

# **CONTRAT DE CONSULTANCE IRD/GORO-NI**

Convention n° 9135 A0

## **ETAT DE REFERENCE : QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX ET NIVEAUX DE CONCENTRATION DES METAUX DANS LES SEDIMENTS**



Rapport final

IRD-Nouméa, 28/02/06

Fernandez JM, Moreton B, Gérard P, Belhandouz A, Fichez R

UR-103 CAMELIA, IRD-Nouméa

Nouvelle-Calédonie

## SOMMAIRE

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION.....</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>OBJECTIFS .....</b>                                   | <b>3</b>  |
| <b>METHODOLOGIE .....</b>                                | <b>3</b>  |
| ECHANTILLONNAGE .....                                    | 3         |
| PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES .....                       | 7         |
| <i>Profils verticaux</i> .....                           | 7         |
| <i>Sels nutritifs dissous</i> .....                      | 7         |
| <i>Matière organique particulaire</i> .....              | 9         |
| CONDITIONNEMENT DES SEDIMENTS .....                      | 9         |
| ANALYSE DES METAUX .....                                 | 10        |
| <i>Métaux dissous</i> .....                              | 10        |
| <i>Métaux dans les sédiments</i> .....                   | 10        |
| <b>RESULTATS.....</b>                                    | <b>11</b> |
| PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES .....                       | 11        |
| <i>Structure des masses d'eaux</i> .....                 | 11        |
| <i>Sels nutritifs dissous</i> .....                      | 13        |
| <i>Carbone, azote et phosphore organiques</i> .....      | 15        |
| <i>Chlorophylle a</i> .....                              | 16        |
| <i>Conclusions</i> .....                                 | 16        |
| DISTRIBUTION DES METAUX.....                             | 18        |
| <i>Métaux totaux dissous dans la colonne d'eau</i> ..... | 18        |
| <i>Métaux associés aux sédiments</i> .....               | 19        |
| <i>Conclusions</i> .....                                 | 24        |
| <b>CONCLUSION.....</b>                                   | <b>25</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                | <b>27</b> |
| <b>LISTE DES FIGURES .....</b>                           | <b>28</b> |
| <b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>                           | <b>29</b> |
| <b>LISTE DES ANNEXES .....</b>                           | <b>30</b> |

## INTRODUCTION

Ce document regroupe les études conduites dans le cadre de la définition de l'Etat de Référence de la colonne d'eau et des sédiments qui fait suite à la demande d'autorisation d'exploiter les installations classées déposée par la Société Goro-Ni. Cette demande a été soumise en avril 2004 et correspond à l'étude préalable au démarrage des activités de construction dans le futur site minier de Goro-Ni.

La Province Sud de Nouvelle Calédonie, compétente en matière d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement, a instruit la demande et autorisé l'exploitation par arrêté provincial n° 1769-2004/PS du 15 octobre 2004.

Cet arrêté ICPE requiert la définition de l'Etat de Référence du milieu marin autour du point de rejet de l'effluent traité dans le canal de la Havannah et en Baie de Prony où auront lieu les activités portuaires.

## OBJECTIFS

Les objectifs sont de caractériser d'une part la colonne d'eau, en analysant les principaux paramètres physico-chimiques (Température, salinité, turbidité,...), les sels nutritifs (nitrates, phosphates, ...) et les concentrations en certains métaux dissous (Mn, Ni, Co, ...) et d'autre part les sédiments, en déterminant les concentrations en métaux (Mn, Ni, Co, ...) dans différentes fractions géochimiques.

Cette étude du milieu marin constituera la base de référence pour la surveillance de l'impact industriel dans l'environnement. Elle a été réalisée sur 14 stations localisées dans le Canal de la Havannah et 4 stations dans la Baie du Prony conformément au cahier des charges de l'appel d'offre.

Ce document présente les résultats détaillés de l'Etat de Référence sur les 18 stations retenues.

## METHODOLOGIE

### *Echantillonnage*

L'échantillonnage a porté sur un total de 18 stations telles que prédéfinies dans le cahier des charges et proposées par la Province Sud de Nouvelle-Calédonie (Tableau 1 et Figure 3).

Les opérations de terrain ont été réalisées au cours de trois campagnes de prélèvements successives :

- **Campagne N/O IRD CORIS** (27-29 avril 2005). Cette campagne a permis la réalisation de :

- Profils multiparamétriques avec la sonde CTD (Seabird, modèle SBE 19);
- Prélèvements d'eau pour l'analyse des sels nutritifs dissous et de la matière organique particulaire ;
- Prélèvements d'eau pour l'analyse des métaux dissous.

Au cours de cette campagne 17 stations sur 18 ont pu être échantillonnées. En effet, en raison des mauvaises conditions météorologiques persistantes, la station St10 n'a pas été échantillonnée.

Les prélèvements d'eau destinés à la détermination des paramètres trophiques ont été effectués par bouteilles Niskin. Pour l'analyse des métaux dissous, les prélèvements ont été réalisés avec une bouteille General Oceanics, Metal-Free (Go-Flo, modèle 1080). Les profondeurs échantillonnées ont été les suivantes : Sub-surface (-2 m), mi-profondeur et fond (2 m au-dessus du fond).

#### Conditions météorologiques et hydrodynamiques (Figure 1)

27/04/05 : Vent ESE, 15-20 nœuds, mer agitée, variable, visibilité bonne ;

28/04/05 : Vent ESE, 15-20 nœuds, mer agitée, variable, visibilité bonne ;

29/04/05 : Vent SSE, 15-20 nœuds, mer agitée, variable, visibilité bonne.

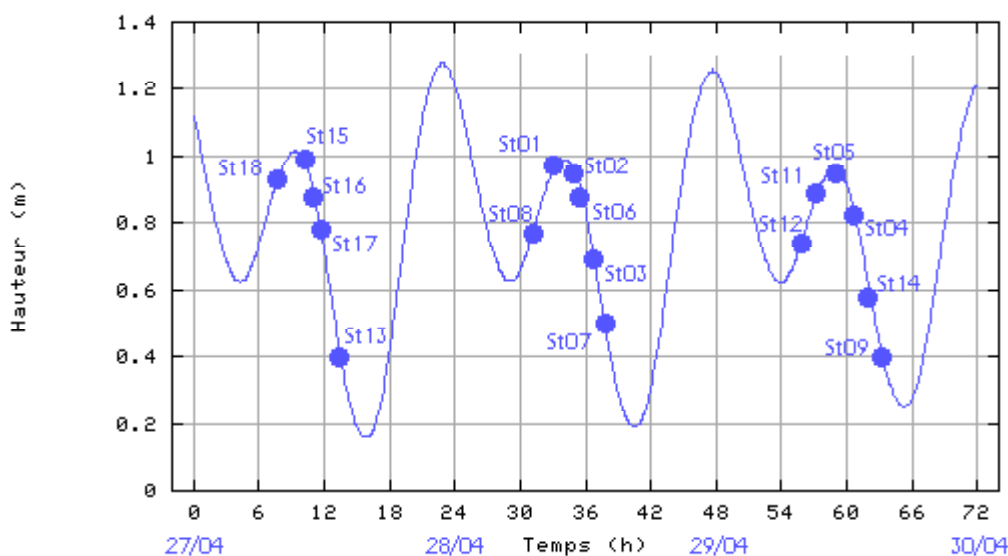


Figure 1 : Chronologie des prélèvements dans la colonne d'eau et marégramme du 27 au 30 avril 2005

- **Campagne N/O IRD ALIS** (9-10 juin 2005) : Cette campagne était destinée aux prélèvements de sédiments compte tenu des conditions météorologiques particulièrement mauvaises rencontrées en avril 2005. Les prélèvements ont été effectués avec un navire de dimensions plus importantes (28 m) en raison de la dangerosité des opérations de dragage, spécifiquement dans le canal de la Havannah. Les prélèvements de sédiments ont été réalisés avec une benne de type Van-Veen de grande contenance (30 litres) en acier inoxydable (nuance 316 L).

### Conditions météorologiques

09/06/05 : Vent SSE, 5-10 nœuds, mer calme, ensoleillé, visibilité bonne.

10/06/05 : Vent SSE, 5-10 nœuds, mer calme, ensoleillé, visibilité bonne

**Remarque :** Seuls les sédiments de 5 stations ont pu être échantillonnés principalement suite à une discordance entre les coordonnées prédéfinies dans le cahier des charges (Tableau 1) et le système de navigation par GPS. En effet, il semble que les positions géographiques des stations ont probablement été relevées sur une carte au référentiel géodésique IGN-72 et non WGS-84. Ces positions ne concordent pas avec un positionnement au moyen des systèmes de navigation par satellite actuels embarqués. Compte tenu de ces incertitudes de positionnement, de la bathymétrie des fonds et de la proximité des récifs frangeants proches des stations, les échantillonnages n'ont pu être réalisés dans le temps bateau réservé.

- **Campagne N/O Affaires Maritimes DARMAD** (28-30 novembre 2005) : Cette campagne a permis de rechercher de nouvelles stations afin de trouver des aires de sédimentation aussi proches que possible des coordonnées fournies dans le Cahier des Charges. Sur les 18 stations, 15 prélèvements ont seulement été réalisés. En effet, au terme de plusieurs essais infructueux aux stations St04, St10 et St11, il n'a pas été possible de remonter de matériel sédimentaire. Les prélèvements de sédiments ont été réalisés avec la benne de type Van-Veen précédemment décrite.

Le positionnement des 16 stations de prélèvement sédimentaires sont regroupés dans le tableau 1 et la figure 1.

### Conditions météorologiques et hydrodynamiques (Figure 2)

28/11/05 : Vent 10-15 nœuds, mer agitée, ensoleillé, visibilité bonne ;

29/11/05 : Vent 15-20 nœuds, mer agitée, nuageux, visibilité bonne ;

30/11/05 : Vent 16-20 nœuds, mer agitée, ensoleillé, visibilité bonne.

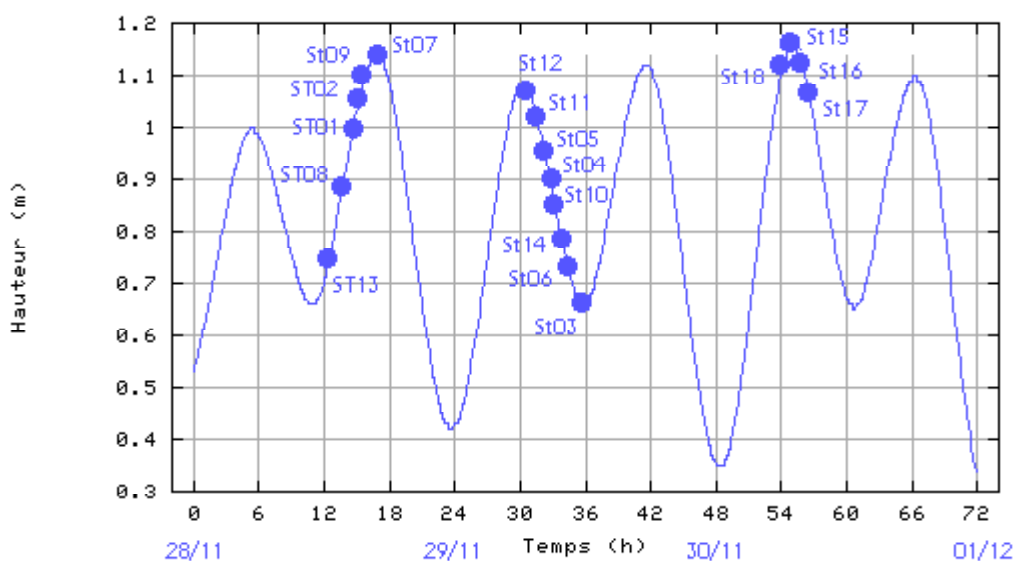


Figure 2 : Chronologie des prélèvements de sédiment et marégramme du 28 novembre au 01 décembre 2005

**Tableau 1 : Liste et localisation des stations. NP = Non Prélèvement ; (-) = Coordonnées ne permettant pas l'échantillonnage.**

| Stations                    | N° | Stations « colonne d'eau » |            |           | Stations « sédiments » |             |           |
|-----------------------------|----|----------------------------|------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|
|                             |    | Longitude E                | Latitude S | Prof. (m) | Longitude E            | Latitude S  | Prof. (m) |
| Corne NE du banc Ionontea   | 1  | 166° 59' 03                | 22° 23' 78 | 35        | 166° 59' 172           | 22° 23' 674 | 29        |
| Basse Chambeyron            | 2  | 167° 00' 45                | 22° 23' 70 | 36        | 167° 00' 506           | 22° 23' 599 | 30        |
| Récif pointe Puka           | 3  | 166° 58' 30                | 22° 21' 48 | -         | 166° 58' 463           | 22° 21' 378 | 12        |
|                             |    | 166° 58' 46                | 22° 21' 38 | 13        |                        |             |           |
| Bancs de Kié                | 4  | 167° 01' 30                | 22° 22' 25 | 36        | 167° 01' 518           | 22° 21' 949 | 20        |
| Ilot Kié                    | 5  | 167° 03' 60                | 22° 22' 50 | -         | 167° 03' 761           | 22° 22' 334 | 20        |
|                             |    | 167° 03' 75                | 22° 22' 33 | 20        |                        |             |           |
| Récif de la Baie Kwé        | 6  | 166° 58' 85                | 22° 20' 93 | -         | 166° 59' 112           | 22° 20' 830 | 15        |
|                             |    | 166° 59' 10                | 22° 20' 83 | 15        |                        |             |           |
| Récif loro                  | 7  | 166° 57' 50                | 22° 23' 10 | -         | 166° 57' 623           | 22° 22' 889 | 30        |
|                             |    | 166° 57' 62                | 22° 22' 90 | 31        |                        |             |           |
| Canal de la Havannah (A 28) | 8  | 166° 57' 14                | 22° 24' 33 | 47        | 166° 57' 453           | 22° 24' 323 | 48        |
| Canal de la Havannah (A 29) | 9  | 166° 59' 42                | 22° 22' 35 | 35        | 166° 59' 754           | 22° 22' 540 | 43        |
| Canal de la Havannah (A 30) | 10 | 167° 00' 93                | 22° 21' 51 | NP        | 167° 01' 593           | 22° 21' 665 | 45        |
| Fosse Est                   | 11 | 167° 04' 87                | 22° 25' 92 | 55        | 167° 04' 867           | 22° 25' 926 | 55        |
| Fosse Ouest                 | 12 | 167° 00' 13                | 22° 27' 71 | 69        | 166° 59' 023           | 22° 26' 269 | 62        |
| Pointe Nord du récif Ma     | 13 | 166° 51' 22                | 22° 25' 10 | 27        | 166° 51' 354           | 22° 24' 914 | 33        |
| Tombant Est de L'île Toémo  | 14 | 167° 01' 50                | 22° 20' 20 | -         | 167° 01' 965           | 22° 20' 062 | 23        |
|                             |    | 167° 01' 96                | 22° 20' 05 | 23        |                        |             |           |
| Prony Creek Baie Nord       | 15 | 166° 52' 40                | 22° 20' 25 | 33        | 166° 52' 590           | 22° 20' 037 | 27        |
| Prony Wharf                 | 16 | 166° 53' 30                | 22° 21' 45 | 25        | 166° 53' 365           | 22° 21' 210 | 24        |
| Prony Ilot Montravel        | 17 | 166° 51' 10                | 22° 22' 75 | 10        | 166° 51' 257           | 22° 22' 597 | 25        |
| Prony Ilot Casy             | 18 | 166° 50' 95                | 22° 21' 85 | 15        | 166° 51' 061           | 22° 21' 668 | 20        |

**Remarque :** Les stations, 11 (Fosse Est) et 12 (Fosse Ouest) ont été définies par l'IRD au cours de la campagne de prélèvements dans la colonne d'eau.

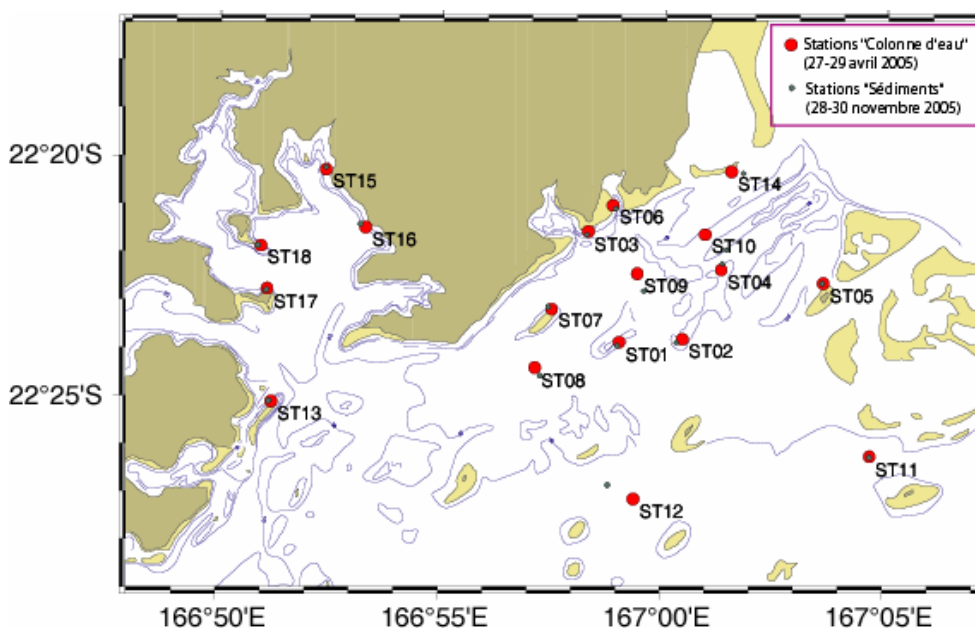


Figure 3: Localisation géographique des stations de prélèvements dans la colonne d'eau (mission du 27-29 avril 2005 et dans la couverture sédimentaire (mission du 28-30 novembre 2005)

## Paramètres physico-chimiques

### Profils verticaux

La structuration verticale des masses d'eau sur chacune des stations échantillonnées (17/18), a été obtenue par des profils verticaux réalisés à l'aide d'une sonde CTD SBE19 équipée de capteurs additionnels. La fréquence d'acquisition des données étant de 0,5 secondes et la vitesse de descente d'environ 0,5 m/s, une série de données est générée tous les 25 cm environ.

Les paramètres mesurés par la sonde multiparamétriques sont les suivants :

- La pression, elle permet de calculer la profondeur ;
- La salinité déduite de la mesure de la conductivité ;
- La température (°C) ;
- La turbidité par mesure de la néphélométrie exprimée en FTU (Formazin Turbidity Units) :  $1\text{FTU} \simeq 1 \text{ mg L}^{-1}$  de matière particulaire sèche (capteur Sea Point) ;
- La fluorescence *in-vivo* exprimée en unités arbitraires et permettant après calibration par croisement avec les données collectées *in situ*, de calculer les concentrations en pigments chlorophylliens (capteur Wet labs) ;

### Sels nutritifs dissous

Les échantillons d'eau nécessaires aux différentes déterminations analytiques ont été directement conditionnés à bord dans du flaconnage soit en :

- PEHD pour être stockés à -20°C en vue de leur traitement ultérieur à l'IRD. Ces dosages concernent les nitrates+nitrites ( $\text{NO}_3$ ), les phosphates ( $\text{PO}_4$ ), l'azote organique

dissous (NOD) et le phosphore organique dissous (POD). Chaque niveau échantillonné a fait l'objet d'un duplicat ;

- Verre borosilicaté et addition de réactif pour le dosage quotidien (dans les 24 heures) de l'ammonium ( $\text{NH}_4$ ). Compte tenu des faibles valeurs attendues, chaque niveau échantillonné a fait l'objet d'un triplicat.

### Nitrates + Nitrites

L'ion nitrate est la forme oxydée stable de l'azote en solution aqueuse. Compte tenu des faibles concentrations océaniques et des interférences possibles, la méthode retenue pour leur dosage est celle fondée sur le dosage des ions nitrites obtenu par réduction des ions nitrates. Cette méthode conduit à une mesure de la somme des concentrations nitrites+nitrates par photométrie (Oudot et al., 1988), les concentrations en nitrites dans les eaux de surfaces étant quasiment nulles. Cette méthode permet de couvrir une gamme d'analyse comprise entre 0,2 et 1  $\mu\text{mol.L}^{-1}$  avec des limites de détection d'environ 0,002  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ . Les mesures ont été effectuées avec un auto-analyseur en flux continu Bran & Luegbe, modèle Autoanalyseur III.

### Ammonium

En solution, l'azote ammoniacal est présent sous forme d'ammoniac  $\text{NH}_3$  et d'ion ammonium  $\text{NH}_4^+$  ce dernier étant prépondérant dans le milieu marin. Dans les régions tropicales, les teneurs sont généralement très faibles de l'ordre de quelques dizaines de nanomoles et la méthode décrite par Holmes et al. (1999) est la plus adaptée. Il s'agit d'une méthode manuelle basée sur le principe d'une mesure fluorométrique qui permet de doser des quantités sub micromolaires d'ammonium. Les proportions de réactifs ont été déterminées pour des concentrations maximales d'ammonium de 3  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ , la limite de détection de la méthode est de 1,5 nmol.L<sup>-1</sup>.

### Phosphates

Le dosage des orthophosphates a été effectué selon la méthode de Murphy et Riley (1962) basée sur la formation en milieu acide (pH<1) de phosphomolybdate d'ammonium, complexe de couleur jaune dosable par photométrie. Le domaine de concentrations mesurable s'étend de 0 à 28  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ , la limite de détection étant de 0,01  $\mu\text{mol.L}^{-1}$  avec un intervalle de confiance de 95% sur la gamme de 0 à 3  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ .

### Silicates

La méthode qui sert de référence est celle de Mullin et Riley (1965), modifiée par Fanning et Pilson (1973). Le dosage colorimétrique est fondé sur la formation d'un complexe silicomolybdique qui, après réduction donne une coloration bleue intense. Le domaine de concentrations mesurables s'étend de 0 à 140  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ , la limite de détection est de 0,05  $\mu\text{mol.L}^{-1}$  et l'intervalle de confiance de 98,5% sur une gamme de 0 à 10  $\mu\text{mol.L}^{-1}$  de Si.

### Azote et phosphore organiques dissous

Le dosage de la matière organique ne peut s'effectuer directement. Celle-ci est d'abord dégradée (minéralisée) et les composés inorganiques qui sont produits sont alors dosés selon les méthodes précédemment décrites pour les nitrates+nitrites et les phosphates. La méthode d'oxydation par voie humide utilisée (Raimbault et al., 1999) présente l'avantage d'être simple et rapide à mettre en oeuvre et ne nécessite pas d'appareillage lourd ou sophistiqué. Pour l'azote, dans le domaine de concentrations > 1  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ , la limite de détection est de 0,020  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ , pour le phosphore cette limite est 10  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ .

## Matière organique particulaire

La charge organique particulaire a été déterminée sur des échantillons d'eau conditionnés à bord puis filtrés au laboratoire quotidiennement sur des filtres Whatman GF/F (porosité 0,7  $\mu\text{m}$ ). Leur conservation a été assurée par congélation à  $-20^{\circ}\text{C}$  jusqu'à dosage du contenu en :

- Carbone ;
- Azote ;
- Phosphore ;
- Pigments chlorophylliens (chlorophylle A et phéo-pigments).

### Carbone et azote

L'analyse des filtres a été conduite sur un analyseur CHN (Perkin Elmer, modèle 2400) selon le principe de la combustion de la matière organique par l'oxygène suivi d'un dosage du dioxyde de carbone et de l'azote formés. Avec cette technique, 20  $\mu\text{g}$  de C correspond à la quantité limite en dessous de laquelle il est communément admis que l'erreur sur la mesure du carbone (COP) est négligeable. Pour l'azote (NOP) cette quantité limite est repoussée à 10  $\mu\text{g}$  de N dans l'échantillon.

### Phosphore organique particulaire

Les filtres ont été soumis au même traitement que pour le dosage du phosphore organique dissous. Dans le domaine de concentrations étudié en mer, la limite de détection est de 0,010  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ .

### Pigments chlorophylliens

Les dosages ont été effectués par la méthode fluorométrique de Lorenzen (1966) qui présente une très grande sensibilité. Les pigments chlorophylliens sont extraits du filtre par un solvant organique, leur détection s'effectue, après excitation dans un faisceau lumineux à 450 nm, par mesure de la fluorescence émise à 670 nm (ce principe est identique à celui utilisé par le capteur de fluorescence *in-situ* équipant la sonde multiparamétrique SBE 19). Sur chaque extrait, la mesure de fluorescence est effectuée deux fois, avant et après acidification. L'écart de fluorescence observé entre ces deux lectures est en relation avec le pourcentage relatif de chlorophylle a par rapport à la somme chlorophylle a + Phéophytine a. Etant donné les interférences dues aux chlorophylles b et c, la précision des mesures dépend de la nature même des communautés de producteurs primaires. La limite de détection pour le matériel utilisé (Turner design 700) est de 10ng.L<sup>-1</sup>.

## Conditionnement des sédiments

Les prélèvements de sédiments (15/18 stations) ont été effectués sur la couche centimétrique de surface. Cent à cent cinquante grammes de sédiments ont été placés dans des sachets en vinyle à usage unique (Whirl-Pack®), congelés puis lyophilisés une fois au laboratoire.

Une séparation granulométrique des sédiments a été effectuée par voie humide (Eau Milli-Q 18.6  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ) afin de récupérer la fraction sédimentaire chimiquement la plus réactive (pélites = particules < 40  $\mu\text{m}$ ) (e.g., Mayer and Fink, 1979; Ackerman, 1980; Deely and Fergusson, 1994; He and Walling, 1996). Les tamisages ont été conduits sur les aliquotes sédimentaires comprises entre 10 et 100 g selon nécessité et les fractions récoltées ont été séchées à l'étuve ( $40^{\circ}\text{C}$ ) puis conditionnées pour leur conservation jusqu'à l'analyse des métaux.

## **Analyse des métaux**

En ce qui concerne les métaux dissous dans la colonne d'eau, les analyses ont été confiées au laboratoire Ultra Traces Analyses Aquitaine (UT2A) de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour par spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS).

Le Cr(VI) dissous et tous les métaux présents dans les sédiments ont été analysés à l'IRD-Nouméa. L'appareillage utilisé est de marque Perkin Elmer, modèle Optima 3200 DV. Les corrections spectrales ont été appliquées pour limiter les interférences (fichiers MSF) et les mesures ont été réalisées aux longueurs d'ondes suivantes : As 188.979 ; Ca 227.546 ; Cd 228.802 ; Co 238.892 ; Cr 267.716 ; Cu 224.700 ; Fe 238.204 ; Mn 259.372 ; Ni 221.648 ; Na 330.237 ; Zn 206.200.

### **Métaux dissous**

Un premier lot de prélèvements d'eau (51/54 correspondant à 17/18 stations) a été filtré à 0,45 µm (filtres Millipore, qualité HA, pré-lavés) puis acidifié à raison de 1 mL/L avec HNO<sub>3</sub> Ultrapur® immédiatement après les opérations d'échantillonnage. Ces échantillons ont ensuite été expédiés en Métropole au laboratoire UT2A. Les limites de détection fournies par le laboratoire sont respectivement : As(200), Cd(20), Co(30), Cr(100), Cu(80), Fe(5000), Mg(100), Mn(100), Ni(100), Pb(50) et Zn(90).

Pour le dosage du Cr(VI), un deuxième lot de prélèvement d'eau (51/54 correspondant à 17/18 stations) a été conditionné et traité sur place immédiatement après l'échantillonnage. Ces échantillons ont été filtrés à 0,45 µm (filtres Millipore, qualité HA, pré-lavés) puis acidifiés à pH=3 (HCl Ultrapur®) avant d'être percolés à 4 mL.mn<sup>-1</sup> sur des colonnes cationique fortes (Dionex, OnGuard II-H) pour la pré-concentration du Cr(III). Le dosage du Cr(III) s'effectue, après l'élution des colonnes avec une solution HCl, par analyse en spectrométrie optique à plasma induit (ICP-OES).

La concentration en Cr(VI) s'obtient par différence entre la concentration en Cr(total) et en Cr(III).

### **Métaux dans les sédiments**

Dans les sédiments, les métaux suivant ont été analysés : As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb et Zn.

#### **Extraction séquentielle des métaux**

Les étapes d'extraction séquentielles ont été conduites conformément au protocole de type Tessier et al. (1979) comprenant 4 ou 5 phases géochimiques. Cette méthodologie permet de mieux appréhender les effets de l'impact d'une contamination métallique dans le milieu. Les deux premières étapes du protocole permettent de mettre en évidence les conditions sédimentaires et les influences anthropiques, les deux dernières reflètent l'évolution géochimique naturelle.

Pour chaque échantillon, 2 g de pelites ont été 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 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 ou constituant la matière minérale tels que les silicates et aluminosilicates. L'extraction est réalisée par une solution acide ( $HNO_3/HCl/HF$ ) à haute température et pression. Cette étape est conduite dans des bombes en Teflon® dans un four micro-ondes Anton Paar / Perkin Elmer.

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

### Attaque totale

L'analyse des métaux totaux a été conduite après attaque de la matrice géochimique par fusion alcaline, selon le protocole en vigueur à l'IRD. Brièvement, il s'agit de faire réagir du tétraborate de lithium et du sédiment à haute température ( $1100^\circ C$ ) puis, après refroidissement partiel, de dissoudre les billes d'amalgame formées dans une solution acide ( $HCl$ ).

## RESULTATS

### Paramètres physico-chimiques

#### Structure des masses d'eaux

La campagne de prélèvement s'est déroulée au mois d'avril 2005 et permet de disposer, par ce fait, de données complémentaire s'ajoutant aux séries temporelles fournies dans le rapport correspondant à la convention N°9105 (Octobre 2005).

Dans l'aire étudiée, les valeurs des paramètres température, salinité, turbidité, fluorimétrie et irradiance montrent des écarts parfois notables non seulement entre les stations mais également, dans certains cas, le long des profils verticaux effectués (Tableau 2 et Annexe 1). Ces variations permettent de distinguer, d'Est en Ouest, une évolution dans les caractéristiques physico-chimiques des masses d'eau :

- Dans la bordure Est de la zone étudiée, les eaux des stations St04, St05, St11 et St14 présentent des similitudes évidentes avec les eaux océaniques. En effet, sur près de 30 m de profondeur, les profils montrent des températures ( $24,5^\circ C$ ) et des salinités (35,1 PSU) parfaitement constantes, les valeurs de turbidité étant faibles et régulières ( $<0,5$  FTU), enfin la fluorescence évoluant autour d'environ  $2 \text{ mg/m}^3$ . La station St11 se

- singularise par une couche plus profonde située entre -30 et -55 m dont la température souligne la présence d'eaux relativement plus froides (23°C environ) qu'en surface ;
- Les eaux, dans les 30 premiers mètres des stations St08 ( Station équivalente à A28) et St12 ainsi que les 15 premiers mètres à la station St07, possèdent des caractéristiques proches de celles précédemment décrites. Toutefois, elles se distinguent singulièrement par les couches profondes où la température et la fluorescence diminuent et la turbidité augmente très sensiblement. L'ensemble de ces profils met en évidence la présence de 2 masses d'eaux bien individualisées ;
  - Entre ces 2 ensembles, les eaux des stations St01 et St02 possèdent des caractéristiques très proches de celles mesurées le long la bordure Est directement influencée par les entrées océaniques. Les eaux de la station St09 (A29) possèdent, quant à elles, des caractéristiques plus proches des eaux collectées au large du Cap Ndoua. Toutefois, la station St09 ayant été échantillonnée à marée descendante (Figure 1), la présence d'une couche faiblement turbide dans les 5 derniers mètres peut être attribuée à un phénomène de remise en suspension.
  - Les stations St03 et St06, bien que proches de la Passe de la Havannah, sont déjà visiblement influencées par les apports côtiers. En particulier, les eaux de la station de la Baie Kwé (St06) montrent une légère dessalure dans les 6 premiers mètres de la colonne d'eau (33,3 PSU) et le profil de température marque l'apparition de minces veines de courant plus moins froides. A ces 2 stations, la turbidité générale des eaux est relativement plus élevée que dans le reste du Canal de la Havannah (1 à 2 FTU).
  - Situées à dans la Rade Nord de la Baie du Prony, les eaux des stations St15, St06 et St18 sont clairement influencées par les apports terrestres. Ainsi, la station St15 en particulier, montre des profils laissant apparaître plusieurs couches d'eaux bien individualisées ; en surface la dessalure est importante (32,9 PSU) et coïncide avec une couche turbide (1,4 FTU) plus froide (23,7°C), en dessous, si la température et la salinité (respectivement environ 25°C et 35,5 PSU) demeurent constantes et proches des valeurs mesurées dans le Canal de la Havannah, la turbidité et la fluorescence mettent en évidence une importante couche néphéloïde benthique, entre 22 et 35 m de profondeur. Cette présence est probablement générée par les apports de la rivière Kadjé (Profils effectués une demi-heure après l'étal de marée haute). Les eaux des stations St18 et St16 reflètent, à des degrés moindres, cette influence terrestre, avec cependant un effet de remise en suspension notable pour la station proche du futur port industriel (St16). L'augmentation de la fluorescence en profondeur est considérable puisqu'elle passe de 1 à plus de 4 mg/m<sup>3</sup>. Cette distribution correspond en tout point aux observations effectuées dans cette même aire d'étude et correspond à un phénomène métabolique (Fichez et al., soumis).
  - Les stations St13 et St17, localisées en sortie de la Baie du Prony, sont des eaux intermédiaires.

**Tableau 2 : Valeurs maximales et minimales pour les paramètres Température, Salinité, Turbidité, Fluorescence et Irradiance**

| Station |     | Température<br>°C | Salinité<br>PSU | Turbidité<br>FTU | Fluorescence<br>mg/m3 | Irradiance |
|---------|-----|-------------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------|
| St01    | Min | 24,4              | 35,1            | 0,33             | 0,98                  | 13,7       |
|         | Max | 24,6              | 35,2            | 0,63             | 1,84                  | 187,9      |
| St02    | Min | 24,5              | 35,1            | 0,32             | 1,28                  | 12,0       |
|         | Max | 24,6              | 35,2            | 3,75             | 2,65                  | 134,8      |
| St03    | Min | 24,2              | 34,7            | 0,02             | 0,55                  | 10,9       |
|         | Max | 24,6              | 35,1            | 1,57             | 2,24                  | 551,3      |
| St04    | Min | 24,7              | 35,1            | 0,08             | 1,00                  | 30,0       |
|         | Max | 24,8              | 35,2            | 0,71             | 1,79                  | 462,8      |
| St05    | Min | 24,5              | 35,2            | 0,30             | 1,00                  | 55,3       |
|         | Max | 24,5              | 35,2            | 0,65             | 1,56                  | 478,2      |
| St06    | Min | 23,3              | 33,3            | 1,15             | 0,28                  | 16,8       |
|         | Max | 24,0              | 34,7            | 2,25             | 0,70                  | 501,4      |
| St07    | Min | 24,1              | 35,2            | 0,12             | 1,06                  | 22,4       |
|         | Max | 24,6              | 35,3            | 1,43             | 2,24                  | 185,8      |
| St08    | Min | 23,6              | 35,0            | 0,42             | 0,96                  | 0,8        |
|         | Max | 24,4              | 35,5            | 1,99             | 2,29                  | 100,7      |
| St09    | Min | 24,4              | 34,9            | 0,32             | 1,68                  | 5,6        |
|         | Max | 24,7              | 35,2            | 0,67             | 2,67                  | 90,9       |
| St10    | Min | -                 | -               | -                | -                     | -          |
|         | Max | -                 | -               | -                | -                     | -          |
| St11    | Min | 22,7              | 35,3            | 0,28             | 0,63                  | 7,7        |
|         | Max | 24,0              | 35,5            | 0,92             | 1,78                  | 459,4      |
| St12    | Min | 22,2              | 35,2            | 0,31             | 0,77                  | 0,3        |
|         | Max | 24,1              | 35,6            | 0,99             | 1,96                  | 64,3       |
| St13    | Min | 24,1              | 34,8            | 0,73             | 1,00                  | 13,0       |
|         | Max | 24,5              | 35,3            | 1,80             | 3,10                  | 2543,8     |
| St14    | Min | 24,7              | 35,0            | 0,40             | 1,79                  | 14,6       |
|         | Max | 24,7              | 35,1            | 0,64             | 2,05                  | 174,0      |
| St15    | Min | 23,7              | 32,9            | 0,37             | 1,38                  | 0,9        |
|         | Max | 25,1              | 35,4            | 3,74             | 3,77                  | 378,6      |
| St16    | Min | 23,7              | 34,9            | 0,36             | 0,69                  | 1,1        |
|         | Max | 24,8              | 35,5            | 6,59             | 4,52                  | 595,3      |
| St17    | Min | 23,8              | 33,9            | 0,52             | 0,68                  | 169,0      |
|         | Max | 24,6              | 35,3            | 0,69             | 1,84                  | 765,7      |
| St18    | Min | 24,2              | 34,7            | 0,32             | 0,54                  | 25,5       |
|         | Max | 25,0              | 35,5            | 1,43             | 5,20                  | 471,3      |

## Sels nutritifs dissous

### Nitrates + Nitrites

L'ion nitrate est la forme oxydée stable de l'azote en solution aqueuse. Il entre dans le cycle de l'azote comme support principal de la croissance du phytoplancton qui une fois dégradé rend au système l'azote sous forme minérale. La vitesse de régénération peut-être parfois

différente de la vitesse d'utilisation, il en résulte des concentrations en nitrates variables qui peuvent être un facteur influençant la croissance des algues.

Pour la zone étudiée (Figure 5, Annexe 2), les concentrations en nitrates+nitrites sont comprises entre 0,011 et 2,715  $\mu\text{mol/L}$ . Cependant, deux domaines sont clairement identifiables, le premier correspond à l'ensemble du Canal de la Havannah avec des valeurs comprises entre 0,232 et 1,317  $\mu\text{mol/L}$ . Les concentrations augmentent progressivement d'Est en Ouest, la couche de fond présentant souvent des valeurs plus fortes qu'en surface. Le deuxième domaine concerne l'intérieur de la Baie du Prony où des concentrations les plus fortes sont enregistrées dans la couche profonde, en particulier des stations St15 et St16 avec respectivement 1,857 et 2,715  $\mu\text{mol/L}$ , alors qu'en surface et quelque fois à mi-profondeur, elles n'atteignent pas les 0,050  $\mu\text{mol/L}$ .

### Ammonium

Dans le milieu marin, la forme prépondérante de l'azote ammoniacal est l'ammonium. Naturellement, il provient des excréments animaux 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 nanomoles.

La distribution des concentrations (Annexe 2) se superpose de manière remarquable à celle de l'azote minéralisé (nitrates + nitrites). Ainsi, les deux mêmes domaines peuvent être distingués : Le Canal de la Havannah avec des valeurs globalement croissantes vers le Sud-Ouest de la zone, comprises entre 0,002 et 0,195  $\mu\text{mol/L}$  et la Baie du Prony entre 0,001 et 0,384  $\mu\text{mol/L}$  où les concentrations maximales sont enregistrées pour la couche profonde des stations St15 et St16 et les minimales en surface.

### Phosphates

Dans l'eau de mer le phosphore dissous est essentiellement présent sous forme d'ions orthophosphates. Leur concentration dépend de phénomènes physiques et biologiques ou chimiques. Les teneurs sont généralement très faibles en surface et augmente avec la profondeur au-dessous de la zone euphotique. En milieu côtier, une augmentation des concentrations est un signe d'influence anthropique.

Comme pour les paramètres précédents, la répartition des phosphates (Annexe 2) suit la même logique : Enregistrement de concentrations faibles passant à moyennes dans le Canal de la Havannah à mesure que l'on se dirige vers le Sud-Ouest, observation d'un enrichissement net dans la couche profonde exception faite de la station St06 ; les concentrations sont comprises entre 0,002 et 0,122  $\mu\text{mol/L}$ . Dans la Baie du Prony, les valeurs sont comprises entre 0,002 et 0,258  $\mu\text{mol/L}$ , les plus fortes concentrations correspondant aux couches profondes.

### Silicates

Bien que le silicium ne soit un composant de la matière vivante proprement dite, il constitue l'essentiel des squelettes de divers organismes marins. Sa concentration dans l'eau de mer qui peut devenir insuffisante par suite de sa très faible solubilité, varie en fonction de l'origine et la nature des eaux. Ainsi, dans le domaine océanique, 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.

La distribution de la silice (Annexe 2) permet aussi de distinguer les deux domaines déjà décrits pour les autres paramètres, à savoir : Une influence océanique caractérisée par des concentrations faibles comprises entre 0,873 et 1,823  $\mu\text{mol/L}$  dans le Canal (3,367  $\mu\text{mol/L}$  sur

les stations plus côtières, comme St03) ; Une influence terrigène en Baie du Prony où les valeurs augmentent de 2,009 à 7,946  $\mu\text{mol/L}$ . Toutefois, cette répartition se différencie de celle des phosphates notamment par la présence, dans la couche de surface, des valeurs les plus fortes correspondant à la signature des influences terrigènes.

## Carbone, azote et phosphore organiques

La distinction entre matière dissoute et particulaire est arbitraire, cependant dans études environnementales, il est admis que la limite de taille pour les séparer est de 0,45  $\mu\text{m}$  (Strickland et Parsons, 1972).

### Azote et phosphore dissous

Leur contribution naturelle provient de la dégradation de matière de nature biogénique qu'elle soit d'origine océanique (bactéries, phytoplancton, zooplancton, macro-organismes pélagiques, ...) ou terrestre (bactéries, débris végétaux, ...) voire éolienne (bactéries, pollens, ...). D'une manière générale, la concentration en composés dissous est très faible particulièrement dans l'océan ouvert.

Les répartitions spatiales de l'azote (NOD) et du phosphore organique dissous (POD ; Annexe 2) sont identiques entre elles. En effet, elles ne montrent aucune structuration nette de gradient horizontal ni vertical ; les valeurs pour l'azote sont comprises entre 1,525 et 4,198  $\mu\text{mol/L}$  en Baie du Prony et entre 2,253 et 4,717  $\mu\text{mol/L}$  dans tout le Canal de la Havannah. Cette homogénéité est encore plus marquée pour le phosphore organique dissous dont les valeurs oscillent entre 0,222 et 0,548  $\mu\text{mol/L}$  en Baie du Prony et entre 0,232 et 0,826  $\mu\text{mol/L}$ .

### Carbone, azote et phosphore particulaires

La fraction particulaire de ces éléments est constituée des matières en suspension de tailles divers qui sont transportées par au sein des masses d'eau. Leur origine est également océanique, terrestre voir éolienne. Les concentrations présentent d'ordinaire un gradient de côte-large et peuvent montrer des discontinuités verticales en fonction de l'existence ou non de couches néphéloïdes.

Contrairement aux fractions dissoutes de l'azote et du phosphore, ces deux éléments se distribuent selon des schémas remarquablement superposables (Annexe 2). Ainsi, il est possible de distinguer une influence océanique qui maintient de manière homogène des valeurs faibles dans le Canal de la Havannah : 0,266 à 0,750  $\mu\text{mol/L}$  pour l'azote (NOP) et 0,022 à 0,062  $\mu\text{mol/L}$  pour le phosphore (POP). A l'inverse, en Baie du Prony, ces valeurs, augment vers le fond de la baie puisqu'elles passent de 0,686 à 1,977  $\mu\text{mol/L}$  pour NOP et de 0,037 à 0,115  $\mu\text{mol/L}$  pour POP. A cette tendance s'ajoute en général un gradient dans la colonne d'eau traduisant la présence d'une couche néphéloïde (St08, St15) et/ou la contribution des apports en chlorophylle (St07). Cependant, ce type de distribution verticale est bien moins prononcé dans le Canal de la Havannah qu'en Baie du Prony.

*Remarque : Les dosages d'azote particulaire conduits sur un analyseur CHN (Perkin Elmer, modèle 2400) sont en parfaite concordance avec les résultats d'analyses effectuées par oxydation humide puis analyse avec l'auto-analyseur en flux continu Bran & Luegbbe.*

Le carbone organique particulaire suit une distribution semblable à celle de l'azote et du phosphore, avec cependant un faible gradient de concentration du Nord-Est au Sud-Ouest du Canal de la Havannah. Le deuxième domaine constitué par la Baie du Prony montre des

valeurs sensiblement plus fortes : 2,66 à 10,91  $\mu\text{mol/L}$  contre 1,95 à 6,95  $\mu\text{mol/L}$  dans le Canal.

Les rapports C/N permettent également de délimiter les deux domaines : La Baie du Prony et le Canal de la Havannah et où les valeurs respectivement se distribuent de 3,6 à 9,6 et de 3,7 à 11,2 (exception faite d'une valeur à 14,7 dans la couche de surface de St07).

## Chlorophylle a

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 (Fichez et al., 2005). Sa dégradation donne de nombreux composés dont principalement la phéopigments.

Hormis 3 valeurs isolées de concentration en chlorophylle (St13-F, St17-S et St15-M), il n'est pas possible de distinguer clairement des domaines de concentrations différents (Annexe 2). Pour l'ensemble de la zone, les valeurs sont comprises entre 0,294 et 0,620  $\mu\text{g/L}$  en Baie du Prony et entre 0,226 et 0,704  $\mu\text{g/L}$  dans le Canal de la Havannah. Toutefois, on notera un très faible gradient entre les stations de pleine eau et les stations proches de la côte, augmentation principalement attribuable aux apports terrigènes.

Bien que du même ordre de grandeur et ne suscitant aucune interprétation contradictoire, les niveaux de concentrations semblent, dans certains cas, jusqu'à 40% plus élevés que ceux proposés dans l'étude temporelles (Convention 9104).

En matière de phéopigments, les tendances sont en tout point similaires à celles décrites pour la chlorophylle. Les concentrations sont comprises entre 0,058 et 0,284  $\mu\text{g/L}$  dans la Baie du Prony et entre 0,110 et 0,291  $\mu\text{g/L}$  dans le Canal de la Havannah.

## Conclusions

1. La bordure Est du canal de la Havannah est clairement et logiquement influencée par les apports océaniques. Les caractéristiques de ces masses d'eaux changent à mesure que l'on entre dans le Canal et soulignent l'apparition de couches turbides (Particules en suspension) de part et d'autre (St07 et St09) du futur point de rejet des effluents industriels. La présence de ce néphéloïde benthique peut être en liaison avec les phénomènes de resuspension dus aux effets des courants de marée.
2. La Baie du Prony reçoit des apports en eau douce dont la signature est visible tant dans les premiers mètres des eaux de surface que sur les couches profondes où semble s'installer par endroits un néphéloïde benthique dont l'intensité diminue en direction de la sortie de la baie.
3. Ces observations semblent en parfaite cohérence avec l'étude sur l'évolution temporelle des « Caractéristiques physico-chimiques des eaux » (Convention 9104) qui conclue à une rémanence des structure hydrologiques ci-dessus décrites, au cours du temps.
4. Les fortes valeurs mesurées en nitrates, ammonium sont probablement l'expression de l'augmentation du métabolisme benthique constaté en période chaude (Fichez et al., soumis). Ce phénomène entraîne le relargage vers la colonne d'eau d'éléments nutritifs minéralisés dans la couche sédimentaire dont la nature conditionnera l'intensité du signal.

5. Pour ce qui est des phosphates, la distribution spatiale est totalement conforme à l'attendu, exception faite de la station ST06 dont la concentration très forte mesurée en surface n'est explicable que par la nature des particules en suspension. Cette hypothèse semble être confirmée par la forte concentration en silice qui est un traceur des apports terrigènes.
6. Globalement, les masses d'eau analysées contiennent des concentrations faibles en azote et phosphore organiques dissous. Ces valeurs sont proches de celles rencontrées en milieu côtier ouvert et montrent une grande homogénéité sur tout le domaine. Cependant, les distributions en carbone, azote et phosphore organiques particulières permettent de distinguer les influences océaniques qui prédominent dans le Canal de la Havannah, des influences terrigènes installées dans la Baie du Prony. Par ailleurs, à l'intérieur de chacune de ces deux unités, la présence de structures hydrologiques telles que les couches turbides (néphéloïdes) induit des augmentations notables des niveaux de concentration.
7. Dans le milieu marin, il est admis que les rapports C/N/P sont voisins de 106/16/1 (Redfield, 1934), tant pour les eaux superficielles que les eaux profondes, dans l'océan ouvert comme en milieu côtier. Dans notre aire d'études, les valeurs moyennes sont, d'une part, globalement conformes à ce principe (Tableau 3) et d'autre part elles sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans des zones du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie non influencées par les apports anthropiques (Fichez et al., soumis). Toutefois, il est possible de distinguer le système constitué par la Baie du Prony dont les rapports C/P et N/P sont sensiblement plus élevés ainsi que les eaux de la couche profonde pour l'ensemble de la zone. Les rapports C/N demeurent invariants et toujours inférieurs à 10 (valeur optimale en matière de vitesse de minéralisation), ce qui permet de conclure à une limitation de la production primaire par l'azote. Cette observation conduit à recommander la surveillance des apports futurs dans le milieu, notamment autour du point de rejets d'effluents domestiques, pour éviter l'eutrophisation des fonds de baies.
8. En ce qui concerne la chlorophylle, les niveaux de concentrations, inférieurs à 1 µg/L pour l'ensemble des domaines étudiés excepté 3 valeurs orphelines, montrent que le milieu peut être considéré actuellement comme typiquement oligotrophe (Fichez et al., 2005).

**Tableau 3 : Valeurs des rapports C/N/P pour l'ensemble de la zone étudiée et pour les profondeurs échantillonnées**

| Niveau        | Site                    | C/P        | N/P       | C/N      |
|---------------|-------------------------|------------|-----------|----------|
| Surface       | Canal Havannah          | 105        | 15        | 7        |
|               | Baie du Prony           | 112        | 21        | 6        |
| Mi-Profondeur | Canal Havannah          | 99         | 14        | 7        |
|               | Baie du Prony           | 107        | 18        | 6        |
| Fond          | Canal Havannah          | 89         | 12        | 7        |
|               | Baie du Prony           | 136        | 25        | 7        |
| Colonne       | Canal Havannah          | 98         | 14        | 7        |
|               | Baie du Prony           | 119        | 22        | 6        |
|               | <b>Canal H + Baie P</b> | <b>103</b> | <b>16</b> | <b>7</b> |

## Distribution des métaux

### Métaux totaux dissous dans la colonne d'eau

Parmi les 11 éléments métalliques retenus dans cette étude, seules les concentrations de 9 d'entre eux ont pu être déterminées (Annexe 3). En effet, le fer et de magnésium dissous ont posés des problèmes de détection compte de tenu des très faibles niveaux de concentrations respectives dans les eaux de mer et des problèmes afférents qui se sont posés en termes de résolution spectrale des interférences.

Globalement, les concentrations en Co et Ni (Tableau 4) sont en très bon accord avec les résultats fournis dans le rapport correspondant à la convention N°9105 (Octobre 2005). Par contre, les valeurs en Cu et Mn diffèrent considérablement puisqu'elles sont bien plus élevées que celles citées dans le rapport ci-dessus mentionné. Cette différence trouve une explication dans la technique de traitement des échantillons d'eau qui comporte une étape d'exposition aux rayons ultra-violets nécessaire pour la destruction des matières organiques qui complexent les éléments métalliques. Cette technique permet d'appréhender la concentration totale dissoute et augmente donc les valeurs de concentration en métaux organophilles comme Cu, voire Mn par rapport aux techniques faisant appel aux seules résines de préconcentration.

D'une manière générale, la distribution spatiale des éléments montre qu'il existe un gradient de concentration entre la Passe de la Havannah et le reste du domaine, les concentrations les plus élevées étant relevées à l'intérieur de la Baie du Prony. Seuls deux éléments, Cd et Co, sont en concentrations très homogènes dans tout le domaine d'études (Canal de la Havannah et Baie du Prony) y compris sur toute la profondeur de la colonne d'eau.

Les concentrations en manganèse dissous total se caractérisent par de grands écarts puisqu'elles sont comprises entre 0,07 µg/L (St12, Canal de la Havannah) sous l'influence des masses d'eau océaniques et 12,5 µg/L près des lignes de rivage (St17, Baie du Prony). Les valeurs obtenues le long de la colonne d'eau ne permettent pas de mettre en évidence une stratification des concentrations.

**Tableau 4 : Concentrations minimales, maximales et moyennes des principaux éléments métalliques détectés dans les eaux de mer du domaine étudié.**

|                            |         | Mg<br>(µg/L) | Cr<br>(µg/L) | Mn<br>(µg/L) | Fe<br>(µg/L) | Co<br>(µg/L) | Ni<br>(µg/L) | Cu<br>(µg/L) | Zn<br>(µg/L) | As<br>(µg/L) | Cd<br>(µg/L) | Pb<br>(µg/L) |
|----------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Domaine<br>entier          | Min     | -            | -            | 0,07         | -            | 0,03         | 0,25         | 0,09         | 0,96         | 0,54         | 0,02         | -            |
|                            | Max     | -            | -            | 5,05         | -            | 0,08         | 3,61         | 10,07        | 13,36        | 1,41         | 0,23         | -            |
|                            | Moyenne | -            | -            | 1,02         | -            | 0,04         | 0,81         | 1,42         | 3,64         | 0,98         | 0,07         | -            |
| Canal de<br>la<br>Havannah | Min     | -            | -            | 0,07         | -            | 0,03         | 0,27         | 0,09         | 0,99         | 0,54         | 0,02         | -            |
|                            | Max     | -            | -            | 5,05         | -            | 0,07         | 1,62         | 10,07        | 13,36        | 1,33         | 0,23         | -            |
|                            | Moyenne | -            | -            | 0,71         | -            | 0,04         | 0,56         | 1,44         | 3,78         | 0,92         | 0,07         | -            |
| Baie du<br>Prony           | Min     | -            | -            | 0,07         | -            | 0,03         | 0,25         | 0,10         | 0,96         | 0,79         | 0,03         | -            |
|                            | Max     | -            | -            | 4,79         | -            | 0,08         | 3,61         | 4,54         | 7,34         | 1,41         | 0,11         | -            |
|                            | Moyenne | -            | -            | 1,56         | -            | 0,04         | 1,24         | 1,37         | 3,35         | 1,03         | 0,07         | -            |

Pour Ni, une distribution très similaire permet de distinguer les aires d'influence océanique et terrigène. Si les valeurs les plus faibles (0,20 à 0,40 µg/L) sont observables près de la Passe de la Havannah, à l'intérieur du Canal les concentrations ne dépassent que ponctuellement 1,0 µg/L (St02-S, St06-M, St07-M,...). Dans la baie du Prony, les concentrations de Ni atteignent 3,61 µg/L (St17). D'une manière très globale, les eaux de mi-profondeur et de fond semble être relativement plus concentrées en Ni.

En ce qui concerne Cr, les concentrations mesurées sont toutes inférieures aux limites de détection des techniques chimiques et analytiques employées. Le chrome total n'étant pas mesurable, les concentrations en Cr(VI), obtenues par soustraction de Cr(III), ne sont pas quantifiables.

## Métaux associés aux sédiments

### Les sédiments

La fraction pélitique des sédiments, c'est-à-dire la population granulométrique inférieure à 40 µm est la plus réactive d'un point de vue géochimique notamment avec les métaux. Dans le domaine d'études, 16 des 18 stations ont été échantillonnées, les 2 dernières étant localisées sur des zones constituées de dalles calcaires (St04 et St11). La distribution spatiale des pélites est extrêmement variable selon la proximité des côtes (Tableau 5, Figure 4, Annexe 4). La fraction grossière des sédiments (> 40 µm) est principalement composée de débris coquilliers de grande taille et de sables (Annexe 4).

En effet, les sédiments peuvent être majoritairement composés de pélites (72,3% en St15), voire en contenir moins de 5% (St01, St02 et St09). Dans certains cas, les quantités ne sont que difficilement quantifiables (St03 et St12) ou encore inexistantes (St04, St11). D'une manière générale, un gradient dans la distribution pélitique est visible selon l'axe Nord-Est / Sud-Ouest du Canal de la Havannah, la zone proche de la Passe (St04, St10 et St14) ne contenant pas de pélites. A l'autre extrémité de la zone étudiée (St07), les sédiments renferment plus de 26% de matière particulaire fine. Ces valeurs contrastées montrent la diversité des conditions hydrodynamiques régnantes qui permettent localement la formation de lentilles de dépôts pélitiques.

Les sédiments de la station St06 sont logiquement plus riches en pélites (48,6 %) de par son positionnement dans la Baie Kwé.

Dans la Baie du Prony, 2 stations, positionnées sur des platiers montrent des teneurs faibles en pélites (St17 et St18) tandis que les station St15 et St16 sont composés majoritairement de pélites, respectivement 72,3 et 56,2 %.

**Tableau 5: Teneur en fraction pélitique (< 40µm) des sédiments échantillonnés dans le domaine d'étude ; (-) = Absence de matériel sédimentaire meuble.**

| Station  | St01 | St02 | St03 | St04 | St05 | St06 | St07 | St08 | St09 | St10 | St11 | St12 | St13 | St14 | St15 | St16 | St17 | St18 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| %Pélites | 4,2  | 1,2  | 0,6  | -    | 5,7  | 48,6 | 26,5 | 1,1  | 2,7  | 0,0  | -    | 0,6  | 47,9 | 0,6  | 72,3 | 56,2 | 9,7  | 9,0  |

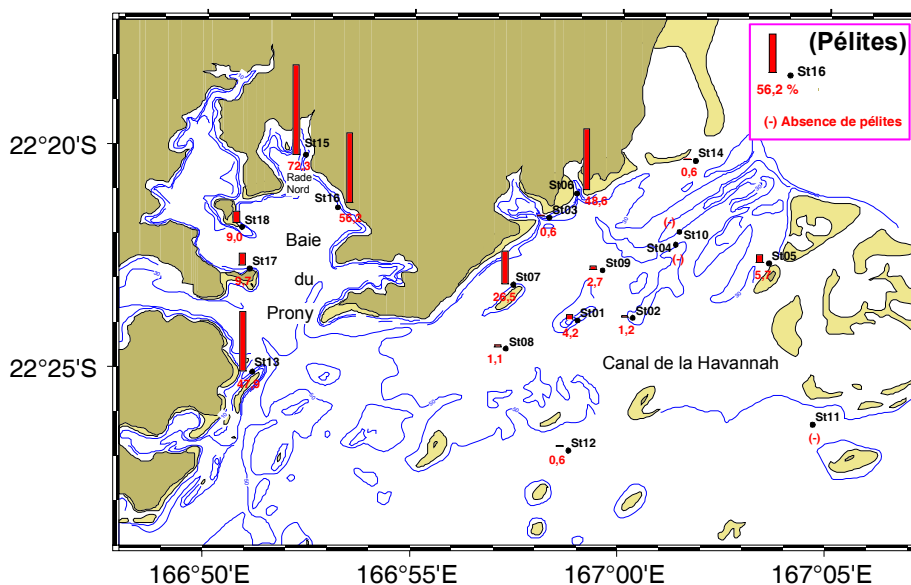


Figure 4 : Carte distribution spatiale des pélites dans les sédiments du domaine étudié. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la masse du sédiment échantillonné.

## Les métaux dans les sédiments

### Métaux totaux

L'analyse des métaux totaux contenus dans la fraction pélitique des sédiments a été conduite pour 15 sites sur les 18 stations initialement prévues (Tableau 6, Annexe 5). En effet, 3 prélèvements n'ont pas pu être effectués faute de matériel sédimentaire au niveau des stations St04 et St11 ou en raison de la quantité infime de pélites que l'échantillon renfermait (St10).

Les teneurs des éléments Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn et Ni ont été déterminées, les éléments As, Cd, Pb et Zn ne se présentant pas en quantité suffisante dans les pélites, ils n'ont pu être dosés correctement, leurs concentrations dans les solutions issues de la fusion alcaline étant inférieures aux limites de détection de l'appareil.

A l'exception de Ca qui peut être considéré comme un marqueur de l'influence marine, les distributions spatiales des éléments Co, Cu, Cr, Fe et Ni sont identiques à celle du manganèse illustrée par figure 6. Ces analyses permettent de distinguer d'une part, les fonds du Canal de la Havannah et la frange côtière de celui-ci et d'autre part, la Baie du Prony et la Rade Nord.

Les exemples du manganèse et du nickel, dont les concentrations dans le domaine étudié sont respectivement comprises dans les gammes 38,0-2485,0  $\mu\text{g/g}$  et 21,0-4107,0  $\mu\text{g/g}$ , fournissent une bonne appréciation de l'extension des secteurs sous influence terrigène. En effet, il apparaît que :

- Dans la zone centrale du Canal, les dépôts sont très peu marqués par les apports particuliers terrigènes puisqu'ils contiennent au plus, environs 300,0  $\mu\text{g/g}$  de Mn et 430,0  $\mu\text{g/g}$  de Ni au niveau des stations St08 et St09 proches de la côte ; les moyennes dans la zone étudiées étant respectivement de 134,4  $\mu\text{g/g}$  et 118,4  $\mu\text{g/g}$ , les valeurs minimales n'atteignant pas les 50  $\mu\text{g/g}$  pour Mn et 25  $\mu\text{g/g}$  pour Ni.
- Le long de la frange littorale Nord qui borde le Canal, les valeurs maximales mesurées augmentent pour atteindre respectivement 658,0  $\mu\text{g/g}$  pour Mn et 1116,6  $\mu\text{g/g}$  pour Ni.

Ces niveaux de concentration, dont le maximum est relevé en St06, soulignent la proximité des sources d'apports terrigènes comme la rivière Kwé.

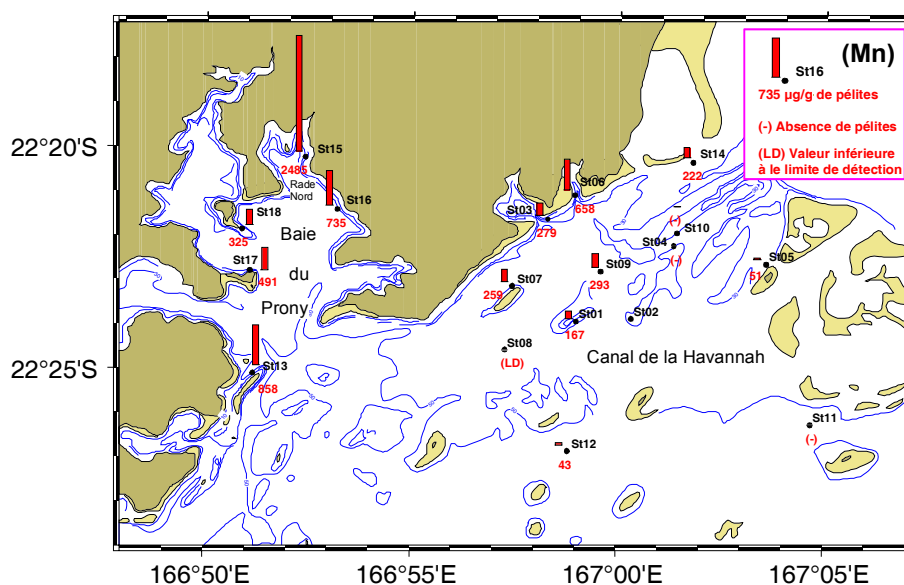
- Dans la Baie du Prony, les concentrations augmentent considérablement et sont comprises dans les gammes 325,0 - 2485,0 µg/g pour Mn et 569,0 - 4107,0 µg/g pour Ni, les valeurs maximales pour les deux métaux étant enregistrées en St15, station située au fond de la Rade Nord.

Le chrome qui se présente majoritairement sous la forme de chromites, est principalement localisé aux abords immédiats des termes sources, ce qui explique en particulier, les très fortes valeurs rencontrées dans la Rade Nord (St15 ; 16575 µg/g).

En ce qui concerne Cu, exception faite des stations St15 (286,0 µg/g) et dans une moindre mesure St06 (94,0 µg/g), les concentrations moyennes de cuivre sont de l'ordre de 14,0 µg/g dans le Canal et de 113,8 µg/g en Baie du Prony. Ces niveaux s'expliquent par les faibles teneurs en Cu dans les apports terrigènes et les phénomènes de dilution du matériel particulaire additionnels.

**Tableau 6 : Concentrations minimales, maximales et moyennes des principaux éléments métalliques détectés dans les sédiments du domaine étudié.**

| Site                    | Concentration                   | Ca<br>(mg/g) | Co<br>(µg/g) | Cu<br>(µg/g) | Cr<br>(µg/g) | Fe<br>(mg/g) | Mn<br>(µg/g) | Ni<br>(µg/g) |
|-------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Canal de la<br>Havannah | Min                             | 256,5        | 12,0         | 6,0          | 48,0         | 0,4          | 38,0         | 21,0         |
|                         | Max Canal                       | 337,9        | 27,0         | 21,0         | 1249,0       | 42,4         | 293,0        | 430,0        |
|                         | Max Canal +<br>frange littorale | 337,9        | 67,0         | 94,0         | 3326,0       | 112,5        | 658,0        | 1116,0       |
|                         | Moyenne                         | 300,1        | 14,0         | 13,5         | 465,8        | 16,4         | 141,8        | 183,7        |
| Baie du<br>Prony        | Min                             | 40,4         | 33,0         | 17,0         | 1662,0       | 43,6         | 325,0        | 569,0        |
|                         | Max                             | 346,3        | 274,0        | 286,0        | 16575,0      | 381,5        | 2485,0       | 4107,0       |
|                         | Moyenne                         | 168,9        | 113,8        | 115,3        | 5231,4       | 142,3        | 978,8        | 1890,8       |



**Figure 5 : Distribution spatiale type des métaux dans les pérites des sédiments de surface: exemple du manganèse total**

## Métaux dans les phases géochimiques

Sur les 18 stations initiales, seulement 11 ont pu être échantillonnées de manière satisfaisante pour permettre la séparation des fractions pélitiques en quantités suffisantes et l'application du protocole d'extractions séquentielles (Tableau 7, Annexe 6).

**Tableau 7 : Ecart des concentration de Co, Cr, Fe, Mn et Ni dans les 4 phases géochimiques des pélites constitutives des échantillons St01, St02, St05, St06, St07, St09, St13, St15, St16, St17 et St18 ; (< ld) = Valeurs inférieure à la limite de détection de mesure.**

| Phase      | Valeur | Co   |      | Cr    |      | Fe     |      | Mn   |      | Ni   |      |
|------------|--------|------|------|-------|------|--------|------|------|------|------|------|
|            |        | µg/g | %    | µg/g  | %    | µg/g   | %    | µg/g | %    | µg/g | %    |
| Organique  | Min    | 1    | 0,8  | 2     | 0,0  | 14     | 0,0  | 16   | 2,1  | 6    | 0,3  |
|            | Max    | 8    | 31,9 | 36    | 6,4  | 48     | 0,1  | 156  | 21,0 | 19   | 10,0 |
| Carbonates | Min    | < ld | 0,0  | 2     | 0,1  | 4      | 0,0  | 76   | 29,0 | < ld | 0,0  |
|            | Max    | 25   | 9,2  | 13    | 3,2  | 77     | 0,2  | 720  | 56,0 | 64   | 3,6  |
| Oxydes     | Min    | < ld | 0,0  | 5     | 0,1  | 273    | 0,2  | 12   | 5,4  | 10   | 1,1  |
|            | Max    | 54   | 19,5 | 25    | 3,9  | 2411   | 4,9  | 327  | 13,1 | 133  | 16,6 |
| Résidu     | Min    | 8    | 68,1 | 353   | 87,2 | 15788  | 94,9 | 43   | 14,8 | 64   | 69,8 |
|            | Max    | 194  | 93,4 | 16535 | 99,8 | 380823 | 99,8 | 1282 | 51,9 | 4009 | 97,6 |

Globalement, la répartition des métaux dans les phases géochimiques est assez similaire à celle mise en évidence dans les sédiments de la Baie de Boulari (Fernandez et al., 2005). Cette similarité est particulièrement prononcée pour les fractions organiques et carbonatées dont les métaux sont facilement accessibles.

### Métaux liés à la matière organique

Géographiquement, la distribution des métaux contenus dans la phase organique des pélites est assez homogène et ne permet pas pour certains éléments comme Fe, Ni et Cr de différencier le Canal de la Havannah et la Baie du Prony (Annexes 6). Toutefois, malgré les fortes teneurs en pélites, on observe des concentrations en Cr particulièrement faibles dans la Rade Nord. Ces niveaux peuvent être expliqués par la forme du chrome qui, présent sous la forme de chromite, est solubilisable selon une cinétique très lente et donc met en solution progressivement du chrome qui sera repris par les organismes. Par ailleurs, il est à noter qu'un autre paramètre explicatif peut être la matière organique du sédiment dont la teneur n'a pas été déterminée. Le manganèse se singularise par des concentrations très faibles souvent bien inférieures à 20 µg/g dans le Canal (Exception faite de St09 et St06 où les valeurs atteignent respectivement 38,9 et 47,5 µg/g) et 2 à 5 fois plus élevées dans la Baie du Prony (155,9 µg/g en St15).

D'un point de vue quantitatif (Tableau 7), les métaux dans les phases organiques des sédiments sont présents dans des proportions variables d'un élément à l'autre. Ainsi, le cobalt complexé avec les composés organiques peut représenter plus de 30% de la totalité de cet élément dans les pélites de la zone d'expansion de la rivière (St06), soit 8,4 µg/g. Les concentrations de manganèse sont généralement peu élevées dans le Canal de la Havannah (17,7 - 47,5 µg/g) ce qui représente environs 5% de la quantité totale. Cette proportion est à peine plus importante dans la Baie du Prony (St15 et St16) avec respectivement 6 et 14 % ce qui correspond à 155,0 µg/g et 103,3 µg/g. Le pourcentage de nickel dans les complexes organiques est généralement bien inférieur à 5%, exception faite de la St09 où cette proportion double. Les quantités de fer et de chrome dans les phases organiques des pélites sont tellement faibles qu'elles ne représentent que 0,1 % pour Fe et moins de 2 % pour Cr dans la majorité des pélites analysées.

### *Métaux liés aux carbonates*

La répartition géographique des métaux liés aux carbonates diffère selon que l'on considère Cr, Ni ou Fe et Mn (Annexes 6). Ainsi, les concentrations de Ni sont négligeables dans le Canal de la Havannah ( $< 3,3 \mu\text{g/g}$ ), avec un maximum en St06 à  $9,6 \mu\text{g/g}$ . Dans la Baie du Prony, les carbonates sont un peu plus enrichis puisque les valeurs peuvent atteindre  $41,5$  et  $64,0 \mu\text{g/g}$  aux stations St13 et St15. Le chrome, bien que sa distribution dans les carbonates n'obéisse pas à une logique géographique bien déterminée, semble être absent des prélèvements localisés à l'entrée de la Passe de la Havannah, c'est-à-dire non directement soumis aux apports terrigènes issus de la Grande Terre. Fer et manganèse, se distribuent de manière semblable bien que les valeurs les plus fortes en manganèse soient relevées dans la Baie du Prony, contrairement au fer.

Les quantités de manganèse dans les carbonates sont faibles. Cependant, elles représentent entre  $36,8$  et  $56,0 \%$  dans le Canal de la Havannah et de  $29,0$  à  $44,1 \%$  en Baie du Prony du manganèse total (Tableau 6). A l'inverse, le fer des carbonates représente une fraction infime puisqu'il ne dépasse pas les  $0,2 \%$  du fer total, les concentrations étant ponctuellement plus élevées que la moyenne (St13 ;  $68,7 \mu\text{g/g}$  et St06 ;  $76,9 \mu\text{g/g}$ ). Chrome et nickel des carbonates ne représentent respectivement que  $3,2$  et  $3,6 \%$  au maximum, les valeurs moyennes se situant bien en dessous de  $1\%$  pour les deux métaux.

### *Métaux liés aux oxy-hydroxydes*

La formation des oxy-hydroxydes dicte la répartition des métaux qui leur sont liés. Ces phases géochimiques se forment en particulier, à proximité des zones d'apports terrigènes, comme les estuaires, ou dans les grands fonds océaniques. Cette propriété dicte la distribution géographique des oxy-hydroxydes et de ce fait celle des métaux associés (Annexes 6). Le nickel et en particulier le chrome sont plus concentrés dans la Baie du Prony ( $16,4$  à  $132,8 \mu\text{g/g}$  pour Ni et  $8,9$  à  $25,4 \mu\text{g/g}$  pour Cr) que dans le Canal de la Havannah ( $< 15 \mu\text{g/g}$  pour Ni et  $< 15,8 \mu\text{g/g}$  pour Cr). Il en est de même pour le fer et dans une moindre mesure du manganèse. Ce dernier est très peu concentré dans cette phase géochimique, la valeur moyenne étant inférieure à  $10 \mu\text{g/g}$  et la maximale en St09 égale à  $38,8 \mu\text{g/g}$ .

Les métaux liés aux oxy-hydroxydes sont en proportions variables dans les pélites (Tableau 6) ; les valeurs maximales sont comprises entre  $3,9 \%$  pour Cr et  $19,5 \%$  pour le Co. Le manganèse est un des principaux composés des oxy-hydroxydes, il représente dans cette phase  $5,4$  à  $13,1 \%$  du métal contenu dans les pélites, tout comme le nickel dont les teneurs sont comprises entre  $1,1$  et  $16,6 \%$ .

### *Métaux liés aux résidus*

Les métaux de cette dernière phase géochimique du protocole d'extractions séquentielles sont les éléments constitutifs des particules principalement terrigènes. Ils peuvent être considérés comme une signature utilisable pour suivre le transport des matières en suspension d'origine naturelle introduites dans le système. Les résultats montrent donc de manière évidente les différentes sources que sont les émissaires naturels qui débouchent dans la zone du Canal de la Havannah, comme la rivière Kwé (St06) ou l'ensemble du réceptacle que constitue la Baie du Prony et particulièrement la Rade Nord alimentée par la rivière Kadji. Géographiquement, les concentrations se distribuent de manière identique pour tous les éléments analysés. En effet, elles permettent de distinguer (Tableau 8, Annexe 6) :

- La zone centrale occupée par le Canal de la Havannah avec des concentrations faibles et la Baie de la Kwé où les métaux sont en moyennes 5 fois concentrés ;
- La Baie du Prony dont les concentrations sont proches de celles trouvées dans la Baie de Kwé et la Rade Nord, fortement influencée par les apports terrigènes.

Tableau 8 : Concentrations moyennes dans les phases résiduelles des pélites.

|           | Canal Havannah<br>(µg/g) | Baie de la Kwé<br>(µg/g) | Baie du Prony<br>(µg/g) | Rade Nord<br>(µg/g) |
|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Co</b> | 14,2                     | 56,1                     | 56,7                    | 193,7               |
| <b>Cr</b> | 524                      | 3291                     | 2364                    | 16535               |
| <b>Fe</b> | 22098                    | 112131                   | 81207                   | 380823              |
| <b>Mn</b> | 74,5                     | 341,2                    | 240,1                   | 1281,8              |
| <b>Ni</b> | 176                      | 1075                     | 1254                    | 4009                |

D'un point de vue quantitatif, pour les éléments les moins solubles comme Cr, cette phase géochimique peut contenir jusqu'à 99,8 % du métal (Tableau 6) ; pour les autres éléments les pourcentages sont compris entre 68,1 et 97,6 %. Le manganèse fait exception à cette répartition puisque les phases résiduelles peuvent ne contenir que 14,8 à 51,9 % du métal total. En moyenne, les phases résiduelles des dépôts correspondant à la Baie du Prony ou proche des émissaires naturels contiennent jusqu'à 10 % de métal en plus que les pélites du Canal de la Havannah.

Globalement, les distributions de métaux issus de cette phase géochimique résiduelle et des pélites, sont en bonne correspondance.

Les niveaux de concentrations mesurés sont de l'ordre de grandeur des valeurs obtenues pour d'autres systèmes comme la Baie de Boulari (Fernandez et al, sous-presse). Toutefois, si les teneurs de Co et Ni voire Mn sont équivalentes dans les deux systèmes, Cr est 6 fois plus concentré dans la fraction résiduelle des pélites de la Baie du Prony alors que, à l'inverse, les concentrations de Fe sont de moitié inférieures.

## Conclusions

De l'ensemble des résultats obtenus sur les métaux, il est possible de conclure que :

- La Baie du Prony et les franges côtières du domaine étudié sont relativement riches en pélites (jusqu'à 72%), teneurs qui augmentent avec la profondeur. A l'inverse, les fonds Nord-Ouest du Canal de la Havannah sont constitués en général de matériel sédimentaire à très faibles teneurs en pélites (< 6 %). Par ailleurs, certains secteurs sont quasiment composés de dalles carbonatées au fur que l'on se rapproche de la Passe.
- Les plus faibles concentrations en métaux correspondent généralement avec les sédiments pélitiques qui composent les dépôts meubles du Canal.
- Ces deux dernières observations suggèrent que peu de particules fines sont capables de sédimenter dans le Canal et de plus qu'une très faible proportion d'entre elles aura une origine terrigène. En effet, le transport des particules terrigènes semble être limité à une frange côtière assez restreinte d'un point de vue spatial, seule la Baie du Prony est probablement alimentée en permanence par du matériel particulaire terrigène.

- Les apports en matière terrigène constituent une réserve d'éléments métalliques qui avec le temps vont pouvoir être redistribués sous des formes géochimiques diverses, d'abord dissoutes, avant de se recombinaient avec les phases particulaires. Selon les éléments, et le comportement du manganèse le démontrent clairement, une fraction non négligeable peut rapidement se retrouver dans les phases organiques ou carbonatées, donc disponibles.
- Les concentrations en éléments métalliques totaux ramenées au gramme de sédiment brut sont particulièrement faibles dans tout le Canal de la Havannah en raison notamment de l'effet de la dilution particulaire (Tableau 8). Ailleurs, le long de la frange littorale, les concentrations varient en fonction de l'importance de la fraction pélitique.

**Tableau 9 : Concentration en métaux totaux exprimées par gramme de sédiment brut échantillonné ; (-) = Absence de pérites ; (< ld) = Valeur d'analyse inférieure à la limite de détection de l'ICP-OES.**

| Station | Pelites (%) | Co (µg/g)                                         | Cu (µg/g) | Cr (µg/g) | Fe (mg/g) | Mn (µg/g) | Ni (µg/g) |
|---------|-------------|---------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| St01    | 4,2         | 0,58                                              | 0,25      | 23,3      | 0,92      | 6,9       | 6,9       |
| St02    | 1,21        | < ld                                              | < ld      | 0,6       | 0,005     | 0,46      | 0,25      |
| St03    | 0,57        | 0,21                                              | < ld      | 6,6       | 0,26      | 1,6       | 2,9       |
| St04    | -           | Pas de présence de sédiment meuble sur la station |           |           |           |           |           |
| St05    | 5,75        | 0,69                                              | < ld      | 2,9       | 0,56      | 2,9       | 5,7       |
| St06    | 48,58       | 32,6                                              | 45,7      | 1616      | 54,7      | 320       | 542       |
| St07    | 26,52       | 7,2                                               | 5,6       | 331,2     | 11,2      | 68,7      | 114,0     |
| St08    | 1,09        | 0,033                                             | < ld      | < ld      | 0,032     | < ld      | < ld      |
| St09    | 2,71        | 0,33                                              | < ld      | 11,0      | 0,45      | 7,9       | 2,5       |
| St10    | -           | Pas de présence de sédiment meuble sur la station |           |           |           |           |           |
| St11    | -           | Pas de présence de sédiment meuble sur la station |           |           |           |           |           |
| St12    | 0,60        | 0,10                                              | < ld      | 2,9       | 0,12      | 0,26      | 1,8       |
| St13    | 47,93       | 59,4                                              | < ld      | 814       | 46,8      | 411       | 1191      |
| St14    | 0,01        | 0,04                                              | < ld      | 1,9       | 0,05      | 0,2       | 0,9       |
| St15    | 72,25       | 198                                               | 207       | 11976     | 276       | 1795      | 2967      |
| St16    | 56,19       | 47,8                                              | < ld      | 2270      | 63,0      | 413       | 709       |
| St17    | 9,74        | 5,2                                               | 4,2       | 213       | 7,5       | 47,8      | 101       |
| St18    | 9,00        | 3,0                                               | 1,5       | 150       | 3,9       | 29,2      | 51,2      |

## CONCLUSION

Le domaine étudié qui s'étend de la Passe de la Havannah à toute la Baie du Prony permet de mettre en évidence :

- Une zone d'influence océanique qui occupe l'ensemble du Canal de la Havannah. Cette aire se caractérise par des teneurs faibles, tant en sels nutritifs qu'en métaux, et la présence d'un gradient de concentration orienté NE-SW. Par ailleurs, la nature des fonds analysés laisse supposer l'existence d'une hydrodynamique soutenue qui s'atténue en direction du Sud-Ouest ;
- Une aire d'influence fortement terrigène, constituée par la Baie du Prony et particulièrement, sa Rade Nord. Dans cette dernière, l'importance des apports en matériel particulaire et la faible hydrodynamique qui résulte du confinement du

système, conduit aux teneurs élevées mesurées tant pour les métaux que les sels nutritifs ;

- Une zone de mélange entre les systèmes océanique et terrigène semble se constituer au niveau de la sortie de la Baie du Prony et s'étend jusqu'au centre du Canal de la Havannah.

D'un point de vue du suivi temporel des niveaux de concentrations, il apparaît nécessaire de focaliser l'attention :

- Sur la Rade Nord en ce qui concerne l'impact des apports terrigènes, ceux générés par l'ensemble des activités humaines dont les rejets domestiques (St15) et celles relevant des installations portuaires (St16) : les stations St17 et St18 sont de ce fait nécessaires à suivre ;
- Le secteur du Canal de la Havannah localisé au Sud-Ouest du futur emplacement de l'émissaire industriel montre l'existence de zones de concentration potentielle des métaux qu'il conviendra de considérer attentivement tant au niveau de la colonne d'eau que des dépôts sédimentaires (St07, St08 et St01). Dans le secteur nord-est, l'influence océanique est prédominante et semble se caractériser par un renouvellement des eaux intense (Figure 4).

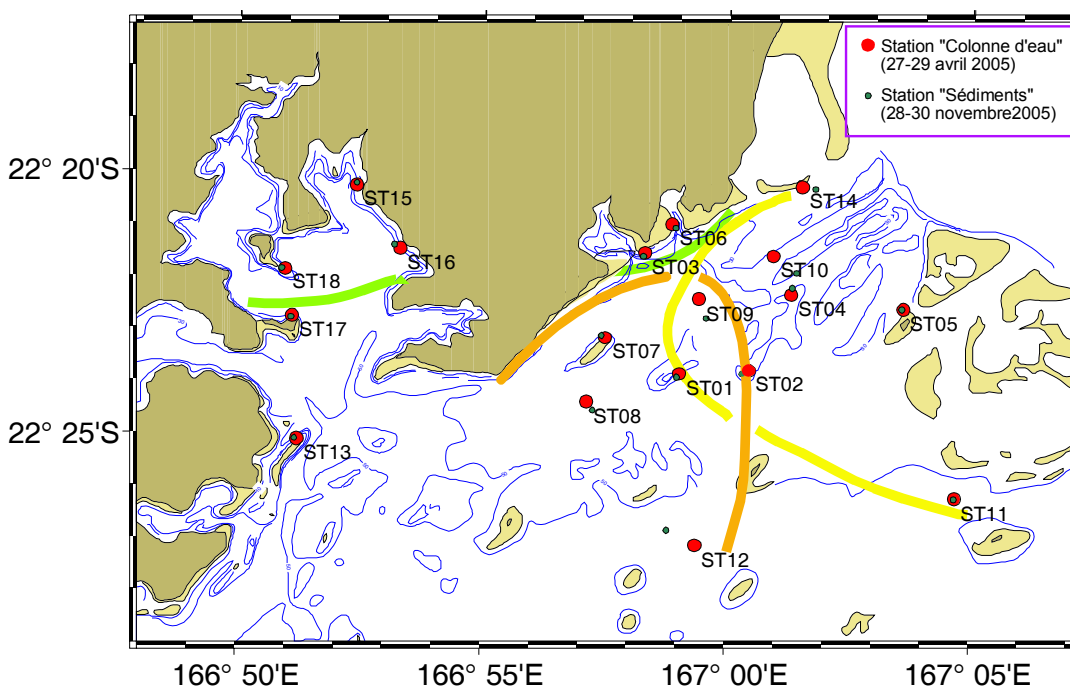


Figure 6 : Carte de la structure horizontale des masses d'eaux dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony

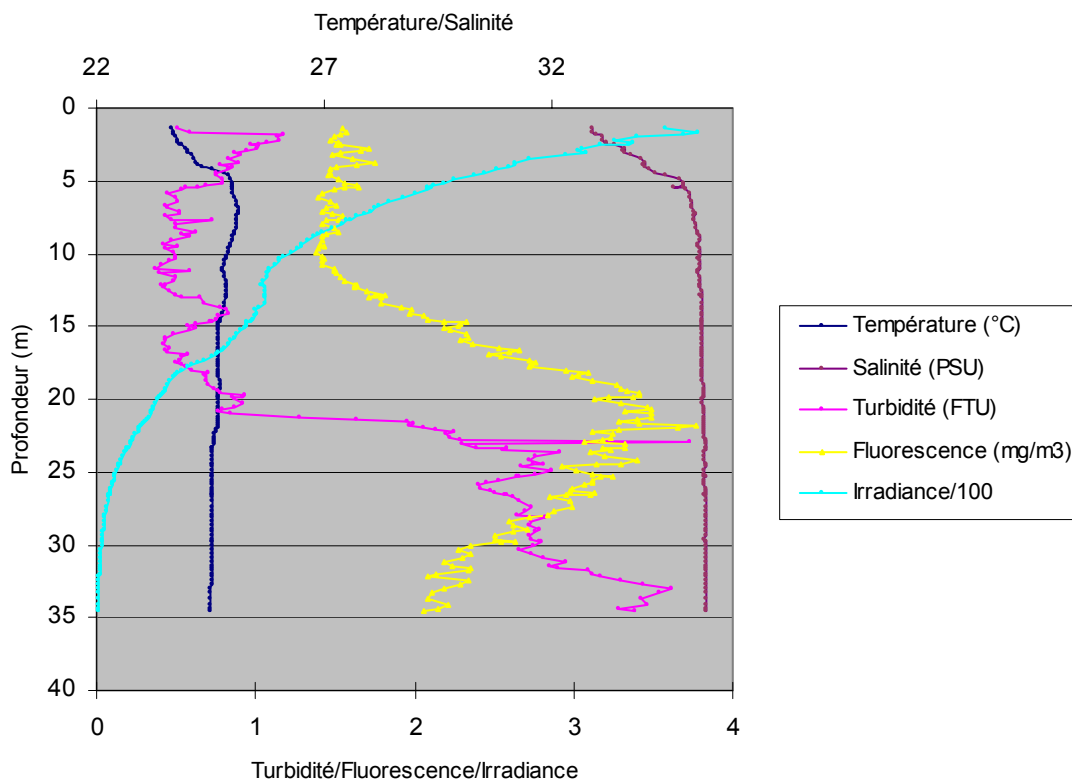
## ANNEXE 1

### Principales caractéristiques physico-chimiques : Profils CTD obtenus avec une sonde multiparamétrique SBE 19.

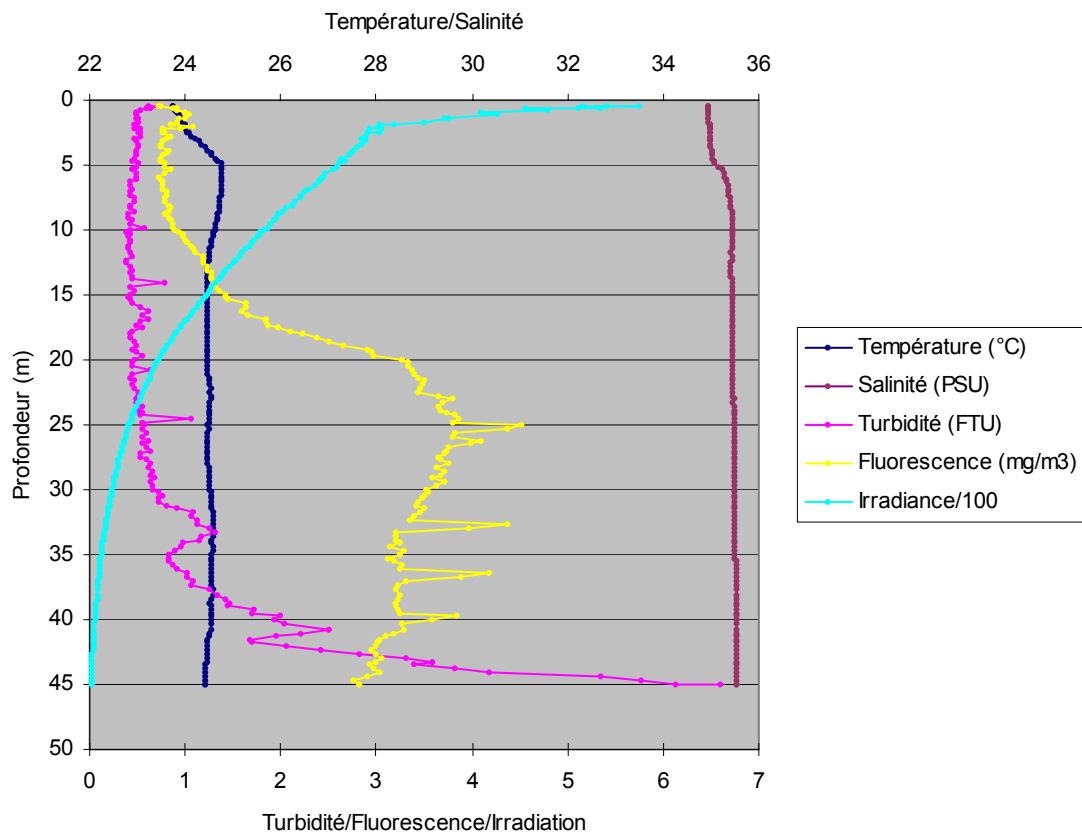
Les valeurs des paramètres température, salinité, turbidité, fluorimétrie et irradiance sont regroupées par unité physiographique, les profils :

- St13, St15, St16, St17 et St18 correspondent aux eaux de la Baie du Prony ;
- St03 et St06 décrivent les eaux de la frange littorale du Canal de la Havannah ;
- St01, St02, St07, St08, St09 et St12 sont représentatifs des eaux intermédiaires du Canal;
- St04, St05, St11 et St14 sont proches de la signature des eaux océaniques.

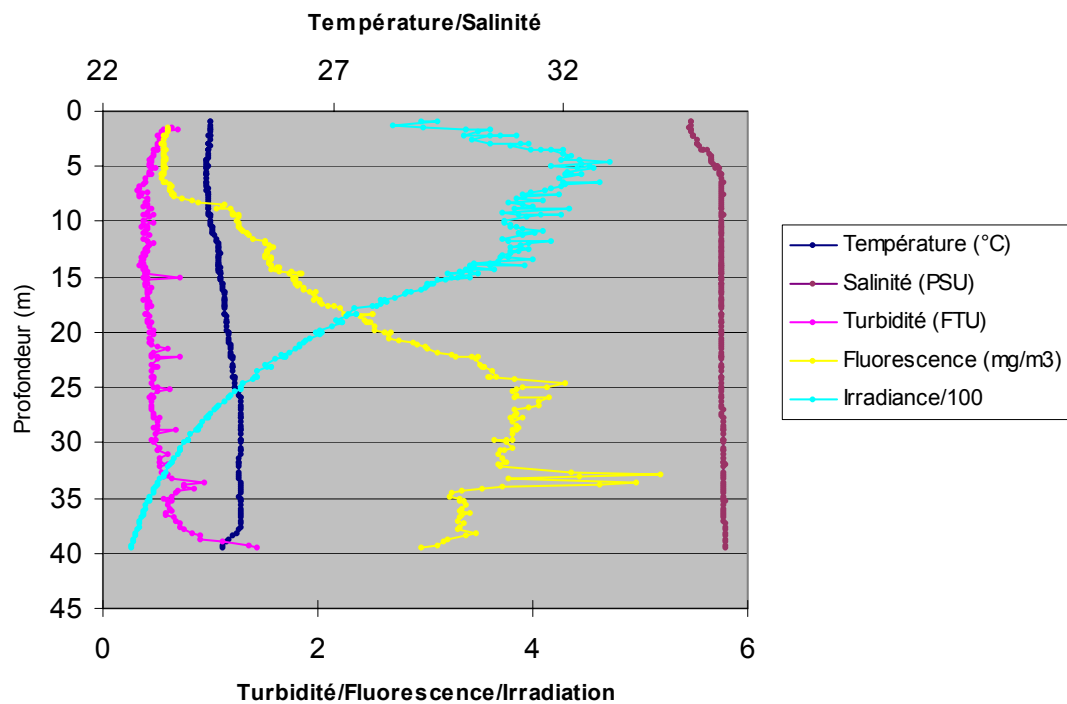
#### St 15



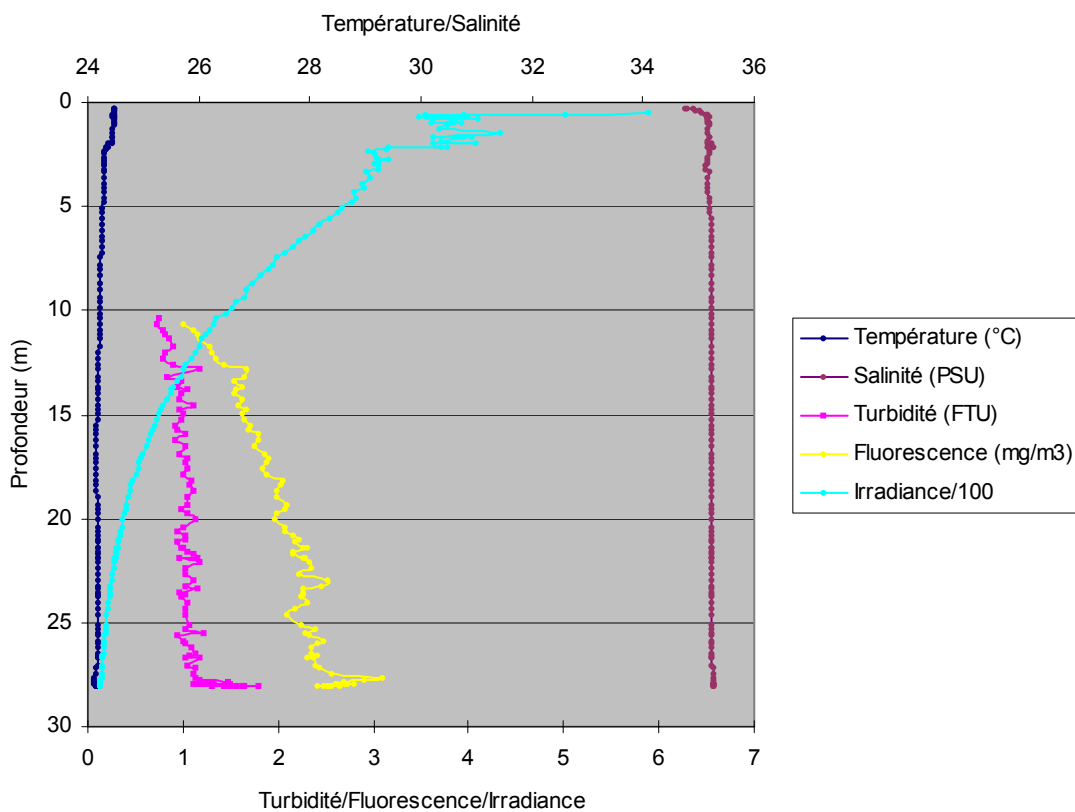
### St16



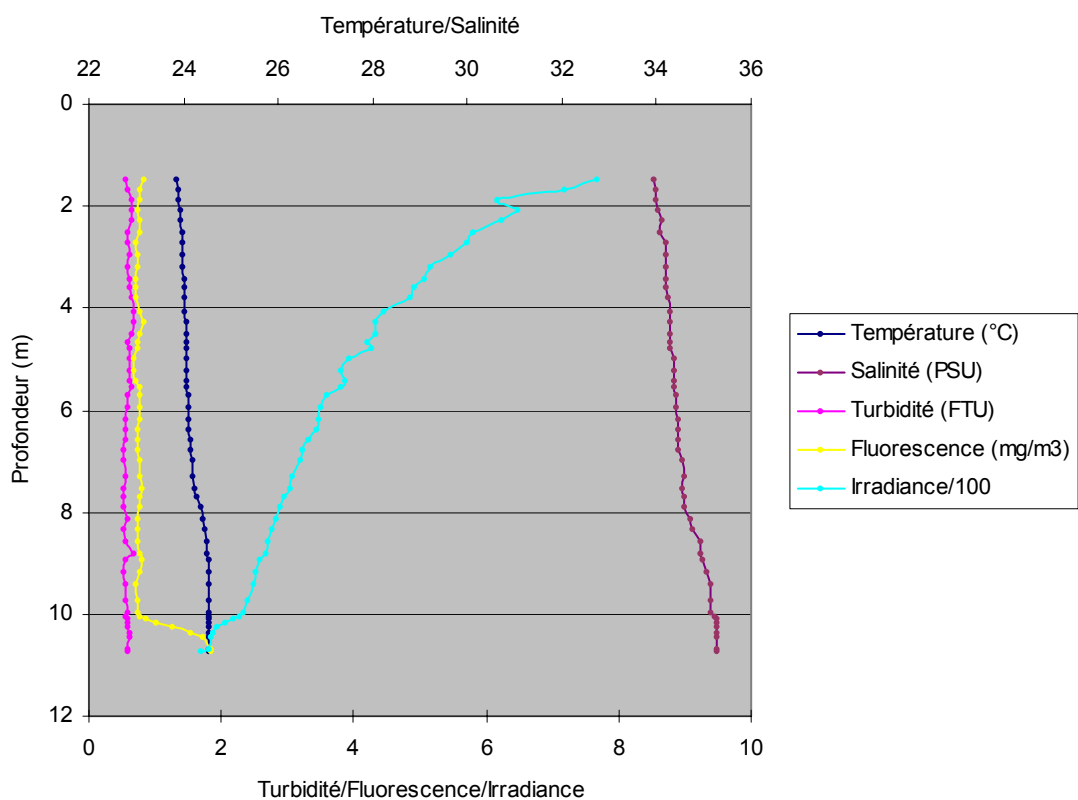
### St 18



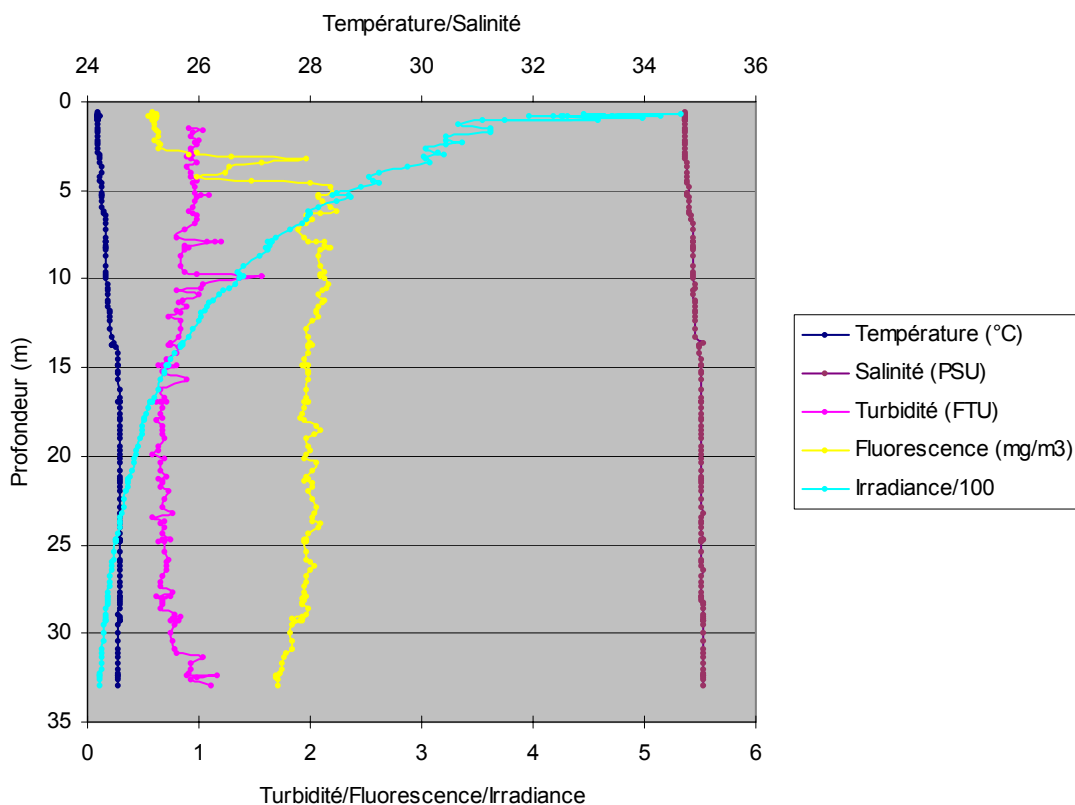
### St13



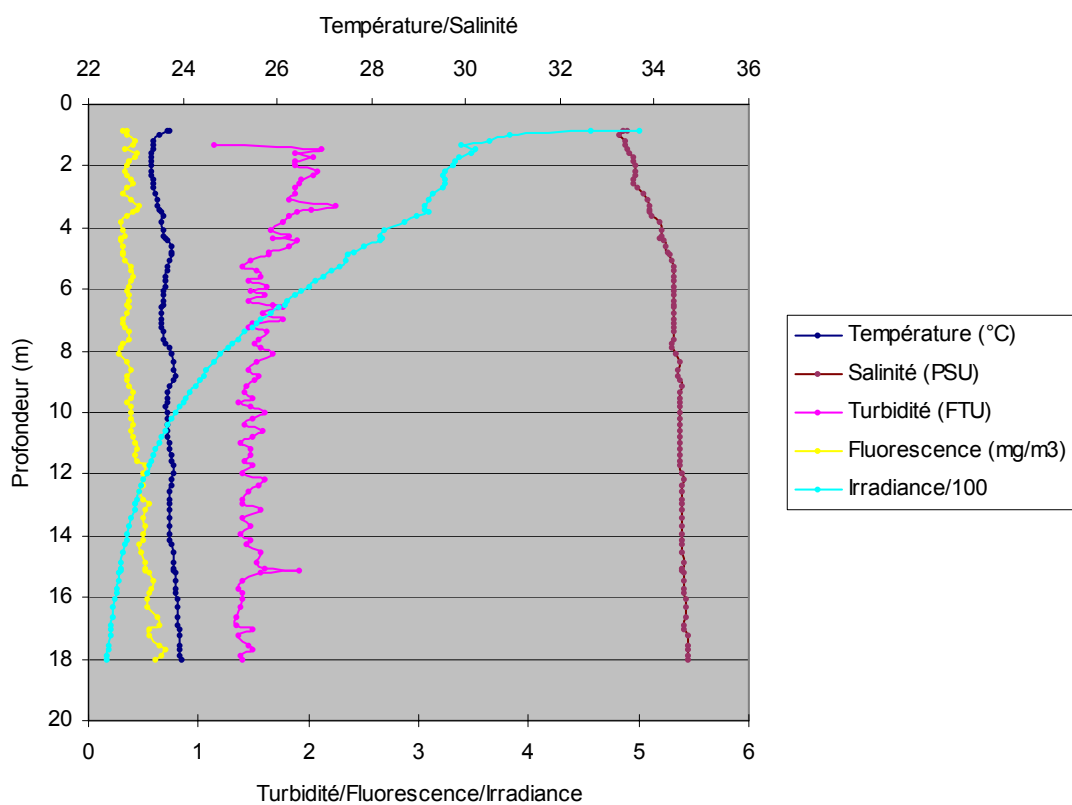
### St17



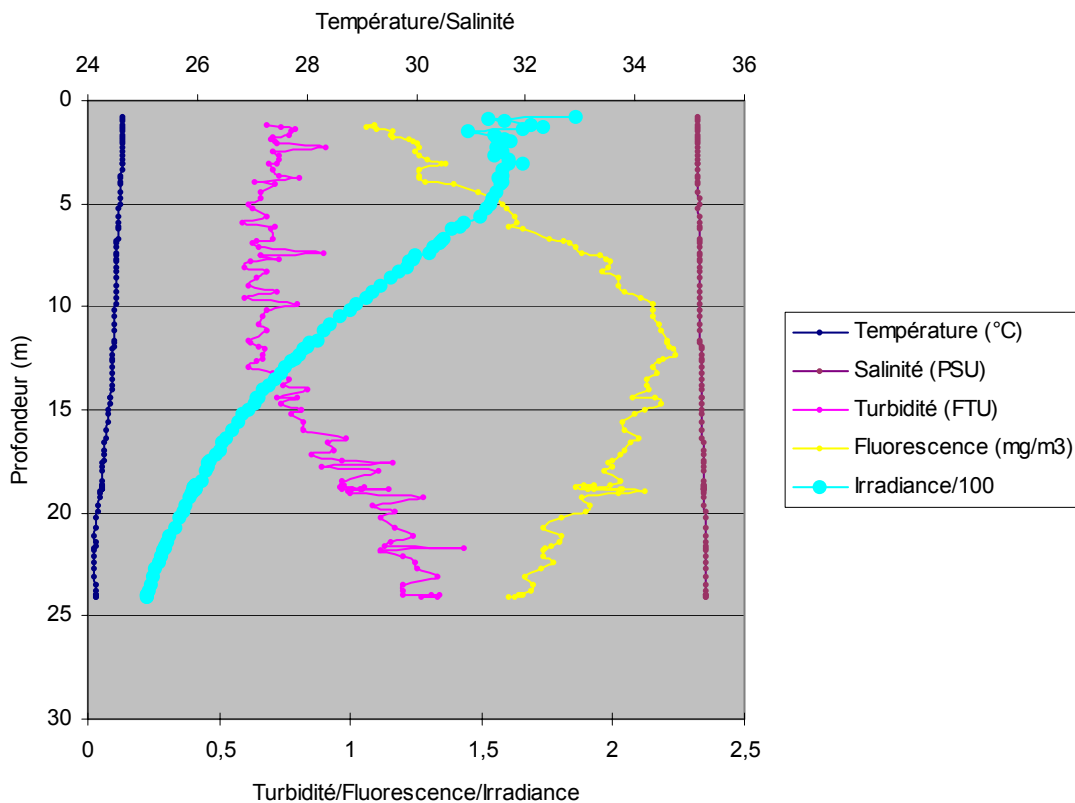
### St03



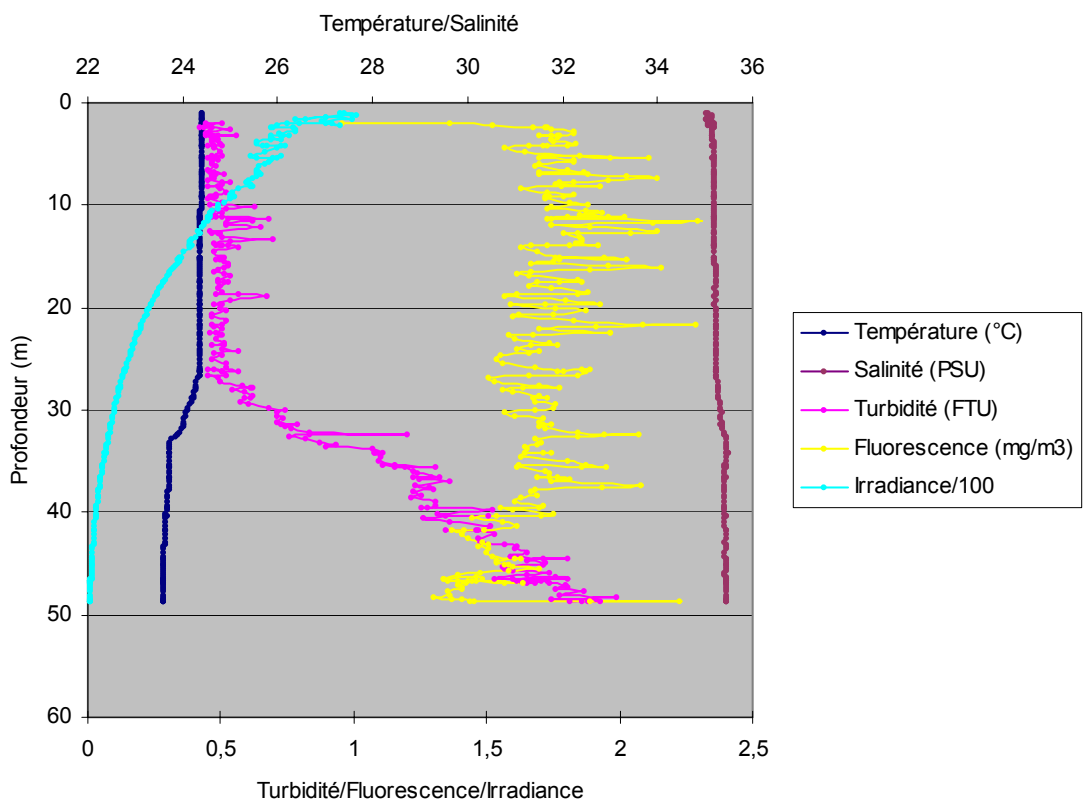
### St06



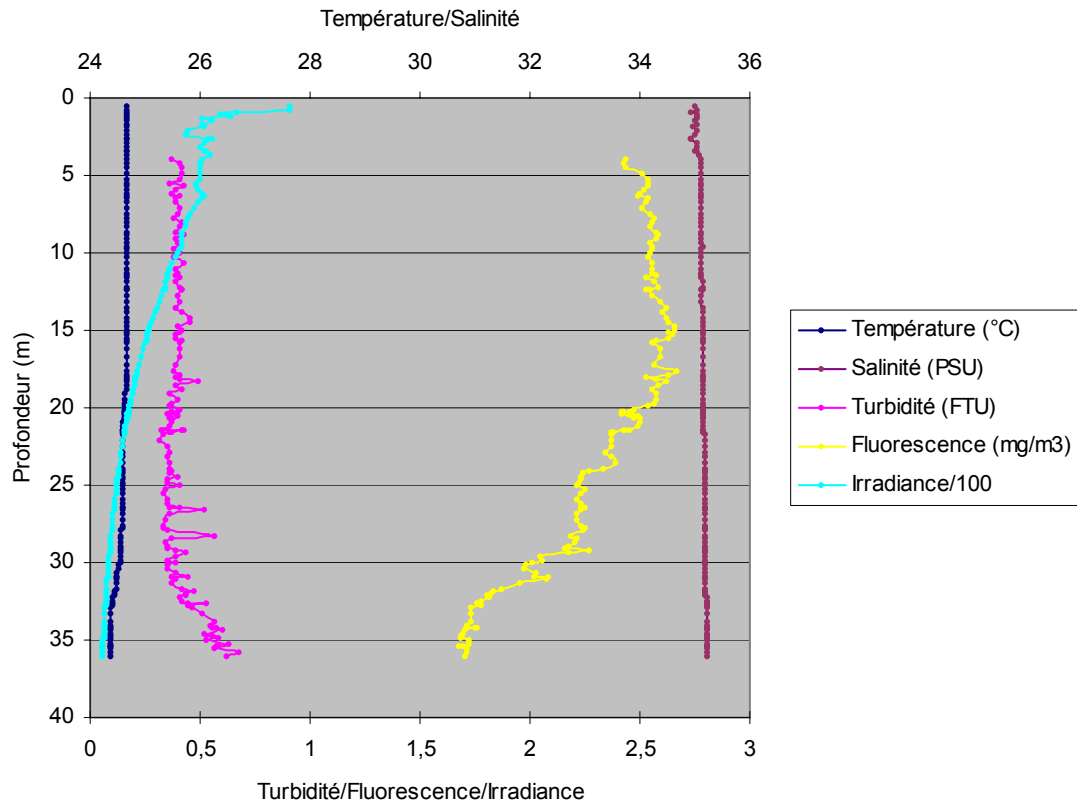
### St07



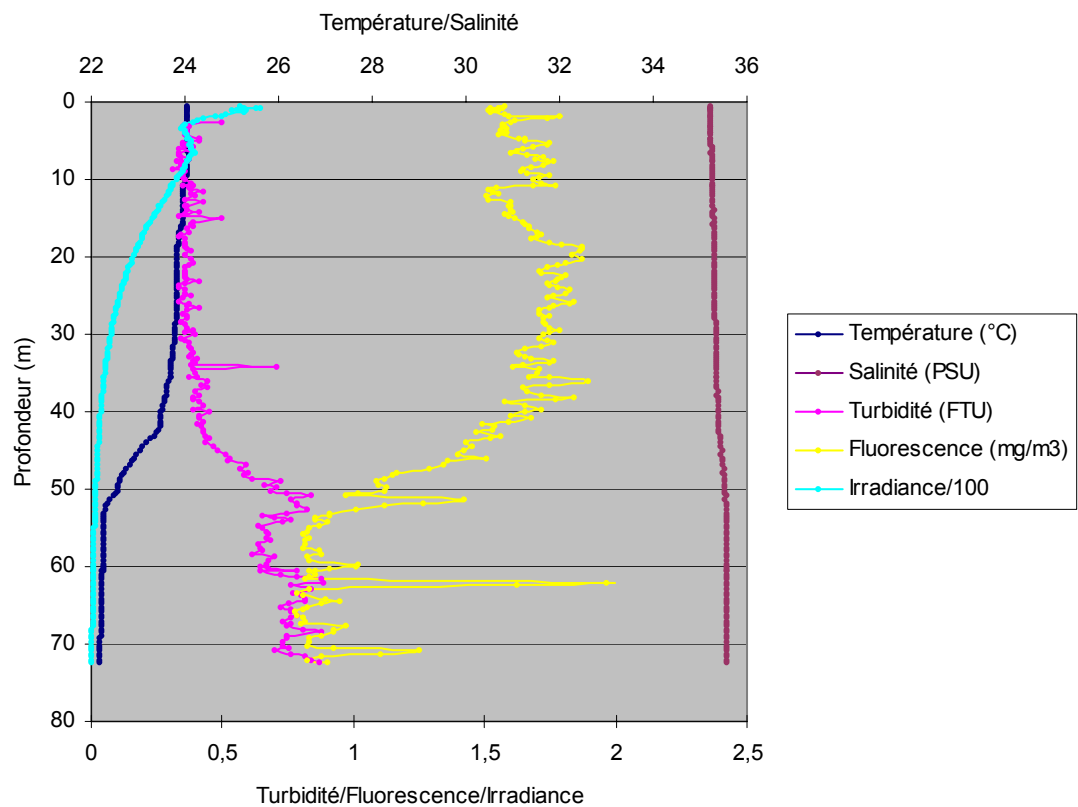
### St08



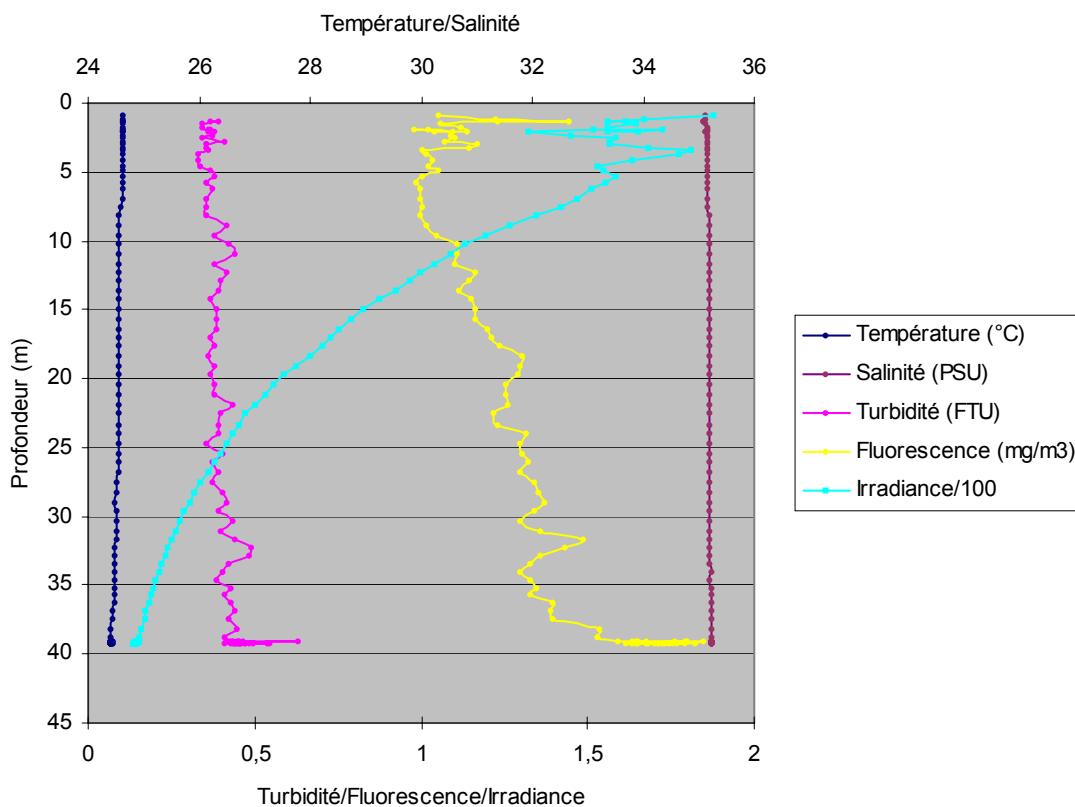
### St09



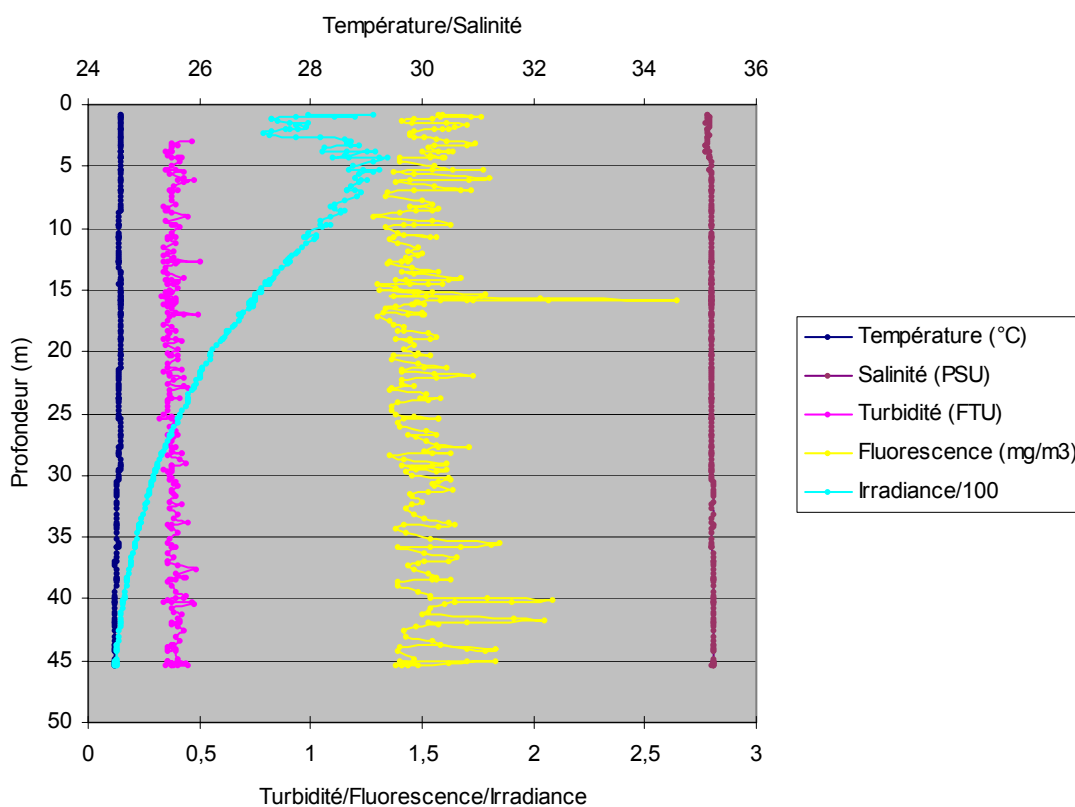
### St12



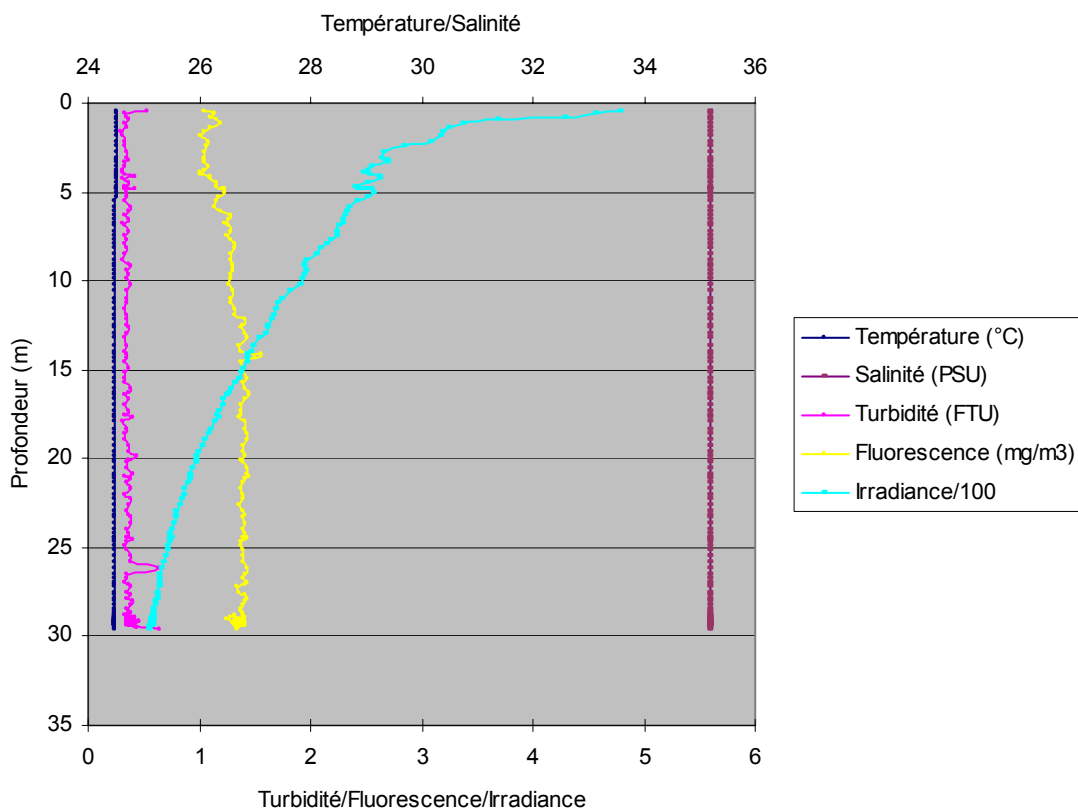
### St01



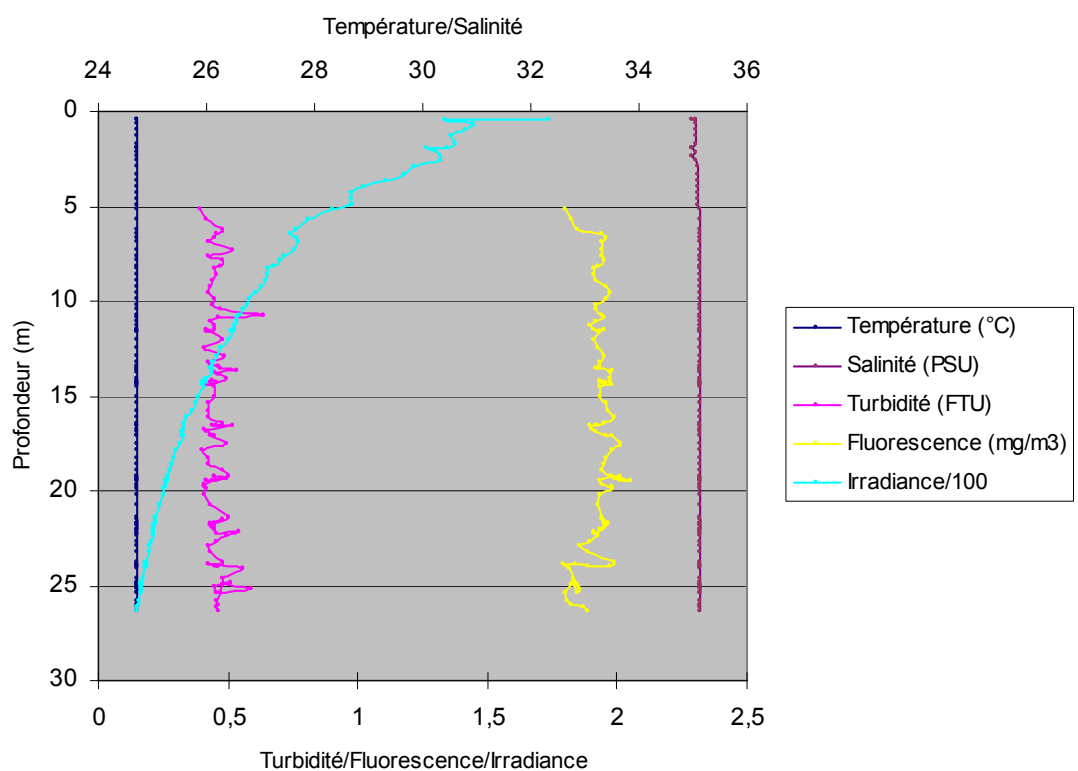
### St02



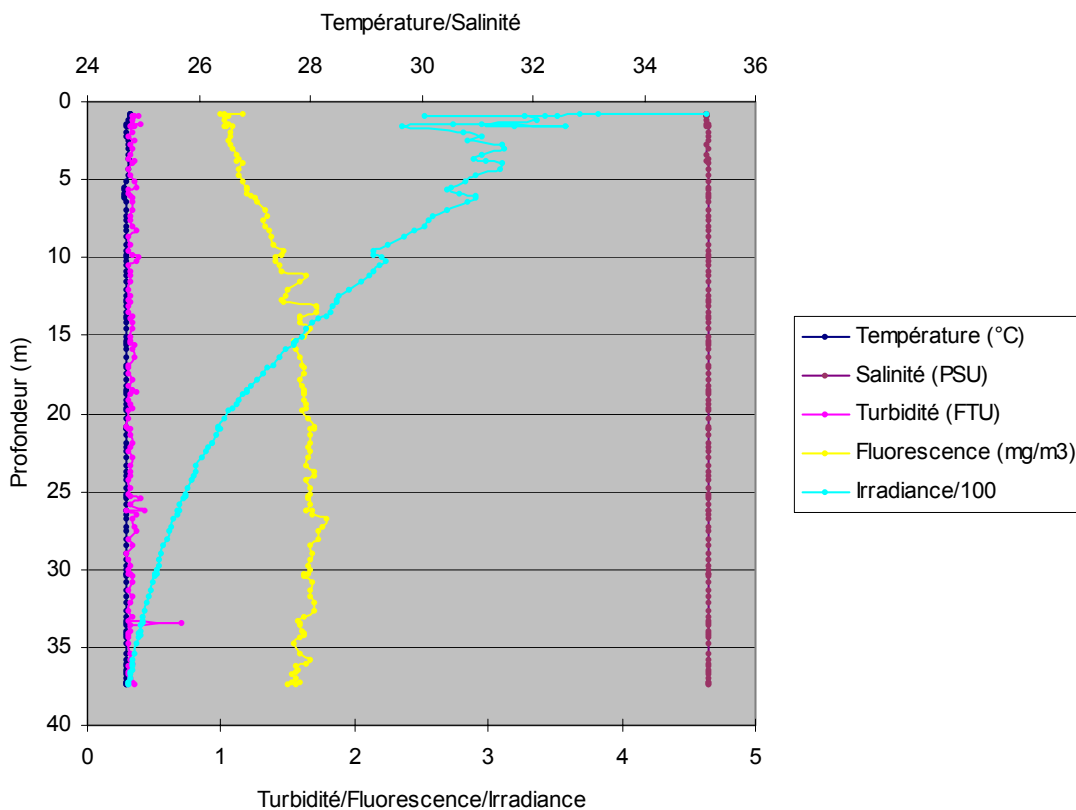
### St05



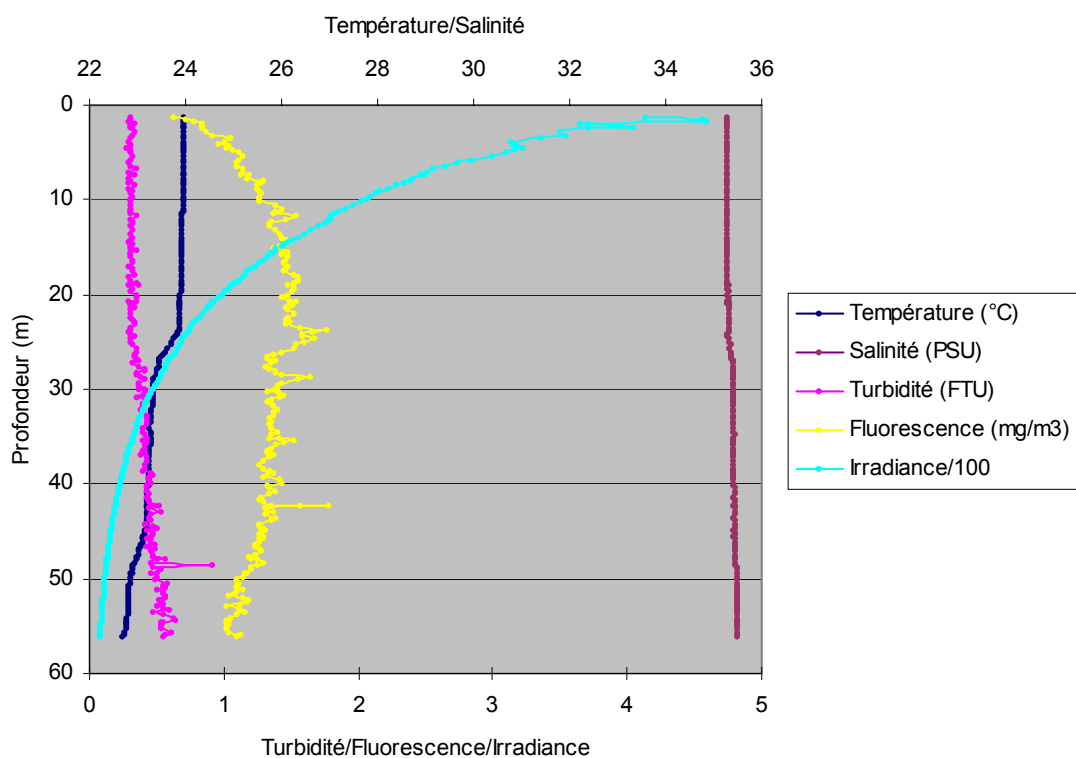
### St14



### St04



### St11



## ANNEXE 2

### Chlorophylle a et en Phéopigments

Concentration en Chlorophylle a et en Phéopigments dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ; Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond -3m ; (\*) = Echantillon non traité ; (-) Absence de résultats.

| Station | Profondeur | [Chl] (µg/l) | [Pheo] (µg/l) | %Pheo |
|---------|------------|--------------|---------------|-------|
| ST01    | S          | 0,360        | 0,144         | 28,6  |
| ST01    | M          | 0,326        | 0,136         | 29,51 |
| ST01    | F          | 0,391        | 0,166         | 29,8  |
| ST02    | S          | 0,386        | 0,122         | 24,0  |
| ST02    | M          | 0,423        | 0,172         | 29,0  |
| ST02    | F          | 0,352        | 0,140         | 28,4  |
| ST03    | S          | 0,704        | 0,291         | 29,2  |
| ST03    | M          | 0,616        | 0,245         | 28,4  |
| ST03    | F          | 0,491        | 0,190         | 27,9  |
| ST04    | S          | 0,382        | 0,151         | 28,3  |
| ST04    | M          | 0,423        | 0,179         | 29,8  |
| ST04    | F          | 0,427        | 0,161         | 27,4  |
| ST05    | S          | 0,299        | 0,123         | 29,1  |
| ST05    | M          | 0,226        | 0,121         | 34,9  |
| ST05    | F          | -            | -             | -     |
| ST06    | S          | 0,280        | 0,196         | 41,2  |
| ST06    | M          | 0,234        | 0,163         | 41,1  |
| ST06    | F          | 0,255        | 0,195         | 43,3  |
| ST07    | S          | 0,544        | 0,274         | 33,5  |
| ST07    | M          | 0,427        | 0,177         | 29,4  |
| ST07    | F          | 0,410        | 0,169         | 29,2  |
| ST08    | S          | 0,342        | 0,128         | 27,3  |
| ST08    | M          | 0,403        | 0,160         | 28,4  |
| ST08    | F          | 0,295        | 0,145         | 33,0  |
| ST09    | S          | 0,455        | 0,185         | 28,9  |
| ST09    | M          | 0,231        | 0,110         | 32,3  |
| ST09    | F          | 0,355        | 0,173         | 32,7  |
| ST10    | S          | *            | *             | -     |
| ST10    | M          | *            | *             | -     |
| ST10    | F          | *            | *             | -     |
| ST11    | S          | 0,298        | 0,126         | 29,8  |
| ST11    | M          | 0,357        | 0,156         | 30,5  |
| ST11    | F          | 0,270        | 0,149         | 35,5  |
| ST12    | S          | 0,313        | 0,165         | 34,6  |
| ST12    | M          | 0,312        | 0,154         | 33,1  |
| ST12    | F          | 0,241        | 0,151         | 38,5  |
| ST13    | S          | 0,472        | 0,198         | 29,6  |
| ST13    | M          | 0,663        | 0,254         | 27,7  |
| ST13    | F          | 1,457        | 0,490         | 25,2  |

| Station | Profondeur | [Chl] (µg/l) | [Pheo] (µg/l) | %Pheo |
|---------|------------|--------------|---------------|-------|
| ST14    | S          | 0,363        | 0,145         | 28,5  |
| ST14    | M          | 0,378        | 0,147         | 28,0  |
| ST14    | F          | 0,499        | 0,238         | 32,2  |
| ST15    | S          | 0,336        | 0,093         | 21,7  |
| ST15    | M          | 1,531        | 0,581         | 27,5  |
| ST15    | F          | 0,402        | 0,160         | 28,5  |
| ST16    | S          | 0,313        | 0,073         | 18,8  |
| ST16    | M          | 0,511        | 0,152         | 22,9  |
| ST16    | F          | 0,620        | 0,224         | 26,5  |
| ST17    | S          | 1,987        | 0,721         | 26,6  |
| ST17    | M          | 0,491        | 0,205         | 29,4  |
| ST17    | F          | 0,362        | 0,058         | 13,9  |
| ST18    | S          | 0,294        | 0,071         | 19,3  |
| ST18    | M          | 0,430        | 0,136         | 24,0  |
| ST18    | F          | 0,546        | 0,284         | 34,3  |

## Ammonium

Concentration en NH<sub>4</sub> dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ; Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond -3m ; (\*) = Echantillons non traité ; (-) = Echantillon unique, écart-type non calculable.

| Station | Profondeur | [NH4]<br>(µmol/L) | Ecart-type |
|---------|------------|-------------------|------------|
| ST01    | S          | 0,033             | 0,002      |
| ST01    | M          | 0,038             | 0,007      |
| ST01    | F          | 0,060             | 0,010      |
| ST02    | S          | 0,038             | 0,001      |
| ST02    | M          | 0,025             | 0,002      |
| ST02    | F          | 0,032             | 0,003      |
| ST03    | S          | 0,027             | -          |
| ST03    | M          | 0,026             | -          |
| ST03    | F          | 0,075             | -          |
| ST04    | S          | 0,016             | 0,000      |
| ST04    | M          | 0,020             | 0,000      |
| ST04    | F          | 0,023             | 0,003      |
| ST05    | S          | 0,021             | 0,001      |
| ST05    | M          | 0,024             | 0,001      |
| ST05    | F          | 0,034             | 0,000      |
| ST06    | S          | 0,175             | -          |
| ST06    | M          | 0,171             | -          |
| ST06    | F          | 0,195             | -          |
| ST07    | S          | 0,039             | -          |
| ST07    | M          | 0,037             | -          |
| ST07    | F          | 0,024             | -          |
| ST08    | S          | 0,035             | 0,013      |
| ST08    | M          | 0,057             | 0,007      |
| ST08    | F          | 0,115             | 0,007      |

| Station | Profondeur | [NH <sub>4</sub> ]<br>(μmol/L) | Ecart-type |
|---------|------------|--------------------------------|------------|
| ST09    | S          | 0,000                          | 0,000      |
| ST09    | M          | 0,013                          | 0,002      |
| ST09    | F          | 0,048                          | 0,002      |
| ST10    | S          | *                              | -          |
| ST10    | M          | *                              | -          |
| ST10    | F          | *                              | -          |
| ST11    | S          | 0,013                          | 0,003      |
| ST11    | M          | 0,002                          | 0,000      |
| ST11    | F          | 0,030                          | 0,001      |
| ST12    | S          | 0,002                          | 0,000      |
| ST12    | M          | 0,125                          | 0,071      |
| ST12    | F          | 0,183                          | 0,017      |
| ST13    | S          | 0,149                          | -          |
| ST13    | M          | 0,070                          | -          |
| ST13    | F          | 0,130                          | -          |
| ST14    | S          | 0,007                          | 0,002      |
| ST14    | M          | 0,015                          | 0,005      |
| ST14    | F          | 0,036                          | 0,000      |
| ST15    | S          | 0,000                          | -          |
| ST15    | M          | 0,231                          | -          |
| ST15    | F          | 0,384                          | -          |
| ST16    | S          | 0,021                          | 0,014      |
| ST16    | M          | 0,014                          | 0,002      |
| ST16    | F          | 0,190                          | 0,117      |
| ST17    | S          | 0,065                          | -          |
| ST17    | M          | 0,065                          | -          |
| ST17    | F          | 0,122                          | -          |
| ST18    | S          | 0,016                          | 0,001      |
| ST18    | M          | 0,023                          | 0,029      |
| ST18    | F          | 0,092                          | 0,012      |

### Azote et Phosphore organique dissous

Concentration en N et P organique dissous (NOD et POD) dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ; Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond -3m ; (\*) = Echantillon non traité ; (-) = Echantillon unique, pas d'écart-type calculable ou absence de résultat.

| Station | Profondeur | P dissous<br>μmol/L | Ecart-type | N dissous<br>μmol/L | Ecart-type |
|---------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| ST01    | S          | 0,387               | 0,033      | 3,072               | 0,141      |
| ST01    | M          | 0,391               | 0,011      | 3,098               | 0,120      |
| ST01    | F          | 0,340               | 0,007      | 2,850               | 0,020      |
| ST02    | S          | 0,407               | 0,007      | 2,889               | 0,084      |
| ST02    | M          | 0,434               | 0,043      | 2,996               | 0,099      |
| ST02    | F          | 0,427               | 0,015      | 3,005               | 0,256      |

| Station | Profondeur | P dissous<br>μmol/L | Ecart-type | N dissous<br>μmol/L | Ecart-type |
|---------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| ST03    | S          | 0,453               | 0,009      | 2,688               | 0,070      |
| ST03    | M          | 0,468               | 0,001      | 2,837               | 0,246      |
| ST03    | F          | 0,410               | 0,096      | 2,864               | 0,695      |
| ST04    | S          | 0,403               | 0,049      | 2,550               | 0,255      |
| ST04    | M          | 0,369               | 0,009      | 2,253               | 0,050      |
| ST04    | F          | 0,456               | 0,115      | 2,746               | 0,218      |
| ST05    | S          | 0,627               | 0,083      | 2,800               | 0,488      |
| ST05    | M          | 0,353               | 0,009      | 2,595               | 0,079      |
| ST05    | F          | 0,356               | 0,011      | 2,955               | 0,120      |
| ST06    | S          | 0,232               | 0,019      | 3,355               | 0,163      |
| ST06    | M          | 0,368               | 0,012      | 2,463               | 0,179      |
| ST06    | F          | 0,372               | 0,056      | 3,290               | 1,160      |
| ST07    | S          | 0,746               | 0,185      | 4,717               | 1,632      |
| ST07    | M          | 0,686               | 0,251      | 4,702               | 0,966      |
| ST07    | F          | 0,826               | 0,009      | 4,564               | 0,461      |
| ST08    | S          | 0,349               | 0,031      | 3,459               | 0,206      |
| ST08    | M          | 0,429               | 0,067      | 3,019               | 0,021      |
| ST08    | F          | 0,405               | 0,016      | 3,830               | 0,142      |
| ST09    | S          | 0,424               | 0,058      | 2,728               | 0,234      |
| ST09    | M          | 0,420               | 0,022      | 2,482               | 0,015      |
| ST09    | F          | 0,440               | 0,007      | 2,531               | 0,005      |
| ST10    | S          | *                   | -          | *                   | -          |
| ST10    | M          | *                   | -          | *                   | -          |
| ST10    | F          | *                   | -          | *                   | -          |
| ST11    | S          | 0,416               | 0,112      | 3,049               | 0,266      |
| ST11    | M          | 0,418               | 0,043      | 2,673               | 0,211      |
| ST11    | F          | 0,457               | 0,027      | 3,352               | 0,548      |
| ST12    | S          | 0,525               | 0,088      | 2,953               | 0,093      |
| ST12    | M          | 0,622               | 0,294      | 3,941               | 1,878      |
| ST12    | F          | 0,663               | 0,006      | 3,904               | 0,348      |
| ST13    | S          | 0,479               | -          | 3,156               | -          |
| ST13    | M          | 0,424               | -          | 2,976               | -          |
| ST13    | F          | 0,357               | -          | 2,496               | -          |
| ST14    | S          | 0,397               | 0,137      | 2,565               | 0,240      |
| ST14    | M          | 0,394               | 0,049      | 2,637               | 0,259      |
| ST14    | F          | 0,449               | 0,037      | 2,334               | 0,626      |
| ST15    | S          | 0,296               | -          | 2,033               | -          |
| ST15    | M          | 0,320               | -          | 2,213               | -          |
| ST15    | F          | 0,222               | -          | 4,198               | -          |
| ST16    | S          | 0,370               | 0,015      | 2,419               | 0,379      |
| ST16    | M          | 0,421               | 0,022      | 2,275               | 0,492      |
| ST16    | F          | 0,231               | 0,030      | 1,837               | 0,073      |
| ST17    | S          | 0,301               | -          | 2,826               | -          |
| ST17    | M          | 0,442               | -          | 2,858               | -          |
| ST17    | F          | 0,305               | -          | 2,795               | -          |
| ST18    | S          | 0,380               | 0,042      | 1,859               | 0,433      |
| ST18    | M          | 0,518               | 0,073      | 1,525               | 1,271      |
| ST18    | F          | 0,490               | 0,028      | 3,786               | 0,211      |

## Phosphates

Concentration en PO<sub>4</sub> dissous dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ;  
Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond -3m  
; (\*) = Echantillon non traité ; (-) = Echantillon unique, pas d'écart-type calculable ou absence de résultat.

| Station | Profondeur | PO <sub>4</sub><br>μmol/L | Ecart-type |
|---------|------------|---------------------------|------------|
| ST01    | S          | 0,004                     | 0,005      |
| ST01    | M          | 0,006                     | 0,006      |
| ST01    | F          | 0,006                     | 0,002      |
| ST02    | S          | 0,043                     | 0,035      |
| ST02    | M          | 0,018                     | 0,009      |
| ST02    | F          | 0,016                     | 0,007      |
| ST03    | S          | 0,025                     | 0,000      |
| ST03    | M          | 0,013                     | 0,007      |
| ST03    | F          | 0,019                     | 0,005      |
| ST04    | S          | 0,012                     | 0,002      |
| ST04    | M          | 0,022                     | 0,005      |
| ST04    | F          | 0,023                     | 0,000      |
| ST05    | S          | 0,014                     | 0,002      |
| ST05    | M          | 0,023                     | 0,006      |
| ST05    | F          | 0,027                     | 0,004      |
| ST06    | S          | 0,122                     | 0,003      |
| ST06    | M          | 0,032                     | 0,005      |
| ST06    | F          | 0,043                     | 0,008      |
| ST07    | S          | 0,020                     | 0,004      |
| ST07    | M          | 0,022                     | 0,004      |
| ST07    | F          | 0,065                     | 0,001      |
| ST08    | S          | 0,016                     | 0,004      |
| ST08    | M          | 0,026                     | 0,001      |
| ST08    | F          | 0,069                     | 0,002      |
| ST09    | S          | 0,020                     | 0,006      |
| ST09    | M          | 0,033                     | 0,005      |
| ST09    | F          | 0,009                     | 0,002      |
| ST10    | S          | *                         | -          |
| ST10    | M          | *                         | -          |
| ST10    | F          | *                         | -          |
| ST11    | S          | 0,023                     | 0,002      |
| ST11    | M          | 0,030                     | 0,002      |
| ST11    | F          | 0,070                     | 0,002      |
| ST12    | S          | 0,018                     | 0,004      |
| ST12    | M          | 0,040                     | 0,003      |
| ST12    | F          | 0,094                     | 0,002      |
| ST13    | S          | 0,020                     | 0,002      |
| ST13    | M          | 0,022                     | 0,005      |
| ST13    | F          | 0,033                     | 0,005      |
| ST14    | S          | 0,028                     | 0,020      |
| ST14    | M          | 0,002                     | 0,002      |
| ST14    | F          | 0,007                     | 0,000      |

| Station | Profondeur | PO4<br>μmol/L | Ecart-type |
|---------|------------|---------------|------------|
| ST15    | S          | 0,017         | 0,009      |
| ST15    | M          | 0,058         | 0,001      |
| ST15    | F          | 0,135         | 0,001      |
| ST16    | S          | 0,017         | 0,016      |
| ST16    | M          | 0,030         | 0,004      |
| ST16    | F          | 0,258         | 0,004      |
| ST17    | S          | 0,011         | 0,014      |
| ST17    | M          | 0,002         | 0,001      |
| ST17    | F          | 0,021         | 0,001      |
| ST18    | S          | 0,014         | 0,006      |
| ST18    | M          | 0,001         | 0,002      |
| ST18    | F          | 0,084         | 0,020      |

### Azote et Phosphore organique particuliers

Concentration en N et P organique particulaire (NOP et POP) dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ; Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond -3m ; (\*) = Echantillon non traité ; (-) = Echantillon unique, pas d'écart-type calculable ou absence de résultat.

| Station | Profondeur | POP<br>μmol/l | NOP<br>μmol/l |
|---------|------------|---------------|---------------|
| ST01    | S          | 0,030         | 0,41          |
| ST01    | M          | 0,029         | 0,39          |
| ST01    | F          | 0,029         | 0,41          |
| ST02    | S          | 0,033         | 0,37          |
| ST02    | M          | 0,030         | 0,43          |
| ST02    | F          | 0,031         | 0,41          |
| ST03    | S          | 0,044         | 0,60          |
| ST03    | M          | 0,038         | 0,54          |
| ST03    | F          | 0,038         | 0,52          |
| ST04    | S          | 0,036         | 0,50          |
| ST04    | M          | 0,032         | 0,45          |
| ST04    | F          | 0,031         | 0,39          |
| ST05    | S          | 0,032         | 0,41          |
| ST05    | M          | 0,037         | 0,55          |
| ST05    | F          | *             | -             |
| ST06    | S          | 0,037         | 0,63          |
| ST06    | M          | 0,041         | 0,54          |
| ST06    | F          | 0,036         | 0,46          |
| ST07    | S          | 0,022         | 0,32          |
| ST07    | M          | 0,032         | 0,48          |
| ST07    | F          | 0,035         | 0,38          |
| ST08    | S          | 0,022         | 0,27          |
| ST08    | M          | 0,030         | 0,40          |
| ST08    | F          | 0,048         | 0,46          |

| Station | Profondeur | POP<br>μmol/l | NOP<br>μmol/l |
|---------|------------|---------------|---------------|
| ST09    | S          | 0,040         | 0,56          |
| ST09    | M          | 0,031         | 0,45          |
| ST09    | F          | 0,031         | 0,38          |
| ST10    | S          | *             | -             |
| ST10    | M          | *             | -             |
| ST10    | F          | *             | -             |
| ST11    | S          | 0,036         | 0,52          |
| ST11    | M          | 0,036         | 0,50          |
| ST11    | F          | 0,033         | 0,45          |
| ST12    | S          | 0,045         | 0,57          |
| ST12    | M          | 0,040         | 0,54          |
| ST12    | F          | 0,043         | 0,54          |
| ST13    | S          | 0,049         | 0,65          |
| ST13    | M          | 0,061         | 0,75          |
| ST13    | F          | 0,053         | 0,70          |
| ST14    | S          | 0,031         | 0,46          |
| ST14    | M          | 0,030         | 0,42          |
| ST14    | F          | 0,031         | 0,56          |
| ST15    | S          | 0,053         | 0,86          |
| ST15    | M          | 0,115         | 1,98          |
| ST15    | F          | 0,088         | 1,00          |
| ST16    | S          | 0,049         | 0,78          |
| ST16    | M          | 0,050         | 0,83          |
| ST16    | F          | 0,062         | 0,84          |
| ST17    | S          | 0,055         | 0,86          |
| ST17    | M          | 0,048         | 0,76          |
| ST17    | F          | 0,049         | 0,81          |
| ST18    | S          | 0,049         | 0,87          |
| ST18    | M          | 0,062         | 1,02          |
| ST18    | F          | 0,037         | 0,69          |

## Silicates

Concentration en SiO<sub>2</sub> dissous dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ;  
Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond -3m  
; (\*) = Echantillon non traité ; (-) = Echantillon unique, pas d'écart-type calculable ou absence de résultat.

| Station | Profondeur | SiO <sub>2</sub><br>μmol/L | Ecart-type |
|---------|------------|----------------------------|------------|
| ST01    | S          | 0,924                      | 0,018      |
| ST01    | M          | 1,025                      | 0,049      |
| ST01    | F          | 1,085                      | 0,172      |
| ST02    | S          | 1,362                      | 0,212      |
| ST02    | M          | 1,271                      | 0,372      |
| ST02    | F          | 1,018                      | 0,168      |

| Station | Profondeur | SIO2<br>μmol/L | Ecart-type |
|---------|------------|----------------|------------|
| ST03    | S          | 2,643          | 0,091      |
| ST03    | M          | 1,913          | 0,104      |
| ST03    | F          | 1,978          | 0,190      |
| ST04    | S          | 0,919          | 0,039      |
| ST04    | M          | 1,223          | 0,169      |
| ST04    | F          | 0,975          | 0,031      |
| ST05    | S          | 0,879          | 0,016      |
| ST05    | M          | 1,599          | 0,777      |
| ST05    | F          | 0,996          | 0,182      |
| ST06    | S          | 22,609         | 0,416      |
| ST06    | M          | 3,367          | 0,067      |
| ST06    | F          | 2,451          | 0,005      |
| ST07    | S          | 1,228          | 0,066      |
| ST07    | M          | 1,233          | 0,047      |
| ST07    | F          | 1,647          | 0,011      |
| ST08    | S          | 1,064          | 0,026      |
| ST08    | M          | 1,240          | 0,259      |
| ST08    | F          | 1,618          | 0,093      |
| ST09    | S          | 0,948          | 0,116      |
| ST09    | M          | 1,133          | 0,286      |
| ST09    | F          | 0,900          | 0,029      |
| ST10    | S          | *              | -          |
| ST10    | M          | *              | -          |
| ST10    | F          | *              | -          |
| ST11    | S          | 1,358          | 0,444      |
| ST11    | M          | 0,918          | 0,001      |
| ST11    | F          | 1,191          | 0,086      |
| ST12    | S          | 1,065          | 0,131      |
| ST12    | M          | 1,075          | 0,081      |
| ST12    | F          | 1,823          | 0,398      |
| ST13    | S          | 1,510          | 0,028      |
| ST13    | M          | 1,446          | 0,029      |
| ST13    | F          | 1,627          | 0,003      |
| ST14    | S          | 0,873          | 0,084      |
| ST14    | M          | 1,212          | 0,201      |
| ST14    | F          | 1,261          | 0,638      |
| ST15    | S          | 7,946          | 0,065      |
| ST15    | M          | 2,116          | 0,127      |
| ST15    | F          | 4,223          | 0,172      |
| ST16    | S          | 3,648          | 0,052      |
| ST16    | M          | 2,335          | 0,007      |
| ST16    | F          | 6,456          | 0,177      |
| ST17    | S          | 5,583          | 0,381      |
| ST17    | M          | 3,142          | 0,006      |
| ST17    | F          | 2,169          | 0,020      |
| ST18    | S          | 5,813          | 0,214      |
| ST18    | M          | 2,128          | 0,375      |
| ST18    | F          | 2,009          | 0,004      |

## Nitrates + Nitrites

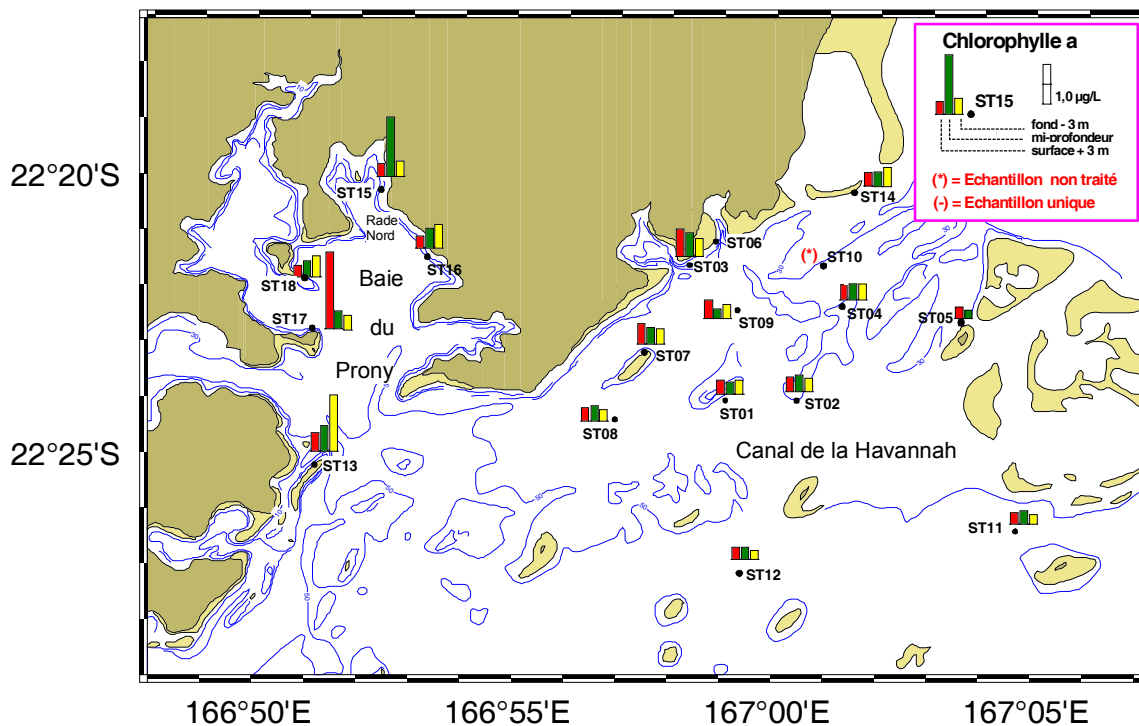
Concentration en  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$  dans les eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony ;  
Les profondeurs de prélèvement sont : S = surface + 3 m ; M = mi-profondeur ; F = fond - 3m ; (\*) = Echantillon non traité ; (-) = Echantillon unique, pas d'écart-type calculable ou absence de résultat.

| Station | Profondeur | $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$<br>( $\mu\text{mol/L}$ ) | Ecart-type |
|---------|------------|------------------------------------------------------|------------|
| ST01    | S          | 0,542                                                | 0,066      |
| ST01    | M          | 0,459                                                | 0,006      |
| ST01    | F          | 0,546                                                | 0,051      |
| ST02    | S          | 0,495                                                | 0,002      |
| ST02    | M          | 0,432                                                | 0,002      |
| ST02    | F          | 0,502                                                | 0,001      |
| ST03    | S          | 0,446                                                | 0,002      |
| ST03    | M          | 0,405                                                | 0,001      |
| ST03    | F          | 0,463                                                | 0,018      |
| ST04    | S          | 0,426                                                | 0,007      |
| ST04    | M          | 0,436                                                | 0,006      |
| ST04    | F          | 0,419                                                | 0,006      |
| ST05    | S          | 0,448                                                | 0,002      |
| ST05    | M          | 0,482                                                | 0,000      |
| ST05    | F          | 0,481                                                | 0,002      |
| ST06    | S          | 0,916                                                | 0,124      |
| ST06    | M          | 0,394                                                | 0,007      |
| ST06    | F          | 0,420                                                | 0,015      |
| ST07    | S          | 0,413                                                | 0,008      |
| ST07    | M          | 0,431                                                | 0,011      |
| ST07    | F          | 0,943                                                | 0,017      |
| ST08    | S          | 0,457                                                | 0,007      |
| ST08    | M          | 0,528                                                | 0,010      |
| ST08    | F          | 1,258                                                | 0,001      |
| ST09    | S          | 0,335                                                | 0,020      |
| ST09    | M          | 0,541                                                | 0,006      |
| ST09    | F          | 0,364                                                | 0,006      |
| ST10    | S          | *                                                    | -          |
| ST10    | M          | *                                                    | -          |
| ST10    | F          | *                                                    | -          |
| ST11    | S          | 0,534                                                | 0,004      |
| ST11    | M          | 0,602                                                | 0,024      |
| ST11    | F          | 1,077                                                | 0,000      |
| ST12    | S          | 0,358                                                | 0,018      |
| ST12    | M          | 0,551                                                | 0,004      |
| ST12    | F          | 1,317                                                | 0,005      |
| ST13    | S          | 0,399                                                | 0,004      |
| ST13    | M          | 0,347                                                | 0,006      |
| ST13    | F          | 0,534                                                | 0,021      |
| ST14    | S          | 0,232                                                | 0,038      |
| ST14    | M          | 0,256                                                | 0,003      |
| ST14    | F          | 0,348                                                | 0,003      |
| ST15    | S          | 0,013                                                | 0,000      |
| ST15    | M          | 0,697                                                | 0,013      |
| ST15    | F          | 1,857                                                | 0,043      |

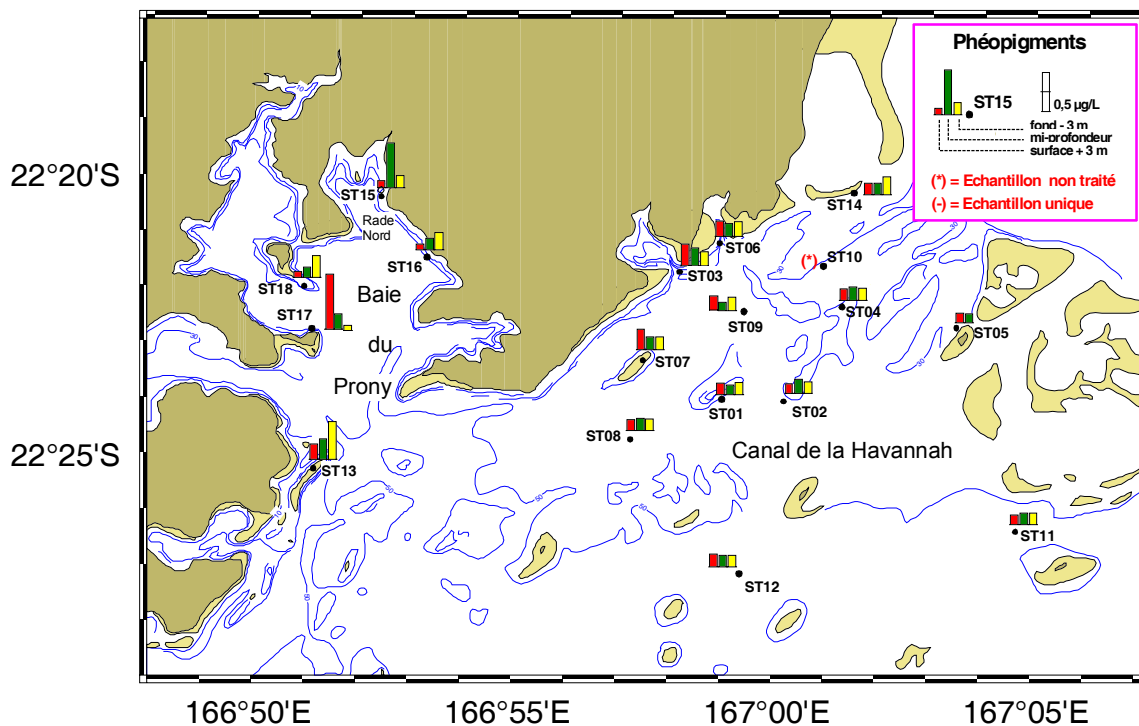
| Station | Profondeur | NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub><br>(μmol/L) | Ecart-type |
|---------|------------|----------------------------------------------|------------|
| ST16    | S          | 0,020                                        | 0,000      |
| ST16    | M          | 0,011                                        | 0,015      |
| ST16    | F          | 2,715                                        | 0,061      |
| ST17    | S          | 0,012                                        | 0,000      |
| ST17    | M          | 0,281                                        | 0,014      |
| ST17    | F          | 0,543                                        | 0,002      |
| ST18    | S          | 0,028                                        | 0,009      |
| ST18    | M          | 0,042                                        | 0,013      |
| ST18    | F          | 0,757                                        | 0,068      |

### Cartes de distribution de la chlorophylle a et des phéopigments.

Concentration de la chlorophylle a dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

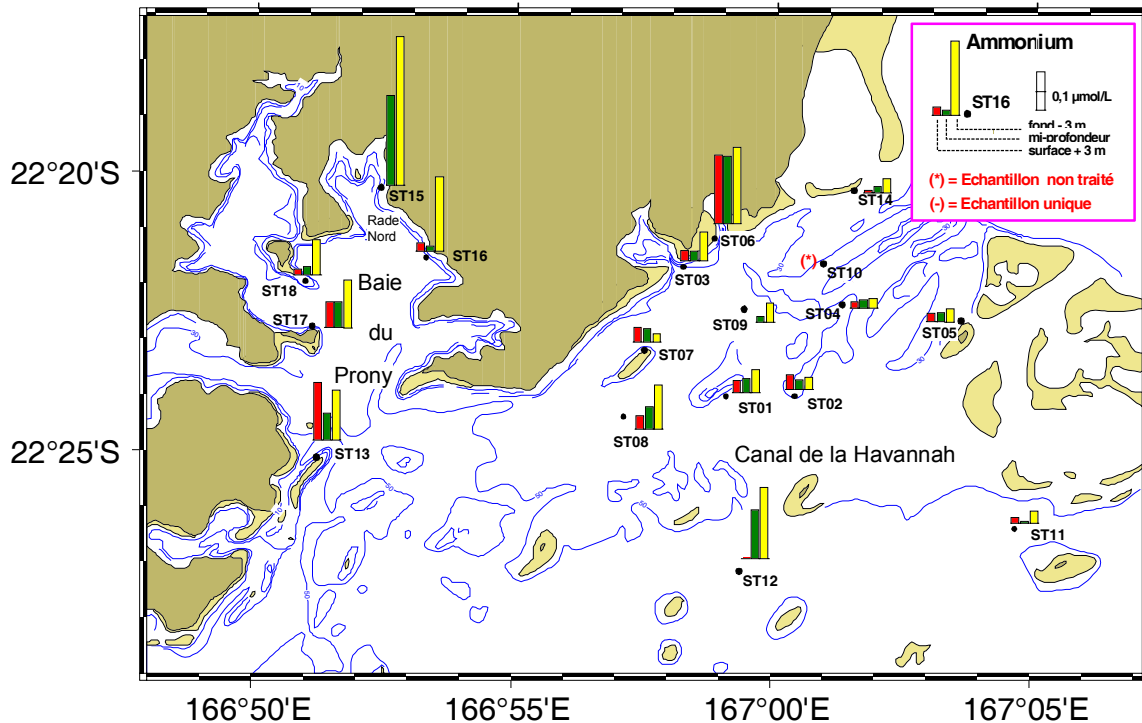


Concentration des phéopigments dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

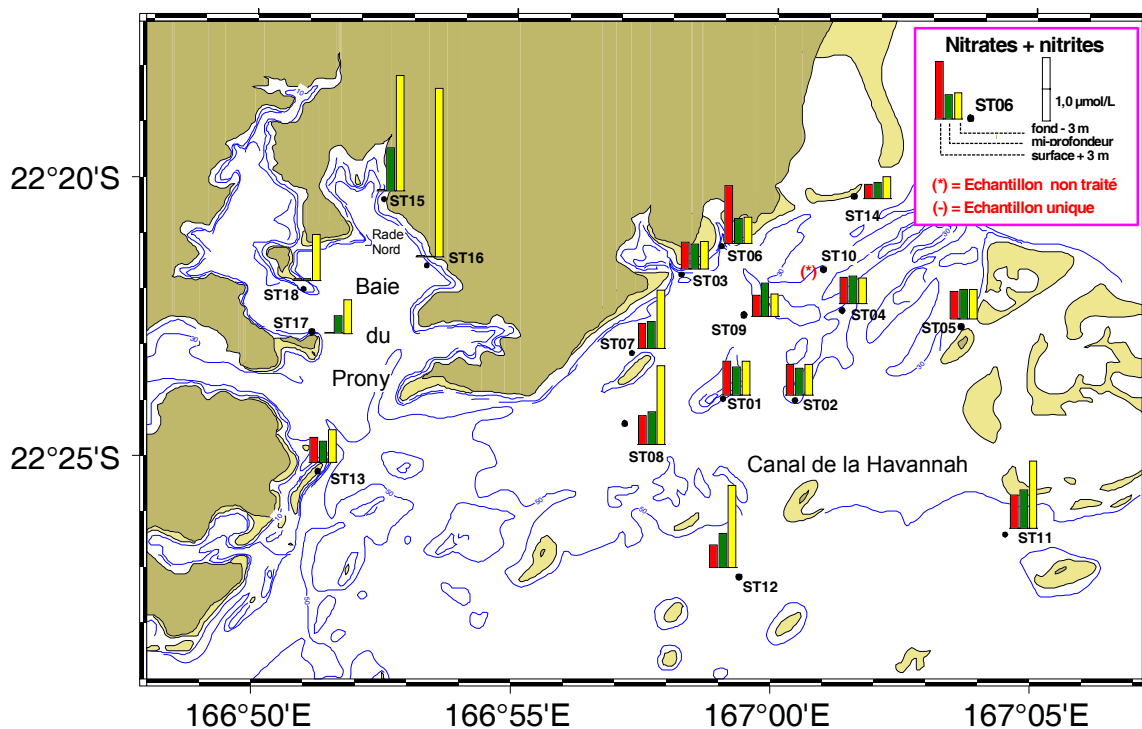


### Cartes de distribution de l'ammonium et des nitrates.

Concentration de l'ammonium dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

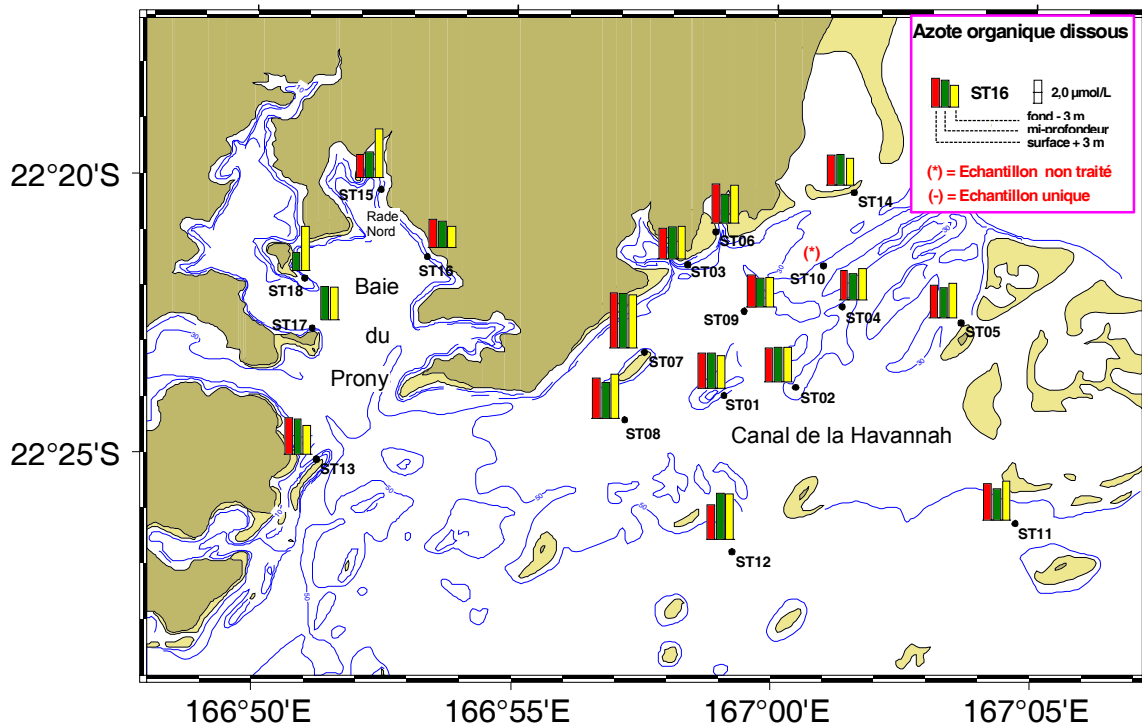


Concentration de l'ammonium dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

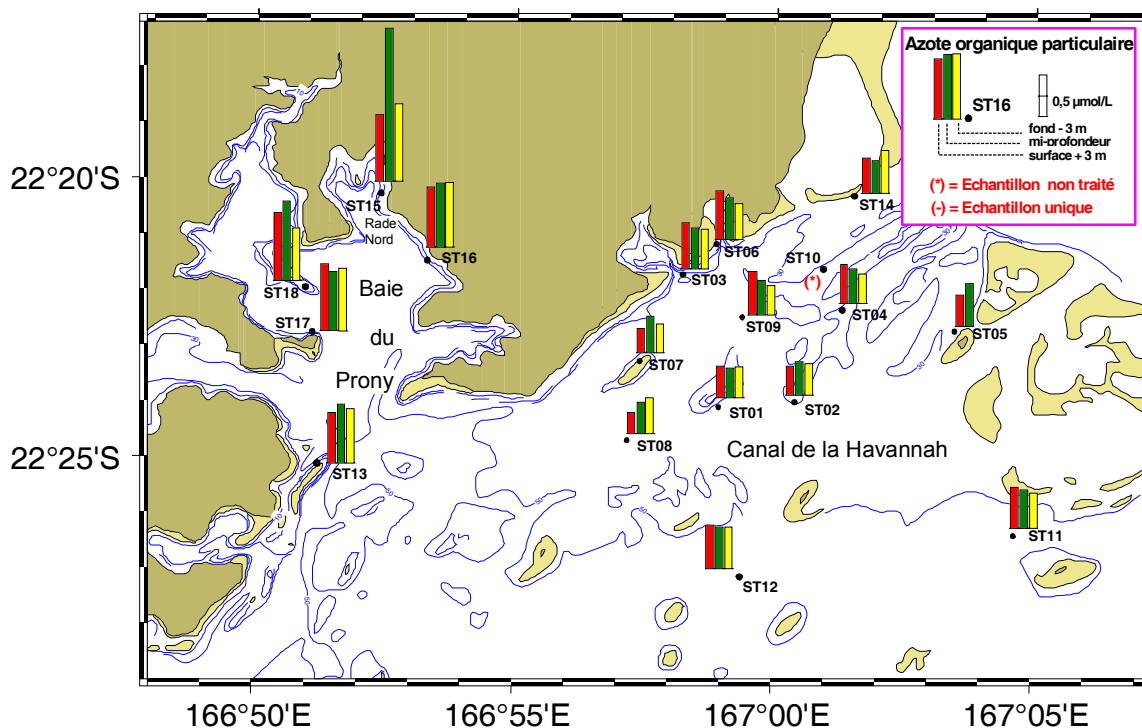


### Cartes de distribution de l'azote organique dissous et particulaire.

Concentration de l'azote organique dissous (NOD) dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.



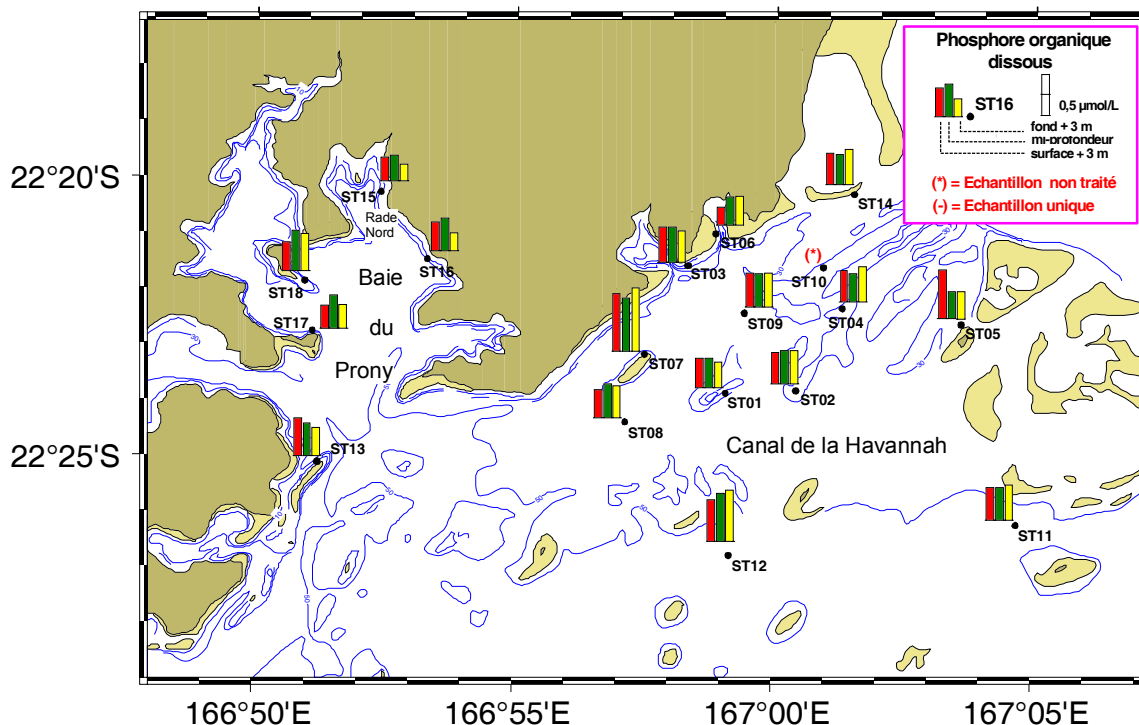
Concentration de l'azote organique particulaire (NOP) dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.



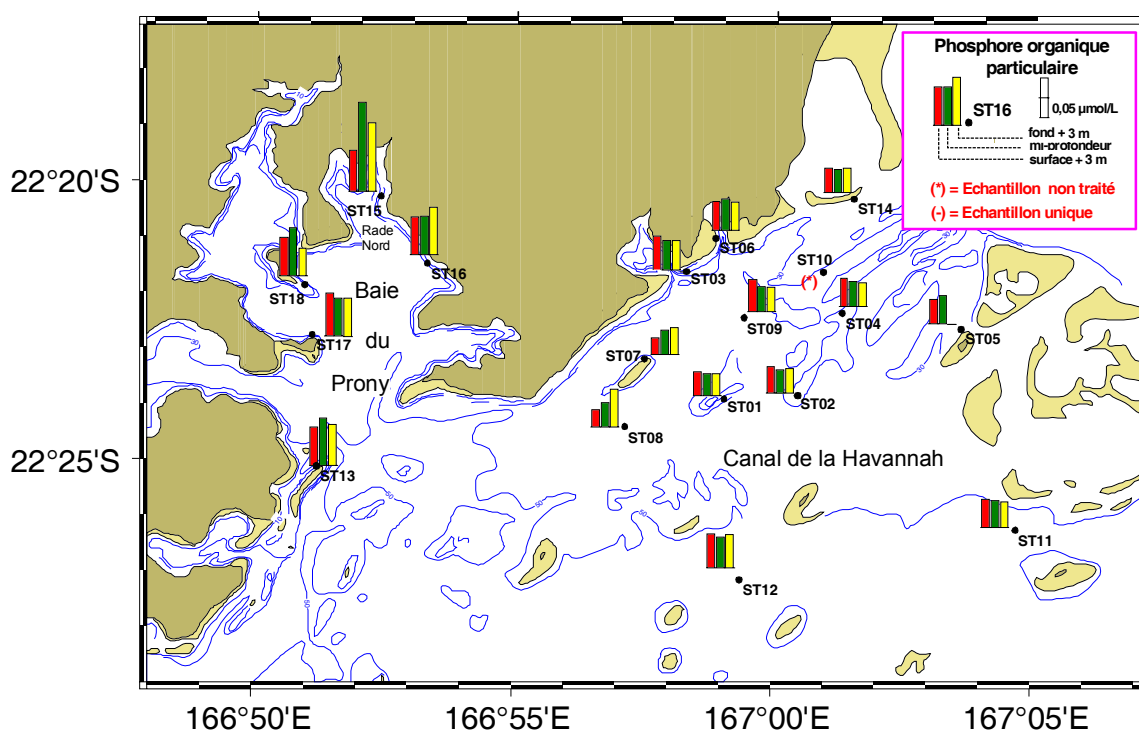


## Cartes de distribution du phosphore organique dissous et particulaire.

Concentration du phosphore organique dissous (POD) dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

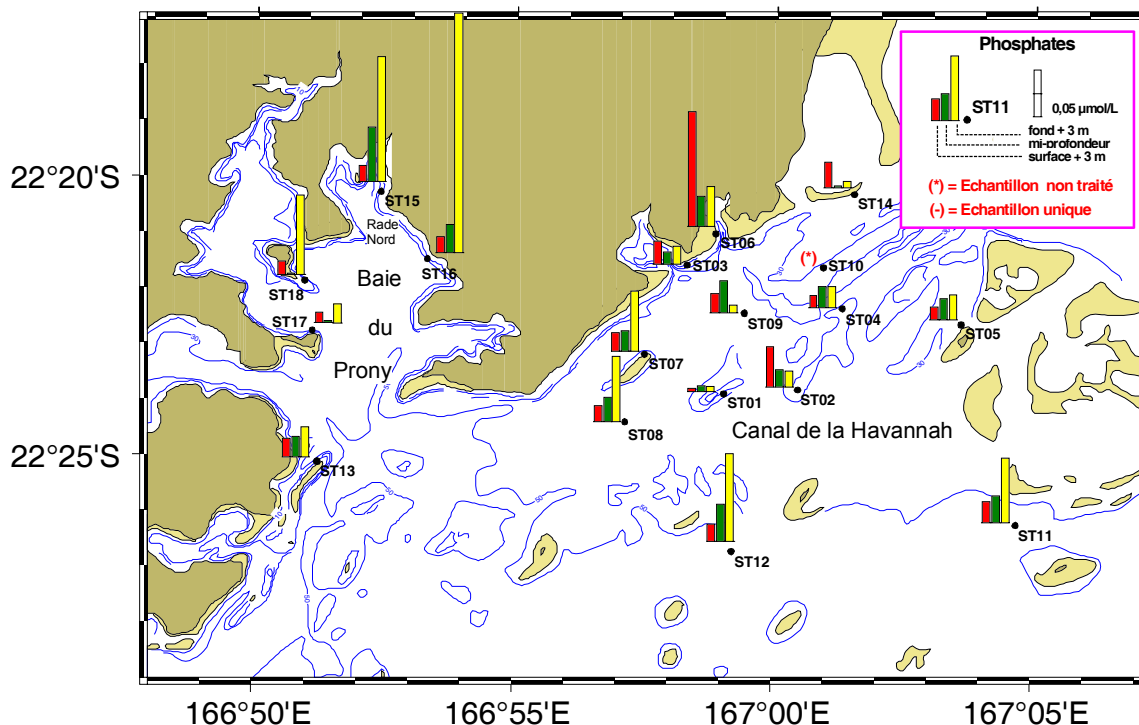


Concentration du phosphore organique particulaire (POP) dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

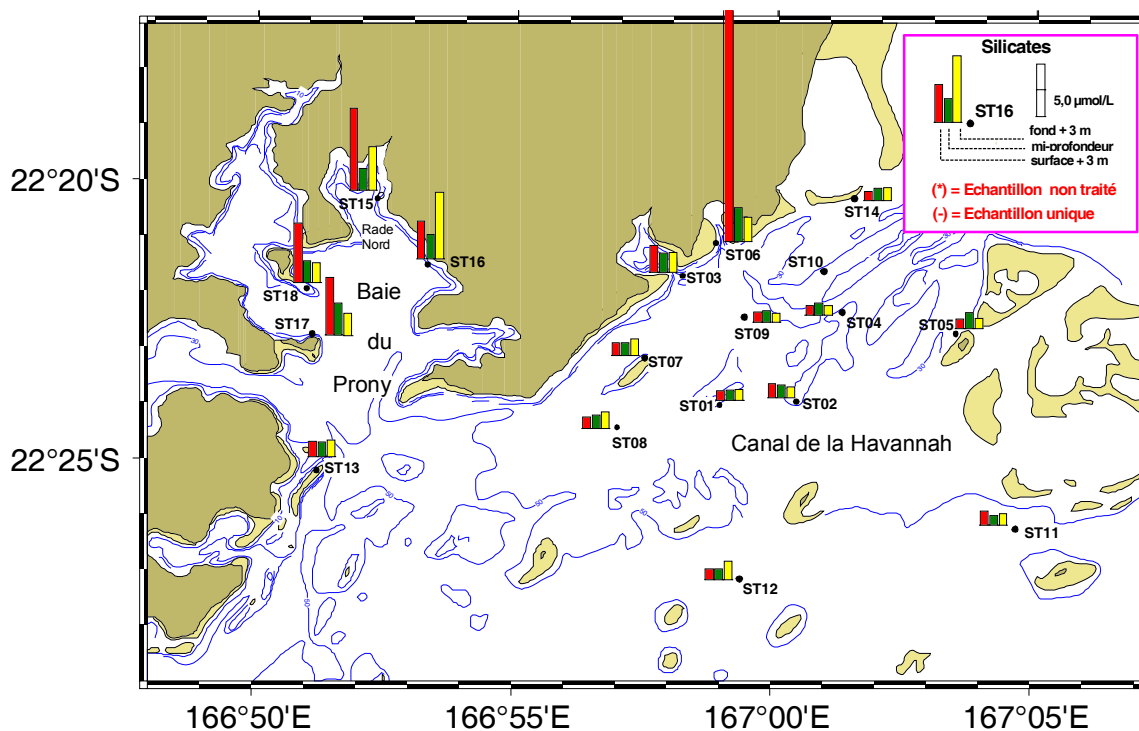


### Cartes de distribution des phosphates et des silicates.

Concentration des phosphates dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.



Concentration des silicates dans la colonne d'eau ; échantillonnage en surface, mi-profondeur et fond dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.



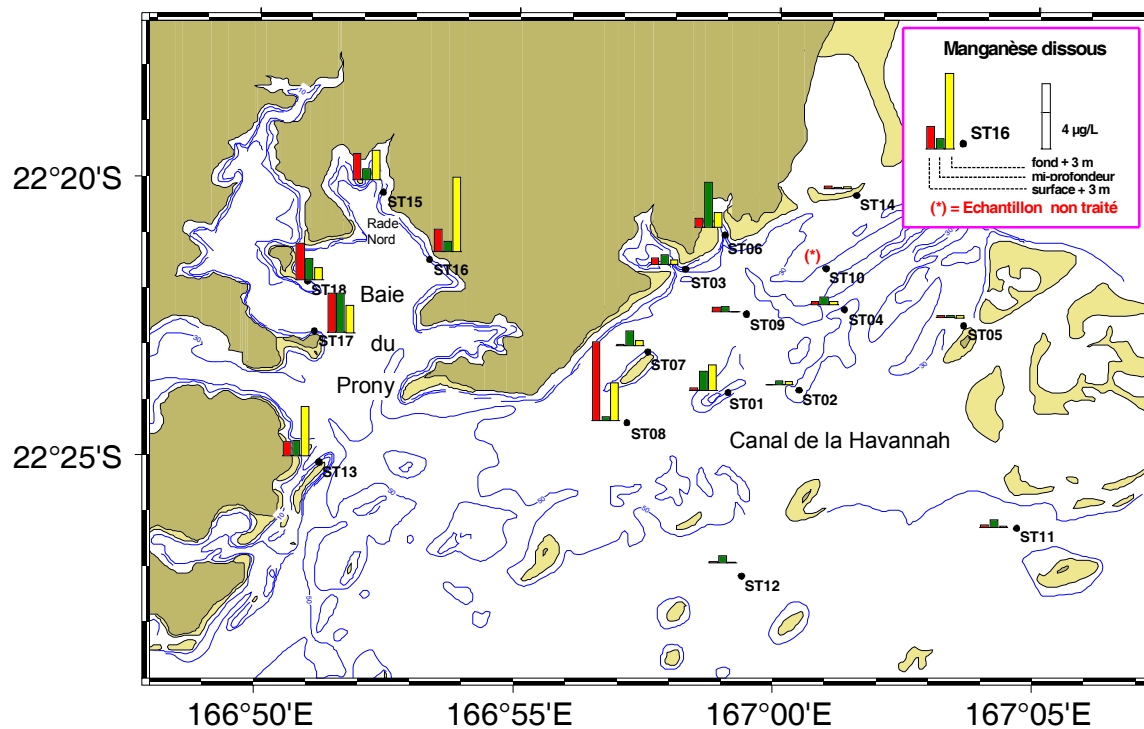
## ANNEXE 3

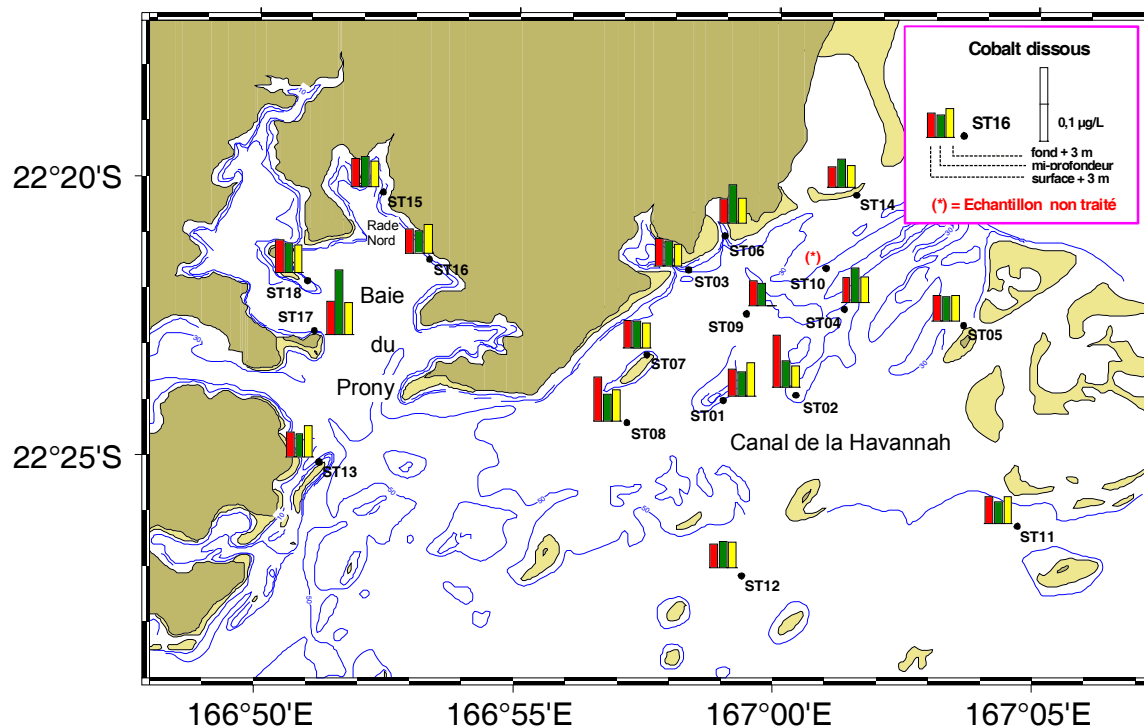
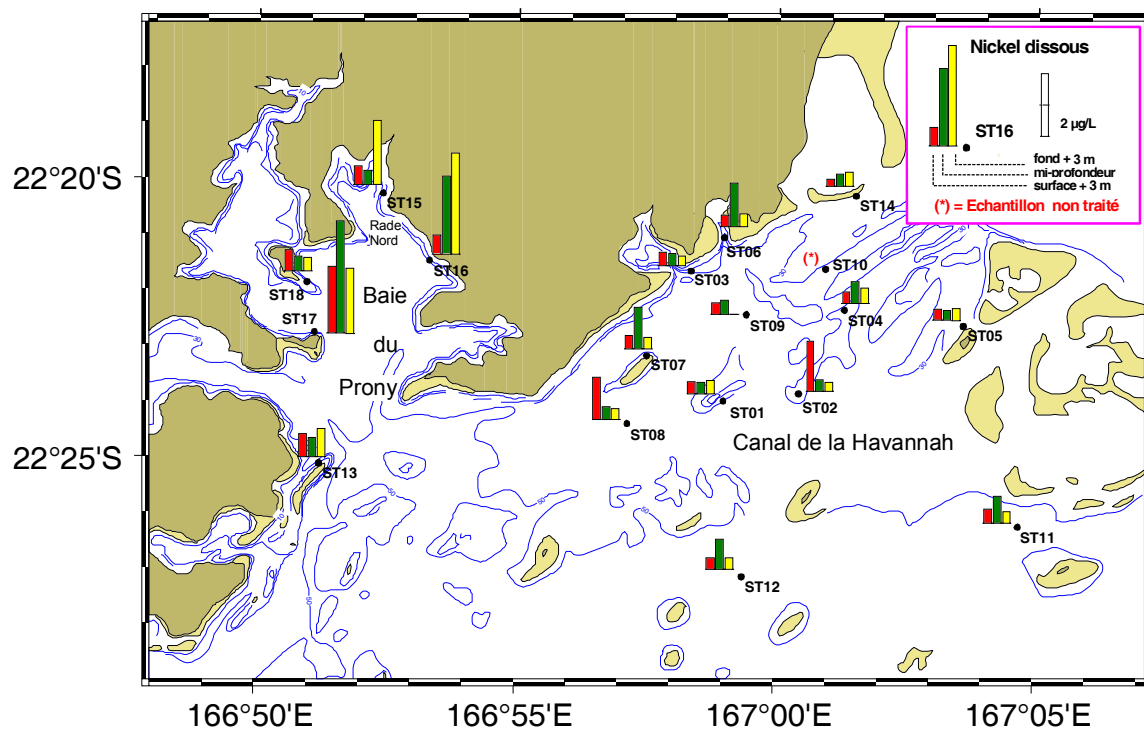
### Concentrations des métaux dissous dans la colonne d'eau

Concentrations des métaux dissous analysés dans la colonne d'eau à 3 profondeurs : S = surface -3m, M = mi-profondeur, F = fond + 3 m ; (< ld) = Valeur inférieure à la limite de détection de l'ICP-OES ; (-) = Dosage non effectué, (\*) = Analyse défailante ; (\*\*) = Limite de détection prenant en compte le facteur de dilution de l'échantillon lors de l'analyse.

| Station | Profondeur | As**<br>(µg/L) | Cd<br>(µg/L) | Co<br>(µg/L) | Cu<br>(µg/L) | Cr**<br>(µg/L) | Fe<br>(µg/L) | Mg<br>(µg/L) | Mn<br>(µg/L) | Ni<br>(µg/L) | Pb<br>(µg/L) | Zn<br>(µg/L) |
|---------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| St01    | S          | < 0,80         | 0,09         | 0,03         | 0,50         | < 0,40         | -            | -            | 0,20         | 0,41         | < 0,05       | < 0,90       |
| St01    | M          | < 0,80         | 0,02         | 0,03         | 0,75         | < 0,40         | -            | -            | 1,26         | 0,38         | < 0,05       | 1,16         |
| St01    | F          | < 0,80         | 0,13         | 0,04         | 1,02         | < 0,40         | -            | -            | 1,66         | 0,47         | < 0,05       | 13,17        |
| St02    | S          | < 0,80         | 0,08         | 0,07         | 0,69         | < 0,40         | -            | -            | *            | 1,62         | < 0,05       | 13,36        |
| St02    | M          | < 0,80         | 0,05         | 0,03         | 0,29         | < 0,40         | -            | -            | 0,27         | 0,38         | < 0,05       | < 0,90       |
| St02    | F          | 0,94           | 0,04         | 0,03         | 1,84         | < 0,40         | -            | -            | 0,21         | 0,27         | < 0,05       | < 0,90       |
| St03    | S          | < 0,80         | < 0,02       | 0,04         | 0,21         | < 0,40         | -            | -            | 0,45         | 0,46         | < 0,05       | 1,42         |
| St03    | M          | < 0,80         | 0,07         | 0,03         | 0,88         | < 0,40         | -            | -            | 0,69         | 0,42         | < 0,05       | 4,17         |
| St03    | F          | < 0,80         | 0,07         | 0,03         | 0,28         | < 0,40         | -            | -            | 0,36         | 0,32         | < 0,05       | 1,64         |
| St04    | S          | < 0,80         | 0,07         | 0,03         | 10,07        | < 0,40         | -            | -            | 0,23         | 0,35         | < 0,05       | 2,23         |
| St04    | M          | < 0,80         | 0,06         | 0,04         | 5,20         | < 0,40         | -            | -            | 0,50         | 0,71         | < 0,05       | 2,53         |
| St04    | F          | < 0,80         | 0,08         | 0,03         | 0,93         | < 0,40         | -            | -            | 0,21         | 0,51         | < 0,05       | 1,20         |
| St05    | S          | < 0,80         | 0,09         | 0,03         | 0,73         | < 0,40         | -            | -            | 0,12         | 0,35         | < 0,05       | < 0,90       |
| St05    | M          | < 0,80         | 0,05         | 0,03         | 0,09         | < 0,40         | -            | -            | 0,19         | 0,33         | < 0,05       | 0,99         |
| St05    | F          | < 0,80         | 0,03         | 0,03         | 0,26         | < 0,40         | -            | -            | 0,18         | 0,39         | < 0,05       | < 0,90       |
| St06    | S          | < 0,80         | 0,03         | 0,03         | 0,18         | < 0,40         | -            | -            | 0,55         | 0,37         | < 0,05       | 2,62         |
| St06    | M          | < 0,80         | 0,07         | 0,05         | 0,89         | < 0,40         | -            | -            | 2,91         | 1,38         | < 0,05       | 1,93         |
| St06    | F          | < 0,80         | 0,08         | 0,03         | 0,10         | < 0,40         | -            | -            | 0,96         | 0,40         | < 0,05       | < 0,90       |
| St07    | S          | < 0,80         | 0,09         | 0,04         | 0,32         | < 0,40         | -            | -            | 0,09         | 0,46         | < 0,05       | < 0,90       |
| St07    | M          | 0,84           | 0,08         | 0,04         | 1,61         | < 0,40         | -            | -            | 0,97         | 1,36         | < 0,05       | 0,99         |
| St07    | F          | 0,86           | 0,06         | 0,03         | 3,73         | < 0,40         | -            | -            | 0,35         | 0,41         | < 0,05       | < 0,90       |
| St08    | S          | 1,33           | 0,23         | 0,06         | 3,05         | < 0,40         | -            | -            | 5,05         | 1,33         | < 0,05       | 8,85         |
| St08    | M          | 1,07           | 0,05         | 0,03         | 0,53         | < 0,40         | -            | -            | 0,22         | 0,39         | < 0,05       | 2,11         |
| St08    | F          | 1,07           | 0,15         | 0,04         | 2,75         | < 0,40         | -            | -            | 2,41         | 0,33         | < 0,05       | 4,77         |
| St09    | S          | 0,81           | 0,06         | 0,03         | 4,18         | < 0,40         | -            | -            | 0,25         | 0,37         | < 0,05       | 3,32         |
| St09    | M          | < 0,80         | 0,06         | 0,03         | 0,31         | < 0,40         | -            | -            | 0,28         | 0,43         | < 0,05       | < 0,90       |
| St09    | F          | 0,81           | -            | -            | -            | < 0,40         | -            | -            | -            | -            | -            | -            |
| St10    | S          | -              | -            | -            | -            | < 0,40         | -            | -            | -            | -            | -            | -            |
| St10    | M          | -              | -            | -            | -            | < 0,40         | -            | -            | -            | -            | -            | -            |
| St10    | F          | -              | -            | -            | -            | < 0,40         | -            | -            | -            | -            | -            | -            |
| St11    | S          | < 0,80         | 0,06         | 0,03         | < 0,08       | < 0,40         | -            | -            | 0,16         | 0,44         | < 0,05       | < 0,89       |
| St11    | M          | 0,81           | 0,03         | 0,03         | 0,29         | < 0,40         | -            | -            | 0,48         | 0,86         | < 0,05       | 1,56         |
| St11    | F          | < 0,80         | 0,10         | 0,03         | 1,18         | < 0,40         | -            | -            | 0,09         | 0,37         | < 0,05       | < 0,89       |

| Station | Profondeur | As**<br>(µg/L) | Cd<br>(µg/L) | Co<br>(µg/L) | Cu<br>(µg/L) | Cr**<br>(µg/L) | Fe<br>(µg/L) | Mg<br>(µg/L) | Mn<br>(µg/L) | Ni<br>(µg/L) | Pb<br>(µg/L) | Zn<br>(µg/L) |
|---------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| St12    | S          | 0,93           | 0,07         | 0,03         | < 0,08       | < 0,40         | -            | -            | 0,10         | 0,38         | < 0,05       | < 0,89       |
| St12    | M          | < 0,80         | 0,07         | 0,03         | 0,32         | < 0,40         | -            | -            | 0,43         | 0,97         | < 0,05       | < 0,89       |
| St12    | F          | < 0,80         | 0,09         | 0,03         | 0,10         | < 0,40         | -            | -            | 0,07         | 0,37         | < 0,05       | < 0,89       |
| St13    | S          | 1,41           | 0,05         | 0,03         | 2,72         | < 0,40         | -            | -            | 0,88         | 0,73         | < 0,05       | 0,96         |
| St13    | M          | 1,08           | 0,03         | 0,03         | 0,34         | < 0,40         | -            | -            | 0,94         | 0,62         | < 0,05       | < 0,89       |
| St13    | F          | 1,23           | 0,06         | 0,04         | 1,37         | < 0,40         | -            | -            | 3,14         | 0,91         | < 0,05       | 3,14         |
| St14    | S          | < 0,80         | 0,07         | 0,03         | 0,12         | < 0,40         | -            | -            | 0,18         | 0,25         | < 0,05       | < 0,89       |
| St14    | M          | < 0,80         | 0,11         | 0,04         | < 0,08       | < 0,40         | -            | -            | 0,07         | 0,43         | < 0,05       | < 0,89       |
| St14    | F          | < 0,80         | 0,06         | 0,03         | 0,25         | < 0,40         | -            | -            | 0,15         | 0,49         | < 0,05       | < 0,89       |
| St15    | S          | 1,05           | 0,08         | 0,04         | 0,90         | < 0,40         | -            | -            | 1,69         | 0,60         | < 0,05       | 5,59         |
| St15    | M          | 1,01           | 0,10         | 0,04         | 3,38         | < 0,40         | -            | -            | 0,72         | 0,47         | < 0,05       | 1,54         |
| St15    | F          | < 0,80         | < 0,02       | 0,03         | 4,54         | < 0,40         | -            | -            | 1,90         | 2,08         | < 0,05       | 3,11         |
| St16    | S          | 0,90           | 0,04         | 0,03         | 1,90         | < 0,40         | -            | -            | 1,45         | 0,59         | < 0,05       | 2,65         |
| St16    | M          | 0,89           | 0,05         | 0,03         | 0,14         | < 0,40         | -            | -            | 0,68         | 2,50         | < 0,05       | < 0,89       |
| St16    | F          | 0,84           | 0,06         | 0,04         | 0,11         | < 0,40         | -            | -            | 4,79         | 3,25         | < 0,05       | 1,42         |
| St17    | S          | < 0,80         | 0,07         | 0,04         | 1,17         | < 0,40         | -            | -            | 2,52         | 2,15         | < 0,05       | < 0,89       |
| St17    | M          | 1,39           | 0,08         | 0,08         | 3,69         | < 0,40         | -            | -            | 2,53         | 3,61         | < 0,05       | 7,34         |
| St17    | F          | 0,82           | 0,04         | 0,04         | 2,12         | < 0,40         | -            | -            | 1,76         | 2,10         | < 0,05       | < 0,89       |
| St18    | S          | < 0,80         | 0,07         | 0,04         | 0,13         | < 0,40         | -            | -            | 2,39         | 0,68         | < 0,05       | 4,39         |
| St18    | M          | 0,86           | 0,09         | 0,04         | 0,10         | < 0,40         | -            | -            | 1,40         | 0,46         | < 0,05       | < 0,89       |
| St18    | F          | 0,97           | 0,05         | 0,04         | 0,27         | < 0,40         | -            | -            | 0,84         | 0,44         | < 0,05       | < 0,89       |





## ANNEXE 4

### Photographies des sédiments collectés dans le Canal de la Havannah.



Station St01



Station St02



Station St05



Station St07



Station St09



Station St05

**Photographies des sédiments collectés dans la Baie du Prony.**



Station St13



Station St15



Station St16

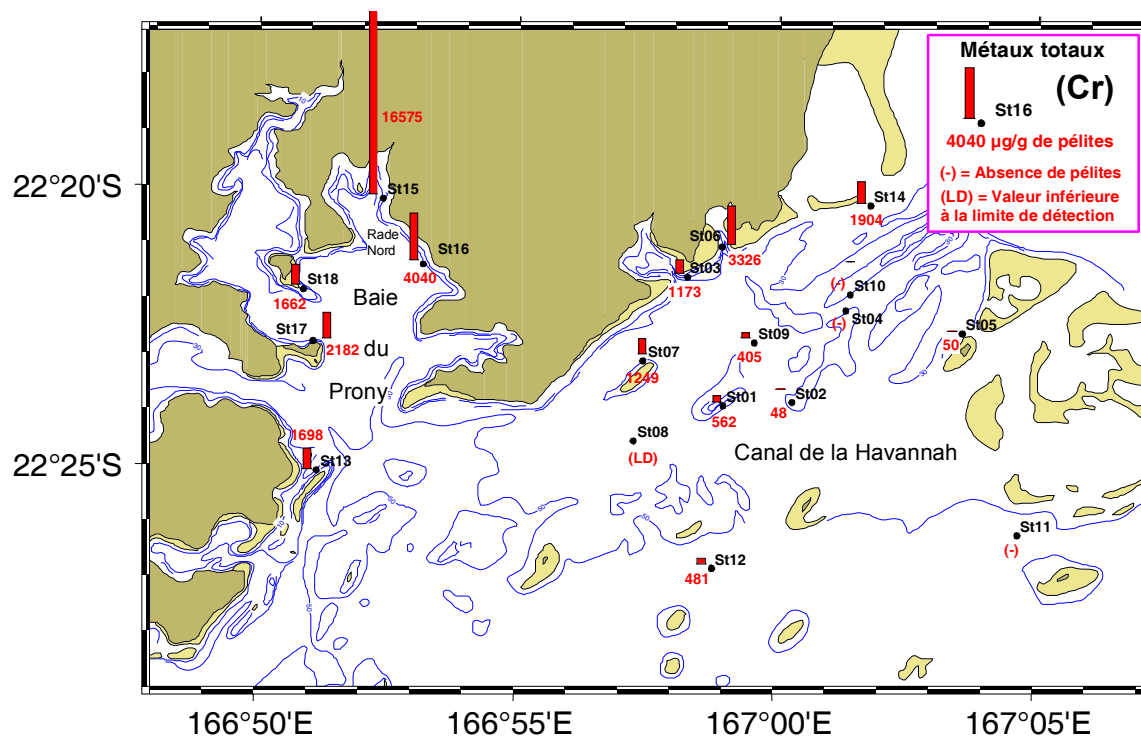
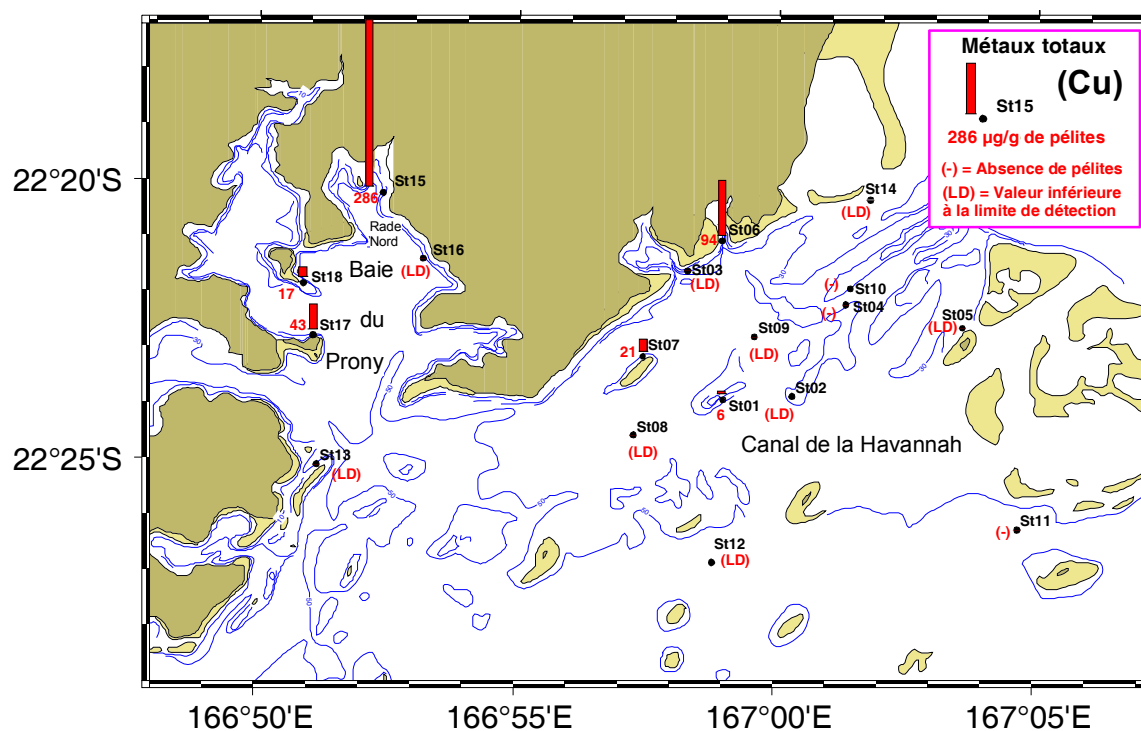


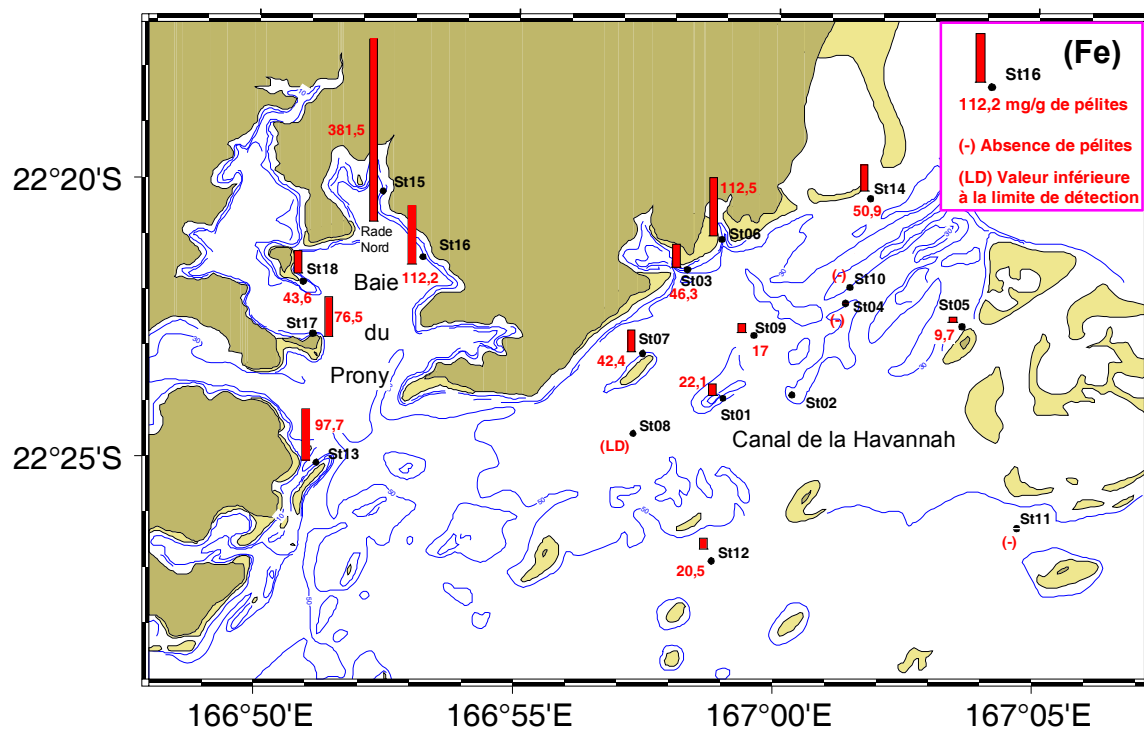
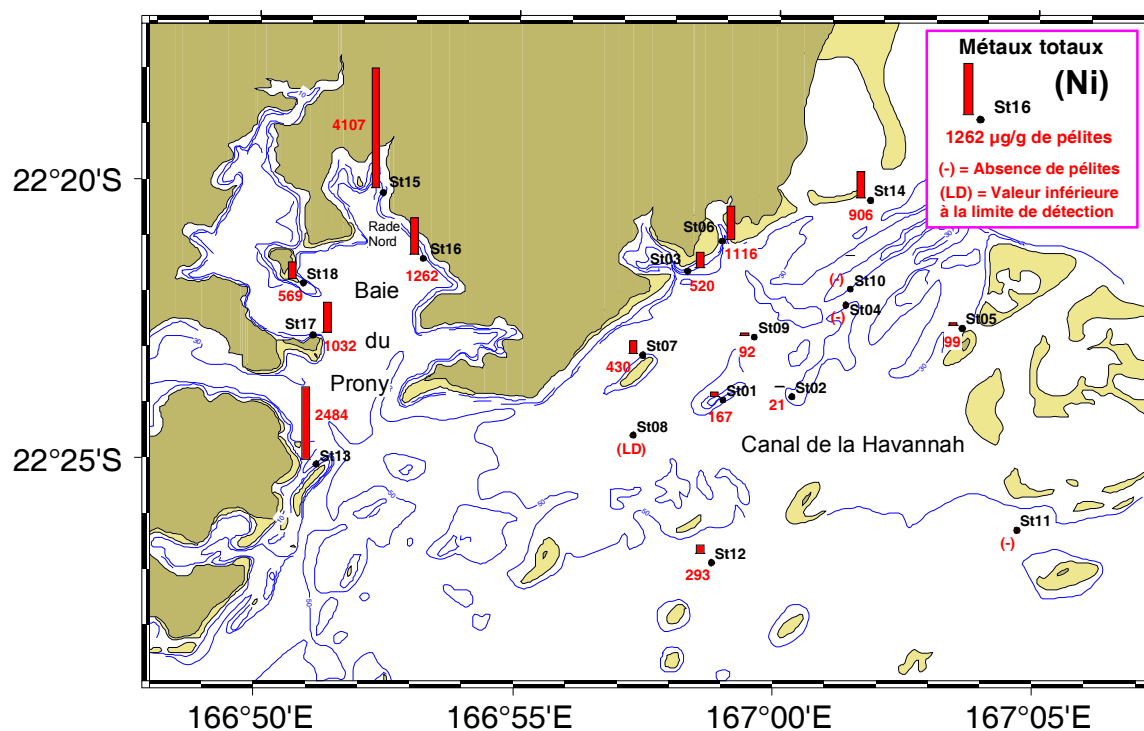
Station St17

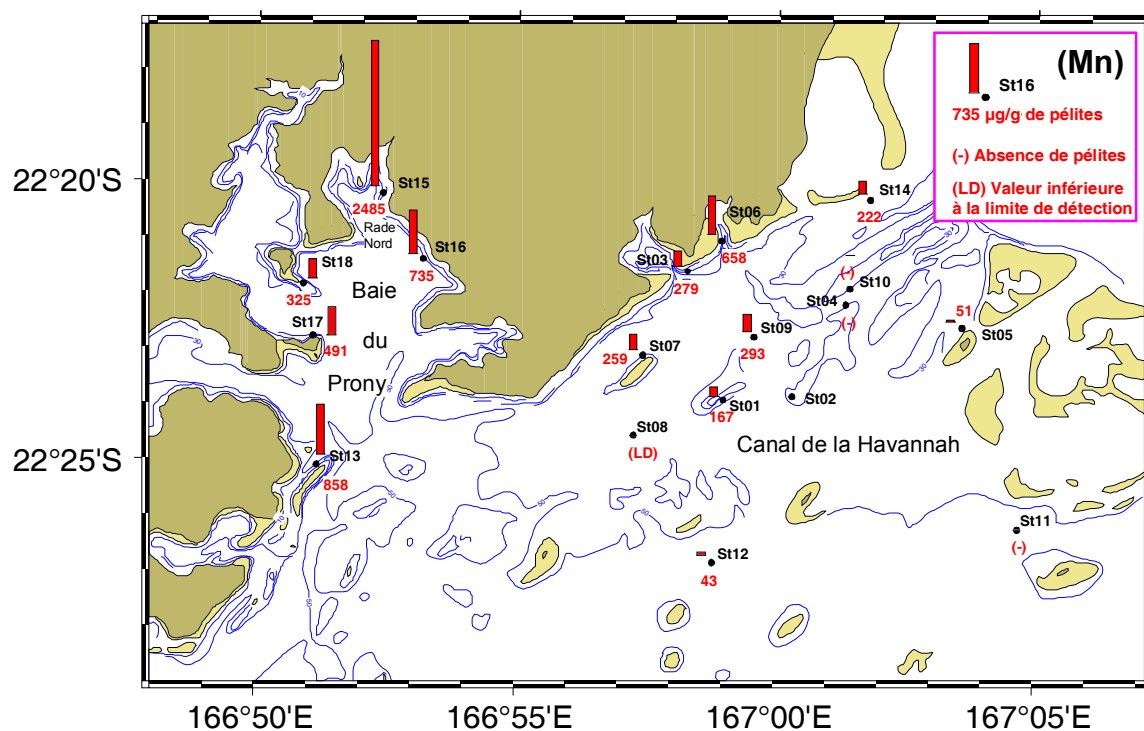


Station St18









## ANNEXE 6

### Concentration en métaux dans les phases géochimiques des pélites

Extraction séquentielle des métaux contenus dans les pélites des sédiments du domaine étudié. Résultats d'analyse pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni ; (< ld) = Valeur analytique inférieure à la limite de détection de l'ICP-OES ; (-) = Valeur non calculée ; n/a = Echantillon non analysé.

| Co   | Résidu                                                                            |      | Oxyde |      | Carbonate |     | Matière Organique |      | Total |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|-----------|-----|-------------------|------|-------|
|      | µg/g                                                                              | %    | µg/g  | %    | µg/g      | %   | µg/g              | %    | µg/g  |
| St01 | 12,7                                                                              | 88,3 | < ld  | -    | < ld      | -   | 1,7               | 11,7 | 14,4  |
| St02 | n/a                                                                               | -    | < ld  | -    | < ld      | -   | 0,3               | -    | -     |
| St03 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St04 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St05 | n/a                                                                               | -    | < ld  | -    | < ld      | -   | 0,8               | -    | -     |
| St06 | 56,1                                                                              | 83,8 | 1,5   | 2,3  | 0,9       | 1,3 | 8,4               | 12,6 | 66,9  |
| St07 | 24,3                                                                              | 91,0 | 0,2   | 0,7  | < ld      | -   | 2,2               | 8,3  | 26,7  |
| St08 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St09 | 8,4                                                                               | 68,1 | < ld  | -    | < ld      | -   | 3,9               | 31,9 | 12,3  |
| St10 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St11 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St12 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St13 | 91,7                                                                              | 74,1 | 18,7  | 15,1 | 11,4      | 9,2 | 2,1               | 1,7  | 123,9 |
| St14 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St15 | 193,7                                                                             | 70,6 | 53,5  | 19,5 | 25,2      | 9,2 | 2,1               | 0,8  | 274,5 |
| St16 | 63,2                                                                              | 74,6 | 15,3  | 18,1 | 4,8       | 5,6 | 1,5               | 1,7  | 84,8  |
| St17 | 44,0                                                                              | 83,1 | 3,6   | 6,8  | 0,5       | 0,9 | 4,9               | 9,2  | 52,9  |
| St18 | 27,9                                                                              | 84,5 | 0,5   | 1,4  | < ld      | 0,0 | 4,6               | 14,0 | 32,9  |

| Cr   | Résidu                                                                            |      | Oxyde |     | Carbonate |     | Matière Organique |     | Total |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-----|-----------|-----|-------------------|-----|-------|
|      | µg/g                                                                              | %    | µg/g  | %   | µg/g      | %   | µg/g              | %   | µg/g  |
| St01 | 511                                                                               | 91,0 | 7,0   | 1,2 | 7,6       | 1,4 | 36,1              | 6,4 | 562   |
| St02 | n/a                                                                               | -    | 4,1   | -   | 5,7       | -   | 38,0              | -   | -     |
| St03 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St04 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St05 | n/a                                                                               | -    | 3,9   | -   | 5,4       | -   | 23,1              | -   | 32    |
| St06 | 3291                                                                              | 99,0 | 5,0   | 0,1 | 5,1       | 0,2 | 24,8              | 0,7 | 3326  |
| St07 | 1214                                                                              | 97,2 | 8,1   | 0,6 | 2,9       | 0,2 | 23,9              | 1,9 | 1249  |
| St08 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St09 | 353                                                                               | 87,2 | 15,8  | 3,9 | 12,8      | 3,2 | 23,4              | 5,8 | 405   |
| St10 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St11 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St12 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St13 | 1655                                                                              | 97,5 | 20,2  | 1,2 | 3,4       | 0,2 | 19,1              | 1,1 | 1698  |
| St14 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |       |
| St15 | 16535                                                                             | 99,8 | 25,4  | 0,2 | 12,5      | 0,1 | 1,7               | 0,0 | 16575 |
| St16 | 4013                                                                              | 99,3 | 21,0  | 0,5 | 2,2       | 0,1 | 3,5               | 0,1 | 4040  |
| St17 | 2150                                                                              | 98,5 | 8,9   | 0,4 | 2,9       | 0,1 | 20,0              | 0,9 | 2182  |
| St18 | 1639                                                                              | 98,6 | 9,0   | 0,5 | 3,0       | 0,2 | 11,5              | 0,7 | 1662  |

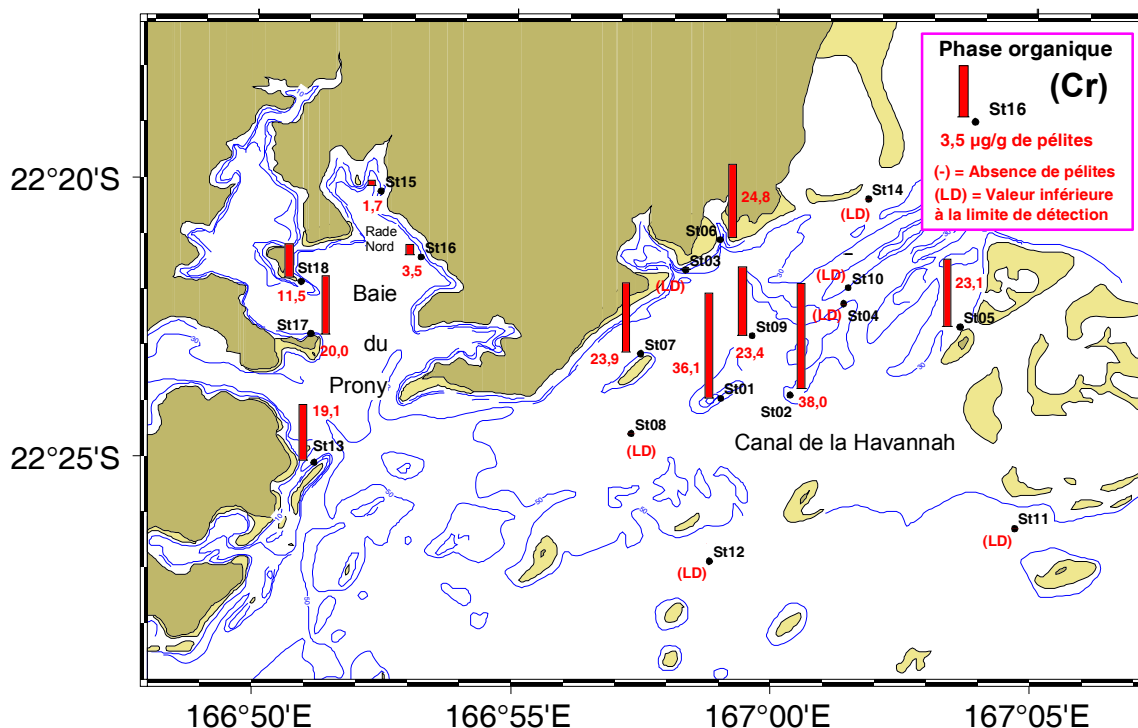
| Fe   | Résidu                                                                            |      | Oxyde |     | Carbonate |     | Matière Organique |     | Total  |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-----|-----------|-----|-------------------|-----|--------|
|      | µg/g                                                                              | %    | µg/g  | %   | µg/g      | %   | µg/g              | %   |        |
| St01 | 21521                                                                             | 97,5 | 519   | 2,3 | 17,1      | 0,1 | 15,8              | 0,1 | 22073  |
| St02 | n/a                                                                               | -    | 319   | -   | 17,5      | -   | 22,7              | -   | -      |
| St03 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St04 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St05 | n/a                                                                               | -    | 189   | -   | 21,1      | -   | 12,6              | -   | -      |
| St06 | 112131                                                                            | 99,7 | 273   | 0,2 | 76,9      | 0,1 | 19,2              | 0,0 | 112500 |
| St07 | 41607                                                                             | 98,2 | 737   | 1,7 | 17,1      | 0,0 | 20,9              | 0,0 | 42383  |
| St08 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St09 | 15788                                                                             | 94,9 | 811   | 4,9 | 20,0      | 0,1 | 14,1              | 0,1 | 16633  |
| St10 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St11 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St12 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St13 | 95238                                                                             | 97,4 | 2411  | 2,5 | 68,7      | 0,1 | 17,4              | 0,0 | 97735  |
| St14 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |     |           |     |                   |     |        |
| St15 | 380823                                                                            | 99,8 | 662   | 0,2 | 6,1       | 0,0 | 47,5              | 0,0 | 381539 |
| St16 | 110902                                                                            | 98,8 | 1266  | 1,1 | 3,8       | 0,0 | 29,3              | 0,0 | 112201 |
| St17 | 75872                                                                             | 99,1 | 623   | 0,8 | 9,7       | 0,0 | 22,9              | 0,0 | 76528  |
| St18 | 42816                                                                             | 98,2 | 754   | 1,7 | 19,5      | 0,0 | 19,8              | 0,0 | 43609  |

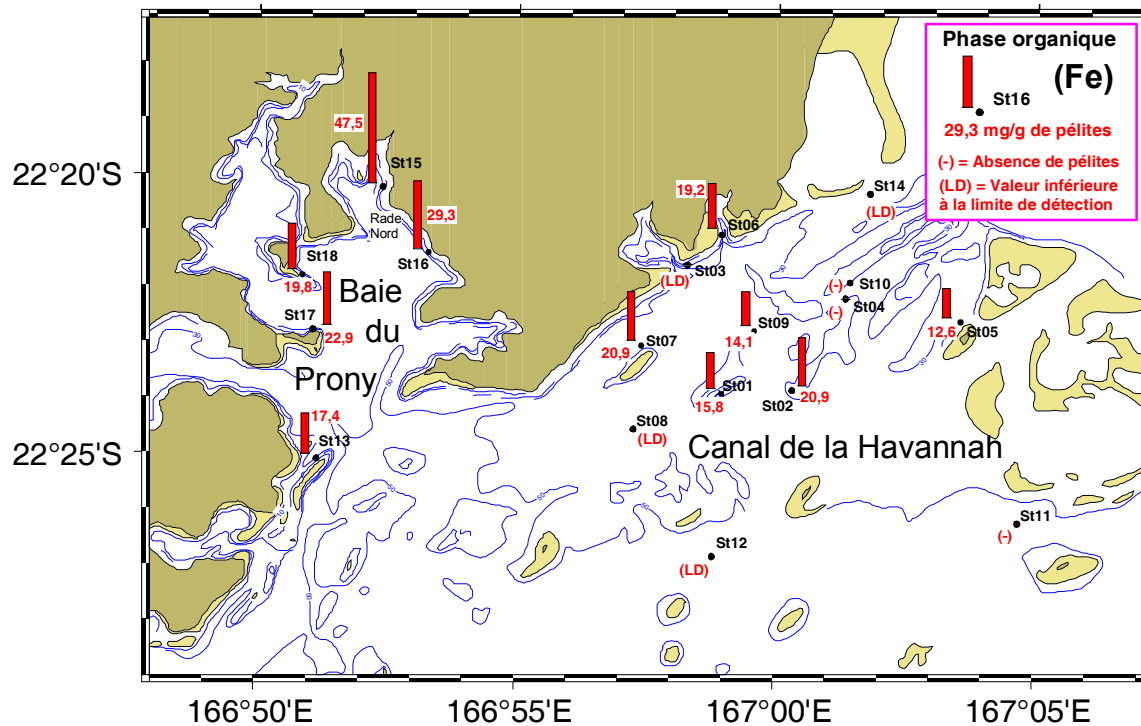
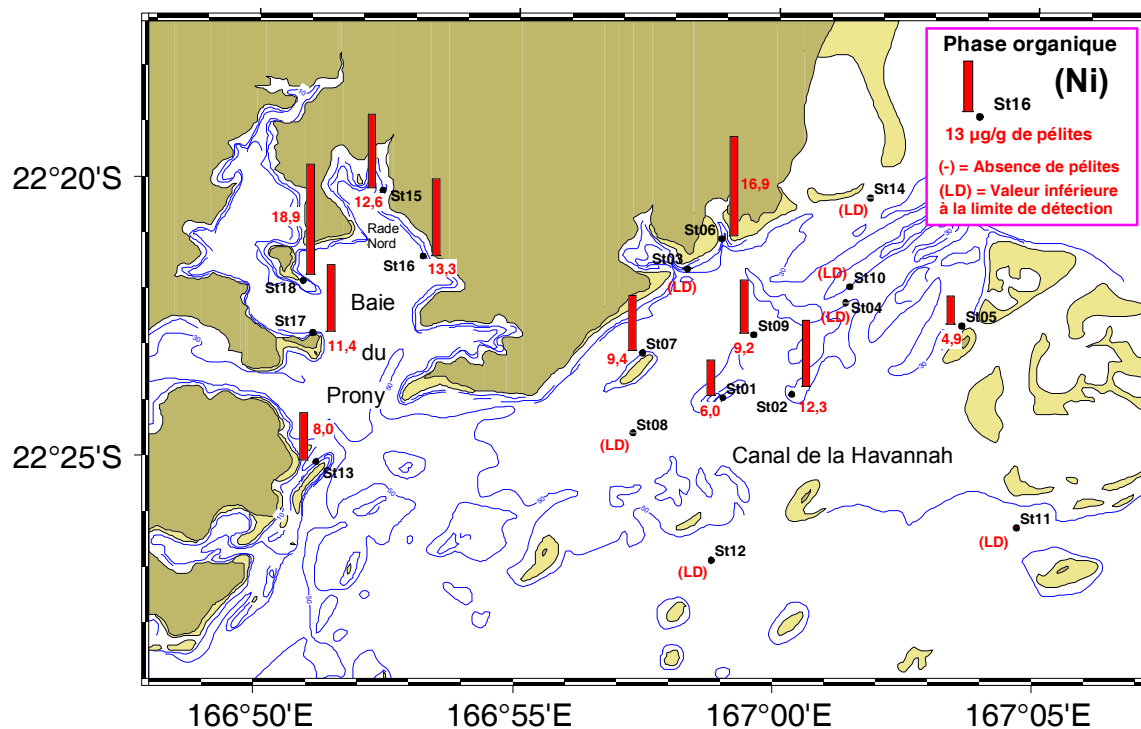
| Mn   | Résidus                                                                           |      | Oxydes |      | Carbonates |      | Matière Org |      | Total |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|--------|------|------------|------|-------------|------|-------|
|      | µg/g                                                                              | %    | µg/g   | %    | µg/g       | %    | µg/g        | %    |       |
| St01 | 60                                                                                | 36,1 | 11,7   | 7,0  | 76,1       | 45,5 | 19,0        | 11,4 | 167   |
| St02 | n/a                                                                               | -    | < ld   | -    | 28,7       | -    | 9,3         | -    | -     |
| St03 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St04 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St05 | n/a                                                                               | -    | < ld   | -    | 39,4       | -    | 11,1        | -    | -     |
| St06 | 341                                                                               | 51,9 | 35,3   | 5,4  | 242,3      | 36,8 | 38,9        | 5,9  | 658   |
| St07 | 120                                                                               | 46,3 | 21,6   | 8,4  | 101,3      | 39,1 | 16,2        | 6,3  | 259   |
| St08 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St09 | 43                                                                                | 14,8 | 37,9   | 12,9 | 164,0      | 56,0 | 47,5        | 16,2 | 293   |
| St10 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St11 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St12 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St13 | 365                                                                               | 42,6 | 76,8   | 8,9  | 398,6      | 46,4 | 17,7        | 2,1  | 858   |
| St15 | 1282                                                                              | 51,6 | 326,6  | 13,1 | 720,5      | 29,0 | 155,9       | 6,3  | 2485  |
| St14 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |        |      |            |      |             |      |       |
| St16 | 247                                                                               | 33,7 | 60,1   | 8,2  | 323,9      | 44,1 | 103,3       | 14,1 | 735   |
| St17 | 216                                                                               | 44,0 | 33,6   | 6,8  | 204,4      | 41,6 | 36,9        | 7,5  | 491   |
| St18 | 132                                                                               | 40,5 | 24,6   | 7,6  | 100,7      | 30,9 | 68,4        | 21,0 | 325   |

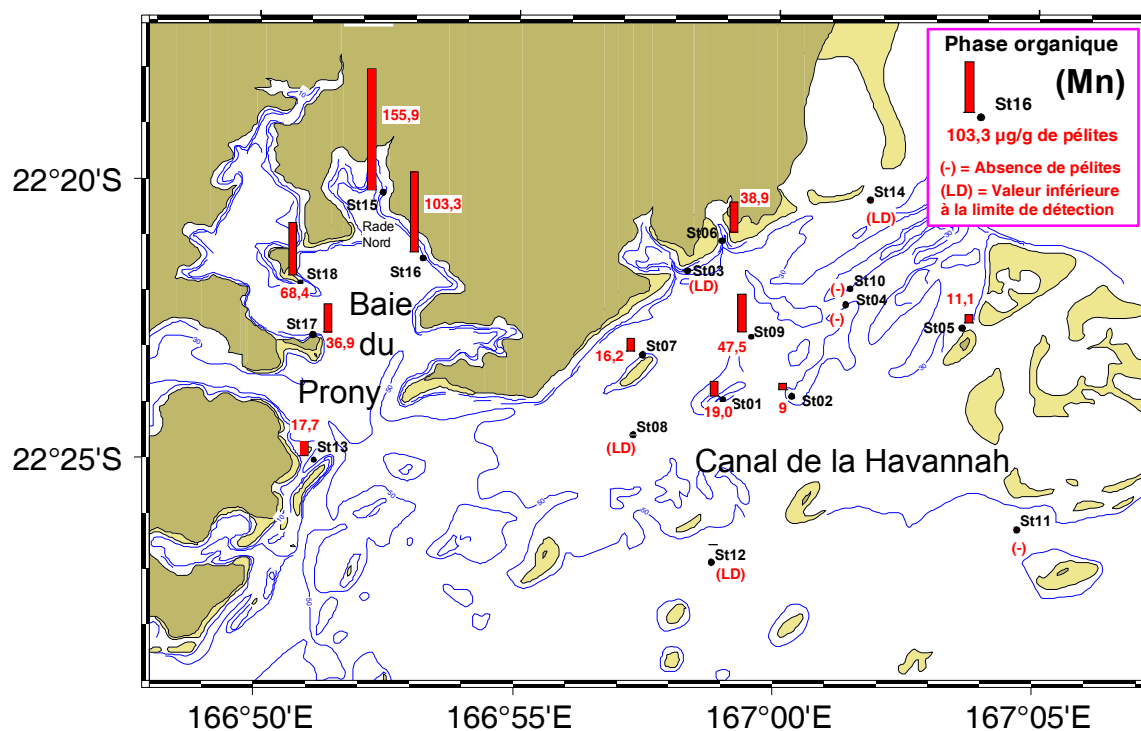
| Ni   | Résidu                                                                            |      | Oxyde |      | Carbonate |     | Matière Organique |      | Total |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|-----------|-----|-------------------|------|-------|
|      | µg/g                                                                              | %    | µg/g  | %    | µg/g      | %   | µg/g              | %    |       |
| St01 | 150                                                                               | 89,7 | 10,5  | 6,2  | 0,7       | 0,4 | 6,0               | 3,6  | 167   |
| St02 | n/a                                                                               | -    | 8,4   | -    | < ld      | -   | 12,3              | -    | -     |
| St03 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St04 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St05 | n/a                                                                               | -    | 6,2   | -    | < ld      | -   | 4,9               | -    | -     |
| St06 | 1075                                                                              | 96,3 | 14,6  | 1,3  | 9,6       | 0,9 | 16,9              | 1,5  | 1116  |
| St07 | 401                                                                               | 93,1 | 17,8  | 4,1  | 2,6       | 0,6 | 9,4               | 2,2  | 430   |
| St08 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St09 | 64                                                                                | 69,8 | 15,3  | 16,6 | 3,3       | 3,6 | 9,2               | 10,0 | 92    |
| St10 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St11 | Absence de couverture sédimentaire                                                |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St12 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St13 | 2280                                                                              | 91,8 | 132,8 | 5,3  | 64,0      | 2,6 | 8,0               | 0,3  | 2484  |
| St15 | 4009                                                                              | 97,6 | 44,2  | 1,1  | 41,5      | 1,0 | 12,6              | 0,3  | 4107  |
| St14 | Matériel particulaire en quantité insuffisante pour les extractions séquentielles |      |       |      |           |     |                   |      |       |
| St16 | 1210                                                                              | 95,9 | 28,5  | 2,3  | 10,1      | 0,8 | 13,3              | 1,1  | 1262  |
| St17 | 995                                                                               | 96,4 | 20,0  | 1,9  | 5,4       | 0,5 | 11,4              | 1,1  | 1032  |
| St18 | 532                                                                               | 93,4 | 16,4  | 2,9  | 2,5       | 0,4 | 18,9              | 3,3  | 569   |

### Carte de distribution des métaux solubilisés par extraction séquentielle.

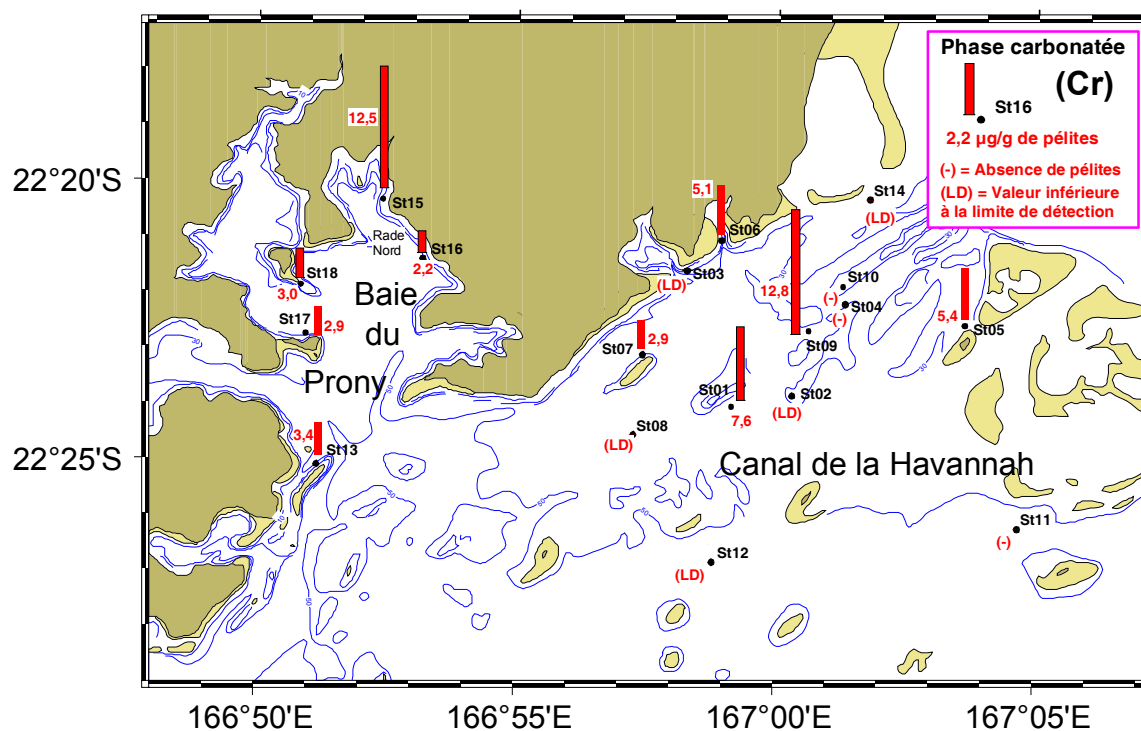
Concentration des éléments métalliques (Cr, Fe, Mn et Ni) extraits de la phase organique des pélites des sédiments de surface échantillonnés dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony.

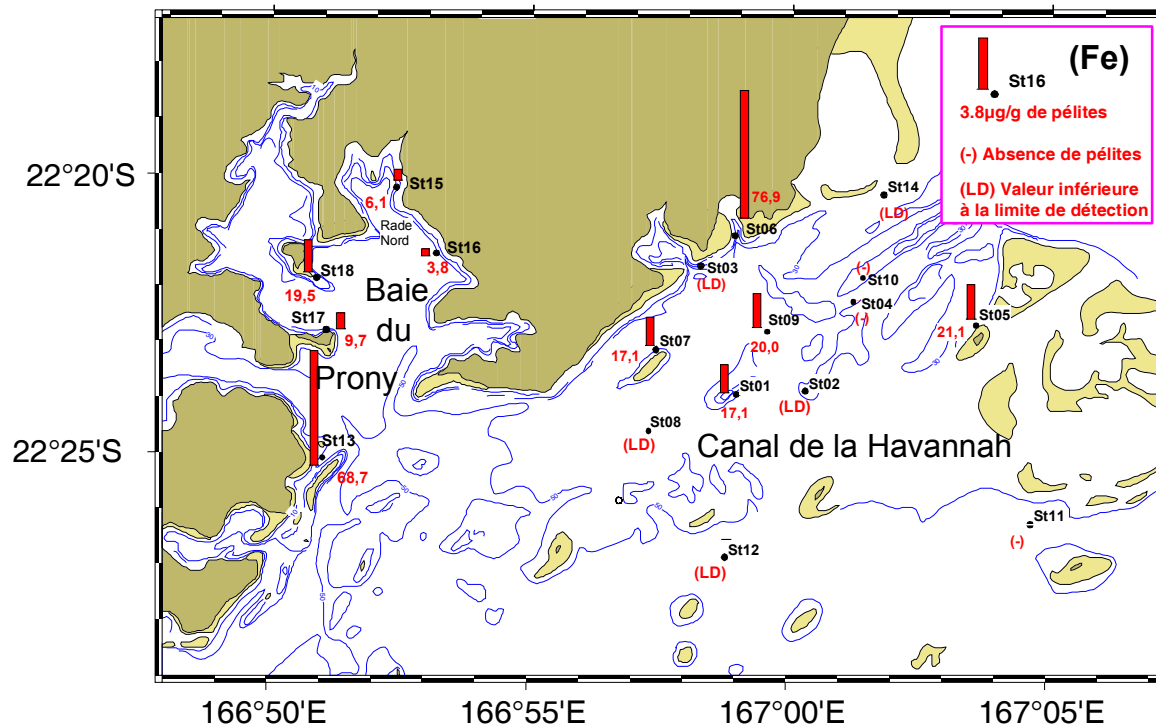
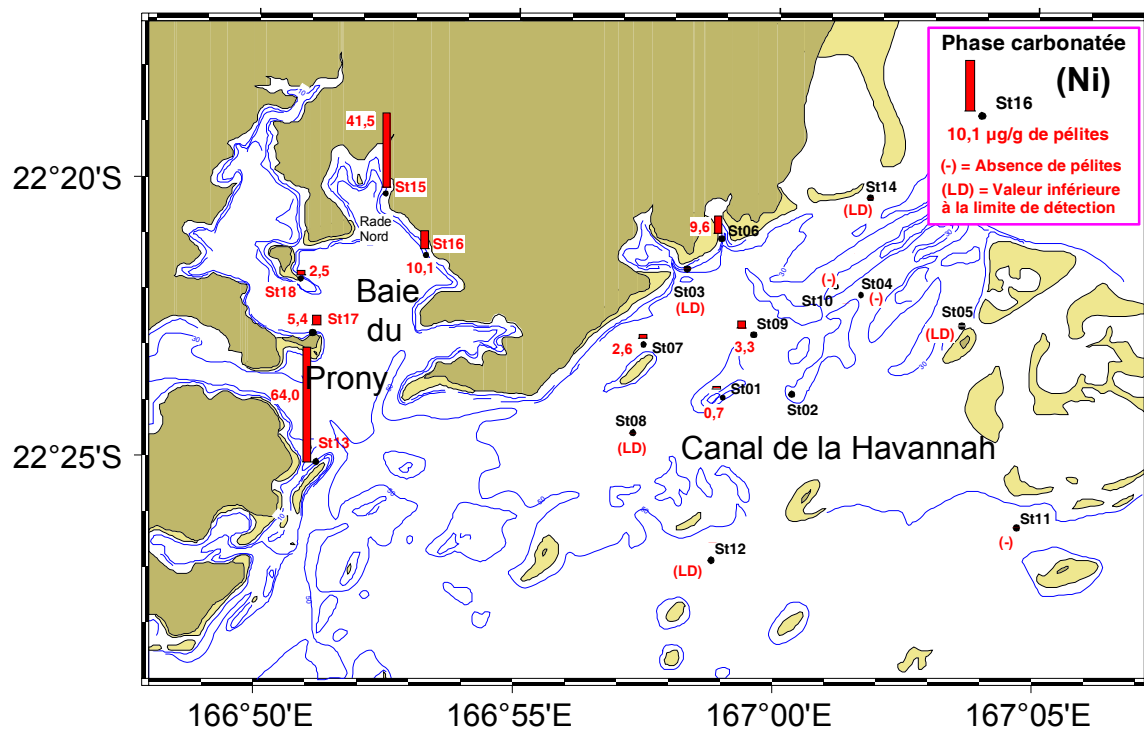


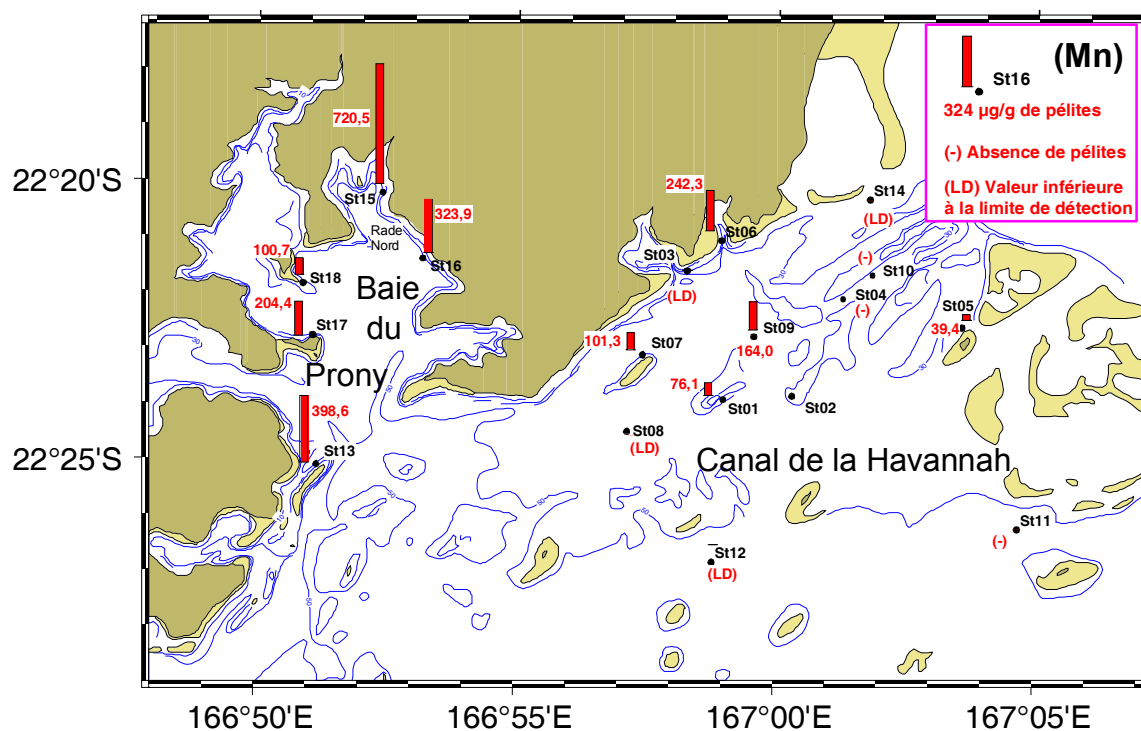




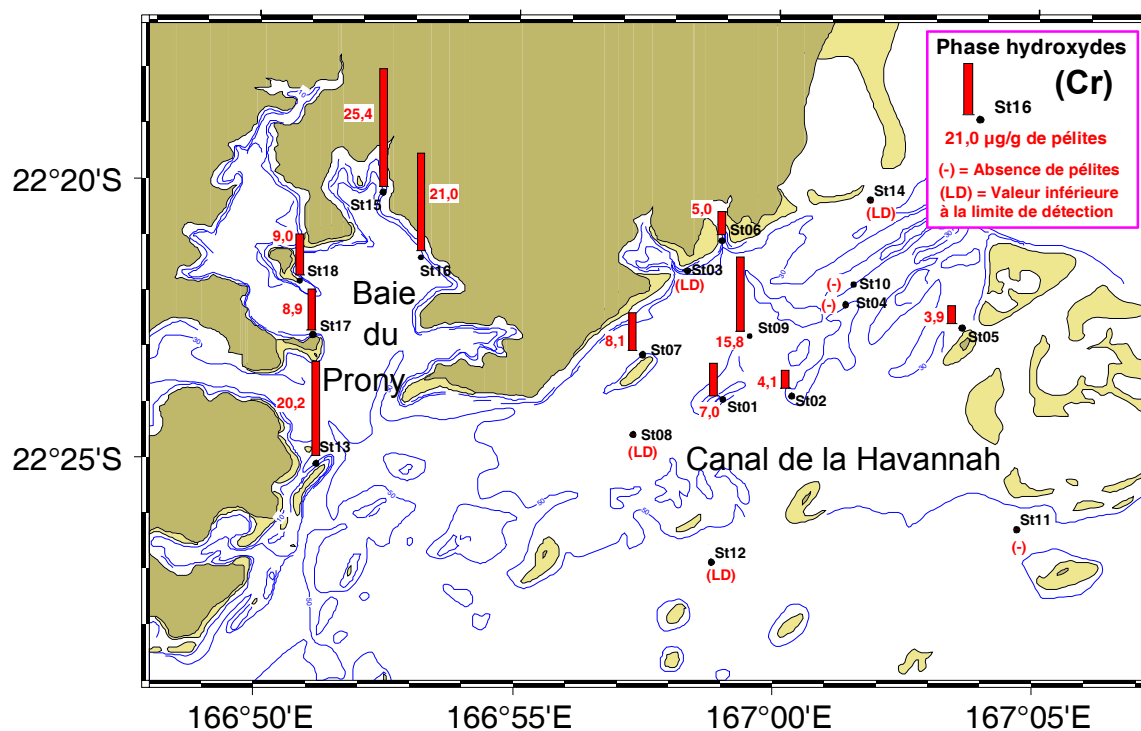
Concentration des éléments métalliques (Cr, Fe, Mn et Ni) extraits de la phase carbonatée des pélites des sédiments de surface échantillonnés dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony

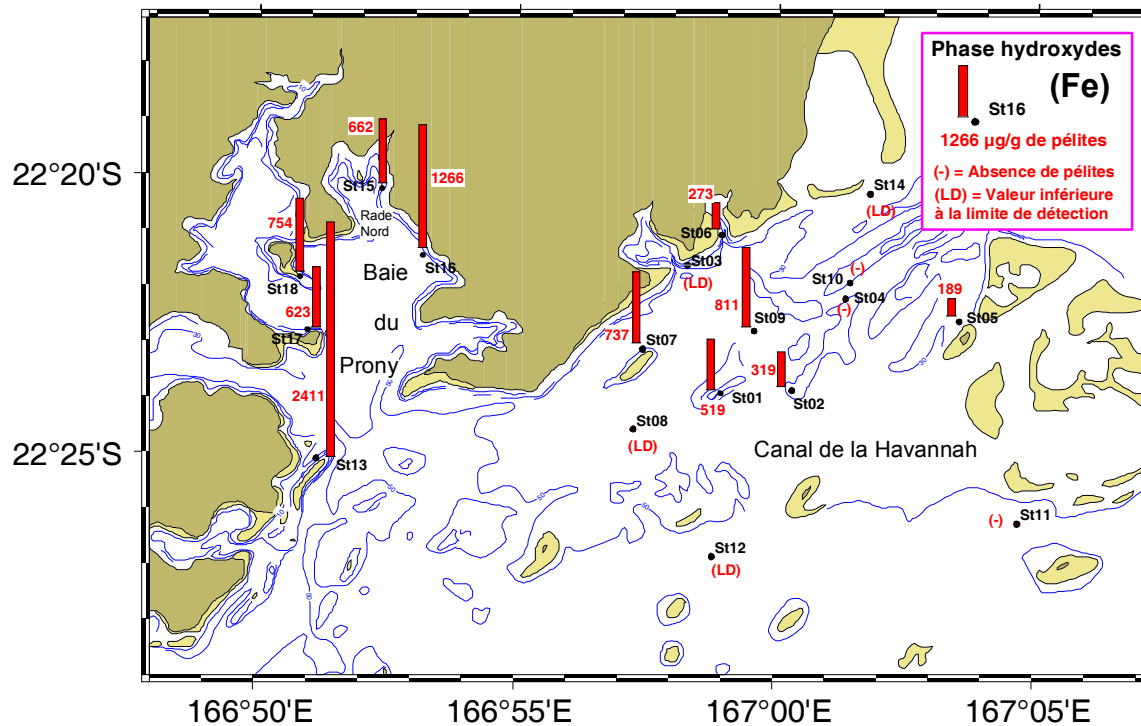
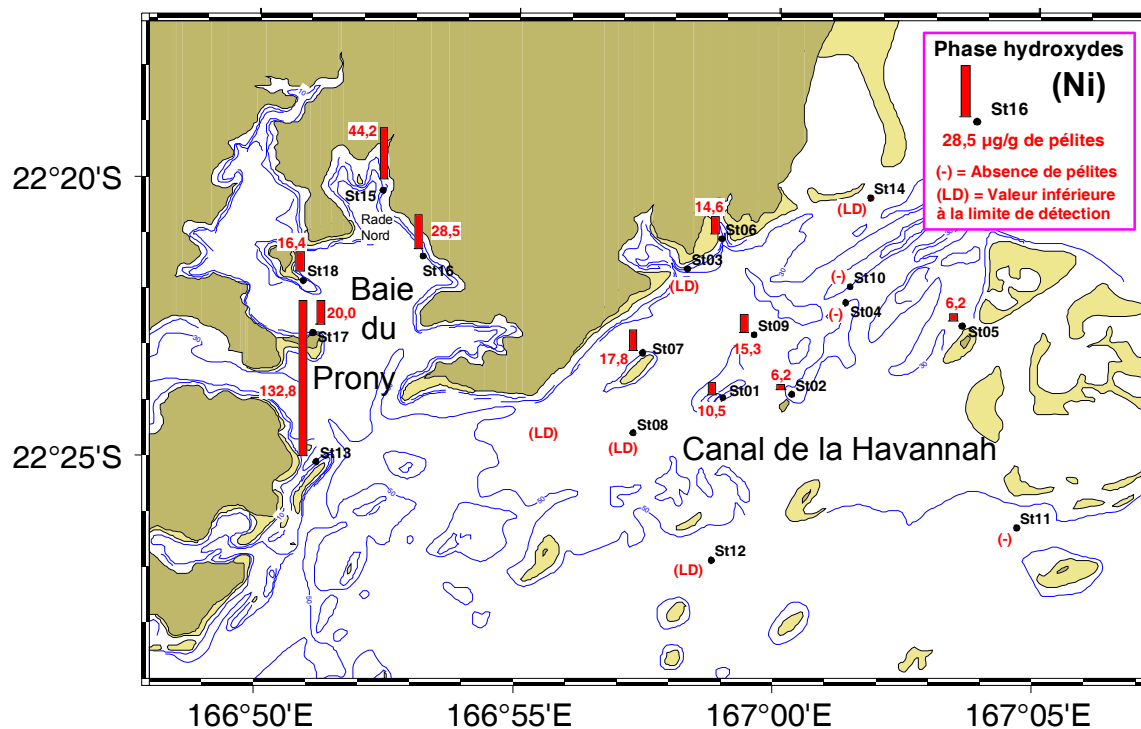


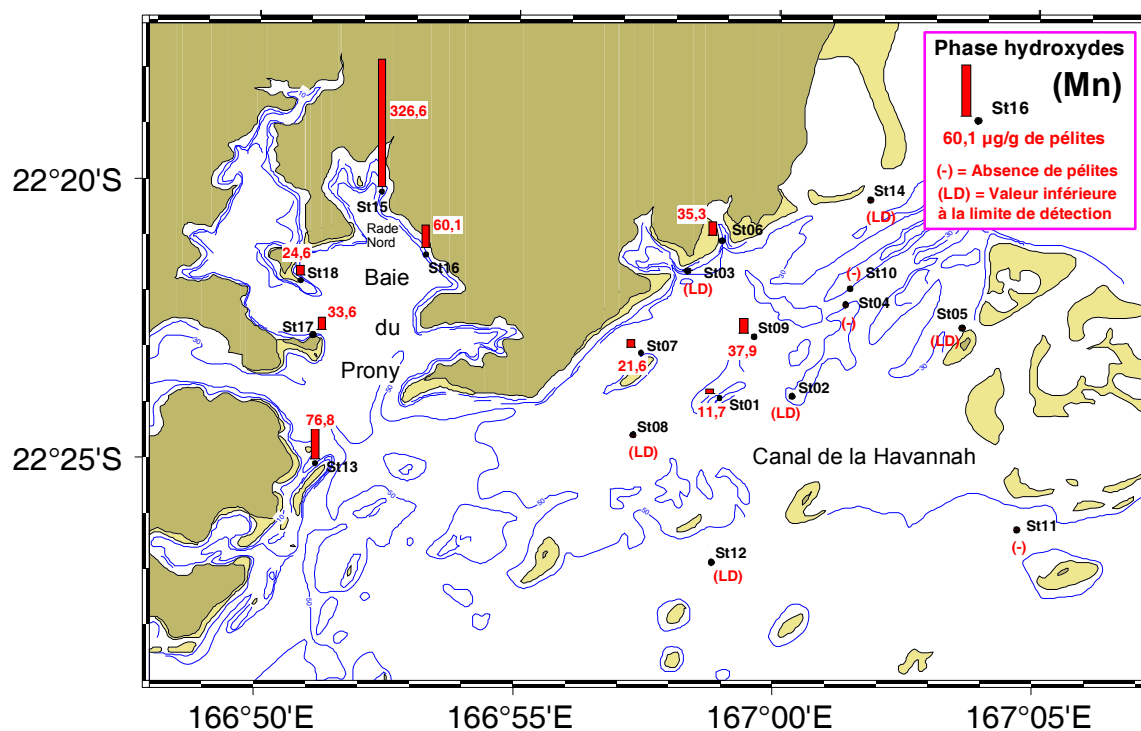




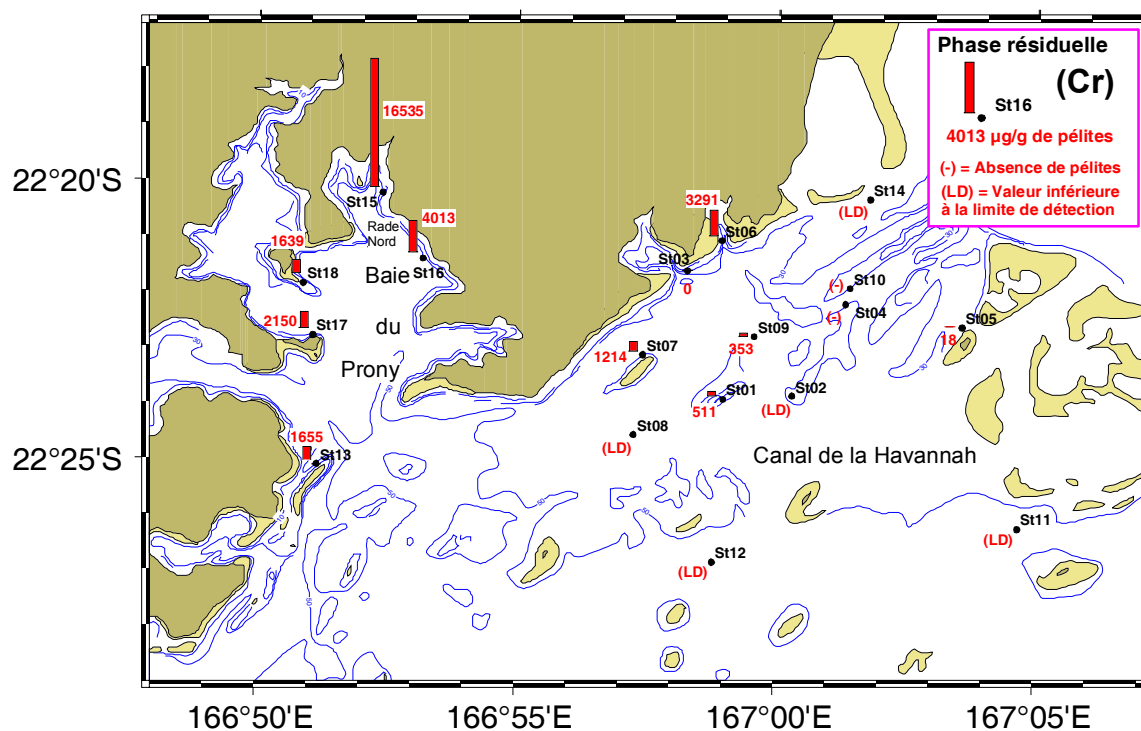
Concentration des éléments métalliques (Cr, Fe, Mn et Ni) extraits de la phase oxy-hydroxydée des pélites des sédiments de surface échantillonnés dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony

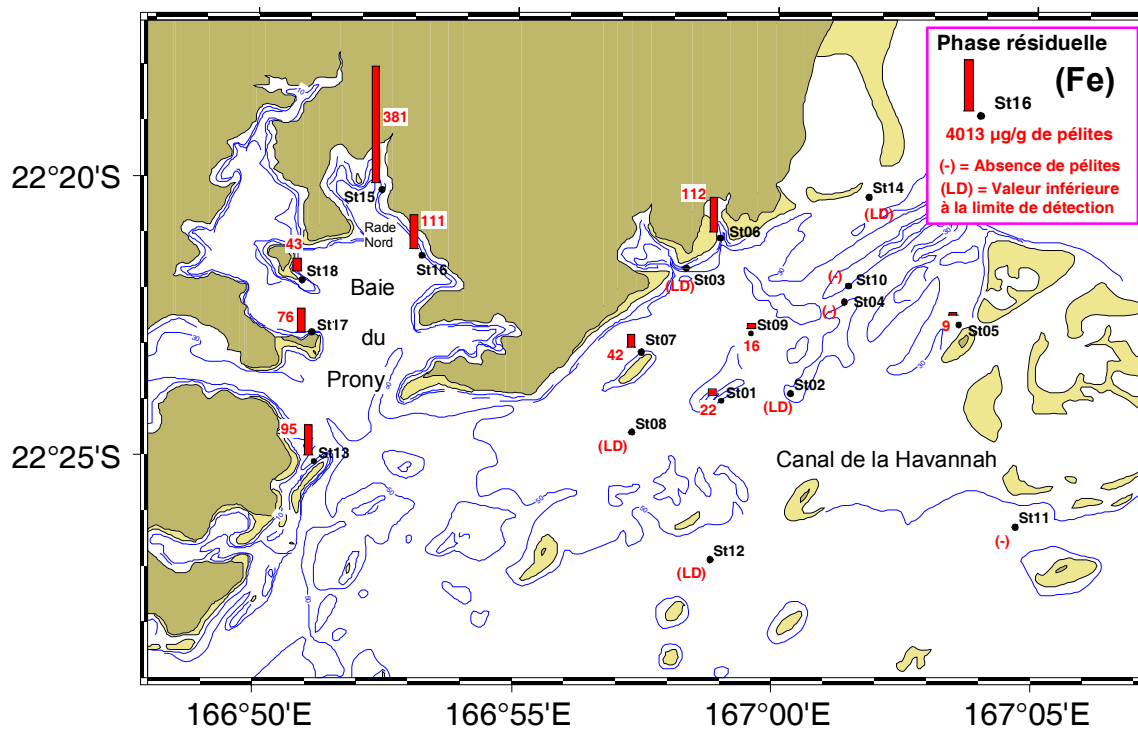
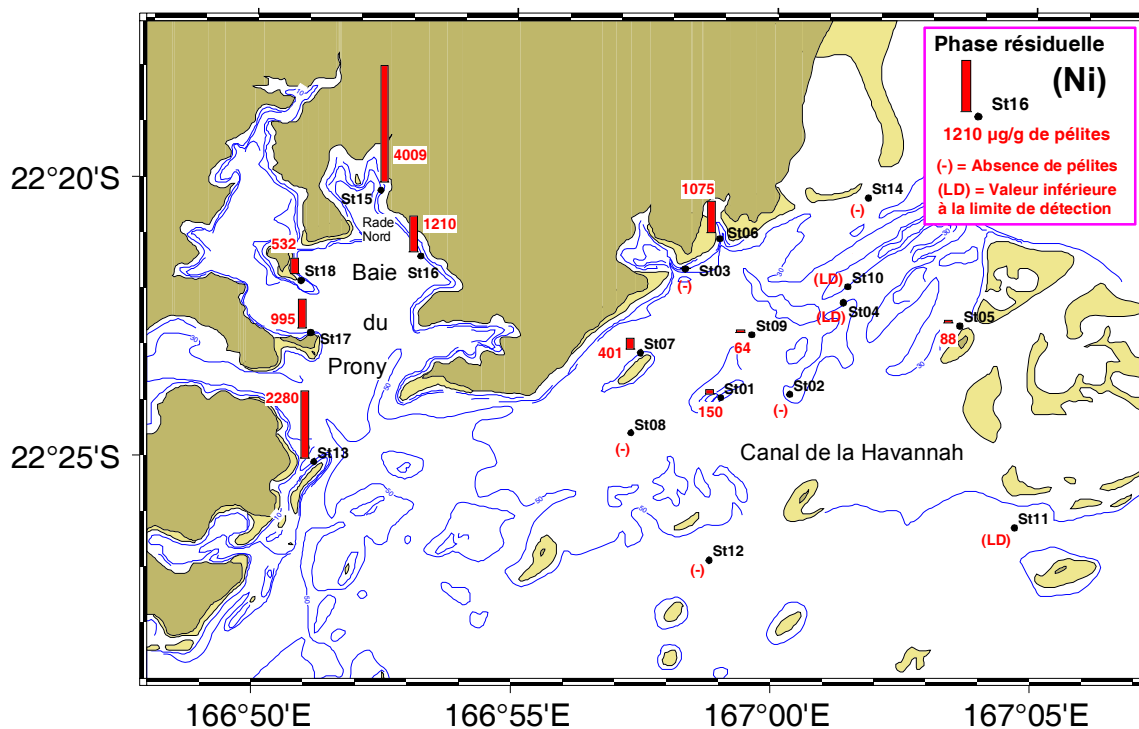


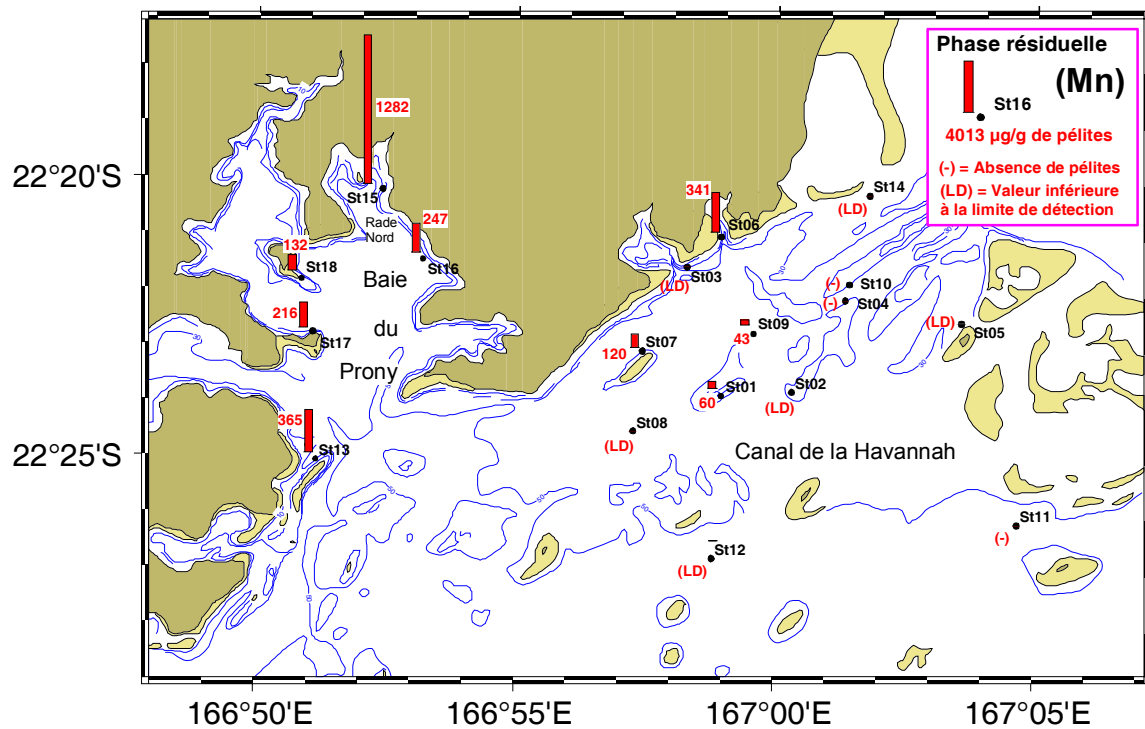




Concentration des éléments métalliques (Cr, Fe, Mn et Ni) extraits de la phase résiduelle des pélites des sédiments de surface échantillonnés dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony







## BIBLIOGRAPHIE

- Ackermann F., 1980. A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of Estuarine and coastal sediments. *Environment technology letters*, vol. 1, pp 518-527.
- Deely J.M. & Fergusson J.E., 1994. Heavy metal and organic matter concentrations and distribution in dated sediments of a small estuary adjacent to a small urban area. *Sci. Total Environ.*, 153, 97-111.
- Fanning G.O., Pilson M.E.Q., 1973. On the spectrophotometric determination of dissolved silica in natural waters. *Anal. Chem.*, 45 : 136-140.
- Fernandez, J.M., Breau L., Cabon M., Fichez, R. 2005. Distribution et variabilité des métaux de transition dans les sédiments du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, Collection Sciences de la Mer, Note technique n°3, IRD Nouméa.
- Fernandez J.M., Ouillon S., Chevillon C., Douillet P., Fichez R. and Le Gendre R. 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), *In Press, Corrected Proof, Available online 27 October 2005*.
- Fichez R., Adjerdoud M., Bozec Y.M., Breau L., Chancerelle Y., Chevillon C., Douillet P., Fernandez J.M., 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
- Fichez R., Chifflet S., Douillet P., Gérard P., Ouillon S. Biogeochemical typology and temporal variability of lagoon waters in a coral reef ecosystem subject to terrigenous and anthropogenic inputs (New Caledonia). Soumis à *Marine Pollution Bulletin*.
- He, Q., Walling, D.E., 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): 117-137.
- Holms-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W., Strickland J.D.H., 1965. Fluorimetric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 30 : 3-15.
- Lorenzen C.J., 1966. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Res.*, 13 : 223-227.
- Mayer L.M. & Fink L.K., 1979. Granulometry dependence of Cr accumulation in estuarine sediments in Maine. *Estuarine and coastal marine science*, II, pp. 491-503.
- Murphy J., Riley J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. 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. *Mar. Chem.*, 24 : 239-252.
- Raimbault P., Slawyk G., Coste B., Fry J., 1990. Feasibility of measuring an automated colorimetric procedure for the determination of seawater nitrate in the 0 to 100nM range : examples from field and culture. *Mar. Biol.*, 104 : 347-351.
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M., 1979. Sequential procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, Vol. 51, pp. 844-851.
- Redfield A.C., 1934. On the proportion of organic derivatives in the sea and their relation to the composition of plankton. *In James Jonhstone Memorial, Liverpool*, 177-192.

Strickland J.D.H., Parsons T.R., 1972. A practical handbook of sea water analysis. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 167 : 311p.

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Chronologie des prélèvement dans la colonne d'eau et marégramme du 27 au 30 avril 2005 .....                                                                                      | 4  |
| Figure 2 : Chronologie des prélèvement de sédiment et marégramme du 28 novembre au 01 décembre 2005.....                                                                                     | 5  |
| Figure 3: Localisation géographique des stations de prélèvements dans la colonne d'eau (mission du 27-29 avril 2005 et dans la couverture sédimentaire (mission du 28-30 novembre 2005)..... | 7  |
| Figure 5 : Carte distribution spatiale des pélites dans les sédiments du domaine étudié. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la masse du sédiment échantillonné.....                | 20 |
| Figure 6 : Distribution spatiale type des métaux dans les pélites des sédiments de surface: exemple du manganèse total.....                                                                  | 21 |
| Figure 4 : Carte de la structure horizontale des masses d'eaux dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony .....                                                                        | 26 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Liste et localisation des stations. NP = Non Prélèvement ; (-) = Coordonnées ne permettant pas l'échantillonnage.....                                                                                                                                              | 6  |
| Tableau 2 : Valeurs maximales et minimales pour les paramètres Température, Salinité, Turbidité, Fluorescence et Irradiance.....                                                                                                                                               | 13 |
| Tableau 3 : Valeurs des rapports C/N/P pour l'ensemble de la zone étudiée et pour les profondeurs échantillonnées.....                                                                                                                                                         | 17 |
| Tableau 4 : Concentrations minimales, maximales et moyennes des principaux éléments métalliques détectés dans les eaux de mer du domaine étudié.....                                                                                                                           | 18 |
| Tableau 5: Teneur en fraction pélique (< 40µm) des sédiments échantillonnés dans le domaine d'étude ; (-) = Absence de matériel sédimentaire meuble.....                                                                                                                       | 19 |
| Tableau 6 : Concentrations minimales, maximales et moyennes des principaux éléments métalliques détectés dans les sédiments du domaine étudié. ....                                                                                                                            | 21 |
| Tableau 7 : Ecart des concentration de Co, Cr, Fe, Mn et Ni dans les 4 phases géochimiques des pélites constitutives des échantillons St01, St02, St05, St06, St07, St09, St13, St15, St16, St17 et St18 ; (< Id) = Valeurs inférieure à la limite de détection de mesure..... | 22 |
| Tableau 8 : Concentrations moyennes dans les phases résiduelles des pélites. ....                                                                                                                                                                                              | 24 |
| Tableau 9 : Concentration en métaux totaux exprimées par gramme de sédiment brut échantillonné ; (-) = Absence de pélites ; (< Id) = Valeur d'analyse inférieure à la limite de détection de l'ICP-OES. ....                                                                   | 25 |

## LISTE DES ANNEXES

### **Annexe 1**

Principales caractéristiques physico-chimiques : Profils CTD obtenus avec une sonde multiparamétrique SBE 19.

### **Annexe 2**

Concentrations en sels nutritifs dans la colonne d'eau.

### **Annexe 3**

Concentrations des métaux dissous dans la colonne d'eau.

### **Annexe 4**

Photographies des sédiments collectés dans le Canal de la Havannah et dans la Baie du Prony.

### **Annexe 5**

Concentrations en métaux totaux dans les pélites.

### **Annexe 6**

Concentration en métaux dans les phases géochimiques des pélites.