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 m², 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 par campagne.**

La photographie suivante présente cet appareillage immergé durant au moins 48 jours et fixé par un corps mort. L'appareillage ne doit pas toucher le fond et son arrimage doit être solide, souvent vérifié par un plongeur.

Figure 18 : Immersion de l'appareillage pour un suivi des flux intégrateur séquentiel de MES

Attention : Les tubes à sédiments sont bien moins performants que ce dispositif automatisé 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, ils permettent de séquencer les informations et de mieux les corréler à la pluviométrie ou d'autres évènements.

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. 12 godets –collecteurs ont été actifs durant 4 jours chacun.

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 déclanchement 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.

- **Le poids des appareillages exige un bateau assez robuste** pour pouvoir supporter l'installation d'un bras de charge et le bateau doit pouvoir tenir une position statique, notamment dans le courant du canal de la Havannah.

- **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. (60 m, axe NE/SW)

- **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 MES en circulation (ici présenté) et le taux de sédimentation, (suivi par carottage). Le dépôt sédimentaire peut être différent des flux en circulation en fonction de l'hydrodynamisme.

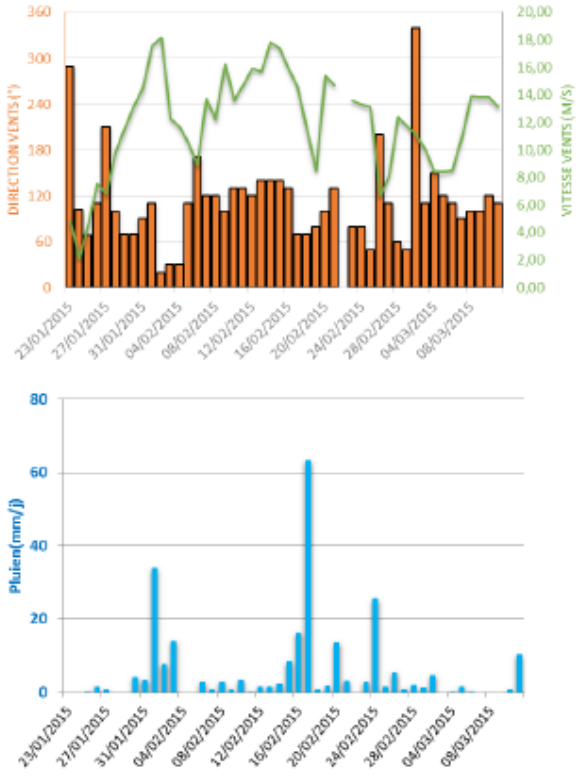
►Les échantillons de MES (matière en suspension) collectés dans les godets des pièges séquentiels, sont conservés au frais (4°C) jusqu'à la phase de traitement. Ils sont traités au laboratoire et conditionnés dans des sachets à usage unique puis analysés.

- 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 Ioro, ils sont absolument nécessaires pour analyser les flux de MES. (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 19 : 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.

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

La corrélation avec les vents doit être prise en compte, tout autant que la pluviométrie

►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-Calédonies, si son appareillage est en hors-service il faut exporter les enchantions en Australie ou Nouvelle Zélande), à la charge du prestataire.

- **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.

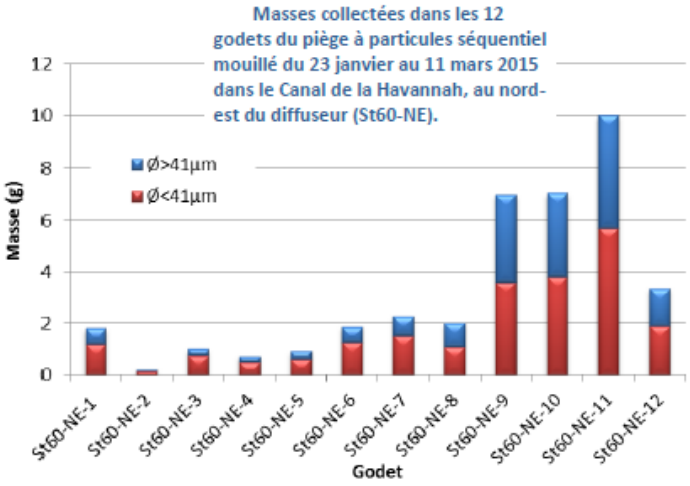
- **Dosage des HCT :** L'analyse des hydrocarbures totaux est effectuée sur le sédiment brut par la norme NF EN ISO 9377-2.

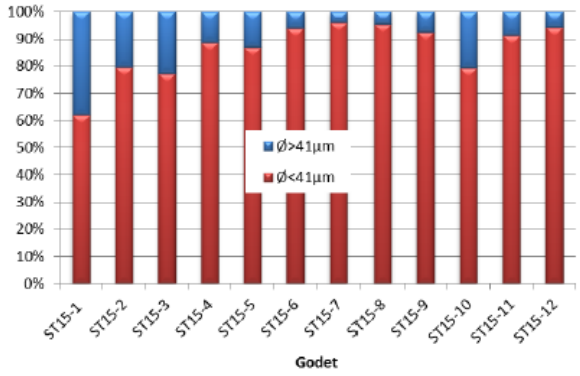
►Les résultats

- **Masse et granulométrie de MES**

Par station et par godet (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 déments plus grossiers, (tout en restant dans le domaine des matières en suspension de passage).

Figure 20 : Exemple de présentation des résultats : masses collectées par godets (périodes de 4 jours) et fractions des déments fins et plus grossiers

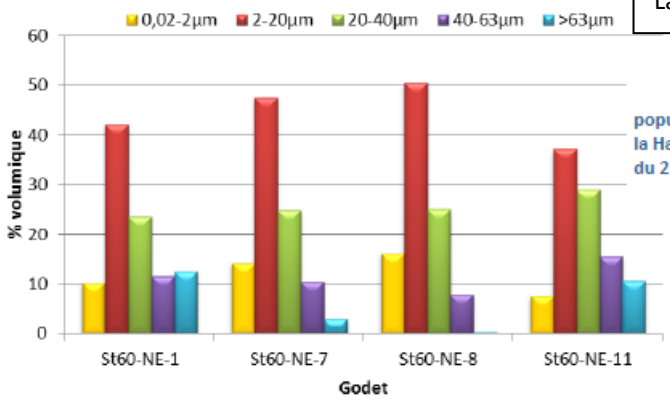




Pourcentage des fractions fines et des fractions grossières dans les 12 godets du piège à particules séquentiel mouillé du 23 janvier au 11 mars 2015 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE).

5 classes : Argiles fines < 2 µm ; 2 classes pélitiques (< 41 µm) : silts fins de 2 à 20 µm et silts plus grossiers de 20 à 40 µm ; la fraction de 41 à 63 µm ; puis < 63 µm.

La limite de rétention est de 0, 022 µm



Distribution granulométrique des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah (St60-NE) par le piège séquentiel du 23 janvier au 11mars 2015.

- **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, dans les MES) 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 dire 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 importante.
    - Ce ratio Ca/ Fe n'a de sens qu'au niveau des MES en circulation et des sédiments, mais pas au niveau du fer dissous (Cf. Qualité de l'eau). Le fer dissous n'est pas un indicateur terrigène conservateur car il fait partie des chaines trophiques, il ne suit pas le gradient [cote/large] ni le gradient [eau de surface/eau du fond] que les autres métaux dissous- indicateurs terrigènes respectent (Ni, Co, Mn, Cr).

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/m^2/jour)
  - Flux en éléments métalliques (en milligrammes/m^2/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/m^2/jour est courant, hors phénomène pluvieux exceptionnel et hors impact, pour un taux d'accumulation qui sera de 1,80 g/cm^2/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, bassins de sédimentation ou du relargage de lentilles de sédimentations en amont, dans le lit d'un creek. (Cas de la baie Kwé).

- **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 baie Kwé, en dehors d'un apport terrigène.

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

Figure 21 : 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.

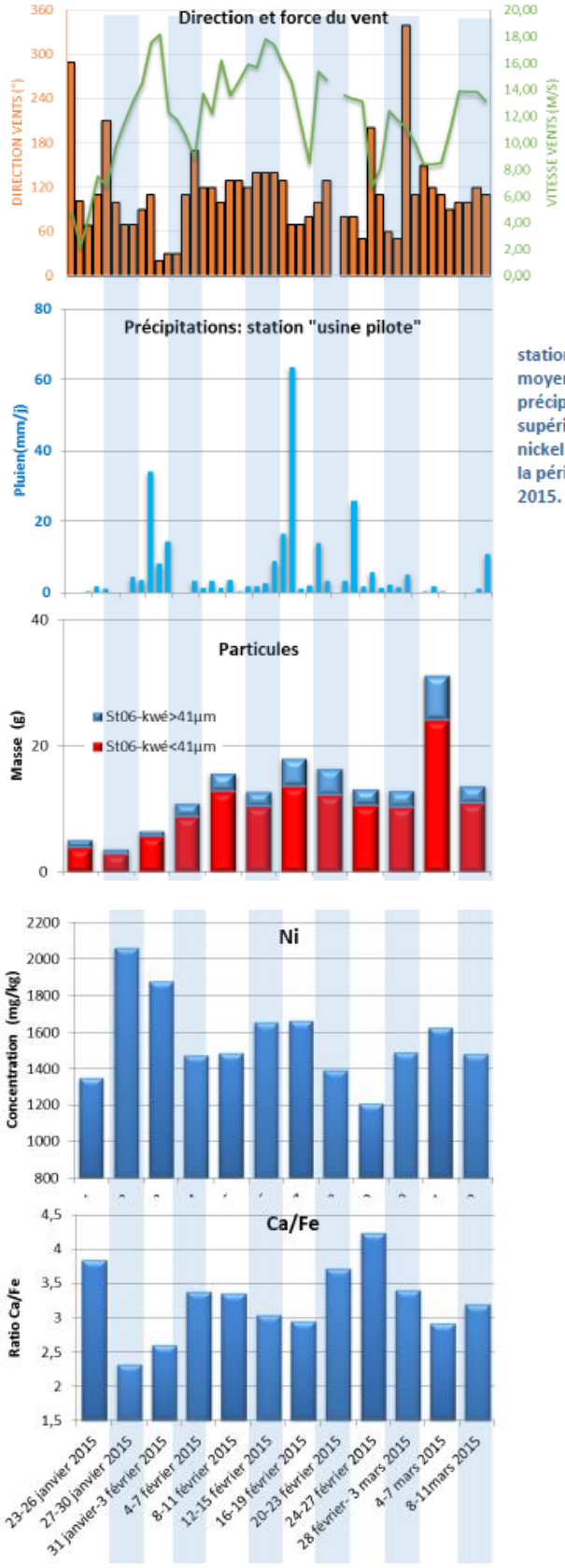


Diagramme combiné pour la station St06-KW1 : direction et vitesse moyenne des vents, taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 41 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe pour la période du 23 janvier au 11 mars 2015.

5. QUALITE DES SEDIMENTS

La collecte des sédiments de surface est effectuée par benne Van-Venne (Cf. photographie suivante) en acier inoxydable de nuance 316L.
Le navire utilisé pour ce type de suivi doit être à assez grand pour permettre le déploiement d'un bras de charge et aussi capable de rester en position statique.
14 stations sont échantillonnées, cependant sur des fonds du canal de la Havannah, endurés sans dépôts de sédiments meubles en raison de la forte courantologie, il peut être impossible de récolter des sédiments de surface.
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.

Figure 22 : Récolte marine des sédiments de surface

Une séparation granulométrique des sédiments est effectuée par voie humide (Eau Milli-Q 18.6 µS.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 granulométriques
La caractérisation des sédiments est conduite par analyse granulométrique aux seuils de coupures standards pour séparer, le cas échéant, les sables moyens et grossiers (Ø > 500 µm), les sables fins (500 < Ø < 250 µm), les silts grossiers (250 < Ø < 125 µm), les silts moyen (125 < Ø < 63 µm) et les silts fins plus les argiles (Ø < 63 µm).
L'étude de la distribution des populations de particules composant **la fraction fine** (silts plus argiles inférieurs à 40µm) 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**.

Les analyses reprennent l'évolution temporelle au fil des missions. (Cf. figure ci-dessous)

Figure 23 : Compilation des pourcentages de fraction fine (Ø < 41 µm) obtenus (moyennes et écart-types) lors des différentes campagnes du suivi de sédiments de surface.

Zone	Station	% Ø < 41 µm				
		2006	2009	2012	2015	2018
Baie du Prony	St15	72,3	98,0	83,4	82,3	89,3
	St16	56,2	97,8	78,5	80,2	96,3
	St18	9,0	ND	2,6	0,3	7,8
	St19	SI	79,3	50,1	76,0	78,6
Canal de la Havannah	St02	1,2	9,8	0,2	0,7	15,4
	St03	0,6	70,6	34,6	59,7	54,6
	St05	5,7	ND	ND	ND	ND
	St06	48,6	39,0	16,9	52,5	37,7
	St07	26,5	65,3	38,0	26,8	57,6
	St09	2,7	13,6	ND	0,1	ND
	St14	0,1	27,0	23,0	24,5	22,6
	St21	SI	SI	5,9	19,7	4,5
Ile Ouen	St13	47,9	58,1	36,3	41,7	49,5
	St20	SI	41,3	30,5	43,0	46,5

ND = valeur non déterminé ; SI = Station inexistante

►Analyse des compositions minéralogiques

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 est confiée à l'Université d'Auckland (School of Environment), Nouvelle-Zélande.

Sont identifiées : % Calcite% Calcite Mg% Aragonite% Halite% Goethite% + Autres

- L'influence terrigène naturelle est signée principalement par la goethite ainsi que par de la serpentine et des kandites.
- L'influence marine et signée par la calcite et l'aragonite.

Figure 24 : Composition minéralogique principale de la fraction fine (Ø < 41 µm) des sédiments de surface et comparaison des stations à l'égard des % des signatures marines et terrigènes

Zone	Station	% Calcite	% Calcite Mg	% Aragonite	% Halite	% Goethite	% Autres*
Baie du Prony	St15	5	7	2	0	54	32
	St16	24	26	8	1	23	19
	St18	22	52	12	7	4	3
	St19	25	35	12	0	21	6
Canal de la Havannah	St02	17	54	25	4	1	0
	St03	20	49	17	2	8	4
	St05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	St06	15	39	15	0	25	5
	St07	26	46	17	3	2	5
	St09	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	St14	16	50	23	2	4	5
	St21	23	49	18	9	1	0
Ile Ouen	St13	28	49	20	0	1	2
	St20	21	24	10	1	22	23

Gradient

* : minéraux argileux, groupe des Kandites, Serpentine, Chlorite, Muscovite, Talc, alpha Quartz, Alpha quartz, groupe des Amphibole calcique et sodique, group des Plagioclase calcique et sodique, Feldspath et/ou Rutile et Gibbsite ; ND : valeur non déterminée.

Ces analyses spatiales de la composition minéralogique des sédiments de surface confirment le zonage des hydro-régions du lagon.

► Analyse des compositions chimiques et dosage des métaux liés aux fractions géochimiques
Pour ce suivi triennal très poussé, 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.

Pour chaque échantillon, dans leurs 4 phases géochimiques, sont analysées les concentrations en métaux Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn ainsi que le Ca. (Extraction 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).

4 phases distinctes :

1- ***Formes oxydables*** : Cette fraction représente les métaux liés à la matière organique du sédiment. Leur extraction est conduite par un oxydant fort (H_2O_2) en milieu acide

2- ***2-Formes acido-solubles*** : C'est une fraction facilement *solubilisable* par l'utilisation d'un acide faible tamponné (CH_3COOH/CH_3COONH_4) en solution qui attaque en particulier la matrice carbonatée du sédiment. Elle contient également des éléments très faiblement liés aux autres phases géochimiques ;

3-*Formes réductibles* : Elles sont associées aux oxy-hydroxydes de fer et manganèse principalement. Leur extraction s'opère avec un agent réducteur puissant (NH_2OH, HCl) en milieu faiblement acide ;

4-*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. 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 verre, PEHD ou en Teflon.
Après une mise en solution, les huit éléments suivants sont analysés par ICP-OES : Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni et Zn.
Après conversion des données, les limites de quantification (LQ en mg/kg de matière sèche) des métauxet du calcium sont les suivantes :

Tableau 14 : limites de quantification (LQ en mg/kg MS) des Métaux et du calcium dans les sédiments

Elément	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Phase 1, 2 et 3 (mg/kg ps)	13	0,125	0,250	0,125	0,500	0,125	0,250	1,25
Phase 4 (mg/kg ps)	-	[illegible]		4	-	-	41	103

Traitement statistique :

L'usage des LQ permet de s'assurer du niveau de sensibilité des analyses mais a pour conséquence d'éliminer des données lors des traitements statistiques lorsque les métaux sont en très faibles concentrations. Avec des jeux de données peu denses, les concentrations moyennes sont alors artificiellement majorées. Afin de se rapprocher de la réalité, **les valeurs en dessous de la LQ sont majorées au seuil de limites respectives pour chaque élément.**

Pourquoi quadrupler le nombre de données en distinguant 4 phases ?

- Les métaux associés aux deux premières phases géochimiques (oxydable et acido-soluble) fournissent une évaluation des fractions les plus facilement disponibles pour les organismes vivants.
- Les deux dernières phases (réductible et résiduelle) représentent des fractions dans lesquelles les métaux sont moins ou très peu disponibles.

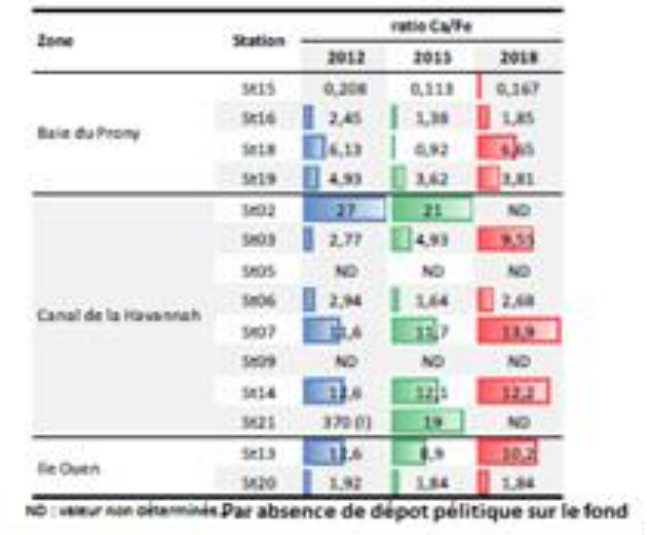
Tableau 15: Méthodologie globale pour le suivi des sédiments de surface

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*

L'évolution temporelle des ratios Ca/Fe calculés dans les fractions pélitiques (des sédiments de surface) est aussi un indicateur pertinent suivi par Vale NC. (Cf. Exemple ci-dessous).

Figure 25 : Evolution des ratios Ca/Fe mesurés dans les fractions pélitiques lors des différentes campagnes du suivi géochimique des sédiments de surface.



Le travail du laboratoire externalisé qui analyse les résultats doit présenter :

- une comparaison spatiale des 14 stations à l' égard de la composition chimique de leurs sédiments de surface et de leurs concentrations en Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn et Ca.
- une comparaison temporelle, (évolution), pour chacune des 4 fractions différenciées, mission après mission de suivi. L'attention la plus poussée doit concerner les fractions qui sont bio-disponibles, soit les deux premières formes. (Cf. Exemple ci-dessous).

Figure 26 : Evolution des concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni associées aux différentes fractions géochimiques (oxydable, acido-soluble, réductible, résiduelle, totale et labile) mesurées dans les fractions pélitiques de la station sentinelle St18 lors des différentes campagnes du suivi des sédiments de surface.

St18*							
Elements	Campagne	Fraction (mg/kg ps)					
		Oxydable	Acido-soluble	Réductible	Résiduelle	Totale	Disponible
Co	2006	4,62	0,250	0,471	27,9	33,19	4,87
	2009	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2012	0,831	5,60	4,66	37,4	48,53	6,43
	2015	4,30	3,46	17,4	129	154	7,76
	2018	1,20	1,60	5,20	18,0	26,00	2,80
Cr	2006	11,5	3,02	8,96	1639	1662	14,5
	2009	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2012	26,3	11,1	5,04	1542	1584	37,4
	2015	49,3	5,41	38,7	6069	6162	54,7
	2018	18,0	3,00	6,00	642	669	21,0
Fe	2006	19,8	19,48	754	42816	43609	39,3
	2009	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2012	2,50	29,5	317	43936	44285	32,0
	2015	2,50	8,65	2861	219257	222129	11,2
	2018	2,50	4,00	432	28860	29299	6,50
Mn	2006	68,4	101	24,6	132	325	169
	2009	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2012	1,11	246	24,00	179	449	247
	2015	42,5	218	1064	795	2120	261
	2018	3,00	118	52,0	86,0	259	121
Ni	2006	18,9	2,47	16,4	532	569	21,4
	2009	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2012	0,500	10,8	8,86	715	735	11,3
	2015	2,62	9,31	44,3	3720	3776	11,9
	2018	0,800	3,20	8,70	253	266	4,00

* pour faciliter la lecture des tendances, les concentrations non quantifiables (surlignées en rouge) sont majorées à la limite de la quantification ; ND : valeur non déterminée.

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.

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

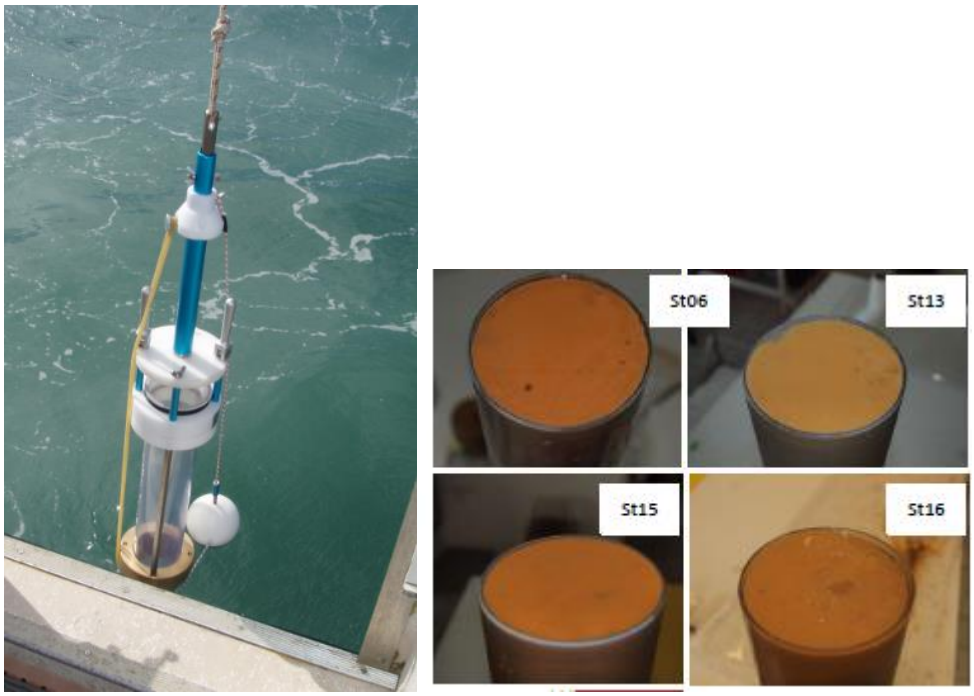
►Les prélèvements des carottes

C'est une opération délicate qui exige un personnel qualifié et qui ne doit pas être sous traitée en dehors d'un laboratoire océanographique compétent.

Les prélèvements 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. (Cf photographies). Des tubes en plexiglass sont utilisés afin de conserver l'intégrité géochimique des sédiments et de bien pénétrer dans le substrat lors de leur descente. Par ailleurs, ce type de carottier présente l'avantage d'assurer une très bonne conservation de l'interface « eau-sédiments ».
La carotte (visible grâce au plexiglas transparent) dans le carottier ne doit pas être « abimée » et après libération elle ne doit pas être secouée ni inclinée, plusieurs essais sont souvent nécessaires.

Le bateau qui permet ces missions océanographiques doit être de taille suffisante pour installer une potence qui permet de travailler à la verticale de la mer, même si elle est agitée (comme dans le canal de la Havannah), ce bateau doit pouvoir impérativement pouvoir se maintenir en position statique.

Figure 27 : Carottier et carottes de sédiments marins



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 plus longue, 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 aussi conduites.

Tableau 16 : 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	Spectométrie 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 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 est conduite par extraction séquentielle (Tessier et al. 1979 ; Quevauvillier et al. 1997), l'analyse ayant été effectuée par spectrométrie d'émission (ICP-OES) ; comme lors du suivi des sédiments de surface.
- **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 CO_2. 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) :** La minéralogie est déterminée par diffraction de rayons X (DRX) avec un appareillage INEL équipé d'une anticathode Cu. Une fois les différents minéraux identifiés (carbonates, sulfures, oxydes….), leurs proportions relatives sont évaluées en utilisant une procédure de type affinement Rietveld. Les diffractions semi-quantitatives seront effectuées à l'UNC (Nouméa).

- **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 4 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 (H_2O_2, 110 vol) en milieu acide ;

    - Formes acido-solubles : C'est une fraction facilement solubilisable par l'utilisation d'un acide faible tamponné en solution (CH_3COOH/CH_3COONH_4) 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 (NH_2OH, 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 (au port de Prony) :**
  - **Dosage du soufre lixiviable** : L'extraction du souffre 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 conduit 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 (T½ = 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):

$$t_{CIC} = \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{^{210}Pb^{0}}{^{210}Pb}\right)_{A}$$

$$t_{CRS} = \frac{1}{\lambda}.\ln\left(\frac{A_{(\infty)}}{A_{(\infty)} - A_{(t)}}\right)$$

λ = 3,11.10^{-2} an^{-1} ;

$(^{210}Pb^{0})_{A}$ = la radioactivité dans le niveau de surface (h = 0) ;

$(^{210}Pb)_{A}$ = la radioactivité à la profondeur h ;

$A(\infty)$ = le flux total de Pb-210 ;

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

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

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

►Résultats et analyses

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 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, sans cascade de sous-traitants.

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**.**

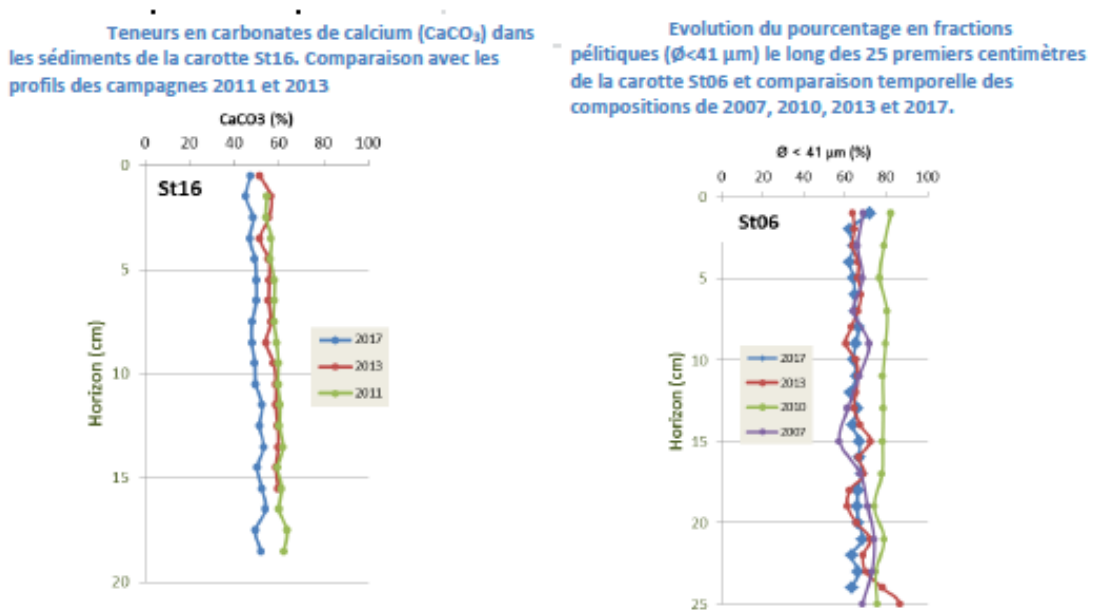
Tableau 17 : Composition minéralogique des sédiments pour les horizons (0-1 cm), (1-2 cm), (17-18 cm) et (33-34 cm) de la carotte St06 de la baie Kwé

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)

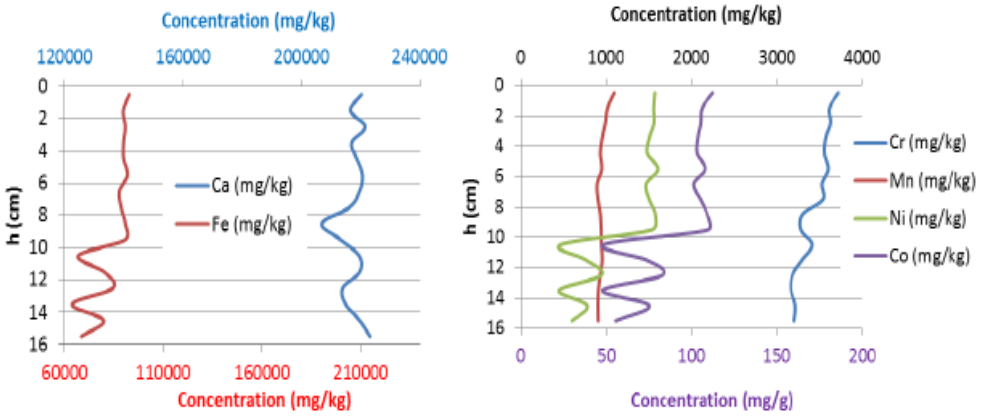
Les résultats sont présentés sous forme de profils verticaux qui vont du plus ancien dépôt (horizon profond) vers le plus récent dépôt (en surface). L'hétérogénéité du plancher sous-marin fait que au fil des missions les profils ne se superposent pas exactement mais ils gardent bien la même homogénéité (ou tendance évolutive s'ils sont inclinés). Cf. Exemples suivants:

Figure 28 : Profil d'un paramètre analysé dans une carotte sédimentaire



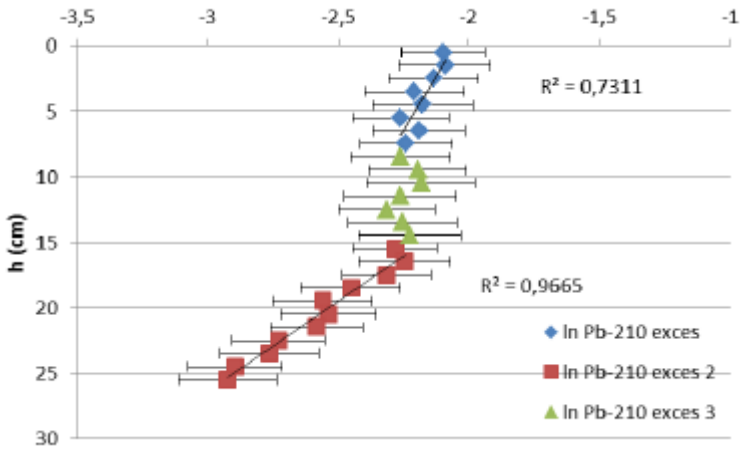
La présentation suivante montre les concentrations métaux dans les sédiments en fonction de la profondeur de ceux-ci, ce type de suivi affiche la tendance évolutive par la pente d'un profil vertical.

Figure 29 : 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



Le taux d'accumulation de sédiments en fonction des différents horizons (anciens ou récents) est calculé (par le laboratoire compétent) à partir de la pente semi-logarithmique des mesures du « 210Pb ». Si la pente est régulière, le taux de sédimentation est stable au fil des ans, à chaque rupture de pente, une variation du taux d'accumulation a eu lieu. Quand le 210Pb ne diminue pas avec la profondeur (verticalité de la courbe), cela signifie un épisode chaotique d'un point de vue sédimentaire, concentré en peu de temps. Exemple ci-dessous.

Figure 30 : Profil vertical de la radioactivité du « 210Pb en excès » dans les sédiments de la carotte St06.



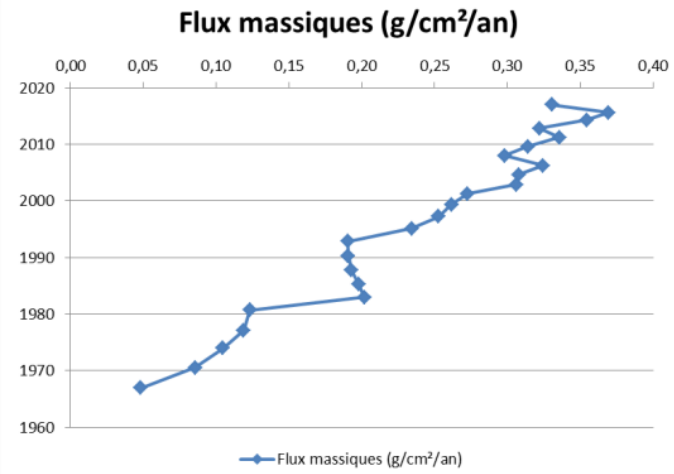
Le premier épisode est constitué par les horizons de 0 à 8 cm, il présente un taux de décroissance radioactive rapide et équivaut à un taux d'accumulation calculé d'environ 1,23 g/cm²/an (R^2=0,780).

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

Ces deux épisodes de sédimentation sont séparés par un horizon de 7 cm d'épaisseur dont la radioactivité est relativement constante ce qui signifie un apport sédimentaire chaotique plus 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). Exemple de calculs des flux massiques présentés en fonction de l'âge estimé pour chaque horizon d'une carotte sédimentaire, ci-dessous.

Figure 31 : Calculs des flux massiques



7. LES CAPTEURS DGT

Suivi intégrateur séquentiel

L'utilisation d'échantillonneurs passifs (Diffusive Gradient in Thin film ; DGT) en milieu marin permet, pour certains composés (métaux dans le cas des DGT), de les extraire et de les concentrer in situ en réduisant ainsi une partie des difficultés liées à l'analyse des contaminants à l'état de traces.

Le dispositif DGT est composé d'un support plastique de 4 cm de diamètre, sur lequel sont disposés successivement une phase pour laquelle les cations métalliques ont une très forte affinité (résine de type Chelex 100), un hydrogel de diffusion d'épaisseur connue et un filtre de protection (membrane) en polycarbonate **Les cations métalliques migrent à travers le gel de diffusion et se fixent de façon irréversible sur la résine**. La diffusion, contrôlée par les propriétés physiques du gel, ainsi que la température et la concentration en métal dans le milieu à échantillonner, déterminent la cinétique d'accumulation sur la résine.

Le bio-fouling ou biofilm sur la pastille limite son temps d'action, il provoque une surestimation des concentrations en premier lieu quand il commence à se développer (après environ 8 jours, à calibrer selon les hydro régions et la température) puis une sous-estimation. Une étude ADIIP du CRNT parue en 2013 est consacrée à la calibration des DGT dans le lagon calédonien.

En l'absence de développement de biofilm, la corrélation entre le temps d'immersion et la masse de métal accumulée par la résine est linéaire. En présence d'un biofilm, les résultats obtenus montrent que l'accumulation de Ni-63 augmente avec le degré de développement du biofilm sur les membranes des DGT. Il apparait qu'une limitation du temps d'exposition dans l'eau de mer peut être estimée entre 5 et 7 jours afin de réduire les effets du biofilm. L'appréciation du temps optimal d'immersion est liée à la connaissance générale du milieu à surveiller. La vitesse de rotation de l'automate THOE (qui expose puis occulte et protège les pastilles DGT successives) est réglée afin d'éviter ce dépôt de Biofilm sur les capteurs DGT.

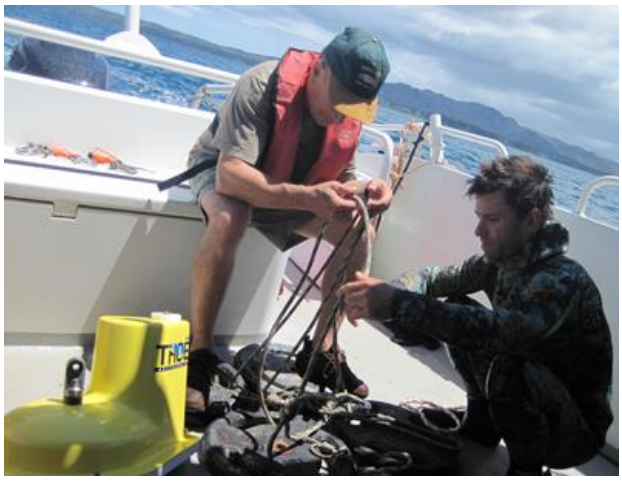
Figure 32 : DGT (Pastille Diffusive Gradient in Thin film) capteur des cations et automate passeur (THOE) des pastilles DGT à un fréquence choisie

Un passeur automatique des échantillonneurs passifs (THOË) permet d'effectuer in situ une série d'échantillonnage dans le temps en fonction d'une programmation prédéfinie. Les THOËs sont gréés sur une ligne instrumentée permettant leur mouillage à 3m au-dessus du fond, ou autre profondeur choisie, par exemple dans la couche de présence maximale du panache d'effluent. Ils sont immergés sur un point donné au GPS et leur bon positionnement a été vérifié par plongées précédentes. Au terme de la mission, la récupération des appareils est confiée à des plongeurs.
Le plateau tournant, pouvant accueillir 12 DGT™, permet d'exposer séquentiellement les échantillonneurs passifs au milieu environnant, au niveau de la fenêtre d'ouverture du THOË. Il ne doit y avoir aucune partie métallique pouvant interférer avec la capture des métaux du milieu au niveau de cet instrument, la visserie a été remplacée par du téflon.

Le simple contact avec l'eau permet l'accumulation des métaux divalents (ex. : Cd2+, Co2+, Fe2+, Mn2+, Ni2+, Zn2+…) grâce à un complexant*: l'iminodiacetate*. Cette technique permet de capter exactement la même fraction des métaux dissous que celle fixée par le traitement des échantillons d'eau percolés à travers une cartouche DIONEX (pré-concentration). De la même manière, l'élution de ces *iminodiacetates* permet ensuite **l'analyse des métaux par ICP**. (ICP-MS et ICP-OES- Cf. Chapitre 1.5.)

Afin de conforter la pertinence d'utiliser ce type de suivi environnemental, des prélèvements « instantanés » sont réalisés par échantillonnage classique à l'aide d'une bouteille GoFlo, au cours de la phase d'immersion et au cours de la phase de récupération. Les échantillons d'eau de mer ainsi obtenus ont été pré-concentrés sur des résines chélatantes en laboratoire de nature similaire à la Chelex-100 qui constitue la DGT™. Après élution de ces résines, les éluas sont analysés par ICP-OES afin de déterminer les concentrations en métaux dissous.

Figure 33 : Immersion de THOE pour le suivi de la qualité de l'eau de mer en profondeur dans le champ proche du diffuseur



8. ANALYSE DES INDICATEURS ET SYNTHESE

Les équipes externalisées qui effectuent les missions de suivis selon les méthodologies ci-dessus, doivent fournir **les données brutes et aussi un rapport d'analyses** de celles-ci, il est nécessaire qu'elles possèdent les compétences et maitrisent la logistique afin d'effectuer à la fois les missions de terrain et les analyses des résultats, dans le but d'éviter des biais qui pourraient être dus à dans une cascade de sous-traitants.

D'autre part :

- **La taille et la stabilité du bateau doivent être suffisantes** car les échantillonnages ne peuvent être effectués (en milieu agité de plus de 40 m de fond), qu'avec des moyens adéquats, à la fois sécuritaires et garantissant des prélèvements de qualité. Par exemple un dinghy pneumatique ne suffit pas, le bateau doit porter un bras de charges et tenir une position statique lors des suivis qualité de l'eau et des sédiments ou lors de l'immersion de lourds automates (Flux et THOE).
- **L'échantillonnage est d'autant plus rigoureux que les personnes sur le terrain sont impliquées dans l'analyse et la cohérence des données récoltées**. (Eviter la cascade de sous-traitants).
- **La fidélisation des observateurs** sur plusieurs missions est aussi recommandée afin d'éviter des biais ; notamment en biologie marine (LIT, identification et comptages des poissons, observation des habitats coralliens). Eviter la sous-traitance en cascade et le *turn over* des plongeurs.
- **Les LQ (limites de quantification) très basses sont essentielles** et le (ou les) laboratoires impliqués doivent **les respecter** ; leur certification à l'égard des analyses demandées est aussi nécessaire.

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 de chaque spécialiste dans leur domaine : celle des analyses comparatives et des évolutions. **(Stratégie de suivi BACI = Before / After & Control / Impact) :**

2.1. **Les synthèses 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. Une station témoin doit impérativement être située dans la même hydro région que la station de surveillance d'impact.

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.

Les conditions météorologiques (pluviométrie une semaine avant et durant le suivi, force et orientation du vent) doivent être corrélés aux résultats, le moment de la marée lors d'un échantillonnage ponctuel est aussi une donnée à prendre en compte.

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 ou deux données ponctuelles ; et/ou par une comparaison stricte avec une grille de lecture préétablie (il n'existe aucun seuil en milieu naturel marin et les hydro-régions marines sont nombreuses et très différentes entre elles. Le guide du suivi du lagon du CNRT-ZoNeco-2011-en révision en 2019/2020- est un outil très utile, cependant il ne donne pas des limites règlementaires).

2.3.1. Le guide CNRT- ZoNeCo (2011, en réactualisation 2019/2020) 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 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 en bruit de fond naturel, cela ne permet pas de conclure que cette réserve est globalement en mauvaise santé).

La méthode *ONE OUT-ALL OUT* est facile d'emploi lors des synthèses mais non recommandée. Avec cette méthode : l'accroissement du nombre de paramètres surveillés augmente de façon importante la probabilité d'avoir au moins un paramètre déviant ; par contre les zones du lagon observées avec moins d'intensité et peu de paramètres seraient rapidement jugées en excellente santé globale. L'amalgame serait biaisé selon les deux biais les plus fréquents lors des diagnostics :

- Biais α : alertes prématurées ou trop fréquentes
- Biais β : alerte manquée.

3. L'ensemble des indicateurs physiques, chimiques, biologiques, ponctuels et intégrateurs, doivent être conjointement analysés

Dans cet objectif, une communication et une synergie sont nécessaires entre les différents spécialistes qui assurent les compagnes de surveillance : océanographes, chimistes de laboratoire, ichtyologues, spécialistes du corail, biologistes et plongeurs…Ils doivent partager leurs connaissances et leurs questionnements. A cette fin, et sous la demande de l'ingénieur coordinateur des suivis marins VNC, 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 en physico chimie et biologie ; la station Casy en 2018…).

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES PRINCIPALES

9.1. 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 particulaires d'origine naturelle : Simulation annuelle de la sédipmentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. Convention IRD/Goro-Ni, n°1124, « Modélisation hydrodynamique », 55p.

Dugas, F., 1974. La sedimentation en baie de St Vincent (Côte ouest de la Nouvelle-Caledonie). 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, Thébault 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., Andrefouët, S., Panché, 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.

9.2. DGT

J. Gimbel, H Zhang, W Hutchinson, W Davison. 2001. Measurement of trace metal by the diffusive gradient in thin film technique. Analytica chimica acts.

J.L. Gonzales, 2012. Techniques d'échantillonnage passif. Convention IFREMER/AQUAREF. 2011.

J.L. Gonzales, N. Tapie, J. Guyomarch, H. Budzinski 2011. Séminaire AQUAREF: « Echantillonneurs passifs et techniques alternatives aux prélèvements"

J.L. Gonzales, N. Tapie, J. Guyomarch, H. Budzinski, 2012. Porjet PEPS Guyane. Evaluation de la contamination chimique des eaux guyanaises par les techniques d'échantillonnages passifs.

J.L. Gonzales, N. Tapie, J. Guyomarch, Evaluation de la contamination chimique des eaux réunionnaises par les techniques d'échantillonnages passifs. Convention IFREMER/DIREN.

J.L. Gonzales, N. Tapie, J. Guyomarch, H. Budzinski and Co. 2010. Utilisation d'échantillonneurs passifs pour évaluer la pollution chimique des eaux marines: application en Méditerranée française. CIESM congress.

J-M Fernandez, B Andral, F Galgani, JL Gonzales, O Grauby, B.Moreton and coll : ADIIP 2011- 2015 (AMELIORATION / DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'IMPACTS ET DE PRESSION- CNRT) : Utilisation d'échantillonneurs passifs de la pression chimique liée à l'activité minière en Nouvelle-Calédonie.

Conférences DGT-2017, Goald Coast-Australie et DGT2019, Vienne-Autriche

9.3. 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.

9.4. 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 derivationof 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'Ilot 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., Núñe, 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 particulaires 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. 293-301Fernandez J-M. et Moreton B., 2013. Rade Nord : physico-chimie de la colonne d'eau consécutivement au passage du cycloneFréda. 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 Phytoplancton 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

Gabrié C., Cros A., Chevillon C., Downer A. 2005. Analyse Eco-régionale marine de Nouvelle-Calédonie. Atelie d'identification des aires de conservation prioritaire. 112p

Gabrié 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. Micronesico, 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. iiiur., ORSTOM, Nouniea, 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. Edition 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 scléractiniaires du Grand Lagon Nord – Mission CoRalCal 3-IRD. (CRISP). 119p

Lasne G., 2010. Inventaire des coraux scléractiniaires 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 Familly 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

Wilcoson F., 1945. Individual comprarisons by ranking methods. Biometrics Bulletin 1 (6): 80–83

9.5. 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)

10. ACRONYMES

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement.
AEM : Autorisation d'exploitation minière.
AODPM : Autorisation d'occupation de domaine maritime.
BACI : Before/After & Control/Impact
CCB : Convention pour la conservation de la biodiversité.
CNRT : Centre national de recherche technologique
CTD : Sonde multiparamétrique
DENV : Direction de l'environnement de la province Sud calédonienne.
DGT: Diffusive Gradient in Thin film.
DIMENC : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie
ERRC : Eviter, réduire, restaurer et compenser les impacts résiduels.
HT : Hydrocarbures totaux
MES : Matières en suspension.
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
INERIS : L'Institut national de l'environnement industriel et des risques