

Rapport final

IMPACT POTENTIEL DES ACTIVITES INDUSTRIELLES DE VALE-NC
VOLUME 3/3 : SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE DU MILIEU MARIN
(2009-2013)

SYNTHESE DES ETUDES

Jean-Michel Fernandez

Mai 2014



Observatoire de l'environnement
en Nouvelle-Calédonie

11 rue Gynemer
98800 Nouméa
Tel.: (+ 687) 23 69 69
www.oeil.nc

Photos de couverture AEL : sonde multiparamétrique et carottier-tube

Contributions scientifiques



IRD - Institut de Recherche pour le Développement

Fernandez, JM, Belhandouz A, Bodei S, Breau L, Chevillon Ch, Derex P, Dolbecq M, Douillet P, Gerard P, Lamoureux JP, Le Grand H, Le Gendre R, Moreton B, Pangrani A, Senia J

CEREGE - Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement

Meunier JD, Borschneck D, Grauby O, Gros M, Miche H

CEA - Commissariat à l'Énergie Atomique

Tiffreau Ch, Jullien M, Libert M, Pault M, Pointeau I, Raynal J

IAEA - International Atomic Energy Agency

Warnau M

CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

Adams M, Binet M.

Expertise provinciale



Comité d'experts de la province Sud

Université de Bordeaux 1 - CNRS, Massabuau JC
 Université Paul Sabatier, Toulouse - CNRS, Monnin C
 Université d'Aix Marseille - CNRS, Roux B
 Université du Québec - INRS, Campbell P

Suivi environnemental



AEL-LEA Environnement

Fernandez JM, Achard R, Beineix M, Haddad L, Kaplan H, Kumar-Roiné S, Le Grand H, Moreton B, Pluchino S, Pousse C, Raynal A, Suarez K.

Nombre de pages : 121

	N/Ref	V/Ref	
Identification	AEL N°130218-OE-05 et 131218-OE-06	BDC N°09-02-13 et 18-12-13	
Titre complet	IMPACT POTENTIEL DES ACTIVITES INDUSTRIELLES DE VALE-NC. VOLUME 3/3 : SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE DU MILIEU MARIN (2009-2013). <i>SYNTHESE DES ETUDES</i>		
Auteur(s)	Jean-Michel Fernandez		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Jean-Michel Fernandez		17/01/2014
Vérificateur 1	Céline Pousse		21/01/2014
Vérificateur 2	Ben Moreton		22/01/2014
Approbateur	Jean-Michel Fernandez		22/08/2014
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V-3.13	Rapport final		22/08/2014
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Matthieu Juncker	OEIL		

Ce rapport est cité comme suit :

Fernandez J-M (2014). Impact potentiel des activités industrielles de Vale-NC : Volume 3/3 : Suivi physico-chimique du milieu marin (2009-2013). Synthèse des études. Rapport AEL 130218-OE-05, 121p.

Table des matières

Avant-Propos	6
Chapitre I - INTRODUCTION	7
I.1. Vale-NC : POURQUOI UN TUYAU ?	11
I.2. CADRE LEGISLATIF	14
Chapitre II - SYNTHESE DES SUIVIS	17
II.1. Suivi physico-chimique de la colonne d'eau	19
II.1.1. Suivi de la colonne d'eau en saison fraîche	20
II.1.2. Suivi de la colonne d'eau en saison chaude.....	34
II.1.3. Conclusion	44
II.2. Suivi des flux de particules	48
II.2.1. Caractérisation de la matière en suspension.....	49
II.2.2. Calcul des flux de matières	55
II.2.3. Conclusion	58
II.3. Suivi géochimique des sédiments	59
II.3.1. Sédimentologique	60
II.3.2. Comparaison des concentrations en métaux	62
II.3.3. Conclusion	65
II.4. Suivi des taux d'accumulation des sédiments	67
II.4.1. Carotte St15 (Rade du Nord).....	68
II.4.2. Carotte St06 (Baie Kwé)	69
II.4.3. Carotte St13 (Ile Ouen)	70
II.4.4. Carotte St16 (port de commerce).....	71
II.4.5. Conclusion	72
II.5. Biosurveillance du milieu marin	73
II.5.1. Bio-surveillance active par transplantation de bio-indicateurs	73
II.5.2. Bio-surveillance passive et analyse du risque sanitaire	83
Chapitre III - CONCLUSION ET PERSPECTIVES	109
REFERENCES	115
LISTE DES FIGURES	117
LISTE DES TABLEAUX	120

Avant-Propos

Ce rapport sollicité par l'OEIL – Observatoire de l'Environnement en Nouvelle-Calédonie – constitue une synthèse des suivis « physico-chimiques » conduits dans le lagon sud susceptible d'être impacté par l'activité industrielle et minière de Vale-NC. Ce suivi résulte d'une part de l'aboutissement des états de référence et des études d'impact conduits ainsi que des améliorations et optimisations consécutives apportées au réseau de surveillance initial.

Les travaux relatifs au suivi ont été initiés par l'IRD dès 2009 et ensuite confiés à AEL à partir de 2010 pour le compte de Vale-NC.

Le rapport de synthèse ci-dessous présenté constitue le **troisième des trois volumes** correspondant à l'étude complète intégrant les travaux suivants :

- Caractérisation de l'état physico-chimique de référence du milieu marin (2005-2009) (Volume 1/3) ;
- Evaluations prédictives du comportement géochimique, du transport et des effets écotoxicologiques potentiels du futur effluent (2006-2009 ; « *Programme prédictif* » IRD) (Volume 2/3) ;
- Suivi de la qualité du milieu marin (2009-2013) sur la base du réseau de surveillance physico-chimique et écotoxicologique instauré dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony (Volume 3/3).

L'objet du présent travail n'était pas de faire une analyse complète des données disponibles, il s'agit d'une compilation des principaux résultats issus de la surveillance environnementale.

Chapitre I - INTRODUCTION

En 1864 Jules Garnier découvre l'existence d'un minerai silicaté à forte teneur en nickel (qui sera baptisé « garniérite »). Depuis cette date, les techniques de prospection géologique modernes ont permis d'établir que la Nouvelle-Calédonie détient entre 20 et 30 % des réserves mondiales en nickel (Les Echos, 11 mars 2010) et se place ainsi aux premiers rangs mondiaux en termes de ressources minières. Environ 80 % de ces ressources seraient associés aux latérites et 20 % aux saprolites, c'est-à-dire aux péridotites altérées (Figure 1).

Jusqu'à présent, l'opérateur historique (SLN) a exploité principalement le **minerai saprolitique** duquel il récupère le nickel grâce à un **procédé pyro-métallurgique**. Le minerai nécessite alors des prétraitements successifs avant d'être transféré dans d'immenses fours équipés d'électrodes où il subit une fusion à une température de 1400°C entraînant une réduction des oxydes de nickel et de fer et ainsi une libération de ces deux métaux.



Figure 1 : Mine de nickel à ciel ouvert de Poro (Nouvelle-Calédonie).

Ce minerai silicaté est extrait de mines à ciel ouvert après un « décapage » initial des couches à plus faibles teneurs (cuirasse, latérites rouges puis jaunes) industriellement inexploitable par ce procédé industriel classique.

Jusqu'à l'arrivée des américains lors de la Seconde Guerre Mondiale, l'extraction et l'exploitation de ce minerai saprolitique étaient réalisées manuellement par des ouvriers ; l'introduction de la mécanisation lourde (pelleteuses et camions de roulage notamment) vers 1950, a permis d'augmenter considérablement le tonnage de minerai extrait. Ainsi en 2010, un total de 8,7 millions de tonnes humides de minerais (soit 6,0 millions de tonnes humides de saprolites et 2,7 millions de tonnes humides de latérites) ont été extraites des sols calédoniens.

Cependant, cette augmentation des volumes de saprolites extraites s'est accompagnée d'un appauvrissement important des teneurs des minerais en nickel, de 15-16 % vers 1875 à 2-3 % à l'heure actuelle pour les gisements exploités par la SLN (Figure 2). De plus, les ressources en

saprolites détenues par la SLN ont été significativement entamées après 135 ans d'exploitation et ne permettront plus, dans les décennies à venir, la poursuite de leur valorisation par pyro-métallurgie ; ce procédé étant d'autant plus rentable que le minerai est riche en nickel, ce qui n'est plus le cas à des teneurs inférieures à 2 %. Depuis le début du XXI siècle, la ressource latéritique à faible teneur en nickel (1,5%) focalise l'intérêt des industriels de la mine.

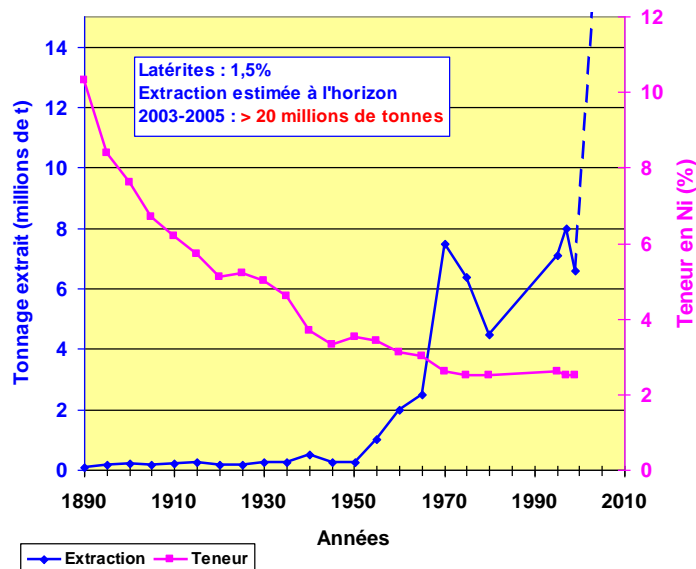


Figure 2 : Évolution temporelle des volumes de saprolites extraits et de leurs teneurs en nickel (comm DIMENC, 1998).

Parallèlement à cette diminution des teneurs, depuis plusieurs années maintenant, la demande en nickel des industries produisant de l'acier inoxydable et des alliages spéciaux a fortement augmenté, principalement dopée par la remarquable croissance économique de la Chine (et des pays émergents) et de sa nécessité de construire des infrastructures que ce développement rapide induit.

De par l'importance de ses ressources minières, la Nouvelle Calédonie est bien placée pour faire face à cette demande, sous réserve d'augmenter ses capacités de production et d'exploiter tous les types de minerais disponibles y compris ceux à faible teneur. Pour répondre à cet objectif, deux projets miniers majeurs sont aujourd'hui en phase de production : l'un dans le nord avec la société Koniambo Nickel SAS dont l'actionnaire majoritaire est une société minière calédonienne, la SMSP, et l'autre, dans le sud avec la société Vale-NC et son projet d'**usine hydro-métallurgique** spécifique pour l'exploitation des **latérites à faible teneur**.

En effet, l'importance de la demande mondiale récente en nickel ajoutée à l'appauvrissement progressif des teneurs et la diminution des volumes de minerai saprolitique encore disponibles ont incité certains industriels à se tourner vers l'exploitation de minerai à faible teneur en nickel (proche de 1,5 %) : les **latérites jaunes**. Les volumes disponibles étant colossaux, leur exploitation serait assurée pendant de nombreuses décennies.

C'est donc à partir des années 1990 que l'industrie minière calédonienne a commencé à s'intéresser à ces latérites, tout d'abord en les exportant telles quelles en Australie. Puis, en 1991, un accord capital a été signé entre le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et la compagnie canadienne INCO pour la réalisation d'une étude de faisabilité et la construction d'un complexe

industriel de traitement sur place des latérites contenant du nickel et du cobalt à partir des concessions minières de SOPROMINES, une filiale du BRGM.

En 1997, après avoir réalisé de nombreux tests dans ses laboratoires au Canada, INCO prend la décision de construire une usine pilote près du plateau de Goro, dont l'objectif était de tester ce procédé à l'échelle semi-industrielle et de concevoir et d'optimiser toutes les opérations industrielles nécessaires. Cette usine pilote est mise en opération en 1999.

En 2001, sur la base de cette expérimentation, INCO décide de passer à la construction de l'usine commerciale. Amorcée en 2002, celle-ci est rapidement suspendue pour des raisons de réévaluation financière du projet ; le chantier reprend en 2005 (Figure 3 et Figure 4) après l'obtention du permis d'exploitation au titre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE 2004). Le 9 octobre 2008, Goro Nickel (la filiale calédonienne d'INCO) obtient les deux nouveaux arrêtés d'autorisation d'exploitation nécessaires : ICPE usine/CPM et ICPE parc des résidus.

Après le rachat d'INCO en 2006 par le groupe brésilien CVRD, renommé par la suite Vale, Goro Nickel devient Vale-NC en 2010 et démarre progressivement sa production ; elle n'est aujourd'hui encore que partielle.

En matière de réserves, les études menées fin 2005 indiquent que les volumes « *prouvés et probables* » de la zone minière initiale du plateau de Goro (Figure 5) sont estimés à 120 millions de tonnes, avec une teneur moyenne en nickel de 1,48 % (une des plus fortes au monde pour des latérites) et une teneur en cobalt de 0,11 %.



Figure 3 : Etat de la construction de l'usine de Goro-Nickel au mois de novembre 2005.

A ces réserves s'ajoutent des ressources « *indiquées et mesurées* » estimées à 75 millions de tonnes qui présentent une teneur en nickel de 1,49 % et une teneur en cobalt de 0,12 %, situées autour de la zone minière initiale. Vale-NC prévoit d'extraire 4 millions de tonnes sèches/an de minerai latéritique (plan minier prévu sur 29 ans) afin d'assurer une production de 54 000 tonnes/an de nickel et de 5 400 t/an de cobalt.

Ce projet a généré la création de plusieurs milliers d'emplois temporaires lors de la phase de construction et doit apporter environ 800 emplois directs et plusieurs milliers d'emplois indirects et induits, pendant toute la période d'exploitation.



Figure 4 : Usine de Vale-NC: vue des réacteurs d'extraction acide en mars 2009.



Figure 5 : Vue du front de mine sur le plateau de Goro en novembre 2006.

I.1. Vale-NC : POURQUOI UN TUYAU ?

Le procédé hydro-métallurgique permettant l'extraction du nickel et du cobalt contenus dans les latérites jaunes consiste en une mise en solution des métaux après dissolution chimique du minerai brut à l'aide d'acide sulfurique concentré. Cette liqueur acide subit ensuite une série de traitements aboutissant à l'obtention des produits finis commercialisables (oxyde de nickel et carbonate de cobalt). L'ensemble des étapes de ce procédé est résumé ci-dessous et illustré en Figure 6.

- **Etape 1 : Préparation du minerai sur mine.** Les latérites extraites sont acheminées vers l'usine de préparation du minerai, située à proximité de la mine. La granulométrie du minerai est dans un premier temps réduite par tamisage, concassage et broyage, puis le minerai est mélangé avec de l'eau pour former une pulpe. Celle-ci est alors envoyée vers l'usine de traitement grâce à un pipeline.

- **Etape 2 : Lixiviation acide sous pression.** La pulpe est transférée dans des autoclaves en présence d'acide sulfurique concentré, à une température de 270°C et une pression de 56 bars. Ce traitement permet de détruire la structure du minerai pour en libérer les métaux. La pulpe lixiviée est constituée de solides résiduels composés majoritairement d'oxydes de fer et d'une solution contenant 85 % d'eau, du nickel, du cobalt mais également d'autres éléments métalliques non désirés.

- **Etape 3 : Décantation à contre-courant.** Une fois refroidie cette pulpe passe dans un circuit de décantation à contre-courant permettant de séparer les solides (résidus) des liquides (liqueurs). Les solides décantés sont récupérés au fond de 6 décanteurs successifs pour assurer un bon lavage. A chaque fois, d'importants volumes de phases liquides sont récupérés par débordement. En fin d'opération, la liqueur contient 94 % du nickel et du cobalt extraits. Les solides résiduels, sous forme de pâte épaisse, sont envoyés vers une unité de traitement.

- **Etape 4 : Neutralisation partielle.** La liqueur recueillie contient de nombreuses impuretés en solution ainsi qu'un reste d'acide non consommé par les réactions chimiques. Elle subit donc une série de traitements afin de la rendre moins acide et la purifier. L'acide résiduel est neutralisé avec du calcaire et de la chaux et forment un précipité : du **gypse** (plâtre). Le fer, le chrome, l'aluminium et la silice sont également précipités sous forme d'**hydroxydes solides** et sont séparés de la liqueur par décantation et filtration. Le gypse et les hydroxydes de métaux sont envoyés sous forme de pâte vers une unité de traitement des résidus solides.

- **Etape 5 : Extractions par solvant.** L'élimination finale des impuretés résiduelles de la liqueur (zinc, magnésium, manganèse, calcium) et la phase de concentration du nickel et du cobalt sont assurées par l'ajout de divers **solvants organiques**. Un premier mélange de solvants capte sélectivement le nickel, le cobalt et le zinc, mais laisse dans la liqueur les autres impuretés. Une étape supplémentaire permet alors de concentrer les trois métaux d'un facteur 20 à 30. La solution finale ne contenant plus que le nickel et le cobalt est alors envoyée dans un circuit d'extraction secondaire, où les deux métaux sont séparés dans deux solutions pures et distinctes : du chlorure de nickel et du chlorure de cobalt.

- **Etape 6 : Obtention des produits finis commercialisables.** La solution de chlorures de nickel est envoyée vers une unité de pyrolyse à 800°C avec un mélange d'air et de gaz naturel pour former

de petites billes solides d'oxydes de nickel. La solution de chlorures de cobalt est neutralisée pour former du carbonate de cobalt de couleur pourpre.

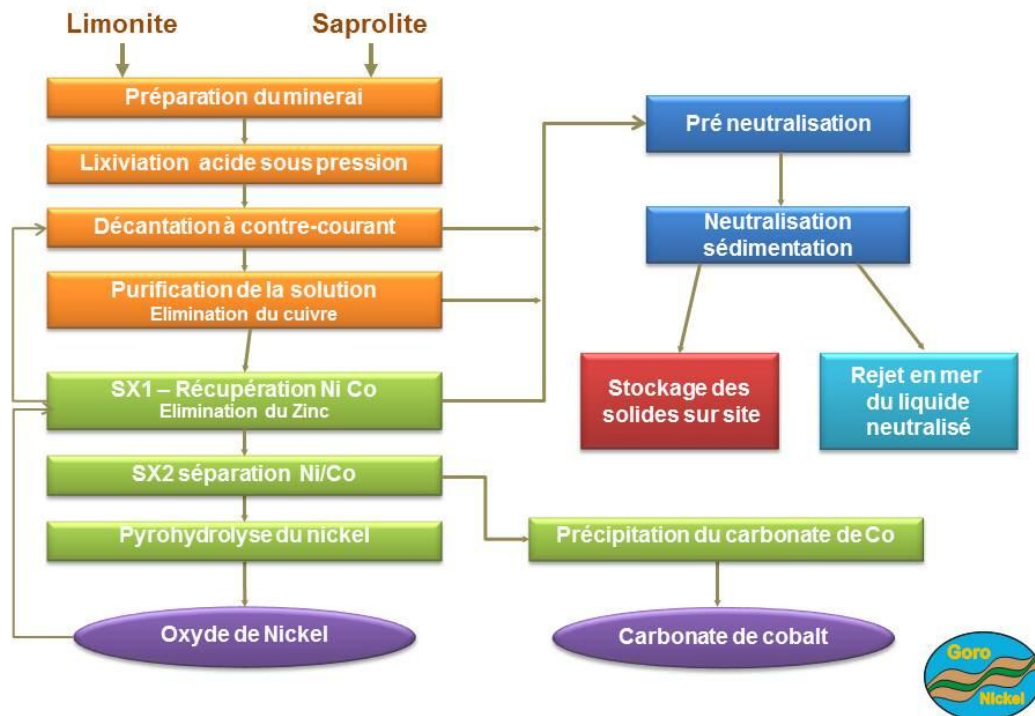


Figure 6 : Schéma simplifié du procédé d'extraction du Ni et Co par attaque à l'acide sulfurique. Circuit de l'eau d'entraînement jusqu'à son injection dans le pipe-line (juin 2004, modifié en 2007, comm Vale-NC).

A chaque étape de ce procédé, les fractions liquides et particulières issues des phases de clarification des pulpes sont envoyées vers des unités de traitements aboutissant à deux types de résidus : des **résidus solides épaissis** (5,3 millions t/an), ceux-ci aboutissant à un **stockage** dans le parc à résidus et des volumes de **résidus liquides** (13 millions de m³/an). Pour ces derniers, l'élimination ou le recyclage complet de ces énormes quantités sont techniquement impossibles et/ou financièrement inenvisageables :

- soit, en raison des fortes teneurs en magnésium et en sulfates de calcium (gypse) dans le cas de la mise en place de procédés d'osmose inverse ou de séparation membranaire qui sont, en outre, forts consommateurs d'énergie ;
- soit, du fait des fortes précipitations atmosphériques (3,5 m/an) bien supérieures aux possibilités d'évaporation naturelle (1 m/an). Un procédé d'évaporation forcée pourrait être utilisé mais il demanderait, là aussi, de produire d'avantage d'énergie (doublement de la production actuelle).

La solution du rejet en mer après traitement adéquat a donc été jugée comme étant la mieux adaptée par le MEEDAT (2008).

En sortie d'unité de traitement, ces résidus liquides sont dilués avec 7% d'eau de mer puis sont rejetés dans le Canal de la Havannah par l'intermédiaire d'un pipeline sous-marin de 23 km de long

partant du port ; le dernier kilomètre, situé au large de la Baie Kwé, est percé de 200 trous assurant la diffusion pour une meilleure dispersion de l'effluent (Figure 7)¹. Le débit moyen annoncé du rejet est estimé entre 1 200 et 1 500 m³/h.

Le choix du point de rejet (Figure 7) est motivé par la présence de forts courants permettant une dilution importante des effluents rejetés. Par ailleurs, cette solution a fait l'objet d'une expertise effectuée par le ministère de l'Ecologie (MEEDAT) en 2008, expertise qui a évalué les différents scénarii envisageables et conclue : « ... Au terme de son analyse des solutions alternatives au « tuyau », la mission se prononce clairement en faveur de la solution nominale proposée par l'exploitant ».



Figure 7 : Carte du tracé du pipe-line de rejet des effluents industriels depuis la sortie de l'usine (Port commercial de Vale NC) jusqu'au droit de la Baie Kwé (Canal de la Havannah, comm Vale-NC).

¹ Une alternative de rejet à l'extérieur du lagon par 250 à 300 m de fond a été envisagée. Cette solution a été abandonnée en raison, d'une part, des courants très faibles qui semblent régner et ne favorisent pas les mécanismes de dispersion, et d'autre part, les capacités techniques de surveillance, d'entretien et d'intervention très réduites sur le tuyau, à ces profondeurs, en particulier au niveau du diffuseur (colmatage potentiel par développement de concrétions).

I.2. CADRE LEGISLATIF

Le lagon de Nouvelle-Calédonie est réputé pour être le plus grand au monde et pour abriter une biodiversité récifo-lagonaire très importante. Ces caractéristiques lui ont valu d'être inscrit au Patrimoine Mondial de l'Humanité (UNESCO) depuis juillet 2008. Il existe donc un conflit d'intérêt et d'usage évident entre l'industrie minière et la sauvegarde de cette biodiversité.

Les autorités compétentes en matière d'environnement et des mines (Direction de l'Environnement - DENV de la Province Sud et Direction des Mines et de l'Energie - DIMENC de Nouvelle-Calédonie) ont donc nécessairement dû réglementer, au plan environnemental, le développement de l'industrie minière en province Sud. Cette réglementation est basée sur l'obligation qu'a l'industriel de réaliser d'une part des études de caractérisation initiale (état de référence) des milieux terrestres, dulcicoles et marins préalablement à toute activité, et d'autre part, d'étudier l'impact potentiel de ses activités et rejets sur ces milieux. En fonction des conclusions, l'autorisation d'exploiter est alors accordée par la Province via arrêtés ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement).

Ainsi, les grandes étapes qui ont concerné la problématique environnementale du milieu marin liée au projet minier du sud (Vale-NC) sont résumées ci-dessous :

- Le **15 janvier 2002**, Goro Nickel dépose à la province Sud son dossier de demande d'autorisation d'exploiter des installations classées (ICPE). L'industriel y indique notamment que les effluents rejetés auront une concentration moyenne en manganèse de 100 mg/L environ, soit 100 fois supérieure à la limite de rejet autorisée en France pour ce métal. Le 29 mars 2002, le commissaire-enquêteur émet un avis défavorable suite à la première enquête publique ;
- La province Sud demande une Expertise INERIS/Ifremer dans le cadre de l'instruction du dossier ICPE. Un rapport de synthèse intitulé « *Analyse critique du dossier de demande d'autorisation du Projet Goro Nickel* » lui est remis le **15 août 2002**. Les experts y indiquent un total de 38 recommandations portant sur l'amélioration du design de l'émissaire proposé, sur des études complémentaires à réaliser, et sur l'amélioration du suivi environnemental envisagé par l'industriel. Goro Nickel fournit ensuite des compléments d'informations pour répondre aux recommandations ;
- Sur la base de ces compléments apportés par Goro Nickel, le service instructeur de la province Sud demande à l'INERIS de lui fournir une seconde expertise. Son rapport « *Analyse critique de l'acceptabilité du niveau de rejet de manganèse dans le milieu marin* » est remis par l'INERIS à la province Sud le **15 décembre 2003** ;
- De nombreux compléments d'information ayant été obtenus, l'industriel et la province Sud décident après une mise à jour du dossier en **mars 2004** de le soumettre à une seconde enquête publique. A l'issue de celle-ci, le commissaire-enquêteur émet le **6 août 2004** un avis favorable assorti de 13 recommandations et d'une réserve ; la première recommandation est de rejeter dans le Canal de la Havannah des eaux résiduelles dont la teneur moyenne en manganèse ne dépasse pas 1 mg/L ;
- Le **7 octobre 2004**, la province Sud crée un Comité de pilotage du projet industriel du Sud et un *Comité d'Information, de Concertation et de Surveillance sur les impacts environnementaux de l'usine* ;

- Le **9 octobre 2004**, la province Sud demande qu'une tierce expertise soit à nouveau réalisée, cette fois-ci sur le thème du rejet en mer de l'effluent par un groupe de chercheurs extérieur à la Nouvelle-Calédonie. Le groupe a été dirigé par le Dr Jean-Charles Massabuau, directeur de recherche au CNRS (UMR 5805 EPOC, Université de Bordeaux), accompagné de Bernard Roux, Peter Campbell et Bernard Monnin ;
- Le **15 octobre 2004**, la province Sud émet l'Arrêté provincial n°1769-2004/PS autorisant Goro Nickel à exploiter son usine de traitement de minerai de Ni et Co ;
- En **mars 2005**, l'industriel lance un appel d'offre international pour la réalisation d'un programme de recherches portant sur l'évaluation de l'impact du futur effluent en mer. L'Unité de Recherche « CAMELIA » de l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD), basée à Nouméa, est sélectionnée par l'industriel et débute un programme pluridisciplinaire d'une durée de 3 ans : le programme associe la modélisation hydrodynamique, la sédimentologie, la géochimie et l'écotoxicologie ;
- En **novembre 2006**, les chercheurs formant le groupe de la tierce expertise remettent leur rapport à la province Sud. Sur la base des diverses expérimentations réalisées dans ce cadre, ils préconisent notamment de réduire la concentration en manganèse de l'effluent de 100 à 10 mg/L confirmant ainsi la position du commissaire enquêteur dans ses recommandations (6 août 2004). L'industriel décide ultérieurement de réduire de 10 à 20 fois ce seuil pour le ramener au-dessous de la limite réglementaire de rejet en France, soit 1 mg/L grâce à l'ajout d'une nouvelle technologie à son usine de traitement des effluents ;
- En **juillet 2007**, l'arrêté ICPE concernant le port de commerce est délivré ;
- L'avis favorable des experts de l'IUCN (International Union for Conservation of Nature) à l'inscription de 6 zones du lagon calédonien au patrimoine de l'UNESCO est obtenu en **juillet 2008**. 5 zones sont situées en dehors des bandes côtières jouxtant mines et agglomérations. La 6^{ème} zone, celle du Grand Lagon Sud, présente une zone tampon qui jouxte le projet Vale NC, avec avis favorable de l'IUCN ;
- En juillet 2008, une contre-expertise MEEDAT est demandée par la Province sud au Ministère de l'écologie, de l'énergie et du développement durable (MEEDAT), elle porte sur les solutions alternatives au rejet de l'effluent traité avec une écoute des associations opposées. Elle est conduite par l'ingénieur J.P Leteurtois qui rend ses conclusions (favorables au rejet) et des recommandations.
- Le **27 septembre 2008**, la signature du Pacte pour le Développement Durable du Grand Sud est apposée. Le CICS donne un avis favorable ;
- Le **9 octobre 2008**, l'arrêté ICPE regroupant l'usine d'extraction et l'usine de préparation des minerais ainsi que l'arrêté ICPE dédié au parc à résidus de la Kwé ouest sont accordés. Ces trois arrêtés (avec celui du port) constituent les documents qui encadrent aujourd'hui les conditions d'exploitation de l'usine ;
- En **mars 2009**, est signée la Convention pour la Conservation de la Biodiversité entre la province Sud et Vale NC qui encadre les suivis de l'ensemble des milieux récepteurs dans une démarche de protection globale de la biodiversité et d'une globalisation des effets du projet (port, usine, mine et auxiliaires). Les mesures compensatoires en faveur de la

biodiversité constituent le second volet de cette convention et elles sont établies sur la base des effets résiduels du projet global ;

- **Fin 2009**, l'IRD remet à l'industriel ses rapports relatifs à l'impact potentiel de l'effluent dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony. Les premières campagnes des suivis environnementaux consécutifs aux définitions des différents états de références sont initiées.

Chapitre II - SYNTHÈSE DES SUIVIS

La mise en place d'un programme de suivi des impacts sur le milieu marin avait déjà fait l'objet de recommandations (N°19 et 20) lors de la première analyse critique conduite par l'INERIS (2002) sur les travaux réalisés par Rescan (2001) et GEMS (2003).

Reprenant l'avis de l'INERIS (recommandation 20), il avait été demandé, en préalable à tout rejet, d'acquiescer de nouvelles données et de mettre en place une modélisation à caractère prévisionnel. Ces études ont été réalisées pour l'essentiel par l'IRD dans le cadre de son « *Programme Prédicatif* », mais aussi grâce à la contribution du groupe d'experts mandatés par la province Sud de Nouvelle-Calédonie (cf. : *Volume 2/3*). La définition des états de références physiques, physico-chimiques et biogéochimiques des milieux a permis de collecter une masse considérable d'informations sur le fonctionnement du lagon sud (cf. : *Volume 1/3*). Ces informations ont ensuite été exploitées pour mettre en place la modélisation géochimique des interactions des effluents avec leur milieu, puis le couplage « *géochimie-transport* » des charges dissoutes et particulaires.

Les contributions de la modélisation hydrodynamique du Canal de la Havannah et de la simulation des phénomènes de dispersion de l'effluent ont été déterminantes pour redistribuer de manière pertinente les stations de surveillance sur une aire géographique qui devait dépasser de manière significative les limites du champ proche de l'émissaire.

Initialement, les états de référence ont été définis à partir de 18 sites de mesures correspondant, pour une partie, aux localisations suggérées par l'INERIS dès 2004. Au terme du « *Programme Prédicatif* » de l'IRD (2009), le réseau initial de stations a été remodelé dans l'objectif d'améliorer la représentativité des échantillons et de décèler toute altération du milieu attribuable aux effluents industriels, en particulier, aussi minime soit-elle.

Actuellement, intégrées à l'arrêté ICPE-2008, le nombre de stations (n=47) qui concerne la surveillance « physico-chimique », au sens large, du milieu marin est résumée ci-dessous par type de suivi (Tableau 1) :

- 14 stations pour les relevés physico-chimiques de la colonne d'eau ;
- 14 stations pour le suivi du contenu en métaux des sédiments ;
- 4 stations pour l'évaluation des taux d'accumulation des sédiments ;
- 3 stations pour l'évaluation des flux de particules ;
- 8 stations pour le suivi de la bioaccumulation par transplantation d'organismes marins ;
- 4 secteurs pour le suivi sanitaire sur les organismes marins consommés par la population.

Le plan de surveillance comprend le suivi des paramètres (n=97) suivants :

- caractéristiques physico-chimiques et géochimiques de la colonne d'eau à trois profondeurs (n=36) ;
- métaux labiles (disponibles) dans les sédiments fins des principales aires de dépôt et caractéristiques physiques des dépôts (n=13) ;

- flux de particules naturelles issues des bassins versants et industrielles transportées par l'effluent (n=13) ;
- taux de sédimentation dans les principales aires de dépôt soumises à l'activité industrielle (n=11) ;
- niveaux de bioaccumulation des métaux dans des organismes tests (bivalves filtreurs, algues ; n=10) ou de consommation courante (bivalves, gastéropodes et poissons ; n=14).

La stratégie d'échantillonnage a consisté à définir progressivement et de manière pertinente un nombre restreint, mais toutefois optimal, de sites de prélèvement sur la base des connaissances acquises auxquels ont été associés des fréquences d'échantillonnage temporelles en accord avec les objectifs du programme de surveillance.

Tableau 1 : Liste et localisation des stations de prélèvement déterminées pour les suivis physico-chimiques de la colonne d'eau et des fonds sédimentaires, tels que définies dans l'arrêté ICPE du 9 octobre 2008. Liste des stations de mouillage ou aires de collecte pour les suivis de la bioaccumulation des métaux bio-disponibles (transplantation) et des impacts sanitaires potentiels dans les organismes marins consommables. Fréquence des campagnes : trimestrielle, semestrielle, annuelle, trisannuelle.

LOCALISATION	Station/ secteur	TYPE DE SUIVI					
		Physico- chimie eau	Géochimie sédiments	Taux accumulation	Flux particules	Bioacc (transplant)	Suivi sanitaire
Basse Chambeyron	St02	X	X				
Baie Port Boisé	St03	X	X			X	
Ilot Kié	St05 ²	X	X				
Baie Kwé	St06	X	X	X	X	X	
Récif Ioro	St07	X	X			X	
Canal de la Havannah	St09	X	X				
Pointe Nord du récif Ma	St13	X	X	X		X	
Port de Goro	St14	X	X			X	
Prony Creek Baie Nord	St15	X	X	X			
Prony Wharf	St16	X	X	X		X	
Prony Ilot Casy	St18	X	X			X	
Rade de l'est	St19	X	X				
Baie Iré	St20	X	X				
Ilot Ugo	St21	X	X				
Ilot Nouaré	St31					X	
Diffuseur	St60 SW	X				X	
	St60 NE	X				X	
Bord de côte P-Boisé-Goro	St03, St06, St14						X
Ile Ouen	St13, St20						X
Baie du Prony	St15, St16, St18, St19						X
Canal Havannah (centre)	St02, St05, St07, St09						X

² Pour le suivi de la bioaccumulation des métaux dans les organismes transplantés, cette station (St05) étant sur un secteur de très fort courant elle a été substituée par la station St31 près de l'Ilot Nouaré qui est dans le même secteur d'influences marines.

- Pour les sels nutritifs, l'azote sous forme de nitrates+ nitrites et d'ammonium (élément de la boucle bactérienne), les silicates (traceur terrigène) et la chlorophylle a (indicateur de la biomasse) ;
- Pour les métaux, le cobalt, le chrome hexavalent, le cuivre, le manganèse et le nickel sont listés comme traceurs de l'empreinte minière ; les concentrations en fer pouvant être reliées à l'intensité de l'activité phytoplanctonique.

II.1.1. Suivi de la colonne d'eau en saison fraîche

Cette synthèse regroupe les valeurs moyennes des concentrations des sels nutritifs (NO_3+NO_2 , NH_4 , PO_4 et SiO_4), des pigments chlorophylliens et des métaux dissous (Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni et Zn), pour les campagnes de suivis « **saison fraîche** » réalisées depuis août 2008.

Les conditions météorologiques, notamment les précipitations, ayant une influence sur la physico-chimie des eaux et les concentrations en métaux, les cumuls de pluies 5 jours avant et pendant la campagne sont reportés dans la Figure 9, à titre d'information.

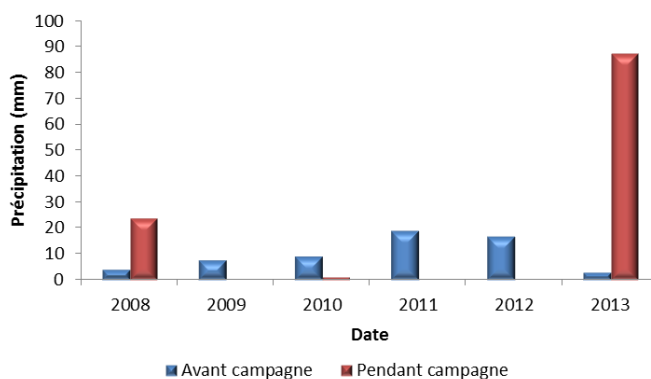


Figure 9 : Cumuls des précipitations tombées durant les 5 jours précédant les campagnes de prélèvement en « saison fraîche » et pendant celles-ci. Période de 2008 à 2013 ; station d'observation météorologique : « Prony Pilot Station, Vale-NC ».

II.1.1.a. Sels nutritifs

(1) Distribution globale dans le domaine

Dans l'ensemble du domaine d'étude, les concentrations d'ammonium (NH_4), de nitrites+nitrates (NO_2+NO_3), de phosphates (PO_4) et de silicates (SiO_4) montrent de grandes variations pour chacune des campagnes depuis 2008. Cette dispersion des valeurs observée montre qu'aucune évolution spatio-temporelle de l'un de ces paramètres ne peut être étudiée pour le domaine entier en raison de la juxtaposition d'aires d'influence terrigène et océanique. A l'inverse, des tendances temporelles relativement bien marquées peuvent être dégagées dans chacun des deux sous-ensembles que sont le Canal de la Havannah et la Baie du Prony, s'ils sont considérés individuellement (Figure 10 et Figure 11).

Il est par ailleurs à noter qu'à l'intérieur de ces deux sous-ensembles des unités aux comportements particuliers sont identifiables. C'est notamment le cas des baies de Port Boisé et de la Kwé du sous-ensemble Canal de la Havannah.

CANAL DE LA HAVANNAH

- les concentrations moyennes de NH_4 les plus faibles ont été mesurées en 2008 ($0,027 \pm 0,015 \mu\text{M}$) et les plus fortes en 2013 ($0,153 \pm 0,102 \mu\text{M}$) ;
- les concentrations de NO_2+NO_3 les plus élevées ont été observées en 2013 ($0,626 \pm 0,356 \mu\text{M}$), puis en 2011 et 2009 avec près de $0,200 \text{ M/L}$; les plus faibles ayant été mesurées en 2008 et 2012 avec, respectivement $0,061 \pm 0,027 \mu\text{M}$ et $0,044 \pm 0,041 \mu\text{M}$. Les concentrations obtenues dans le Canal de la Havannah en 2013 sont particulièrement dispersées avec des valeurs mesurées comprises entre $0,103$ et $1,426 \mu\text{M}$;
- les concentrations maximales de PO_4 sont toutes relativement similaires, puisqu'elles se distribuent autour de la centaine de $\mu\text{M/L}$ excepté en 2012 ($0,049 \pm 0,020 \mu\text{M}$). La concentration moyenne de PO_4 la plus faible a été mesurée lors de la campagne de 2012 ($0,020 \pm 0,011 \mu\text{M}$), la plus forte étant de $0,063 \pm 0,026$ obtenue en 2013 ;
- les concentrations de SiO_4 ne diffèrent pas significativement entre les campagnes, à l'exception de celles obtenues en 2013 ; en effet, une très forte concentration de SiO_4 ($10,79 \pm 0,26 \mu\text{M}$), soit environ 2 à 5 fois les valeurs maximales mesurées habituellement, est observée. Cette dernière est liée aux très fortes précipitations enregistrées au début du mois d'août. Si les valeurs moyennes fluctuent normalement autour de $1 \mu\text{M/L}$, cette moyenne passe à $2,20 \pm 2,04 \mu\text{M}$ en 2013.

BAIE DU PRONY

- Les concentrations de NH_4 les plus faibles ont été mesurées lors de la campagne de 2008 et se caractérisent également par une très grande dispersion ($0,019 \pm 0,025 \mu\text{M}$). Les concentrations moyennes de NH_4 obtenues depuis 2009 diffèrent singulièrement entre-elles, celles-ci sont toutes comprises entre $0,034 \pm 0,036 \mu\text{M}$ (2012) et $0,188 \pm 0,121 \mu\text{M}$ (2013) ;
- les concentrations de NO_2+NO_3 obtenues entre les campagnes de 2008 à 2011 restent dans le même ordre de grandeur ($0,064$ à $0,077 \mu\text{M/L}$). La campagne de 2012 montre des valeurs souvent très inférieures mais ces résultats sont sujets à interrogation, alors que la valeur moyenne de 2013 est nettement supérieure ($0,359 \pm 0,215 \mu\text{M}$) ;
- les concentrations moyennes de PO_4 mesurées en 2008 ($0,021 \pm 0,008 \mu\text{M}$), 2009 ($0,034 \pm 0,019 \mu\text{M}$) et 2012 ($0,017 \pm 0,012 \mu\text{M}$) sont relativement similaires. Les concentrations moyennes les plus fortes ont été obtenues en 2013 ($0,051 \pm 0,044 \mu\text{M}$) et 2011 ($0,078 \pm 0,045 \mu\text{M}$). Comme pour NO_2+NO_3 , les concentrations de PO_4 de 2012 sont presque toutes bien inférieures à celles obtenues habituellement, ces résultats sont donc sujets à caution ;
- les concentrations moyennes de SiO_4 les plus fortes ont été observées lors des campagnes de 2009 ($2,56 \pm 0,84 \mu\text{M}$) et de 2013 ($3,04 \pm 1,38 \mu\text{M}$) ; la concentration moyenne la plus faible est de $1,04 \pm 0,65 \mu\text{M}$ en 2011.

Remarque : De manière systématique depuis 2008, les concentrations en NO_2+NO_3 sont plus élevées dans le Canal de la Havannah que dans la Baie du Prony. Cette observation est avérée, tant en « saison chaude » qu'en « saison fraîche », bien que pour cette dernière les niveaux de concentration dans les deux domaines soient nettement inférieurs et que leur écart soit plus faible. Il est donc manifeste que les nitrates sont consommés plus rapidement dans la Baie et que cette décroissance en nitrates est liée à la quantité de biomasse présente. Toutefois, si la biomasse (estimation basée sur les

résultats de la mesure fluorimétrique qui est l'expression de la quantité de chlorophylle phyto-planctonique) semble plus importante en « saison chaude » dans le Canal de la Havannah que dans la Baie du Prony, en « saison fraîche » la situation inverse se produit ; cette inversion des charges pouvant être alors compensée par une activité phyto-planctonique supérieure en raison de températures bien plus élevées dans les eaux de la Baie par rapport au Canal.

Remarque : Les valeurs extrêmes mesurées sont à relier avec les apports terrigènes massifs provoqués par l'érosion et la lixiviation des sols suite à de fortes précipitations en juillet et en août 2013.

(1) Distribution aux stations sentinelles St06, St09 et St15

Aux stations St09 (Canal de la Havannah) et St15 (Creek de la rade Nord), les 4 sels nutritifs (NH_4 , NO_2+NO_3 , PO_4 et SiO_4) se distribuent de manière homogène dans les colonnes d'eaux respectives et ne montrent pas de variations d'une campagne « saison fraîche » à l'autre depuis 2008 (Figure 12 et Figure 13). Toutefois, une légère gradation des concentrations en ammonium semble se dessiner dans les eaux de surface avec le temps.

Ainsi, hormis les valeurs exceptionnelles de 2013 en relation probable avec les fortes précipitations, à la station St09 les concentrations mesurées en 2010 et 2011 sont 3 à 4 fois supérieures à celles de 2008 et 2009 ; en 2012, elles évoluent davantage avec la profondeur, les plus élevées étant mesurées à mi-profondeur, puis au fond et enfin en surface.

D'une manière générale, les concentrations obtenues à la station St15 sont relativement faibles comparées à celles mesurées aux autres stations ; les concentrations maximales ont été dosées en 2010 à mi-profondeur et fond.

Les eaux de la station St06 (Baie Kwé) sont souvent stratifiées en raison des apports en eau douce, de ce fait elles montrent une forte dispersion verticale des valeurs ainsi qu'une augmentation dans le temps pour l'ammonium. De plus, exception faite de 2008 et de 2013, les concentrations des eaux de surface sont bien plus élevées que dans le reste de la colonne d'eau.

Excepté les prélèvements de 2013, globalement, les eaux de la Rade Nord (St15) sont très homogènes avec des niveaux de concentrations en NO_2+NO_3 et NH_4 relativement faibles.

II.1.1.b. Chlorophylle A

Les concentrations en chlorophylle A les plus importantes ont été observées lors de la campagne 2010. Les concentrations mesurées lors des autres campagnes semestrielles de la saison ne diffèrent que très peu entre 2008 et 2013 (Figure 10 et Figure 11).

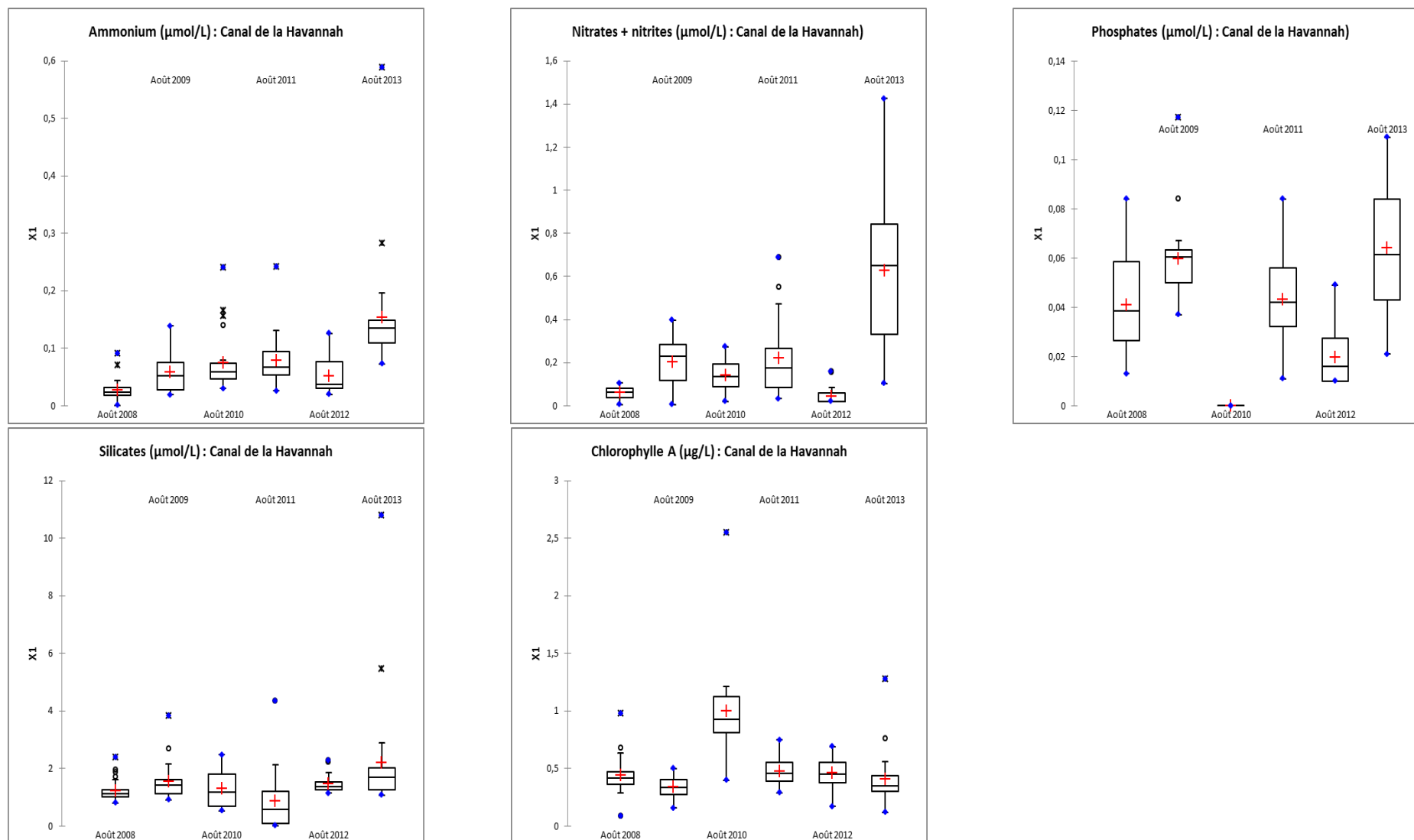


Figure 10 : Variabilité des concentrations en nutriments et chlorophylle A dans la totalité de la colonne d'eau pour la zone « Canal de la Havannah » (St02, St03, St05, St06, St07, St09, St14 et St21 ; n=158). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison fraîche » 2008-2013. Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu.

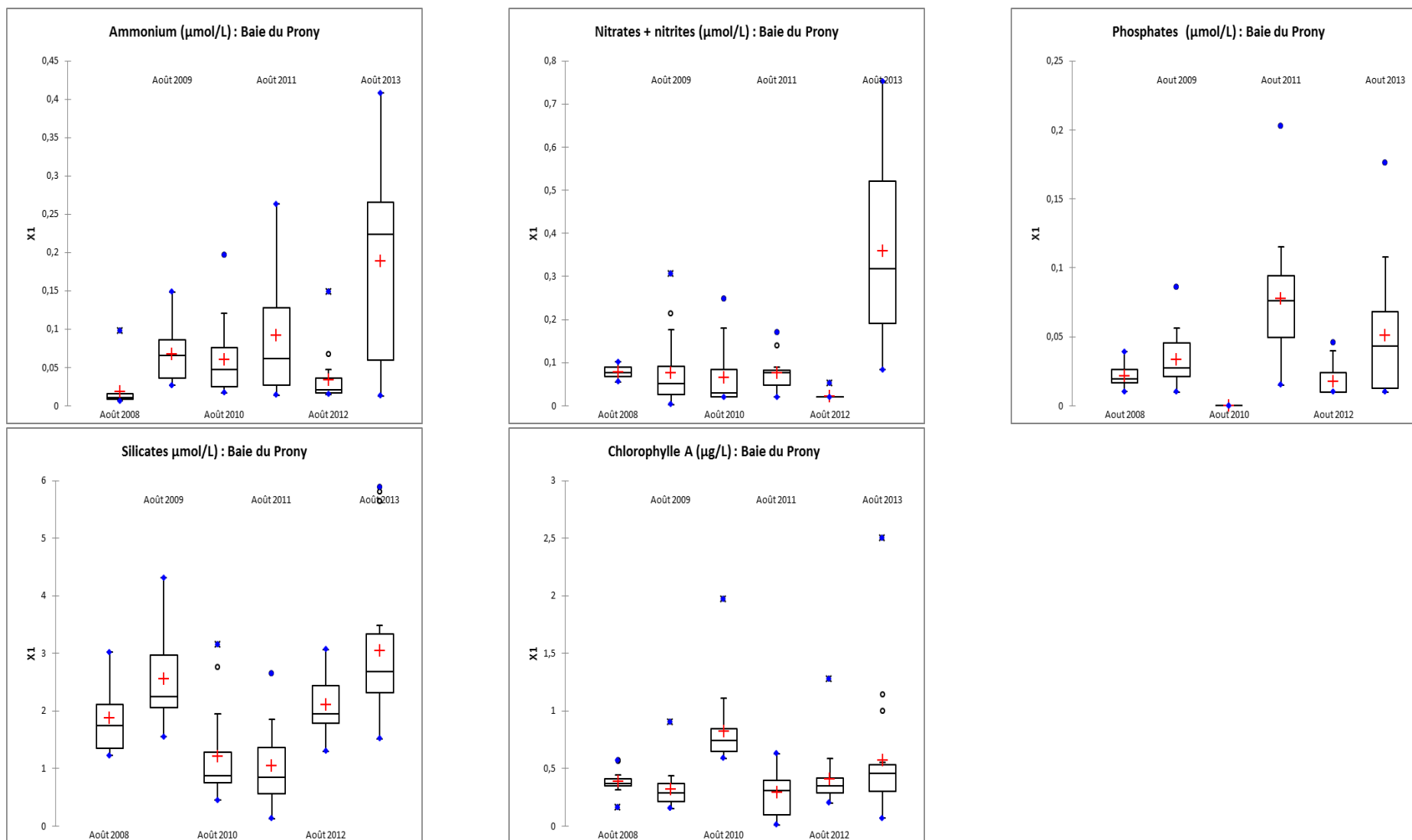


Figure 11 : Variabilité des concentrations en nutriments et chlorophylle A dans la totalité de la colonne d'eau pour la zone « Baie du Prony » (St15, St16, St18, St19 ainsi que St13 et St20 ; n=100). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison fraîche » 2008-2013. Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu.

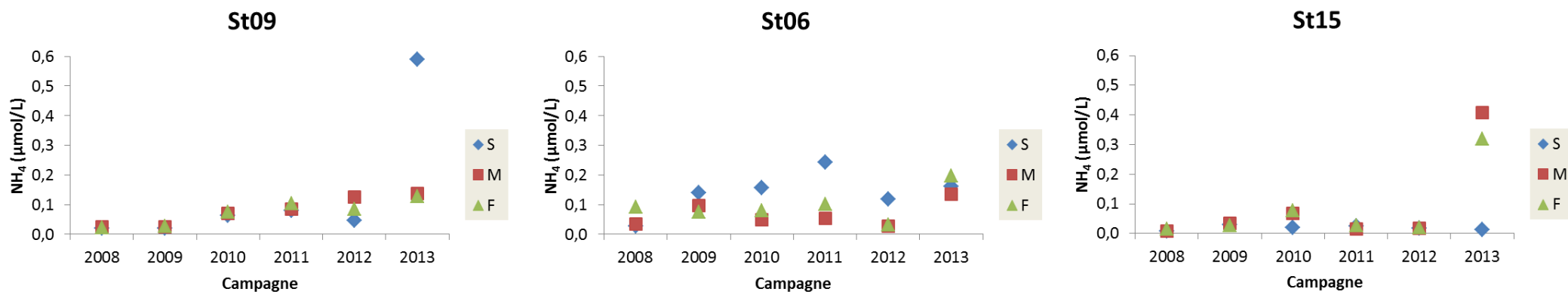


Figure 12 : Concentrations d'ammonium mesurées en surface (S), mi-profondeur (M) et fond (F) aux stations St09, St06 et St15 lors des campagnes « saison fraîche » 2008-2013.

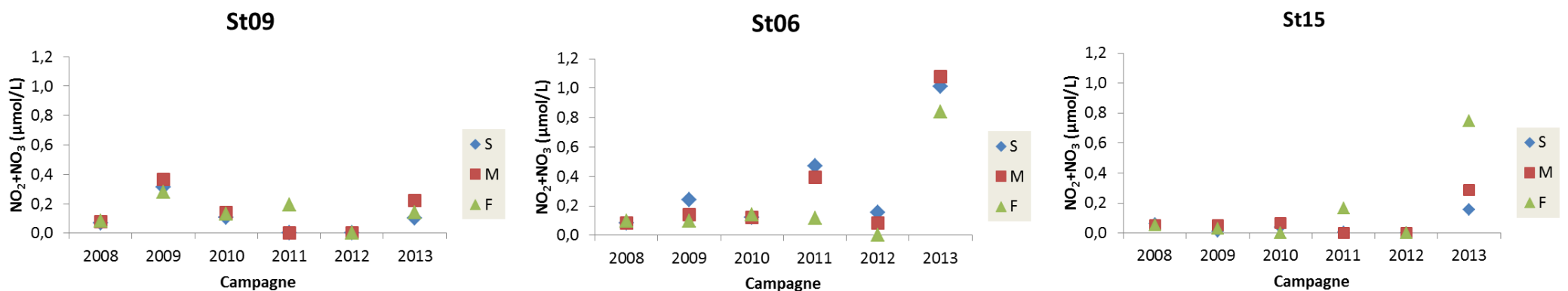


Figure 13 : Concentrations de nitrates + nitrites mesurées en surface (S), mi-profondeur (M) et fond (F) aux stations St09, St06 et St15 lors des campagnes « saison fraîche » 2008-2013.

II.1.1.c. Métaux dissous

(1) Distribution globale dans le domaine

Exception faite de 2013, d'une manière générale, les concentrations moyennes en Co, Cr(VI), Fe, Ni et Zn sont toutes demeurées du même ordre de grandeur entre 2008 et 2012, même si pour certains éléments (Co et Zn), les valeurs sont toujours assez dispersées (Figure 14 et Figure 15).

Pour Cu, si les concentrations ne diffèrent que très légèrement entre 2008 et 2010, en 2011, la concentration moyenne augmente avec, également, une grande dispersion (0,02-1,21 µg/L) ; en 2012 les concentrations ($0,46 \pm 0,19$ µg/L) sont de 3 à 10 fois plus élevées qu'auparavant³.

Pour le manganèse (Mn), à l'exception des concentrations de 2011 ($0,28 \pm 0,24$ µg/L) qui sont légèrement plus élevées, les valeurs sont depuis 2008 quasiment similaires.

Globalement, un gradient de concentration soulignant la pénétration de l'influence terrigène dans le lagon se dessine régulièrement de la côte vers le large, notamment après un épisode pluvieux.

D'une manière plus détaillée, les tendances suivantes sont observées :

CANAL DE LA HAVANNAH (Figure 14)

- les concentrations moyennes de Co les plus élevées sont mesurées en 2009 ($0,031 \pm 0,015$ µg/L) alors qu'en 2011 et 2013, elles sont toutes inférieures aux limites de quantification ; pour les campagnes 2008, 2010 et 2012, les concentrations sont remarquablement similaires ;
- les concentrations moyennes de Cu sont très proches entre les différentes campagnes, seules les valeurs de 2011 sont légèrement plus élevées que les années précédentes. En 2012, aucune valeur de concentration supérieure à la limite de quantification n'a été obtenue³ ;
- les concentrations moyennes de Cr(VI) et Cr total sont très stables pour le domaine entier avec toutefois une légère augmentation qui s'est produite en 2009 au niveau de la Baie Kwé ;
- les concentrations de Fe sont assez dispersées et ne permettent pas de montrer de nette différence entre les campagnes, cet élément étant fortement impliqué dans les réactions biogéochimiques de la boucle planctonique ;
- les concentrations moyennes de Mn et Ni sont remarquablement stables entre les campagnes : aucune évolution sensible n'est à signaler ;

³ Ces dernières analyses ont été effectuées par un laboratoire extérieur (UT2A) dont la méthode d'analyses en mode direct est moins sensible (LQ = 0,25 µg/L) que celle habituellement employée (AEL ; LQ = 0,015 µg/L) qui applique une phase de pré-concentration. De ce fait, seulement 5 valeurs de Cu ont pu être déterminées pour cette campagne. Par ailleurs, compte tenu des différences de limites de quantification, les résultats de 2012 ne peuvent pas être facilement comparés avec ceux des années précédentes : à ce niveau de concentration naturelle, l'analyse directe des métaux dissous dans les eaux marines est donc déconseillée.

- d'une année à l'autre les concentrations moyennes en Zn étant assez variables, aucune tendance ne peut être proposée pour cette période d'observation.

BAIE DU PRONY (Figure 15)

- les concentrations de Co les plus élevées sont obtenues pour les campagnes de 2008 ($0,046 \pm 0,012 \mu\text{g/L}$) et de 2011 ($0,049 \pm 0,021 \mu\text{g/L}$). En 2011, elles sont particulièrement dispersées avec des valeurs comprises entre $0,030$ et $0,105 \mu\text{g/L}$; la concentration moyenne la plus faible a été mesurée en 2010 ($0,024 \pm 0,006 \mu\text{g/L}$) ;
- les concentrations de Cu restent dans le même ordre de grandeur entre les campagnes de 2008 et 2013. Toutefois, en 2012, les concentrations semblent particulièrement élevées, comparées à celles mesurées lors des précédentes campagnes³ ;
- hormis les concentrations de Cr(VI) (et Cr-total) de 2013 bien plus élevées que la moyenne ($0,434 \pm 0,234 \mu\text{g/L}$) et 2009 ($0,273 \pm 0,079 \mu\text{g/L}$), les valeurs sont très similaires pour les campagnes de 2008, 2010, 2011 et 2012 ;
- la concentration moyenne maximale de Fe est observée en 2008 ($0,13 \pm 0,02 \mu\text{g/L}$) et les moyennes minimales pour les campagnes de 2010 et 2011 ($0,03 \pm 0,01 \mu\text{g/L}$). En 2012, toutes les valeurs sont demeurées inférieures à la limite de quantification ;
- la concentration moyenne de Mn la plus élevée est mesurée en 2011 ($0,37 \pm 0,15 \mu\text{g/L}$) et une dispersion importante est observée ($0,22$ - $0,72 \mu\text{g/L}$). Les concentrations moyennes mesurées pour les autres campagnes « saison fraîche » ne diffèrent que très légèrement ; elles sont comprises entre $0,15 \pm 0,05$ (2010) et $0,26 \pm 0,06$ (2008) $\mu\text{g/L}$;
- les concentrations de Ni sont très similaires d'une campagne à l'autre, la concentration moyenne la plus faible ayant été mesurée en 2010 ($0,21 \pm 0,04 \mu\text{g/L}$) et la plus forte en août 2013 ($0,46 \pm 0,04 \mu\text{g/L}$) et une valeur extrême de $1,6 \mu\text{g/L}$ dans les eaux de surface à la station St19 ;
- les concentrations moyennes de Zn les plus faibles sont obtenues en 2009 ($0,10 \pm 0,05 \mu\text{g/L}$), les concentrations obtenues entre 2008 et 2013 sont plus élevées mais très dispersées et ne permettent pas de montrer de nette différence entre ces campagnes.

(2) *Distribution aux stations sentinelles St06, St09 et St15*

Note : Les matrices de similarité permettent de mesurer le degré de parenté qu'il existe entre les concentrations en métaux dissous dans l'eau de mer et la composition géochimique des latérites. Cette relation est exprimée par le coefficient de Pearson et sa valeur renseigne sur l'évolution du milieu en fonction de l'influence des termes sources identifiés.

STATION ST06 (BAIE KWE)

Les concentrations de Co, Mn et Ni présentent les mêmes types de distribution entre les campagnes depuis 2008 (Figure 16, Figure 17, Figure 18 et Figure 19). En effet, les concentrations de mi-profondeur et fond ne varient que très légèrement entre les campagnes 2008 et 2013 alors que les concentrations de surface atteignent des valeurs maximales en 2011 et 2013 pour Mn ($1,43$ et $1,61 \mu\text{g/L}$) et pour Ni ($0,87$ et $2,99 \mu\text{g/L}$). Ces valeurs sont de 2 à 4 fois supérieures à celles des autres années : $0,13 \mu\text{g/L}$ en 2012 et $0,69 \mu\text{g/L}$ en 2010, pour Mn et jusqu'à 6 fois pour Ni.

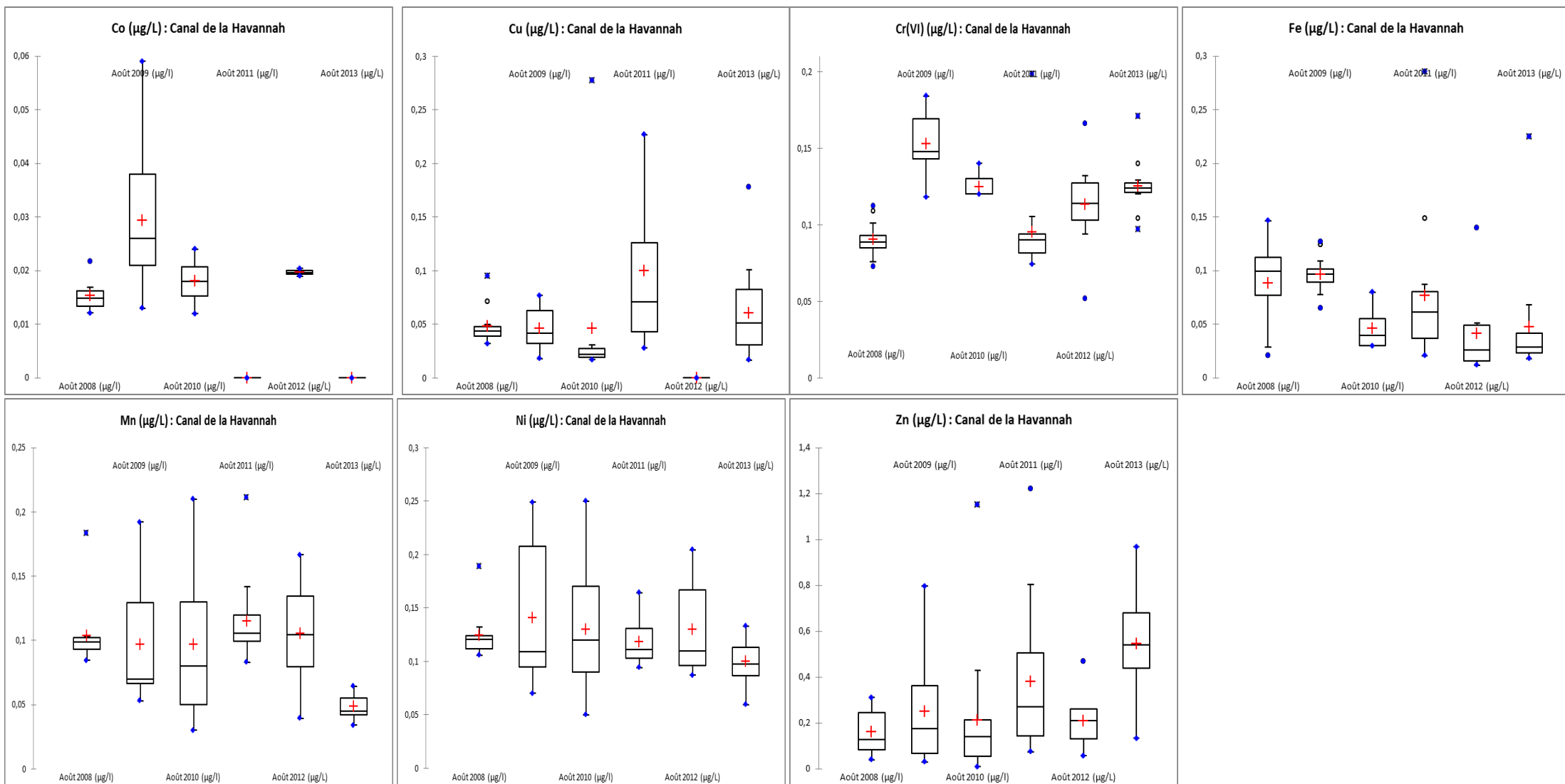


Figure 14 : Variabilité des concentrations en métaux dissous dans la totalité de la colonne d'eau pour la zone « Canal de la Havannah » (St02, St05, St07, St09, St21). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison fraîche » 2008-2013 (n=90). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu. Les concentrations en Co de 2011 et 2012 et en Cu de 2012 ont été inférieures à la LQ.

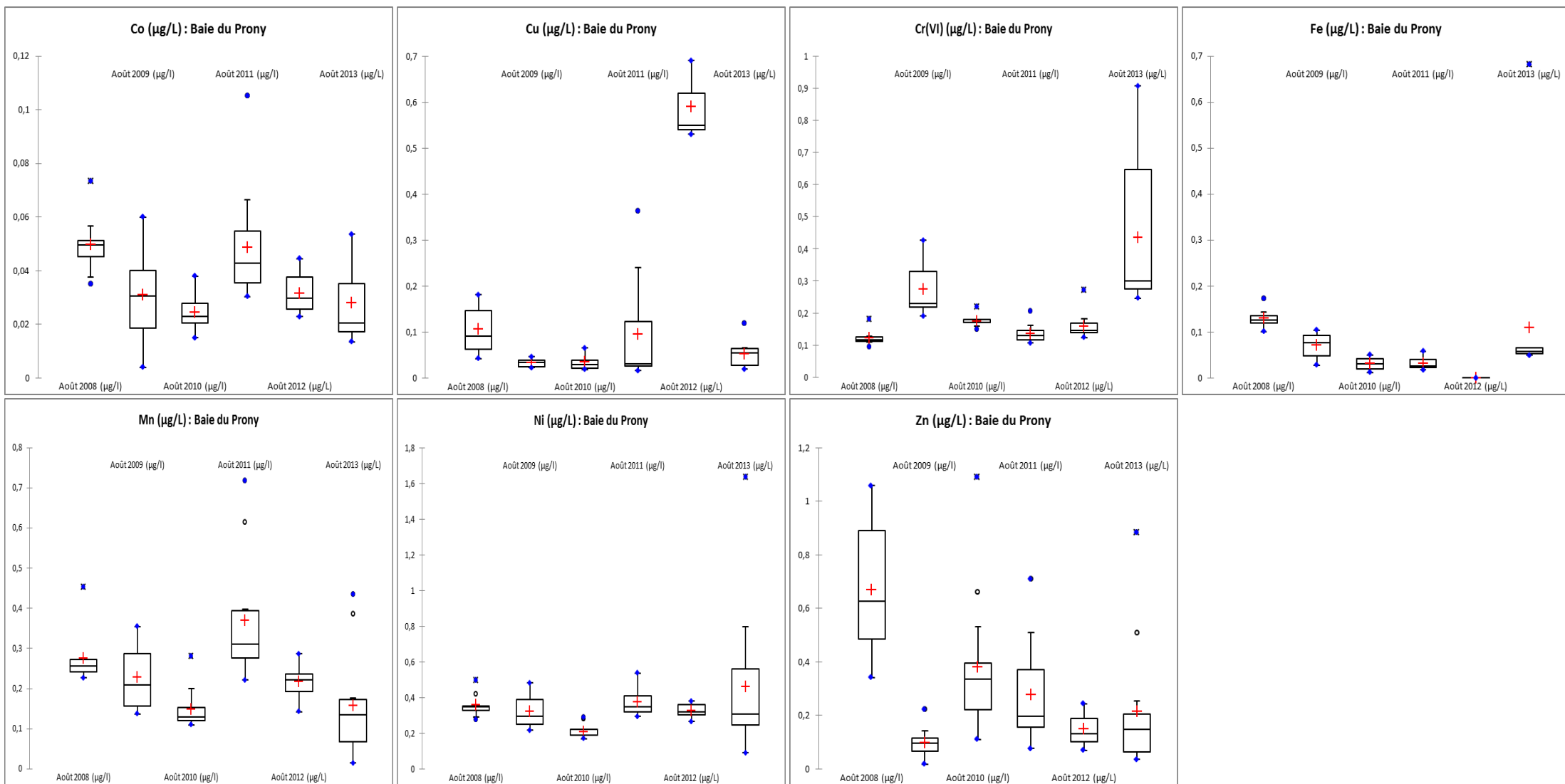


Figure 15 : Variabilité des concentrations en métaux dissous dans la totalité de la colonne d'eau pour la zone « Baie du Prony » (St15, St16, St18, St19). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison fraîche » 2008-2013 (n=72). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu. Les concentrations en Fe de 2012 ont été inférieures à la LQ.

Ces fortes concentrations sont à lier au rythme des apports terrigènes influencés par le front de mine et entraînés par les précipitations atmosphériques qui alimentent le bassin versant du creek Kwé. Par ailleurs, le prélèvement ayant été effectué en fin de marée basse, la dilution des eaux du creek a probablement été moins efficace.

Pour le Cr(VI), d'une manière générale, les concentrations les plus fortes sont mesurées dans les eaux de surfaces avec une variabilité modérée d'une année sur l'autre excepté pour 2013 (Figure 17) ; en profondeur, la variabilité en Cr(VI) est encore plus ténue. En 2013, la valeur maximale est mesurée en surface (1,40 µg/L).

Le traitement statistique des données (Tableau 2) montre que les concentrations en Cr(VI) ne sont pas corrélables avec celles des 3 autres métaux. A l'inverse, la variabilité temporelle des concentrations en Co, Mn et Ni montre qu'il existe une similarité de distribution de ces métaux dans les eaux de la Baie Kwé. En d'autres termes, la variabilité des concentrations de ces 3 métaux reflète à la fois l'impact des fluctuations, en matière d'apports terrigènes par le creek Kwé et des modifications temporaires de la composition de ce terme source, mais la distribution du chrome n'est pas directement liée aux effets de lixiviation des sols

Tableau 2 : Matrice de similarité (Coefficient de Pearson) pour la station localisée à proximité de l'embouchure du creek Kwé (St06) : seuil de dissimilarité = 0,85 avec n=6.

Station St06	Cr(VI)	Mn	Ni	Co
Cr(VI)	1			
Mn	0,440	1		
Ni	0,439	0,964	1	
Co	0,394	0,878	0,890	1

STATION ST15 (CREEK DE LA RADE NORD)

Les concentrations de Co et Ni suivent des distributions semblables entre les campagnes : les concentrations maximales sont mesurées pour les eaux de surface en 2013 ; la distribution de Mn est similaire, mais la valeur maximale (0,72 µg/L) est mesurée en 2011 (Figure 16, Figure 17, Figure 18 et Figure 19). Les concentrations les plus élevées se rencontrent dans les eaux de surface, en dessous, elles demeurent quasiment du même ordre de grandeur depuis 2008. Les précipitations cumulées pendant la campagne de 2013 (Figure 9), sont sans aucun doute à l'origine des valeurs importantes obtenues à cette station.

L'ensemble des analyses montre que les concentrations en Cr(VI) n'évoluent quasiment pas dans le temps (0,18 à 0,22 µg/L), hormis deux valeurs élevées dans les eaux de surface en 2013 (0,69 µg/L) et 2009 (0,43 µg/L) (Figure 17).

Comme pour les résultats de la station St06, le traitement statistique des données met en évidence que les concentrations en Cr(VI) ne sont pas corrélables avec celles des 3 autres métaux. A l'inverse, la variabilité temporelle des concentrations en Co, Mn et Ni montre qu'il existe une similarité de distribution des métaux dans les eaux de la Rade Nord.

Il en résulte d'une part, que la variabilité des concentrations en Cr(VI) est infime (bruit de fond géochimique) et d'autre part que les fluctuations notables (2009 et 2013) sont probablement

l'expression des conséquences de phénomènes exceptionnels de lessivage des sols (accident du 01 avril 2009 et fortes précipitations d'août 2013) ; les concentrations des 3 autres métaux reflètent l'impact chronique des fluctuations en matière d'apports terrigènes par le Creek de la Rade Nord.

Tableau 3 : Matrice de similarité (Coefficient de Pearson) pour la station localisée à proximité de l'embouchure du Creek de la Rade Nord (St15) : seuil de dissimilarité = 0,85 avec n=6.

Station St15	Cr(VI)	Mn	Ni	Co
Cr(VI)	1			
Mn	0,018	1		
Ni	0,180	0,797	1	
Co	0,115	0,866	0,919	1

STATION ST09 (CANAL DE LA HAVANNAH)

Les concentrations des métaux sont de 8 à 30 fois plus faibles que celles mesurées respectivement aux stations St15 et St06, directement influencées par les apports terrigènes. La majorité des concentrations en Co sont inférieures aux limites de quantification, seules les valeurs des campagnes 2008 et 2009 (en surface) sont quantifiées à la station St09. A cette station, les concentrations de Co, Cr(VI), Mn et Ni ne montrent pas d'évolution particulière au cours du temps et sont même remarquablement stables entre les différentes campagnes depuis 2008 (Figure 16, Figure 17, Figure 18 et Figure 19), tout comme à la station St05 de l'Ilot Kié.

Au niveau de cette station, il ne semble pas que les concentrations en métaux (Co, Cr(VI), Mn et Ni) analysées dans les eaux du Canal de la Havannah soient liées entre-elles, comme le montre les résultats du traitement statistique⁴ (Tableau 4). En d'autres termes, la variabilité des concentrations ne paraît pas être en rapport direct avec les fluctuations des apports terrigènes identifiés (Baie Kwé : St06) ; les concentrations mesurées sont donc la combinaison des apports des différentes sources terrigènes et du bruit de fond géochimique existant, milieu océanique compris.

Tableau 4 : Matrice de similarité (Coefficient de Pearson) pour la station localisée à proximité du diffuseur (St09 ; Canal de la Havannah) : seuil de dissimilarité = 0,85 avec n=6.

Station St09	Cr(VI)	Mn	Ni	Co
Cr(VI)	1			
Mn	-0,635	1		
Ni	-0,397	0,861	1	
Co	0,833	-0,902	-0,781	1

⁴ Les coefficients de corrélation élevés pour les couples impliquant Co avec les 3 autres éléments résultent d'un artefact dû au nombre très réduit d'observations quantifiées (4 sur 15) pour ce métal ; les 11 autres mesures sont en dessous des limites de quantification.

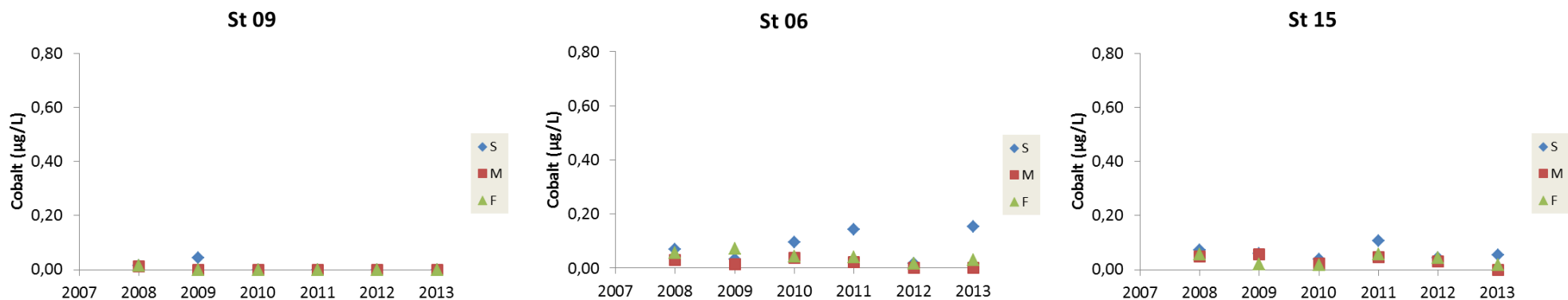


Figure 16 : Concentrations de cobalt mesurées en surface (S), mi-profondeur (M) et fond (F) aux stations St09, St06 et St15 lors des campagnes « saison fraîche » 2008-2013.

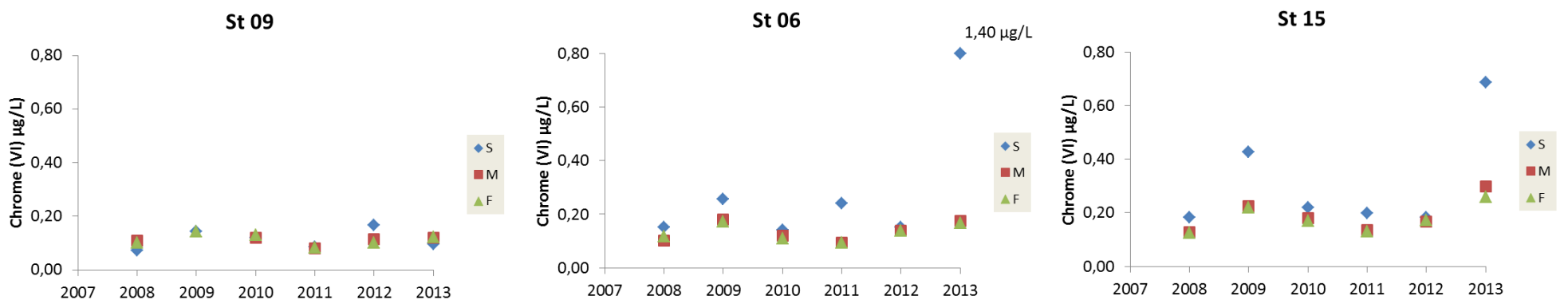


Figure 17 : Concentrations de Chrome(VI) mesurées en surface (S), mi-profondeur (M) et fond (F) aux stations, St09, St06 et St15 lors des campagnes « saison fraîche » 2008-2013.

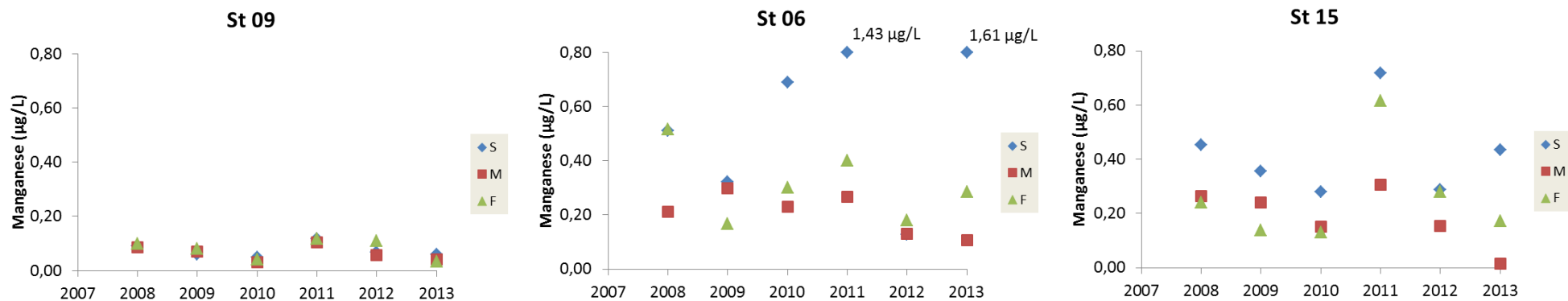


Figure 18 : Concentrations de manganèse mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations, St09, St06 et St15 lors des campagnes « saison fraîche » 2008-2012.

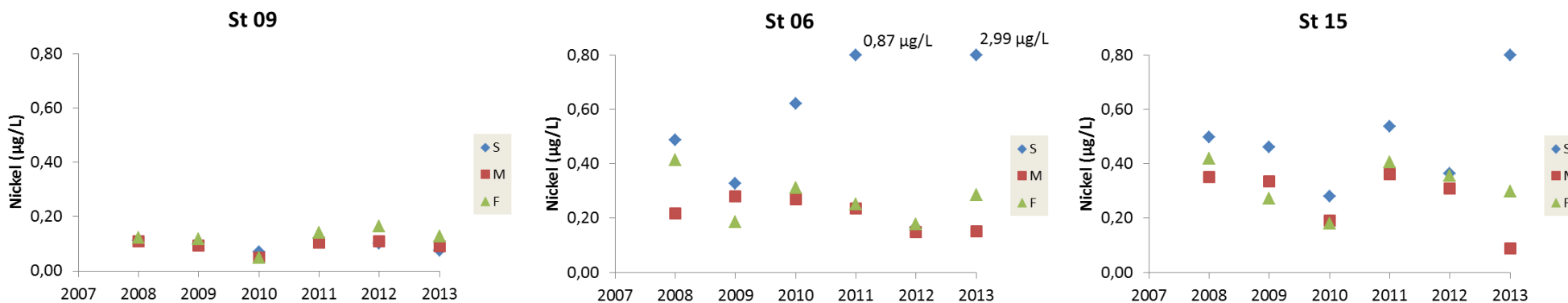


Figure 19 : Concentrations de nickel mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations, St09, St06 et St15 lors des campagnes « saison fraîche » 2008-2012.

II.1.2. Suivi de la colonne d'eau en saison chaude

Cette synthèse regroupe les valeurs moyennes des concentrations des sels nutritifs (NO_3+NO_2 , NH_4 , PO_4 et SiO_4), des pigments chlorophylliens et des métaux dissous (Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni et Zn) dans la colonne d'eau pour les campagnes de suivis « **saison fraîche** » réalisées depuis mars 2007.

Les conditions météorologiques, notamment les précipitations, ayant une influence sur la physico-chimie des eaux et la concentration en métaux, le cumul des précipitations 5 jours avant et pendant les campagnes a été reporté dans la Figure 20, à titre d'information.

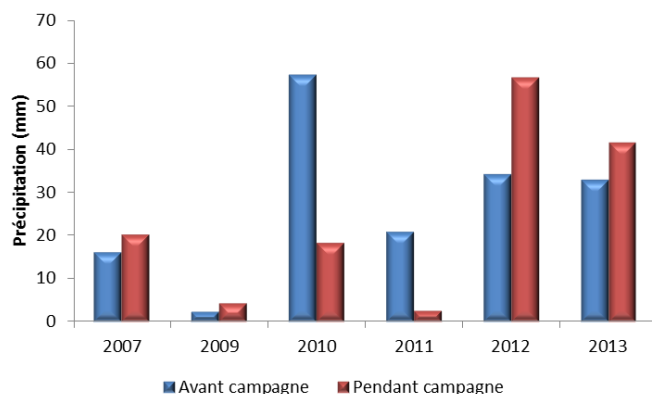


Figure 20 : Cumuls des précipitations tombées durant les 5 jours précédant les campagnes de prélèvement en « saison chaude » et pendant celles-ci. Période de 2007 à 2013 ; station d'observation météorologique : « Prony Pilot Station, Vale-NC ».

Remarque : Le cumul des pluies enregistrées pour toutes les campagnes des saisons chaudes montre qu'il est tombé en moyenne 3 fois plus d'eau que pendant les campagnes des saisons fraîches.

II.1.2.a. Sels nutritifs

(1) Distribution globale dans le domaine

Globalement pour l'ensemble du domaine d'étude, les concentrations moyennes en sels nutritifs mesurées lors des campagnes semestrielles « saison chaude » ne montrent pas de tendance particulière entre 2007 et 2013 (Figure 21 et Figure 22). En effet, dans l'ensemble du domaine étudié, les concentrations de ces éléments sont très dispersées et ne mettent pas en évidence d'évolution temporelle particulière. Seules les concentrations de nitrates et nitrites semblent être nettement plus faibles en 2012 que celles mesurées les autres années, bien que ces valeurs puissent être sujettes à caution en raison de leurs niveaux proches des LQ.

Cependant quelques variations apparaissent entre chaque campagne dans la Baie du Prony et le Canal de la Havannah. Les concentrations de NO_2+NO_3 ne montrent pas d'évolution temporelle particulière entre 2007 et 2013. En 2012, seulement deux concentrations ont été quantifiées dans le Canal de la Havannah.

La plupart des concentrations de PO_4 et NH_4 ne montrent pas d'évolution temporelle particulière dans la Baie du Prony, ni dans le Canal de la Havannah. Seule une concentration en NH_4 de 2012, mesurée dans le Canal de la Havannah ($0,52 \mu\text{mol/L}$), est nettement plus élevée que celles obtenues habituellement.

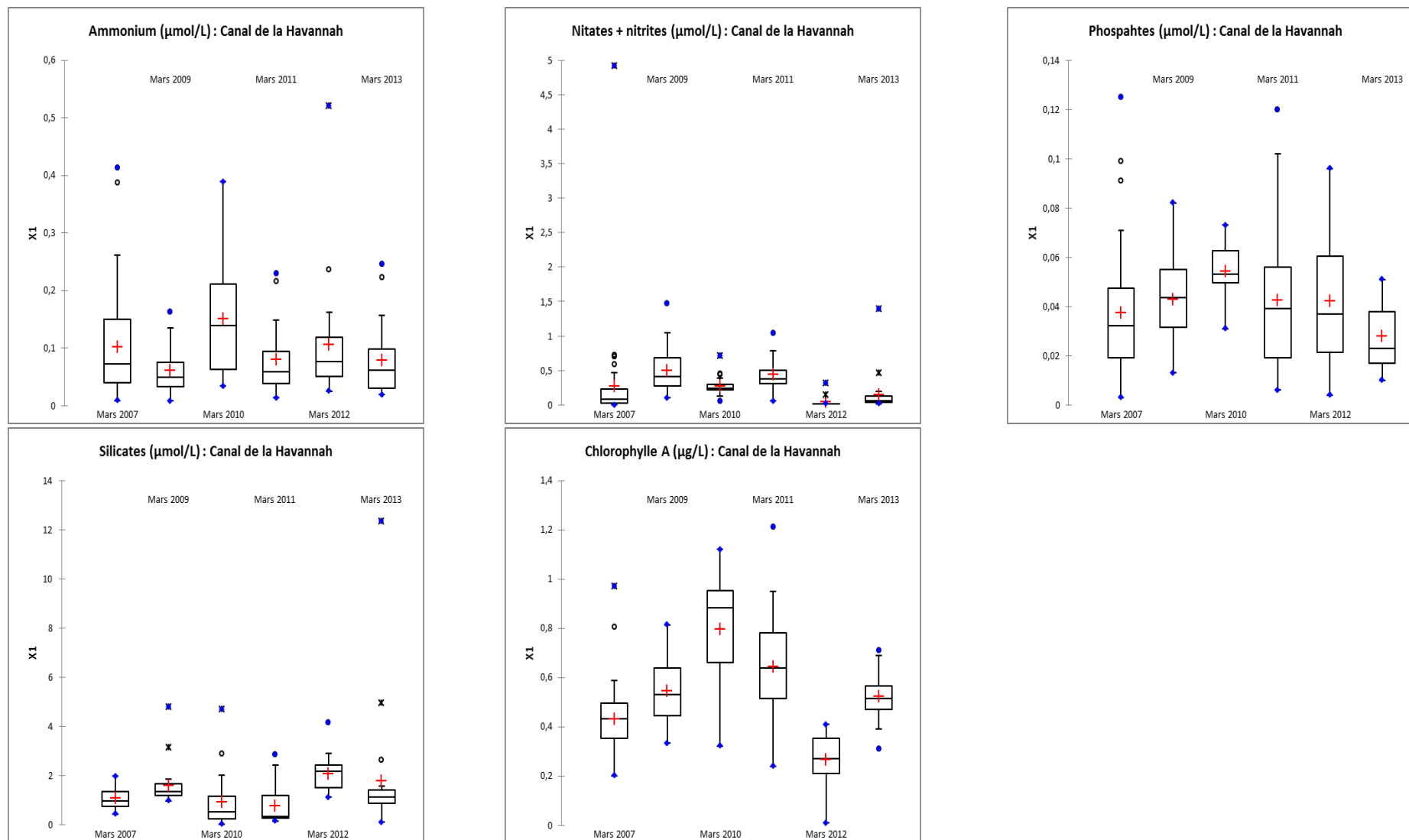


Figure 21 : Variabilité des concentrations en nutriments et chlorophylle A dans la totalité de la colonne d'eau pour la zone « Canal de la Havannah » (St02, St03, St05, St06, St07, St09, St14 et St21 ; n=158). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison chaude » 2007-2013. Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu.

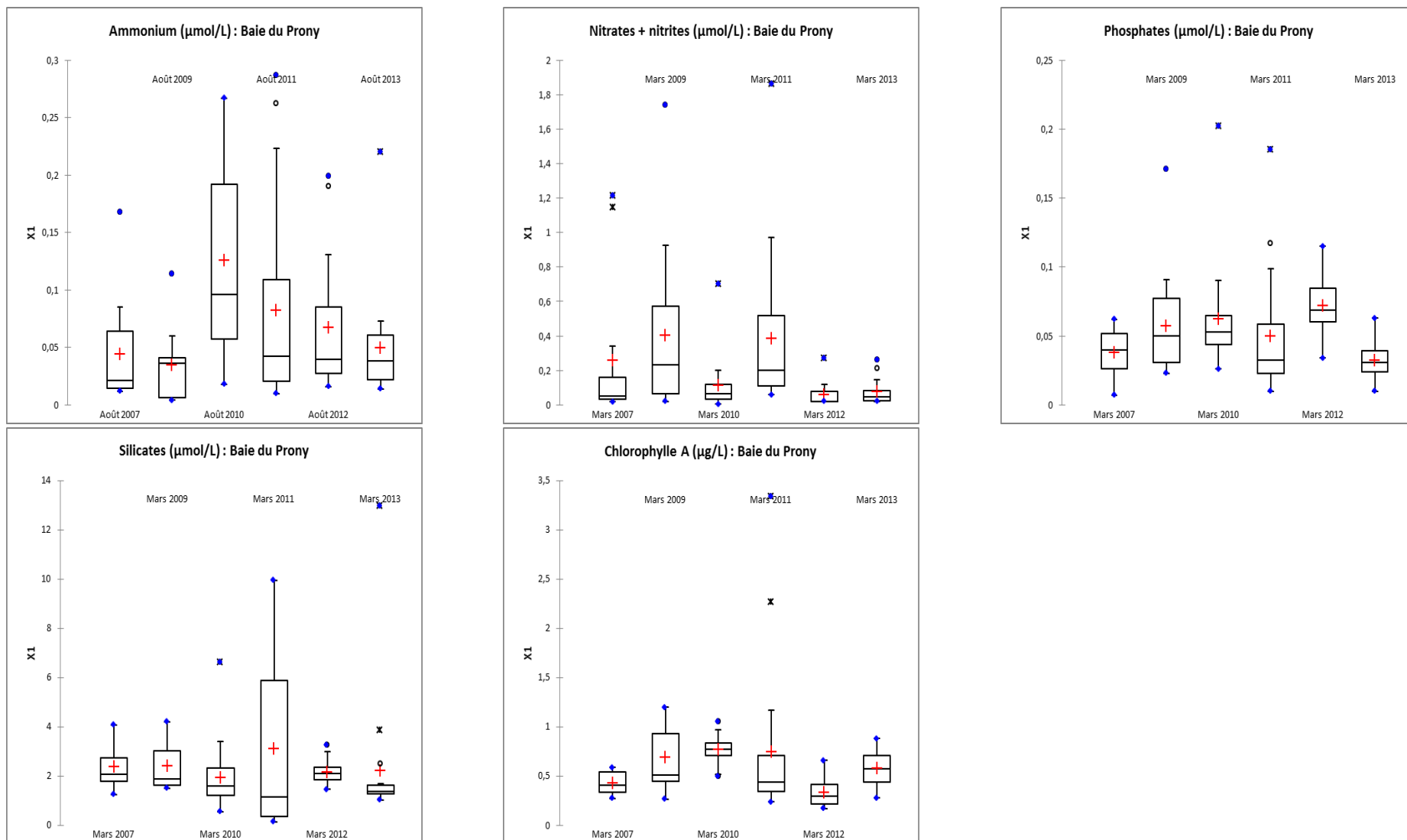


Figure 22 : Variabilité des concentrations en nutriments et chlorophylle A dans la totalité de la colonne d'eau pour la zone « Baie du Prony » (St15, St16, St18, St19 ainsi que St13 et St20 ; n=100). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison chaude » 2007-2013. Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu.

Les concentrations de SiO_4 sont toujours plus élevées dans la Baie du Prony que dans le Canal de la Havannah. Dans ce dernier, la concentration de SiO_4 la plus élevée a été mesurée lors de la campagne de 2013 (12,34 $\mu\text{mol/L}$), comme pour la Baie du Prony (12,96 $\mu\text{mol/L}$).

(2) Distribution aux « stations sentinelles » St06 et St09 et St15

Les concentrations en NH_4 et NO_2+NO_3 mesurées aux trois stations St15 (Prony Creek Baie Nord), St06 (Baie Kwé) et St09 (Canal de la Havannah) reflètent les deux différents types d'influence dénombrés dans la zone d'étude : influence terrigène des creeks de la Baie et Prony (St15) et de la Kwé (St06), influence océanique du Canal de la Havannah (St09). La comparaison entre les six campagnes « saison chaude » (2007 à 2013) est représentée aux Figure 23 et Figure 24.

Les concentrations de NH_4 et de NO_2+NO_3 pour les trois stations sentinelles retenues évoluent différemment entre les campagnes de « saison chaude » :

- A la station **St06**, les concentrations en NH_4 ne montrent pas de tendance particulière entre les campagnes. On doit cependant remarquer une concentration légèrement plus élevée que les autres à mi-profondeur en 2010 (0,27 μM) et au fond en 2012 (0,24 μM). Les concentrations en NO_2+NO_3 sont relativement stables et ne dépassent pas 0,7 μM entre les campagnes, hormis dans les eaux de surface en 2013 (1,33 $\mu\text{mol/L}$) ;
- A la station **St09**, les concentrations en NH_4 varient peu entre les campagnes. En 2009, les concentrations de NO_2+NO_3 ont atteint un maximum à 1 $\mu\text{mol/L}$, hormis cet épisode, celles-ci ne présentent pas d'évolution particulière entre les campagnes ; les concentrations ne dépassant pas 0,3 $\mu\text{mol/L}$. Les concentrations de mars 2012 sont cependant anormalement faibles ;
- A la station **St15**, deux concentrations de NH_4 se démarquent par leurs valeurs plus élevées que les autres ; celles-ci ont été mesurées en profondeur lors des campagnes de 2010 (0,25 μM) et 2011 (0,29 μM). Les concentrations de NO_2+NO_3 de cette station diffèrent entre les campagnes ; cette évolution ne semblant pas être liée à la pluviométrie mesurée avant et pendant les campagnes.

II.1.2.b. Chlorophylle A

Les concentrations de chlorophylle *a* ont presque doublé entre 2007 (0,43 \pm 0,13 $\mu\text{g/L}$) et 2010 (0,78 \pm 0,20 $\mu\text{g/L}$) et sont ensuite revenues aux valeurs initialement mesurées entre 2010 et 2012 (0,30 \pm 0,13 $\mu\text{g/L}$). Cette diminution est plus prononcée dans le Canal de La Havannah où les concentrations moyennes de chlorophylle *a* ont été divisées par 3 de 2010 (0,88 \pm 0,17 $\mu\text{g/L}$) à 2012 (0,28 \pm 0,11 $\mu\text{g/L}$).

Pour les stations de la Baie du Prony, les concentrations de chlorophylle A ne diffèrent pas entre les campagnes de 2009 à 2013, mais les plus faibles teneurs sont relevées en 2012, tant pour la Baie du Prony que pour le Canal de la Havannah.



Figure 23 : Concentrations de nitrates + nitrites mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations St06, St09 et St15 lors des campagnes « saison chaude » 2007-2013.

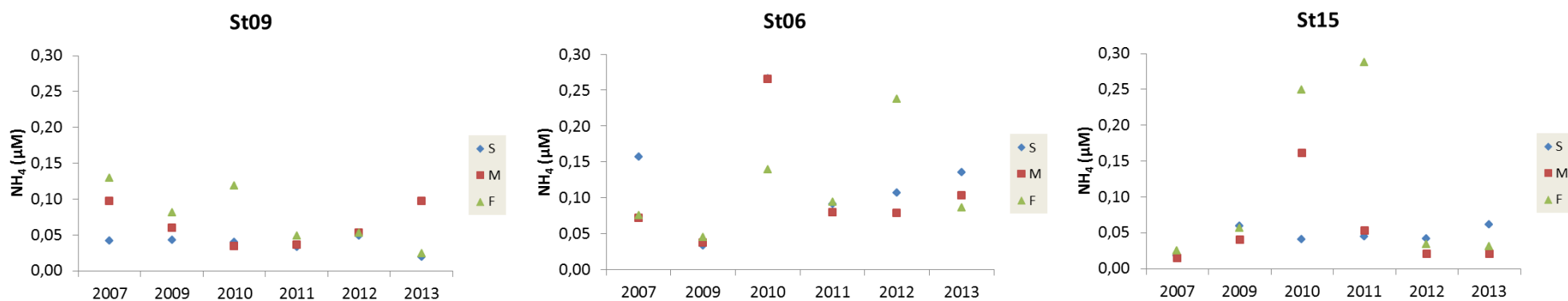


Figure 24 : Concentrations d'ammonium mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations St06, St09 et St15 lors des campagnes « saison chaude » 2007-2013.

II.1.2.c. Métaux dissous

(1) Distribution globale dans le domaine

Pour le domaine d'étude entier, les concentrations moyennes en Co, Mn et Ni peuvent être considérées comme stables entre les différentes campagnes menées depuis 2007, en particulier dans la Baie du Prony (Figure 25 et Figure 26). Dans cette dernière, les concentrations de Ni ont été particulièrement dispersées en 2011 ($0,50 \pm 0,51 \mu\text{g/L}$).

Pour le chrome Cr(VI), dans le Canal de la Havannah, les concentrations sont remarquablement stables entre les différentes campagnes (Figure 25). En Baie du Prony, les valeurs sont beaucoup plus dispersées et diffèrent entre les campagnes ; elles augmentent entre 2009 ($0,22 \pm 0,08 \mu\text{g/L}$) et 2011 ($0,43 \pm 0,42 \mu\text{g/L}$) puis diminuent entre 2011 et 2012 ($0,15 \pm 0,03 \mu\text{g/L}$). Cependant, au vue des importants écart-types de ces concentrations, cette tendance doit être interprétée avec précaution. La valeur maximale a été observée en 2011 ($1,22 \mu\text{g/L}$).

Les concentrations moyennes de Fe, Zn et Cu varient entre les différentes campagnes. Les écart-types montrent une importante dispersion des concentrations de ces trois métaux, aucune tendance ne peut donc être déterminée entre les différentes campagnes. On peut cependant noter une augmentation des concentrations de Cu dans la Baie du Prony en 2012 ($0,18 \pm 0,13 \mu\text{g/L}$ avec un maximum de $0,48 \mu\text{g/L}$), mais, dans une moindre mesure, aussi dans le Canal de la Havannah ($0,13 \pm 0,11 \mu\text{g/L}$ et un maximum de $0,25 \mu\text{g/L}$).

(2) Distribution aux « stations sentinelles » St06, St09 et St15

Les concentrations en Co, Cr(VI), Mn et Ni mesurées aux trois stations St15 (Creek Rade Nord), St06 (Baie Kwé) et St09 (Canal de la Havannah) reflètent parfaitement les deux différents types d'influences dénombrés : influence terrigène des creeks de la Rade Nord (St15) et de la Kwé (St06), influence océanique du Canal de la Havannah (St09). La comparaison entre les six campagnes « saison chaude » (2007 à 2013) est illustrée par les Figure 27, Figure 28, Figure 29 et Figure 30.

STATION ST06 (BAIE KWE)

Les concentrations en Co, Cr(VI), Mn et Ni ne montrent pas de tendance particulière entre les différentes campagnes « saison chaude », mais mettent en évidence une variabilité inter-annuelle bien marquée ; deux valeurs de Ni exceptionnellement élevées ayant été mesurées pour les eaux de surface, en 2009 ($0,82 \mu\text{g/L}$) et 2013 ($0,73 \mu\text{g/L}$). Pour les autres métaux, les concentrations de Co, Mn et Ni sont également plus élevées en surface qu'en profondeur, la plupart du temps.

STATION ST09 (CANAL DE LA HAVANNAH)

La distribution temporelle des concentrations des métaux est très homogène d'une campagne à l'autre. Cette homogénéité se reflète également dans toute la colonne d'eau. Les concentrations mesurées dans le Canal de la Havannah sont les plus faibles parmi les 3 stations sentinelles.

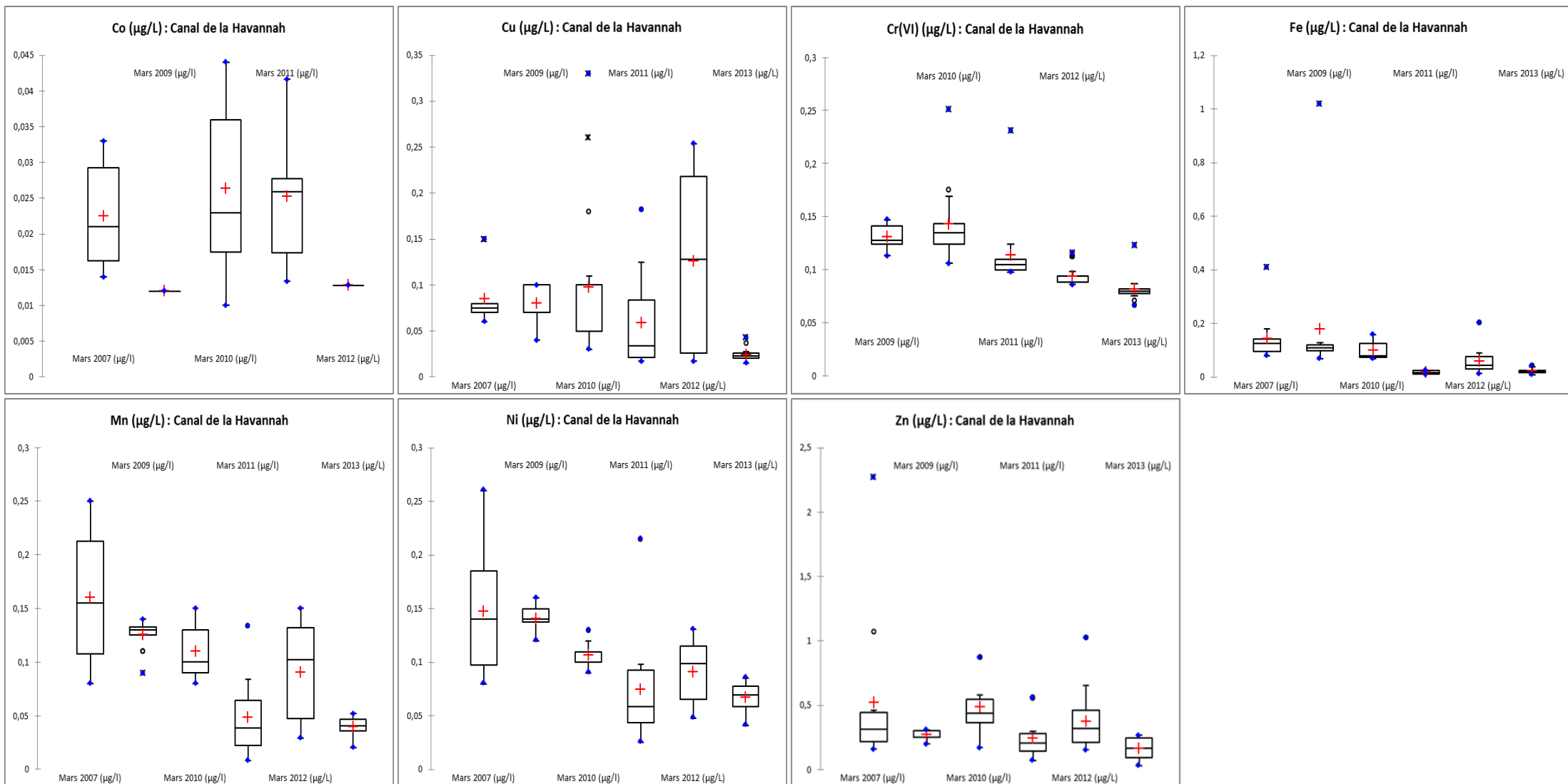


Figure 25 : Variabilité des concentrations en métaux dissous dans la colonne d'eau pour la zone « Canal de la Havannah » (St02, St05, St07, St09, St21). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison chaude » 2007-2013 (n=105). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu. Pour 2013, toutes les valeurs de Co sont inférieures à la LQ.

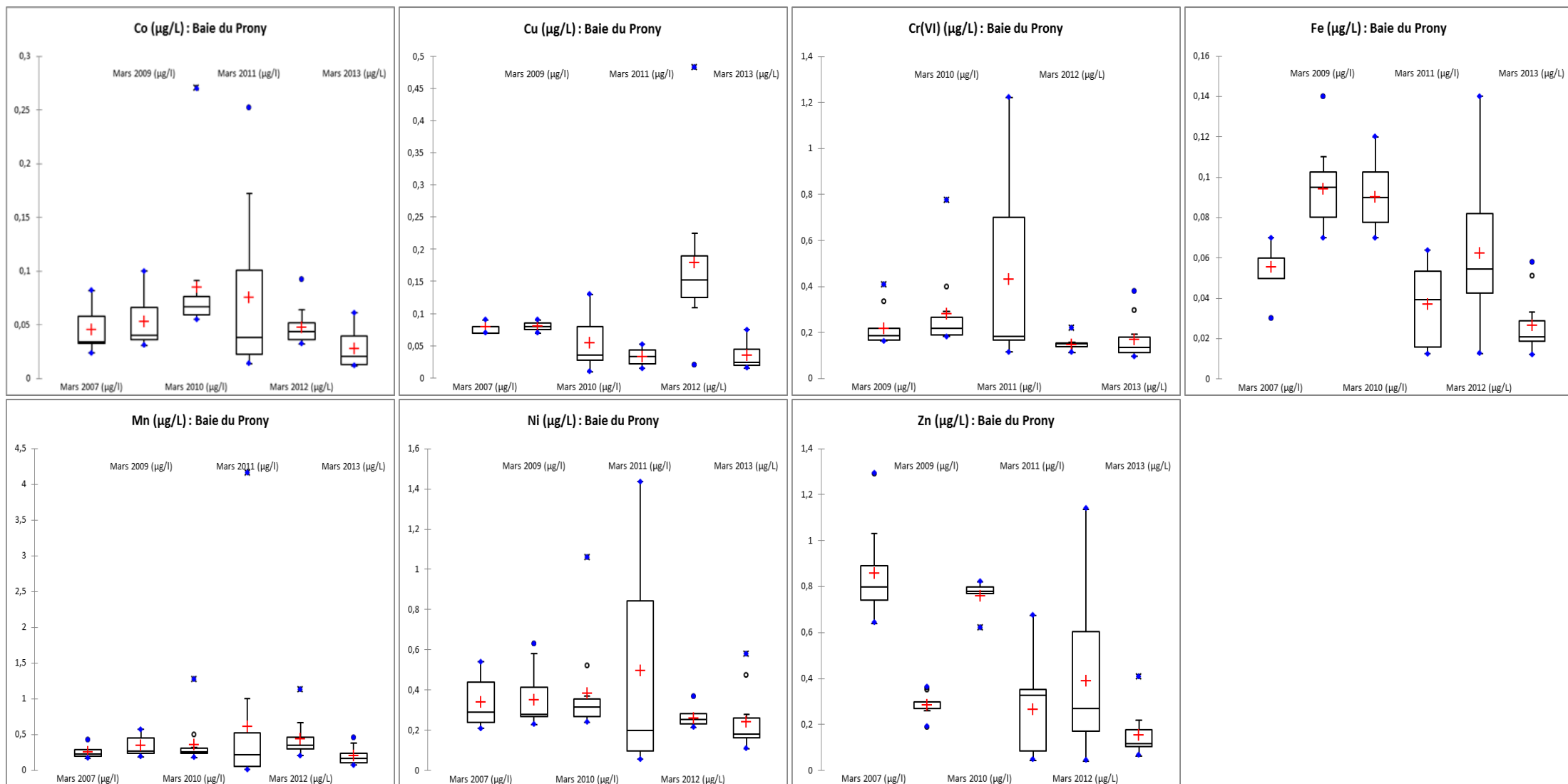


Figure 26 : Variabilité des concentrations en métaux dissous dans la colonne d'eau pour la zone « Baie du Prony » (St15, St16, St18, St19). Mesures effectuées lors des campagnes semestrielles « saison chaude » 2007-2013 (n=84). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par le point bleu.

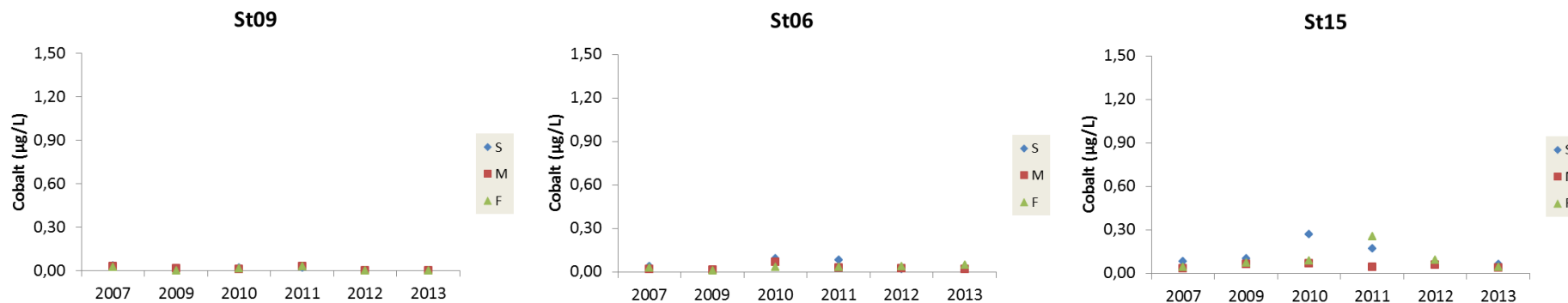


Figure 27 : Concentrations de Co mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations St06, St09 et St15 lors des campagnes « saison chaude » 2007-2013.

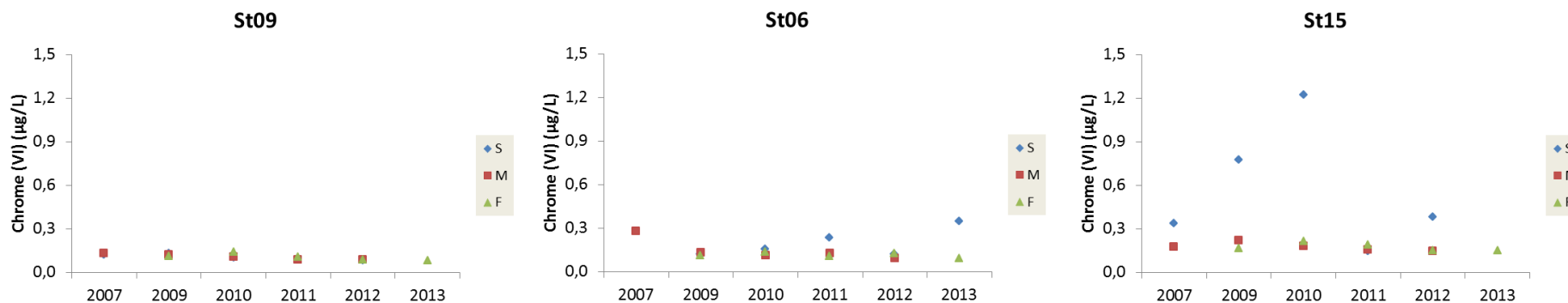


Figure 28 : Concentrations de Cr(VI) mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations St06, St09 et St15 lors des campagnes « saison chaude » 2007-2013.

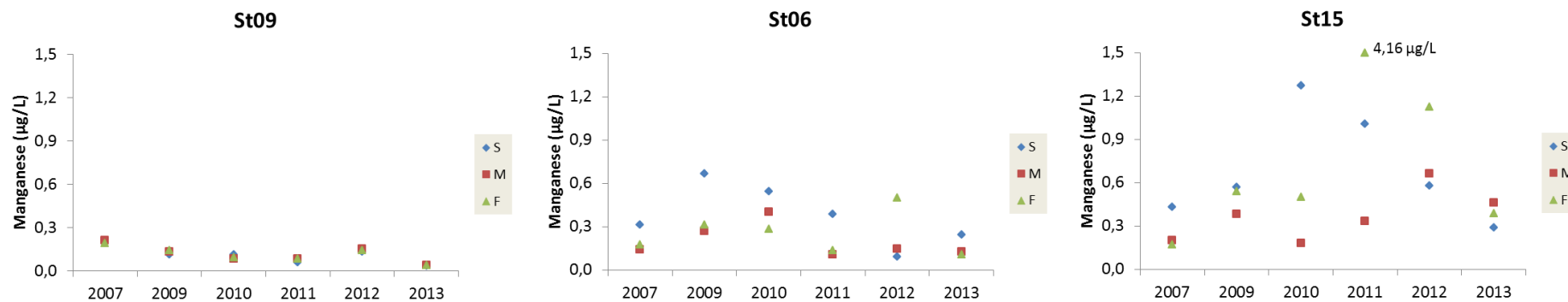


Figure 29 : Concentrations de Mn mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations St06, St09 et St15 lors des campagnes « saison chaude » 2007-2013.

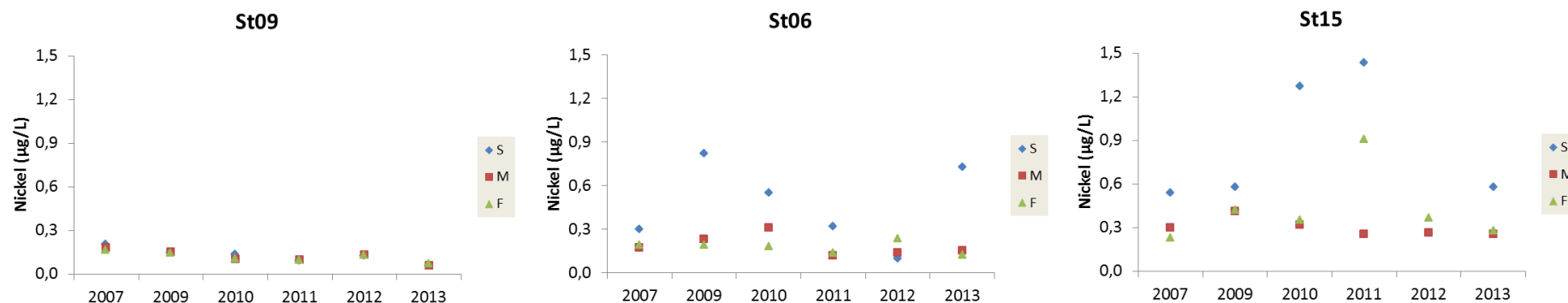


Figure 30 : Concentrations de Ni mesurées en surface, mi-profondeur et fond aux stations St06, St09 et St15 lors des campagnes « saison chaude » 2007-2013.

STATION ST15 (CREEK DE LA RADE NORD)

Alors que les concentrations des métaux dans les eaux de mi-profondeur sont toujours relativement stables, les concentrations en surface et au fond sont assez variables entre les campagnes. La variabilité principale est observée dans les eaux de surface, notamment pour Cr(VI), Mn et Ni.

Dans les eaux de fond, les concentrations en Co, Mn et Ni, ne diffèrent pas, ou très légèrement, entre les campagnes de 2007, 2009, 2010 et 2012.

En revanche en 2011, les concentrations de ces trois métaux sont multipliées par 4 voire 12 par rapport aux valeurs de mi-profondeur. Pour Co et Ni, en surface, les concentrations peuvent être très élevées et montrer les valeurs maximales (Ni). Durant cette période de prélèvement, la présence d'un néphéloïde benthique bien développé sur les derniers mètres (2-3 FTU) explique l'augmentation de la concentration, en particulier du manganèse, mais aussi des deux autres métaux.

D'une manière générale, en surface, les concentrations des 4 métaux (Co, Cr(VI), Mn et Ni) sont généralement plus élevées que celles mesurées à mi-profondeur et fond. Les campagnes de 2010 et 2011 présentent des concentrations plus élevées que celles mesurées lors des campagnes de 2007, 2009 et 2012.

II.1.3. Conclusion

Tous les résultats disponibles (12 campagnes de suivi) qui concernent les trois métaux (Ni et Cr(VI) et Mn), traceurs de l'érosion des formations latéritiques et de l'activité industrielle, ont été compilés dans le Tableau 5, le Tableau 6, ainsi qu'à la Figure 31.

Pour le **manganèse et le nickel**, il apparaît que :

- Au niveau de la **Baie Kwé** (St06) et de la **Rade du Nord** (St15), les concentrations mesurées aux trois profondeurs ont varié fortement au cours du temps. De plus, ces concentrations sont bien plus élevées que celles enregistrées plus au large et reflètent de manière évidente l'influence directe des apports terrigènes (lixiviation des sols par les pluies) qui sont déversés au droit des embouchures. On notera les très fortes augmentations des concentrations tant au fond qu'en surface pour la campagne de mars 2011 et en particulier, dans les eaux de surface pour la campagne d'août 2013;

Au niveau du **Canal de la Havannah** (St09), comme à la station de **l'îlot Kié** (St05), les concentrations des eaux de surface, mi-profondeur et fond ne varient pas ou très peu au cours du temps. Cette constatation conforte les résultats de la modélisation hydrodynamique (Douillet et Fernandez, 2009) et de la caractérisation des états de référence physico-chimiques qui montrent que la réserve Merlet est isolée des influences terrigènes grâce à l'existence de forts courants prenant naissance à la passe de la Havannah et qui longent le Canal. La délimitation des zones d'influences océanique et terrigène passe approximativement au nord de la station St09 et divise le Canal longitudinalement (Douillet et Fernandez, 2009).

Pour le **chrome**, exception faite des campagnes de la saison chaude 2010 et 2011, d'une part, et de la saison fraîche 2013, d'autre part, les résultats sont relativement moins dispersés que pour

Mn et Ni. En effet, au droit du **Creek de Rade du Nord** (St15) et du **Creek Kwé** (St06), les variations sont relativement moins marquées dans les eaux de surface, voire de fond, et extrêmement ténues dans le Canal de la Havannah (St09) dans toute la colonne d'eau. Dans les eaux de mi-profondeur, les résultats donnent un aperçu des valeurs générées par le fond géochimique dans ce secteur du lagon sud de Nouvelle-Calédonie.

Si dans l'ensemble, les valeurs moyennes enregistrées demeurent dans la fourchette des concentrations admises pour les 3 types de domaines sentinelles (St06, St09 et St15), il convient d'être attentif aux variations constatées en Cr(VI), Mn et Ni mesurées dans les eaux proches des embouchures. En effet, sur ces deux stations d'embouchures (St06 et St15), les niveaux de concentrations en chrome mais aussi en manganèse et nickel ont dépassé en 2010, 2011 et 2013 les niveaux considérés comme indicateurs de zones fortement perturbées pour ce type de milieu, selon l'approche effectuée par le guide ZoNeCo (Tableau 5 et Tableau 6). Si en 2012, les concentrations pour ces éléments sont repassées en dessous des valeurs indiquant une perturbation d'origine terrigène, en 2013, de nouvelles valeurs fortes ont été mesurées suite à des taux de précipitations particulièrement importants, en particulier en saison fraîche (août 2013).

Il convient de suivre les fluctuations en corrélation avec les événements climatiques pour ce type de perturbation terrigène et de suivre les tendances évolutives.

Dans les eaux du Canal, l'empreinte terrigène naturelle n'est que très rarement perceptible, la réserve Merlet restant en permanence en dehors des influences terrigènes avec des concentrations homogènes tout le long de l'année quelle que soit la profondeur.

Tableau 5 : Nombre de mesures obtenues (période 2007-2013) pour chacune des stations St06, St09 et St15 dans les catégories proposées par Beliaeff et al (2011) pour la définition de l'état de santé du lagon (n=36). Comparaison avec la station St05 (Ilot Kié).

	NOMBRE DE MESURES PAR MILIEU			DATE	NIVEAU CONCERNE
	Milieu non perturbé	Milieu modérément perturbé	Milieu fortement perturbé		
St05 (Ilot Kié)					
Chrome-VI	36	1			
Manganèse	36				
Nickel	36				
St06 (Baie Kwé)					
Chrome-VI	33	3		Août 2013	Surface
Manganèse	26	9	1	Août 11	Surface
Nickel	28	5	3	Mars 09/Août 11/13	Surf/Surf/Surf
St09 (Canal Havannah)					
Chrome-VI	36				
Manganèse	36				
Nickel	36				
St15 (Rade Nord)					
Chrome-VI	28	5	3	Mars 10/11/Août 13	Surf/Surf/Surf
Manganèse	19	14	3	Mars 10/11/11/12	Surf/Surf/Fond/Fond
Nickel	23	10	3	Mars 10/11/11/Août 13	Surf/Surf/Fond/Surf

	Milieu non perturbé	Milieu modérément perturbé	Milieu fortement perturbé
Cr(VI) (µg/L)			
Fond de baie, littoral	< 0,25	[0,25 – 0,60[≥ 0,60
Lagon en milieu côtier	< 0,20	[0,20 – 0,30[≥ 0,30
Proche récif barrière	< 0,15	[0,15 – 0,20[≥ 0,2
Mn (µg/L)			
Fond de baie, littoral	< 0,35	[0,35 – 0,80[≥ 0,80
Lagon en milieu côtier	< 0,25	[0,25 – 0,50[≥ 0,50
Proche récif barrière	< 0,10	[0,10 – 0,20[≥ 0,20
Ni (µg/L)			
Fond de baie, littoral	< 0,40	[0,40 – 0,75[≥ 0,75
Lagon en milieu côtier	< 0,30	[0,30 – 0,50[≥ 0,50
Proche récif barrière	< 0,15	[0,15 – 0,20[≥ 0,20

Tableau 6 : Gammes de concentrations obtenues habituellement dans les différentes unités du lagon de Nouvelle Calédonie (St15 = Fond de baie ; St09 = Lagon en milieu côtier ; St05 = Proche récif barrière) selon Béliciaeff et al., 2011.

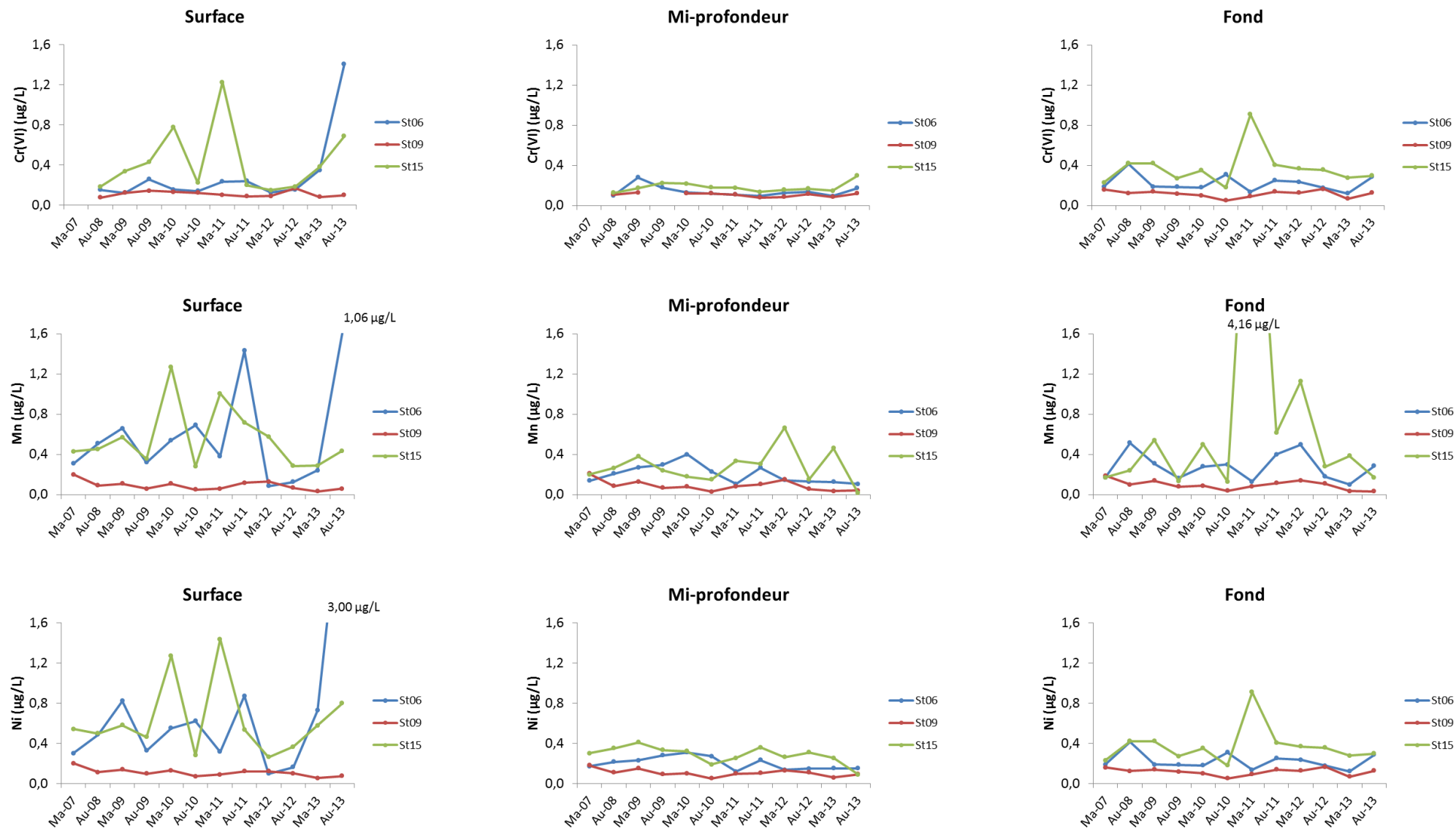


Figure 31 : Concentrations moyennes de surface, milieu et fond en Cr(VI), Mn et Ni, aux stations St06 (Baie Kwé), St09 (Canal de la Havannah, diffuseur) et St15 Creek de la Rade Nord, Prony pour l'ensemble des campagnes semestrielles de 2007 à 2013.

II.2. Suivi des flux de particules

Consécutivement à la définition de l'état de référence de 2008, la première phase du suivi des flux particulaires dans le Canal de la Havannah a commencé en juillet 2011 avec le mouillage de pièges à particules de type séquentiel sur les 3 stations St06, St60NE et St60SW. Depuis cette date, la surveillance s'est poursuivie au rythme de 2 campagnes par an, une en saison chaude et l'autre en saison fraîche pour être synchrones avec les analyses physico-chimiques conduites dans la colonne d'eau. La durée de collecte est d'environ deux mois par campagne, la sédimentation des MES étant réalisée à une cadence d'un échantillon intégré toutes les 96 heures (4 jours), pour une série de 12 prises séquentielles totalisant 48 jours. Au total, 4 campagnes de mouillages ont été réalisées.

La collecte des particules poursuit deux objectifs : d'une part, suivre les apports de la rivière Kwé (St06) qui alimentent le Canal de la Havannah (Figure 32) et d'autre part, piéger les matières solides transportées par l'effluent industriel (précipités, oxy-hydroxydes, gypse) ainsi que les particules naturelles transitant dans le Canal. Pour cette mission, deux pièges séquentiels sont mouillés simultanément de part et d'autre du diffuseur (St60SW et St60NE).

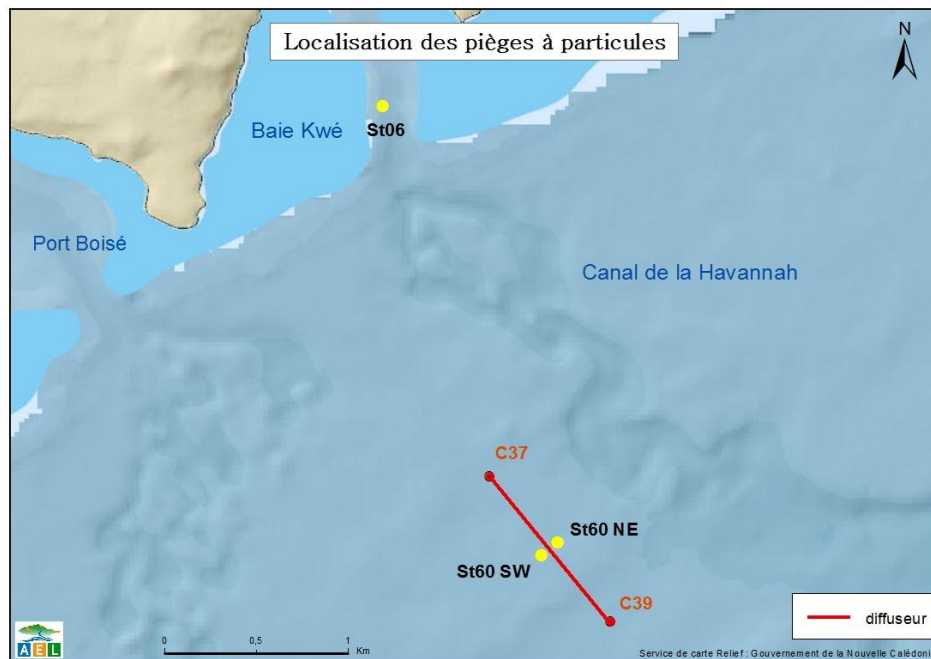


Figure 32 : Positionnement des pièges à sédiments de type séquentiel pour la collecte des particules issues de la rivière Kwé (St06) et émises par l'effluent (St60NE et St60SW).

Les objectifs poursuivis dans chacune des deux zones d'études, c'est-à-dire la Baie Kwé et le Canal de la Havannah, ont été d'effectuer, respectivement :

- le suivi temporel des apports terrigènes générés par l'activité minière en sortie de la Baie Kwé, dans un secteur de relative profondeur ($h > 15\text{m}$). En effet, il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage des grosses particules sur le fond, il n'est donc pris en compte que les fractions fines en suspension potentiellement transportables par les courants sur de longues distances, comme le suggère la modélisation hydrodynamique ;

- le suivi temporel des apports industriels issus du procédé chimique au voisinage immédiat du diffuseur. Ce suivi avait pour objet de répondre aux questions de la double rémanence supposée :
 - d'une part, du gypse formé après l'étape de neutralisation des solutions acides d'extraction du Ni par le calcaire ;
 - d'autre part, des précipités de CaCO_3 et d'hydroxydes de Mn supposés être générés lors de l'entrée en contact de l'effluent avec l'eau de mer, phénomène qui pourrait entraîner une fraction non négligeable des métaux (dont Mn). Les expériences de laboratoire et la modélisation géochimique associée montrent que seule une formation négligeable de précipités de calcite devrait se produire (cf. : Volume 2). La mesure in-situ permet de discuter de cette hypothèse, dans l'état actuel du niveau des rejets (phase de démarrage de l'usine).

Pour répondre à ces questions, les analyses ont porté sur les masses collectées (flux), la granulométrie des populations de grains, la composition minéralogique, les teneurs en carbonates, les observations de MES à la loupe binoculaire et les métaux traces du cortège latéritique ainsi que le calcium bioclatique.

II.2.1. Caractérisation de la matière en suspension

II.2.1.a. Baie Kwé (station St06)

(1) Compositions granulométriques

Les matières en suspension collectées au niveau de la Baie Kwé sont composées de particules dont le mode principal n'est pas bien exprimé mais que l'on situe globalement dans la classe 2-20 μm (argiles et silts fins) avec des proportions tournant, en général, autour 30 à 40 % du volume (Figure 33). Les silts moyens (20-40 μm) composent la deuxième population granulométrique, avec des valeurs très proches du mode précédent, comprises entre 30 et 40 %. Les populations de silts plus grossiers de la classe 40-63 μm ne représentent qu'un peu plus de 10 %, les populations extrêmes, c'est-à-dire les argiles (0,02-2 μm) et les silts grossiers (> 63 μm) représentent respectivement de l'ordre de 5 % et compris entre 5 et 15% du volume total.

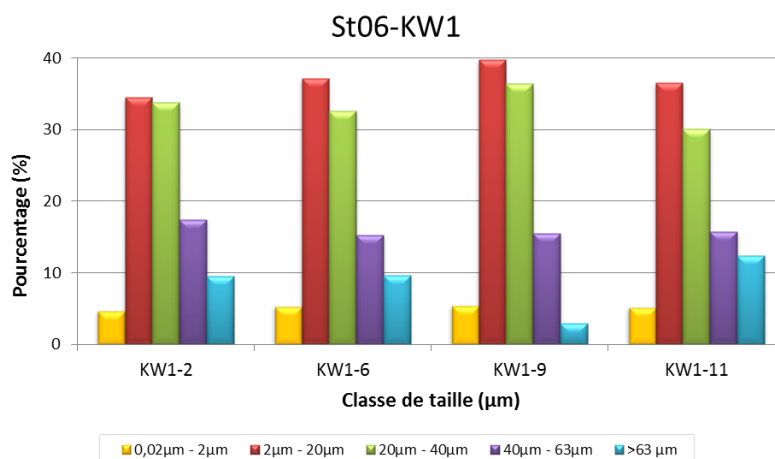


Figure 33 : Distribution granulométrique moyenne des populations de grains représentatives des MES de la Baie Kwe collectées dans les godets KW1-2, KW1-6, KW1-9 et KW1-11 du piège à sédiments séquentiel.

(2) Compositions minéralogiques

Les analyses réalisées par diffractométrie de rayons X montrent que les MES sont composées d'une part de goéthite, signature minéralogique majoritaire des formations latéritiques, et parfois d'hématite (saison fraîche 2011). D'autre part, il est décelé de la calcite, de la calcite magnésienne (phase majoritaire) et de l'aragonite, qui sont autant de signatures des influences marines ; cette dernière étant un des constituants principaux des coquilles d'invertébrés.

Globalement, les résultats d'analyses semi-quantitatives tendent à montrer que les proportions de chacune des phases minérales sont équivalentes d'un prélèvement à l'autre, quelle que soit la campagne.

(3) Teneurs en carbonates

Au niveau de la station St06, les MES collectées sont constituées d'une fraction carbonatée qui reste majoritaire puisque celle-ci oscille entre environ 60 et 85 % quels que soient le prélèvement et la campagne.

Les teneurs observées pour la campagne de janvier-février 2013 (58,2 et 81,2 %) sont en moyenne bien inférieures à celles obtenues l'année précédente (janvier-février 2012) pour laquelle les valeurs minimale et maximale étaient de 74,9 et 83,4%, respectivement. La teneur mesurée en 2013 (Figure 34) se rapproche davantage des valeurs obtenues durant la saison fraîche (juillet-août 2011 et septembre-octobre 2012), périodes pour lesquelles il a été observé $67,7 \pm 3,2$ % et $69,3 \pm 3,6$ %, respectivement.

En général, les teneurs maximales coïncident avec des régimes de forts alizés de secteurs SE, caractéristiques de la saison chaude. La baisse observée pour une bonne partie du mois de janvier 2013 pourrait alors être liée au passage de Fréda (début janvier 2013) : diminution de la productivité primaire, comme conséquence des apports massifs d'eau douce, conjointement à l'augmentation de la charge terrigène, observable durant plusieurs semaines après le passage du cyclone.

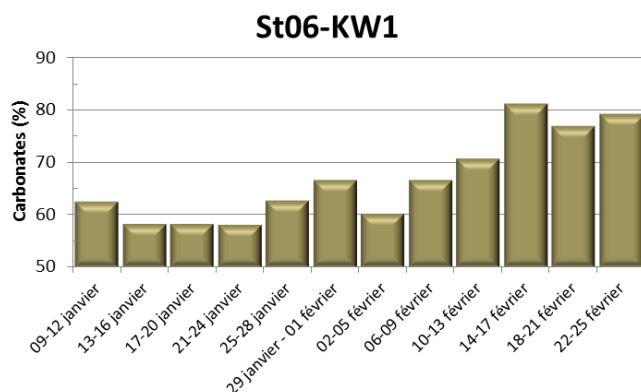


Figure 34 : Evolution type des teneurs en carbonates dans les particules collectées par les pièges séquentiels mouillés en Baie Kwé (e.g : campagne « janvier-février 2013 », St06-KW1).

(4) Composition géochimique

Les éléments métalliques analysés dans les MES de la Baie Kwé ont permis de mettre évidence les influences respectives des apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) et marins (Ca) en fonction d'un

contexte hydro-climatique précis.

Globalement, les concentrations en métaux obtenues pour les différents prélèvements séquentiels peuvent montrer une variation maximale, pour ces 4 campagnes, de l'ordre de 40% (pour le calcium) à 140 % (pour le chrome ; Tableau 7), ces variations étant toujours plus élevées en saison chaude qu'en saison fraîche.

D'un point de vu de l'évolution temporelle, lorsque les concentrations en métaux montrent des valeurs maximales, pour le calcium un schéma inverse se produit traduisant la diminution temporaire et simultanée des influences marines (Tableau 8). Par ailleurs, la matrice de corrélation met en évidence une grande similarité (seuil > 0,95) d'évolution des concentrations massiques inter-éléments pour Co, Cr, Fe et Ni, bien que pour Mn le niveau de similarité soit moindre. Toutefois, ces résultats démontrent que ces 5 éléments métalliques proviennent bien du cortège des formations latéritiques exploitées.

Tableau 7 : Concentrations moyennes, écart-types, pourcentage de variation et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé pour les 4 campagnes (Station St06-KW1 ; n=48).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	206 841	65	2 410	67 860	567	1 198
MAX	284 302	106	5 716	151 085	1 424	2 845
MOYENNE	249 174	104	3 717	105 047	872	1 858
ECART-TYPE	119 45	14	413	10 178	102	200
% VARIATION	5%	13%	11%	10%	12%	11%

Tableau 8 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations (seuil de similarité >0,95) des 5 métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé pour les 4 campagnes (Station St06-KW1 ; n=48).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,750	1				
Cr	-0,717	0,967	1			
Fe	-0,727	0,984	0,970	1		
Mn	-0,711	0,949	0,948	0,962	1	
Ni	-0,715	0,935	0,918	0,953	0,899	1

La normalisation des concentrations du calcium par le fer (Ca/Fe) souligne de manière notable les évolutions relatives distinctes des deux éléments qui représentent les pôles marins et terrigènes, respectivement comme illustré par la Figure 35. Ainsi, les deux valeurs maximales des ratios Ca/Fe traduisent la mise en place de périodes de forte empreinte marine, à l'inverse, les valeurs minimales soulignent l'augmentation des apports terrigènes en coïncidence avec les pics de concentration en métaux.

Les valeurs maximales du ratio correspondent avec des régimes globalement de SE forts à modérés ; les valeurs minimales coïncident avec un régime de tendance E modéré, indépendamment des épisodes pluvieux.

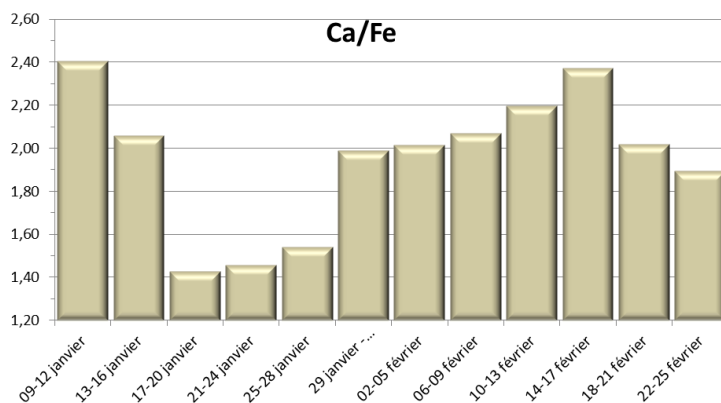


Figure 35 : Exemple de normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé (St06-KW1) entre le 9 janvier et le 25 février 2013.

Compte tenu de la constance naturelle des concentrations en calcium dans le milieu marin, les ratios Ca/Fe permettent de montrer que l'influence terrigène à la station St06 :

- d'une part, semble plus importante en saison chaude en raison des conditions hydro-climatiques régnantes ;
- d'autre part, paraît s'accroître notablement avec le temps (Tableau 9). En effet, les valeurs moyennes du rapport Ca/Fe, toutes saisons confondues, diminuent progressivement d'une campagne à l'autre passant de $3,17 \pm 0,5$ (juillet-août 2011) à $1,95 \pm 0,33$ (janvier-février 2013).

Il est à noter également que la valeur obtenue lors de la définition de l'« Etat de Référence » (2007/2008) était de $3,85 \pm 0,51$ (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230).

Tableau 9 : Evolution temporelle du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St06-KW1 pour les 4 campagnes (n=48).

Ca/Fe	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	2007-2008*
Moyenne	1,95	2,40	2,32	3,17	3,85
Ecart-type	0,33	0,31	0,18	0,50	0,51

(*) Valeurs obtenues lors de la définition de l'Etat de Référence.

II.2.1.b. Canal de la Havannah (stations St60-NE et St60-SW)

(1) Compositions granulométriques

La distribution des populations de grains est quasiment identique aux deux stations St60-NE et St60-SW (Figure 36).

La distribution granulométrique montre une variation temporelle qui affecte de manière relative les classes de grains les plus grossières. Cette observation est particulièrement avérée pour les populations de très grandes tailles ($\varnothing > 63 \mu\text{m}$) et intermédiaires ($40 \mu\text{m} < \varnothing < 63 \mu\text{m}$). En effet, ces proportions sont minimales pour des conditions météorologiques d'alizés moyens (SW60/NE60-9), alors qu'elles sont maximales consécutivement aux épisodes pluvieux (SW60/NE60-11).

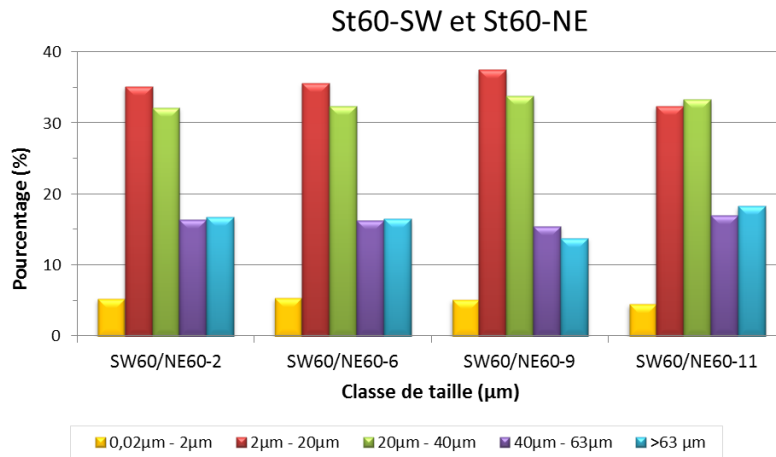


Figure 36 : Exemple de distribution granulométrique moyenne des populations de grains représentatives des MES du Canal de la Havannah collectées par les deux pièges à sédiments séquentiels des stations St60-SW et St60-NE (campagne de « janvier-février 2013 »).

Les épisodes pluvieux entraînent également une diminution générale des proportions en populations de particules fines et en particulier celles dont les diamètres sont compris entre 2 et 40 µm.

Les populations granulométriques d'un diamètre supérieur à 63 µm, sont plus nombreuses en saison chaude, une des raisons étant l'augmentation de la production primaire (apparition de tests carbonatés), mais également la resuspension des débris coralliens sous l'effet des alizés plus soutenus durant cette période.

(2) Compositions minéralogiques

L'ensemble des analyses réalisées montre que les MES sont composées, très majoritairement de minéraux comme la calcite, l'aragonite et la calcite magnésienne, cette dernière constituant, de manière évidente, la phase principale. Au niveau de ces stations, ces minéraux mettent en évidence la dominance quasi-totale de l'influence marine, l'aragonite en particulier, celle-ci étant un des constituants des coquilles des invertébrés. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques, n'est présente qu'à l'état de traces.

Par ailleurs, cette analyse semi-quantitative semble globalement montrer que les minéraux terrigènes, comme la goethite, sont en plus grande quantité dans les particules collectées en « saison chaude » qu'en « saison fraîche ». Les minéraux terrigènes, comme la goethite, sont en quantités équivalentes au niveau des deux stations du Canal.

(3) Teneurs en carbonates

Globalement, pour les deux stations, les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 37) sont relativement élevées et très homogènes : la valeur moyenne pour les 4 campagnes est de 84,5 ±3,5 %.

En termes d'évolution, elles sont passées de 91,0 ±3,0 % et 82,7 ±2,4 %, pour les campagnes de la saison fraîche de juillet-août 2011 et septembre-octobre 2012, respectivement, à 89,7 ±7,5 % pour la campagne de la saison chaude janvier-février 2012 et 75,2 ±5,1 % en janvier-février 2013.

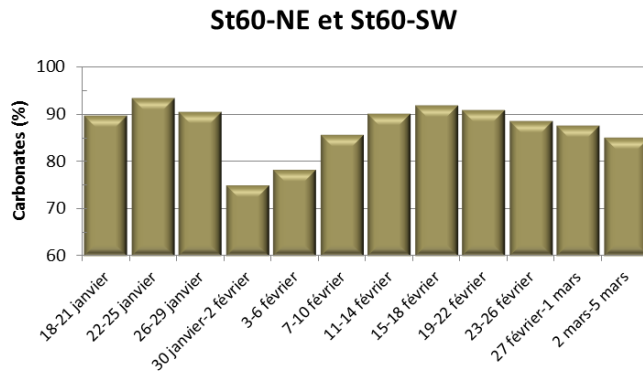


Figure 37 : Evolution type des teneurs en carbonates dans les particules collectées par les pièges séquentiels mouillés dans le Canal de la Havannah (e.g : campagne janvier 2012, St60-SW et St60-NE).

(4) Composition géochimique

Globalement, les éléments analysés dans les MES collectées au niveau du diffuseur ont logiquement permis de mettre en évidence une influence marine très marquée (Ca). Toutefois, les apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) sont décelables, mais à des niveaux de concentrations respectifs bien moindres que dans les MES de la Baie Kwé.

Globalement, les concentrations obtenues pour les différents prélèvements séquentiels peuvent montrer une variation maximale, pour ces 4 campagnes, de l'ordre de 50% (pour le calcium) à 470 % (pour le manganèse ; Tableau 10), ces variations étant toujours plus élevées en saison chaude qu'en saison fraîche.

La matrice de corrélation (Tableau 11) ne permet de dégager aucune similarité significative entre les 5 métaux (Coefficient de Pearson > 0,95).

Il doit être rappelé qu'une seule corrélation significative au seuil de similarité de 0,95 avait été mise en évidence pour les campagnes de janvier-février 2012 et 2013 pour Cr et Fe à la station St60-NE. Cette statistique démontre clairement que l'influence des apports terrigènes n'est pas prépondérante dans ce secteur du Canal de la Havannah.

Par ailleurs, dans le Canal, la normalisation moyenne des concentrations du calcium par le fer oscille entre 11,7 et 31,3 et montre de ce fait que les apports terrigènes sont extrêmement faibles.

Tableau 10 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah pour les 4 campagnes (Station St60NE et St60SW ; n=84).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	253 561	8	327	9 515	109	165
MAX	373 441	44	1 009	30 345	618	601
MOYENNE	310 586	24	652	20 697	220	392
ECART-TYPE	11 634	5	53	1 939	51	53
% RSD	4%	20%	8%	9%	18%	12%

Tableau 11 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations (seuil de similarité >0,95) des 5 métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah pour les 4 campagnes (Station St60-NE et St60SW ; n= 84).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,099	1				
Cr	-0,019	0,363	1			
Fe	-0,313	0,619	0,795	1		
Mn	-0,027	0,707	0,460	0,462	1	
Ni	-0,145	0,695	0,670	0,807	0,600	1

D'un point de vue temporel, la variabilité du ratio Ca/Fe est faible et il ne diffère pas fortement selon les saisons, même si effectivement, l'impact terrigène semble plus marqué pendant la saison chaude (Tableau 12). Si ces observations démontrent que l'impact des apports terrigènes demeure modéré dans cette zone, quelle que soit la saison, il apparaît toutefois assez clairement que les apports en particules latéritiques riches en métaux tendent à augmenter depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007 (Tableau 12).

Tableau 12 : Evolution temporelle moyenne du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau des stations St60-NE et St60-SW pour les 4 campagnes (n=96). Comparaison avec les résultats de l'état de référence de février-mars 2007 (n=36)

Ca/Fe	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	Fev-mar-2007*
Moyenne	11,8	18,2	14,1	31,3	29,5
Ecart-type	1,1	1,95	1,7	1,1	6,9

(*) : Définition de l'état de référence

II.2.2. Calcul des flux de matières

II.2.2.a. Matière en suspension

Les valeurs moyennes et écart-types des flux de particules ont été calculés sur la base des 4 campagnes réalisées entre juillet 2011 et janvier 2013 pour les deux ensembles, Baie Kwé et Canal de la Havannah. Une approche similaire a été également réalisée à partir des résultats issus de la définition de l'Etat de Référence de 2007 à des fins de comparaison (Tableau 13).

Pour la Baie Kwé, entre juillet 2011 et janvier 2013, les flux moyens de MES ont été compris entre 27,1 ±30,0 et 46,2 ±9,5 g/m²/j. Ces valeurs mettent en évidence une très grande variabilité temporelle des flux mais aussi une périodicité dans leur intensité entre les saisons fraîches et chaudes ; durant ces dernières les flux étant bien plus élevés qu'en saison fraîche (Tableau 13). Par ailleurs, si aucun accroissement des flux de matière particulaire n'est clairement établi entre les saisons fraîches de 2011 à 2013, une tendance à l'augmentation, bien exprimée seulement à partir de « janvier-février 2013 », paraît tout de même se dessiner entre les saisons chaudes. Ce constat est étayé par les valeurs de flux mesurées, notamment en mars 2007 (état de référence de la saison chaude) qui conduit à devoir prendre en considération la progression continue du flux (mars 2007, janvier 2012 et janvier 2013 ; Tableau 13).

Pour le Canal de la Havannah, entre juillet 2011 et janvier 2013, les flux ont été compris entre 3,5 ±3,0 et 12,7 ±15,4 g/m²/j (Tableau 13). Comme pour la Baie Kwé, une périodicité des intensités apparaît montrant clairement que les apports sont au moins 2 fois plus importants en saison chaude qu'en saison fraîche. Par ailleurs, les valeurs observées en février 2007 semblent exceptionnellement

élevées, alors que les résultats de la campagne de novembre 2007 sont dans l'ordre de grandeur actuel. Toutefois, hormis en février 2007, dans le Canal de la Havannah, bien que de bien moindre importance par rapport à la Baie Kwé, les valeurs de flux moyennes suivent une tendance à la hausse d'une saison froide/chaude à l'autre, comme en Baie Kwé.

Tableau 13 : Valeurs moyennes et écart-types des densités de flux en matière particulaire au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah). Valeurs calculées pour l'ensemble des 4 campagnes de juillet 2011 à janvier 2013 ; comparaison des valeurs obtenues avec celles mesurées en 2006 et 2007 pour la définition de l'Etat de Référence aux stations St06-KW1 pour la Baie Kwé et T4B, T4C et TCM pour le Canal de la Havannah (Fernandez et al., 2007).

Baie Kwé (St06-KW1)

	nov-06	mars-07	juil-11	janv-12	sept-12	janv-13
Moyenne (g/m ² /j)	14,6	28,3	27,1	39,5	26,4	46,5
Ecart-type	7,4	9,2	30,0	33,2	13,1	29,5
Masse sédimentée (g/m ²)	700	1132	1299	1894	1267	2231

Canal de la Havannah (St60-NE et St60-SW)

	févr-07	nov-07	juil-11	janv-12	sept-12	janv-13
Moyenne (g/m ² /j)	26,4	7,8	3,5	10,1	4,9	12,7
Ecart-type	33,2	7,7	3,0	9,6	6,5	15,4
Masse sédimentée (g/m ²)	527	366	167	483	233	611

II.2.2.b. Eléments métalliques et calcium

Pour la Baie Kwé, les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux ont augmenté entre 2011 et 2013. En effet, si les valeurs maximales sont restées du même ordre de grandeur, les minimales ont fortement progressé puisqu'entre juillet-août 2011 (1^{ère} campagne) et janvier-février 2013 (4^{ème} campagne) le bruit de fond géochimique moyen a été multiplié par un facteur de 4,5 (Tableau 14). Cette augmentation est explicitée par **l'accroissement régulier des flux de matière terrigène particulaire de faible diamètre**, donc de plus forte concentration spécifique en métaux ; ces apports étant liés au débit solide du creek Kwé.

Il est à noter que le flux minimal de métaux mesuré lors de la première campagne (juillet-août 2011) était du même ordre de grandeur que celui observé lors de la définition de l'Etat de Référence (Tableau 15 et Figure 38), à contrario, les valeurs maximales étant déjà très différentes.

Pour le Canal de la Havannah, une augmentation moyenne des densités de flux en métaux est également observée entre 2011 et 2013 (Tableau 15 et Figure 38). Cependant et contrairement aux observations effectuées pour la Baie Kwé, l'accroissement des valeurs minimales, qui constituent le bruit de fond géochimique, ne semble pas être la raison principale, les masses d'eau étant cycliquement renouvelées par les courants provenant de la Passe de la Havannah. Il faut probablement rechercher la cause dans l'augmentation de la fréquence plus élevée des épisodes d'apports importants qui prennent naissance dans la Baie Kwé.

En effet, il s'agit probablement de néphéloïdes générés par la resuspension des particules de « premier dépôt » dans la Baie Kwé où le taux de sédimentation (envasement) a progressé assez nettement. Régulièrement, ces dépôts sont soumis à l'action mécanique de la houle engendrée par les différents régimes de vents de S (seuls capables de remobiliser fortement les sédiments). Les particules sont ensuite transportées vers le Canal où elles suivent les courants dominants.

Les flux moyens en métaux ont été calculés pour chaque campagne de 48 jours de collecte ; leur évolution temporelle peut être illustrée par le cas du nickel (Figure 38). Celui-ci montre clairement que pour la Baie Kwé, et le Canal de la Havannah, l'augmentation des flux est notable, dès janvier-février 2012 ; en saison fraîche, l'accroissement étant nettement de moindre intensité. Dans le Canal de la Havannah, si le phénomène est globalement identique avec une forte augmentation constatée en janvier 2013, l'évolution se singularise par une valeur très forte en mars 2007 ; cette valeur qui est unique, conduit à rester prudent sur cette apparente augmentation dans le Canal.

Tableau 14 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah).

ST06-KW1		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison fraîche juillet-août 2011	Minimum	1 283	0,4	14,6	409	3,5	7,4
	Maximum	24 519	11,4	392,8	10 460	94,5	185,8
Saison chaude janvier-février 2012	Minimum	2 501	1,0	31,8	999	7,5	18,0
	Maximum	29 794	14,6	492,5	14 378	118,8	267,1
Saison fraîche sept-octobre 2012	Minimum	4 125	1,6	57,1	1 648	12,4	25,9
	Maximum	15 490	6,1	219,0	6 531	50,9	110,6
Saison chaude janvier-février 2013	Minimum	3 145	1,9	68,9	1 805	15,2	33,1
	Maximum	25 147	12,8	478,5	12 630	116,4	228,6

ST60-NE+ST60-SW		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (MG/M ² /J)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison fraîche juillet-août 2011	Minimum	122	0,01	0,17	5,4	0,08	0,14
	Maximum	3 732	0,16	5,03	156,9	1,59	2,74
Saison chaude janvier-février 2012	Minimum	314	0,03	0,7	22	0,20	0,46
	Maximum	9 543	0,93	21,4	736	9,16	13,38
Saison fraîche sept-octobre 2012	Minimum	1564	0,08	3,0	90	0,8	1,5
	Maximum	15490	6,09	219,0	6531	50,9	110,6
Saison chaude janvier-février 2013	Minimum	152	0,14	0,6	16	0,1	0,3
	Maximum	16 479	1,05	43,8	1 364	14,3	24,6

Tableau 15 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), T4B et T4C (Canal de la Havannah) obtenues lors de la phase de définition de l'Etat de Référence (2007-2008).

ST06-KW1		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison fraîche nov-déc 2006	Minimum	1 781	0,3	11,8	515	0,9	8,6
	Maximum	8 957	1,5	63,4	2 739	6,3	45,8
Saison chaude mars-avril 2007	Minimum	4 953	0,6	25,2	1 105	1,1	18,7
	Maximum	1 1267	1,5	67,1	2 927	7,1	49,5

T4C ET T4B		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison chaude Février/mars 2007	Minimum	2 057	1,30	0,17	106	13,1	1,6
	Maximum	42 564	1,39	0,97	1700	13,8	26,7
Saison fraîche nov-dec 2007	Minimum	611	0,25	0,05	26	-	0,4
	Maximum	8 418	0,51	9,14	540	-	11,0

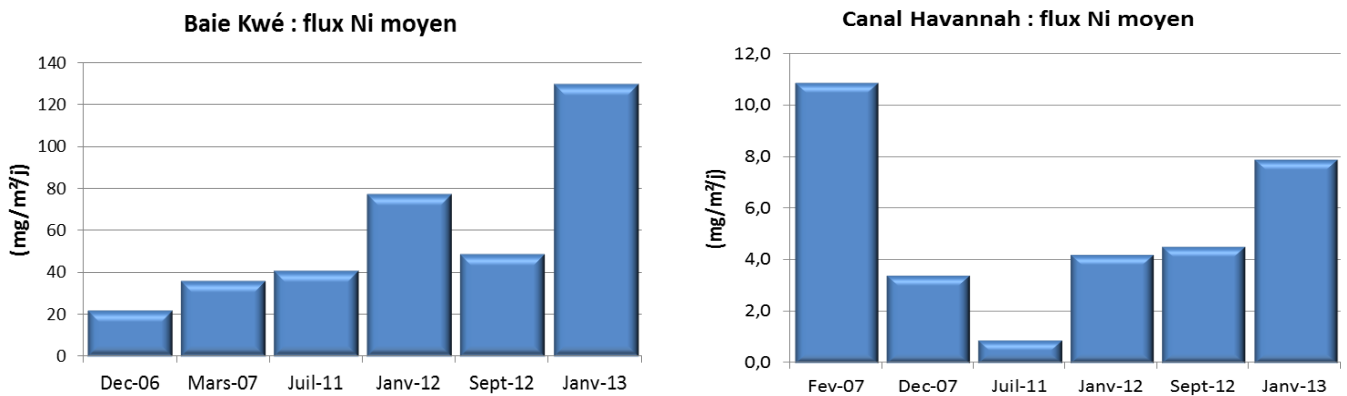


Figure 38 : Evolution temporelle des flux de nickel moyens ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$) mesurés au niveau de la station St06-KW1 pour la Baie Kwé et des stations St60-NE + St60-SW dans le Canal de la Havannah depuis juillet 2011 et comparaison avec les valeurs observées en 2006/2007 (Etat de Référence).

II.2.3. Conclusion

La distribution des MES dans les eaux, tant en Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah, est grandement régie par l'action mécanique de la houle sur les fonds envasés par les charges particulaires véhiculées par le creek Kwé. Ce mécanisme est généré par les vents et ce facteur se combine aux effets de la lixiviation des bassins versants par les épisodes pluvieux de plus ou moins forte intensité.

En effet, seuls les régimes d'un large secteur S et d'une certaine intensité sont susceptibles de remettre en suspension les particules sédimentées à l'embouchure et le long de la frange littorale de la baie jusqu'à une profondeur de 10 m, ce mécanisme concernant essentiellement la Baie Kwé mais également la ligne de côte du Canal. Par ailleurs, les vitesses des vents supérieures à 15 m/s entraînent aussi la remise en suspension des particules carbonatées de plus fort diamètre, provenant de l'altération du platier récifal. Une fraction de toutes ces particules suit ensuite les courants dominants vers le secteur W du Canal de la Havannah.

Dans le Canal, l'alimentation en particules quasi exclusivement carbonatées, coïncide avec les vents de secteurs E mais également SW qui balayent l'important système récifal de cette partie du lagon sud.

Les valeurs de flux de matière particulaire et de métaux entrent toutes dans les gammes observées antérieurement en saison chaude bien qu'une augmentation globale soit perceptible en 2012 et 2013 ; à saison équivalente, **ces flux de métaux sont quasiment tous nettement supérieurs** par rapport aux valeurs obtenues lors de la définition de l'Etat de Référence de 2007, en Baie Kwé comme dans le Canal de la Havannah.

A ce stade de l'activité industrielle, aucune trace d'enrichissement anormal en calcium, manganèse ou en soufre (signatures potentielles du rejet) dans les MES collectées aux stations St60-NE et/ou St60-SW ne permet de déceler l'influence de l'effluent (présence de gypse et/ou d'oxy-hydroxydes de Mn).

II.3. Suivi géochimique des sédiments

Si les effets mécaniques de l'hyper-sédimentation sont mesurables immédiatement, les modifications de leur composition géochimique, notamment en éléments métalliques peuvent avoir des conséquences en termes de contamination des écosystèmes benthiques. Au-delà des déséquilibres écologiques que ces apports peuvent induire, la contamination d'organismes marins dont certains sont consommés par l'homme, est à considérer. Le suivi physico-chimique des sédiments est donc, à ce titre, un outil de surveillance précoce des contaminations potentielles.

La compilation des résultats du **suiti sédimentaire triennal** prend en compte l'information acquise lors des premières campagnes de suivi de 2009 et 2012 consécutives à la définition de l'« état de référence » de 2006 réalisée sur 18 stations pour le Canal de la Havannah et la Baie Kwé.

Le suivi porte sur 13 stations telles que définies dans l'arrêté ICPE-2008 de la province Sud (Figure 39) sur lesquelles les prélèvements de sédiments de surface ont été réalisés. Une 14^{ème} station (St21, Ugo) a récemment été rajoutée à la demande de Vale-NC pour compléter le réseau de surveillance au large de l'île Ouen.

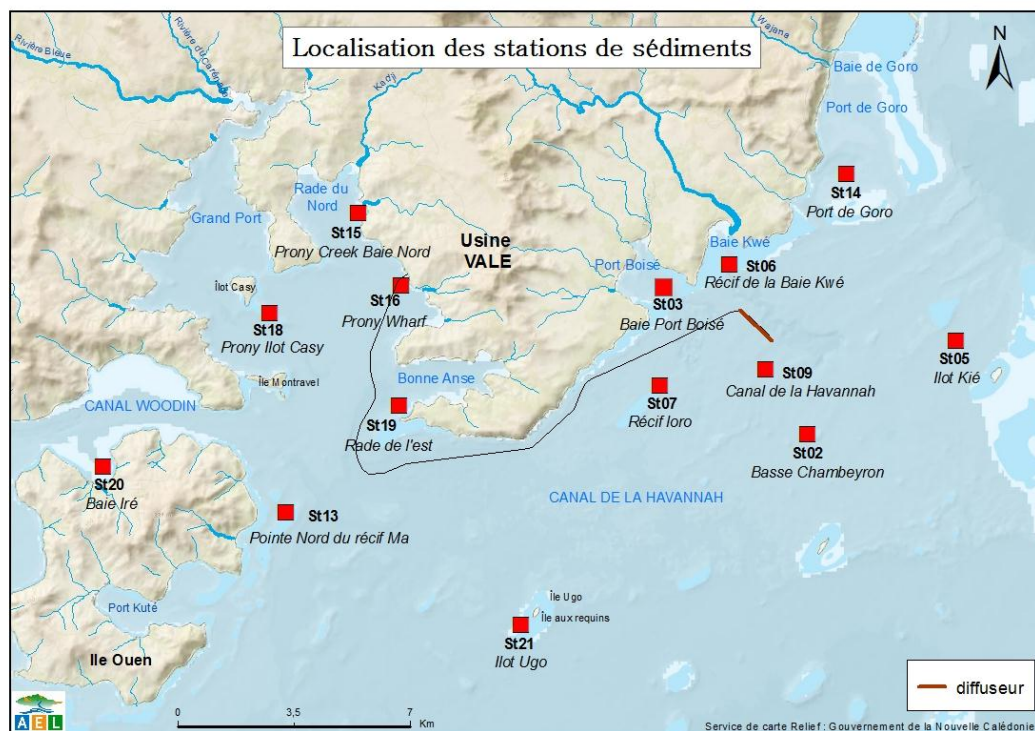


Figure 39 : Localisation géographique des 14 stations d'échantillonnage des fonds sédimentaires.

Les principaux paramètres sédimentologiques et géochimiques pris en compte sont :

- la granulométrie et les fractions pélitiques ;
- la distribution spatiale de la minéralogie ;
- la teneur en métaux des 4 fractions géochimiques constitutives des dépôts (phase organique, phase carbonatée, phase oxy-hydroxydée et phase résiduelle).

Pour chaque phase géochimique, les analyses portent sur les 6 métaux d'intérêt que sont : Co, Cr, Fe, Mn, Ni et Zn.

II.3.1. Sédimentologique

II.3.1.a. Distribution des pélites

Comme défini dans l'« état de référence », les baies (Prony, Kwé) et le pourtour de l'île Ouen sont presque entièrement composés de fractions fines dont le diamètre des grains est inférieur à 40 µm (pélites ≥ 80%, Tableau 16). Dans le Canal de la Havannah la situation est assez contrastée en liaison directe avec la diversité des conditions hydrodynamiques régnantes localement. En effet, dans la zone du diffuseur (St09) et plus au large, les courants ne favorisent pas, voire interdisent (St05 Ilot Kié) le dépôt des fractions fines pélitiques alors que les baies (eg : St03 Port Boisé et Port St14 Goro) renferment majoritairement des sédiments fins.

A l'exception de la Baie Kwé, la fraction pélitique de l'ensemble du domaine est plus importante dans les sédiments prélevés en 2009. En réalité, pour certains secteurs (St03, St07 et St14), la nette augmentation qui est observée s'explique par le repositionnement des stations de prélèvement en 2008 vers des aires plus abritées choisies, en 2008, pour leur propension potentielle à piéger les particules fines riches en métaux et assurer ainsi un meilleur suivi des impacts.

Pour la station St15, localisée dans la Rade Nord, l'anthropisation du bassin versant du Creek de la Rade Nord, c'est-à-dire l'accroissement des opérations de terrassement nécessaires à l'implantation de l'usine, est probablement l'explication de cette augmentation.

Pour les autres stations, les augmentations sont probablement à rechercher dans la variabilité importante des sédiments due en grande partie à l'hydrodynamique qui permet à des poches de sédimentation d'extension variables de se développer à l'abri d'obstacles naturels. A cette difficulté de localisation, pour bon nombre de ces stations des difficultés d'échantillonnage s'ajoutent en raison des courants régnants, comme notamment le Canal de la Havannah, lorsque les profondeurs sont supérieures à 20m.

Tableau 16 : Teneur en fraction pélitique (< 40µm) des sédiments échantillonnés dans le domaine d'étude ; (nd) = présence de matériel sédimentaire en quantité insuffisante. (st) = station inexistante.

% PELITES	Stations	localisation	2006	2009	2012
Baie de Prony	St15	Creek Baie Nord	72,3	98	83,4
	St16	Prony Warf	56,2	97,8	78,5
	St18	Ilot Casy	9	nd	2,6
	St19	Rade de l'Est	st	79,3	50,1
Ile Ouen / Canal Woodin	St20	Baie Iré	st	41,3	30,5
	St13	Pointe Nord du récif Ma	47,9	58,1	36,3
Canal de la Havannah	St02	Basse Chambeyron	1,2	9,8	0,2
	St03	Baie de Port Boisé	0,6	70,6	34,6
	St05	Ilot Kié	5,7	nd	nd
	St06	Récif de la baie Kwé	48,6	39	16,9
	St07	Récif loro	26,5	65,3	38
	St09	Canal de la Havannah	2,7	13,6	nd
	St14	Port de Goro	0,6	27	23
	St21	Ilot Ugo	st	st	5,9

II.3.1.b. Minéralogie des sédiments de surface

Les distributions minéralogiques décrites dans les sédiments prélevés en 2009 et 2012 n'ont pas subi d'évolution notable par rapport à la campagne de 2006.

Les minéraux identifiés ont été : l'aragonite, la calcite, la calcite magnésienne, la goethite et la kaolinite.

CANAL DE LA HAVANNAH

Dans la Canal, l'ensemble des minéraux ci-dessus énumérés a été décelé. Toutefois, ces minéraux ne sont pas tous présents dans toutes les stations. Ainsi, les sédiments des stations St02 et St21 qui sont situées au large dans le Canal de la Havannah, sont exclusivement composés de minéraux carbonatés comme la calcite magnésienne qui est amplement majoritaire. Les analyses montrent aussi la présence de calcite et d'aragonite.

Les stations St07 et St14, localisées dans des aires de mélange des eaux, respectivement loro et Port Goro, recèlent des traces infimes de goethite ; les minéraux carbonatés demeurant très bien représentés et majoritaires.

Les proportions de goethite augmentent sensiblement au fur et à mesure que les stations sont proches de la côte. Ainsi, pour St03 (Port Boisé) et St06 (Baie Kwé), l'influence terrigène devient sensible à notable, respectivement. Cependant, la calcite magnésienne reste le minéral prédominant.

Pour les stations St05 et St09, aucune analyse n'a pu être conduite par manque de sédiment meuble récolté.

ILE OUEN/CANAL WOODIN

Pour les deux stations localisées à proximité de l'île Ouen, des niveaux de goethite ont été décelés. Les minéraux majoritaires restent la calcite magnésienne, qui est le principal composant carbonaté, ainsi que la calcite et l'aragonite.

BAIE DU PRONY

Dans cette baie, les compositions sont très contrastées. Ainsi, à la station St18 (Ilo Casy), aucune présence de goethite n'est décelable, les minéraux composant les sédiments étant exclusivement carbonatés ; calcite magnésienne en majorité, suivie de la calcite et de l'aragonite.

Plus près de la côte, les sédiments de la station St19 permettent de mesurer des quantités notables de goethite, le reste des minéraux étant bien entendu de nature carbonatée. Enfin, directement influencées par les creek des rades du Nord et de l'Est, respectivement, les stations St15 et St16 montrent de grandes quantités de goethite.

La station (St16) contient plus de calcite magnésienne que la station (St15) sous influence du Creek de la Nord.

II.3.2. Comparaison des concentrations en métaux

II.3.2.a. Distribution générale

Les métaux liés à la phase organique ne suivent pas de distribution spatiale régie par la distance à la côte (phénomène de dilution particulière). Toutefois, les valeurs sont maximales le long d'une frange côtière sans que celle-ci influe de manière identique sur les niveaux de concentration des métaux.

Les phases carbonatées des métaux ont permis de mettre en évidence une distribution spatiale qui globalement suit un gradient de décroissance des concentrations en fonction de la distance à la côte. Cependant, les différents termes sources terrigènes n'exercent pas des pressions identiques, notamment la Kwé et le Creek de la Rade Nord ; le bassin versant de ce dernier s'avérant prépondérant pour les apports en Co, Cr, Mn et Ni.

En ce qui concerne les métaux liés aux oxy-hydroxydes de fer, les niveaux de concentration des métaux sont faibles et une seule source avérée (Creek de la Rade Nord) est mise en évidence ; la Baie Iré montrant aussi des teneurs notables. La distribution s'effectue selon un fort gradient côte-large.

Tous les métaux constitutifs de la matrice géochimique des latérites montrent un remarquable gradient de concentrations en fonction de la distance aux termes sources. Le Creek de la Rade Nord est le principal vecteur identifié ; la Kwé ainsi que les creeks qui alimentent les baies de Port Boisé et Iré sont autant de sources secondaires à prendre en compte.

II.3.2.b. Distribution aux 3 stations sentinelles (St06, St15 et St16)

Les résultats d'analyses des 3 campagnes triennales (2006, 2009 et 2012) sont, pour les éléments Co, Cr, Fe, Mn et Ni, ici compilés pour les stations sentinelles St06, St15 et St16.

Les analyses en métaux totaux réalisées depuis 2012 (Tableau 17) montrent que les concentrations en Co et Mn sont remarquablement constantes dans le temps pour les 3 stations sentinelles ; respectivement les variations sont comprises entre 4% (St15) à 13% (St06) et de 1% (St06) à 12% (St15).

Les écarts de concentrations sont un peu plus importants pour Fe (28% en St15 à 36% en St16) et Ni (15% en St15 et 24% en St06) que pour le chrome (Cr), celui-ci montrant la dispersion la plus importante (27% en St06 à 42% en St16). Ces résultats reflètent la variabilité naturelle des sédiments mais peuvent aussi, notamment au niveau des embouchures de certains creeks, exprimer des changements dans la nature des apports particuliers.

La concentration totale de chaque métal se distribue de manière inégale dans les 4 différentes phases géochimiques attaquées ; la quantité de métal pour chaque phase étant liée au comportement géochimique du métal, c'est-à-dire en fonction de ses capacités à se solubiliser puis à se recombinaison avec d'autres composés.

L'étude des concentrations des principaux traceurs terrigènes (Co, Cr et Ni) permet de suivre les évolutions temporelles des pressions au niveau des stations sentinelles localisées à proximité des deux termes sources de matériel particulaire prépondérants que sont le Creek de la Rade Nord (St15) et la Creek Kwé (St06).

Tableau 17 : Concentrations totales Co, Cr, Fe, Mn et Ni pour les sédiments de surface des 3 stations sentinelles (St06, St15 et St16) ; valeurs moyennes, écart-types et % de variation pour les concentrations 2006, 2009 et 2012.

	Stations	Moyenne 2006 à 2012	Ecart-type	% Variation
Cobalt	St06	78	10	13
	St15	269	10	4
	St16	90	5	6
Chrome	St06	2715	741	27
	St15	12954	3765	29
	St16	2938	1241	42
Fer	St06	86106	26220	30
	St15	287954	81862	28
	St16	83674	30087	36
Manganèse	St06	667	10	1
	St15	2404	290	12
	St16	795	54	7
Nickel	St06	1254	305	24
	St15	3619	558	15
	St16	1163	275	22

COBALT (Figure 40)

La phase organique de la station St06, montre des concentrations en Co en diminution d'un facteur 10 entre 2006/2009 et 2012, une baisse tout aussi remarquable est observée pour les sédiments de la station St15 ([Co] < LQ). Pour cette dernière, en particulier, la différence peut en partie être imputée au positionnement de la station de prélèvement qui est localisée au pied du talus deltaïque du Creek de la Rade Nord où la nature des sédiments varie beaucoup en raison des effets de crues ; la matière organique étant peu dense, sa propension à être transportée vers le large est forte.

Au niveau du prisme deltaïque de la Rade Nord (St15), les concentrations dans la phase carbonatée sont relativement constantes. Cette tendance s'étend à la répartition des formes oxy-hydroxydées du métal. A l'inverse, en Baie Kwé (St06), une progression notable des formes carbonatées semble se dessiner depuis les deux dernières campagnes du suivi sédimentologique (2009 et 2012), cette augmentation concerne également la formation des oxy-hydroxydes de cobalt. Dans ces deux cas, les concentrations en Co ont été multipliées par un facteur 10 environ.

Les formes résiduelles qui représentent plus de 90% de la concentration totale, montrent une très légère progression en 2012, à peine plus sensible pour St06 que pour St15.

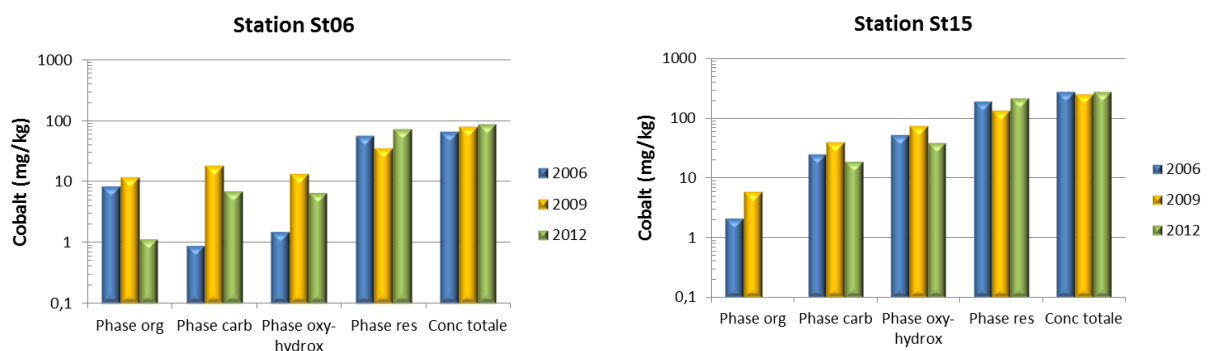


Figure 40 : Concentrations en Co dans les 4 différentes phases géochimiques : évolutions temporelles 2006, 2009 et 2012 pour les stations sentinelles St06 (Baie Kwé) et St15 (Creek de la rade Nord).

CHROME (Figure 41)

Le chrome dans la phase organique montre une variabilité interannuelle de faible amplitude pour les sédiments de la station St06. A l'inverse, celle-ci est en forte progression depuis plusieurs années au niveau de la station St15 où, d'une manière globale, les concentrations sont actuellement près de 40 fois celles mesurées en 2006.

Pour la phase carbonatée, comme pour le cobalt, les concentrations semblent avoir progressé depuis 2006. Cet accroissement s'est matérialisé de manière moins claire en Rade Nord qu'en Baie Kwé même si, dans cette dernière, les niveaux de concentrations sont plus faibles d'un facteur 5 environ.

Un schéma comparable est observable pour les formes du chrome lié aux phases oxy-hydroxydées, là encore, de manière plus nette dans les sédiments de la Baie Kwé, mais aussi à des niveaux de concentrations 5 fois inférieurs en moyenne.

En ce qui concerne les fractions du chrome liées aux phases résiduelles, celles-ci demeurent assez constantes dans le temps. Le chrome, généralement présent dans les produits d'altération est sous la forme de chromite, minéral de forte densité qui sédimente rapidement et ne se retrouve que rarement dans les sédiments exportés dans le Canal.

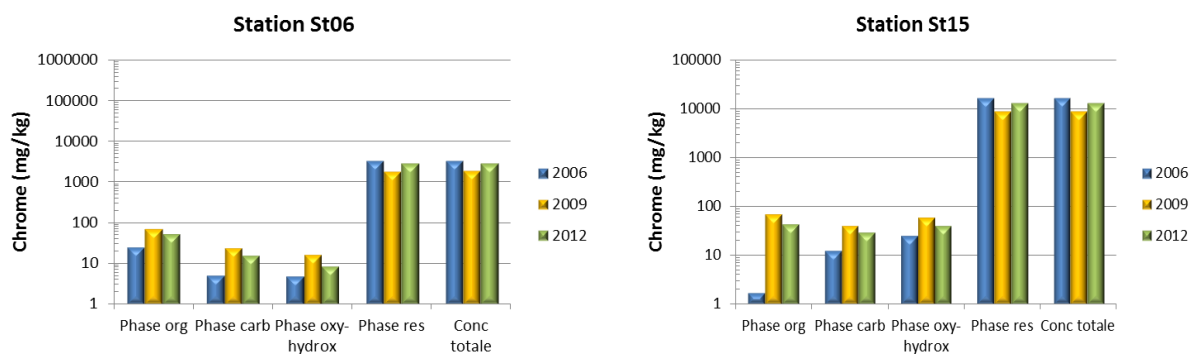


Figure 41 : Concentrations en Cr dans les 4 différentes phases géochimiques : évolutions temporelles 2006, 2009 et 2012 pour les stations sentinelles St06 (Baie Kwé) et St15 (Creek de la rade Nord).

NICKEL (Figure 42)

Pour 2012, le nickel extrait de la phase organique des sédiments montre des concentrations en limite de détection (<1 mg/kg), contrairement aux mesures réalisées en 2006 et 2009 où il dépassait les 10 mg/kg. Cette observation concerne les sédiments de la Baie Kwé comme ceux de la Rade Nord. Tout comme pour le cobalt, la variabilité sédimentaire peut, là aussi, constituer un facteur explicatif de ces résultats.

En ce qui concerne les formes carbonatées, le nickel est moins concentré dans les sédiments de la Baie Kwé que dans ceux de la Rade Nord. Cette répartition est probablement à relier, d'une part, aux effets de dilution particulière des apports terrigènes, la Baie Kwé étant un milieu plus carbonaté que la rade et d'autre part à la quantité plus importante de nickel dissous exporté par les eaux du Creek de la Rade Nord.

Les oxy-hydroxydes de nickel sont en concentrations relativement constantes depuis 2006, tant pour les sédiments de la Baie Kwé (St06) que du Creek de la Rade Nord (St15) ; les phases résiduelles ne

montrent pas non plus, une grande variabilité temporelle.

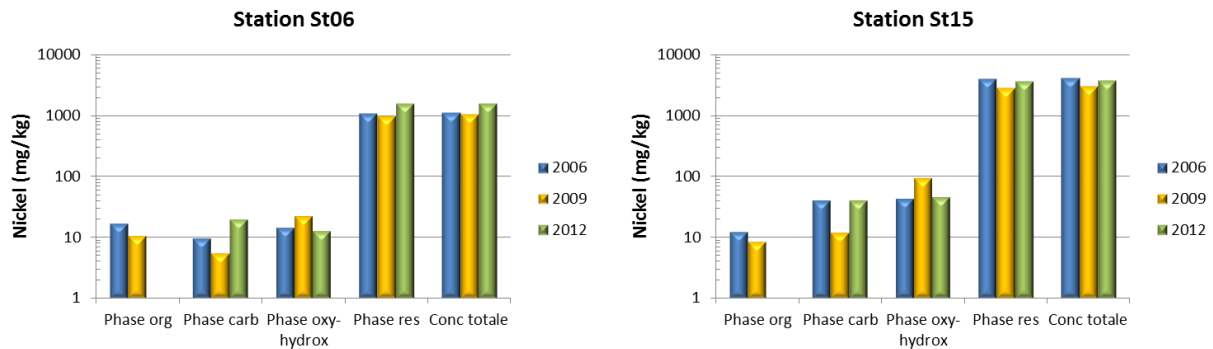


Figure 42 : Concentrations en Ni dans les 4 différentes phases géochimiques : évolutions temporelles 2006, 2009 et 2012 pour les stations sentinelles St06 (Baie Kwé) et St15 (Creek de la rade Nord).

II.3.3. Conclusion

A l'issue de cette deuxième campagne de suivi de la qualité des sédiments, il apparaît que :

- la granulométrie des sédiments n'a pas évolué de manière probante dans l'ensemble des stations entre 2009 et 2012, à l'exception de St06. Les minéraux carbonatés dominent la composition des 12/14 échantillons de sédiments prélevés dans la zone d'études ; la goethite, minéral issu de l'altération des latérites, étant décelable sur un nombre limité de stations proches des sources d'apports terrigènes uniquement ;
- les métaux de la phase organique ne se distribuent pas selon un gradient « côte-large » même si les valeurs sont maximales le long d'une frange côtière ;
- à l'inverse, les métaux analysés dans la phase carbonatée mettent en évidence une distribution spatiale qui globalement suit un gradient de décroissance des concentrations en fonction de la distance à la côte. Cependant, les différents termes sources terrigènes n'exercent pas des pressions identiques, notamment la Kwé et le Creek de la Rade Nord ; le bassin versant de ce dernier s'avérant prépondérant pour les apports en Co, Cr, Mn et Ni dissous ;
- tous les métaux constitutifs des phases oxy-hydroxydées et résiduelles montrent une excellente relation de décroissance des concentrations en fonction de la distance aux termes sources. Le Creek de la Rade Nord est le principal vecteur identifié des métaux terrigènes.

Les résultats d'analyses ont permis de calculer les ratios de concentrations normalisées avec le fer pour les stations St06 et St15. Cette technique de calcul permet de suivre l'évolution de la nature des apports dans le temps et l'espace (Fernandez et al., 2006 ; Debenay et Fernandez, 2009), (Tableau 18).

Pour ces 2 stations, le ratio demeure remarquablement constant pour Cr. A l'inverse pour Ni, voire Co, les ratios montrent une nette tendance à la réduction relative des quantités de fer dans les sédiments. Pour Co et Mn, les ratios traduisent une forte réduction des concentrations relatives en fer suivie, en 2012 d'une sensible augmentation ; ces variations sont du même ordre de grandeur à la Baie Kwé (St06) et dans la Rade Nord (St15).

Bien que de moindre ampleur, des modifications semblent également concerner les sédiments de la station St15 (Creek de la Rade Nord) pourtant normalement moins sujets à une variation de leur nature en raison de l'absence de front de mine sur ce petit bassin versant.

Tableau 18 : Normalisation des concentrations de Co, Cr, Mn et Ni par rapport au fer pour les 4 phases géochimiques des pélites constitutives des sédiments aux stations St06 et St15 des campagnes 2006 et 2009.

Station	Année	(Co/Fe) ⁻¹	(Cr/Fe) ⁻¹	(Mn/Fe) ⁻¹	(Ni/Fe) ⁻¹
St06 (Baie Kwé)	2006	1682	34	171	101
	2009	759	32	90	58
	2012	987	29	127	53
St15 (CRN)	2006	1390	23	154	93
	2009	894	25	87	76
	2012	921	19	121	68

II.4. Suivi des taux d'accumulation des sédiments

Le suivi porte sur 2 stations (St06, Baie Kwé et St15, Creek de la Rade Nord) telles que définies dans l'arrêté ICPE-2008 de la province Sud (Figure 43). Deux autres stations pour le suivi des taux d'accumulation (St13 et St16) ont récemment été rajoutées à la demande de Vale-NC pour compléter le réseau de surveillance au large de l'île Ouen et au droit du port de commerce.

La compilation des résultats du **sui**vi des **taux d'accumulation triennal** des émissaires naturels (St06 et St15) prend en compte l'information acquise lors de la première campagne de suivi de 2010, consécutive à la définition de l'état de référence de 2007.

L'état de référence de la station St13 (île Ouen), n'a été réalisé qu'en 2010.

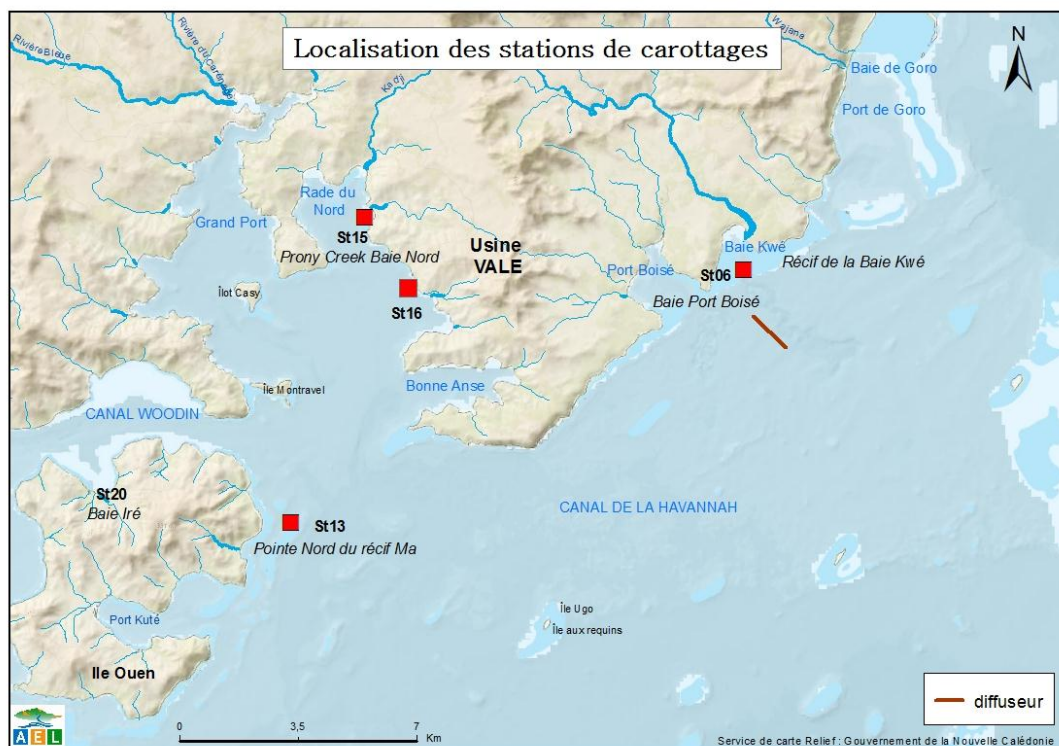


Figure 43 : Carte de localisation des stations de prélèvement de carottes sédimentaires pour le suivi des taux d'accumulation. Le trait bistre schématise la position du diffuseur.

Les résultats relatifs à la station du port de commerce de la Baie du Prony (St16) fait l'objet d'un **sui**vi **triennal** depuis 2011, date à laquelle l'état de référence a été défini.

La seconde campagne de suivi a été programmée en 2013 ; les échantillons sont actuellement encore en cours de traitement.

Les analyses sédimentologiques ont été effectuées sur les fractions brutes de chaque horizon sédimentaire afin de déterminer les paramètres comme les densités, la composition en pélites ou en carbonates ainsi que la granulométrie et les spectrométries du ^{210}Pb . La concentration des métaux totaux a été réalisée sur les fractions fines (pélites = particules de diamètre inférieur à 40 μm).

II.4.1. Carotte St15 (Rade du Nord)

L'importante variabilité des taux de pélites et des concentrations en métaux prouve que le dépôt sédimentaire résulte d'événements événementiels, à répétition. Cependant malgré ces fluctuations notables, du bas de la carotte jusqu'à l'horizon 12-14 cm, s'observe une tendance nette à l'accroissement de la teneur en particules fines au cours du temps. Cet accroissement s'accompagne d'une modification dans la nature du matériel particulaire déposé, comme l'indique l'évolution minéralogique : présence d'hématite dans les couches les plus anciennes, substituée progressivement par de la lizardite dans les horizons récents. Globalement, ces minéraux reflètent l'évolution des apports générés par le lessivage des sols plus ou moins remaniés ; dans une première phase, des particules de tailles diverses sont mobilisées, phénomène qui va en s'épuisant dans le temps pour ne transporter majoritairement plus que le matériel de faible diamètre.

Globalement pour la carotte St15, l'ensemble des paramètres géochimiques permet de dégager la chronologie suivante, en dépit de la possibilité de datation compte tenu du profil discontinu du ^{210}Pb dans les couches récentes :

- Du bas de la carotte jusqu'à la cote 28 cm environ, la diminution des concentrations en calcium biogène (CaCO_3) reflète une nette décroissance de l'influence marine au cours du temps. Cette atténuation s'accompagne d'une augmentation des concentrations de certains métaux marqueurs des apports terrigènes, comme le cobalt, le fer (hématite), voire le chrome.
- Des cotes 28 cm à 15 cm, on observe une phase d'inversion complète des influences marines. Cette augmentation s'accompagne d'une diminution des apports en métaux terrigènes comme le cobalt, le nickel, le fer ou le manganèse. L'augmentation de la fraction pélitique des sédiments est dans ce cas attribuable aux altérations de carbonates biogènes.
- Des cotes 15 cm à 5 cm environ, les sédiments sont caractérisés par une radioactivité anormalement décroissante vers les couches les plus récentes (Figure 44). Cette décroissance est à relier à des phénomènes de dilution isotopique générés par des apports en matériel particulaire pauvre en ^{210}Pb atmosphérique. Cet apport peut correspondre avec la mise en place brusque d'une grande quantité de matériel particulaire appauvri en ^{210}Pb , comme les remblais qui constituaient les bassins de rétention des eaux pluviales et de drainage (accident de mars 2006). Cette hypothèse est confortée par la brusque diminution du taux de pélites et par les variations conséquentes de la densité humide.
- De la cote 5 cm jusqu'à la surface, la remontée du taux de pélites suggère un retour progressif aux conditions normales de dépôt. Par ailleurs, les concentrations en métaux, systématiquement beaucoup plus élevées dans l'horizon de surface (0-2 cm), suggèrent que l'enrichissement en métaux puisse provenir d'un événement particulier ; les sols attaqués par le déversement de la solution d'acide sulfurique d'avril 2009 (Convention IRD/Goro-Ni, n° 2284) pourraient être la cause.

Pour les deux épisodes les plus anciens, un taux moyen d'accumulation a pu être évalué à 0,36 $\text{g/cm}^2/\text{an}$. Cette valeur est en parfaite correspondance avec la moyenne calculée en 2007 (contrat de consultance IRD/GoroNi, Convention n°1230). Cependant, dans l'étude 2010, il n'a pas été possible

de décomposer les profils semi-logarithmiques pour distinguer deux épisodes sédimentaires ; l'observation d'anomalies dans la distribution radioactive du ^{210}Pb , au niveau des horizons sédimentaires équivalents entre les deux carottes, conforte cependant la probabilité de l'existence réelle du même phénomène sédimentaire dans les deux carottes. Une étude plus détaillée permettrait de relier ces épisodes sédimentaires avec les activités humaines passées (édification du bagne à l'embouchure du Creek de la Rade Nord, déforestation, ouverture des pistes,...). Cette étude peut être réalisée en effectuant un second carottage dans une aire plus profonde de la rade.

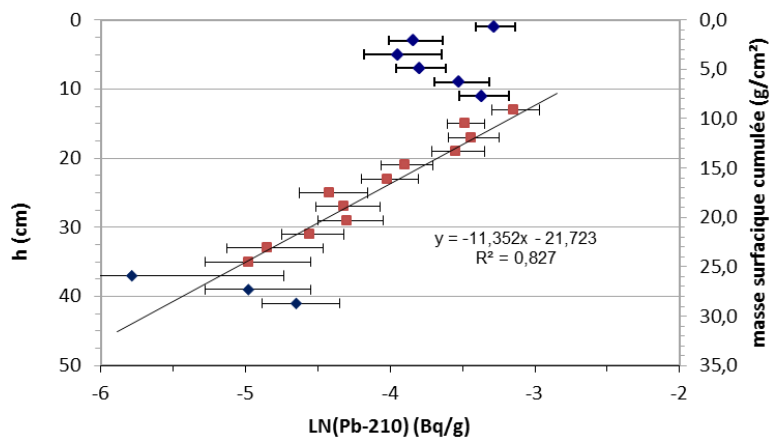


Figure 44 : Profil vertical de la radioactivité du « Pb-210 en excès » dans les sédiments de la carotte St15. Apports événementiels de sédiments : points en bleu.

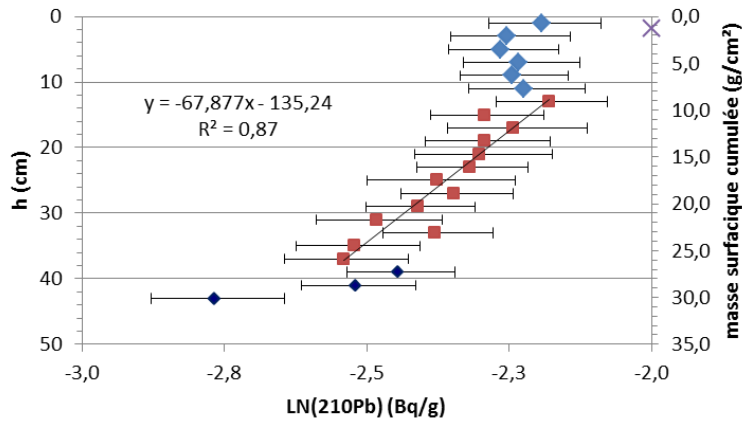
II.4.2. Carotte St06 (Baie Kwé)

Cette carotte St06-1 est caractérisée par un taux de pélites qui fluctue relativement peu ($74,3 \pm 2,4\%$) mais dont la mise en place s'est produite de manière pulsée. Toutefois, en particulier dans les cinq premiers centimètres de la carotte, une tendance nette à l'augmentation des teneurs en fractions pélitiques se dessine accompagnée d'une augmentation légère des modes.

Comme pour la carotte précédente (St15), la datation n'est pas envisageable. Toutefois, l'ensemble des paramètres géochimiques analysés permet de dégager les phases suivantes :

- Outre les apports carbonatés, les 13 premiers centimètres de la colonne sédimentaire peuvent être le résultat de la combinaison de deux phénomènes :
 - Le mélange de particules générées d'une part, par l'érosion naturelle de la couverture superficielle des sols (riches en ^{210}Pb ; Figure 45) et d'autre part, par les apports de matériel terrigène issu de l'excavation des couches anciennes (appauvris en traceur) ;
 - Le remaniement partiel attribué aux mécanismes de bioturbation (activité biologique).
- L'influence marine, s'est maintenue relativement constante, hormis un fléchissement progressif entre les cotes 25 et 15 cm et une régression plus nette qui concerne en particulier l'horizon de surface (0-2 cm). Cette dernière se traduit par une claire diminution de la concentration en calcium dans les sédiments de surface ;
- Les apports en matériel particulaire généré par l'excavation des séries latéritiques anciennes (creusement de la mine) pauvres en Fe sont identifiables dans l'horizon de surface.

Le dépôt de sub-surface témoigne d'une accumulation sédimentaire intense ($1,83 \text{ g/cm}^2/\text{an}$) liée d'une part à la grande extension du bassin versant de la Kwé et d'autre part, à l'érosion des constructions coralliennes qui constituent une importante partie de l'estuaire. Cette altération est mise en évidence par l'importante concentration en calcium ; les carbonates biogènes représentent $56,6 \pm 2,0 \%$ de la masse sédimentée.



II.4.3. Carotte St13 (Ile Ouen)

Cette carotte ne permet pas de dégager des tendances claires. En effet, les paramètres analysés ne permettent de dégager que les points suivants :

- Contrairement aux deux autres carottes très marquées par l'influence du substrat latéritique, les dépôts de la carotte St13-3 montrent une prédominance très nette des apports d'origine marine. Ces apports, qui sont plus grossiers que pour les deux autres sites, traduisent l'existence d'un niveau d'hydrodynamisme élevé.
- Les profils de concentrations en calcium et du taux de pélites montrent que la sédimentation des particules s'est effectuée de manière relativement constante et que seuls les sédiments de la base de carotte (horizons 13-14 cm à 15-16 cm) présentent des caractéristiques quelque peu différentes.

Les hypothèses ci-dessus présentées semblent être corroborées par les mesures de la radioactivité du ^{210}Pb qui montrent assez nettement la mise en place récente d'un processus de sédimentation rapide dont l'apparition pourrait être estimée il y a plus de 20 ans approximativement. Cependant, en l'absence d'un traceur complémentaire cette géochronologie est à considérer avec précaution.

En conclusion, la carotte résulte probablement de la succession rapide de deux phénomènes sédimentaires bien distincts. En effet, la couche des 7 premiers centimètres de la carotte peut avoir été formée par un dépôt événementiel de forte intensité ; les 2 premiers centimètres étant, par ailleurs, fortement marqués par des apports terrigènes, comme le montre un enrichissement en Ni important.

En tout état de cause, cette carotte ne peut être utilisée comme référence pour le suivi des phénomènes de sédimentation à proximité de l'Ile Ouen. En conséquence, un autre site, moins exposé aux aléas naturels devra être recherché.

II.4.4. Carotte St16 (port de commerce)

Un relatif mais constant appauvrissement en carbonates des couches les plus anciennes vers les plus récentes et à l'inverse, un enrichissement progressif en particules fines (pélites), caractérisent cette carotte. Cependant, deux zones se distinguent par leurs teneurs en eau et leurs valeurs de porosité ; la limite semble se situer au niveau de l'horizon (11-12 cm). Au-dessus, les sédiments sont plus riches en particules argilo-silteuses ($\varnothing < 20 \mu\text{m}$), alors qu'en dessous les proportions de silts fins et moyens augmentent.

L'influence terrigène se traduit clairement par une augmentation faible mais progressive de Fe vers la surface, parallèlement à une diminution de Ca. Pour les autres éléments métalliques qui sont autant de signatures des apports latéritiques, la tendance est la même avec de surcroît une très nette surconcentration dans la couche de sub-surface (1-2 cm).

Les concentrations en métaux disponibles et les distributions verticales dans les sédiments sont du même ordre de grandeur que celles obtenues antérieurement. En termes de proportions, la disponibilité potentielle ne représente, par rapport aux concentrations totales, que de 0,2 % à 1,5 % pour des métaux comme Cr et Ni, alors cette fraction augmente à 7,7 % pour Co et 45,3 % pour Mn.

En ce qui concerne le soufre, les concentrations diminuent avec la profondeur d'enfouissement ; pour le soufre lixiviable, les teneurs passent d'environ 1750 dans le premier centimètre à 1250 mg/kg dans les horizons plus anciens, et d'environ 2550 à 1500 mg/kg, pour la fraction échangeable. En effet, les niveaux de concentration en soufre lixiviable et échangeable sont sensiblement proches dans les 4 derniers horizons avec cependant une légère décroissance vers le bas. Le niveau le plus vieux (4-5 cm), datable entre 1990-1995, correspond à une époque antérieure à l'installation du complexe industriel. Toutefois, il n'est pas exclu qu'une migration verticale puisse se produire depuis la surface.

En effet, la disponibilité en soufre par solubilisation directe montre qu'une fraction non négligeable de celui-ci est faiblement combinée à la matière organo-minérale par simple adsorption.

La courbe du Pb-210 dans les sédiments montre un hiatus entre les horizons (10-11 cm) et (11-12 cm). Cette distribution permet de distinguer deux épisodes de décroissance radioactive (Figure 46). Le changement sédimentaire est daté avec vraisemblance de 1955 ± 3 ans. Le taux de sédimentation à la station St16 est actuellement de $0,12 \text{ g/cm}^2/\text{an}$.

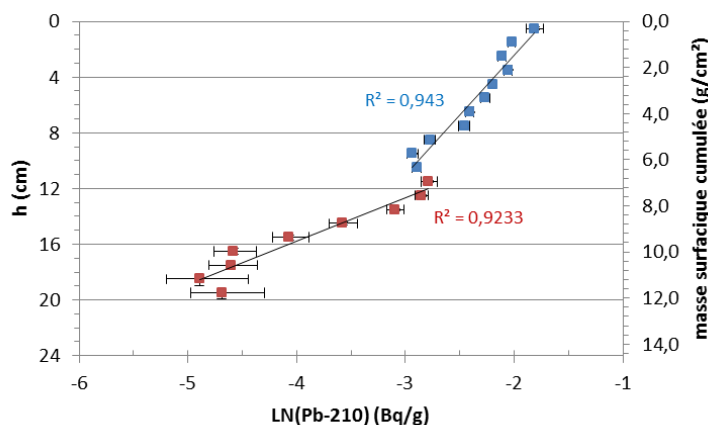


Figure 46 : Profil vertical de la radioactivité du « Pb-210 en excès » dans les sédiments de la carotte St16.

II.4.5. Conclusion

Les sédiments de la station St15 résultent des événements sédimentaires qui se sont succédés au cours des trois dernières années (2007-2010), à savoir :

- l'apport accidentel de mars 2006 suite à la rupture de la digue de rétention des eaux pluviales et de drainage. Paradoxalement, cet accident n'a pas été mis en évidence par l'étude de la carotte PR-1 (ancienne St15, approximativement) prélevée quelques mois après la date de l'effondrement (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230). Un glissement récent du matériel particulaire sédimenté sur le talus vers le bas de la pente pourrait constituer une explication plausible. Il est à noter que les carottes ne correspondent pas exactement en terme de positionnement géographique, quelques dizaines de mètres les séparent, au niveau du talus prodeltaïque, cette distance peut être d'une importance relative ;
- l'apport accidentel en particules enrichies en métaux suite à l'altération des sols du bassin versant du Creek de la Rade Nord par la solution d'acide sulfurique.

En ce qui concerne la station St06, les sédiments traduisent, pour leurs horizons les plus récents, des changements dans leur nature, origine et probablement quantité. Toutefois, ces apports semblent progressivement diminuer en masse et un retour à des conditions normales d'alimentation par la rivière Kwe semble se profiler. Comme pour la carotte St15, la datation des événements sédimentaires qui se sont succédés est impossible en raison de la nature massive des apports qui constituent les 10 à 12 premiers centimètres du dépôt. En effet, les hypothèses de base nécessaires à l'emploi des modèles (CRS et CIC) ne sont pas respectées, à savoir, respectivement : un flux en ^{210}Pb constant à l'interface « eau-sédiment (Appleby & Oldfield, 1978) et un taux de sédimentation constant (Robbins & Edgington, 1975).

Aucune donnée antérieure n'étant disponible pour la couverture sédimentaire échantillonnée au niveau de la carotte St13, seule une étude ultérieure (campagne de suivi 2013) permettra d'observer une éventuelle évolution des rythmes sédimentaires.

Un relatif mais constant appauvrissement en carbonates des couches les plus anciennes vers les plus récentes et à l'inverse, un enrichissement progressif en particules fines (pélites), caractérisent cette carotte St016. En effet, l'influence terrigène se traduit clairement par une augmentation faible mais progressive de Fe vers la surface, parallèlement à une diminution de Ca. En termes de sédimentation, la courbe du Pb-210 permet de distinguer deux épisodes sédimentaires, datés avec vraisemblance de 1955 ± 3 ans.

II.5. Biosurveillance du milieu marin

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus lors des campagnes de caractérisation de l'état de référence (2009) puis du suivi environnemental (2010 à 2013) réalisés dans le cadre de la mise en œuvre des deux méthodes de bio-surveillance active (transplantation d'organismes marins) et de bio-surveillance passive.

II.5.1. Bio-surveillance active par transplantation de bio-indicateurs

II.5.1.a. Localisation des stations de transplantation

Depuis 2009, un ensemble de huit stations distribuées dans toute la zone du Canal de la Havannah et la Baie du Prony (Figure 47) a été déterminé pour le suivi environnemental par transplantation (ou bio-surveillance active). Ces stations sont : St03 (Port Boisé), St05 (Ilot Kié), St06 (Baie Kwé), St07 (Récif Ioro), St13 (Ile Ouen), St14 (Port de Goro), St16 (Port de commerce) et St18 (Ilot Casy).

La localisation géographique des stations est associée aux données hydrodynamiques fournies par la modélisation du transport des fractions dissoutes et particulaires (Derex et al., 2008 ; Douillet et Fernandez, 2009). Par ailleurs, les stations de bio-surveillance active et de physicochimie de la colonne d'eau possèdent des coordonnées identiques. Toutefois, deux modifications importantes sont intervenues dans le réseau de bio-surveillance, successivement en 2010 et en 2012, en effet :

- En 2010, une nouvelle station de référence St31 (Ilot Nouaré), spécifique au suivi de la bioaccumulation a été créée en remplacement de la station St05 (Kié) où les courants marins sont trop forts : l'intensité hydrodynamique ne permet pas de déployer en toute sécurité les dispositifs mais surtout il présente un risque non négligeable pour les plongeurs qui interviennent dans les opérations de mouillage et de récupération des cages ;
- En 2012, la position géographique de la station St16 a demandé à être modifiée en raison des pertes régulières des lignes de mouillage placées sur le passage des navires et la zone d'évitage et de manœuvre. La nouvelle position de cette station se situe à présent au nord-ouest du port de commerce de Prony.

Le présent document fait la synthèse des 5 années (2009, 2010, 2011, 2012 et 2013) de bio-surveillance active. On rappelle que l'évaluation du degré de biodisponibilité des métaux est réalisé grâce à l'analyse chimique de huit métaux (As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) accumulés dans les tissus de deux espèces marines appelées « Bio-indicateurs quantitatifs », ou « Bio-accumulateurs », transplantées à mi-profondeur (Tableau 19).

Il s'agit du bivalve *Isognomon isognomon* et de l'algue brune *Lobophora variegata*.

Afin de faciliter l'analyse statistique des données puis leur interprétation, les stations ont été réparties selon la typologie à 3 modalités :

- « baie » : St03 (Port Boisé), St06 (Baie Kwé), St16 (Baie du Prony) et St18 (Ilot Casy) ;
- « océanique » : St07 (Récif Ioro), St13 (Récif Ma), St14 (Port de Goro) et St31 (Ilot Nouaré) ;
- « référence » : localisation de prélèvement des bio-indicateurs (Baie Maa).

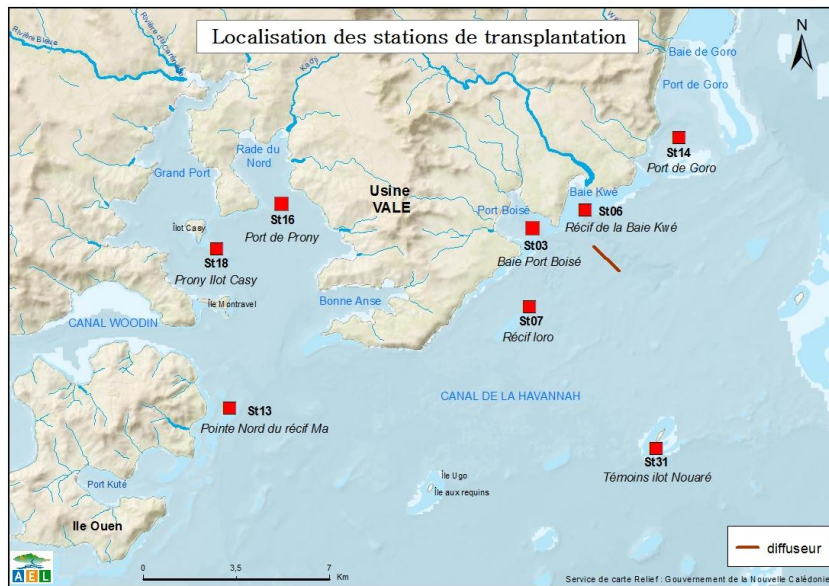


Figure 47 : Localisation géographique des 8 stations de bio-surveillance active du milieu marin par transplantation d'espèces bio-accumulatrices. La station St31 figure dans les suivis à partir de 2010 et remplace la station St05 à proximité de l'Îlot Kié (non représentée sur la carte) en raison de courants excessifs qui y règnent. La nouvelle localisation de la station St16, plus au nord-ouest de la zone portuaire, est maintenant en dehors de la zone de navigation et d'évitement des navires.

II.5.1.b. Données disponibles

Pour les bivalves *Isognomon isognomon*, l'ensemble des 5 campagnes déployées de juin à septembre de chaque année, totalise l'analyse de 645 individus (Tableau 19). Toutefois, seule la campagne de 2012 est complète avec les 8 cages récupérées en fin d'exposition, durant les 4 autres années, la perte de lignes de mouillages a été régulièrement constatée pour des raisons diverses (courants, crochage,...).

Tableau 19 : Bilan des données disponibles par année et par station pour *Isognomon Isognomon* et *Lobophora variegata*. Nombre de répliques de 3^(a), 4^(b) ou 5^(c) individus disponibles selon les campagnes pour l'analyse des 8 métaux et nombre total d'analyses par test. Pour certaines années^(d), le nombre de répliques de frondes (*L. variegata*) est variable selon la station.

Année	<i>Isognomon isognomon</i>									Année	<i>Lobophora variegata</i>								
	ST03	ST06	ST07	ST13	ST14	ST16	ST18	ST31	TOTAL		ST03	ST06	ST07	ST13	ST14	ST16	ST18	ST31	TOTAL
2009 ^(b)	5	5	5	5	5	5	5		140	2009 ^(b)	5	5	5	5	5	5	5		140
2010 ^(a)	5	5		5	5	5	5	5	105	2010 ^(b)	5			5	5	5		5	100
2011 ^(a)	5	5	5	5	5		5	5	105	2011 ^(d)	5	5	3	2	5		5		100
2012 ^(a)	5	5	5	5	5	5	5	5	120	2012 ^(d)	1	1	1	2	1	2	3	1	44
2013 ^(c)	5	5	5	5	5	5	5		175	2013 ^(d)	1			3		3	3		55

De la même façon, pour *Lobophora variegata* le bilan des données montre que le nombre de répliques est souvent critique (<3) et que le nombre de stations sans données est plus important que pour le bivalve, au total, 439 individus ont toutefois pu être analysés (Tableau 19). La technique de transplantation en cage pose des problèmes de pertes de frondes algales non encore totalement élucidés au moment de la rédaction de ce rapport.

II.5.1.c. Conditions environnementales

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant l'immersion des cages sont susceptibles d'influer d'une part, sur la nature et la quantité des apports en métaux dans le milieu

marin (lixiviation des sols en fonction des taux de précipitations) et d'autre part, sur leur dispersion en mer (force et direction des vents). De ce fait, la pluviométrie et les données de vents (vitesse et direction) ont été systématiquement mesurées par la station météorologique de Vale-NC située à l'emplacement de l'ancienne usine pilote ou bien par la station AEL installée sur la balise du Récif loro (AEL). Le cumul des pluies est reporté sur la Figure 48.

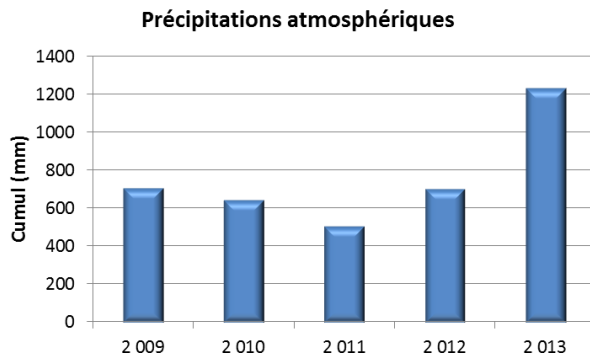


Figure 48 : Cumul des pluies pour la période de transplantation (juin, juillet, août et septembre) par année (2009 à 2013) (données Météo-France).

Les cumuls montrent que l'année 2013 fait figure d'exception puisque le taux moyen enregistré entre 2009 et 2012 est de 641 ± 95 mm alors qu'en 2013 il a doublé : 1232 mm ; dont 880 en juillet.

II.5.1.d. Analyse des évolutions spatio-temporelles

(1) Normalisation des données et méthodologie

L'objectif principal de la bio-surveillance active est de compléter le suivi de la qualité physico-chimique des eaux du Canal de la Havannah et de la Baie du Prony, par l'évaluation des fractions bio-disponibles des métaux dissous. Cette technique n'est donc pas déployée à des fins de surveillance sanitaire (comme la bio-surveillance passive), de ce fait, seule l'évolution relative des concentrations bio-accumulées doit être prise en compte (normalisation).

De surcroît, la normalisation des concentrations a pour avantage de s'affranchir de la variabilité des concentrations initiales des métaux (lots de référence,) d'une année sur l'autre.

Aussi pour chaque campagne, chaque concentration a été pondérée (normalisée) par la moyenne annuelle du lot de référence. Cette nouvelle variable est appelée « *coefficient d'incorporation* » (CI). Il s'exprime selon la relation :

$$CI = [m\acute{e}tal] / [m\acute{e}tal\ lot\ initial]$$

Ainsi, un coefficient d'incorporation (CI) significativement :

- supérieur à 1, traduit un phénomène d'accumulation du métal ;
- inférieur à 1, reflète la mise en place d'une phase d'élimination du métal par le bivalve.

Remarque :

Les données de l'année 2009 n'ont pas été intégrées aux analyses en l'absence des valeurs de référence (lot initial).

Pour chaque bio-indicateur, une analyse exploratoire multivariée de type ACP (Analyse en Composantes Principales) a permis de mettre en évidence les grandes tendances dans les évolutions spatio-temporelles.

Chez *Isognomon isognomon*, après transformation des données pour répondre aux exigences de normalisation et d'homogénéité des variances nécessaires, une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (*Année* et *Typologie*) a été conduite. Lorsque des évolutions spatio-temporelles significatives ont été décelées (significativité de l'interaction des facteurs *Année*Typologie*) des analyses à postériori (Test de Tukey) ont été réalisées de sorte à évaluer l'origine de ces différences.

Pour *Lobophora variegata*, les transformations de données ne permettant pas de répondre aux exigences de normalisation et d'homogénéité des variances, l'analyse des variances (significativité de l'interaction des facteurs *Année*Typologie*) a été réalisée avec un test non-paramétrique (Kruskal-Wallis). Lorsque des évolutions temporelles significatives ont été décelées des tests à postériori (Test de comparaison multiple des rangs) ont été réalisées.

(2) Réponse du bio-indicateur « *Isognomon isognomon* »

L'analyse multivariée de type ACP (Analyse en Composantes Principales) montre que chez *Isognomon isognomon* (Figure 49), la variabilité temporelle (*Année*) est plus marquée que la variabilité spatiale (*Typologie*). L'année 2013 se détache avec les stations dites de « Baie » qui présentent des facteurs de concentration plus élevés en Cr et Mn, voire en Fe et As.

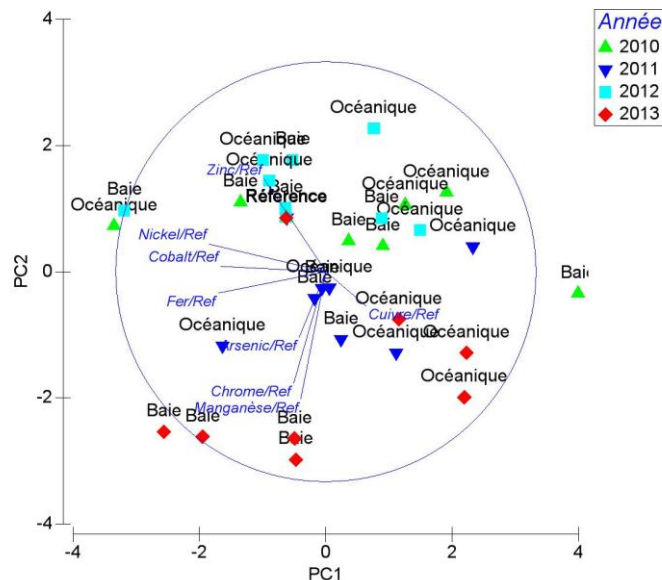


Figure 49 : Plan factoriel (58% de la variabilité) issu de l'ACP (Analyse en Composantes Principales) pour *Isognomon isognomon*.

Par ailleurs, en fonction du métal et de l'année considérée, les coefficients d'incorporation (CI) calculés (Tableau 20) montrent une variabilité relative avec une moyenne, tous métaux confondus, de 1,07 et des valeurs extrêmes comprises entre 0,24 (Cr en 2010) et 2,3 (Cr en 2013).

Bien que certaines évolutions temporelles apparaissent (Tableau 21 et Figure 50), les analyses statistiques montrent que l'interaction « *Typologie*Année* », n'est pas significative pour 4 des métaux étudiés ; aucune différence significative du CI « *Baie* » ou « *Océanique* » n'apparaît pour Co, Cu, Fe et Zn, quelle que soit l'année. Autrement dit, aucune phase d'accumulation (ou d'élimination) significative n'est observée pour ces métaux.

Seuls 4 métaux présentent des différences significatives : As, Cr auxquels peuvent être associés Ni et Mn (*p value* ≈ 0,05). En effet, les analyses de 2013 présentent les signes évidents d'une réponse significative en termes d'accumulation (CI>1) pour le groupe des stations dites de « *baie* » pour As, Cr et Mn (Tableau 21 et Figure 50). Bien que non significative, la bioaccumulation des métaux aux stations dites « *océaniques* » montre aussi des niveaux moyens inférieurs à celles des stations dites de « *baie* ». Enfin concernant Ni, les différences significatives mises en évidence (Tableau 21 et Figure 50) sont clairement liées à une phase d'élimination (CI<1), pour les stations notamment « *océaniques* » et non d'accumulation.

Statistiquement, l'année 2012 n'a pas montré de tendance de bioaccumulation significative (Tableau 21 et Figure 50).

Enfin les années 2010 et 2011 montrent des différences significatives pour Cr, pour les deux typologies avec pour chacune d'elles le développement d'une phase d'élimination (CI<1 ; « *Baie* ») et d'accumulation (CI>1 ; « *Océanique* ») (Tableau 21 et Figure 50).

Tableau 20 : Résultats du test ANOVA à deux facteurs (Année*Typologie) des 8 coefficients d'incorporation (CI) pour *Isognomon Isognomon*. Avec * Significatif ; ** hautement significatif, * très hautement significatif ; NS Non Significatif.**

	Arsenic/Ref	Chrome/Ref	Cobalt/Ref	Cuivre/Ref	Fer/Ref	Manganèse/Ref	Nickel/Ref	Zinc/Ref
Typologie	NS	***	***	*	***	***	***	NS
Année	***	***	NS	NS	NS	***	NS	*
Typologie*Année	***	***	NS	NS	NS	*	*	NS

Tableau 21 : Résultats du test de Tukey entre les différentes modalités des coefficients d'incorporation (CI) pour *Isognomon Isognomon*. Avec * Significatif ; ** hautement significatif, * très hautement significatif ; NS Non Significatif.**

	2010			2011		
	<i>Baie*Ref</i>	<i>Océanique*Ref</i>	<i>Baie*Océanique</i>	<i>Baie*Ref</i>	<i>Océanique*Ref</i>	<i>Baie*Océanique</i>
Arsenic/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Chrome/Ref	***	***	NS	***	***	NS
Manganèse/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Nickel/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	2012			2013		
	<i>Baie*Ref</i>	<i>Océanique*Ref</i>	<i>Baie*Océanique</i>	<i>Baie*Ref</i>	<i>Océanique*Ref</i>	<i>Baie*Océanique</i>
Arsenic/Ref	NS	NS	NS	*	NS	NS
Chrome/Ref	NS	NS	NS	***	NS	***
Manganèse/Ref	NS	NS	NS	*	NS	*
Nickel/Ref	NS	NS	*	NS	*	*

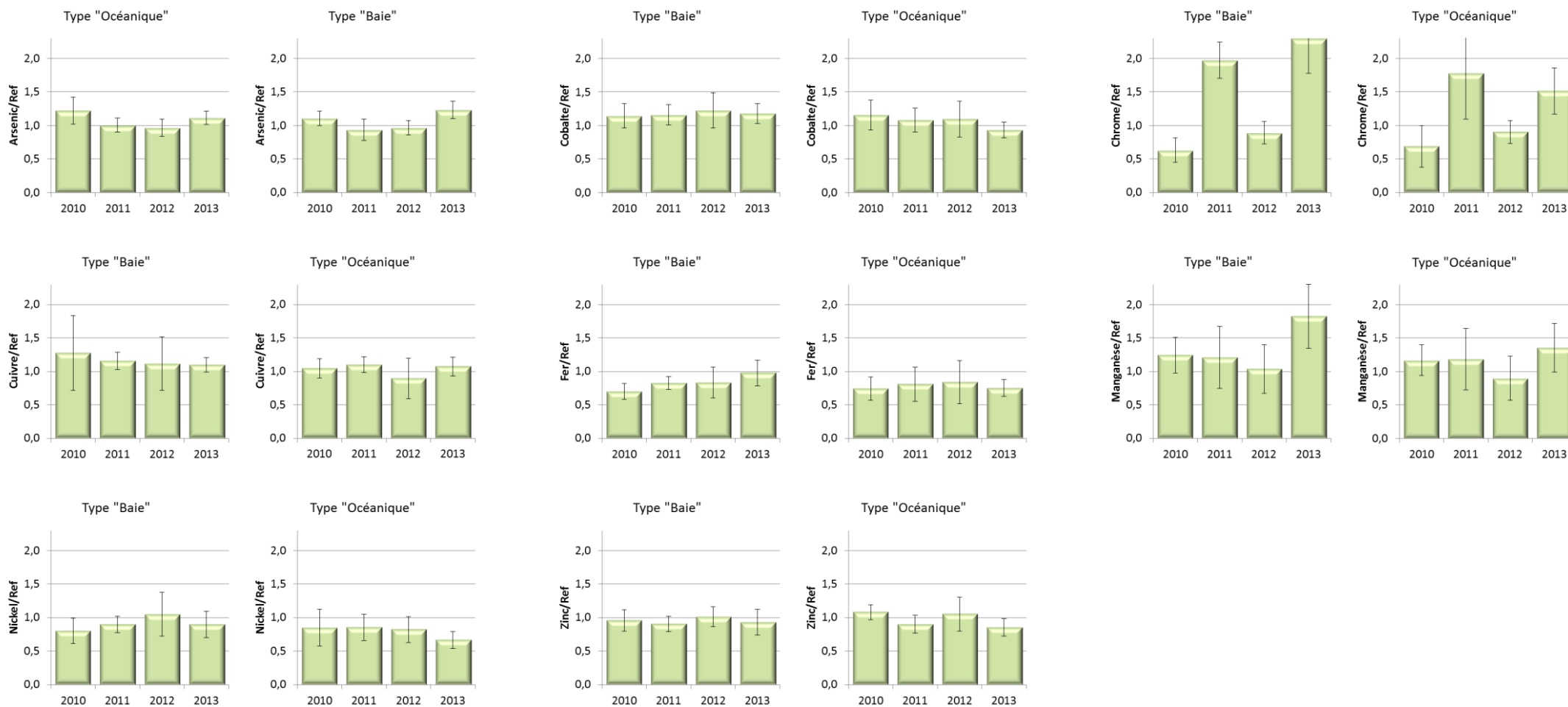


Figure 50 : Evolutions temporelles (2010, 2011, 2012 et 2013) en fonction de la typologique (Baie, Océanique) par rapport à la Référence. Valeur du coefficient d'incorporation (CI) « station/référence » par métal (As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) pour *Isognomon isognomon*.

(3) Réponse du bio-indicateur « *Lobophora variegata* »

Comme pour *I. isognomon*, l'analyse multivariée de type ACP (Analyse en Composantes Principales) montre également chez *Lobophora variegata* (Figure 51), que la variabilité temporelle (*Année*) est plus marquée que la variabilité spatiale (*Typologie*). Les années 2012 et 2013 se détachent des autres campagnes du fait de quelques stations. L'année 2013 présente une tendance similaire à celle du bivalve : les stations dites de « Baie » montrent des facteurs de concentration élevés en métaux notamment pour Cr, Mn, Ni et Fe.

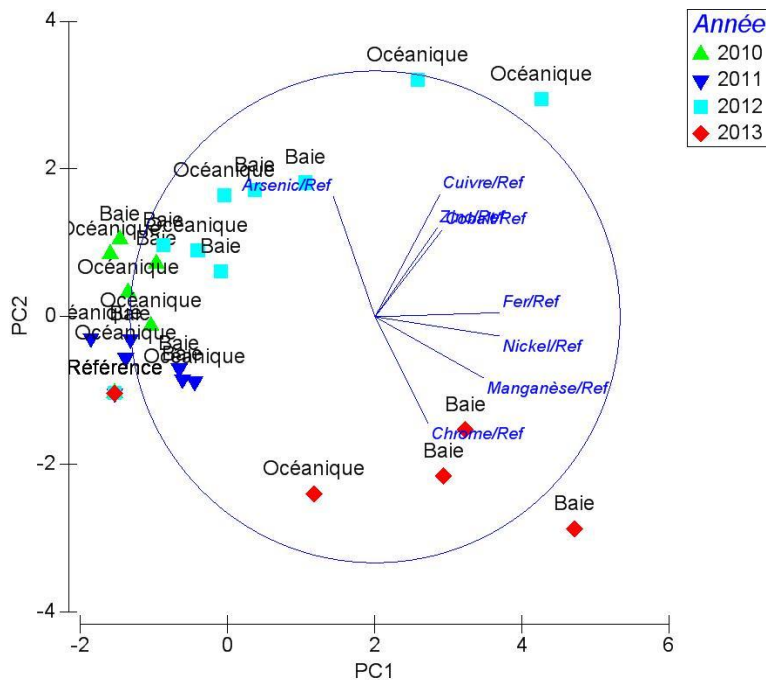


Figure 51 : plan factoriel (75% de la variabilité) issu de l'ACP (Analyse en Composantes Principales) pour *Lobophora variegata*.

L'analyse des données (Tableau 22) montre que le coefficient d'incorporation (CI) est variable entre les métaux et entre les années avec une moyenne, tous métaux confondus, de 2,13 et compris entre un minimum de 0,43 (Cu pour 2011) et un maximum de 8,1 (Cu pour 2012). Ces résultats montrent que le niveau des phases d'accumulation/élimination exprimé à travers le CI est globalement supérieur à celui du bivalve.

Ainsi pour chaque typologie et pour l'ensemble des métaux (As, Co, Cr, Co, Fe, Mn, Ni et Zn) on observe des évolutions temporelles significatives (Tableau 23 et Figure 52).

Les analyses pariées entre les différentes modalités de la variable typologique (Tableau 23) permettent de relativiser les variations temporelles observées. En effet, si des évolutions sont observées entre les années, celles-ci s'opèrent en 2010, 2011 et 2012 sur l'ensemble des stations sans différence significative entre les stations de « baie » et les stations « océaniques ».

A l'inverse, 2013 est l'année où l'on observe les plus fortes bioaccumulations (CI>1) avec une structuration spatiale significative entre les stations dites de « baie » et « océaniques ».

Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA de Kruskal-Wallis sur la significativité du facteur « Année » par niveau typologique pour les 8 facteurs de concentration pour *Lobophora variegata*. Avec * Significatif ; ** hautement significatif, *** très hautement significatif ; NS Non Significatif.

	Arsenic/Ref	Chrome/Ref	Cobalt/Ref	Cuivre/Ref	Fer/Ref	Manganèse/Ref	Nickel/Ref	Zinc/Ref
Référence*Année	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Baie*Année	***	***	NS	***	***	***	***	***
Océanique*Année	**	**	**	***	***	**	***	***

Tableau 23 : Résultats par année du test de comparaison multiple des rangs entre les différentes modalités du facteur typologique pour *Lobophora variegata*.

	2010			2011		
	Baie*Ref	Océanique*Ref	Baie*Océanique	Océanique*Ref	Baie*Ref	Baie*Océanique
Arsenic/Ref	**	**	NS	**	**	NS
Chrome/Ref	**	**	NS	***	**	NS
Cobalt/Ref	*	*	NS	***	**	NS
Cuivre/Ref	NS	NS	NS	***	**	NS
Fer/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Manganèse/Ref	*	**	NS	*	**	NS
Nickel/Ref	*	NS	NS	**	**	NS
Zinc/Ref	*	*	NS	***	NS	NS
	2012			2013		
	Baie*Ref	Océanique*Ref	Baie*Océanique	Baie*Ref	Océanique*Ref	Baie*Océanique
Arsenic/Ref	**	**	NS	NS	*	*
Chrome/Ref	NS	NS	NS	**	*	*
Cobalt/Ref	**	**	NS	**	NS	*
Cuivre/Ref	**	**	NS	NS	*	*
Fer/Ref	**	**	NS	**	*	*
Manganèse/Ref	NS	NS	NS	**	*	*
Nickel/Ref	**	**	NS	**	*	*
Zinc/Ref	NS	NS	NS	**	*	*

II.5.1.e. Conclusions

Isognomon isognomon

Les analyses statistiques montrent que le bivalve n'accumule pas ($CI > 1$) de manière significative pour Co, Cu, Fe, Ni et Zn, quelle que soit l'année. A l'inverse, seul Cr présente pour deux années (2011 et 2013) des coefficients d'incorporation significatifs traduisant la mise en place d'une phase d'accumulation. Pour Mn l'accumulation n'est avérée que pour 2013. Par ailleurs, si pour Fe et Ni, les concentrations mesurées tendent à montrer que les bivalves entament une phase d'élimination ($CI < 1$), les éléments Cd, Co et Zn ne semblent pas réagir de manière bien déterminée. Le comportement de As reste un cas à part qu'il faudra examiner en relation avec sa spéciation (disponibilité) dans le milieu marin (Hédouin et al., 2010a).

Cette dernière observation est confortée par les résultats de l'expérimentation de 2013 qui font exception puisqu'une accumulation significative pour As, Cr et Mn est mesurée ; pour Fe, la phase d'élimination étant bien moins prononcée que pour les années précédentes. Le phénomène d'accumulation n'est pas mesuré sur les stations dites « océaniques » mais localisé uniquement sur l'ensemble des stations de « baie ». Ces résultats sont à relier aux conditions météorologiques et

pluviométriques observées les 2 et 3 juillet 2013 de caractère exceptionnel qui a conduit à un flux en éléments métalliques, notamment Cr, Co, Mn et Ni sous des formes à la fois particulaires et dissoutes.

Toutefois, l'absence de réponse significative du bivalve à Co et Ni qui pourtant sont présents en concentrations importantes dans les eaux côtières (environ 0,1 µg/L et 1 µg/L, respectivement), est conforme aux résultats obtenus pour des bivalves du même genre ou appartenant à des genres proches de cette espèce (Breau, 2003). En effet, malgré les très fortes concentrations présentes dans les particules latéritiques, il apparaît que Co et Ni ne sont pas fortement bio-accumulables en raison probablement de mécanismes cinétiques lents, à l'inverse de Fe, Mn et surtout de Zn (Hédouin et al., 2010b).

Ces analyses confirment la plus grande variabilité des métaux dans les baies pour le Ni, Mn, Cr et As.

Lobophora variegata

Le comportement de cette algue contraste avec celui du bivalve bien que sa conservation durant la période de caging soit délicate. En effet, cette algue présente des niveaux de bioaccumulation (CI>1) significatifs sur l'ensemble de métaux avec une certaine variabilité entre les années.

Toutefois les évolutions observées entre les années s'opèrent en 2010, 2011 et 2012 sur l'ensemble des stations sans différence significative entre les stations qu'elles soient localisées dans les baies ou influencées par les masses océaniques. Ces variations s'opérant sur l'ensemble du domaine d'étude montrent qu'il est fort probable que celles-ci soient d'ordre naturel.

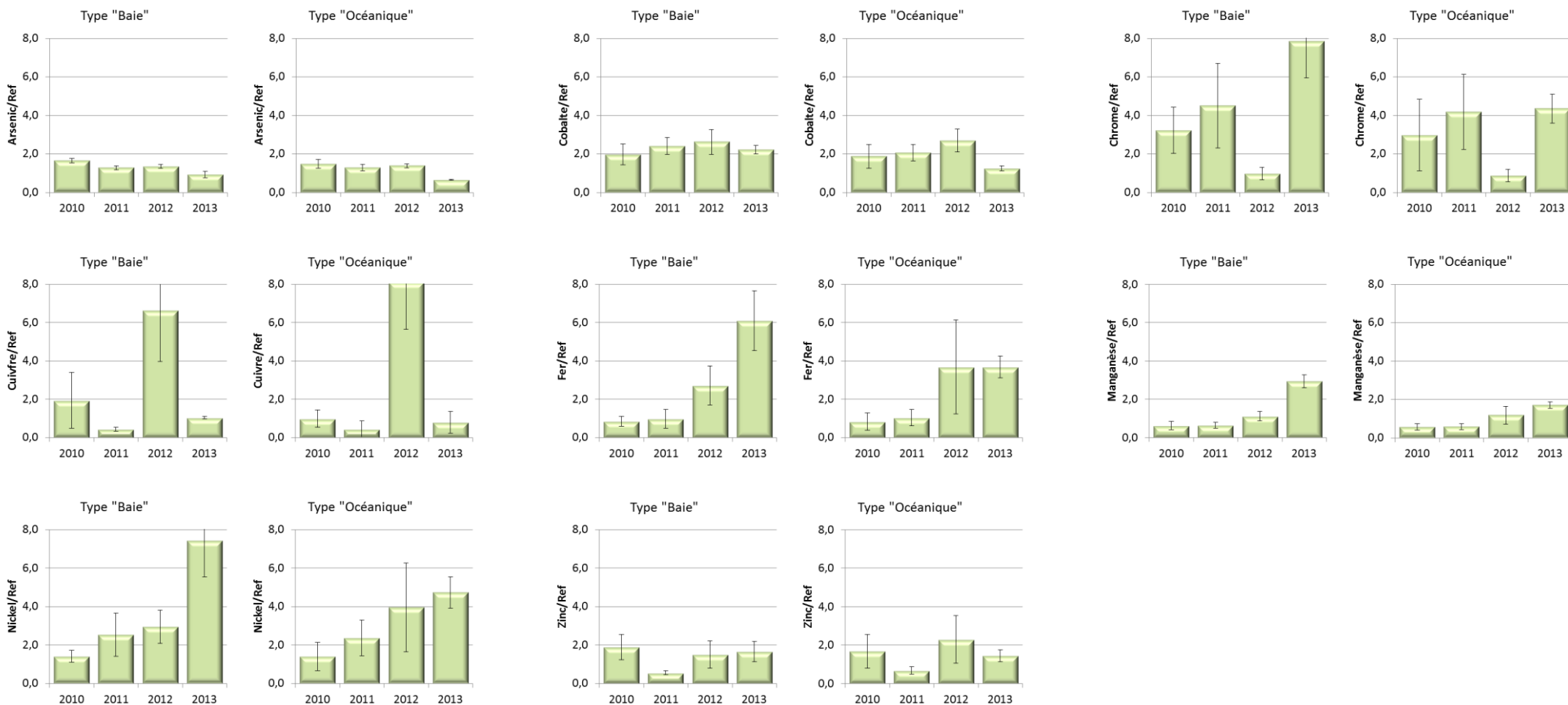


Figure 52 : Evolutions temporelles (2010, 2011, 2012 et 2013) en fonction de la typologique (Baie, Océanique) par rapport à la Référence. Valeur du coefficient d'incorporation (CI) « station/référence » par métal (As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) pour *Lobophora variegata*.

II.5.2. Bio-surveillance passive et analyse du risque sanitaire

II.5.2.a. Localisation des zones de pêche

La zone d'étude a été délimitée sur la base des données environnementales et socio-économiques précédemment acquises par AEL, à savoir les résultats des enquêtes de pêche conduites en 2009 lors de la réalisation de l'Etat de Référence Sanitaire (Breau et al., 2010 ; Annexe 1). Les données environnementales s'appuient sur les résultats des études de courantologie et de modélisation de la dispersion du panache (Douillet et Fernandez, 2009).

Ainsi, un ensemble de cinq zones à surveiller a été défini (Figure 53 et Tableau 24) :

- **Zone 1** : côte sud-est de la Baie du Prony (**Bonne Anse**) ;
- **Zone 2** : **Canal de la Havannah** ;
- **Zone 3** : **Baie Kwé** ;
- **Zone 4** : côte sud de **Port de Goro** ;
- **Zone 5** : côte est de **l'île Ouen**.

En 2009-2010 lors de la campagne d'état de référence, les zones de pêche couvraient des aires relativement larges. En effet, la zone 1 s'étendait de Bonne Anse jusqu'à la Rade Nord, la zone 2 allait de la limite de la Réserve Merlet au sud du cap Ndoua et la zone 3 s'étendait du Cap Ndoua jusqu'au sud de la Baie de Goro.

En 2012 et 2013, les zones ont été redessinées pour une meilleure délimitation des aires de pêche et donc un traitement des données plus robuste.

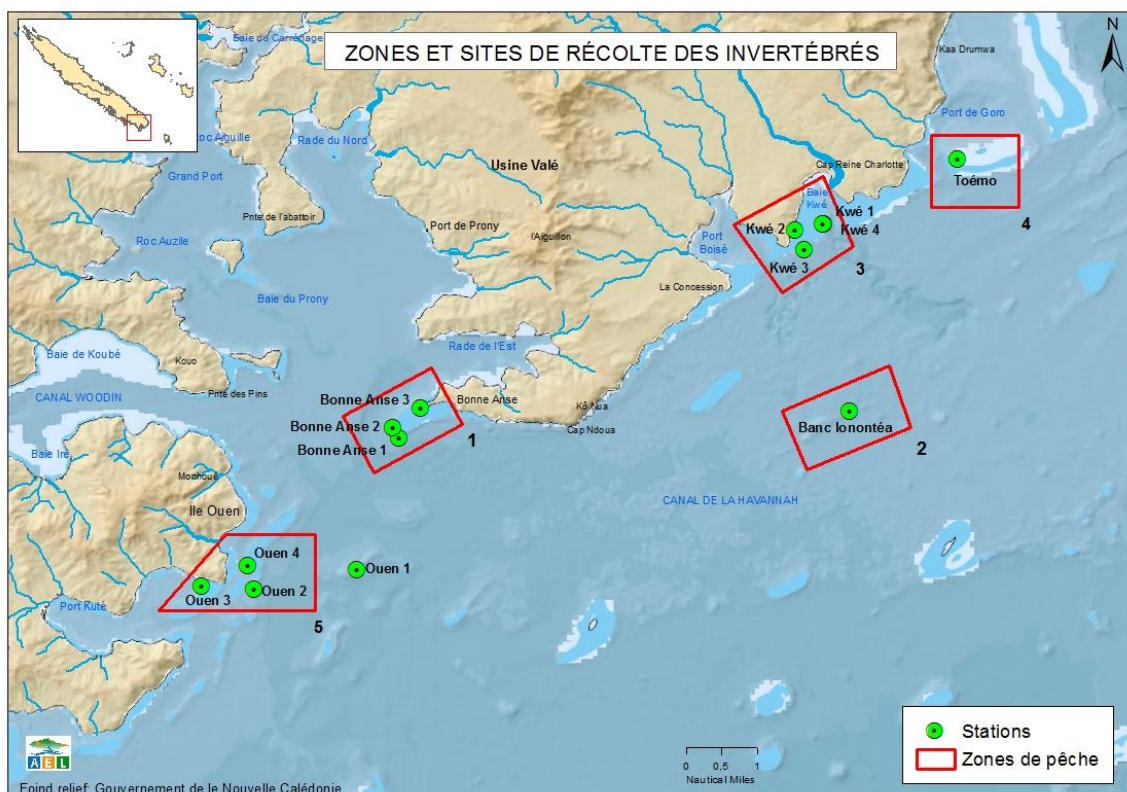


Figure 53 : Localisation des zones et des stations de pêche du suivi sanitaire dans le sud de la Grande Terre en 2012/2013.

Tableau 24 : Positionnement des stations d'étude (WGS84) du risque sanitaire 2012/2013 et type d'échantillonnage.

ZONE	NOM DE LA ZONE	STATIONS	LATITUDE	LONGITUDE	RECOLTES
Zone 1	Bonne Anse	Bonne Anse 1	22° 23,876	166° 53,017	Poisson 2012
		Bonne Anse 2	22° 23,739	166° 52,933	Poisson 2012
		Bonne Anse 3	22° 23,460	166° 53,328	Coquillage 2013
Zone 2	Havannah	Banc Ionontéa	22° 23,508	166° 59,380	Poisson 2012
		Kwé 1	22° 20,853	166° 59,030	Poisson 2012
Zone 3	Baie Kwé	Kwé 2	22° 20,94	166° 58,62	Poisson 2012 et Coquillage 2013
		Kwé 3 (Port Boisé)	22° 21,213	166° 58,740	Poisson 2012
		Kwé 4	22° 20,862	166° 59,004	Coquillage 2013
Zone 4	Port de Goro	Toémo	22° 19,947	167° 00,909	Poisson 2012
Zone 5	Ile Ouen	Ouen 1	22° 25,747	166° 52,423	Poisson 2012
		Ouen 2	22° 26,015	166° 50,975	Poisson 2012
		Ouen 3	22° 25,980	166° 50,220	Coquillage 2013
		Ouen 4	22° 25,680	166° 50,880	Coquillage 2013

II.5.2.a. Stratégie de l'échantillonnage

Pour l'étude de l'état de référence (T0), deux campagnes de pêche ont été réalisées ; l'une en saison fraîche (août 2009) et l'autre en saison chaude (janvier 2010). Lors de ces deux saisons, les poissons et coquillages ont été récoltés (Breau et al., 2010).

Suite à l'état de référence, en 2012 et 2013, les campagnes de suivi (T1) ont eu lieu. L'ensemble des poissons étudiés a été collecté durant la saison chaude au cours d'une seule campagne (janvier 2012) tandis que pour les coquillages ont été collectées durant la saison fraîche au cours d'une seule campagne (juillet 2013).

Les poissons collectés dans les différentes zones lors de ces campagnes ont été disséqués afin d'analyser les contenus des chairs en 9 métaux et métalloïdes (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn).

Chez les bivalves, les concentrations en métaux ont été évaluées sur la chair totale de l'animal, alors que seuls les muscles (parties consommées) ont été analysés chez les gastéropodes.

II.5.2.b. Concentrations en métaux chez les poissons

(1) Echantillonnage

Les deux années de suivi sanitaire ont permis d'échantillonner 285 spécimens, respectivement 144 en 2009-2010 (Etat de référence) et 141 en 2012, distribués entre 12 familles, 23 genres et 50 espèces pour 3 régimes alimentaires différents (herbivore, carnivore et omnivores ; Tableau 25 et Tableau 26). Il ressort de cet échantillonnage que la majorité des spécimens (181/285) sont des carnivores, suivis par les herbivores (101/285), seuls 3 poissons appartiennent à un régime trophique omnivore.

Les détails concernant les nombres de spécimens analysés selon l'espèce, la zone d'étude et de campagne sont représentés dans le Tableau 26. En résumé, les individus analysés pour la campagne 2012 appartiennent majoritairement (128/141) aux trois familles suivantes :

- Acanthuridae (herbivore) : 25 individus pour 4 espèces (dawa, picot kanak, chirurgien et ume) ;

- Scaridae (herbivore) : 46 perroquets pour 13 espèces ;
- Serranidae (carnivore) : 57 loches pour 5 espèces.

Enfin, il est également à noter que 49 spécimens carnivores sur les 70 pêchés appartiennent à l'espèce *Plectropomus leopardus*. En outre, 18 et 10 spécimens des poissons herbivores sur 68, appartiennent, respectivement, à l'espèce *Naso unicornis* (« Dawa ») et *Scarus rivulatus*.

En 2009-2010, les individus sont repartis majoritairement (82/144) en deux familles :

- Serranidae (carnivore) : 23 loches pour 7 espèces ;
- Lethrinidae (carnivore) : 59 individus pour 7 espèces (bossu taché, blanc, doré et d'herbe, bec de cane et gueule rouge).

Tableau 25 : Nombre de poissons récoltés en 2009,2010 et 2012 destinés à l'analyse des éléments métalliques dans les chairs (filets), classés par zone et selon leur régime trophique (carnivore, herbivore ou omnivore) ainsi que leur diversité.

ZONE	NB INDIVIDUS	REGIME TROPHIQUE			DIVERSITE TAXONOMIQUE		
		Carnivores	Herbivores	Omnivores	Familles	Genres	Espèces
1-Bonne Anse	27	12	14	1	4	6	9
2- Havannah	66	46	20	0	8	12	21
3 - Baie Kwé	78	58	18	2	9	13	22
4 - Port de Goro	59	32	27	0	9	11	18
5 - Ile Ouen	55	33	22	0	7	12	18
Total général	285	181	101	3	12	23	50

Tableau 26 : Nombre de poissons destinés à l'analyse des éléments métalliques dans les chairs (filets), classés par famille, espèce, zone de collecte et par l'année de campagne.

Espèce	Campagne 2012 (saison chaude)					Campagne 2010 (saison chaude)					Campagne 2009 (saison fraîche)				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Acanthuridae	25					0					5				
<i>Acanthurus dussumieri</i>	1				3										
<i>Acanthurus mata</i>	1	1													
<i>Naso hexacanthus</i>	1														
<i>Naso unicornis</i>	7	5	1	2	3									3	2
Carangidae	0					2					0				
<i>Caranx papuensis</i>									2						
Haemulidae	4					2					0				
<i>Diagramma pictum</i>								2							
<i>Plectorhinchus chaetodonoides</i>			1	1											
<i>Plectorhinchus picus</i>		2													
Kyphosidae	2					0					0				
<i>Kyphosus sp.</i>			2												
Labridae	3					7					1				
<i>Bodianus perditio</i>							3	1							
<i>Cheilinus chlororurus</i>															1
<i>Choerodron graphicus</i>	1			2				3							
Lethrinidae	1					44					15				
<i>Gymnocranius grandocculus</i>							3								
<i>Lethrinus atkinsoni</i>				1				7	3				5		1
<i>Lethrinus harak</i>								1							
<i>Lethrinus lentjan</i>								8	4						
<i>Lethrinus mahsena</i>									10						
<i>Lethrinus miniatus</i>															4
<i>Lethrinus nebulosus</i>							2	6					5		

Espèce	Campagne 2012 (saison chaude)					Campagne 2010 (saison chaude)					Campagne 2009 (saison fraîche)				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Lutjanidae	1					10					7				
<i>Aprion virescens</i>				1											
<i>Lutjanus adeti</i>							8								
<i>Lutjanus vitta</i>								2				6			1
Mullidae	1					0					3				
<i>Moolgarda seheli</i>															3
<i>Parupeneus cyclostomus</i>					1										
Scaridae	46					3					6				
<i>Cetoscarus bicolor</i>				2											
<i>Chlorurus microrhinos</i>		1	1	4	1										
<i>Chlorurus sordidus</i>	3		1	1	3										2
<i>Scarus altipinnis</i>			1												
<i>Scarus forstenu</i>		1													
<i>Scarus frenatus</i>	1	3		2	1										
<i>Scarus ghobban</i>		1		1	1				3					3	1
<i>Scarus niger</i>	1	1													
<i>Scarus prianatus</i>				1											
<i>Scarus rivulatus</i>	2	1	5		2										
<i>Scarus rubroviolaceus</i>		2													
<i>Scarus schlegeli</i>			2												

Espèce	Campagne 2012 (saison chaude)					Campagne 2010 (saison chaude)					Campagne 2009 (saison fraîche)				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Scombridae	1					0					0				
<i>Scomberomorus commerson</i>					1										
Serranidae	57					10					13				
<i>Cromileptes altivelis</i>					2										
<i>Epinephelus aerolatus</i>												4			2
<i>Epinephelus coloïde</i>												1			
<i>Epinephelus fasciatus</i>								2							
<i>Epinephelus maculatus</i>		1													
<i>Ephinephelus macrospilos</i>															1
<i>Epinephelus merra</i>								1					2		
<i>Plectropomus laevis</i>			1	2	1										
<i>Plectropomus leopardus</i>	10	9	8	7	15		5						3		
<i>Plectropomus maculatus</i>			1												
<i>Epinephelus polyphkadion</i>								2							
Siganidae	0					13					3				
<i>Siganus canaliculatus</i>									2						
<i>Siganus lineatus</i>							4	7						3	
Total	141					91					53				

La grande majorité des spécimens (59) appartenait à la famille des Lethrinidae (carnivore) dont les espèces *Lethrinus atkinsoni* (bossu doré) et *Lethrinus lentjan* (bossu d'herbe), représentent 16 et 12 individus, respectivement.

(2) Concentration en métaux dans la population globale

Dans les muscles des poissons, toutes espèces et zones confondues pour la campagne de 2012 et les deux campagnes de 2009-2010, les concentrations moyennes, médianes ainsi que les écarts-types et les valeurs de fourchettes minimales et maximales sont regroupées dans le Tableau 27 et représentées dans les Figure 54, Figure 55 et Figure 56.

Le nombre d'analyses quantifiables varie selon l'élément considéré et la campagne. Globalement, le Cu et le Fe voire le Mn, le Cr et l'As, sont mesurés dans la quasi-totalité des spécimens tandis que le Zn n'est en concentrations supérieures à la LQ que dans 79% de l'échantillonnage. Pour le Co et le Ni, les proportions chutant à 41 et 34%, respectivement ; le Cd n'étant mesuré dans aucun des spécimens pêchés en 2012, ni en 2009.

Toutes les zones, espèces et campagnes confondues, l'amplitude des niveaux de concentrations mesurées chez les poissons varie selon les métaux considérés, à savoir : les moyennes extrêmes vont de 0,04 µg/g pour le Ni à 3,31 µg/g pour le Zn. Globalement, les métaux peuvent être classés selon leur niveau moyen de bioaccumulation de la manière suivante : (Zn) > (As) = (Fe) > (Cu) > (Co) = (Mn) = (Ni) = (Cr) > (Cd).

Par ailleurs, outre cet ordonnancement, peu de différences sont observables avec les concentrations moyennes obtenues en 2012 et la campagne « saison chaude » de 2009 ; les valeurs de 2012 sont, soit légèrement plus fortes, soit légèrement plus faibles. A l'inverse, une différence notable est constatée entre ces valeurs et celles de la campagne de la « saison fraîche » de 2009 pour les éléments As, Cr, Fe et Mn. En effet, les concentrations moyennes sont de 1,8 à 8 fois plus élevées en 2009 lors de la campagne de « saison fraîche ».

Tableau 27 : Teneurs des métaux analysés dans les muscles des poissons moyennées sur l'ensemble des échantillons lors de la campagne en 2012 et de deux campagnes de 2009-2010, nombres d'observations au-dessus du seuil de quantification ainsi que valeurs médianes et écart-types.

CAMPAGNE 2012 (n=141)									
ELEMENT (µg/g pf)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Médiane	0,64	<0,01	0,12	0,03	0,16	1,11	0,06	0,05	2,37
Valeur Minimale	<0,20	<0,01	<0,04	<0,02	0,05	<0,40	<0,02	<0,04	<2,00
Valeur Maximale	24,52	<0,01	0,65	0,73	0,49	14,47	0,46	0,20	10,45
Moyenne	1,57	<0,01	0,16	0,05	0,21	1,65	0,07	0,06	3,19
Ecart-type	3,18	<0,01	0,12	0,07	0,11	1,87	0,06	0,04	1,77
Nb obs quantifiées	126	0	51	127	141	139	140	23	81
CAMPAGNE 2010 (n=91 ; campagne saison chaude)									
ELEMENT (µg/g pf)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Médiane	ND	<0,01	0,03	0,06	0,15	1,60	0,05	0,02	2,92
Valeur Minimale	ND	<0,01	<0,02	0,04	0,07	0,60	0,02	<0,01	2,20
Valeur Maximale	ND	<0,01	0,37	0,44	0,61	23,34	0,24	0,09	5,84
Moyenne	ND	<0,01	0,09	0,07	0,18	2,70	0,06	0,03	3,08
Ecart-type	ND	<0,01	0,10	0,06	0,10	3,39	0,03	0,02	0,68
Nb obs quantifiées	ND	0	42	91	91	91	91	38	91

CAMPAGNE 2009 (n=53 ; campagne saison fraîche)									
ELEMENT ($\mu\text{g/g pf}$)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Médiane	1,86	ND	0,04	0,07	0,16	1,62	0,06	0,03	2,82
Valeur Minimale	0,138	ND	<0,02	<0,02	0,042	0,58	<0,01	<0,01	2
Valeur Maximale	142,4	ND	0,208	1,134	0,634	42,12	0,662	0,27	9,94
Moyenne	5,18	ND	0,07	0,13	0,24	3,03	0,21	0,05	3,47
Ecart-type	19,39	ND	0,05	0,17	0,19	5,94	0,24	0,05	1,78
Nb obs quantifiées	53	ND	25	45	52	53	39	35	53

(ND) = VALEUR NON DETERMINEE

En termes de dispersion des résultats 2012 (Figure 54), les traitements statistiques des concentrations (toute espèce confondue) indiquent que les taux d'incorporation du Ni essentiellement, voire l'As, sont notablement constants pour 3 zones sur 5, Bonne Anse et Port de Goro faisant figures d'exception, respectivement. Pour le Zn, le taux de bioaccumulation est relativement constant mais pour 3 sites sur 5 : Ile Ouen, Port de Goro et Baie Kwé. En 2010 (saison chaude), les taux d'incorporation du Zn et Ni voire le Mn sont constants pour toutes les zones étudiées (Port de Goro, Havannah et Baie Kwé) (Figure 55). En 2009 (saison fraîche), les taux d'incorporation du Fe et Ni sont constants pour 3 zones sur 4, Ile Ouen faisant figure d'exception. Pour le Mn, le taux de bioaccumulation est également relativement constant pour 3 sites sur 4 dont Port de Goro fait figure d'exception (Figure 56).

Exception faite de Mn et de Cu, pour lesquels les concentrations moyennes dans les chairs évoluent peu d'une zone de pêche à l'autre (respectivement de $0,06 \pm 0,05$ à $0,09 \pm 0,09 \mu\text{g/g pf}$ et de $0,16 \pm 0,08$ à $0,22 \pm 0,13 \mu\text{g/g pf}$), les spécimens de la zone du Canal de la Havannah sont plus riches qu'ailleurs en As, Co, voire Zn ; les concentrations maximales de Cr, Fe, Ni et Zn étant dosées dans les spécimens de la Baie Kwé et/ou de Bonne Anse. Les concentrations moyennes les plus faibles en As, Co, Fe, Ni et Zn, sont observées à l'Ile Ouen, alors que pour Cr, Cu (voire Mn et Ni) les minimums sont enregistrés dans le Canal de la Havannah (Figure 54). En 2010 (saison chaude), les concentrations entre les zones demeurent homogènes pour plusieurs éléments à l'exception de Co. En effet, la concentration moyenne la plus élevée est dosée dans les spécimens du Canal de la Havannah et la plus faible à Port de Goro ; pour Cr et Fe les concentrations maximales ont été enregistrées à Baie Kwé et les minimales dans le Canal de la Havannah (Figure 55). En 2009 (saison fraîche), les spécimens du Port de Goro sont plus riches qu'ailleurs en Cr et Mn et dans une moindre mesure en Co, Cu et Zn ; les concentrations maximales de As et Fe étant dosées dans les spécimens de l'Ile Ouen. Les concentrations maximales de Ni ont été enregistrées à la fois à Port de Goro et à la fois à Ile Ouen. Les concentrations les plus faibles ont généralement été observées dans le Canal de la Havannah et à la Baie Kwé mais également à Port de Goro pour le Fe. Pour le Mn celle-ci a été révélée à la fois dans le Canal de la Havannah et à l'Ile Ouen tandis que pour l'As elle a été observée à Port de Goro (Figure 56).

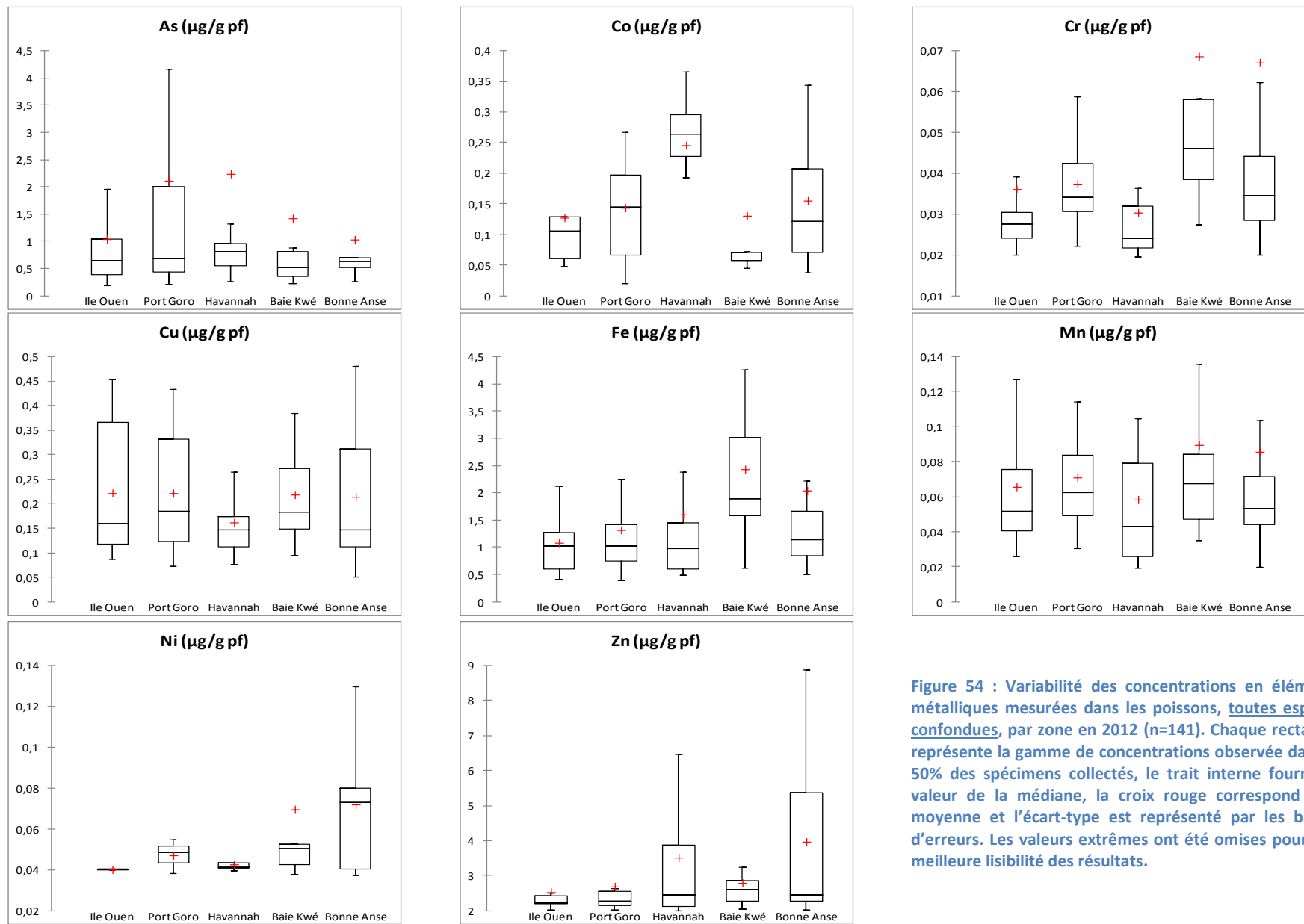


Figure 54 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées dans les poissons, toutes espèces confondues, par zone en 2012 (n=141). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes ont été omises pour une meilleure lisibilité des résultats.

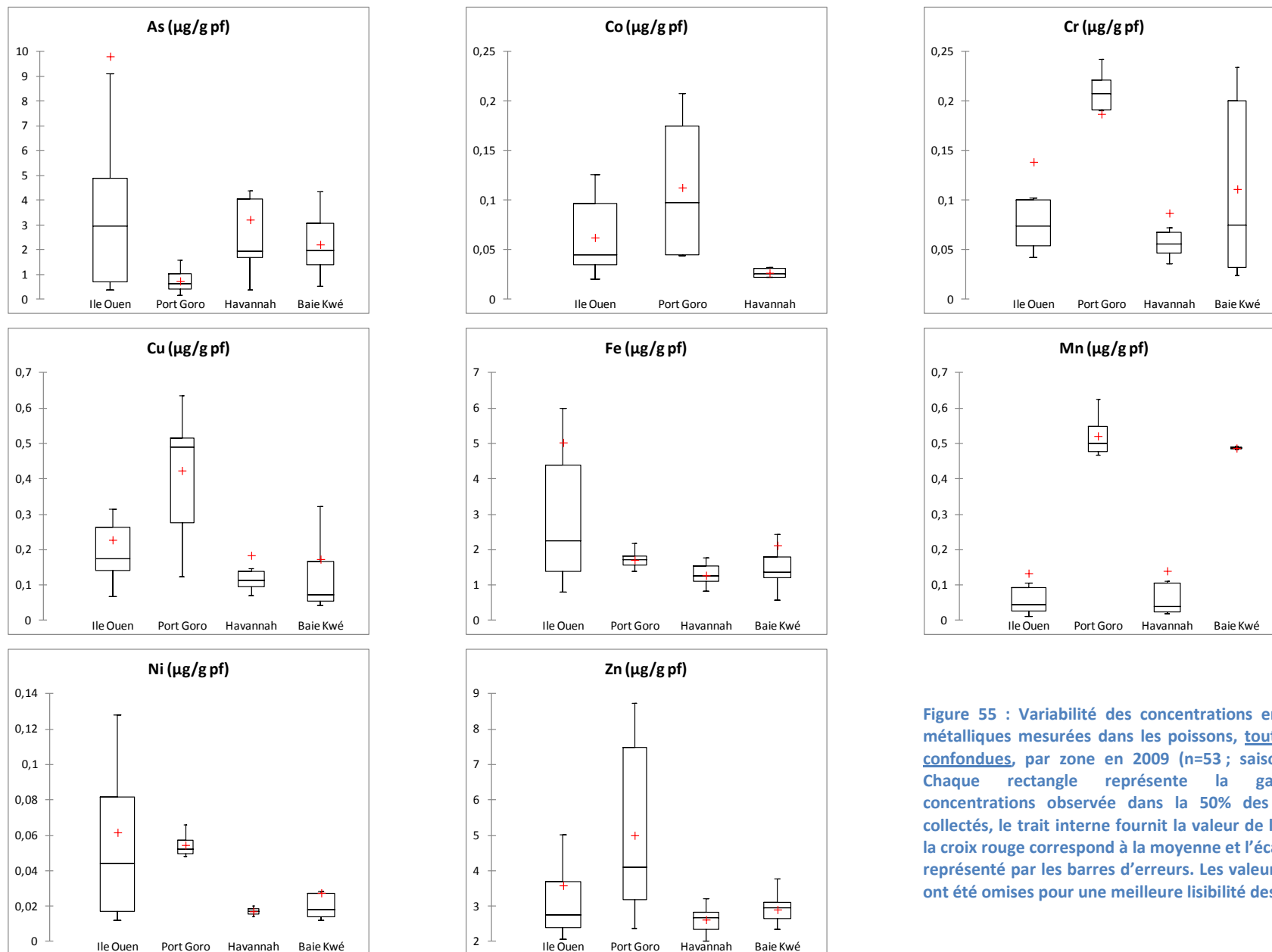


Figure 55 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées dans les poissons, toutes espèces confondues, par zone en 2009 (n=53 ; saison fraîche). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes ont été omises pour une meilleure lisibilité des résultats.

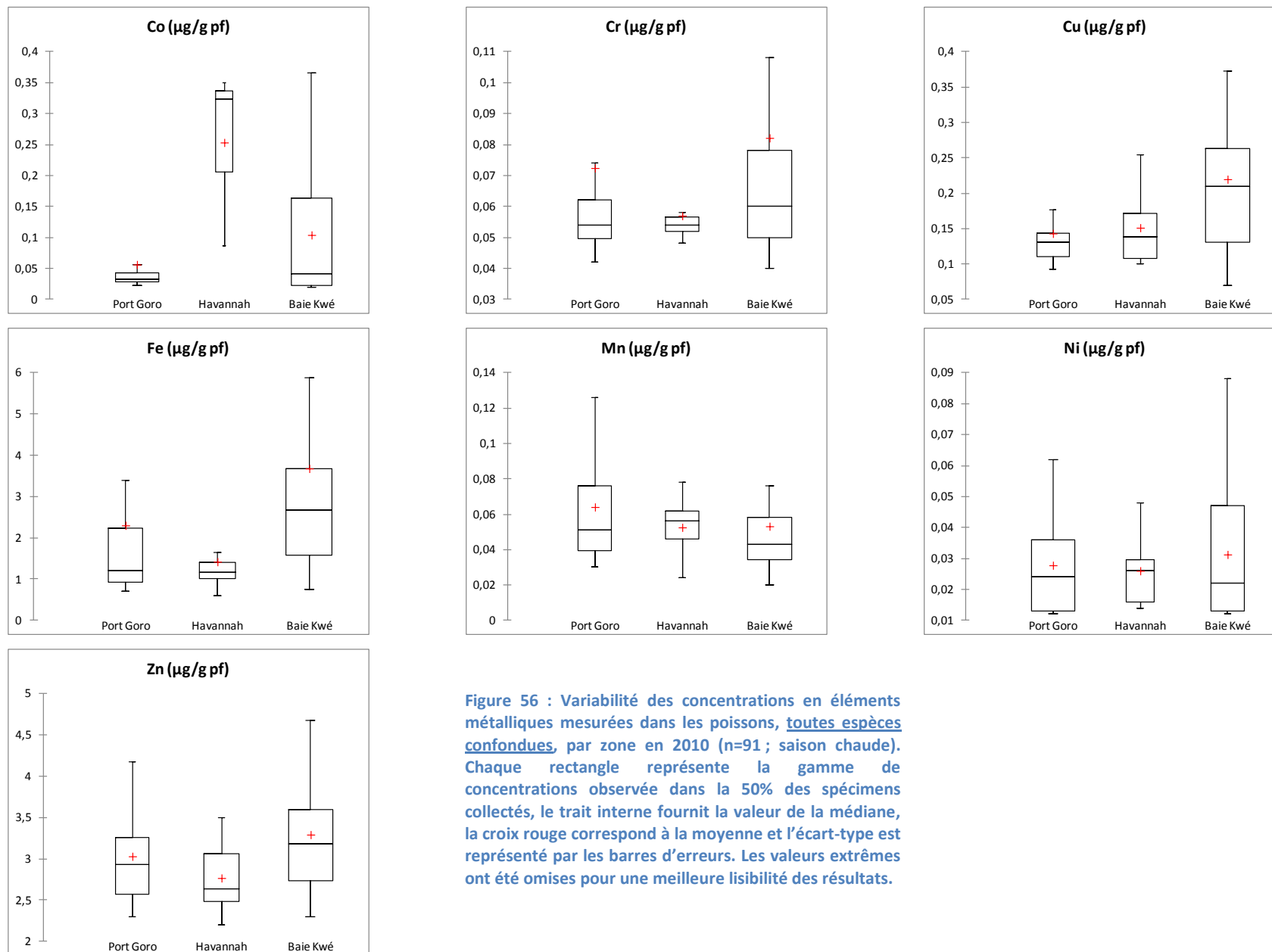


Figure 56 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées dans les poissons, toutes espèces confondues, par zone en 2010 (n=91 ; saison chaude). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes ont été omises pour une meilleure lisibilité des résultats.

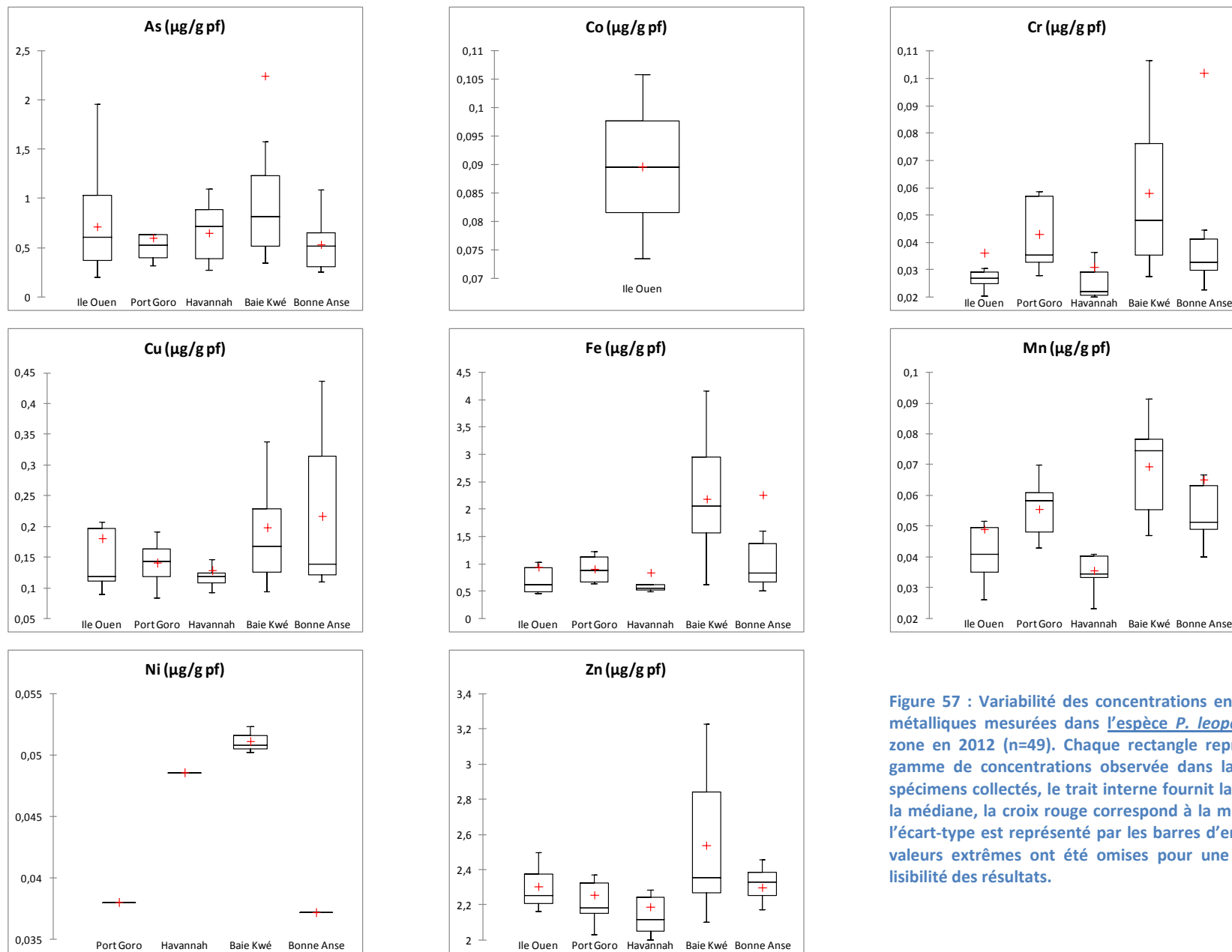


Figure 57 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées dans l'espèce *P. leopardus*, par zone en 2012 (n=49). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes ont été omises pour une meilleure lisibilité des résultats.

(3) Concentrations en métaux chez *Plectropomus leopardus*

Afin de limiter les biais dus à la variabilité interspécifique des espèces, seules les données obtenues pour l'espèce *P. leopardus*, ont été prises en compte dans un deuxième traitement statistique, en raison de la forte représentativité des prises en 2012 (n=49).

En 2012, les concentrations en Cr, Cu, Fe, Mn et Zn (voire As) les plus élevées ont été obtenues à Bonne Anse et/ou Baie Kwé (zones côtières). Pour ces mêmes éléments, les valeurs intermédiaires correspondent aux zones de l'île Ouen ou de Port Goro (zone référence terrigène), les plus faibles ayant été obtenues dans le secteur du Canal de la Havannah (Ionontéa, influence océanique). Pour l'As, la concentration moyenne maximale ($2,25 \pm 3,92 \mu\text{g/g pf}$) a été relevée en Baie Kwé et la plus basse à Bonne Anse ($0,53 \pm 0,28 \mu\text{g/g pf}$), ce qui dénote des écarts considérables. Pour le Ni et le Co, le nombre d'observations est insuffisant pour fournir une statistique robuste.

Il ressort de cette observation que, **hormis la différence dans les tailles (âge)**, l'intensité du terme source joue un rôle majeur dans le niveau de concentration, cet effet étant particulièrement avéré pour les prises réalisées dans la zone d'influence terrigène de la Baie Kwé et parfois Bonne Anse.

En effet, dans ces deux aires, les concentrations correspondent aussi avec les maxima dosés tant dans les chairs que dans les eaux et les sédiments (Le Grand et al., 2013 ; Fernandez et al., 2013).

Par ailleurs, parmi les individus *P. leopardus* collectés lors de la campagne de 2012 et lors de la campagne de la saison chaude de 2009, seuls 9 spécimens analysés en 2012 et 5 en 2009 partagent la même zone de pêche, la Canal de la Havannah.

Pour les 14 individus communs de *P. leopardus* collectés en 2009 (saison chaude ; n=5) et 2012 (saison chaude ; n=9) dans la zone du Canal de la Havannah, les valeurs obtenues montrent qu'en moyenne, les spécimens pêchés en 2012 sont de taille bien plus importante que ceux de 2009 (Tableau 28). Malgré cela, aucune augmentation des teneurs en métaux entre 2009 et 2012 n'a été constatée, exception faite du Ni en raison du nombre d'observations quantifiées insuffisant pour 2012. Paradoxalement, une tendance à la diminution d'un facteur d'environ 2 est toutefois constatée de 2009 à 2012 pour les éléments Fe, Mn et Cr.

Tableau 28 : Teneurs des éléments analysés dans les muscles des poissons *P. leopardus* moyennées sur l'ensemble des échantillons prélevés dans la zone du Canal de Havannah lors des campagnes de 2012 et 2010, nombres d'observations au-dessus du seuil de quantification (LQ) et valeurs médianes et écart-types.

CAMPAGNE 2012 (n=9 ; saison chaude)											
ELEMENT ($\mu\text{g/g pf}$)	POIDS FRAIS (g)	LONGUEUR (cm)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Médiane	2400	53	0,71	<0,01	<0,04	0,02	0,12	0,55	0,03	0,05	2,12
Valeur Minimale	1860	48	0,27	<0,01	<0,04	<0,02	0,09	0,48	0,02	<0,04	<2,00
Valeur Maximale	2995	59	1,10	<0,01	<0,04	0,07	0,23	2,38	0,06	0,05	2,59
Moyenne	2453	53	0,65	<0,01	<0,04	0,03	0,13	0,84	0,04	0,05	2,19
Ecart-type	426	4	0,29	<0,01	<0,04	0,02	0,04	0,64	0,01	-	0,22
Nb obs quantifiées			9	0	0	7	9	9	9	1	6

CAMPAGNE 2010 (n=5 ; saison chaude)											
ELEMENT ($\mu\text{g/g pf}$)	POIDS FRAIS (g)	LONGUEUR (cm)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Médiane	870	42	ND	<0,01	<0,04	0,06	0,17	1,36	0,06	0,02	2,90
Valeur Minimale	750	39	ND	<0,01	<0,04	0,04	0,11	0,98	0,06	<0,04	2,44
Valeur Maximale	2400	57	ND	<0,01	<0,04	0,10	0,27	3,90	0,07	0,03	3,50
Moyenne	1337	45	ND	<0,01	<0,04	0,06	0,19	1,80	0,06	0,02	2,92
Ecart-type	733	8	ND	<0,01	<0,04	0,02	0,08	1,20	0,01	0,01	0,45
Nb obs quantifiées			ND	0	0	5	5	5	5	3	5

(4) Valeurs toxicologiques de référence (VTR)

L'objectif principal de cette étude est de déterminer les niveaux de bioaccumulation de 8 métaux (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn) et 1 métalloïde (As) dans les chairs des poissons les plus couramment pêchés dans le sud du Territoire ; le principal objectif étant d'estimer la marge d'augmentation tolérable des concentrations pour la consommation humaine sans dépassement des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR).

Conformément aux préconisations de l'INERIS et à l'évaluation initiale du risque réalisée en 2009 (Breau et al., 2010), les VTR du JECFA (Comité expert joint OMS/FAO sur les additifs alimentaires) ont été prises en compte en priorité et à défaut celles de l'OMS.

Afin d'évaluer les risques toxicologiques, le JECFA a établi le concept de « Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire » (DHTP)⁵ ou de « Dose Mensuelle Tolérable Provisoire » (DMTP)⁶. Ces indications toxicologiques concernant la valeur de l'apport tolérable du contaminant pour l'être humain sont exprimées en milligramme par kilogramme de poids corporel (mg/kg pf).

Cette évaluation du risque nécessite de connaître approximativement la consommation moyenne en produits de la mer par la population locale. Malheureusement, il est difficile de disposer de ces données spécifiquement pour la région du sud de la Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie. De ce fait, les données obtenues lors de deux études menées en Province Nord (Labrosse et al., 2006) et sur l'île d'Ouvéa (Leopold et al., 2004) ont été prises en considération. Ces auteurs démontrent que les consommations moyennes annuelles (52 semaines) de poissons sont $28,0 \pm 2,0$ kg/habitant et $63 \pm 9,7$ kg/unité de consommation⁷, respectivement. Ainsi, selon ces données obtenues en Nouvelle-Calédonie, la consommation hebdomadaire moyenne de poissons serait donc comprise entre 538 g et 1211 g par personne.

⁵ Le seuil DHTP pour les contaminants alimentaires comme les métaux lourds dont les propriétés sont cumulatives. Sa valeur représente l'exposition à ces contaminants hebdomadaires admise pour l'homme, involontairement associée à la consommation d'aliments autrement sains et nutritifs.

⁶ Le seuil DMTP utilisé pour un contaminant alimentaire dont les propriétés cumulatives ont une demi-vie de longue durée dans le corps humain. Sa valeur représente l'exposition mensuelle à un contaminant admise pour l'homme, involontairement associé à des aliments autrement sains et nutritifs.

⁷ Si la plupart des études quantifient le niveau de consommation annuel en kg/habitant, l'utilisation des Unités de Consommation (UC), établie selon l'échelle d'Oxford, permet de prendre en compte de façon simplifiée la structure en âge des ménages. Avec cette pondération, le nombre de personnes est ramené à un nombre d'unités de consommation (UC). Le chef de ménage compte pour 1 UC, les individus de plus de 14 ans pour 0.7 UC et les enfants de moins de 14 ans pour 0.5 UC. De cette façon, le niveau de consommation du ménage est relié à sa taille.

Les résultats concernant l'évaluation du risque sanitaire en 2012 et en 2009 pour les métaux et l'As liés à la consommation de poisson dans l'ensemble de la zone d'étude (toutes zones confondues) sont résumés dans le Tableau 29. Ainsi, pour le Cd, le Cu, le Fe, le Ni et le Zn (métaux pour lesquels la VTR existent), les indices de risques (IR) restent inférieurs à 1 ce qui équivaut à des doses maximales ingérées en-deçà des seuils limites préconisés par la JECFA et par l'OMS. Pour l'As, le Co, le Cr et le Mn, ni le JECFA, ni l'OMS n'ont encore émis d'indication.

En ce qui concerne l'As, l'apport total de ce metalloïde dans le régime alimentaire humain est généralement dominé par la forme organique de l'arsenic provenant des fruits de mer. Malheureusement, aucune indication toxicologique n'est donnée pour celui-ci par le JECFA, ni par l'OMS. Cependant, la DHTP pour les formes inorganiques (présentes surtout dans l'eau) est établie par ce groupe d'experts. A titre d'information seulement le DHTP pour l'arsenic inorganique est de 0,015 mg/kg/semaine (JECFA, 2012b), soit de 0,450 mg/semaine pour un enfant de 30 kg, soit de 1,050 mg/semaine pour une adulte de 70 kg. Cette valeur a cependant été remise en cause par ce comité en 2010 et devrait être prochainement sensiblement abaissée.

Tableau 29 : Synthèse de l'évaluation du risque sanitaire lié à la consommation des poissons pêchés, toutes espèces et zones confondues en 2012 et 2009/2010 (saison chaude et saison fraîche). Seuil de consommation maximale de chairs ou de muscles frais (g) à ne pas dépasser pour un enfant de 30 kg et un adulte de 70 kg ; consommation exprimée en grammes (g) de poids frais (pf), par jour (j), semaine (s) ou mois (m).

METAUX	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Indication Toxicologique établie par JECFA	-	0,025 ⁸ mg/kg/m	-	-	0,5 ⁹ mg/kg/j	0,8 ¹⁰ mg/g/j	-	-	1 ⁹ mg/kg/j
Indication Toxicologique établie par l'OMS	-	-	-	-	-	-	-	0,005 mg/kg/j ¹¹	-
Indication Toxicologique (mg/kg/s)	-	0,006	-	-	3,5	5,6	-	0,035	7
Concentration moyenne mesurée dans les poissons en 2012 (µg/g de pf)	1,573	<0,010	0,155	0,048	0,207	1,652	0,073	0,060	3,190
Apport minimal hebdomadaire pour une consommation de 538 g de poisson (mg/s)	0,846	<0,005	0,083	0,026	0,111	0,889	0,039	0,032	1,716
Valeur seuil pour un enfant de 30 kg (mg/s)	-	0,188	-	-	105	168	-	1,05	210
Indice de risque (apport vs valeur seuil)	-	<1	-	-	<1	<1	-	<1	<1
Apport maximal hebdomadaire pour une consommation de 1211 g de poisson (mg/s)	1,905	<0,012	0,188	0,058	0,134	2,001	0,088	0,073	3,863
Valeur seuil pour un adulte de 70 kg (mg/s)	-	0,438	-	-	245	392	-	2,45	490
Indice de risque (apport vs valeur seuil)	-	<1	-	-	<1	<1	-	<1	<1

⁸ JECFA, 2012a. Seventy-third meeting Rome, 8-17 June 2010 Summary and Conclusions, 17p.

⁹ JECFA, 1983. Evaluation of certain food additives and contaminants. Twenty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health Organisation, Technical Report Series 696.

¹⁰ WHO, 1997. Guideline for drinking water quality. Second edition, Volume1, Recommendations.

¹¹ JECFA, 1982. Evaluation of certain food additives and contaminants. Twenty-sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health Organisation, Technical Report Series 683.

Concentration moyenne mesurée dans les poissons en 2009-2010 ($\mu\text{g/g}$ de pf)	5,184	<0,010	0,082	0,092	0,201	2,818	0,103	0,038	3,223
Apport minimal hebdomadaire pour une consommation de 538 g de poisson (mg/s)	2,789	<0,005	0,044	0,049	0,108	1,516	0,055	0,020	1,734
Valeur seuil pour un enfant de 30 kg (mg/s)	-	0,180	-	-	105	168	-	1,05	210
Indice de risque (apport vs valeur seuil)	-	<1	-	-	<1	<1	-	<1	<1
Apport maximal hebdomadaire pour une consommation de 1211 g de poisson (mg/s)	6,278	<0,012	0,099	0,111	0,243	3,412	0,125	0,046	3,903
Valeur seuil pour un adulte de 70 kg (mg/s)	-	0,420	-	-	245	392	-	2,45	490
Indice de risque (apport vs valeur seuil)	-	<1	-	-	<1	<1	-	<1	<1

Les évaluations du risque ont également été réalisées par zone (données non présentées) pour les deux campagnes (2012 et 2009-2010). Il en résulte qu'aucune distribution particulière des indices de risque (IR) n'est observable. Ainsi, pour le Cd, Cu, Fe, Ni et Zn (métaux pour lesquels la VTR existe), les indices de risques (IR) restent inférieurs à 1, ce qui équivaut à des doses maximales ingérées en-deçà de celles préconisées par la JECFA et par l'OMS.

(5) Conclusion

Les résultats obtenus lors des deux suivis sanitaires montrent globalement que les muscles de poissons accumulent préférentiellement certains métaux tel que le Zn, Fe, As et dans une moindre mesure le Cu ; les concentrations les plus basses sont observées pour le Mn, Ni et le Co.

Globalement, les niveaux de bioaccumulation révélés en 2012 sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés en 2009 et 2010, exception faite pour l'As, Cr, Fe et Mn lors de la campagne de 2009.

L'absence de concentrations quantifiables de Cd dans les chairs de poisson s'explique par le fait que le métal ne fait pas partie des éléments constituant les latérites de Nouvelle-Calédonie et de ce fait, se trouve à l'état de traces dans l'environnement marin. En revanche, les faibles concentrations de Ni et Co mesurées peuvent paraître très surprenantes en raison de la nature même des latérites. Toutefois, il est reconnu pour ces deux métaux que les taux de bioaccumulation par les organismes marins sont très faibles (INERIS, 2005).

Tandis que l'étude sur les *P. leopardus* a montré clairement une spatialisation des concentrations en métaux, excepté pour As, Co et Ni, à savoir par ordre d'importance décroissant : Bonne Anse/Baie Kwé (zone côtière sous impact direct potentiel), Ile Ouen/Port Goro (zone côtière référence) et Havannah (zone océanique). Cette spatialisation n'est pas clairement établie lorsqu'on traite statistiquement les données de toutes les espèces de poisson confondues.

L'évaluation de l'apport en métaux consécutifs à une consommation de poissons pêchés dans cette zone d'études révèle que les doses sont très inférieures aux valeurs maximales préconisées par la JECFA et par l'OMS pour les deux campagnes.

Pour les poissons, la surveillance à une fréquence triennale des niveaux de bioaccumulation des métaux tels que le Co, Ni, Cr, mais aussi du Zn, semble suffisante afin de vérifier que les apports chez l'Homme restent inférieurs aux doses d'ingestion tolérables fixées par la JECFA.

II.5.2.c. Concentrations en métaux chez les Invertébrés

(1) Echantillonnage

Les deux suivis sanitaires ont permis d'échantillonner 462 spécimens, respectivement 259 en 2009-2010 (Etat de référence) et 203 en 2013, distribués entre 7 familles, 9 genres et 9 espèces pour 2 modes alimentaires différents (filtreur et herbivore voire détritivore ; Tableau 30).

Les 203 spécimens pêchés en 2013 se distribuent entre 129 bivalves appartenant à deux espèces (la clovisse *Atactodea striata* et la palourde *Anadara antiquata*) et 74 gastéropodes de quatre espèces (le bigorneau *Turbo setosus*, l'araignée *Lambis lambis*, le sauteur *Strombus luhuanus*, et le troca *Trochus niloticus*). En regroupant les espèces de petites tailles (*A. striata*) en lot de 6 à 10 individus, le nombre analysé en 2013 est de **97** (Tableau 31).

Pour 2009-2010, au total des deux campagnes, seulement 231 spécimens ont été sélectionnés, soit 132 bivalves appartenant à 5 espèces (*A. striata*, *A. antiquata*, le bénitier rouleuseur *Hippus hippopus*, la grisette *Gafrarium tumidum* et le bénitier *Tridacna maxima*) et 99 gastéropodes de quatre espèces (*L. lambis*, *S. luhuanus*, *T. setosus*, *T. niloticus*). En regroupant les espèces de petites tailles (*A. striata*) en lot de 3 à 4 individus, le nombre d'échantillons analysés en 2009-2010 a été de **227** (Tableau 30).

Il ressort qu'entre 2009 et 2013 un total de **324 échantillons** a été analysé dont majoritairement des gastéropodes (192/324), suivis par les bivalves (132/324).

Les détails concernant le nombre de spécimens analysés selon l'espèce, la zone d'étude et l'année de campagne sont représentés dans le Tableau 31.

En résumé, les individus analysés pour la campagne 2013 appartiennent majoritairement (80/97) aux trois familles suivantes :

- Strombidae (herbivore voire détritivore) : 39 individus pour 2 espèces (araignée et sauteur) ;
- Turbidae (herbivore voire détritivore) : 24 individus pour 1 espèce (bigorneau) ;
- Mesodesmatidae (filtreur) : 17 lots de 6 à 10 individus pour 1 espèce (clovisse).

En 2009-2010, les individus analysés étaient repartis majoritairement (188/227) en cinq familles :

- Strombidae : 85 individus pour 2 espèces (araignée et sauteur) ;
- Tridacnidae : 49 individus pour 2 espèces (bénitier rouleuseur et bénitier) ;
- Mesodesmatidae : 37 lots de 3 à 4 individus pour 1 espèce (clovisse) ;
- Turbinidae : 17 individus pour 1 espèce (bigorneau) ;
- Arcidae : 17 individus pour 1 espèce (palourde).

Tableau 30 : Nombre de coquillages récoltés en 2009,2010 et 2013 destinés à l'analyse des éléments métalliques dans les chairs entières ou dans les muscles, groupés par zone et selon leur Classe (bivalves ou gastéropodes).

ZONE	NB INDIVIDUS	REGIME TROPHIQUE		DIVERSITE TAXONOMIQUE		
		Bivalvia	Gastropoda	Familles	Genres	Espèces
Z1-Bonne Anse (Bonne Anse 3)	52	32	20	5	6	6
Z3 - Baie Kwé (Kwé2 et Kwé4)	168	102	66	4	5	5
Z4 - Port de Goro (Récif Tomo)	168	96	72	7	9	9
Z5 - Ile Ouen (Ouen3 et Ouen4)	74	40	34	5	6	6
Total général	462	270	192	7	9	9

Tableau 31 : Nombre d'analyses dans les chairs, classés par famille, espèce, zone de collecte et par l'année de campagne.

Espèce	Campagne 2013 (saison fraîche)					Campagne 2010 (saison chaude)					Campagne 2009 (saison fraîche)				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Bivalves															
Arcidae	6					0					17				
<i>Anadara antiquata</i>	3		1	1	1									17	
Mesodesmatidae	17					47					22				
<i>Atactodea striata</i>	4		5	3	5			47					8	10	4
Tridacnidae	0					2					47				
<i>Hippopus hippopus</i>								2					13	23	
<i>Tridacna maxima</i>														11	
Veneridae	0					0					6				
<i>Gafrarium tumidum</i>														6	
Gastéropodes															
Strombidae	39					12					73				
<i>Lambis lambis</i>	5		6	3	5			5					8	19	3
<i>Strombus luhuanus</i>	4		5	6	5			7					13	25	5
Trochidae	11					7					9				
<i>Trochus niloticus</i>	5			1	5			7						9	
Turbinidae	24					0					17				
<i>Turbo setosus</i>	6		6	6	6								9	3	5
Total	97					68					191				

(2) Concentration en métaux

Le Tableau 32 présente les concentrations moyennes et médianes ainsi que les écarts-types et les valeurs de fourchettes minimales et maximales pour les métaux et métalloïde analysés dans les chairs des bivalves, toutes espèces et zones confondues (n=23). Ces valeurs sont comparées à celles obtenues en 2009 lors de la définition de l'Etat de Référence (Breau et al., 2010).

Pour les muscles des gastéropodes, le Tableau 33 présente les concentrations moyennes et médianes ainsi que les écarts-types et les valeurs de fourchettes minimales et maximales pour les métaux et métalloïde analysés, toutes espèces et zones confondues (n=74). Ces valeurs sont comparées à celles obtenues en 2009 lors de la définition de l'Etat de Référence (Breau et al., 2010).

Remarque : en 2009, les organismes ont été collectés en saison fraîche sur les zones 2 (Baie Kwé), zone 3 (Port de Goro) et zone 4 (Ile Ouen). Lors de la campagne de 2010 (saison chaude), tous les mollusques prélevés provenaient uniquement de la zone 2 (Baie Kwé).

Pour 2013, le nombre d'analyses quantifiables (Concentrations > LQ) atteint 100% chez les bivalves, tous les éléments étant mesurés dans la totalité des spécimens (23 bivalves), comme en 2009, à l'exception de Co dont les concentrations supérieures aux LQ n'ont été mesurées que dans 87% de l'échantillonnage. En ce qui concerne les gastéropodes, à l'exception de Co, tous les autres éléments sont mesurés dans la totalité des spécimens (74 gastéropodes ; 100% de concentrations > LQ), comme en 2009. Cependant, en 2013, le pourcentage de mesures quantifiées pour Co s'élève à 92% de l'échantillonnage tandis qu'en 2009, il n'était qu'à 20%.

CHEZ LES BIVALVES (Tableau 32)

Chez les bivalves, toutes les zones et espèces confondues, l'amplitude des concentrations observée varie selon les métaux considérés et les valeurs moyennes extrêmes vont de 0,32 µg/g pf pour le Cd à 40,73 µg/g pf pour le Fe. Globalement, les métaux peuvent être classés selon leur niveau moyen de bioaccumulation de la manière suivante : (Fe) > (Zn) > (As) > (Ni) > (Cu) = (Cr) > (Mn) > (Co) > (Cd). Ce classement diffère principalement de celui de 2009 par, notamment, l'importance des concentrations en Mn. En effet, les niveaux de concentrations sont quasiment identiques d'une campagne à l'autre, pour tous les éléments, exception faite de Mn et Ni dont les valeurs obtenues en 2013 sont significativement plus faibles qu'en 2009 (18 et 3 fois, respectivement) et de Co pour qui elles sont, à contrario, significativement plus fortes (8 fois).

CHEZ LES GASTEROPODES (Tableau 33)

Chez les gastéropodes, toutes les zones et espèces confondues, l'amplitude des concentrations observée varie selon les métaux considérés et les valeurs moyennes extrêmes vont de 0,35 µg/g pf (pour le Cr) à 20,53 µg/g pf (pour le Fe). Globalement, les métaux peuvent être classés selon leur niveau moyen de bioaccumulation de la manière suivante : (Fe) > (Zn) = (Mn) > (As) > (Cu) > (Ni) > (Cd) > (Co) = (Cr). Ce classement est relativement similaire à celui observé en 2009. Par ailleurs, outre cet ordonnancement, à l'exception de Cu et Co, les concentrations des éléments sont quasiment identiques d'une campagne à l'autre, les valeurs obtenues en 2013 pour Cu étant significativement plus faibles qu'en 2009. En revanche, pour le Co, elles sont significativement plus fortes.

Tableau 32 : Teneurs des métaux analysés dans les chairs des bivalves moyennées sur l'ensemble des échantillons des campagnes de 2013 et 2009 (campagne saison fraîche), nombre d'observations au-dessus du seuil de quantification ainsi que valeurs médianes et écart-types.

ELEMENT (µg/g pf)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	
										CAMPAGNE 2013 (n=23)
Médiane	4,35	0,06	0,36	0,71	0,73	34,06	0,65	1,58	10,27	
Valeur Minimale	2,22	0,04	0,17	0,15	0,15	8,23	0,23	0,52	5,83	
Valeur Maximale	6,68	2,58	0,83	1,48	1,87	113,47	0,89	2,19	15,99	
Moyenne	4,33	0,32	0,41	0,74	0,77	40,73	0,63	1,47	10,05	
Ecart-type	1,17	0,60	0,18	0,38	0,44	23,22	0,17	0,43	2,11	
Nb obs quantifiées	23	23	23	23	23	23	23	23	23	
CAMPAGNE 2009 (n=92 ; campagne saison fraîche)										
Médiane	4,91	0,14	0,04	0,23	0,35	18,52	2,95	2,74	3,27	
Valeur Minimale	1,24	0,01	<0,01	0,03	0,02	0,65	0,09	0,39	0,30	
Valeur Maximale	10,75	1,90	0,34	6,76	1,99	288,47	159,25	36,02	63,13	
Moyenne	5,04	0,27	0,05	0,61	0,50	48,40	11,47	4,53	8,06	
Ecart-type	1,86	0,39	0,05	1,06	0,47	65,99	21,91	5,18	10,15	
Nb obs quantifiées	92	92	80	92	92	92	92	92	92	

Tableau 33: Teneurs des métaux analysés dans les muscles des gastéropodes moyennées sur l'ensemble des échantillons lors de la campagne en 2013 et 2009 (campagne saison fraîche), nombre d'observations au-dessus du seuil de quantification ainsi que valeurs médianes et écart-types.

ELEMENT ($\mu\text{g/g pf}$)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
	CAMPAGNE 2013 (n=74)								
Médiane	3,48	0,19	0,14	0,23	0,89	17,80	2,48	0,72	4,44
Valeur Minimale	0,97	0,03	<LQ	0,06	0,10	4,34	0,15	0,13	1,50
Valeur Maximale	12,89	2,90	2,23	1,76	7,18	93,17	32,86	3,94	19,42
Moyenne	4,04	0,56	0,36	0,35	1,43	20,53	5,81	1,09	6,00
Ecart-type	2,55	0,64	0,47	0,36	1,48	13,68	8,16	1,02	4,08
Nb obs quantifiées	74	74	68	74	74	74	74	74	74
	CAMPAGNE 2009 (n=99 ; campagne saison fraîche)								
Médiane	3,55	0,40	0,05	0,30	2,45	17,52	4,15	0,96	6,26
Valeur Minimale	1,34	0,04	<0,02	0,12	0,48	8,40	0,10	0,07	0,74
Valeur Maximale	6,70	1,36	0,13	2,39	7,01	126,24	11,66	3,96	12,67
Moyenne	3,61	0,47	0,06	0,41	2,75	24,12	4,13	1,13	6,28
Ecart-type	1,29	0,35	0,03	0,37	1,54	18,61	2,97	0,83	2,47
Nb obs quantifiées	99	99	20	99	99	99	99	99	99

(3) Bioaccumulation des éléments

Toute espèce et zone confondues, les concentrations moyennes en métaux entre les deux classes, bivalves et gastéropodes, montrent des distributions différentes (Figure 59 et Figure 61). Ainsi, les éléments Cr, Fe, Zn et dans une moindre mesure Ni, sont 1,4 à 2 fois plus concentrés dans les chairs des bivalves que dans les muscles des gastéropodes. A l'inverse, Cu et Mn semblent, en moyenne, se bioaccumuler 2 et 7 fois plus dans les muscles des gastéropodes, respectivement. Seuls As et Co voire Cd sont mesurés à des niveaux moyens tout à fait comparables dans les deux classes.

Par ailleurs, lorsque ces valeurs sont détaillées selon les zones de collecte, on constate que les teneurs sont plus hautes chez les gastéropodes que chez les bivalves, de manière très significative, à Bonne Anse pour Cu, mais dans l'ensemble des quatre zones pour le Mn. Pour les autres métaux (Cr, Ni, Fe et Zn), les teneurs chez les bivalves sont généralement plus élevées que chez les gastéropodes, de manière significative à Ile Ouen (pour les quatre métaux), voire Port de Goro (pour Zn seulement).

La comparaison avec les données de 2009, la tendance est inversée pour le Mn (plus élevée chez les bivalves en 2009 ; Figure 58, Figure 59, Figure 60 et Figure 61). Par ailleurs, le Cd et As ont également montré une distribution selon la classe, tandis que les concentrations sont restées homogènes entre les deux classes en 2013.

Enfin, en ce qui concerne la tendance temporelle globale de 2009 à 2013, les teneurs en Co ont augmenté à la fois chez les bivalves et chez les gastéropodes. Pour Ni et Mn, les teneurs diminuent chez les bivalves tandis qu'elles restent invariables chez les gastéropodes. *A contrario*, les teneurs en Cu diminuent chez les gastéropodes et restent stables chez les bivalves. Pour les autres éléments, les variations ne sont pas significatives.

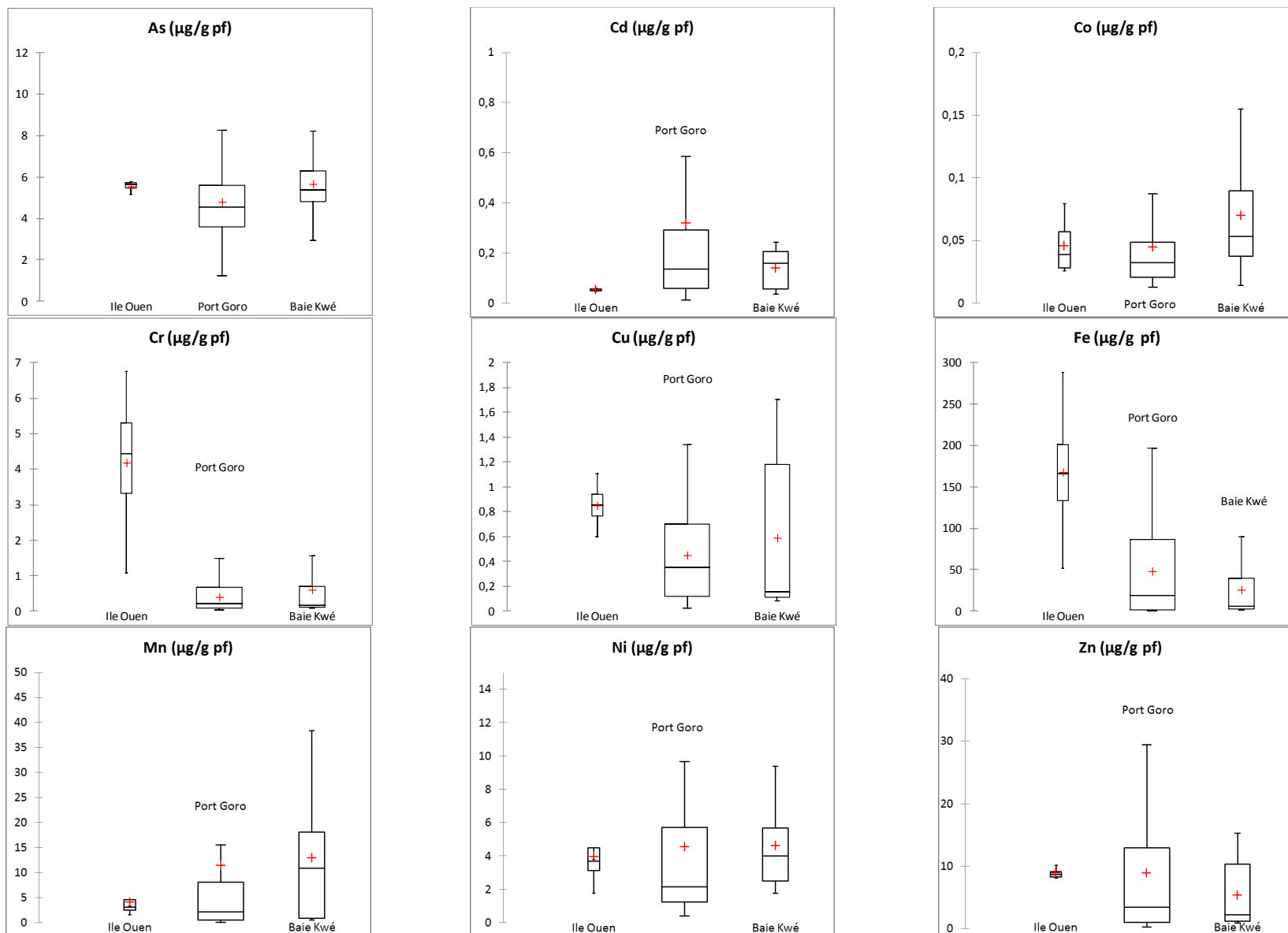


Figure 58 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées dans les bivalves, toutes espèces confondues, par zone en 2009 (n=92 ; saison fraîche). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes ont été omises.

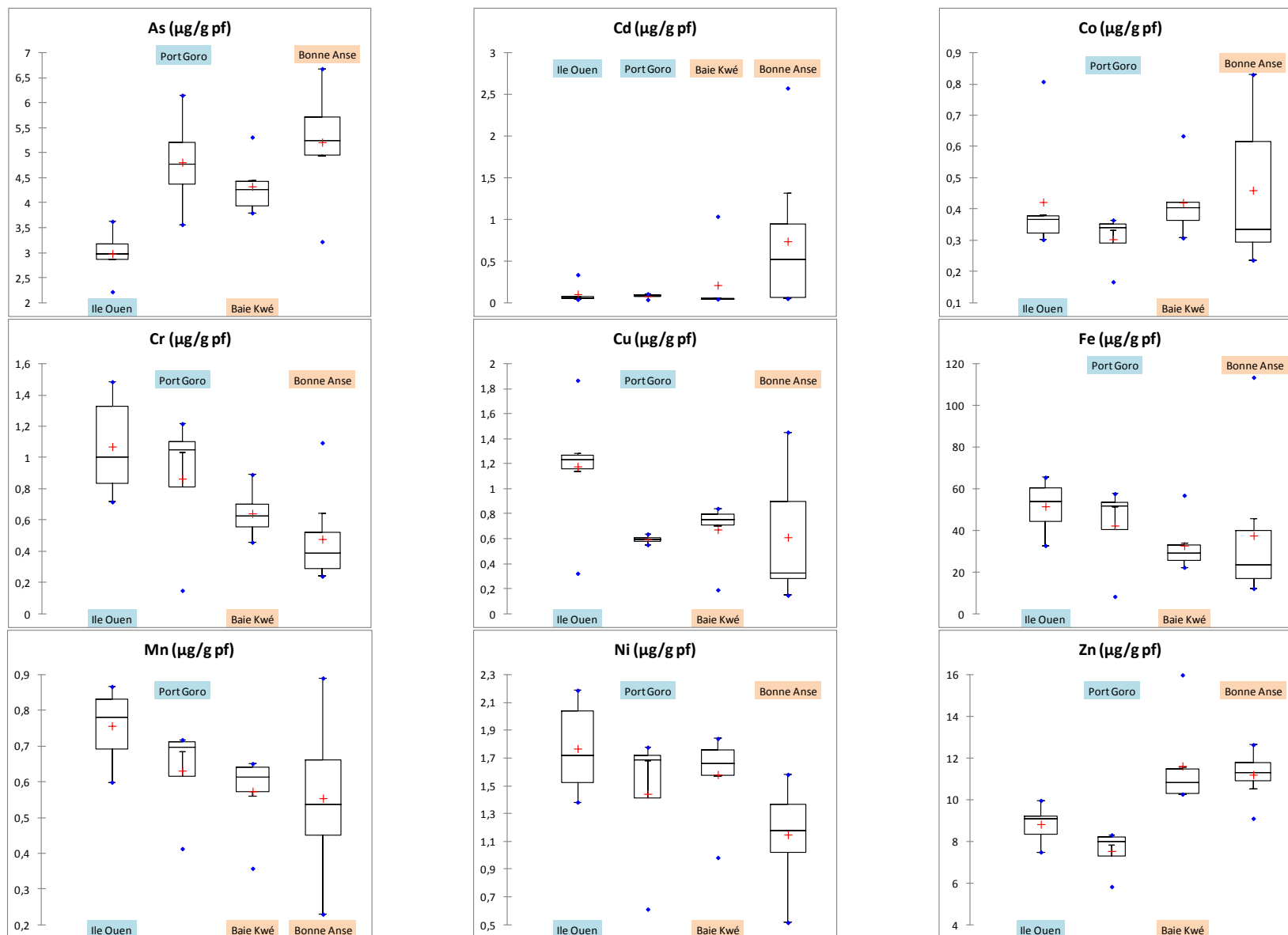


Figure 59 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées chez les bivalves, toutes espèces confondues, par zone en 2013 (n=23). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne, l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs et la valeur minimale et maximale par les points bleus.

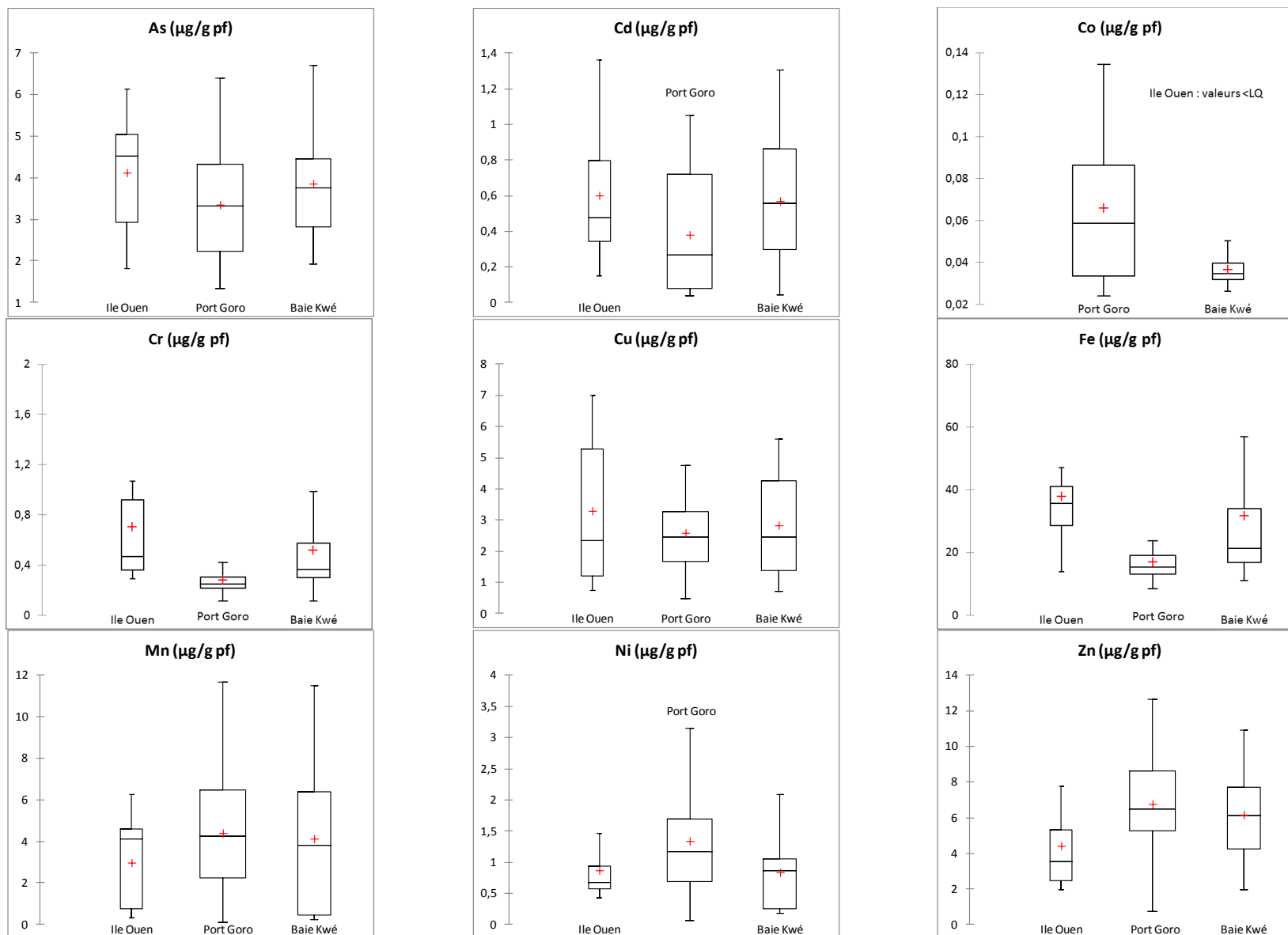


Figure 60 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées dans les gastéropodes, toutes espèces confondues, par zone en 2009 (n=99 ; saison fraîche). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes ont été omises.

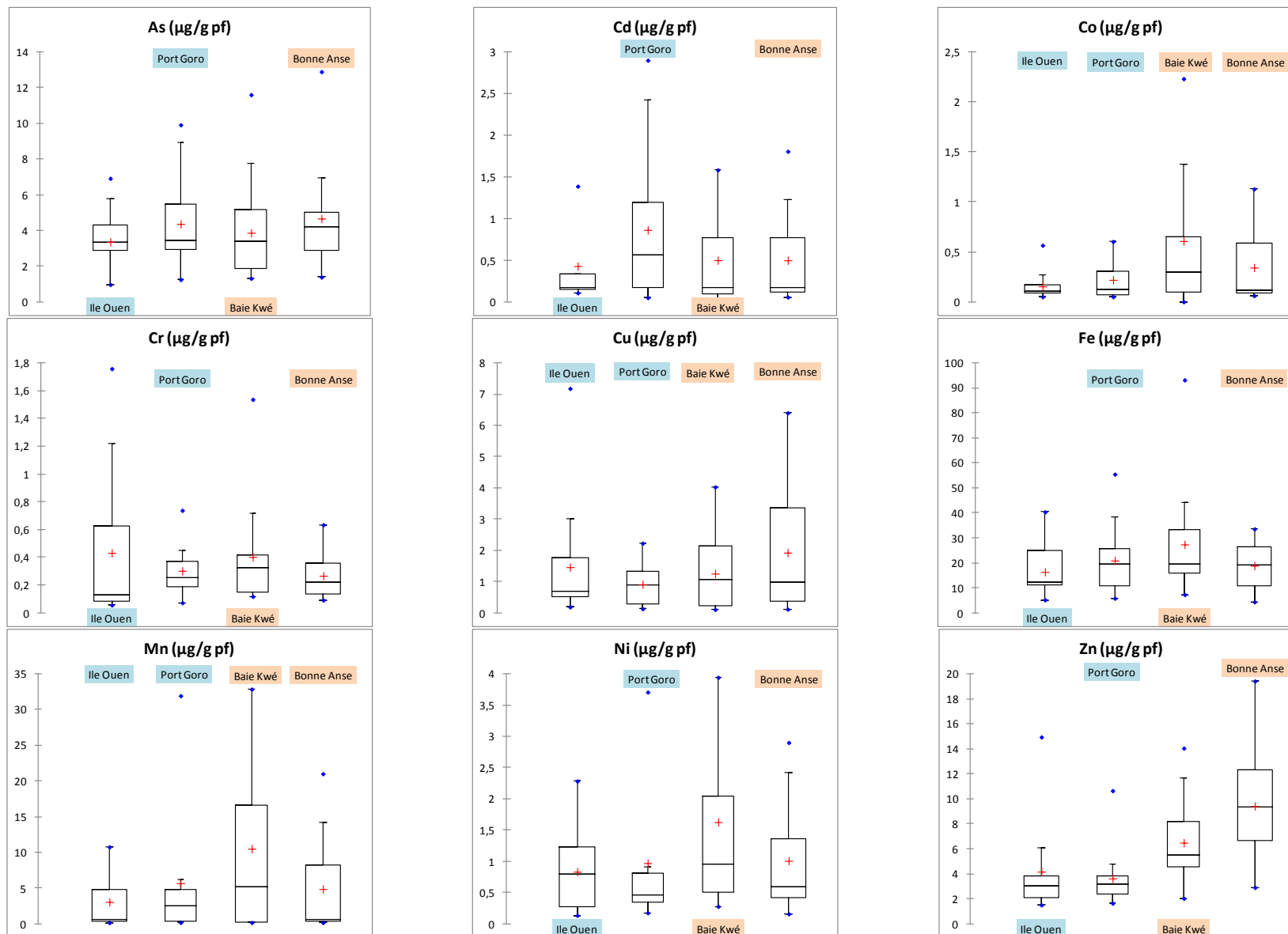


Figure 61 : Variabilité des concentrations en éléments métalliques mesurées chez les gastéropodes, toute espèce confondue, par zone en 2013 (n=74). Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne, l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs et la valeur minimale et maximale par les points bleus.

(4) Valeurs toxicologiques de référence (VTR)

Les résultats concernant l'évaluation du risque sanitaire par les éléments chimiques liés à la consommation de mollusque dans l'ensemble de la zone d'étude (4 zones confondues) sont conduits pour les espèces *A. striata*, *L. lambis*, *S. luhuaus* et *T. setosus* en raison de leur bonne représentativité.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer les niveaux de bioaccumulation de 8 métaux (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn) et 1 métalloïde (As) dans les chairs ou les muscles des mollusques les plus couramment pêchés dans le sud du Territoire afin d'estimer si les concentrations de ces éléments dépassent les seuils tolérables préconisés pour la consommation humaine. Ces seuils tolérables sont calculés à partir des VTRs.

Conformément aux préconisations de l'INERIS et à l'évaluation initiale du risque réalisée en 2009 (Breau et al., 2010), les VTR du JECFA (Comité expert joint OMS/FAO sur les additifs alimentaires) ont été prises en compte en priorité et à défaut celles de l'OMS.

Le JECFA a établi les VTRs pour Cd, Cu, Fe et Zn, tandis que pour Ni, la VTR a été établie par l'OMS. Pour As, Co, Cr et Mn, ni le JECFA, ni l'OMS n'ont pour le moment encore établi de VTR.

Afin d'évaluer les risques toxicologiques, le JECFA a établi le concept de « Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire » (DHTP)¹² ou de « Dose Mensuelle Tolérable Provisoire » (DMTP)¹³. Ces indications toxicologiques concernent la valeur de l'apport tolérable en contaminant pour l'être humain et sont exprimées en milligramme par kilogramme de poids corporels (mg/kg pc) ou en « valeur-seuil » pour un enfant de 30 kg et un adulte de 70 kg. Convertie en « dose-seuil », celle-ci est confrontée à la dose de contaminant ingérée afin de calculer les indices de risques (IR).

La notion de « dose » nécessite de connaître, d'abord, la consommation moyenne approximative en produits de la mer par la population locale, et le niveau de concentration du contaminant dans ces produits. Étant donné qu'aucune donnée relative à la consommation des mollusques en Nouvelle Calédonie n'a été recensée, les IRs ne peuvent être calculés. Cependant, à partir des concentrations moyennes en métaux obtenues lors de cette étude, il est possible d'évaluer la consommation maximale de chair et/ou muscle pour ne pas atteindre la « dose-seuil » prescrite.

Mis à part quelques exceptions, la comparaison avec les données 2013 et 2009/2010 (état de référence) met en évidence des observations similaires en ce qui concerne les éléments présentant un risque pour l'Homme (Tableau 34 et Tableau 35).

En effet, le risque lié à la contamination en **Cd** suite à la consommation de *S. luhunaus* est mentionné pour toutes les zones de pêche (Baie Kwé, Ile Ouen et Port de Goro). Par ailleurs, en 2009, tous les

¹² Le seuil DHTP est calculé pour les contaminants alimentaires comme les métaux lourds dont les propriétés sont cumulatives. Sa valeur représente l'exposition à ces contaminants hebdomadaires admise pour l'homme, involontairement associés à la consommation d'aliments autrement sains et nutritifs.

¹³ Le seuil DMTP est utilisé pour un contaminant alimentaire dont les propriétés cumulatives ont une demi-vie de longue durée dans le corps humain. Sa valeur représente l'exposition mensuelle à un contaminant admise pour l'homme, involontairement associé à des aliments autrement sains et nutritifs.

spécimens de *S. luhunaus* présentaient, toutes zones confondues, un risque vis-à-vis de **Ni**. En revanche, en 2013 seulement les spécimens pêchés à la Baie Kwé comportaient un risque pour les consommateurs.

Il en est de même pour **Ni** qui présente un risque avec la consommation des espèces *A. striata* et *L. lambis* provenant de ces mêmes zones de pêche. De surcroît, en 2009, les spécimens de *A. striata* pêchés à Baie Kwé et Ile Ouen présentaient un risque vis-à-vis de **Fe**, en 2013, ce risque provient des individus pêchés à Port de Goro et l'Ile Ouen.

De même, les *T. setosus* pêchés à Baie Kwé et Ile Ouen présentaient un risque de contamination en Cd en 2009, tandis que seuls les spécimens pêchés à Port de Goro en 2013 présentent un risque avéré. Enfin, les *T. setosus* pêchés à Ile Ouen présentaient un risque avec Fe et Ni, à contrario de 2013.

Rappel : en 2009, la Bonne Anse n'a pas fait l'objet d'une récolte.

Tableau 34 : Ingestion maximale en métaux à ne pas dépasser pour un enfant de 30 kg et un adulte de 70 kg, seuil exprimé en microgrammes (μg) par jour (j) ou mois (m).

MÉTAUX	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Indication Toxicologique établie par JECFA	-	25 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{m}^{14}$	-	-	500 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}^{15}$	800 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}^{16}$	-	-	1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}^{11}$
Indication Toxicologique établie par l'OMS	-	-	-	-	-	-	-	11 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}^{17}$	-
Valeur seuil pour un enfant de 30 kg	-	750 $\mu\text{g}/\text{m}$	-	-	15 000 $\mu\text{g}/\text{j}$	24 000 $\mu\text{g}/\text{j}$	-	330 $\mu\text{g}/\text{j}$	30 000 $\mu\text{g}/\text{j}$
Valeur seuil pour un adulte de 70 kg	-	1 750 $\mu\text{g}/\text{m}$	-	-	35 000 $\mu\text{g}/\text{j}$	56 000 $\mu\text{g}/\text{j}$	-	770 $\mu\text{g}/\text{j}$	70 000 $\mu\text{g}/\text{j}$

¹⁴ JECFA, 2012b. Seventy-third meeting Rome, 8-17 June 2010 Summary and Conclusions, 17p.

¹⁵ JECFA, 1982. Evaluation of certain food additives and contaminants. Twenty-sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health organization, Technical Report Series 683.

¹⁶ JECFA, 1983. Evaluation of certain food additives and contaminants. Twenty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health organization, Technical Report Series 696.

¹⁷ WHO, 2007. Nickel in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 30p. Geneva: World Health Organization.

Tableau 35 : Risque sanitaire lié à l'ingestion de métaux fortement concentrés (Cd, Fe et Ni) des espèces *A. striata*, *L. lambis*, *S. luhunus* et *T. setosus* consommées. Evaluation réalisée pour chacune des zones et campagnes (2009 et 2013). Seuil de consommation maximale de chairs ou de muscles frais à ne pas dépasser pour un enfant de 30 kg et un adulte de 70 kg ; consommation exprimée en grammes (g) de poids frais (pf), par jour (j) pour Fe et Ni, ou par mois (m) pour Cd.

Espèce	Élément	Campagne 2013			Campagne 2009		
		Limite de consommation maximale (g pf/j ou m)		Zone présentant un risque potentiel pour les consommateurs	Limite de consommation maximale (g pf/j ou m)		Zone présentant un risque potentiel pour les consommateurs
		Enfant de 30 kg	Adulte de 70 kg		Enfant de 30 kg	Adulte de 70 kg	
<i>A. striata</i>	Cd	-	-		-	-	
	Fe	448, 458	1044, 1069	Port de Goro, Ile Ouen	386, 143	900, 333	Baie Kwé, Ile Ouen
	Ni	354, 194, 192, 179	826, 453, 448, 417	Bonne Anse, Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen	128, 183, 84	299, 426, 195	Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen
<i>L. lambis</i>	Cd	-	-		-	-	
	Fe	-	-		-	-	
	Ni	141, 106, 103, 241	330, 248, 240, 562	Bonne Anse, Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen	292, 220, 389	681, 512, 908	Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen
<i>S. luhunus</i>	Cd	504, 598, 417, 605	1177, 1396, 972, 1412	Bonne Anse, Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen	833, 1114, 842	1943, 2598, 1964	Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen
	Fe	-	-		-	-	
	Ni	284	663	Baie Kwé	302, 193, 393	705, 451, 917	Baie Kwé, Port de Goro, Ile Ouen
<i>T. setosus</i>	Cd	1620, 1690	3781, 3944	Bonne Anse, Port de Goro	1622, 1578	3785, 3683	Baie Kwé, Ile Ouen
	Fe	-	-	-	443	1033	Ile Ouen
	Ni	-	-	-	362	844	Ile Ouen

(5) Conclusion

Les valeurs moyennes montrent que chez les spécimens de *A. striata* une augmentation significative est constatée en 2013, pour le Co tandis que les teneurs Ni et As diminuent de manière significative. Chez les spécimens de *L. lambis*, la teneur en Co a également augmenté de manière significative en 2013 ainsi que les teneurs en Mn et Ni, tandis que As et Cu, voire Zn et Cd diminuent. Chez les spécimens de *S. luhunus*, la teneur en Cd augmente significativement, tandis que les teneurs en Ni, Zn et As, voire Cu diminuent. Enfin, chez les spécimens de *T. setosus*, une augmentation significative est constatée pour Co, tandis que la teneur en Fe, voire en Cu diminuent.

Ces capacités de bioaccumulation différentes soulignent que le mode de régulation est unique à chaque espèce. La comparaison avec les concentrations dans les chairs de poissons montre que les bivalves et gastéropodes bioaccumulent davantage les métaux tels que le Cd, Ni et Co ; ces métaux étant en faibles concentrations, voire en limite de quantification, dans les filets de poisson (Kumar-Roiné et al., 2013).

Sur la base des espèces les plus sensibles, la distribution des concentrations en métaux peut être regroupée de la manière suivante :

- As, Cd et Cu : pas de spatialisation avérée ;
- Co et Zn : Baie Kwé ≥ Bonne Anse > Port de Goro ≥ Ile Ouen (*L. lambis* et *A. striata*, respectivement) ;
- Cr et Fe : Port de Goro = Ile Ouen > Baie Kwé > Bonne Anse (*A. striata*) ;
- Mn et Ni : Port de Goro = Baie Kwé = Bonne Anse > Ile Ouen (*L. lambis*).

Il apparaît donc que la spatialisation des niveaux de bioaccumulation de Cr, Fe, Mn et Ni, ne se distribue pas selon la typologie de zones, c'est-à-dire, en fonction du degré d'impact des apports terrigènes directs (Baie Kwé/Bonne Anse) ou indirects (Ile Ouen/Port de Goro) ; Co faisant exception puisque les niveaux de bioaccumulation sont maximums à la Baie Kwé.

En effet, il apparaît qu'aux stations St19 (Bonne Anse), St14 (Port de Goro) et St13 (Ile Ouen), les sédiments sont composés d'une forte proportion de pélites ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$; 23 à 50%), tandis que la station St06 (Baie Kwé) montre une composition amplement majoritaire en fractions grossières ($\varnothing > 40 \mu\text{m}$; 85%). De surcroît, la fraction pélitique des sédiments (silts et argiles) détermine à elle seule 90% des capacités géochimiques de transfert, propriété qui est à relier au potentiel toxique du sédiment, comme l'ont montré de nombreux auteurs depuis quelques années (ex. : Mayer et Fink, 1979 ; Ackerman, 1980 ; Deely et Fergusson, 1994 ; He et Walling, 1996). Les mollusques du suivi sanitaire étant des organismes benthiques filtreurs ou herbivores et/ou détritivores, leur mode de nourrissage dépend étroitement du flux de matières particulaires organo-minérales. Ce rapprochement avec la géochimie suggère donc que les niveaux de bioaccumulation des éléments par les organismes collectés à Bonne Anse, Port de Goro et l'Ile Ouen, s'expliquent partiellement par la nature plus fine des sédiments qui composent les fonds de ces sites.

D'après les VTRs préconisées par le JECFA et par l'OMS, l'évaluation des apports en métaux consécutif à une consommation de ces organismes révèle qu'il existe un risque de contamination avéré en Cd et Ni et modéré en Fe pour les consommateurs ; un constat identique dès 2009 a été effectué, pour les mêmes métaux.

Chapitre III - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'exploitation des latérites nickélifères à faible teneur a nécessité la mise au point d'une technologie nouvelle afin d'extraire le métal du minerai. Cette nouvelle technologie fait appel à un procédé de solubilisation par voie humide à l'aide d'une solution d'acide concentré à haute température. De ce fait, cette méthodologie (l'hydrométallurgie) requière de grands volumes d'eau qui, après traitement pour abaisser les concentrations en polluants divers contenus dans la solution d'extraction du nickel, sont rejetés dans le milieu naturel.

Les domaines potentiellement impactés par le projet hydro-métallurgique de Vale-NC, à savoir, le Canal de la Havannah (rejet d'effluents et apports en particules) et la Baie du Prony (influences des installations portuaires et industrielles) ont fait l'objet d'études réalisées dès le début des années 2000. Toutefois, les critiques de l'INERIS (2002 et 2003) ont rapidement montré la nécessité de développer des travaux spécifiques à un milieu dont les caractéristiques sont celles d'un lagon oligotrophe tropical non altéré par l'activité anthropique. A partir de 2005, des études complémentaires ont donc été exigées, il en a résulté l'expertise commandée par la province Sud et le programme de recherches intégré (« *Programme prédictif, 2006-2009* ») proposé par l'IRD.

Sur la base des connaissances jusqu'en 2009, une sélection d'indicateurs a été réalisée pour constituer un tableau de bord destiné au suivi des différents compartiments environnementaux. Les indicateurs sélectionnés répondent, en grande partie, aux critères de pertinence et de faisabilité sur le long terme et figurent dans les recommandations du « *Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin de Nouvelle-Calédonie* » (Bélieff et al., 2011). Ces indicateurs sont porteurs d'une vision globale avec un message clair sur l'évolution des écosystèmes. Ils concernent :

- La qualité physico-chimique de l'eau.
- Les apports sédimentaires ;
- La bioaccumulation des métaux ;
- Les effets toxiques précoces ;
- La veille sanitaire des produits de la mer.

Bien que perfectibles, les réseaux de surveillance physico-chimique et écotoxicologique actuellement en place, sont opérationnels grâce au développement d'indicateurs spécifiques et à un repositionnement des stations de suivi initiales. Cette dernière étape a été conduite au terme du « *Programme prédictif* » sur la base des résultats de la modélisation couplée « *chimie-transport* » des espèces dissoutes et particulaires. Cet outil a permis de sélectionner avec précision les « aires sentinelles » sur lesquelles sont implantées les stations de surveillance : elles permettent à présent, de déceler toute évolution de la composition physico-chimique induite par l'activité industrielle, aussi minime soit-elle, notamment grâce à la sensibilité des analyses conduites dans la colonne d'eau (sels nutritifs, métaux dissous et flux de particules).

Principaux résultats des campagnes de suivi

Le suivi de la qualité physico-chimique de la colonne d'eau montre que, si dans l'ensemble, les valeurs moyennes en métaux latéritiques dissous demeurent dans la fourchette des concentrations admises (Bélieff et al., 2011) pour les 3 types de domaines sentinelles (Baie Kwé ; Canal de la

Havannah et Rade Nord ; Figure 62), il convient d'être attentif, dès à présent, aux variations constatées en Cr(VI), Mn et Ni dans les eaux marines influencées par les embouchures. En effet, un renforcement de la surveillance paraît nécessaire au niveau de la Kwé (St06) et du Creek de la Rade du Nord (St15) en raison, respectivement, de l'augmentation en apports terrigènes constatés et de l'activité industrielle en amont. En Rade Nord, un paramètre supplémentaire, le faible coefficient de renouvellement des eaux, ajoute un degré au risque encouru par le milieu. D'ores et déjà, pour la Rade Nord, la fréquence d'échantillonnage a été doublée, faisant passer celle-ci à une occurrence trimestrielle.

En dehors de ces deux zones critiques où l'empreinte minière, par ailleurs, était attendue, les niveaux de concentrations observés pour le reste du domaine suivi ne montrent aucun signe d'impact. Cette observation est conforme aux conclusions de la modélisation des mécanismes de réactivité géochimique avec le milieu et de dispersion des effluents (cf. : *Volume 2/3*).

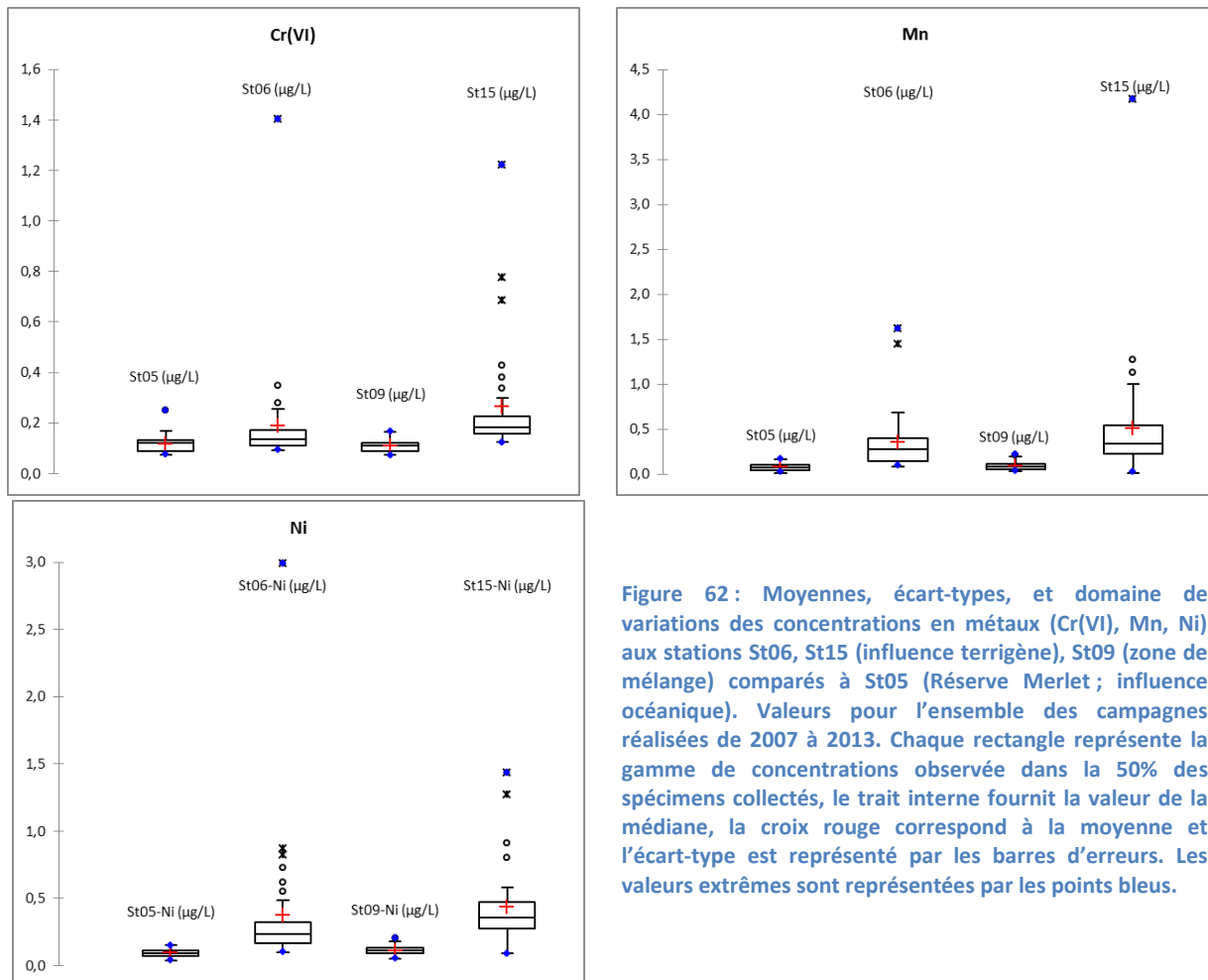


Figure 62 : Moyennes, écart-types, et domaine de variations des concentrations en métaux (Cr(VI), Mn, Ni) aux stations St06, St15 (influence terrigène), St09 (zone de mélange) comparés à St05 (Réserve Merlet ; influence océanique). Valeurs pour l'ensemble des campagnes réalisées de 2007 à 2013. Chaque rectangle représente la gamme de concentrations observée dans la 50% des spécimens collectés, le trait interne fournit la valeur de la médiane, la croix rouge correspond à la moyenne et l'écart-type est représenté par les barres d'erreurs. Les valeurs extrêmes sont représentées par les points bleus.

En termes de flux de MES, si les valeurs entrent toutes dans les gammes observées antérieurement pour les saisons fraîches et les saisons chaudes, une augmentation globale est, cependant, perceptible depuis deux ans (2012 et 2013). En effet, à saison équivalente (chaude ou froide), les flux de métaux sont quasiment tous nettement supérieurs aux valeurs de l'Etat de Référence de 2007, cette observation étant particulièrement avérée en Baie Kwé où les flux moyens en métaux calculés

pour chaque campagne montrent qu'une augmentation temporelle est notable. Cette évolution est clairement mise en évidence en saison chaude en raison des régimes météorologiques classiques qui favorisent l'érosion (multiplication des épisodes pluvieux significatifs). Dans le Canal de la Havannah, où les flux de métaux sont presque 20 fois moins importants que dans la baie Kwé (St06), le phénomène semble globalement identique avec, en particulier, une forte augmentation constatée en janvier 2013. Toutefois, l'évolution des flux se singularise dans ce secteur par une valeur très forte obtenue en mars 2007, cette valeur qui est unique, conduit à demeurer prudent sur cette apparente augmentation dans le Canal et à poursuivre l'acquisition de séries temporelles de haute fréquence par piégeage séquentiel des MES.

En ce qui concerne l'évolution temporelle de ces métaux dans les sédiments de surface, globalement, les quantités totales de cobalt, chrome, manganèse, nickel et zinc sont relativement constantes depuis 2006. Toutefois, pour les secteurs directement exposés à l'influence terrigène, une différence est remarquée dans la répartition de certaines formes géochimiques de ces métaux. En effet, les phases carbonatées extraites sont particulièrement enrichies en métaux, ce qui semble bien en corrélation avec l'augmentation des concentrations en métaux dissous ; les concentrations étant plus élevées au droit du Creek de la Rade Nord que dans la Baie Kwé et pour le manganèse notamment. Il est également à noter qu'au niveau de ces stations, une augmentation des apports en matériel fin (pélites) et une modification de la composition en espèces minérales (apparition de lizardite et talc), transparaissent également. Ces changements s'expliquent par le remaniement qui a concerné, dans un premier temps, les couches latéritiques de surface riches en Fe et pauvres notamment en Co, Ni, celles-ci cédant progressivement la place aux horizons exploitables, inversement, appauvris en Fe mais enrichis en Co et Ni.

En terme de suivi écotoxicologique sur les organismes transplantés (caging = bio-surveillance active), les concentrations en métaux varient selon l'élément considéré et également selon la station, mais par ordre d'importance décroissante en terme de bioconcentration, le classement suivant est observable :

$$\text{Zn} > \text{Fe} > \text{As} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Ni} = \text{Cr} > \text{Co}.$$

Le suivi de la qualité écotoxicologique de la colonne d'eau montre qu'aucune anomalie n'est observée (ou n'a pu être mise en évidence) exception faite de l'année 2013 où l'on constate, chez les deux bio-indicateurs (*Isognomon Isognomon* et *Lobophora variegata*) une bioaccumulation (CI>1) significative au niveau de stations dites de « baie » pour l'ensemble des métaux sentinelles de l'érosion des sols latéritiques et /ou de l'activité minière (Cr, Co, Mn et Ni).

Toutefois, une évolution temporelle semble se dessiner, pour des éléments comme Cr (exception faite de 2012), Fe, Mn et Ni dont les niveaux de bio-accumulation progressent, bien qu'il faille un retour d'expérience plus robuste. A l'inverse, pour Cu et Zn, aucun comportement cohérent ne peut être dégagé.

Pour les deux bio-indicateurs, les mécanismes d'incorporation de As restent un cas à part qu'il faudra examiner en relation avec sa spéciation (disponibilité) dans le milieu marin.

Les quatre marqueurs latéritiques (Co, Cr, Fe et Ni) dont les distributions sont identiques, permettent le classement des stations selon leurs niveaux des concentrations : St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06.

Les concentrations bio-accumulées et les concentrations en métaux dissous des eaux de sub-surface (surface + mi-profondeur) du suivi physico-chimique de la colonne d'eau (août 2013) ont montré une très bonne corrélation pour les métaux Cr et Ni, notamment pour les macro-algues. Ces résultats statistiques reconfirment le classement des stations ci-dessus proposé. Cependant, une relation doit encore être étudiée avec les MES collectées par piégeage, celles-ci étant représentatives de l'ensemble des populations de particules organo-minérales qui constituent la voie trophique en métaux pour les bivalves.

En matière de suivi sanitaire (bio-surveillance passive), les études concernent les poissons et les mollusques :

- Pour les poissons, les résultats obtenus montrent globalement que les muscles (filets) accumulent préférentiellement certains métaux tel que le Zn, Fe, As et dans une moindre mesure le Cu ; les concentrations les plus basses sont observées pour le Mn, Ni et Co, signatures des métaux appartenant au cortège latéritique. Ces observations sont en accord avec les travaux mentionnés par l'INERIS (2005) soulignant que les taux de bioaccumulation pour Ni et Co par les organismes marins sont généralement très faibles.

Pour le Zn, sa bioaccumulation est importante et l'étude de 2012 a montré que celle-ci est fonction de l'âge et du régime alimentaire du poisson ; les herbivores *N. unicornis* sont parmi les poissons dont les chairs possèdent les concentrations les plus fortes.

En terme de distribution spatiale, seule l'étude détaillée des *P. leopardus* (n=14) a montré clairement que les niveaux de concentrations en métaux (excepté pour As, Co et Ni) dessinaient le gradient suivant : Bonne Anse/Baie Kwé (zone côtière sous impact direct potentiel), Ile Ouen/Port Goro (zone côtière référence) et Havannah (zone océanique).

Globalement, les niveaux de bioaccumulation révélés en 2012 sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés en 2009 (Etat de référence) sauf pour l'As et Cr.

L'évaluation de l'apport en métaux consécutivement à une consommation de poissons pêchés dans cette zone d'études révèle que les doses sont très inférieures aux valeurs maximales préconisées par le JECFA et par l'OMS pour les deux années.

- Pour les mollusques, les résultats obtenus (2009/2010 et 2013) montrent globalement que, toutes espèces et zones confondues, les concentrations moyennes en métaux entre les deux classes (bivalves et gastéropodes) se distribuent de manières différentes. Ainsi, les éléments Cr, Fe, Zn et dans une moindre mesure Ni, sont plus concentrés dans les chairs des bivalves que dans les muscles des gastéropodes. A l'inverse, Cu et Mn semblent se bioaccumuler davantage dans les muscles des gastéropodes ; pour Mn, les concentrations les plus élevées étant relevées chez les bivalves en 2009. Seuls As et Co, voire Cd, sont mesurés à des niveaux moyens tout à fait comparables dans les deux classes.

Comme pour les poissons, les concentrations les plus basses sont observées pour le cobalt chez les deux groupes (INERIS, 2005).

D'après les VTRs préconisées par le JECFA et par l'OMS, le risque potentiel de dépassement des doses en Cd et Ni est avéré et modéré en Fe.

La comparaison des concentrations en métaux chez les mollusques (2009-2010-2013) et les poissons (2009-2010-2012) indique que les mollusques, bioaccumulent davantage que les poissons les métaux à l'exception de Co.

Perspectives

Si la nécessaire précision des données est satisfaisante en raison des progrès accomplis en matière de méthodologie, de techniques de prélèvement et d'analyse, un effort doit encore être consenti pour assurer la représentativité des phénomènes mesurés et améliorer les interprétations qui en découlent. Cet effort doit notamment porter sur les indicateurs déployés et la fréquence pour décrire avec plus de précision les tendances qui semblent maintenant se dessiner, notamment pour différencier les secteurs impactés et les aires exemptes de toute modification des pressions.

En effet, la finesse des analyses, notamment pour les métaux dissous, permet d'ores et déjà de pointer une évolution dont il faudra accroître le niveau de surveillance. A ce titre, au niveau de la Rade Nord (St15), plusieurs mesures ont été prises. D'une part, la fréquence du suivi physico-chimique de la colonne d'eau a été relevée à une occurrence trimestrielle. Par ailleurs, les études conduites au laboratoire (AEL) vont permettre dans un très proche futur de déployer une nouvelle méthodologie intégratrice complémentaire (DGT) pour le dosage de métaux dissous. D'autre part, un mouillage de pièges à sédiments de type séquentiel est maintenant programmé au droit du Creek de la Rade Nord avec une fréquence semestrielle pour compléter les investigations.

Par ailleurs, compte tenu des niveaux de concentration mesurés au droit du Creek de la Rade Nord et de l'emprise de l'usine, il a été implanté une nouvelle station de bio-indicateurs par transplantation (bio-surveillance active). De surcroît, une deuxième voie d'amélioration est proposée, elle concerne le déploiement d'une, voire deux nouvelles espèces de bivalve bio-accumulateur récemment étudiés par AEL et qui seront testées *in-situ* très prochainement ; ces espèces permettront de spécifiquement cibler le suivi de certains métaux dont le cuivre (Port de commerce).

Pour les poissons, la surveillance à une fréquence triennale des niveaux de bioaccumulation des métaux tels que le Co, Ni, Cr, mais aussi du Zn, semble suffisante afin de vérifier que les apports chez l'Homme restent inférieurs aux doses d'ingestion tolérable fixées par le JEFCA.

Enfin, l'amélioration de ce suivi sanitaire passera par :

- la proposition d'une redéfinition de la stratégie d'échantillonnage afin de diminuer les variations dues à la biologie de l'animal (ex. cibler les espèces et la taille, et augmenter le nombre minimal d'espèces par zone) pour pouvoir faire des comparaisons plus robustes ;
- la création d'une sixième zone de suivi située dans la Baie de Prony à proximité du port commercial et de l'usine.

Pour les mollusques, la surveillance à une fréquence minimale triennale des niveaux de bioaccumulation des métaux tels que Ni, Cd et Fe mais aussi Co, Cr, Mn, voire Zn, est conseillée.

Afin de parfaire le dispositif de surveillance sanitaire des mollusques consommés, il apparaît également impératif d'apporter certaines améliorations dans la démarche scientifique. Deux suggestions émanent des études afin de différencier les apports et améliorer les interprétations :

- La création d'une cinquième zone de suivi située loin des secteurs de forte sédimentation

(par exemple St05-Ilot Kié ou St21-Ilot Ugo) servant de zone de référence ;

- La modification de la stratégie d'échantillons, afin de diminuer la variabilité biologique, en ciblant dans la mesure du possible, les tailles et en augmentant le nombre des espèces de bivalves.

REFERENCES

- Ackermann F, 1980. A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of estuarine and coastal sediments. *Environment Technology Letters* 1, pp 518–527.
- Appleby P.G. and Oldfield F., 1978. The calculation of Lead-210 dates assuming constant rate supply of unsupported Pb-210 to the sediment. *Catena*. 5 : 1-8.
- Beliaeff B, Bouvet G, Fernandez JM, David C, Laugier T, 2011. Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT "Le Nickel et son environnement". 169pp
- Breau I., Goyaud A., Legrand H., Mou Tham G., 2010a. Etat de Référence de la Zone Sud du Lagon de Nouvelle-Calédonie : Détermination de la Qualité Ecotoxicologique Initiale des Produits de la Mer consommés localement. Convention de Recherches IRD/Vale Inco Nouvelle-Calédonie n°C2326/E13850, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 27 p. + Annexes.
- Breau L., Goyaud A., Legrand H., Dolbecq M., 2010b. Suivi de la qualité écotoxicologique (Métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle Calédonie par transplantation d'espèces bioindicatrices (Bioaccumulateurs). Contrat de Consultance AEL-LEA/Vale NC, Convention n°C2466, 37 p.
- Debenay J.P., Fernandez J-M. 2009 Benthic foraminifera records of complex anthropogenic environmental changes combined with geochemical data in a tropical bay of New Caledonia (SW Pacific) *Marine Pollution Bulletin*, Volume 59, Issues 8–12, Pages 311-322.
- Deely, JM, Fergusson, JE, 1994. Heavy metal and organic matter concentrations and distribution in dated sediments of a small estuary adjacent to a small urban area. *Science of the Total Environment*, 153, pp 97–111.
- Derech P, Douillet P, Le Gendre R, 2008. Modélisation et transport des formes dissoutes. Modèle de Transport, Simulation annuelle de rejet. Convention IRD/Goro-Ni 1124, 183p.
- Douillet P et Fernandez JM, 2009. Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans la lagon sud de la Nouvelle-Calédonie. Modélisation et simulation du transport des formes particulières d'origine naturelle (Canal de Havannah et Kwé). Simulation annuelle de la sédimentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. CONVENTION DE RECHERCHES IRD/GORO-NICKE n° 1124, 55p
- Fernandez JM, Ouillon S, Chevillon C, Douillet P, Fichez R, Legendre R, 2006 - A combined modelling and geochemical study of the fate of terrigenous inputs from mixed natural and mining sources in a coral reef lagoon (New(Caledonia). *Marine Pollution Bulletin* 52, pp 320-331.
- Fernandez JM, Moreton, Gérard P, Belhandouz A et Fichez R, 2006. Etat de référence : qualité physicochimique des eaux et niveaux de concentration des métaux dans les sédiments. Convention IRD/Goro-Ni N° 9135, 79p.
- Fernandez JM, Chevillon C, Dolbecq M, Legendre R, Belhandouze A et Lamoureux JP, 2007. Etat de référence : distribution superficielle des sédiments, flux sédimentaires et taux d'accumulation dans la Baie du Prony (Rades Nord et Nord-Est) et dans la Baie Kwé. Convention IRD/Goro-Ni N° 1230, 55p
- Fernandez JM, Moreton B, Le Grand Hélène, 2013. Qualité physico-chimique des sédiments marins : suivi réglementaire triennal 2012. Contrat Vale-NC/AEL n° E45538, Rapport AEL 120312-VI-16, 56p.
- GEMS, 2003. Field Observations and Plume Dispersion Modelling in the vicinity of the proposed INCO Goro Nickel Outfall in the Canal de la Havannah, New Caledonia. GEMS Report 02/03.
- INERIS, 2005. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Zinc et ses dérivés. INERIS –DRC-01-25590-00DF259.doc Version N°2-2mars 2005.
- He Q, Walling, DE, 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of Cs-137 and unsupported Pb-210 by mineral soils and sediments. *J. Environ. Radioac.*, 30 (2), pp 117-137.
- Hédouin L, Gomez Batista M, Métian M, Buschiazzi E et Warnau M, 2010a. Metal and metalloid bioconcentration capacity of two tropical bivalves for monitoring the impact of land-based mining activities in the New Caledonia lagoon. *Marine Pollution Bulletin* 61, p554-567.

- Hédouin L, Métian M, Teyssié J.L, Fichez R, Warnau M, 2010b. Delineation of heavy metal contamination pathways (seawater, food and sediment) in tropical oysters from New Caledonia using radiotracer techniques. *Marine Pollution Bulletin* 61, p542-553.
- JECFA, 2012b. Seventy-second meeting Rome, 16-25 February 2010 Summary and Conclusions, 16p.
- Kumar-Roiné S, Kerbrat AS, Goyaud A et Fernandez JM, 2013. Suivi de la qualité écotoxicologique des produits de la mer dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie : Evaluation des risques de développement ciguatérique. Rapport 2012. Rapport. AEL 111006-VI-07, contrat VALE-NC/AEL E39156, 121p
- Labrosse P, Ferraris J, Letourneur Y, 2006. Assessing the sustainability of subsistence fisheries in the Pacific : the use of data on fish consumption. *Ocean & Coastal Management*, 49:203-221.
- Le Grand Hélène, Moreton B, Hulliger M, Roupsard F, Kumar-Roiné S et Fernandez JM, 2013. Suivi environnemental de la colonne d'eau 2010-2012. 2ième Semestre. Contrat Vale-NC/AEL n° C2445, Rapport AEL 100216-VI-04, 87p.
- Léopold M, Ferraris J, Labrosse P, 2004. Assessment of the reliability of fish consumption as an indicator of reef fish catches in small Pacific islands : the example of Ouvea Island in New Caledonia. *Aquatic Living Resource*, 17:119-127.
- Mayer LM, Fink LK, 1979. Granulometric control of chromium accumulation in estuarine sediments in Maine. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11, pp 491–503.
- RESCAN, 2001a. Evaluation des effets du manganèse sur l'environnement. Contrat de consultance pour la société Goro Nickel, Hatch Associated Pty Ltd. – Rescan Environmental Services Ltd, Vancouver, Canada. 104p.
- RESCAN, 2001b. Marine outfall design. Effluent dilution modelling and siltation of manganese particulates around the diffuser in New-Caledonia coastal lagoon. Contrat de consultance pour la société Goro Nickel, Hatch Associated Pty Ltd. – Rescan Environmental Services Ltd, Vancouver, Canada. 71p.
- Robbins J.A. et Edgington D.N., 1975. Determination of recent sedimentation rates in lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 39:285-304.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : MINE DE NICKEL A CIEL OUVERT DE PORO (NOUVELLE-CALÉDONIE).....	7
FIGURE 2 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DES VOLUMES DE SAPROLITES EXTRAITS ET DE LEURS TENEURS EN NICKEL (COMM DIMENC, 1998).....	8
FIGURE 3 : ÉTAT DE LA CONSTRUCTION DE L'USINE DE GORO-NICKEL AU MOIS DE NOVEMBRE 2005.	9
FIGURE 4 : USINE DE VALE-NC: VUE DES REACTEURS D'EXTRACTION ACIDE EN MARS 2009.	10
FIGURE 5 : VUE DU FRONT DE MINE SUR LE PLATEAU DE GORO EN NOVEMBRE 2006.....	10
FIGURE 6 : SCHEMA SIMPLIFIE DU PROCEDE D'EXTRACTION DU NI ET CO PAR ATTAQUE A L'ACIDE SULFURIQUE. CIRCUIT DE L'EAU D'ENTRAÎNEMENT JUSQU'À SON INJECTION DANS LE PIPE-LINE (JUIN 2004, MODIFIE EN 2007, COMM VALE-NC).	12
FIGURE 7 : CARTE DU TRACE DU PIPE-LINE DE REJET DES EFFLUENTS INDUSTRIELS DEPUIS LA SORTIE DE L'USINE (PORT COMMERCIAL DE VALE NC) JUSQU'AU DROIT DE LA BAIE KWE (CANAL DE LA HAVANNAH, COMM VALE-NC).	13
FIGURE 8 : VISUALISATION GEOGRAPHIQUE DES 14 STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE DE LA COLONNE D'EAU. LE TRAIT ROUGE REPRESENTE LE DIFFUSEUR. SUR CETTE CARTE NE FIGURENT PAS LES STATIONS ST60SW, ST60NE ET ST31.	19
FIGURE 9 : CUMULS DES PRECIPITATIONS TOMBEES DURANT LES 5 JOURS PRECEDANT LES CAMPAGNES DE PRELEVEMENT EN « SAISON FRAICHE » ET PENDANT CELLES-CI. PERIODE DE 2008 A 2013 ; STATION D'OBSERVATION METEOROLOGIQUE : « PRONY PILOT STATION, VALE-NC ».	20
FIGURE 10 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN NUTRIENTS ET CHLOROPHYLLE A DANS LA TOTALITE DE LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « CANAL DE LA HAVANNAH » (ST02, ST03, ST05, ST06, ST07, ST09, ST14 ET ST21 ; N=158). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON FRAICHE » 2008-2013. CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTEES PAR LE POINT BLEU.	23
FIGURE 11 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN NUTRIMENTS ET CHLOROPHYLLE A DANS LA TOTALITE DE LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « BAIE DU PRONY » (ST15, ST16, ST18, ST19 AINSI QUE ST13 ET ST20 ; N=100). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON FRAICHE » 2008-2013. CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTEES PAR LE POINT BLEU.	24
FIGURE 12 : CONCENTRATIONS D'AMMONIUM MESUREES EN SURFACE (S), MI-PROFONDEUR (M) ET FOND (F) AUX STATIONS ST09, ST06 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON FRAICHE » 2008-2013.	25
FIGURE 13 : CONCENTRATIONS DE NITRATES + NITRITES MESUREES EN SURFACE (S), MI-PROFONDEUR (M) ET FOND (F) AUX STATIONS ST09, ST06 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON FRAICHE » 2008-2013.	25
FIGURE 14 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS DANS LA TOTALITE DE LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « CANAL DE LA HAVANNAH » (ST02, ST05, ST07, ST09, ST21). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON FRAICHE » 2008-2013 (N=90). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTEES PAR LE POINT BLEU. LES CONCENTRATIONS EN CO DE 2011 ET 2012 ET EN CU DE 2012 ONT ÉTÉ INFÉRIEURES À LA LQ.	28
FIGURE 15 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS DANS LA TOTALITE DE LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « BAIE DU PRONY » (ST15, ST16, ST18, ST19). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON FRAICHE » 2007-2013 (N=72). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTEES PAR LE POINT BLEU. LES CONCENTRATIONS EN FE DE 2012 ONT ÉTÉ INFÉRIEURES À LA LQ.	29
FIGURE 16 : CONCENTRATIONS DE COBALT MESUREES EN SURFACE (S), MI-PROFONDEUR (M) ET FOND (F) AUX STATIONS ST09, ST06 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON FRAICHE » 2008-2013.	32
FIGURE 17 : CONCENTRATIONS DE CHROME(VI) MESUREES EN SURFACE (S), MI-PROFONDEUR (M) ET FOND (F) AUX STATIONS, ST09, ST06 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON FRAICHE » 2008-2013.	32
FIGURE 18 : CONCENTRATIONS DE MANGANESE MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS, ST09, ST06 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON FRAICHE » 2008-2012.	33
FIGURE 19 : CONCENTRATIONS DE NICKEL MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS, ST09, ST06 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON FRAICHE » 2008-2012.	33
FIGURE 20 : CUMULS DES PRECIPITATIONS TOMBEES DURANT LES 5 JOURS PRECEDANT LES CAMPAGNES DE PRELEVEMENT EN « SAISON CHAUDE » ET PENDANT CELLES-CI. PERIODE DE 2007 A 2013 ; STATION D'OBSERVATION METEOROLOGIQUE : « PRONY PILOT STATION, VALE-NC ».	34
FIGURE 21 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN NUTRIMENTS ET CHLOROPHYLLE A DANS LA TOTALITE DE LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « CANAL DE LA HAVANNAH » (ST02, ST03, ST05, ST06, ST07, ST09, ST14 ET ST21 ; N=158). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON CHAUDE » 2007-2013. CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTEES PAR LE POINT BLEU.	35
FIGURE 22 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN NUTRIMENTS ET CHLOROPHYLLE A DANS LA TOTALITE DE LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « BAIE DU PRONY » (ST15, ST16, ST18, ST19 AINSI QUE ST13 ET ST20 ; N=100). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON CHAUDE » 2007-2013. CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA	

VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTÉES PAR LE POINT BLEU.	36
FIGURE 23 : CONCENTRATIONS DE NITRATES + NITRITES MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS ST06, ST09 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON CHAUDE » 2007-2013.	38
FIGURE 24 : CONCENTRATIONS D'AMMONIUM MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS ST06, ST09 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON CHAUDE » 2007-2013.	38
FIGURE 25 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS DANS LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « CANAL DE LA HAVANNAH » (ST02, ST05, ST07, ST09, ST21). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON CHAUDE » 2007-2013 (N=105). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTÉ LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTÉES PAR LE POINT BLEU. POUR 2013, TOUTES LES VALEURS DE CO SONT INFERIEURES A LA LQ.	40
FIGURE 26 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS DANS LA COLONNE D'EAU POUR LA ZONE « BAIE DU PRONY » (ST15, ST16, ST18, ST19). MESURES EFFECTUEES LORS DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES « SAISON CHAUDE » 2007-2013 (N=84). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTÉ LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ÉCART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTÉES PAR LE POINT BLEU.	41
FIGURE 27 : CONCENTRATIONS DE CO MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS ST06, ST09 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON CHAUDE » 2007-2013.	42
FIGURE 28 : CONCENTRATIONS DE Cr(VI) MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS ST06, ST09 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON CHAUDE » 2007-2013.	42
FIGURE 29 : CONCENTRATIONS DE Mn MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS ST06, ST09 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON CHAUDE » 2007-2013.	43
FIGURE 30 : CONCENTRATIONS DE Ni MESUREES EN SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND AUX STATIONS ST06, ST09 ET ST15 LORS DES CAMPAGNES « SAISON CHAUDE » 2007-2013.	43
FIGURE 31 : CONCENTRATIONS MOYENNES DE SURFACE, MILIEU ET FOND EN Cr(VI), Mn ET Ni, AUX STATIONS ST06 (BAIE KWE), ST09 (CANAL DE LA HAVANNAH, DIFFUSEUR) ET ST15 CREEK DE LA RADE NORD, PRONY POUR L'ENSEMBLE DES CAMPAGNES SEMESTRIELLES DE 2007 A 2013.	47
FIGURE 32 : POSITIONNEMENT DES PIEGES A SEDIMENTS DE TYPE SEQUENTIEL POUR LA COLLECTE DES PARTICULES ISSUES DE LA RIVIERE KWE (ST06) ET EMIS PAR L'EFFLUENT (ST60NE ET ST60SW).....	48
FIGURE 33 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE MOYENNE DES POPULATIONS DE GRAINS REPRESENTATIVES DES MES DE LA BAIE KWE COLLECTEES DANS LES GODETS KW1-2, KW1-6, KW1-9 ET KW1-11 DU PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL.	49
FIGURE 34 : EVOLUTION TYPE DES TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES PIEGES SEQUENTIELS MOUILLES EN BAIE KWE (E.G : CAMPAGNE « JANVIER-FEVRIER 2013 », ST06-KW1).....	50
FIGURE 35 : EXEMPLE DE NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (ST06-KW1) ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013.	52
FIGURE 36 : EXEMPLE DE DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE MOYENNE DES POPULATIONS DE GRAINS REPRESENTATIVES DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH COLLECTEES PAR LES DEUX PIEGES A SEDIMENTS SEQUENTIELS DES STATIONS ST60-SW ET ST60-NE (CAMPAGNE DE « JANVIER-FEVRIER 2013 »).....	53
FIGURE 37 : EVOLUTION TYPE DES TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES PIEGES SEQUENTIELS MOUILLES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (E.G : CAMPAGNE JANVIER 2012, ST60-SW ET ST60-NE).	54
FIGURE 38 : EVOLUTION TEMPORELLE DES FLUX DE NICKEL MOYENS (MG/M ² /J) MESURES AU NIVEAU DE LA STATION ST06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET DES STATIONS ST60-NE + ST60-SW DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH DEPUIS JUILLET 2011 ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS OBSERVEES EN 2006/2007 (ETAT DE REFERENCE).....	58
FIGURE 39 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES 14 STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE DES FONDS SEDIMENTAIRES.	59
FIGURE 40 : CONCENTRATIONS EN Co DANS LES 4 DIFFERENTES PHASES GEOCHIMIQUES : EVOLUTIONS TEMPORELLES 2006, 2009 ET 2012 POUR LES STATIONS SENTINELLES ST06 (BAIE KWE) ET ST15 (CREEK DE LA RADE NORD).CHROME (FIGURE 41)	63
FIGURE 41 : CONCENTRATIONS EN Cr DANS LES 4 DIFFERENTES PHASES GEOCHIMIQUES : EVOLUTIONS TEMPORELLES 2006, 2009 ET 2012 POUR LES STATIONS SENTINELLES ST06 (BAIE KWE) ET ST15 (CREEK DE LA RADE NORD).	64
FIGURE 42 : CONCENTRATIONS EN Ni DANS LES 4 DIFFERENTES PHASES GEOCHIMIQUES : EVOLUTIONS TEMPORELLES 2006, 2009 ET 2012 POUR LES STATIONS SENTINELLES ST06 (BAIE KWE) ET ST15 (CREEK DE LA RADE NORD).	65
FIGURE 43 : CARTE DE LOCALISATION DES STATIONS DE PRELEVEMENT DE CAROTTES SEDIMENTAIRES POUR LE SUIVI DES TAUX D'ACCUMULATION. LE TRAIT BISTRE SCHEMATISE LA POSITION DU DIFFUSEUR.	67
FIGURE 44 : PROFIL VERTICAL DE LA RADIOACTIVITE DU « Pb-210 EN EXCES » DANS LES SEDIMENTS DE LA CAROTTE ST15. APPORTS EVENEMENTIELS DE SEDIMENTS : POINTS EN BLEU.....	69
FIGURE 45 : PROFIL VERTICAL DE LA RADIOACTIVITE DU « Pb-210 EN EXCES » DANS LES SEDIMENTS DE LA CAROTTE ST06. MISE EN EVIDENCE D'UNE COUCHE BIOTURBEE : POINTS EN BLEU.	70
FIGURE 46 : PROFIL VERTICAL DE LA RADIOACTIVITE DU « Pb-210 EN EXCES » DANS LES SEDIMENTS DE LA CAROTTE ST16.....	71
FIGURE 47 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES 8 STATIONS DE BIO-SURVEILLANCE ACTIVE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES. LA STATION ST31 FIGURE DANS LES SUIVIS A PARTIR DE 2010 ET REMPLACE LA STATION ST05 A PROXIMITE DE L'ÎLOT KIE (NON REPRESENTÉE SUR LA CARTE) EN RAISON DE COURANTS EXCESSIFS QUI Y REGNENT. LA NOUVELLE LOCALISATION DE LA STATION ST16, PLUS AU NORD-OUEST DE LA ZONE PORTUAIRE, EST MAINTENANT EN DEHORS DE LA ZONE DE NAVIGATION ET D'ÉVITATION DES NAVIRES.	74
FIGURE 48 : CUMUL DES PLUIES POUR LA PERIODE DE TRANSPLANTATION (JUIN, JUILLET, AOUT ET SEPTEMBRE) PAR ANNEE (2009 A 2013) (DONNEES METEO-FRANCE).	75
FIGURE 49 : PLAN FACTORIEL (58% DE LA VARIABILITE) ISSU DE L'ACP (ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES) POUR ISOGNOMON ISOGNOMON.	76

FIGURE 50 : EVOLUTIONS TEMPORELLES (2010, 2011, 2012 ET 2013) EN FONCTION DE LA TYPOLOGIQUE (BAIE, OCEANIQUE) PAR RAPPORT A LA REFERENCE. VALEUR DU COEFFICIENT D'INCORPORATION (CI) « STATION/REFERENCE » PAR METAL (AS, CO, CR, CU, FE, MN, NI ET ZN) POUR <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> .	78
FIGURE 51 : PLAN FACTORIEL (75% DE LA VARIABILITE) ISSU DE L'ACP (ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES) POUR <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> .	79
FIGURE 52 : EVOLUTIONS TEMPORELLES (2010, 2011, 2012 ET 2013) EN FONCTION DE LA TYPOLOGIQUE (BAIE, OCEANIQUE) PAR RAPPORT A LA REFERENCE. VALEUR DU COEFFICIENT D'INCORPORATION (CI) « STATION/REFERENCE » PAR METAL (AS, CO, CR, CU, FE, MN, NI ET ZN) POUR <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> .	82
FIGURE 53 : LOCALISATION DES ZONES ET DES STATIONS DE PECHE DU SUIVI SANITAIRE DANS LE SUD DE LA GRANDE TERRE EN 2012/2013.	83
FIGURE 54 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES DANS LES POISSONS, TOUTES ESPECES CONFONDUES, PAR ZONE EN 2012 (N=141). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES ONT ETE OMISES POUR UNE MEILLEURE LISIBILITE DES RESULTATS.	89
FIGURE 55 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES DANS LES POISSONS, TOUTES ESPECES CONFONDUES, PAR ZONE EN 2009 (N=53 ; SAISON FRAICHE). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES ONT ETE OMISES POUR UNE MEILLEURE LISIBILITE DES RESULTATS.	90
FIGURE 56 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES DANS LES POISSONS, TOUTES ESPECES CONFONDUES, PAR ZONE EN 2010 (N=91 ; SAISON CHAUDE). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES ONT ETE OMISES POUR UNE MEILLEURE LISIBILITE DES RESULTATS.	91
FIGURE 57 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES DANS L'ESPECE <i>P. LEOPARDUS</i> , PAR ZONE EN 2012 (N=49). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES ONT ETE OMISES POUR UNE MEILLEURE LISIBILITE DES RESULTATS.	92
FIGURE 58 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES DANS LES BIVALVES, TOUTES ESPECES CONFONDUES, PAR ZONE EN 2009 (N=92 ; SAISON FRAICHE). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES ONT ETE OMISES.	101
FIGURE 59 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES CHEZ LES BIVALVES, TOUTES ESPECES CONFONDUES, PAR ZONE EN 2013 (N=23). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE, L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS ET LA VALEUR MINIMALE ET MAXIMALE PAR LES POINTS BLEUS.	102
FIGURE 60 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES DANS LES GASTEROPODES, TOUTES ESPECES CONFONDUES, PAR ZONE EN 2009 (N=99 ; SAISON FRAICHE). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES ONT ETE OMISES.	103
FIGURE 61 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS METALLIQUES MESUREES CHEZ LES GASTEROPODES, TOUTE ESPECE CONFONDUE, PAR ZONE EN 2013 (N=74). CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE, L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS ET LA VALEUR MINIMALE ET MAXIMALE PAR LES POINTS BLEUS.	104
FIGURE 62 : MOYENNES, ECART-TYPES, ET DOMAINE DE VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN METAUX (Cr(VI), Mn, Ni) AUX STATIONS ST06, ST15 (INFLUENCE TERRIGENE), ST09 (ZONE DE MELANGE) COMPARES A ST05 (RESERVE MERLET ; INFLUENCE OCEANIQUE). VALEURS POUR L'ENSEMBLE DES CAMPAGNES REALISEES DE 2007 A 2012. CHAQUE RECTANGLE REPRESENTE LA GAMME DE CONCENTRATIONS OBSERVEE DANS LA 50% DES SPECIMENS COLLECTES, LE TRAIT INTERNE FOURNIT LA VALEUR DE LA MEDIANE, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE ET L'ECART-TYPE EST REPRESENTE PAR LES BARRES D'ERREURS. LES VALEURS EXTREMES SONT REPRESENTES PAR LES POINTS BLEUS.	110

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LISTE ET LOCALISATION DES STATIONS DE PRELEVEMENT DETERMINEES POUR LES SUIVIS PHYSICO-CHIMIQUES DE LA COLONNE D'EAU ET DES FONDS SEDIMENTAIRES, TELS QUE DEFINIES DANS L'ARRETE ICPE DU 9 OCTOBRE 2008. LISTE DES STATIONS DE MOUILLAGE OU AIRES DE COLLECTE POUR LES SUIVIS DE LA BIOACCUMULATION DES METAUX BIO-DISPONIBLES (TRANSPLANTATION) ET DES IMPACTS SANITAIRES POTENTIELS DANS LES ORGANISMES MARINS CONSOMMABLES. FREQUENCE DES CAMPAGNES : TRIMESTRIELLE, SEMESTRIELLE, ANNUELLE, TRISANNUELLE.....	18
TABLEAU 2 : MATRICE DE SIMILARITE (COEFFICIENT DE PEARSON) POUR LA STATION LOCALISEE A PROXIMITE DE L'EMBOUCHURE DU CREEK KWE (St06) : SEUIL DE DISSIMILARITE = 0,85 AVEC N=6.	30
TABLEAU 3 : MATRICE DE SIMILARITE (COEFFICIENT DE PEARSON) POUR LA STATION LOCALISEE A PROXIMITE DE L'EMBOUCHURE DU CREEK DE LA RADE NORD (St15) : SEUIL DE DISSIMILARITE = 0,85 AVEC N=6.....	31
TABLEAU 4 : MATRICE DE SIMILARITE (COEFFICIENT DE PEARSON) POUR LA STATION LOCALISEE A PROXIMITE DU DIFFUSEUR (St09 ; CANAL DE LA HAVANNAH) : SEUIL DE DISSIMILARITE = 0,85 AVEC N=6.	31
TABLEAU 5 : NOMBRE DE MESURES OBTENUES (PERIODE 2007-2013) POUR CHACUNE DES STATIONS St06, St09 ET St15 DANS LES CATEGORIES PROPOSEES PAR BELIAEFF ET AL (2011) POUR LA DEFINITION DE L'ETAT DE SANTE DU LAGON (N=36). COMPARAISON AVEC LA STATION St05 (ILOT KIE).....	45
TABLEAU 6 : GAMMES DE CONCENTRATIONS OBTENUES HABITUELLEMENT DANS LES DIFFERENTES UNITES DU LAGON DE NOUVELLE CALEDONIE (St15 = FOND DE BAIE ; St09 = LAGON EN MILIEU COTIER ; St05 = PROCHE RECIF BARRIERE) SELON BELIAEFF ET AL., 2011.....	46
TABLEAU 7 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES, POURCENTAGE DE VARIATION ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE POUR LES 4 CAMPAGNES (STATION St06-KW1 ; N=48).....	51
TABLEAU 8 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS (SEUIL DE SIMILARITE >0,95) DES 5 METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE POUR LES 4 CAMPAGNES (STATION St06-KW1 ; N=48).....	51
TABLEAU 9 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 POUR LES 4 CAMPAGNES (N=48).....	52
TABLEAU 10 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH POUR LES 4 CAMPAGNES (STATION St60NE ET St60SW ; N=84).....	54
TABLEAU 11 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS (SEUIL DE SIMILARITE >0,95) DES 5 METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH POUR LES 4 CAMPAGNES (STATION St60-NE ET St60SW ; N= 84).....	55
TABLEAU 12 : EVOLUTION TEMPORELLE MOYENNE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DES STATIONS St60-NE ET St60-SW POUR LES 4 CAMPAGNES (N=96). COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE L'ETAT DE REFERENCE DE FEVRIER-MARS 2007 (N=36).....	55
TABLEAU 13 : VALEURS MOYENNES ET ECART-TYPES DES DENSITES DE FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH). VALEURS CALCULEES POUR L'ENSEMBLE DES 4 CAMPAGNES DE JUILLET 2011 A JANVIER 2013 ; COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES AVEC CELLES MEASUREES EN 2006 ET 2007 POUR LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE AUX STATIONS St06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET T4B, T4C ET TCM POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH (FERNANDEZ ET AL., 2007).....	56
TABLEAU 14 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH).....	57
TABLEAU 15 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), T4B ET T4C (CANAL DE LA HAVANNAH) OBTENUES LORS DE LA PHASE DE DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE (2007-2008).....	57
TABLEAU 16 : TENEUR EN FRACTION PELTIQUE (< 40µm) DES SEDIMENTS ECHANTILLONNES DANS LE DOMAINE D'ETUDE ; (ND) = PRESENCE DE MATERIEL SEDIMENTAIRE EN QUANTITE INSUFFISANTE. (ST) = STATION INEXISTANTE.	60
TABLEAU 17 : CONCENTRATIONS TOTALES Co, Cr, Fe, Mn ET Ni POUR LES SEDIMENTS DE SURFACE DES 3 STATIONS SENTINELLES (St06, St15 ET St16) ; VALEURS MOYENNES, ECART-TYPES ET % DE VARIATION POUR LES CONCENTRATIONS 2006, 2009 ET 2012.....	63
TABLEAU 18 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS DE Co, Cr, Mn ET Ni PAR RAPPORT AU FER POUR LES 4 PHASES GEOCHIMIQUES DES PELITES CONSTITUTIVES DES SEDIMENTS AUX STATIONS St06 ET St15 DES CAMPAGNES 2006 ET 2009.....	66
TABLEAU 19 : BILAN DES DONNEES DISPONIBLES PAR ANNEE ET PAR STATION POUR <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> ET <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> . NOMBRE DE REPLICAS DE 3 ^(A) , 4 ^(B) OU 5 ^(C) INDIVIDUS DISPONIBLES SELON LES CAMPAGNES POUR L'ANALYSE DES 8 METAUX ET NOMBRE TOTAL D'ANALYSES PAR TEST. POUR CERTAINES ANNEES ^(D) , LE NOMBRE DE REPLICAS DE FRONDES (<i>L. VARIEGATA</i>) EST VARIABLE SELON LA STATION.....	74
TABLEAU 20 : RESULTATS DU TEST ANOVA A DEUX FACTEURS (ANNEE*TYPOLOGIE) DES 8 COEFFICIENTS D'INCORPORATION (CI) POUR <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> . AVEC * SIGNIFICATIF ; ** HAUTEMENT SIGNIFICATIF, *** TRES HAUTEMENT SIGNIFICATIF ; NS NON SIGNIFICATIF.....	77
TABLEAU 21 : RESULTATS DU TEST DE TUKEY ENTRE LES DIFFERENTES MODALITES DES COEFFICIENTS D'INCORPORATION (CI) POUR <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> . AVEC * SIGNIFICATIF ; ** HAUTEMENT SIGNIFICATIF, *** TRES HAUTEMENT SIGNIFICATIF ; NS NON SIGNIFICATIF.....	77
TABLEAU 22 : RESULTATS DE L'ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS SUR LA SIGNIFICATIVITE DU FACTEUR « ANNEE » PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LES 8 FACTEURS DE CONCENTRATION POUR <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> . AVEC * SIGNIFICATIF ; ** HAUTEMENT SIGNIFICATIF, *** TRES HAUTEMENT SIGNIFICATIF ; NS NON SIGNIFICATIF.....	80
TABLEAU 23 : RESULTATS PAR ANNEE DU TEST DE COMPARAISON MULTIPLE DES RANGS ENTRE LES DIFFERENTES MODALITES DU FACTEUR TYPOLOGIQUE POUR <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i>	80
TABLEAU 24 : POSITIONNEMENT DES STATIONS D'ETUDE (WGS84) DU RISQUE SANITAIRE 2012/2013 ET TYPE D'ECHANTILLONNAGE.....	84

TABLEAU 25 : NOMBRE DE POISSONS RECOLTES EN 2009,2010 ET 2012 DESTINES A L'ANALYSE DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES CHAIRS (FILETS), CLASSES PAR ZONE ET SELON LEUR REGIME TROPHIQUE (CARNIVORE, HERBIVORE OU OMNIVORE) AINSI QUE LEUR DIVERSITE.....	85
TABLEAU 26 : NOMBRE DE POISSONS DESTINES A L'ANALYSE DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES CHAIRS (FILETS), CLASSES PAR FAMILLE, ESPECE, ZONE DE COLLECTE ET PAR L'ANNEE DE CAMPAGNE.....	85
TABLEAU 27 : TENEURS DES METAUX ANALYSES DANS LES MUSCLES DES POISSONS MOYENNEES SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS LORS DE LA CAMPAGNE EN 2012 ET DE DEUX CAMPAGNES DE 2009-2010, NOMBRES D'OBSERVATIONS AU-DESSUS DU SEUIL DE QUANTIFICATION AINSI QUE VALEURS MEDIANES ET ECART-TYPES.....	87
TABLEAU 28 : TENEURS DES ELEMENTS ANALYSES DANS LES MUSCLES DES POISSONS <i>P. LEOPARDUS</i> MOYENNEES SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS PRELEVES DANS LA ZONE DU CANAL DE HAVANNAH LORS DES CAMPAGNES DE 2012 ET 2010, NOMBRES D'OBSERVATIONS AU-DESSUS DU SEUIL DE QUANTIFICATION (LQ) ET VALEURS MEDIANES ET ECART-TYPES.....	93
TABLEAU 29 : SYNTHESE DE L'EVALUATION DU RISQUE SANITAIRE LIE A LA CONSOMMATION DES POISSONS PECHEES, TOUTES ESPECES ET ZONES CONFONDUES EN 2012 ET 2009/2010 (SAISON CHAUDE ET SAISON FRAICHE). SEUIL DE CONSOMMATION MAXIMALE DE CHAIRS OU DE MUSCLES FRAIS (G) A NE PAS DEPASSER POUR UN ENFANT DE 30 KG ET UN ADULTE DE 70 KG ; CONSOMMATION EXPRIMEE EN GRAMMES (G) DE POIDS FRAIS (PF), PAR JOUR (J), SEMAINE (S) OU MOIS (M).	95
TABLEAU 30 : NOMBRE DE COQUILLAGES RECOLTES EN 2009,2010 ET 2013 DESTINES A L'ANALYSE DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES CHAIRS ENTIERES OU DANS LES MUSCLES, GROUPES PAR ZONE ET SELON LEUR CLASSE (BIVALVES OU GASTEROPODES).....	97
TABLEAU 31 : NOMBRE D'ANALYSES DANS LES CHAIRS, CLASSES PAR FAMILLE, ESPECE, ZONE DE COLLECTE ET PAR L'ANNEE DE CAMPAGNE.....	98
TABLEAU 32 : TENEURS DES METAUX ANALYSES DANS LES CHAIRS DES BIVALVES MOYENNEES SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS DES CAMPAGNES DE 2013 ET 2009 (CAMPAGNE SAISON FRAICHE), NOMBRE D'OBSERVATIONS AU-DESSUS DU SEUIL DE QUANTIFICATION AINSI QUE VALEURS MEDIANES ET ECART-TYPES.....	99
TABLEAU 33: TENEURS DES METAUX ANALYSES DANS LES MUSCLES DES GASTEROPODES MOYENNEES SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS LORS DE LA CAMPAGNE EN 2013 ET 2009 (CAMPAGNE SAISON FRAICHE), NOMBRE D'OBSERVATIONS AU-DESSUS DU SEUIL DE QUANTIFICATION AINSI QUE VALEURS MEDIANES ET ECART-TYPES.....	100
TABLEAU 34 : INGESTION MAXIMALE EN METAUX A NE PAS DEPASSER POUR UN ENFANT DE 30 KG ET UN ADULTE DE 70 KG, SEUIL EXPRIME EN MICROGRAMMES (µG) PAR JOUR (J) OU MOIS (M).....	106
TABLEAU 35 : RISQUE SANITAIRE LIE A L'INGESTION DE METAUX FORTEMENT CONCENTRES (Cd, Fe ET Ni) DES ESPECES <i>A. STRIATA</i> , <i>L. LAMBIS</i> , <i>S. LUHUNAUS</i> ET <i>T. SETOSUS</i> CONSOMMEES. EVALUATION REALISEE POUR CHACUNE DES ZONES ET CAMPAGNES (2009 ET 2013). SEUIL DE CONSOMMATION MAXIMALE DE CHAIRS OU DE MUSCLES FRAIS A NE PAS DEPASSER POUR UN ENFANT DE 30 KG ET UN ADULTE DE 70 KG ; CONSOMMATION EXPRIMEE EN GRAMMES (G) DE POIDS FRAIS (PF), PAR JOUR (J) POUR FE ET NI, OU PAR MOIS (M) POUR Cd.....	107