



Rapport final

IMPACT POTENTIEL DES ACTIVITES INDUSTRIELLES DE VALE-NC
VOLUME 1/3 : ETAT DE REFERENCE DU MILIEU MARIN
(2005-2009)

SYNTHESE DES ETUDES

Jean-Michel Fernandez

Juillet 2014



Observatoire de l'environnement
en Nouvelle-Calédonie

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

Photos de couverture AEL : le bivalve Isognomon isognomon et bouteille Go-Flo™

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'Energie Atomique

Tiffreau Ch, Jullien M, Libert M, Piau 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, Massabau 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 : 93

	N/Ref	V/Ref	
Identification	AEL N°130218-OE-05 et 131218-OE-06	BC N°19-04-11 et 18-12-13	
Titre complet	IMPACT POTENTIEL DES ACTIVITES INDUTRIELLES DE VALE-NC. VOLUME 1/3 : ETAT DE REFERENCE DU MILIEU MARIN (2005-2009). SYNTHESE DES ETUDES		
Auteur(s)	Jean-Michel Fernandez		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Jean-Michel Fernandez		04/07/2014
Vérificateur 1	Céline Pousse		06/07/2014
Vérificateur 2	Shilpa Kumar-Roiné		07/07/2014
Approbateur(s)	Jean-Michel Fernandez		22/08/2014
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V-3.12	Remise rapport, version relecture		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 1/3 : Etat de référence (2005-2009). Synthèse des études. Rapport AEL 130218-OE-05, 93p.

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 ETATS DE REFERENCE	17
II.1. ETAT DE REFERENCE PHYSICO-CHIMIQUE.....	17
II.1.1. Introduction	18
II.1.2. Contexte néo-calédonien.....	20
II.1.3. Caractéristiques et composition des eaux de mer.....	23
II.1.4. Flux de particules	33
II.1.5. Caractéristiques des sédiments	37
II.1.6. Conclusion	51
II.2. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU TRANSPORT	52
II.2.1. Construction du modèle hydrodynamique et validation	53
II.2.2. Atlas des courants dans le canal de la Havannah	59
II.2.3. Conclusion	71
II.3. BIOSURVEILLANCE DU MILIEU MARIN	71
II.3.1. Biosurveillance active par transplantation de bioindicateurs	72
II.3.2. Biosurveillance passive et analyse du risque sanitaire	79
II.3.3. Conclusion	84
Chapitre III - CONCLUSION ET PERSPECTIVES	86
REFERENCES	88
LISTE DES FIGURES	90
LISTE DES TABLEAUX.....	93

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.

Les travaux antérieurs à 2005 (notamment ceux des bureaux d'études Rescan et GEMS ainsi que ceux du Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) en Australie), n'ont pas été pris en compte dans cette synthèse.

Les travaux relatifs à la définition de l'Etat de Référence se sont déroulés entre 2005 et 2009, études qui ont été conduites sous l'égide de l'IRD.

Le rapport de synthèse ci-dessous présenté constitue le **premier 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* » de l'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 minéral 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 **minéral saprolitique** duquel il récupère le nickel grâce à un **procédé pyro-métallurgique**. Le minéral 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.



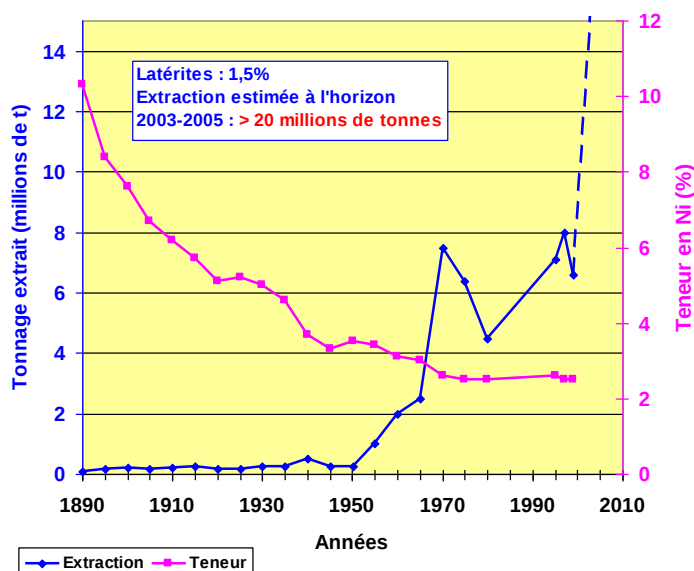
Figure 1 : Mine de nickel à ciel ouvert de Poro (Nouvelle-Calédonie).

Ce minéral silicaté est extrait de mines à ciel ouvert après un « décapage » initial des couches à plus faibles teneurs (cuiresse, 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 minéral 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 minéral 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^e siècle, la ressource latéritique à faible teneur en nickel (1,5%) focalise l'intérêt des industriels de la mine.



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 SMS, 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 ajouté 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.

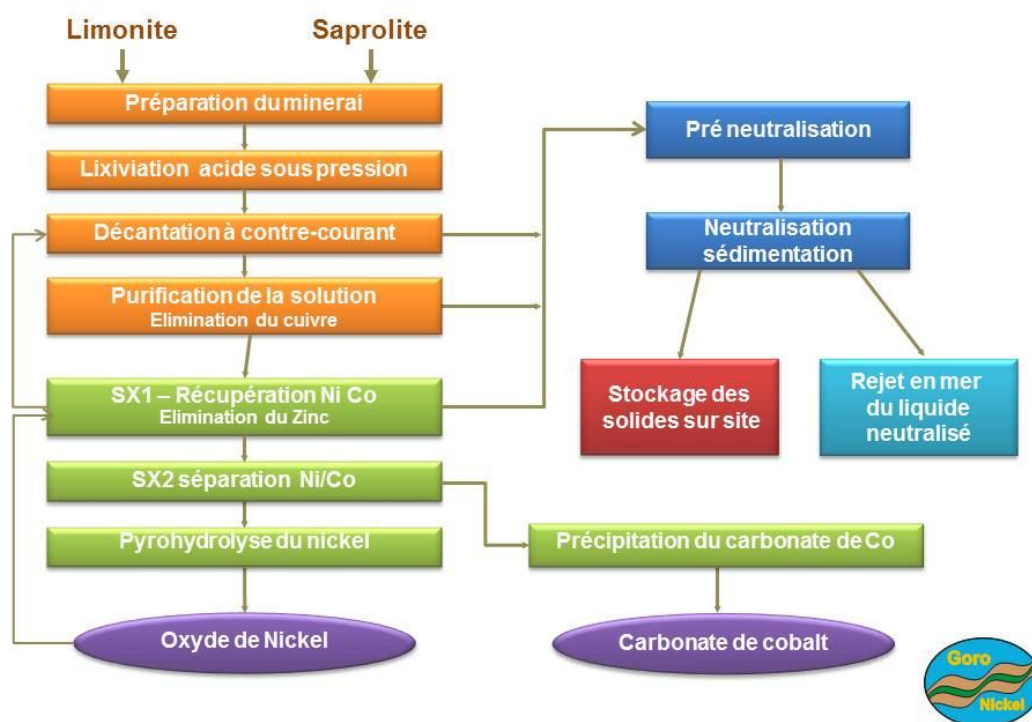


Figure 6 : Schéma simplifié du procédé d'extraction du Ni et Co par attaque à l'acide sulfurique. Circuit de l'eau d'entraînement jusqu'à son injection dans le pipe-line (juin 2004, modifié en 2007, comm. Vale-NC).

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 résiduaires 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 Leteurtrois 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 ETATS DE REFERENCE

L'évaluation de l'impact des rejets industriels de Vale-NC a nécessité d'acquérir une connaissance aussi exhaustive que possible du milieu naturel afin d'être en mesure de prédire la réactivité géochimique des effluents, leur dispersion et les conséquences potentielles sur le compartiment biologique (cf Volume 2). De manière plus précise, les études ont porté sur la **définition des états de référence physico-chimique, sédimentologique et hydrodynamique**.

La définition de l'état de référence du milieu marin a été inscrite à l'arrêté d'autorisation d'exploitation de l'usine de traitement de minerai. Elle avait pour objectif de définir de la manière la plus exhaustive possible les caractéristiques géochimiques, physico-chimiques et physiques naturelles ainsi que leur variabilité dans les eaux, les matières en suspension et les sédiments. Cette définition a également permis de rendre compte des niveaux naturels d'accumulation des métaux par les organismes marins, par surveillance passive et active.

Par ailleurs, afin d'acquérir une connaissance approfondie de la courantologie notamment dans le Canal de la Havannah, des travaux de mesure et de modélisations des phénomènes hydrodynamiques ont été conduits.

Sur la base de la définition de l'état de référence, la **mise en place d'expertises et de programmes scientifiques de recherche** a été programmée. Cette action de « Recherche et Développement » a concerné l'étude du devenir de l'effluent industriel et de ses effets biologiques potentiels. Les actions ont été conduites à différentes échelles spatiales et temporelles et sont présentées dans le Volume 2 de la synthèse globale des travaux (« Impact potentiel de l'effluent de Vale-NC en milieu marin : étude d'impact »).

II.1. ETAT DE REFERENCE PHYSICO-CHIMIQUE

A la question de savoir pourquoi il est impératif de définir un état de référence environnemental préalable s'ajoute une autre interrogation : Quel niveau d'investigation faut-il atteindre dans la définition du milieu naturel ? La réponse à ces deux questions est la suivante : **plus la connaissance de celui-ci tend vers « l'exhaustivité », plus il est évident de déceler des perturbations, aussi minimes soient-elles.**

L'arrêté ICPE d'octobre 2004 a donc eu pour prérequis de compléter la définition de l'état de référence du milieu marin, initiée dès 2000 par différents intervenants (RESCAN², IRD³, etc...). A partir de 2005, l'ensemble des études de caractérisation a donc été conduit sur un réseau de 18 stations distribuées autour du point de rejet (14 stations dans le Canal de la Havannah) et en Baie du Prony (4 stations), lieu des activités portuaires de Vale NC (Tableau 1, Figure 8).

² RESCAN 2001a et 2001b,

³ Fichez et al., 2005a et 2005b ; Breau et al, 2005.

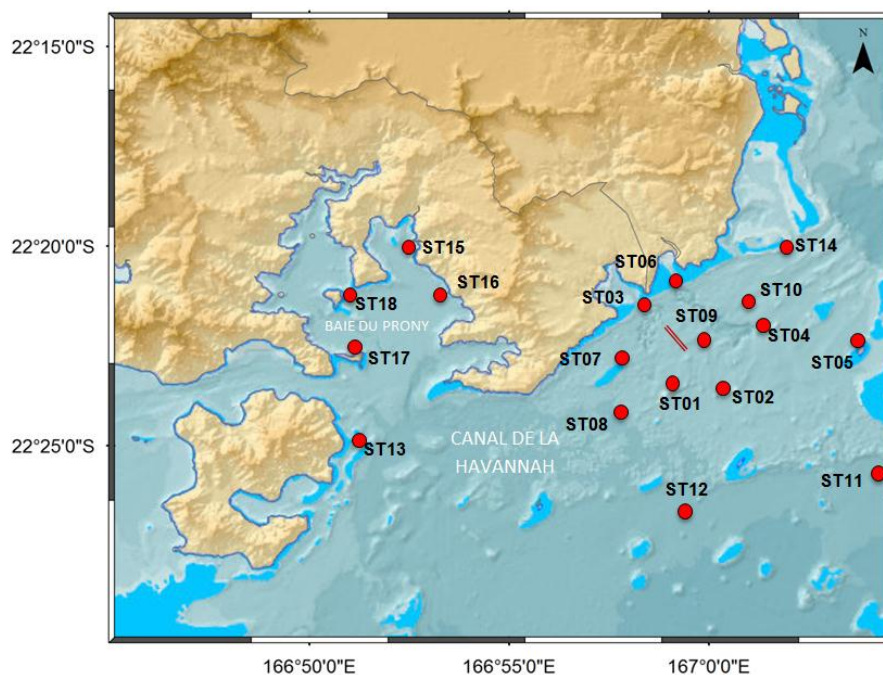


Figure 8 : Localisation géographique des 18 stations de prélèvements dans la colonne d'eau et dans la couverture sédimentaire (ICPE 2004). Le suivi environnemental est basé, lui, sur 14 stations décrites sur l'arrêté ICPE 2008 (cf : IMPACT POTENTIEL DE VALE-NC : SUIVI MILIEU MARIN 2009-2013 : Volume 3/3). Le trait bistre représente la position du diffuseur.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des 18 stations de prélèvements dans la colonne d'eau et dans la couverture sédimentaire (ICPE 2004). Pour une même station, les coordonnées diffèrent légèrement d'un type de prélèvement à l'autre en cas d'absence de sédiments meubles à la verticale de la « station eau ».

Stations	N°	Stations « colonne d'eau »			Stations « sédiments »		
		Longitude E	Latitude S	Prof. (m)	Longitude E	Latitude S	Prof. (m)
Corne NE du banc Ionontea	1	166° 59' 03	22° 23' 78	35	166° 59' 172	22° 23' 674	29
Basse Chambeyron	2	167° 00' 45	22° 23' 70	36	167° 00' 506	22° 23' 599	30
Récif pointe Puka	3	166° 58' 46	22° 21' 38	13	166° 58' 463	22° 21' 378	12
Bancs de Kié	4	167° 01' 30	22° 22' 25	36	167° 01' 518	22° 21' 949	20
Ilot Kié	5	167° 03' 75	22° 22' 33	20	167° 03' 761	22° 22' 334	20
Récif de la Baie Kwé	6	166° 59' 10	22° 20' 83	15	166° 59' 112	22° 20' 830	15
Récif Ioro	7	166° 57' 62	22° 22' 90	31	166° 57' 623	22° 22' 889	30
Canal de la Havannah (A 28)	8	166° 57' 14	22° 24' 33	47	166° 57' 453	22° 24' 323	48
Canal de la Havannah (A 29)	9	166° 59' 42	22° 22' 35	35	166° 59' 754	22° 22' 540	43
Canal de la Havannah (A 30)	10	167° 00' 93	22° 21' 51	37	167° 01' 593	22° 21' 665	45
Fosse Est	11	167° 04' 87	22° 25' 92	55	167° 04' 867	22° 25' 926	55
Fosse Ouest	12	167° 00' 13	22° 27' 71	69	166° 59' 023	22° 26' 269	62
Pointe Nord du récif Ma	13	166° 51' 22	22° 25' 10	27	166° 51' 354	22° 24' 914	33
Tombant Est de L'île Toémo	14	167° 01' 96	22° 20' 05	23	167° 01' 965	22° 20' 062	23
Prony Creek Baie Nord	15	166° 52' 40	22° 20' 25	33	166° 52' 590	22° 20' 037	27
Prony Wharf	16	166° 53' 30	22° 21' 45	25	166° 53' 365	22° 21' 210	24
Prony Ilot Montravel	17	166° 51' 10	22° 22' 75	10	166° 51' 257	22° 22' 597	25
Prony Ilot Casy	18	166° 50' 95	22° 21' 85	15	166° 51' 061	22° 21' 668	20

II.1.1. Introduction

Les éléments métalliques sont des constituants des roches qui, suite à leur altération naturelle, libèrent ces métaux dans l'environnement aquatique. Ainsi, en fonction de la nature géologique des substrats, un même élément métallique peut être présent dans les eaux continentales ou marines à

des concentrations totalement différentes. Celles-ci peuvent notamment varier de plusieurs ordres de grandeur. **Certains écosystèmes sont ainsi naturellement très riches en éléments métalliques alors que d'autres ne le sont pas** : on parle alors de « bruit de fond géochimique ».

Dans sa revue critique des risques liés à la présence de métaux dans l'environnement, l'INERIS (Institut National de l'Environnement et des RISques) précise que, même pour des métaux n'ayant pas de rôle biologique apparent, comme le plomb ou le cadmium, «... **les espèces vivantes peuvent s'adapter⁴** à leur environnement et notamment aux concentrations naturelles en métaux qui peuvent être très variables. La variabilité de ces concentrations naturelles contribue ainsi à la diversité (biologique) des milieux.» (Coquery et al, 2004). Toutefois, une augmentation exagérée des niveaux de concentration, par des processus naturels (volcanisme,...) ou à fortiori résultant de l'activité anthropique, c'est-à-dire urbaine ou industrielle, peut conduire à la mise en danger d'espèces après avoir contaminé l'eau, les matières en suspension, les sédiments et enfin les organismes vivants.

La méthode dite « *du risque ajouté* » (Struijs et al., 1997 ; Crommentuijn et al., 2000) tient compte par conséquent des concentrations naturelles en métaux et propose de déterminer un apport à ne pas dépasser. La norme de qualité correspondante (QS : *Quality Standard*) est alors calculée comme étant la somme de la concentration naturelle (Cb : *Background Concentration*) et de la concentration maximale ajoutée dans l'environnement de façon anthropique (MPA : *Maximum Permissible Addition*) : **QS = Cb + MPA**.

Pour définir un état chimique du milieu, il est alors nécessaire de le rapporter aux concentrations naturelles de référence (Cb), déterminées dans les conditions initiales non perturbées par l'activité humaine (Lepper, 2002), voire par modélisation géochimique (Le Goff and Bonnomet, 2003).

Toutefois, pour que les métaux présents dans les différents compartiments de l'environnement exercent un effet sur les organismes vivants, ils doivent être sous une forme chimique ayant la capacité d'atteindre les cibles biologiques. En d'autres termes, ces formes sont dites « biodisponibles ».

II.1.1.a. Colonne d'Eau

La prise en compte de la biodisponibilité, en grande partie estimée en analysant les fractions dissoutes des métaux ($\phi < 0,455 \mu\text{m}$), permet une évaluation prédictive plus précise des conséquences des métaux sur les organismes vivants. Elle contribue amplement, en particulier, à ne pas trop surestimer certains effets potentiels dus à la présence de formes particulières non assimilables par les organismes.

Selon Newman et Jagoe (1994), la biodisponibilité est définie comme la capacité d'un contaminant à être soit, assimilé et/ou adsorbé par un organisme vivant. Pour d'autres auteurs (Campbell, 1995), un métal est considéré comme biodisponible quand il est assimilé par un organisme et qu'il peut entraîner un effet sur celui-ci. Quoiqu'il en soit, les travaux conduits jusqu'à présent montrent, qu'entre autres facteurs, seules certaines formes du métal (ions libres hydratés, espèces inorganiques et organiques, formes faiblement adsorbées) peuvent être assimilables.

⁴ Adaptation par sélection naturelle

II.1.1.b. Compartiment sédimentaire

Dans les sédiments, une partie importante des métaux est séquestrée par complexation avec des sulfures (en conditions anoxiques) ou avec des oxydes (en conditions oxiques), cependant l'existence de ces phases chimiques dépend de nombreux facteurs environnementaux ; ces métaux ne peuvent donc pas être considérés comme irréversiblement indisponibles pour une remise en solution. La biodisponibilité de ces métaux dépend alors essentiellement des caractéristiques physico-chimiques du sédiment mais aussi, évidemment, de l'activité des organismes et micro-organismes qui y vivent.

Les études ont rapidement montré que la fraction biodisponible en métaux se trouve principalement dans l'eau interstitielle des sédiments sous forme dissoute (Ankley *et al.*, 1996). Pour estimer la proportion de métal biodisponible, il est donc nécessaire d'évaluer la capacité du sédiment à redistribuer le métal particulaire (adsorbé, co-précipité voire inclus sur les particules de sédiment) vers la phase dissoute.

Il est également important de souligner que les métaux ont une forte affinité pour les particules fines, ainsi plus de 90% des métaux échangeables sont généralement détenus par la fraction granulométrique du sédiment de moins de 63 μm : les dépôts de sédiments silto-argileux constituent donc de vrais réservoirs de contaminants (eg : Mayer et Fink, 1979 ; Ackerman, 1980 ; Deely et Fergusson, 1994 ; He et Walling, 1996).

Ce type d'approche vient en complément des méthodes d'évaluation des concentrations disponibles définies par les tests d'écotoxicité réalisés en laboratoire (bioessais).

II.1.2. Contexte néo-calédonien

Notamment de par sa géologie et donc ses sols singulièrement riches en métaux, la Nouvelle-Calédonie présente à plusieurs titres des singularités géochimiques et biologiques intrinsèques ; une des conséquences visibles est le très fort taux d'endémisme qui affecte, en particulier, le sud de la Grande Terre (jusqu'à 90% des espèces végétales).

Les roches ultrabasiques (péridotites) qui couvrent le tiers sud de la Nouvelle-Calédonie (Figure 9) ont été formées au tertiaire par subduction de la plaque tectonique australienne sous la plaque du Pacifique. Ces péridotites qui sont composées de silicates de Mg et Fe pour l'essentiel et qui sont presque complètement dépourvues de phosphore, de potassium et de calcium, contiennent de fortes concentrations en métaux et notamment en Ni, Co et Cr.

Le climat tropical caractérisé par d'intenses précipitations atmosphériques désagrége la roche mère péridotitique et conduit à la formation d'un profil d'altération dans lequel les éléments géochimiques primaires sont complètement redistribués (Figure 10). Le stade ultime de dégradation des séries péridotitiques est la formation en surface d'une cuirasse de fer (Goethite, Hématite) qui recouvre d'importantes strates de latérites nickélifères.

La hauteur d'eau induite par les précipitations en climat tropical océanique peut atteindre jusqu'à 700 mm en une journée. Cette quantité déversée a alors pour autre conséquence le lessivage violent des bassins versants, entraînant naturellement des masses extrêmement élevées de matière en suspension vers le lagon ; ce phénomène pouvant être amplifié par l'activité anthropique (déforestation, incendies, exploitation minière,...). Pour la seule rivière de la Dumbéa, la quantité de

matière en suspension déversée pendant le cyclone Brenda a été estimée à plus de 15 000 t (Baltzer & Trescases, 1971 ; Dugas et al., 1982). Associés au régime hydrologique de type torrentiel de ces rivières, les courants marins permettent la formation de panache transportant la matière sur plusieurs kilomètres dans le lagon (Richer de Forges, 1987), voire jusqu'aux passes.

Cependant, il faut comprendre que l'immense majorité des apports terrigènes se dépose non loin des embouchures où les teneurs naturelles en métaux qui y sont mesurées sont telles qu'elles seraient considérées hors du Territoire (Europe, USA,...) comme résultant d'une pollution (Tableau 2).

Ces apports terrigènes conditionnent, d'une part, les concentrations en métaux dissous (et particulaires) mesurées dans les eaux de mer (Tableau 3, Figure 11) et d'autre part, le niveau potentiel d'incorporation de ces mêmes métaux dans les organismes vivants du lagon.

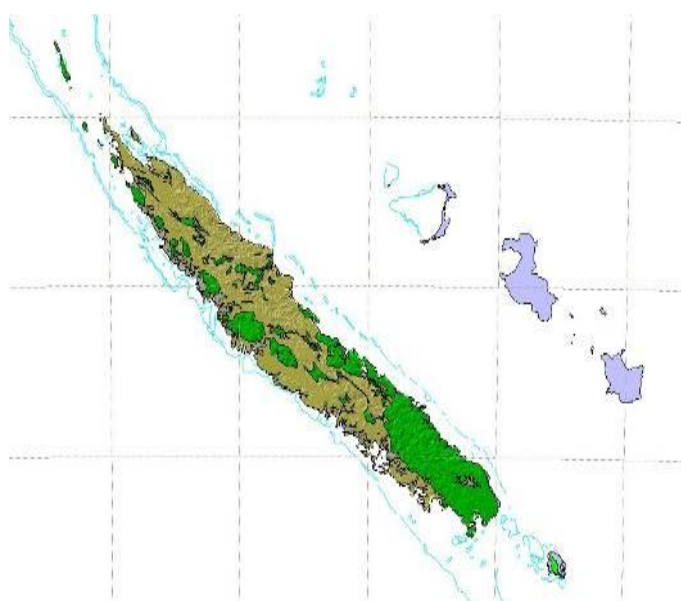


Figure 9 : Carte géologique simplifiée de la Grande Terre. Répartition des péridotites (vert foncé).

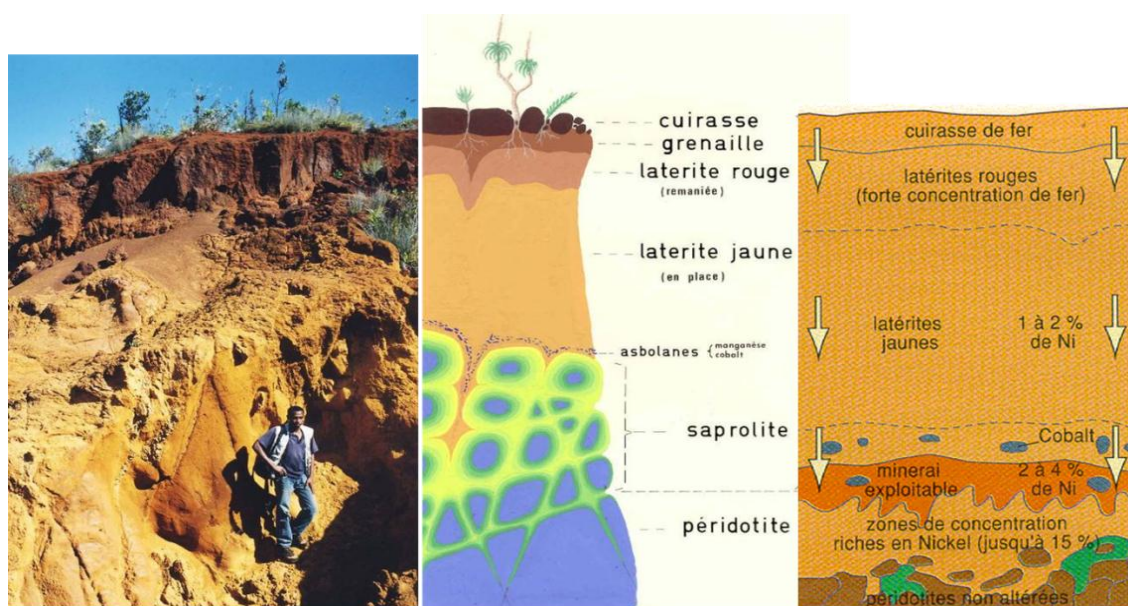


Figure 10 : Profil d'altération de la séquence géologique nickélifère (d'après B. Pelletier/SLN).

Tableau 2 : Teneurs moyennes des sédiments fins (< 63 microns) en métaux totaux (µg/g) dans les embouchures de différentes rivières du sud de la Nouvelle-Calédonie (Fernandez *et al.*, 2006). Comparaison avec les teneurs mesurées aux embouchures de quelques fleuves métropolitains.

ESTUAIRE	Co (µg/g)	Cr (µg/g)	Fe (µg/g)	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)
Boulari	329	2 750	179 348	1 847	4 913
Dumbéa	225	1 822	132 632	1 603	3 943
Pirogues	315	3 426	197 475	2 095	4 535
Kadji	123	8 993	165 001	648	2 153
Creek Rade Nord	200	13 013	293 061	1 383	3 442
Creek rade N-Est	326	12 668	291 427	1 460	4 339
Kwé	187	6 523	213 681	1 032	3 343
Seine*				150 - 450	
Loire**		25 - 80			15 - 30
Gironde **		38 - 88			18 - 25

(*) IFREMER / RNO, 1995. Surveillance du milieu marin, Ed IFREMER ; (**) IFREMER / RNO, 2005. Surveillance du milieu marin, Ed IFREMER.

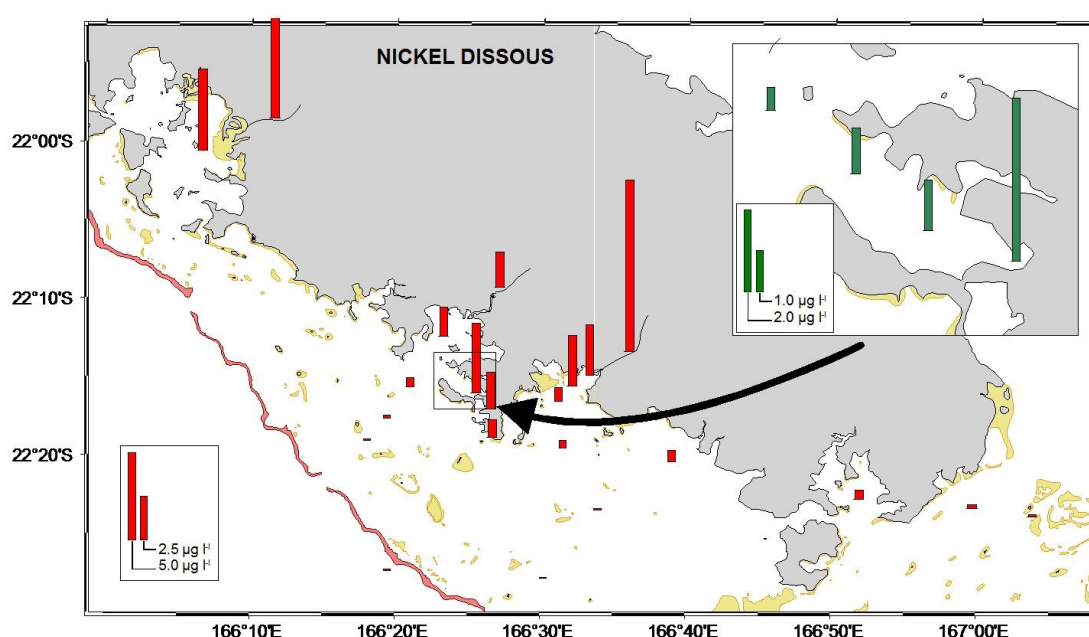


Figure 11 : Concentrations en métaux dissous : exemple de Ni dans les eaux des lagons Sud et Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie (Moreton *et al.*, 2009).

Tableau 3 : Concentrations en métaux dissous (cobalt, fer, manganèse et nickel) exprimées en micro-g/L pour différents sites des lagons sud et sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. (n = nb de stations d'échantillonnage ; r = nb de répliques pour une même station : <QL = inférieur à la limite de quantification), d'après Moreton et Fernandez (2009).

SITE ECHANTILLONNE	Co (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)
Anse Vata (r=21)	0,035 ± 0,007	0,22 ± 0,06	1,32 ± 0,12	1,00 ± 0,04
Port Moselle (r=9)	0,20±0,02	0,57 ± 0,05	2,53 ± 0,03	2,08 ± 0,01
Baie de St Vincent (n=10)	0,04 - 0,09	0,71 - 2,65	0,94 - 2,48	1,95 - 7,10
Baie de la Dumbea (n=10)	0,01 - 0,04	0,23 - 1,41	0,32 - 2,32	0,13 - 4,52
Baie de Boulari (n=10)	0,03 - 0,07	0,24 - 1,38	0,29 - 0,83	0,95 - 3,92
Canal de la Havannah (n=6)	0,025 - 0,033	0,08 - 0,18	0,13 - 0,24	0,18 - 0,26
Reserve Merlet (n=2)	0,006 - 0,009	0,09 - 0,10	0,09 - 0,11	0,09 - 0,10
Bay de Prony (n=4)	0,058 - 0,082	0,05 - 0,10	0,25 - 0,43	0,44 - 0,54
La Coulée River (n=3)	0,069 - 0,072	0,07 - 0,15	2,10 - 2,50	8,93 - 10,65
Dumbea River (n=3)	0,011 - 0,018	0,14 - 0,17	0,66 - 0,86	5,63 - 7,05
La Tontouta River (n=3)	0,012 - 0,023	0,05 - 0,06	1,17 - 1,68	1,92 - 2,12
Milieu lagonaire type (n = 3)	<QL	0,17 ± 0,04	0,13 ± 0,02	0,15 ± 0,02
Milieu océanique (n = 3)	<QL	0,03 ± 0,02	0,05 ± 0,02	0,09 ± 0,02

II.1.3. Caractéristiques et composition des eaux de mer

Compte tenu de la spécificité climatique des aires tropicales, la définition de l'état de référence des eaux oblige à prendre en considération les variations saisonnières. Celles-ci sont rythmées par la pluviométrie dont l'intensité des régimes alterne entre les saisons sèches et fraîches (juin à septembre) et les saisons humides et chaudes (décembre à mars).

Plusieurs campagnes successives entre 2006 et 2009 ont donc été conduites pour compléter les études antérieures réalisées par RESCAN et notamment par l'IRD qui a pu mettre en place un suivi temporel avec des prélèvements mensuels tout le long de l'année 2004 dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony (Fichez et al., 2005a).

II.1.3.a. Structure de la colonne d'eau

Le domaine étudié est divisible en deux ensembles eux-mêmes composés de sous-ensembles possédant des structures hydrologiques propres. En effet, il est nécessaire de distinguer le Canal de la Havannah de celui de la Baie du Prony dont le comportement des masses d'eau respectives diffère radicalement comme le prouve l'étude des paramètres physico-chimiques de base que sont : la température, la salinité, la turbidité et la fluorescence (mesure liée à la teneur en chlorophylle *a*).

La Baie du Prony : compte tenu de sa configuration morphologique fermée (Figure 8), les courants à l'intérieur de celle-ci sont très faibles (1-2 cm/s selon Derex et Douillet, 2008) particulièrement dans son secteur est. Ces conditions sont propices à la stratification thermique des eaux qui y est observée de manière quasi-permanente. Bien évidemment, celle-ci est beaucoup plus marquée en saison chaude qu'en saison fraîche où le gradient de température est très prononcé puisqu'on perd de l'ordre de 1,5 °C dans les 10 premiers mètres et près de 3°C entre la surface et le fond. Pour les eaux de surface, les écarts de température entre les saisons chaude et fraîche peuvent atteindre quasiment 6°C, ce qui est considérablement plus important que dans le Canal de la Havannah (3,7°C), milieu tempéré par les échanges avec la masse d'eau océanique toute proche et moins sensible à l'inter-saisonnalité que la Baie du Prony (Tableau 4).

En termes de salinité, l'influence des rivières est nettement sensible et peut raisonnablement s'exprimer dans les 10 premiers mètres sous la surface, voire l'ensemble de la colonne d'eau lorsque les apports d'eau douce sont soutenus. En effet, la dessalure des eaux de surface est fonction de la pluviométrie du moment et devient d'autant plus marquée que l'on se rapproche des embouchures. Hors événement pluviométrique important, le gradient de salinité reste modéré (0,5 ‰).

Les forts épisodes pluvieux qui s'observent dans le sud de la Nouvelle Calédonie peuvent avoir des conséquences importantes sur la physico-chimie des eaux. Ces événements météorologiques font gonfler fortement les rivières qui déversent dans le lagon des eaux douces chargées en matériel particulaire terrigène. Ces eaux douces étant plus légères que les eaux salées de la baie du Prony, elles ont tendance à rester en surface en formant des panaches estuariens qui peuvent exporter le matériel terrigène fin assez loin (c'est aussi le cas

du Canal de la Havannah avec les apports de la rivière Kwé). La turbidité qui accompagne les fortes pluies peut être élevée ($> 6 \text{ NTU}^5$), mais de manière très temporaire cependant.

Hors épisode pluvieux, en Baie du Prony la ligne de base se situe autour de 0,5 NTU, soit à un niveau significativement supérieur à celui mesuré dans le Canal de la Havannah (0,3 NTU). Par ailleurs, dans la baie sont observés des épisodes de remise en suspension des particules fines par mer agitée sous l'effet du vent ; une courte période de calme météorologique de quelques heures semble toutefois suffisante pour permettre un retour à la "normale" de la turbidité des eaux, en raison probablement de la densité des particules transportées d'origine latéritique.

Le Canal de la Havannah : cet ensemble qui assure la circulation des masses d'eau entre, d'un côté, les lagons sud et sud-ouest et de l'autre, l'océan Pacifique, est le siège de courants importants supérieurs à 0,75 m/s au niveau du diffuseur (Derex et Douillet, 2008) qui augmentent particulièrement en direction de la Passe de la Havannah. Cette hydrodynamique forte conditionne, quelle que soit la saison, la distribution verticale des températures. Celle-ci est soit homogène, soit légèrement et momentanément stratifiée. Cette variabilité s'explique par les caractéristiques thermiques des deux masses d'eau en présence qui conduisent à la mise en place de couches dont la durée de vie est essentiellement fonction du moment de marée. En effet, la renverse de courant favorise probablement de manière momentanée (2-3 heures) la superposition des veines d'eau selon la force de la marée : en saison chaude, la stratification est d'autant plus développée que l'on se rapproche de l'entrée de la Baie du Prony.

La salinité demeure remarquablement constante dans le Canal de la Havannah, et ce quelle que soit la saison (Tableau 4). Cette homogénéité s'explique par l'importance des masses d'eaux océaniques qui circulent à travers cette unité morphologique (les baies de Port-Boisé et particulièrement de la Kwé soumises aux influences des apports en eaux douces, font bien évidemment exception à ce fonctionnement et se comportent de manière similaire à la Baie du Prony mais sur des aires bien plus limitées).

Tableau 4 : Valeurs minimales et maximales de la température (°C), salinité (‰) et turbidité (NTU) des eaux de surface pour la Baie du Prony (st16) et le Canal de la Havannah (st09), pour l'année 2004 (Fichez et al., 2005).

Baie du Prony	Température (°C)	Salinité (‰)	Turbidité (NTU)
Minimum	21,2	33,9	0,4
Maximum	27,0	35,6	1,7
Canal de la Havannah	Température (°C)	Salinité (‰)	Turbidité (NTU)
Minimum	22,1	35,3	0,2
Maximum	25,8	35,6	1,2

D'une manière générale, la turbidité est assez homogène et se maintient à un niveau assez bas (0,3 NTU). Celle-ci correspond à une charge moyenne observée dans l'ensemble des zones centrales du lagon sud-ouest. La variabilité saisonnière de ce paramètre est par contre relativement élevée et en forte relation avec les aléas climatiques (vents et pluies).

⁵ NTU = Nephelometric Turbidity Unit : La correspondance avec la concentration en SiO_2 est fonction de l'incidence du rayon de mesure et du type de capteur. Par exemple, pour un capteur SIGRIST, elle équivaut, approximativement, à une concentration de 7,5 mg/L de sphères de silice par unité NTU avec un angle de lecture de 135°. N'étant pas essentielle, cette conversion n'est pas établie pour les capteurs WETLABS de la sonde multiparamétrique SEABIRD 19+.

L'apparition d'une couche néphéloïde de fond bien marquée (1-2 NTU) est régulièrement constatée, en particulier en direction de la sortie de la Baie du Prony et en correspondance avec une situation de stratification thermique.

Ce qu'il faut retenir

En Baie du Prony les conditions météorologiques (vents et/ou pluie) ont des incidences importantes sur la distribution verticale des caractéristiques physico-chimiques et ces paramètres climatiques doivent être pris en compte dans le cadre des suivis environnementaux. On peut donc considérer que par pluviosité modérée à faible, c'est l'agitation des eaux de surface sous la contrainte du vent qui génère l'essentiel de la turbidité. En revanche un épisode pluvieux significatif ($h \geq 100$ mm/j) génère une forte turbidité temporaire. La spécificité de la Baie du Prony est donc la réponse des masses d'eau au forçage hydro-climatique et à une relative variabilité des caractéristiques hydrologiques.

Dans le Canal de la Havannah et en saison chaude, les eaux du lagon sud semblent constituer la couche de surface observée à marée descendante en raison de leur plus faible densité (température plus élevée). En saison fraîche, elles occupent probablement les couches de sub-surface lorsque leur température est inférieure à celle de l'océan. Ce mécanisme est sans doute lié à un forçage du système par les conditions hydrodynamiques lagon/océan puisque l'absence d'anomalie de salinité ne sous-tend pas l'hypothèse d'apports terrigènes directs. Ce système présente des caractéristiques beaucoup moins influençables par un forçage météorologique que celles de la Baie du Prony.

II.1.3.b. Caractérisation trophique des eaux

Le dynamisme de la production primaire phyto-planctonique (et l'état de santé du milieu qui en découle) est habituellement abordé par l'étude des sels nutritifs et autres composés organiques dissous et/ou particuliers.

D'une manière générale, ces éléments enrichissent le milieu, favorisent la croissance des algues, mais peuvent également conduire, en fonction de la typologie du site, à des dysfonctionnements aboutissant, par exemple, à des efflorescences algales éventuellement toxiques. En cascade, cette prolifération algale va induire des impacts écologiques sur les autres peuplements comme les coraux ou les herbiers de phanérogames, dans un premier temps.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'étude des apports en éléments nutritifs qui sont à la base des processus débouchant sur l'eutrophisation potentielle du milieu. L'azote, le phosphore et le carbone sont présents à l'état dissous mais peuvent aussi être observés sous une forme particulière et ainsi s'accumuler avec l'ensemble de la matière en suspension sédimentée sur le fond.

Ainsi, parmi les principaux paramètres analysés on recense (Tableau 5) :

- la chlorophylle *a*. Elle est indispensable à la photosynthèse des microalgues. Elle permet d'estimer la biomasse phyto-planctonique et de ce fait de définir le niveau trophique (oligotrophie/eutrophie) du milieu et ainsi présumer de son évolution temporelle (Fichez et al., 2005b). La concentration en chlorophylle *a* est un excellent *proxy* de la biomasse

phytoplanctonique, elle-même dépendante de la concentration en nutriments dans l'eau (Bélieff et al., 2011).

- l'ammonium, les nitrates. La composition relative en ces deux nutriments minéraux dissous permet de détecter d'éventuelles limitations ou accumulations dans un système devenu déséquilibré. En effet, l'azote inorganique dissous (NID), dont les nitrates, est consommé pour assurer la croissance du phytoplancton. A la mort de celui-ci, l'azote est restitué au système sous la forme minérale ammoniacquée (NH_4^+). Ces composés se retrouvent également dans les eaux résiduaires de la base vie.
- les silicates ainsi que les composés dissous/particulaires du phosphore et du carbone et de l'azote particuliers. Ils sont également interprétés pour déterminer le degré des influences terrigènes/marines. De ce fait, ils permettent d'affiner la connaissance des structures hydrologiques et d'estimer l'activité des phénomènes physiques et biologiques ou géochimiques.

D'une manière générale, dans les lagons tropicaux et l'océan ouvert, la concentration de ces composés est très faible, de l'ordre de quelques dizaines de nano-moles ; une augmentation de l'une de ces concentrations peut être interprétée comme un signe d'influence terrigène et/ou anthropique. En milieu côtier, les concentrations sont parfois bien plus importantes, atteignant ponctuellement et épisodiquement la dizaine de micro-moles (Beliaeff et al., 2011).

La Baie du Prony : Deux facteurs contribuent à l'enrichissement en substances nutritives et à leur répartition : l'influence des rivières et l'hydrodynamisme particulièrement faible de cette baie. L'accumulation en surface étant liée aux apports terrigènes alors qu'à certaines profondeurs elle serait attribuable à l'augmentation du métabolisme benthique qui entraînerait le relargage vers la colonne d'eau d'éléments nutritifs minéralisés dans les sédiments (Fichez et al., 2005b).

Pour la plupart des éléments nutritifs comme pour la chlorophylle *a*, les concentrations observées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées habituellement dans les eaux du lagon du sud-ouest calédonien en dehors de toute influence anthropique (Binet et Leborgne 1986 ; Fichez et al., 2005a et 2005b) (Tableau 5). Une variabilité temporelle forte du niveau trophique est cependant mise en évidence avec des concentrations en chlorophylle variant entre 0,1 µg/L en saison fraîche et 0,6 µg/L en fin de saison chaude (Fichez et al., 2005a). A la lumière de ces résultats, on peut donc affirmer que, malgré la présence d'apports terrigènes significatifs l'ensemble de la zone doit être considéré comme possédant des caractéristiques typiquement oligotrophes, les concentrations restant en dessous de 1 µg/L (Partensky et al., 1996 ; Jacquet, 2005 ; Fichez et al., 2005b).

Globalement, il en résulte que les concentrations en éléments nutritifs, en carbone, azote et phosphore organiques particuliers sont assez peu contrastées et aucune organisation précise de la distribution spatiale ne peut être dégagée : les faibles niveaux de concentrations observés confirment une qualité de milieu non influencée par les apports anthropiques.

Toutefois, on observe une évolution temporelle des concentrations en carbone organique particulière (COP : 4 à 6 µmol/L), azote organique particulière (NOP : 0,4 à 1 µmol/L) et azote inorganique (NO_3 : < LD à 0,09 µmol/L ; NH_4 < LD à 0,16 µmol/L), celles-ci étant beaucoup moins contrastées dans la Baie du Prony que dans le Canal de la Havannah. Les valeurs maximales sont atteintes globalement en saison fraîche.

Les concentrations en phosphates et silicates sont faibles et varient respectivement entre 0,02

et 0,08 $\mu\text{mol/L}$ et de 1,5 à 5 $\mu\text{mol/L}$. Les concentrations en silicates supérieures 2 $\mu\text{mol/L}$ peuvent être considérées comme une signature (faible) des apports terrigènes puisque les eaux de rivière présentent couramment des concentrations autour de 300 $\mu\text{mol/L}$ (Fichez et al., 2005b).

Le Canal de la Havannah : Hormis les baies périphériques du Canal pour lesquelles les conditions sont proches de celles de la Baie du Prony, l'hydrodynamisme semble être le principal moteur de la répartition des sels nutritifs dans toute la zone.

Ainsi, les concentrations en chlorophylle *a* s'échelonnent entre 0,09 et 0,98 $\mu\text{g/L}$, les valeurs maximales étant mesurées aux intersaisons (Tableau 5). Par ailleurs, le pourcentage de pigments dégradés représente entre 25 et 30 % de l'ensemble des chloropigments et ne montre pas de variabilité significative, ce qui traduit la présence d'une population phytoplanctonique assez active.

Comme en Baie du Prony, les valeurs de chlorophylle *a* (Figure 12), de la matière organique particulaire (COP, NOP) et des principaux sels nutritifs confirment que les niveaux mesurés correspondent globalement aux concentrations obtenues en conditions non perturbées dans les zones typiquement lagunaires.

Toutefois, on peut noter sous certaines conditions des concentrations relativement fortes en nitrates dans le Canal de la Havannah (> 0,4 $\mu\text{mol/L}$). Ce constat apparaît comme paradoxal dans la mesure où les eaux du Canal ont a priori une origine océanique ultra-oligotrophe. Il semble donc que par marée montante les eaux océaniques puissent s'enrichir en azote inorganique au passage de la barrière récifale. Cependant, les signatures, d'une part, en nitrates (nutriment « neuf » en opposition à l'ammonium nutriment « régénéré ») et, d'autre part, en phosphates plaideraient plutôt pour une injection de nutriments provenant de couches océaniques profondes (quelques centaines de mètres). Ces deux hypothèses pouvant parfaitement coexister et se combiner. Les concentrations en silicates comprises entre 1 et 3,5 $\mu\text{mol/L}$ peuvent être considérées comme typiquement lagunaires.

Tableau 5 : Concentrations moyennes et écart-types en sels nutritifs et composés organiques dissous et particuliers analysés dans les eaux du lagon sud de Nouvelle Calédonie. Valeurs retenues pour la définition de l'état de référence physicochimiques de la colonne d'eau.

		Chloro <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	Phéop ($\mu\text{g/L}$)	NH ₄ ($\mu\text{mol/L}$)	NO ₂ +NO ₃ ($\mu\text{mol/L}$)	PO ₄ ($\mu\text{mol/L}$)	SiO ₄ ($\mu\text{mol/L}$)	NOD ($\mu\text{mol/L}$)	NOP ($\mu\text{mol/L}$)	POD ($\mu\text{mol/L}$)	POP ($\mu\text{mol/L}$)
Domaine entier	Min	0,09	0,04	<0,001	<0,02	<0,01	0,43	1,12	<0,13	0,11	<0,01
	Max	1,05	0,47	0,410	4,92	0,15	5,35	9,89	4,15	0,64	0,23
	Moyenne	0,44	0,17	0,056	0,20	0,04	2,03	4,03	0,86	0,26	0,07
	Ecart-type	0,02	0,03	0,035	0,12	0,01	1,15	1,17	0,43	0,11	0,01
Canal de la Havannah	Min	0,09	0,04	0,001	<0,02	<0,01	0,43	1,12	<0,13	0,11	0,01
	Max	0,98	0,47	0,410	4,92	0,13	4,94	9,89	4,15	0,58	0,23
	Moyenne	0,42	0,18	0,215	0,29	0,04	1,77	3,98	0,94	0,29	0,06
	Ecart-type	0,02	0,03	0,173	0,14	0,01	1,21	1,15	0,46	0,10	0,01
Baie du Prony	Min	0,16	0,05	0,005	0,01	0,01	1,23	1,98	<0,13	0,16	<0,01
	Max	1,05	0,44	0,170	1,21	0,13	5,35	6,32	2,77	0,64	0,12
	Moyenne	0,43	0,15	0,039	0,21	0,04	2,64	4,02	0,66	0,29	0,07
	Ecart-type	0,04	0,03	0,019	0,11	0,02	0,93	1,01	0,58	0,15	0,03

(< XX,xx) = valeur inférieure à la limite de quantification de l'espèce analysée.

Diamètre de coupure entre les fractions dissoutes et particulaires = 0,45 μm .

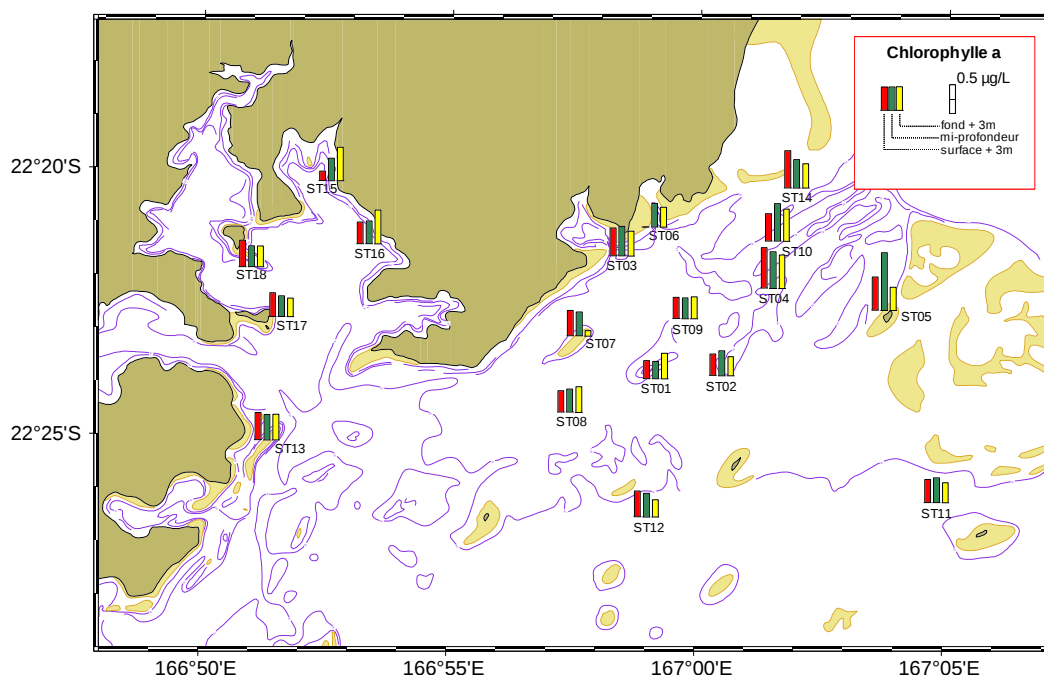


Figure 12 :
Concentration type en chlorophylle A dans la colonne d'eau ; échantillons de surface (+3 m), mi-profondeur et fond (-3 m) collectés en saison fraîche (août 2008).

Ce qu'il faut retenir

On peut raisonnablement estimer que les concentrations décelées sont propres à un milieu lagunaire oligotrophe tropical non altéré par les activités anthropiques. Ce constat s'impose malgré les apports terrigènes qui ont pu être relativement conséquents depuis plus d'un siècle (déforestation, exploitation minière), en raison de la pauvreté des sols latéritiques en substances organiques.

L'apparition durable de concentrations en chlorophylle *a* supérieures au seuil de 1 µg/L devra être considérée comme une alerte sérieuse révélant une altération des conditions naturelles environnementales liées à un enrichissement trophique anormal du milieu.

La limitation par l'azote de la production primaire de matière organique est une caractéristique maintenant bien établie dans les eaux du lagon de Nouvelle-Calédonie (Jacquet, 2005) et pour éviter l'eutrophisation du milieu, les éventuels rejets en azote devront donc être contrôlés en priorité. En effet, le calcul des rapports élémentaires montre que seule une limitation de la production primaire planctonique par l'azote est à surveiller (Fichez et al., 2005).

II.1.3.c. Les niveaux de concentration en métaux

La détermination des concentrations naturelles pour les principaux métaux dissous a fait l'objet d'une attention toute particulière notamment compte tenu du contexte géologique, des aléas climatiques des aires tropicales et de la nature des rejets industriels qui doivent se déverser dans le Canal. Il s'est agi avant tout, d'obtenir une image la plus claire possible de la répartition spatiale et temporelle des concentrations naturelles.

Pour l'ensemble du domaine étudié, les concentrations en éléments métalliques tels que Cr(VI), Co, Mn et Ni, se distribuent selon un double gradient, (i) horizontal, de type « côte-large » et (ii) vertical, entre la surface et le fond (Figure 13). Le nickel et le manganèse sont les meilleurs exemples de

traceurs de cette distribution des métaux, signatures des apports terrigènes (Figure 14, Figure 15, Figure 16 et Figure 17).

Baie du Prony : Les eaux de cette baie se singularisent par les concentrations en métaux les plus élevées de tout le domaine d'étude, tant en saison sèche qu'en saison humide. Ainsi par exemple, dans les eaux de surface (-3 m), les concentrations des principaux métaux (Mn : $0,37 \pm 0,12$ et Ni : $0,44 \pm 0,14$ $\mu\text{g/L}$) sont environ deux fois plus fortes que dans le Canal de la Havannah (Mn : $0,15 \pm 0,08$ et Ni : $0,18 \pm 0,11$ $\mu\text{g/L}$).

Le niveau de concentration en métaux dissous d'origine terrigène, comme Ni, Co, Mn et Fe est amplement fonction du débit des rivières ; la dispersion dans la Rade du Nord s'effectue lentement au gré des courants de marée qui figurent parmi les plus faibles enregistrés de toute la zone ; le vent contribuant toutefois de manière non négligeable au déplacement des masses d'eau de surface.

La distribution des métaux dans la colonne d'eau obéit aux phénomènes individuels de dilution des différentes veines (couches turbides, dessalures). Ces processus, s'ils sont beaucoup moins dynamiques que dans le Canal, ils permettent cependant d'aboutir tout de même à une homogénéisation de la colonne d'eau en moins de deux jours, dans la plupart des cas. Pour certains éléments métalliques comme le Mn, les phénomènes de précipitation accélèrent sa disparition de la colonne d'eau ; des éléments comme Ni et Co, restent en solution et sont donc présents en « *surconcentration* » bien plus longtemps dans les eaux.

Canal de la Havannah : A l'intérieur de ce domaine, il est possible de distinguer clairement les masses d'eau de caractéristiques océaniques de part et d'autre d'une ligne de partage longitudinale délimitée globalement par le récif loro et l'entrée du Port Goro ; au sud de cette ligne, les concentrations en métaux y sont parmi les plus basses mesurées et la variabilité le long de la colonne d'eau, est particulièrement faible. A l'opposé, au nord de cette ligne, le long des côtes du Canal, les influences terrigènes sont clairement observées et les concentrations maximales correspondent aux abords des baies alimentées par les rivières (baies de la Kwé et de Port Boisé) où les eaux de surface sont notablement chargées en métaux.

D'autres métaux comme Cd, Cu et Pb, montrent un comportement totalement différent, ces métaux étant à l'état de traces dans les roches latéritiques du sud calédonien (Atlas de la Nouvelle Calédonie, 1981) ; leurs concentrations dans les eaux des stations côtières peuvent être alors très faibles, voire en dessous des limites de détection. Les autres éléments, comme As et Cr_{total} et Zn, ne montrent pas un gradient de concentration particulier.

Enfin, les très faibles concentrations en fer déterminées notamment à proximité de la Passe de la Havannah sont à mettre en parallèle avec les concentrations en phosphates et chlorophylle plus fortes que dans les eaux du reste du Canal de la Havannah ; cette relation est en parfait accord avec les mécanismes de consommation d'une fraction importante du fer dissous qui entrent dans les cycles de la production primaire et notamment de développement du phytoplancton.

Ce qu'il faut retenir

Le long des côtes et, à fortiori, au droit des embouchures ainsi que dans les baies abritées (Baie du Prony), quelle que soit la saison, la concentration des métaux dissous est en rapport avec la charge particulaire transportée par les rivières, donc reliée à l'intensité des précipitations atmosphériques, principal facteur des phénomènes d'érosion. Un facteur aggravant de ces apports est la déstabilisation des sols. Ainsi par exemple, toute modification dans l'extension des surfaces dévégétalisées et/ou des couches géologiques remaniées sera sanctionnée par une redistribution des éléments métalliques dissous et particuliers (matière en suspension) dans le lagon.

Les concentrations les plus élevées sont analysées dans les couches turbides de surface et/ou de fond (néphéloïde benthique) lorsqu'elles existent ; leur dispersion/dilution s'effectue selon une dynamique étroitement liée à la physiographie du milieu récepteur.

Dans le Canal de la Havannah, l'intense circulation des masses d'eau qui est régie par les phénomènes de marée, permet très rapidement un brassage efficace des eaux marquées par les apports terrigènes : il en résulte qu'à une distance de quelques milles (2-3) au large, l'influence terrigène (eg : Mn, Ni) n'est plus décelable sur l'ensemble de la colonne d'eau. Les exemples des distributions du nickel et du manganèse dissous illustrent parfaitement cette conclusion (Figure 14 , Figure 15, Figure 16 et Figure 17).

Tableau 6 : Valeurs moyennes et domaines de variations des concentrations en métaux dissous, toutes campagnes (saison sèche et saison fraîche) et niveaux (surface, mi-profondeur et fond) confondus mesurées pour la définition de l'Etat de Référence.

		As (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Cr (VI) (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	Zn (µg/L)
Canal de la Havannah	Min	0,30	<0,012	0,03	0,07	<0,01	0,03	0,04	0,10
	Max	1,90	0,088	0,15	0,60	0,63	0,56	0,77	1,45
	Moyenne	0,97	0,020	0,06	0,12	0,11	0,14	0,16	0,25
	Ecart-type	0,29	0,003	0,02	0,04	0,05	0,02	0,03	0,09
Baie du Prony	Min	0,20	0,014	0,03	0,09	0,03	0,16	0,18	0,10
	Max	1,30	0,116	0,18	0,65	0,17	0,46	0,56	1,29
	Moyenne	0,87	0,044	0,07	0,20	0,09	0,26	0,33	0,56
	Ecart-type	0,35	0,002	0,03	0,09	0,04	0,02	0,02	0,34

(< XX,xx) = valeur inférieure à la limite de quantification de l'espèce analysée.

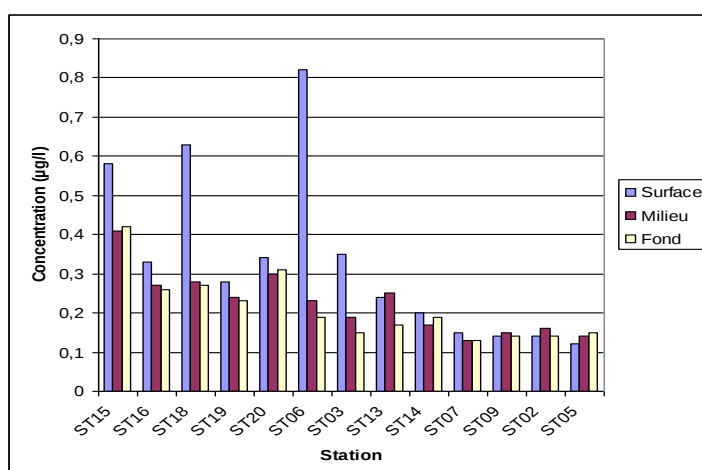


Figure 13 : Evolution spatiale des concentrations en Ni dissous en fonction de l'éloignement à la côte. Mise en évidence de l'influence des apports de la rivière Kwé (St06) et du Creek de Rade Nord (St15) lors de la campagne en saison humide (mars 2009).

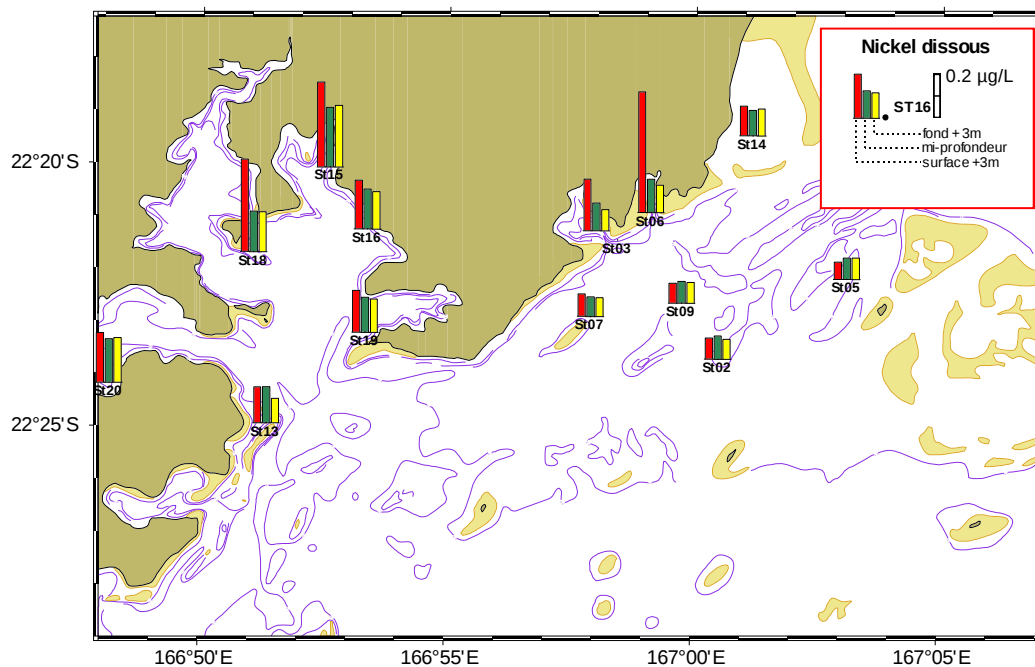


Figure 14 : Saison humide : concentration en Ni dissous en surface (-3m), mi-profondeur et fond (+3m). Campagne de mars 2009.

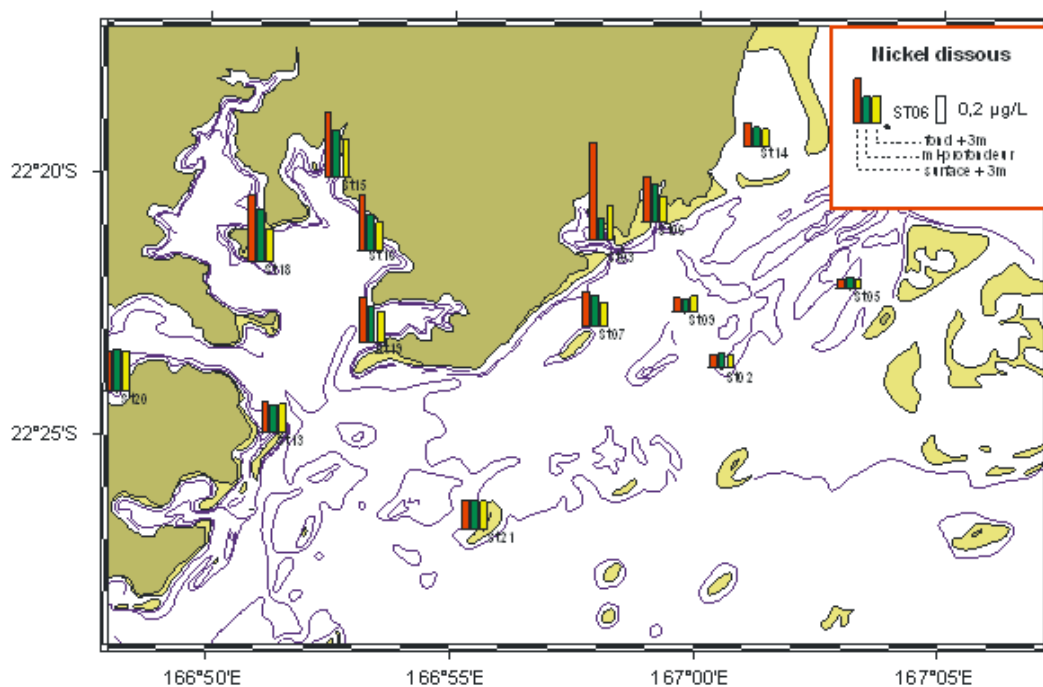


Figure 15 : Saison sèche : concentration en Ni dissous en surface (-3m), mi-profondeur et fond (+3m). Campagne d'août 2009.

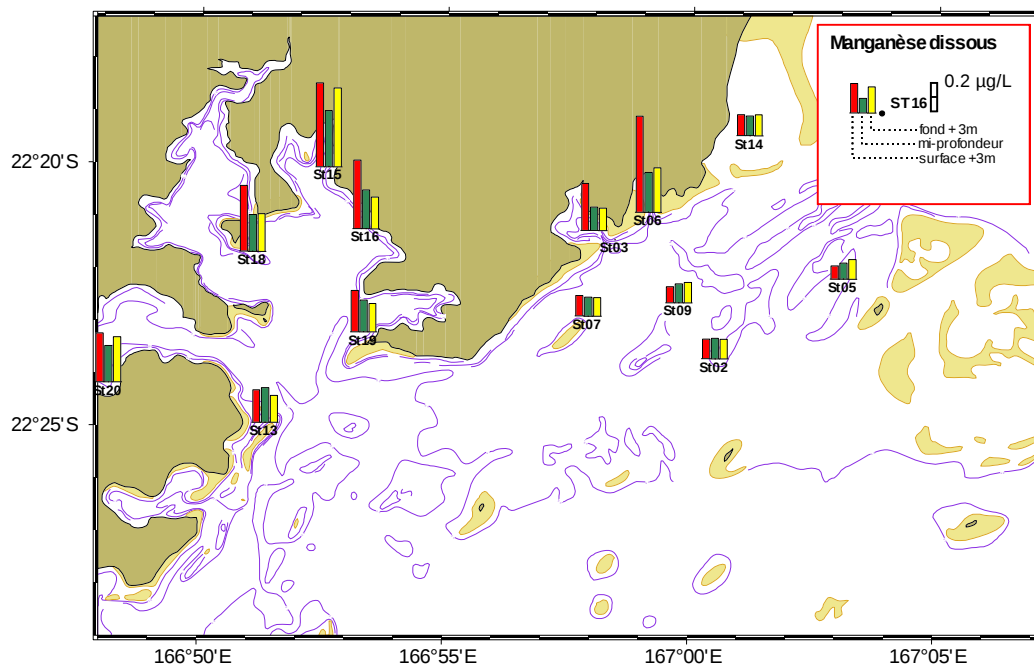


Figure 16 : Saison humide : concentration en Mn dissous en surface (-3m), mi-profondeur et fond (+3m). Campagne de mars 2009.

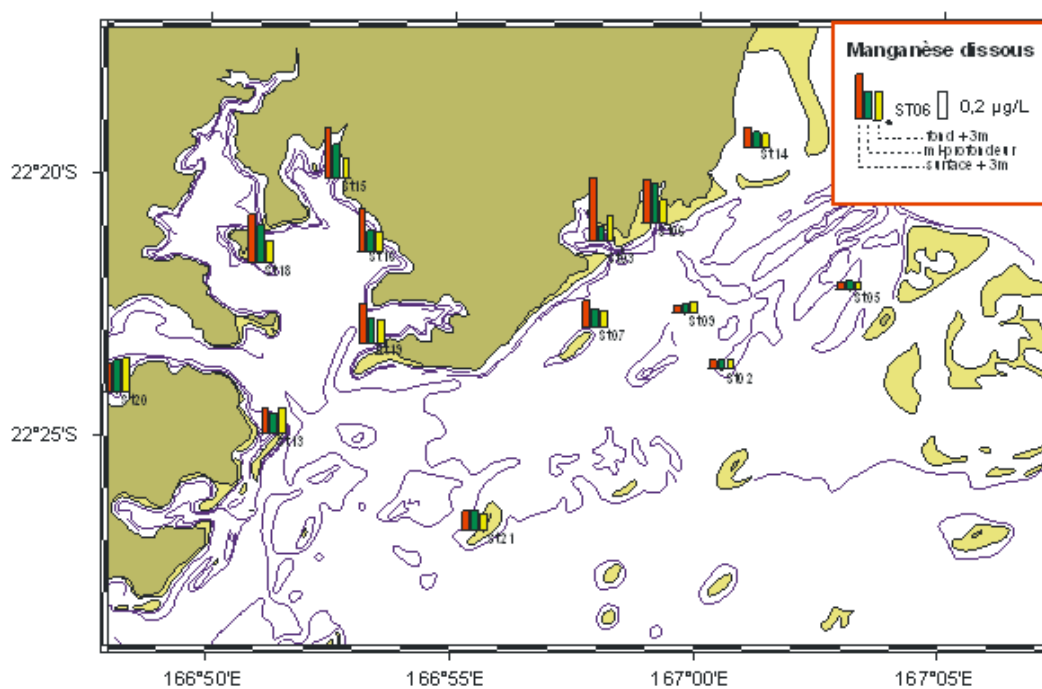


Figure 17 : Saison sèche : concentration en Mn dissous en surface (-3m), mi-profondeur et fond (+3m). Campagne d'août 2009.

II.1.4. Flux de particules

La déstabilisation des manteaux d'altération (latérites) a pour conséquence d'augmenter la quantité de matériel particulaire terrigène introduite dans le milieu lagonaire.

Les phénomènes physiques d'hyper-sédimentation sont mesurables à moyen et long termes par le calcul des taux d'accumulation qui intègrent dans le temps tous les phénomènes et mécanismes de déposition/érosion. Les effets à court terme des apports terrigènes sont induits par la « *densité de flux* » (ou plus simplement de « *flux* ») de particules c'est-à-dire la quantité de particules qui transite par unité de surface et de temps pour un lieu donné. En fonction de l'intensité du flux, les principaux effets prévisibles sont : (i) la réduction de la lumière et de l'oxygène dissous dans les eaux et ; (ii) la contamination potentielle des écosystèmes pélagiques par les polluants associés aux particules. L'étude des flux de particules prend en compte toutes les matières en suspension qui transitent avant qu'elles n'aillent se déposer.

Les particules sont reconnues comme le principal vecteur des polluants car leur flux détermine, notamment le niveau de concentration des métaux dissous dans l'eau de mer. **L'évaluation des flux de matière permet donc d'anticiper les risques de contamination des organismes dont les pélagiques comme les poissons qui sont, en bout de chaîne alimentaire, souvent consommés par l'homme.**

L'étude a donc été réalisée pour les principales sources de matière particulaire du domaine d'intérêt que sont particulièrement : le Creek de la Rade du Nord (Baie du Prony) et la rivière Kwé (Baie Kwé,) (Figure 19). Le suivi des flux de particules a été réalisé par des techniques de mesures séquentielles⁶ de manière à pouvoir évaluer la contribution des facteurs d'influence que sont les précipitations atmosphériques, moteur du lessivage des bassins versants, et dans une certaine mesure le vent, moteur important des mécanismes de remise en suspension.

Globalement, le flux moyen de MES exportées vers le lagon est beaucoup plus important en saison humide qu'en saison sèche, avec des valeurs maximales le plus souvent associées aux épisodes pluvieux ; par exemple lors d'un épisode pluvieux, le flux normal de MES sortant de la Baie Kwé, et mesuré à plus d'un kilomètre de l'embouchure, peut être multiplié par 12 en moins de 2 jours (Figure 20). Toutefois, il conviendra de ne pas négliger les autres facteurs météorologiques comme la vitesse et la direction du vent, dans les mécanismes de formation des couches turbides par remobilisation des dépôts de première sédimentation.

En termes de masses, les flux exportés depuis les deux systèmes estuariens (Rade du Nord et Baie Kwé) diffèrent grandement. Ainsi, les apports de la Kwé dépassent de manière considérable ceux de la Baie du Prony d'environ un facteur 10 (Tableau 7 et Figure 20). Il est également à noter que leurs compositions minéralogiques et géochimiques respectives traduisent les différences en matière de termes sources de particules (cf : *Impact potentiel de l'effluent de Vale-NC : Programme prédictif (2006-2009). Synthèse des études, Volume 2/3*).

⁶ Pour chaque campagne, les lignes de mouillage instrumentées ont été immergées pendant 48 jours consécutifs ; la période de collecte a été de 4 jours par godet aux stations côtières St06 (24m) et St15 (18m) ainsi qu'aux stations du large T4B (35m), T4C (36m), T4M (39m), T4L (40m) et T5B (32m).



Figure 18 : Pièges à sédiments séquentiels et dispositif de collecte automatisé pour l'étude temporelle des flux de particules.

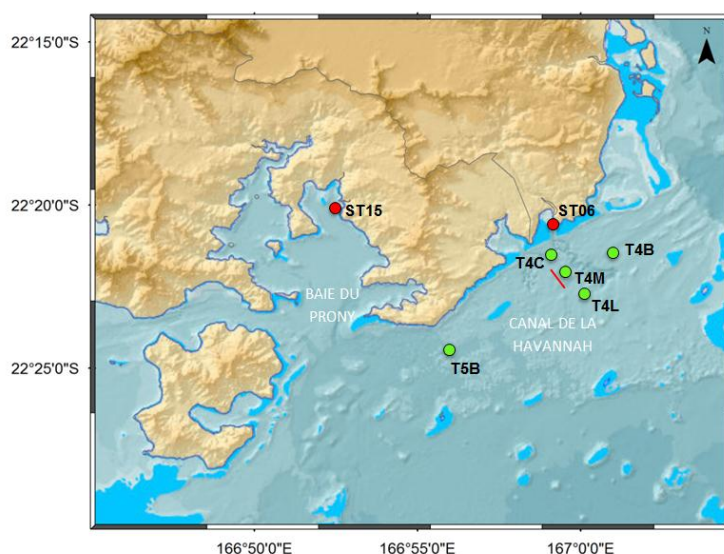


Figure 19 : Carte de localisation des stations de carottage des sédiments et de mouillage des pièges à sédiment (en rouge : St15 et St06) pour les baies du Prony et de la Kwé. En vert, sont représentés les 5 sites de mouillage des pièges à sédiments pour le Canal de la Havannah (T4B, T4C, T4M, T4L et T5B). Le trait bistre représente le diffuseur.

Tableau 7 : Flux de particules mesurés pour toute la colonne d'eau et valeurs moyennes et extrêmes calculées au droit des Creek de la Rade du Nord (St15) et de la rivière Kwé (St06).

Flux (g/m ² /j)	Rade du Nord		Baie Kwé	
	Saison sèche	Saison humide	Saison sèche	Saison humide
Moyenne	1,0 ±0,6	1,6 ±1,4	14,6 ±7,4	46,1 ±43,1
Minimum	0,4	0,1	8,0	14,5
Maximum	2,8	5,0	34,5	168,4

Baie du Prony : d'une manière générale, les flux de particules mesurés au droit du Creek de la Rade du Nord (talus prodeltaïque, (Figure 20) sont sensiblement plus élevés en saison humide qu'en saison sèche, les valeurs demeurant toutefois faibles dans les deux cas, respectivement de l'ordre de 1,0 et 1,6 g/m²/j. Cependant, alors qu'en saison sèche peu de valeurs dépassent nettement cette moyenne, en saison humide, il arrive de mesurer plus fréquemment des flux deux fois plus grands, voire nettement supérieurs à l'occasion d'un épisode pluvieux (5,035 g/m²/j). L'origine latéritique des particules est mise en évidence par la composition géochimique et minéralogique comme le soulignent respectivement les fortes concentrations en métaux (Tableau 7) et la présence largement majoritaire de goéthite (*cf : Impact potentiel de l'effluent de Vale-NC : Programme prédictif (2006-2009). Synthèse des études, Volume 2/3*).

Baie Kwé : les masses collectées en sortie de baie sont en moyenne 2 fois plus faibles en saison sèche qu'en saison humide et les écarts sont très importants puisqu'en saison humide, il a été constaté des variations d'un facteur 12 (Figure 20 et Tableau 7) ; les valeurs moyennes observées étant comprises entre 14,6 et 46,1 g/m²/j. Limités dans le temps, des flux extrêmes supérieurs à 200 g/m²/j sont certainement envisageables sous certaines conditions météorologiques particulières. On citera notamment la resuspension des sédiments sous l'action mécanique de la houle générée par des vents violents d'un large secteur sud et/ou de très fortes précipitations génératrices de phénomènes d'érosion intense sur les bassins versants.

Les matières en suspension de la Baie Kwé se différencient de celles de la Rade du Nord par des valeurs de flux qui sont jusqu'à 30 fois plus élevées, mais également par les très fortes teneurs en Ca (Tableau 8) et la minéralogie des particules qui sont très majoritairement composées de carbonates d'origine marine.

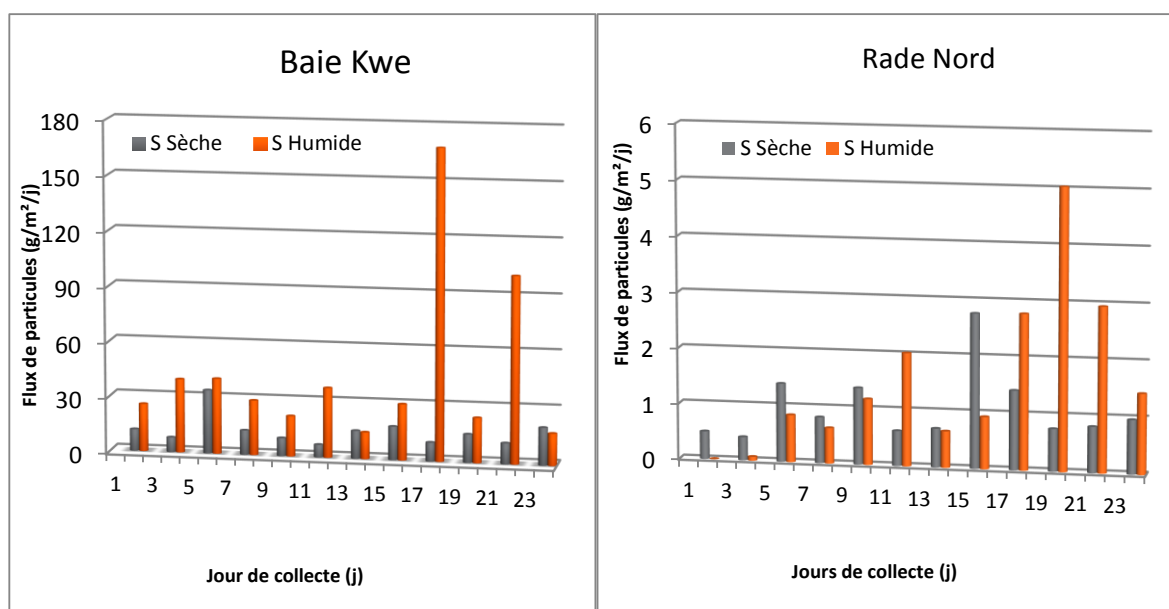


Figure 20 : Evolution des flux particulaires pour les saisons sèche (octobre 2006) et humide (mars 2007) au droit des embouchures du Creek de la Rade du Nord et de la rivière Kwé.

Canal de la Havannah : le canal de la Havannah est une zone à fort hydrodynamisme où entrent en contact les eaux océaniques et lagunaires. Les mesures effectuées montrent que les flux de matière en suspension sont très comparables pour tous les différents secteurs du Canal mais ils sont extrêmement variables à l'intérieur des périodes d'études (Figure 21 ; Tableau 9 et Tableau 10). Ainsi, pour les secteurs situés au N-E de la Baie Kwé, les valeurs de flux peuvent être multipliées par 180, tandis qu'au S-W, en direction du récif Ioro et l'Illet Ugo, les écarts entre les valeurs observées n'atteignent plus qu'un facteur 40 à 80. Cette constatation permet de souligner l'influence permanente des apports issus de la Baie Kwé le long de la côte sud-est du Canal de la Havannah. Par ailleurs, la composition géochimique des particules prouve à l'évidence que l'origine marine est largement prépondérante puisque les teneurs en carbonates peuvent dépasser les 90% (Tableau 8)

Ce qu'il faut retenir

Il apparaît clairement que l'importance des précipitations influe sur la masse de matière exportée vers le lagon ; si en saison sèche, rares sont les journées de pluies qui totalisent plus de 20 mm de précipitations (quantités au-delà desquelles les phénomènes de lixiviation sont significatifs, Figure 22), dans le sud en saison humide, les 20 mm sont cycliquement enregistrés un jour sur trois. Le passage des dépressions durant cette période apporte des quantités de pluies très importantes qui peuvent atteindre régulièrement 100 mm/jour.

Pendant la saison sèche la matière particulaire qui sédimente est en concentration sensiblement constante quel que soit le site. Cette quantité constitue un « *bruit de fond de densité de flux* » et la matière particulaire qui transite ne semble pas majoritairement liée avec les phénomènes de lessivage des sols, des mécanismes de remise en suspension des sédiments ayant été mis en évidence. Toutefois, ce « *bruit de fond* » est inégal d'une unité physiographique à l'autre et peut être estimé entre 5 et 10 fois plus élevée en sortie de Baie Kwé qu'au droit de la Rade du Nord en raison des configurations géomorphologiques respectives.

Les épisodes qui dépassent les valeurs du « *bruit de fond* » sont à relier, soit à des très fortes précipitations soit à des mécanismes de remise en suspension, voire une combinaison des deux phénomènes.

Ainsi, pour la Baie Kwé, les débris coralliens du platier qui borde l'embouchure sont entraînés vers le lagon en fonction des régimes des vents (direction et vitesse) ; les vents de sud générant une forte houle qui constitue vraisemblablement le moteur du mécanisme de re-suspension de masses de particules relativement importantes (Figure 22). Pour d'autres sites, comme la Rade du Nord, le phénomène de remise en suspension est plus modéré et localisé (Figure 20).

Dans le Canal de la Havannah, la charge particulaire semble demeurer en suspension plusieurs jours dans les eaux avant de pouvoir être évacuée et/ou sédimenter en direction du SW principalement.

Tableau 8 : Composition type des particules collectées dans les pièges à sédiment placés au droit des embouchures du Creek de la Rade du Nord, de la rivière Kwé et dans le Canal de la Havannah. Analyse d'un échantillon composite de 12 godets, exprimée en mg/kg de MES, pour chacune des unités étudiées et incertitude associée sur la mesure (%).

Elément (mg/kg)	Ca	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Si	Zn	% CaCO ₃
Incertitude (%)	1	33	17	22	50	22	18	22	20	50	1
Canal de la H	337 350	1 780	12,1	393	ND	11 760	125	162	6 300	3,8	93,5
Baie Kwé	290 310	4 220	57,6	2667	ND	68 940	578	1142	9 670	44,3	80,9
Rade Nord	61 870	74 110	208,0	8500	24,9	205 660	1949	2742	76 860	134,0	17,8

Tableau 9 : Flux de particules mesurés et valeurs moyennes et extrêmes calculées pour le Canal de la Havannah, le long d'un axe médian orienté NE-SW. Calculs effectués pour la saison humide (avril 2008).

Flux (g/m ² /j) (saison humide)	Station T4C	Station T4B	Station T5B
Moyenne	26,9 ±31,6	31,6 ±40,1	34,3 ±33,3
Minimum	2,3	0,7	1,3
Maximum	93,2	126,3	104,5

Tableau 10 : Flux de particules mesurés et valeurs moyennes calculées pour le Canal de la Havannah, le long d'un transect orienté N-S longeant la position du diffuseur. Mesures effectuées en saison sèche (novembre 2007) et humide (avril 2008). T4C est positionnée à l'extrémité nord du diffuseur, T4M est la station médiane et T4L correspond à l'extrémité sud du diffuseur, non opérationnel au moment des mesures.

Flux (g/m ² /j)	TRANSECT COTE LARGE SAISON SECHE			TRANSECT COTE LARGE SAISON HUMIDE		
	Station T4C	Station T4M	Station T4L	Station T4C	Station T4M	Station T4L
Moyenne	11,2	7,3	4,5	23,1	24,1	27,4
Ecart-type	9,6	7,3	4,2	25,8	29,5	35,5
Minimum	0,6	0,4	0,7	2,9	2,3	0,6
Maximum	26,2	24,8	14,8	93,9	105,6	107,8

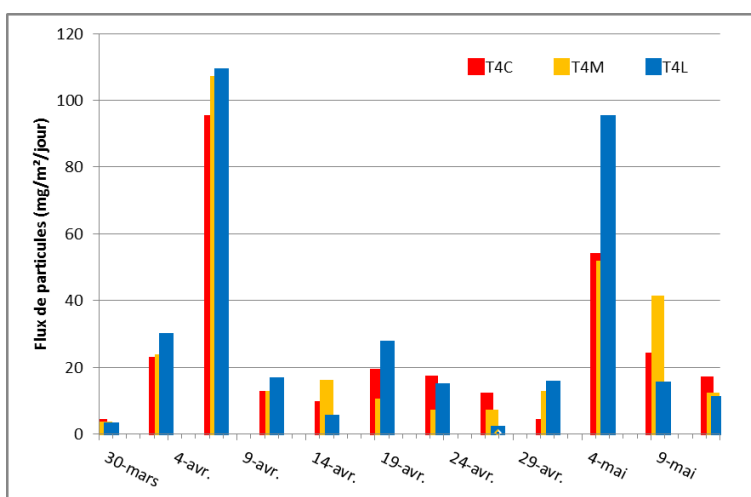
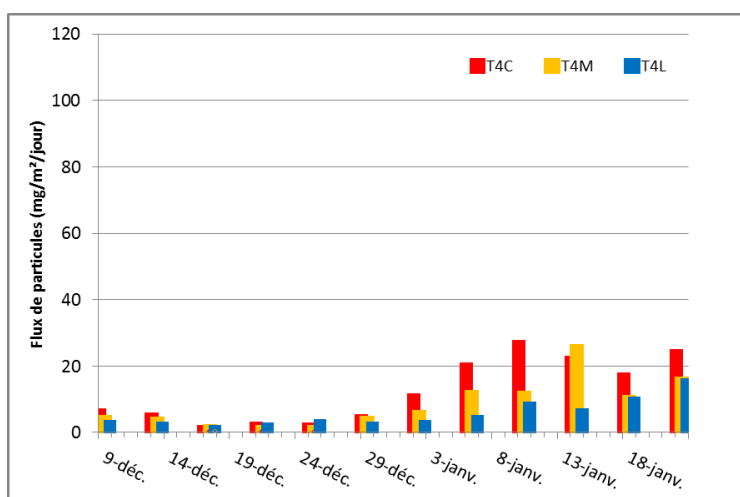
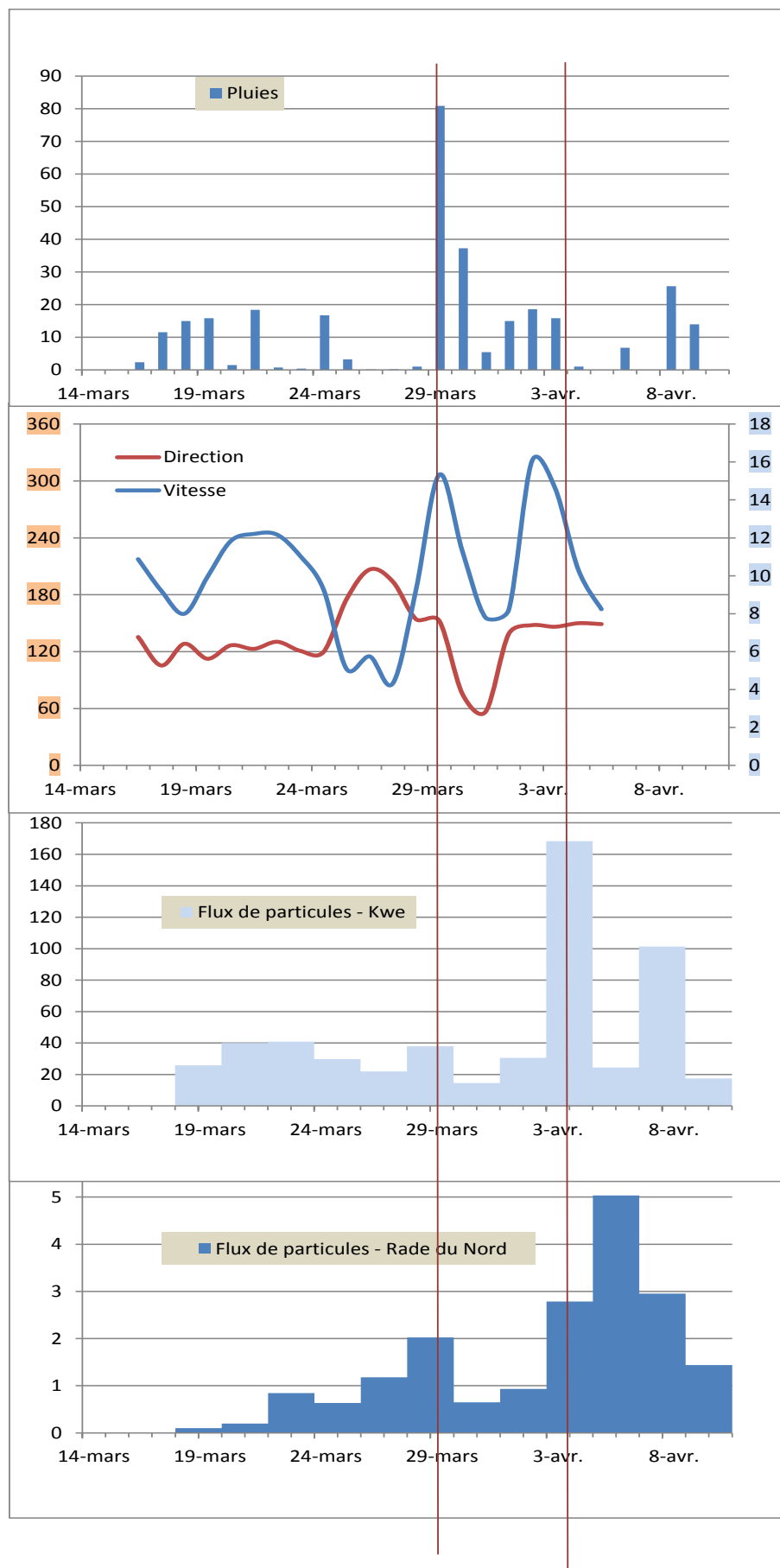


Figure 21 : Evolution des flux particulaires pour le Canal de la Havannah, le long d'un transect orienté N-S longeant la position du diffuseur. Mesures effectuées pour la saison humide (décembre 2007-janvier 2008, à gauche et centrée sur avril 2008 à droite). T4C est positionnée à l'extrémité nord du diffuseur, T4M est la station médiane et T4L correspond à l'extrémité sud du diffuseur.

II.1.5. Caractéristiques des sédiments

Les sédiments sont constitués par la somme de tous les phénomènes de transport hydrodynamique des particules (sédimentation/érosion). Ils sont la mémoire des événements hydro-sédimentaires et constituent à la fois un "terme puits" et potentiellement un "terme source" des polluants. La définition des zones de dépôt préférentiel revêt de ce fait une importance primordiale pour le suivi ultérieur des contaminations du milieu marin. Il est en particulier recherché les aires de sédimentation naturelle des particules fines dont le diamètre est inférieur à 40 µm (pélites) en raison de leur capacité à concentrer/relarguer les métaux.

Dans cet objectif, il a été nécessaire d'explorer le domaine d'études en entier par, notamment, des techniques de prospection acoustique des fonds avant de procéder à l'estimation des taux d'accumulation dans les secteurs potentiellement sensibles et d'étudier la géochimie des fractions labiles des métaux associés aux particules.



II.1.5.a. Nature et granulométrie des fonds

Baie du Prony : pour toute la partie centrale de cette unité, la profondeur atteinte est rapidement d'environ 35-40 mètres et se maintient remarquablement constante sur une très grande étendue (6,5 km², soit 46% de la superficie totale). Cette profondeur est atteinte à environ 200 m de la ligne de côte en Rade du Nord et ailleurs il ne faut guère plus de 300 mètres.

La phase de prospection acoustique a permis d'identifier 12 classes dont 4 correspondent à des vases plus ou moins compacts ou fluides ; les autres correspondent à la signature de sables variés, de roches ou de récifs coralliens plus ou moins altérés ; la Baie du Prony étant en très grande partie couverte de vases compacts (Figure 23).

De manière synthétique, 5 zones distinctes sont constituées par des fonds vaseux situés par plus de 30 m de profondeur : ces vases, compacts dans les zones profondes, deviennent cependant plus fluides aux abords des côtes. Ailleurs, les fonds sont extrêmement hétérogènes et se répartissent de la manière suivante :

- l'ouest de la Pointe Mé, est composé d'une gradation du type « sable vaseux-vase fluide », alors qu'au nord de celle-ci, les coraux branchus et massifs dominant ;
- l'est de la Baie du Prony, est caractérisé par des fonds sablo-vaseux au niveau des embouchures des Creeks des Rades du Nord et du Nord-Est ; le long de la côte les fonds deviennent hétérogènes et sont composés de coraux branchus, de sable et de débris coralliens ;
- l'îlot Gabriel est encerclé de coraux (massifs et branchus), parsemé de débris coralliens, de socles rocheux et de poches de sable fin à vaseux ;
- la côte ouest de la Baie du Prony présente des fonds composés de sables coquilliers et de coraux branchus.

Canal de la Havannah : schématiquement, la zone d'étude (Figure 24) est composée d'une dépression faisant face à la Baie de Port Boisé dont la profondeur varie de 30 à 50 m et, dans le prolongement de la Baie Kwé, d'une vallée sous-marine bien individualisée qui atteint plus de 60 m. Ailleurs, de petits monts sous-marins occupent une surface importante notamment au sud-ouest du Récif Ioro. Les profondeurs entre la côte et le Récif Ioro sont comprises entre 30 et 50 m. Au sud de la zone, la profondeur oscille entre 40 et 60 m alors qu'à l'est de la Baie Kwé, celle-ci avoisine seulement les 20 à 40 mètres.

Le Canal de la Havannah possède 9 types d'habitats identifiables mais seulement 7 d'entre eux ont été validés ; certaines signatures correspondant à des formations trop limitées spatialement ou difficiles à échantillonner (ex. : fond de la vallée sous-marine).

On retiendra que le Canal de la Havannah, peut être composé, dans sa partie sud-ouest, de vases compacts plutôt carbonatées si l'on se réfère aux études effectuées par Chevillon (2005). De manière synthétique, les différents faciès sont répartis de la manière suivante :

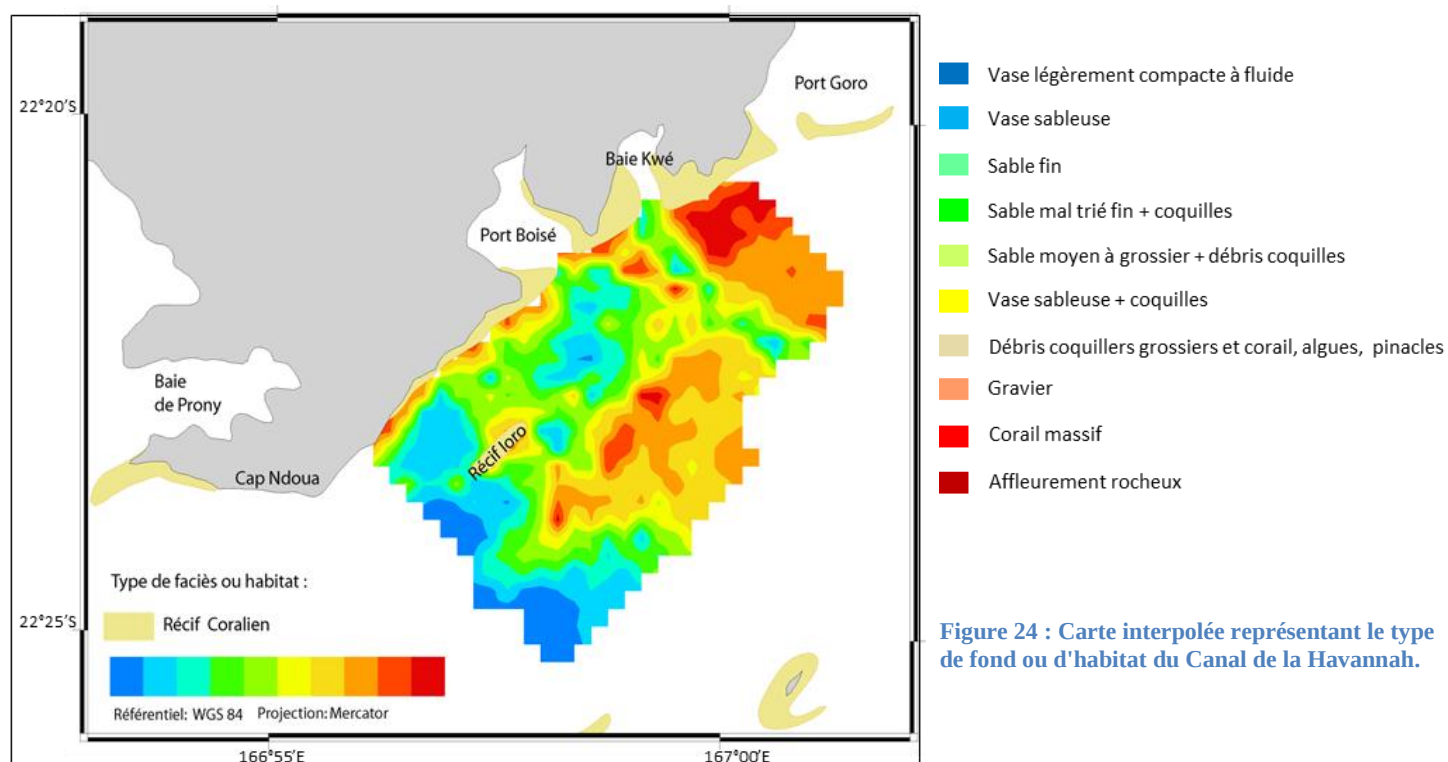
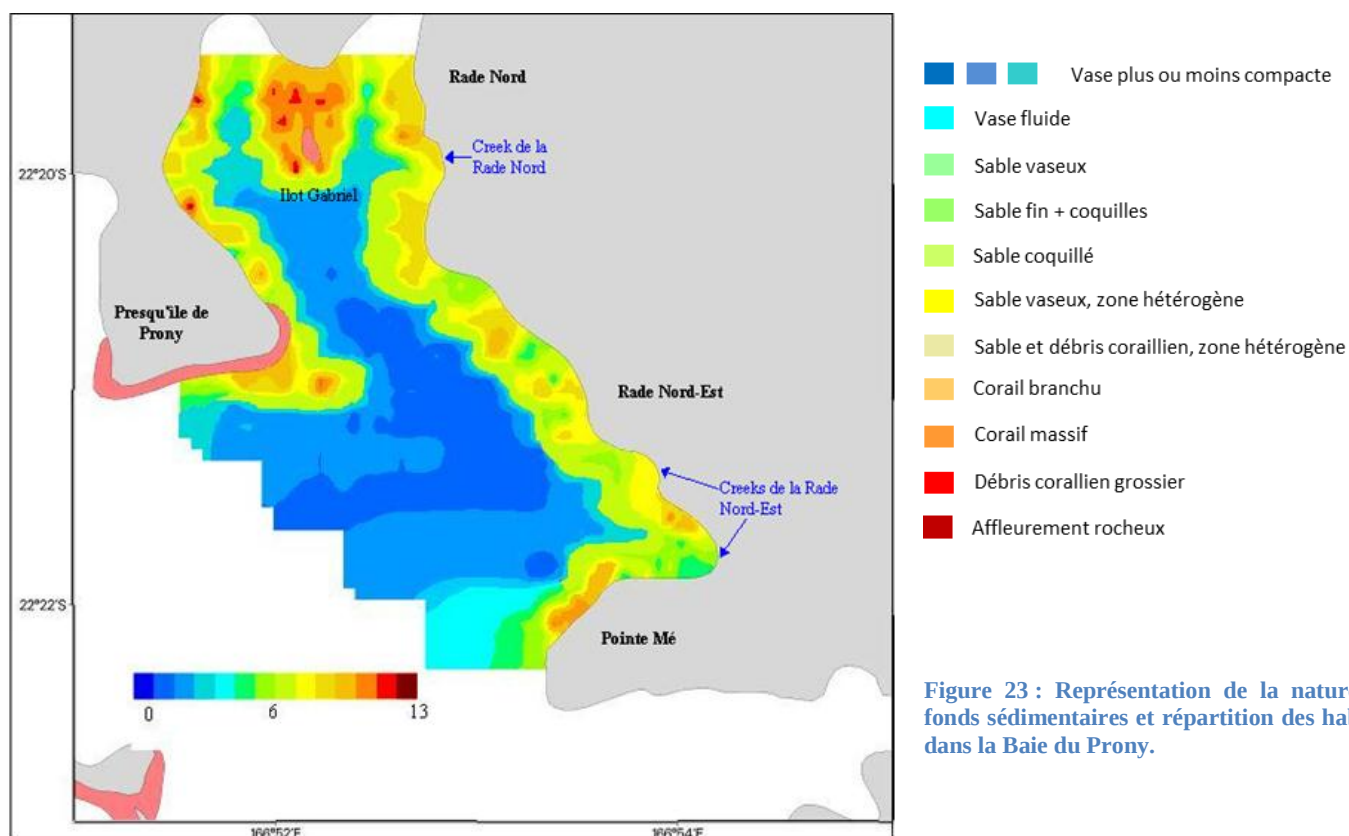
- entre la Baie Kwé et le Port de Goro, en raison des conditions hydrodynamiques intenses, seuls des graviers ($\varnothing > 2\text{cm}$) tapissent le fond et le substratum affleure par endroit ;
- au droit de la Baie Kwé, une profonde paléo-vallée d'axe NO-SE permet une sédimentation graduée de sables grossiers avec des débris coquilliers et coralliens du bord de la vallée à -40 m, puis de vases sableuses jusqu'à 70 m de profondeur ;

- entre Port Boisé et la Baie Kwé, on note la présence d'un éperon formé d'affleurements de roche alternant par endroits avec quelques poches de graviers et des massifs coralliens qui occupent les fonds de 20 m jusqu'à 40 m de profondeur ;
- une vaste zone dépressionnaire entre Port Boisé, le récif Ioro et le banc Ionontéa permet le dépôt d'un substrat plus fin, composé principalement de vase sableuse et de sable fin ;
- les zones situées au sud-ouest du récif Ioro et au sud du banc Ionontéa, sont composées par le même type de dépôt. Encore plus au sud-ouest, à priori une sédimentation de matériel fin se produit ;
- au sud-est du récif Ioro, le banc Ionontéa est constitué de pinacles coralliens d'une vingtaine de mètres de hauteur dont la base est à plus de 30 m de profondeur. Le banc est constitué de graviers puis en s'éloignant vers le sud-est sur des fonds de 40 m, un vaste système hétérogène, constitué de débris coquilliers, de débris coralliens, d'algues, de sable et de quelques aiguilles, prend place.

Ce qu'il faut retenir

Dans la Baie du Prony, seule une frange côtière de 200-300 m de large est constituée de faciès de type corallien parsemé de poches de sables coquilliers et de débris plus ou moins envasés. Les embouchures abritées des creeks sont les seuls domaines de dépôts de sables fins à caractère vaseux. Partout ailleurs, par plus de 15-20 m de profondeur, les vases plus ou moins compactes et relativement carbonatées dominent amplement.

Pour le Canal de la Havannah, les fonds inférieurs à 40 m subissent une forte activité hydrodynamique qui n'autorise pas la sédimentation des particules fines ($\varnothing < 40 \mu m$), seuls de gros graviers et quelques algues profitent de ces conditions. La paléo-vallée de la Baie Kwé semble être le siège d'une sédimentation de matériaux relativement plus fins. Pour les fonds de 40 m situés entre le Récif Ioro et le banc Ionontéa, les formations sableuses sont courantes avec cependant l'intercalation de dépôts hétérogènes de matériels grossiers (débris coralliens, coquilliers grossiers..) au sud-est. La dépression localisée entre le récif Ioro, le banc Ionontéa et Port Boisé, ainsi que toute la région sud-ouest de cette cuvette sont constituées d'un dépôt de sable fin, de sables vaseux et de vases carbonatées.



II.1.5.b. Distribution spatiale des apports latéritiques

La description des faciès présentée ci-dessus a été affinée par des campagnes de « vérité terrain » afin de rendre compte des pourcentages en fraction fine (pélites < 40 μm) d'origine terrigène ou marine ; cette distinction n'étant pas encore possible par la seule prospection acoustique des fonds. En effet, ce type d'étude sédimentologique doit être complété par une caractérisation géochimique qui seule permet de suivre avec précision dans le temps et l'espace, le niveau d'influence des apports terrigènes, liés ou non à l'activité anthropique. Deux études sur les envasements ont été réalisées grâce à un maillage d'échantillonnage serré de la couverture sédimentaire, l'une dans le secteur de la Baie du Prony et l'autre dans le chenal de la Baie Kwé, seules aires de la zone favorisant la sédimentation des pélites d'origine terrigène.

Baie du Prony : la présence importante de pélites dans les sédiments superficiels (environ 88 % en moyenne) suggère que l'hydrodynamisme général de la Baie est faible et favorise la sédimentation des particules les plus fines (Figure 25) ; des teneurs pélitiques supérieures à 90% composent les dépôts du nord et du centre de la Baie du Prony. Entre ces deux unités, une probable accélération (toute relative) des courants entraîne une diminution notable de la sédimentation des fractions particulaires les plus fines.

Cependant, la composition géochimique des pélites diffère d'une aire à l'autre de la baie, les teneurs en carbonates permettant de définir exactement la gradation de l'influence marine (Figure 26), leur formation étant assurée à 90% par des organismes tels les coraux ou bien les populations de foraminifères.

En ce qui concerne les carbonates, les valeurs les plus faibles (<7%) sont logiquement rencontrées près des embouchures des rivières Kadji, du CRN en Rade Nord et des deux creeks de la Rade Nord-Est. Les teneurs les plus importantes en carbonates sont observées au centre de la Baie du Prony, avec un maximum de 73% ce qui reflète une influence marine amplement prépondérante.

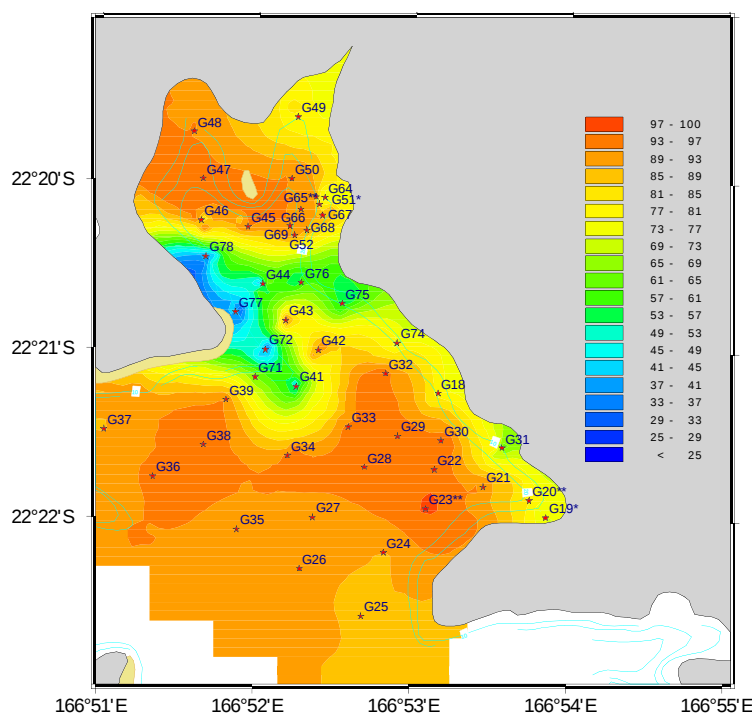


Figure 25 : Carte de positionnement des stations de prélèvement (étoiles) et de distribution des pélites (particules <40µm) dans les sédiments superficiels en Rade Nord et Nord-Est, Baie du Prony. Résultats exprimés en (%) de la masse totale de sédiment brut.

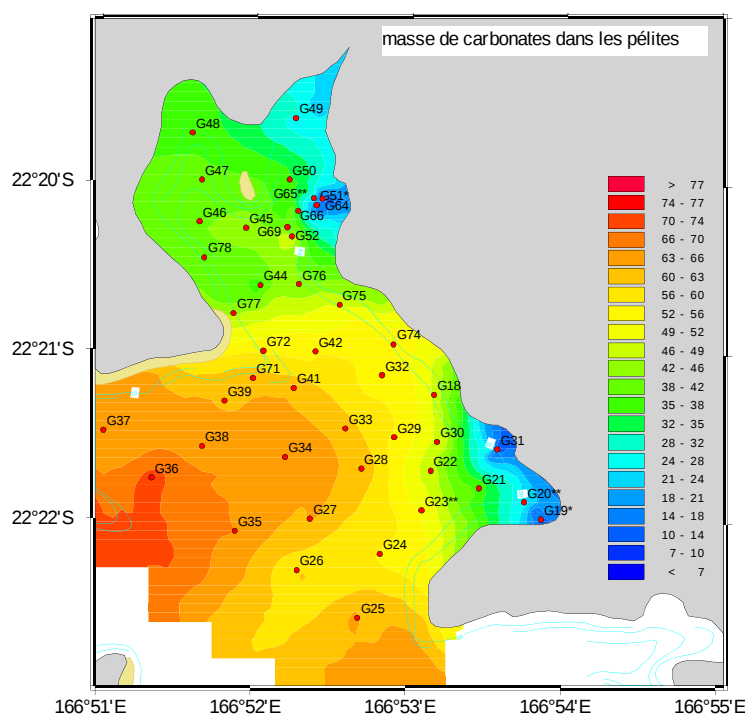


Figure 26 : Carte de positionnement des stations de prélèvement (étoiles) et de distribution des fractions pélitiques. Composition en carbonates exprimée en (%) de la masse totale du sédiment brut.

L'étude des traceurs terrigènes dans les pélites comme Ni et Cr a permis de délimiter de façon très précise les différentes aires d'influence des apports terrigènes (Figure 27 et Figure 28). La diminution des concentrations de Ni et de Cr avec la distance aux embouchures (eg : Creek de la Rade Nord) fournit une information complémentaire sur l'intensité des phénomènes de dispersion des particules terrigènes. Par ailleurs, le rapport de concentration Ni/Cr renseigne sur l'évolution temporelle, en matière de nature des apports. En effet, la composition des strates qui composent les séries géologiques varie avec la profondeur atteinte lors des opérations de terrassement ou d'excavation.

Pour le nickel (Figure 27), les concentrations maximales sont rencontrées près des embouchures du Creek de la Rade du Nord et surtout au niveau des deux creeks qui débouchent dans la Rade du Nord-Est, avec respectivement des valeurs autour de 3 600 mg/kg et de 4 300 mg/kg. En direction du centre de la baie du Prony, les concentrations diminuent pour atteindre moins de 1 300 mg/kg. La teneur la plus faible est observée en sortie sud-ouest de la Baie du Prony (780 mg/kg).

Pour le chrome (Figure 28), les concentrations sont logiquement maximales très près des embouchures du creek de la Rade Nord et au fond de la rade du Nord-Est ; les concentrations atteignent environ 14 100 mg/kg. Dans le reste de la baie, les valeurs ne dépassent pas les 2 000 mg/kg ; la zone présentant les concentrations les plus faibles est localisée à la sortie de la baie du Prony (1 355 mg/kg).

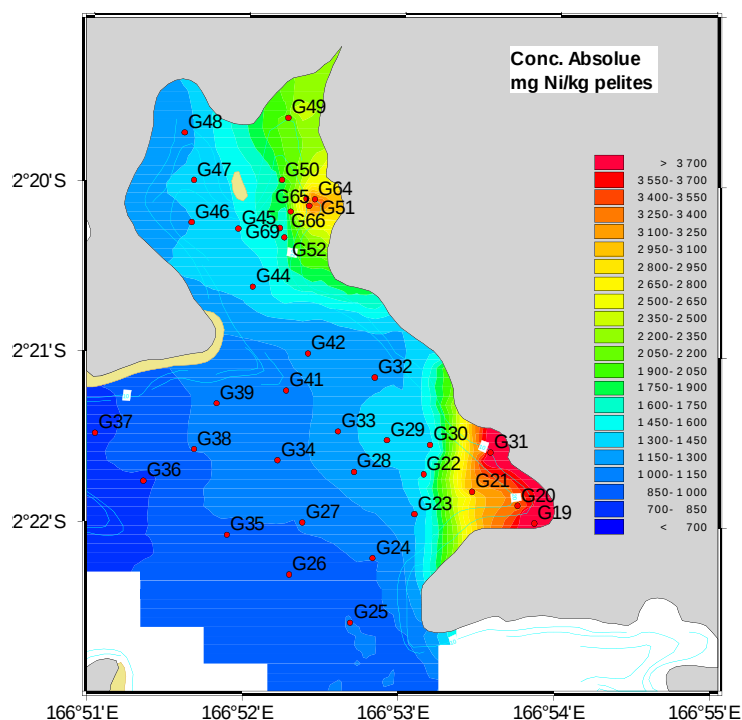


Figure 27 : Distribution spatiale des concentrations en Ni total dans les fractions pélitiques des sédiments de la Baie du Prony.

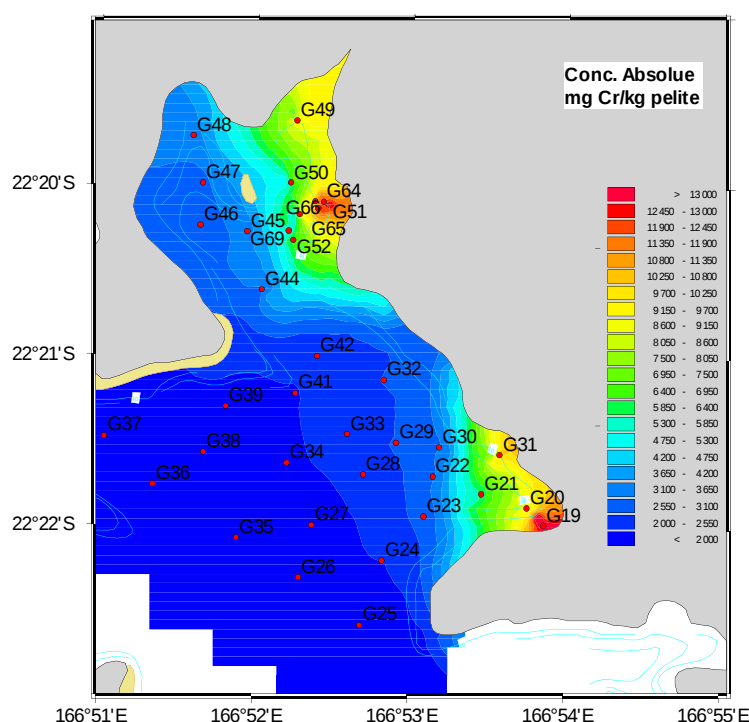


Figure 28 : Distribution spatiale des concentrations en Cr total dans les fractions pélitiques des sédiments de la Baie du Prony.

Baie Kwé : le taux de pélites dans les sédiments de cette baie varie d'environ 15%, près de l'embouchure même de la rivière Kwé, à 74%, au centre (Figure 29). Cette évolution traduit une diminution progressive de l'influence des courants de la rivière en direction de la sortie de la baie. Toutefois, vers le large, les teneurs en pélites diminuent à nouveau (23%) en raison, cette fois-ci, de l'influence des courants marins (> 1m/s) qui règnent dans tout le secteur du Canal et ne permettent que la mise en place, d'abord de sables peu vaseux au niveau du talus, puis uniquement de graviers.

La distribution spatiale des carbonates augmente avec la distance à l'embouchure (22% à 68% en sortie de baie). Les teneurs en carbonates témoignent d'une augmentation de l'influence marine progressive accompagnée d'une diminution de l'impact terrigène en direction du large. Cette évolution est confortée par les concentrations en Ni et Cr qui sont maximales au débouché de la Kwé (respectivement 4 400 mg/kg et 8 700 mg/kg) et diminuent vers la sortie de la baie, respectivement à des valeurs de 1 060 mg/kg et 2 010 mg/kg.

Ce qu'il faut retenir

L'étude sédimentologique menée dans la Baie du Prony a permis de préciser les grands traits de la dynamique générale grâce à l'étude des sédiments. Les zones de déposition préférentielle des pélites se situent à l'ouest de la Rade du Nord et au centre de la baie. Les zones d'influence terrigène majeures sont restreintes aux abords des embouchures des Rades du Nord (et du Nord-Est) ; ces phénomènes conduisent à l'apparition de « hot-spots » de concentration en métaux bien délimités dans l'espace. Une fraction du matériel particulaire est exportée vers la zone centrale dans laquelle elle se dilue avec l'ensemble des apports marins (carbonates).

En Baie Kwé l'étude a été moins approfondie mais les résultats obtenus montrent que seule la partie médiane du chenal d'accès à la baie possède un hydrodynamisme suffisamment faible pour permettre la sédimentation d'une majorité de pélites ; sur ce site, des études complémentaires d'envasement ont été conduites par le bureau d'études EMR, mais les résultats ne sont pas connus ni abordés dans ce rapport de synthèse.

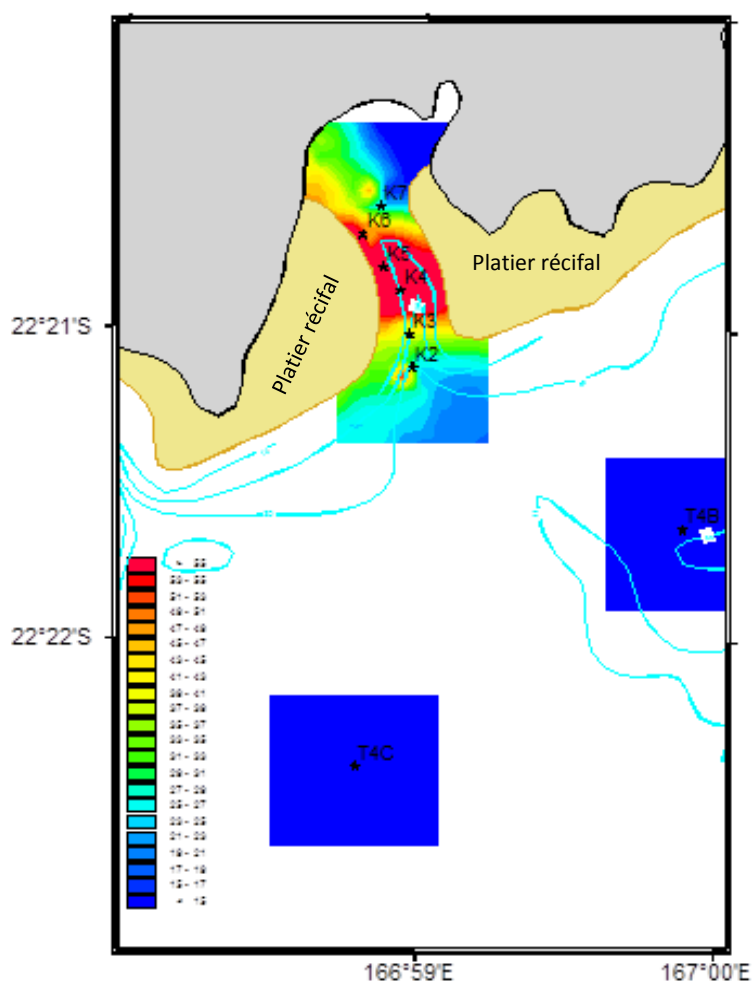


Figure 29 : Carte de distribution des pélites (particules <40µm) dans les sédiments superficiels en Baie Kwé et aux abords du Canal de la Havannah. Résultats exprimés en (%) de la masse totale de sédiment brut.

II.1.5.c. Taux d'accumulation

Les conséquences de l'activité anthropique en générale et minière en particulier conduisent à s'intéresser aux masses en apports terrigènes et à leur quantification, notamment au droit des embouchures ; ces dépôts résultant des mécanismes de sédimentation, bien souvent accélérés par le défrichement des sols avant leur exploitation. Cette quantification peut être conduite sur le long terme sur une sélection d'un ou de plusieurs sites judicieusement choisis en fonction des informations sédimentologiques collectées préalablement et présentées ci-dessus.

Dans cet objectif, des carottages réalisés dans la couverture sédimentaire au pied du talus prodeltaïque du Creek de la Rade Nord (St15) et dans la Baie (St06) ont permis de détailler la géochronologie des événements sédimentaires grâce à la technique de datation au ^{210}Pb (Figure 19 et Figure 30). Cette technique permet d'estimer les taux d'accumulation historiques et de les comparer aux actuels.



Figure 30 : Carottes extraites de la baie du Prony pour l'étude de la géochronologie et le calcul des taux de sédimentation.

Baie du Prony (Rade du Nord, St15) : d'une apparente homogénéité (%pélites = $90,5 \pm 1,8\%$), les sédiments carottés ont permis de distinguer des dépôts de compacités et couleurs distinctes. Cette observation a été confortée par l'étude des populations granulométriques qui ont mis en évidence un enrichissement sensible en fraction pélitique dans les horizons les plus récents. Cette augmentation traduit la modification du régime des apports sédimentaires (augmentation des proportions de matériel particulaire fin) qui ont constitué les horizons de surface.

L'évolution de la radioactivité du « ^{210}Pb en excès » avec la profondeur (Figure 31), permet de distinguer clairement les deux épisodes sédimentaires prépondérants où les sédiments les plus récents se sont accumulés à un taux moyen 2 fois plus important que ceux qui constituent la couche inférieure ; respectivement $0,45 \text{ g/cm}^2/\text{an}$ et $0,25 \text{ g/cm}^2/\text{an}$. Le changement de régime sédimentaire peut être daté aux environs de 1975, moyennant un certain nombre de précautions compte tenu du manque de radio-chronomètres complémentaires exploitables.

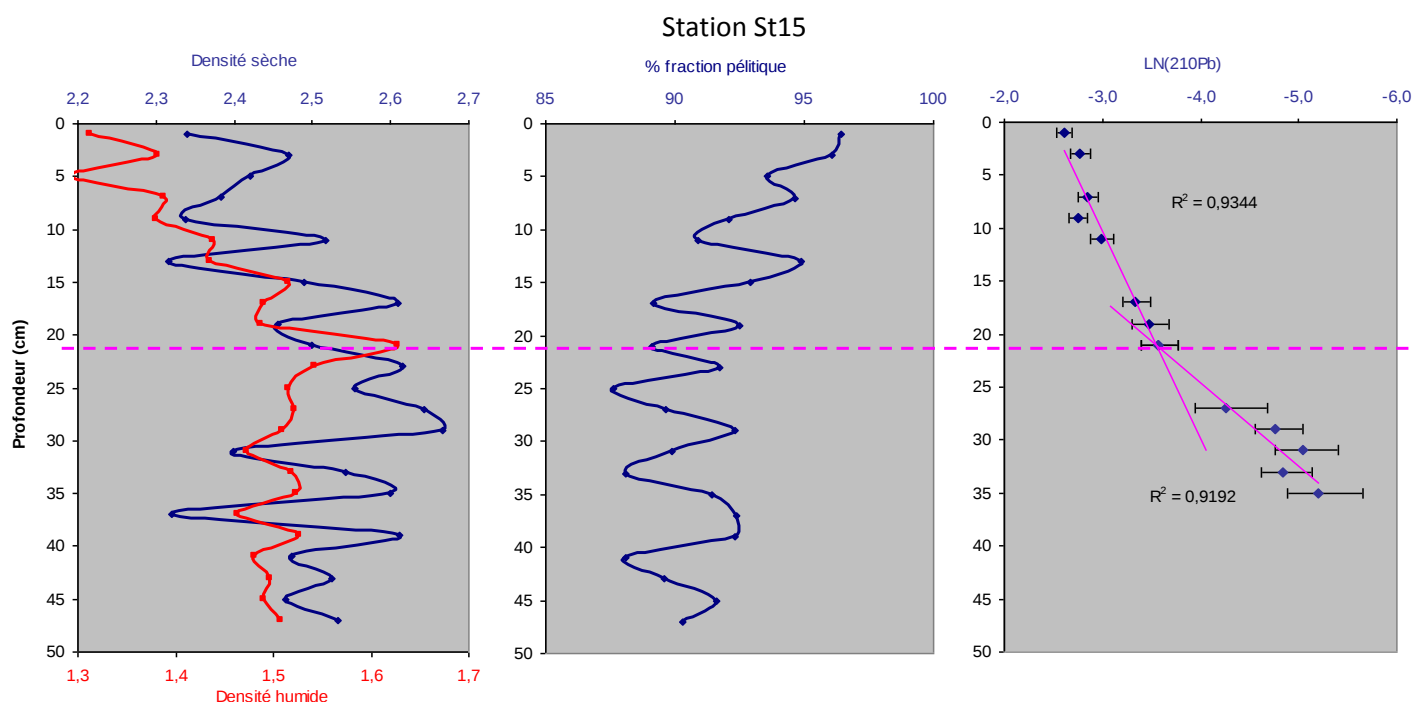


Figure 31 : Profils de densités sèche et humide, pourcentage en fraction pélitique et radioactivité du « ^{210}Pb en excès » dans les sédiments de la carotte de la station St15 (Rade du Nord).

Baie Kwé (St06) : la description visuelle de la carotte a permis de distinguer deux strates très riches en carbonates : la première, entre 0 et 10 cm, composée de vases sableuses surmonte la deuxième constituée de vases devenant progressivement plus riches en sables (Figure 32).

Ces sédiments se différencient des précédents (Baie du Prony) notamment par la proportion de pélites, nettement inférieure, qu'ils refferment ($66,6 \pm 4,7 \%$). La décroissance radioactive du « ^{210}Pb en excès » est relativement linéaire bien que des valeurs élevées en milieu de carotte laissent supposer que des événements catastrophiques se sont produits (apports liés à un cyclone ?). Il est cependant possible d'envisager le calcul d'un taux d'accumulation dont la valeur ($1,20 \text{ g/cm}^2/\text{an}$) est très élevée.

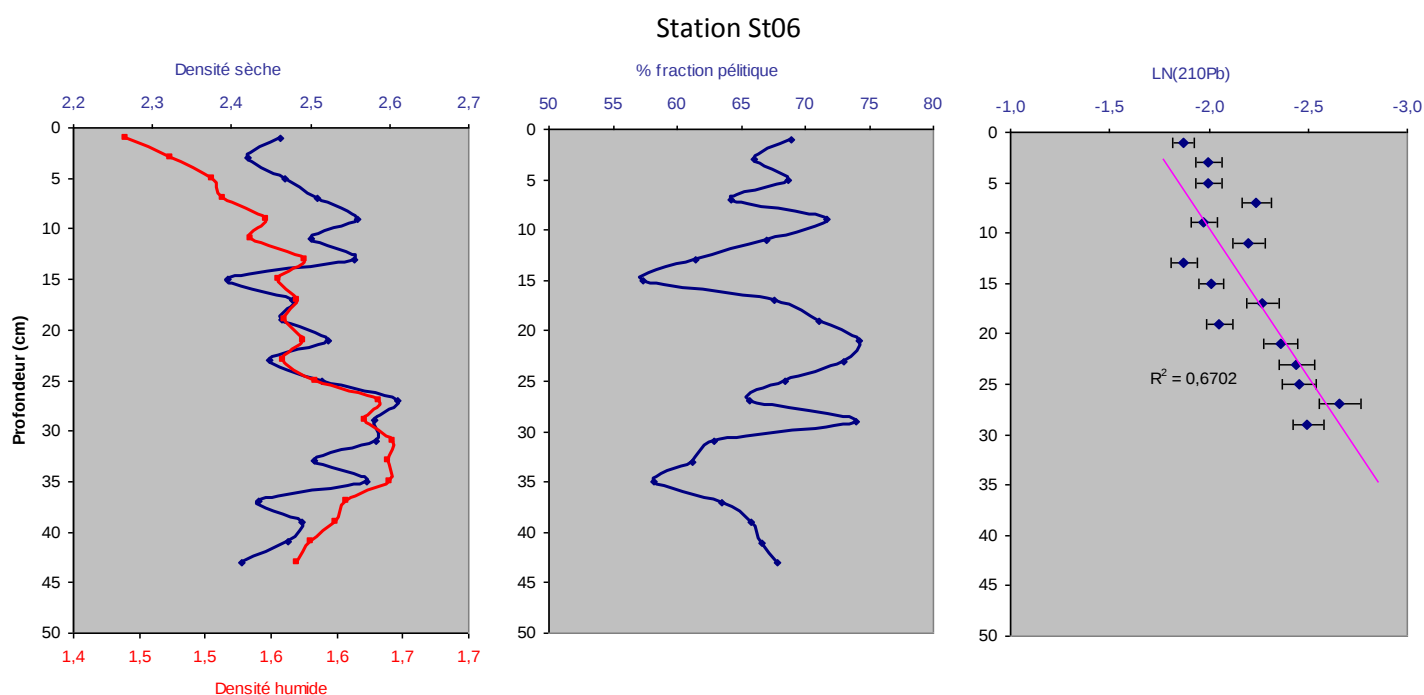


Figure 32 : Profils de densités sèche et humide, pourcentage en fraction pélitique et radioactivité du « ^{210}Pb en excès » dans les sédiments de la carotte KW-1 de la station St06 (Baie Kwé).

Ce qu'il faut retenir

Au niveau du talus prodeltaïque du Creek de la Rade du Nord, la sédimentation s'est effectuée à un rythme relativement lent jusqu'au milieu des années 70, époque à partir de laquelle le taux d'accumulation double dans les dépôts. Cette augmentation est accompagnée d'une modification des caractéristiques de la matière déposée. Ces changements dans les rythmes sédimentaires sont probablement à imputer, au moins en grande partie, à l'ouverture de pistes et aux opérations de prospection minière dont les autorisations ont été accordées de mai 1970 à mars 1971, pour le secteur du bassin versant du Creek de la Rade du Nord. Les conséquences de ces remaniements de terrains pouvant perdurer, voire être amplifiées au cours du temps. Par ailleurs, une légère accélération des taux d'accumulation semble se dessiner mettant en cause probablement des remaniements plus importants à relier avec les terrassements nécessaires à la construction du site industriel actuel.

Pour la Baie Kwé, l'ensemble des données montre que les phénomènes d'accumulation sédimentaire sont importants. Au niveau du point de carottage (milieu de baie), si les quantités de particules ne semblent pas avoir beaucoup évolué avec le temps, en revanche la nature des apports a fortement varié et les fractions vaso-sableuses ont progressivement été remplacées par des fractions pélitiques plus homogènes, en surface. Toutefois, les pélites de surfaces contiennent une forte contribution de carbonates ($\approx 60\%$) ce qui leur confère une origine à dominante clairement marine.

II.1.5.d. Distribution des métaux labiles et totaux

D'une manière générale, l'immense majorité des contaminants déversés directement ou non en mer termine piégée dans les sédiments. Toutefois, ce piégeage n'est pas définitif et une fraction non négligeable peut être remise en solution et ainsi contribuer à la contamination de la biocénose.

En ce qui concerne les métaux qui entrent dans le milieu lagunaire, le suivi de leurs concentrations dans les sédiments doit être réalisé pour estimer le potentiel contaminant de ces derniers. En d'autres termes, il s'agit d'approcher du mieux possible la part des contaminants métalliques présents dans les sédiments susceptible d'être transférée vers les organismes marins. Pour répondre à cette nécessité, l'application des « seuils de qualité dans les sédiments basés sur la concentration en métal total » n'est pas convenable car elle ne permet pas de considérer le critère de disponibilité pour la biocénose. Une des voies satisfaisantes pour estimer ces fractions labiles, c'est-à-dire capables d'être remises en solution dans la masse d'eau lagunaire, est de doser les fractions dites « disponibles » ; Une approche possible consiste à extraire séquentiellement les métaux selon un protocole spécifique (Tessier *et al.*, 1979 ou BCR). Cette extraction a pour objectif de solubiliser successivement différentes phases géochimiques constitutives des sédiments, comme la matière organique, les carbonates, les oxy-hydroxydes et le résidu pour libérer les métaux qu'elles contiennent respectivement.

Afin de normaliser, c'est-à-dire rendre inter-comparables les résultats, cette étude a été conduite sur la fraction pélitique des sédiments (population granulométrique inférieure à $40\ \mu\text{m}$) qui est reconnue pour être la plus réactive d'un point de vue géochimique.

Pour le domaine étudié, les éléments métalliques analysés ont été les suivants : As, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn (Figure 33 et Tableau 11). De tous ces éléments, seuls les deux premiers (As et Cd) semblent être présents dans des concentrations proches des limites de détection, tout comme Pb ; le Hg, mentionné dans la composition nominale de l'effluent ($[\text{Hg}] < 0,001\ \mu\text{g/L}$), est quant à lui, à l'état d'infra-traces.

Métaux liés à la phase organique : la distribution des métaux dans cette phase est généralement assez homogène et ne permet pas pour certains éléments comme Cr et Ni (voire Fe) de différencier nettement les niveaux de concentration dans le Canal de la Havannah de ceux de la Baie du Prony. Par ailleurs, alors que dans l'ensemble du domaine le chrome montre une affinité sensible pour la matière organique, on observe des concentrations particulièrement faibles au droit du Creek de la Rade Nord. Cette particularité peut être expliquée par la forme chimique de Cr qui, présent essentiellement à l'état de chromite, est quasiment insoluble dans le milieu marin et donc très peu disponible. Paradoxalement, les valeurs les plus fortes correspondent aux sédiments carbonatés du Canal de la Havannah où une fraction dissoute du métal co-précipite.

Le manganèse, et particulièrement le fer, se singularisent par des concentrations souvent bien inférieures à 20 µg/g dans le Canal et 2 à 5 fois plus élevées dans la Baie du Prony ([Mn] >100 µg/g et 50 µg/g, respectivement). Pour Ni, les concentrations sont équivalentes à celles observées sous la forme d'oxy-hydroxydes et celles de Co sont relativement faibles.

Métaux liés à la phase carbonatée : comme précédemment, aucun gradient de concentration ne peut être mis en évidence, la distribution paraissant encore plus désordonnée pour tous les métaux exception faite de Mn. Cependant, dans les sédiments des embouchures du Creek de la Rade du Nord mais aussi de la Kwé ainsi que les abords de l'Île Ouen apparaissent comme les seules aires de concentration pour certains métaux. Ailleurs dans le Canal, excepté pour quelques valeurs de chrome, les concentrations en métaux sont extrêmement faibles.

Le manganèse constitue le métal principal de la phase carbonatée. En effet, il montre une tendance marquée à la co-précipitation puisque les concentrations peuvent atteindre plus de 700 µg/g non loin des estuaires. La phase carbonatée contient également du fer à des concentrations très variables (4 à 77 µg/g), puis en moindre quantité, du cobalt (1 à 25 µg/g) et du nickel (1 à 40 µg/g) ; la présence de chrome y étant très réduite pour les mêmes raisons évoquées de disponibilité de cet élément (2 à 12 µg/g).

Métaux dans la phase oxy-hydroxydée : pour l'ensemble des métaux, les concentrations se distribuent selon un gradient de décroissance « côte-large ». Les concentrations maximales demeurent localisées dans les mêmes secteurs que précédemment, à savoir l'embouchure du Creek de Rade du Nord et les abords nord-est de l'Île Ouen ; cette dernière aire enregistrant les valeurs les plus élevées en Fe et Ni. Comparativement, dans le Canal de la Havannah, les valeurs sont très faibles.

Cette phase géochimique caractérise en particulier la proximité de zones d'apports terrigènes comme les estuaires ou bien se forme dans les grands fonds océaniques. Le chrome et en particulier le manganèse montrent des niveaux de concentrations plus élevés en Rade du Nord (21-25 µg/g pour Cr et 60-330 µg/g pour Mn) que dans le Canal de la Havannah (4-16 µg/g pour Cr et 12-38 µg/g pour Mn). Il en est de même pour le cobalt, le fer le nickel, mais dans une moindre mesure.

Métaux dans la phase résiduelle : tous les métaux se distribuent exactement selon un gradient de concentration « côte-large ». Les valeurs maximales sont observées au niveau des estuaires et particulièrement celui du Creek de Rade Nord et dans les aires sous influence terrigène plus ou moins directe dont tout le nord-est de l'Île Ouen. Sans surprise, les concentrations sont beaucoup plus élevées dans les sédiments de la zone d'influence du Creek de la Rade du Nord qu'ailleurs.

Tableau 11 : Compositions moyennes et écart-types des fractions pélitiques des sédiments pour les principaux métaux du cortège latéritique extraits selon le protocole de digestion séquentielle. Résultats concernant l'ensemble de la zone étudiée.

	Ph. résiduelle (mg/kg)		Ph. oxy-hydroxydée (mg/kg)		Ph. carbonatée (mg/kg)		Ph. organique (mg/kg)	
	Concentration	Ecart-type	Concentration	Ecart-type	Concentration	Ecart-type	Concentration	Ecart-type
Co	78,5	5,5	9,5	8,6	5,4	4,2	6,5	5,7
Cr	96,5	1,0	1,0	1,2	0,6	1,0	1,9	2,4
Fe	98,2	1,0	1,7	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Mn	41,7	7,1	8,6	2,7	39,9	8,1	9,8	5,9
Ni	93,2	2,5	3,1	2,0	1,2	1,1	2,5	2,9

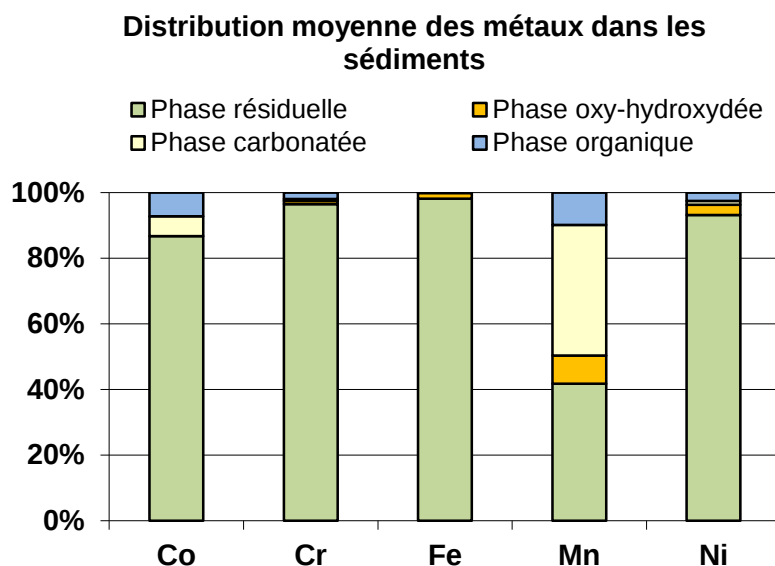


Figure 33 : Histogramme cumulé des compositions moyennes des fractions pélitiques pour les principaux métaux du cortège latéritique pour chacune des 4 phases géochimiques, toutes stations confondues.

Ce qu'il faut retenir

Parmi les métaux analysés, le manganèse est l'élément qui montre le plus grand degré d'affinité pour la phase organique ($9,8 \pm 5,9$ % de la concentration totale). A l'inverse, moins de 0,1% du fer total est complexé par cette même phase organique.

Dans la phase carbonatée, le manganèse co-précipité peut représenter plus de $39,9 \pm 8,1$ % du métal total et le cobalt, bien que très variable atteint plus de $5,4 \pm 4,2$ %. Pour le chrome et le nickel cette proportion décroît aux alentours de 1 à 2 %, la fraction de fer associée aux carbonates étant inférieure à 0,1% du métal total.

La phase oxy-hydroxydée contient en moyenne $14,9 \pm 5,7$ % du cobalt total, pour les sédiments de la Baie du Prony et seulement $1,5 \pm 0,7$ % dans ceux du Canal. Pour les autres métaux, la fraction est plus constante quel que soit le sédiment : $8,6 \pm 2,7$ % pour Mn, $3,1 \pm 2,0$ % pour Ni (exception faite des sédiments du Creek de la Rade du Nord), $1,7 \pm 1,5$ % pour Fe et $1,0 \pm 1,2$ % pour Cr.

La fraction résiduelle des métaux représente $96,5 \pm 1,0$ % de la concentration totale de Cr et respectivement, $98,2 \pm 1,0$ % et $93,2 \pm 2,5$ % pour Fe et Ni. Pour le cobalt cette proportion décroît à $78,5 \pm 5,5$ % et n'est plus que de $41,7 \pm 7,1$ % pour le manganèse. Toutefois, même en grandes quantités, ces métaux demeurent très peu labiles.

Les aires de plus grandes concentrations en métaux totaux, sont le nord-est de l'île Ouen et les embouchures des creeks. Les fractions labiles, donc potentiellement disponibles pour certains organismes, sont mesurées dans les phases organiques et carbonatées. Pour le manganèse, la proportion cumulée pour ces deux phases peut atteindre 50% de la concentration totale du métal.

II.1.6. Conclusion

L'étude de la Baie du Prony et du Canal de la Havannah a montré que ces deux unités possèdent des singularités hydrologiques bien tranchées l'une par rapport à l'autre (Figure 34). En Baie du Prony, les masses d'eau, qui sont toujours plus ou moins fortement stratifiées, subissent directement l'influence des apports des rivières et la circulation semble s'effectuer de manière assez lente à l'inverse du Canal de la Havannah. Dans cette dernière unité, des stratifications très temporaires des masses d'eau prennent place et leur déstructuration au cours d'un même cycle de marée est la preuve d'un hydrodynamisme intense ; le Canal est le siège de la confrontation des eaux du lagon et des masses océaniques.

D'un point de vue de la qualité trophique, les eaux tant en Baie du Prony que dans le Canal de la Havannah, sont remarquablement pauvres en sels nutritifs, classant le domaine entier parmi les milieux oligotrophes, comme il est normal de rencontrer dans les zones tropicales ; dans ce type d'environnement des apports complémentaires en azote peuvent perturber fortement les équilibres vis-à-vis de la production primaire phyto-planctonique. Cependant, si cette menace est potentiellement envisageable pour un milieu fermé comme la Baie du Prony en raison des faibles échanges avec le reste du lagon, dans le Canal, le renouvellement incessant et intense des masses d'eau d'origine océanique semble pouvoir jouer un rôle tampon important.

La distinction entre les deux unités physiographiques s'exprime également par la distribution des concentrations en métaux dissous. Dans la Baie du Prony, mais également en Baie de Kwé, voire dans une moindre mesure dans la baie de Port Boisé et de Port Goro, l'influence des apports terrigènes génère des niveaux de concentration élevés et relativement variables dans le temps. Dans le Canal, une frange littorale de 200 à 300 m est régulièrement impactée par les apports terrigènes. En direction du large et au sud d'une ligne médiane partageant le Canal longitudinalement (Figure 34), les niveaux de concentrations en métaux sont quasiment invariants.

Cette constatation fournit la preuve du confinement probable des impacts terrigènes à une frange côtière de dimensions limitées.

En matière d'apports, la Baie du Prony se singularise par des particules aux signatures clairement identifiées comme terrigènes. Dans le Canal, les apports terrigènes de la rivière Kwé sont très fortement et rapidement dilués avec les débris de carbonates le plus souvent arrachés au platier et remis en suspension en fonction des conditions hydro-climatiques du moment.

En ce qui concerne les sédiments, et plus particulièrement les populations de faible granulométrie, les aires de dépôts identifiées (baies) constituent autant de pièges pour les fractions labiles des métaux, donc potentiellement transférables aux organismes marins. Cependant, si en Baie du Prony la sédimentation de ce matériel fin concerne l'essentiel de la zone (Rade Nord et Est), dans le Canal l'intensité de l'hydrodynamisme interdit la sédimentation de ces particules fines, réduisant de fait le potentiel d'accumulation des métaux toxiques.

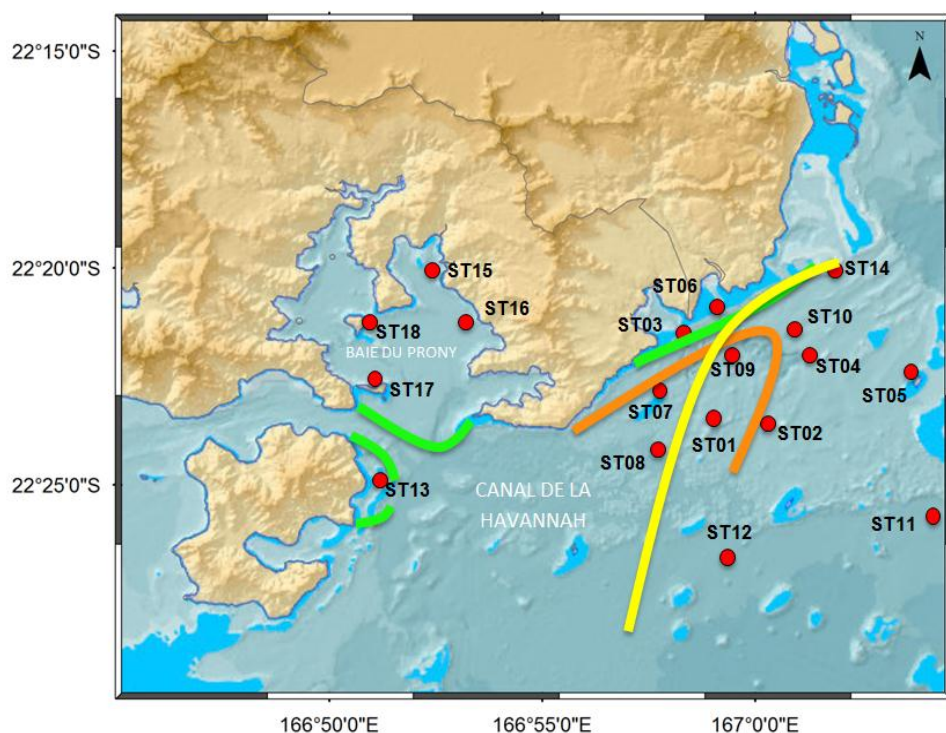


Figure 34 : Carte de la structure horizontale des masses d'eaux dans le Canal de la Havannah et la Baie du Prony : délimitation des aires d'influences terrigènes (lignes vertes pour les influences dues à l'Ile Ouen, aux creeks de la Baie du Prony et à l'ensemble Port Boisé-Port de Goro) et des aires océaniques (ligne jaune). Le trait orange délimite approximativement la zone de mélange des eaux lagunaires et océaniques.

II.2. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU TRANSPORT

Dans son analyse critique, l'INERIS (2004) suggérait de poursuivre les efforts en matière de modélisation pour réactualiser et valider les prévisions d'évolution des concentrations et des effets écotoxiques. Pour cela, l'INERIS recommandait de mettre en place : « ...une modélisation numérique prévisionnelle pour permettre ensuite de disposer d'estimations fiables à long terme (20 ans) ; l'aspect géochimie et transport des particules devant être intégrés de manière pragmatique à la démarche d'actualisation, en tenant compte des caractéristiques du milieu (concentrations en Fe particulaire, concentration et types de bactéries, MES). ».

Pour répondre à cette demande, un des principaux objectifs du programme prédictif de l'IRD intitulé « Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels de GoroNickel dans le lagon sud de la Nouvelle-Calédonie » a été de mettre en œuvre un modèle hydrodynamique fiable afin de pouvoir, dans un deuxième temps réaliser des simulations de transport des formes dissoutes et particulaires en fonction des éléments forçants. Il a donc été proposé d'implémenter pour le lagon sud de Nouvelle-Calédonie un modèle hydro-sédimentaire tridimensionnel comprenant deux modèles imbriqués :

- le premier autorisant les simulations à une maille de 540 mètres qui couvre entièrement les lagons sud et sud-ouest ;
- le deuxième avec une maille de 180 mètres centrée sur une zone qui va de l'île Ouen au large de la passe de La Havannah et couvre depuis la Baie du Prony jusqu'à la réserve Merlet.

Remarque 1 : Un troisième modèle avec une maille à 60 m a été imbriqué ultérieurement uniquement dans le champ proche de l'émissaire pour des calculs de dilution de l'effluent (Cf « Etude d'impact »).

Remarque 2 : Par la suite, le modèle numérique global a ainsi servi de laboratoire virtuel pour déterminer le devenir géographique et temporel des matières dissoutes et particulaires apportées par l'effluent dont le comportement a été modélisé du point de vue géochimique par le CEA (Cf « Etude d'impact »).

Les courants ont été calculés sur 23 niveaux quelle que soit la profondeur (profondeur « *sigma* »). Ce modèle hydrodynamique inclut également un module de transport de composés dissous et un module de transport de particules fines (vases). Il est enfin couplé à un modèle météorologique à méso-échelle.

II.2.1. Construction du modèle hydrodynamique et validation

La stratégie de construction du modèle a consisté à suivre plusieurs étapes en tenant compte d'un certain nombre de conditions :

- La première condition était d'utiliser des outils de modélisations adaptés au problème et considérés, soit en termes de performances technologiques, soit en termes de fiabilité des résultats, comme une référence en la matière à ce jour. Le modèle choisi a été MARS-3D, développé par l'Ifremer (Derex et al., 2008a) ;
- La deuxième condition était de disposer de modèles calibrés et validés. Pour répondre à cet objectif, l'ensemble des informations contextuelles sur la zone d'étude ont été rassemblées et de nouvelles données ont dû être acquises (bathymétrie, nature de la marée, courants, trajectoires et vents), (Douillet et Le Gendre, 2008).

En effet, concernant les vents, il est apparu rapidement au cours de l'étude que dans le lagon ils présentaient de fortes variations temporelles mais aussi spatiales. Outre l'utilisation des stations météorologiques il a été nécessaire de faire appel au modèle atmosphérique régional de méso-échelle WRF (Weather Research and Forecast), développé par les différents instituts et centres de recherche américains (National Center for Atmospheric Research, National Center for Environmental Prediction et Forecast Systems Laboratory). Ce modèle a nécessité la prise en charge d'une phase de validation sur le lagon sud-ouest (Derex et Douillet P, 2008a).

Les données météorologiques nécessaires aux calculs des simulations ont été celles collectées en 2007 (année type). Il est important de noter par ailleurs que les grandes tendances de marnage sont représentées durant cette période, avec des fortes marées de morte-eau et de vive-eau.

Enfin, si les modèles hydrodynamiques permettent l'analyse et la compréhension du comportement d'un milieu, ils sont aussi, pro parte, des outils de prédiction. Il a donc été possible de calculer par ailleurs les courants pour différentes situations de marée et différentes situations météorologiques (Derex et Douillet, 2008b).

II.2.1.a. Données Bathymétriques et génération du maillage

Une des étapes préliminaires à l'utilisation de modèle hydrodynamique de circulation dans le domaine côtier est de disposer d'une bathymétrie fine de la zone d'étude. Converties dans le même

référentiel géodésique WGS84, les sondes (mesures bathymétriques) existantes récoltées par le SHOM, le programme ZoNéCo et l'IRD ont été regroupées dans une même base de données.

Pour parfaire la bathymétrie des zones du lagon sud encore mal hydrographiées, une campagne de mesures (sondeur multifaisceaux) a été réalisée par l'IRD (N/O Alis) dans la partie nord de la Corne Sud du lagon. Par ailleurs, des images satellitaires ont été analysées et interprétées de manière à fournir des informations complémentaires du secteur. C'est à partir de cette bathymétrie finale représentant plus de 3 millions de sondes qu'ont été constitués les fichiers de bathymétrie utilisés par les modèles (Figure 35).

Les objectifs demandés à la modélisation ont impliqué d'imbriquer les trois modèles numériques de mailles décroissantes en utilisant la méthode dite du « nesting ». Cette technique permet de raffiner rapidement les résultats tout en conservant une bonne cohérence entre les modèles. La définition de la bathymétrie et la physique développée dans le modèle limitent la taille des grilles à un minimum de l'ordre de 60 mètres (modèle le plus fin conçu pour modéliser le champ proche de l'émissaire, cf « Etude d'impact »).

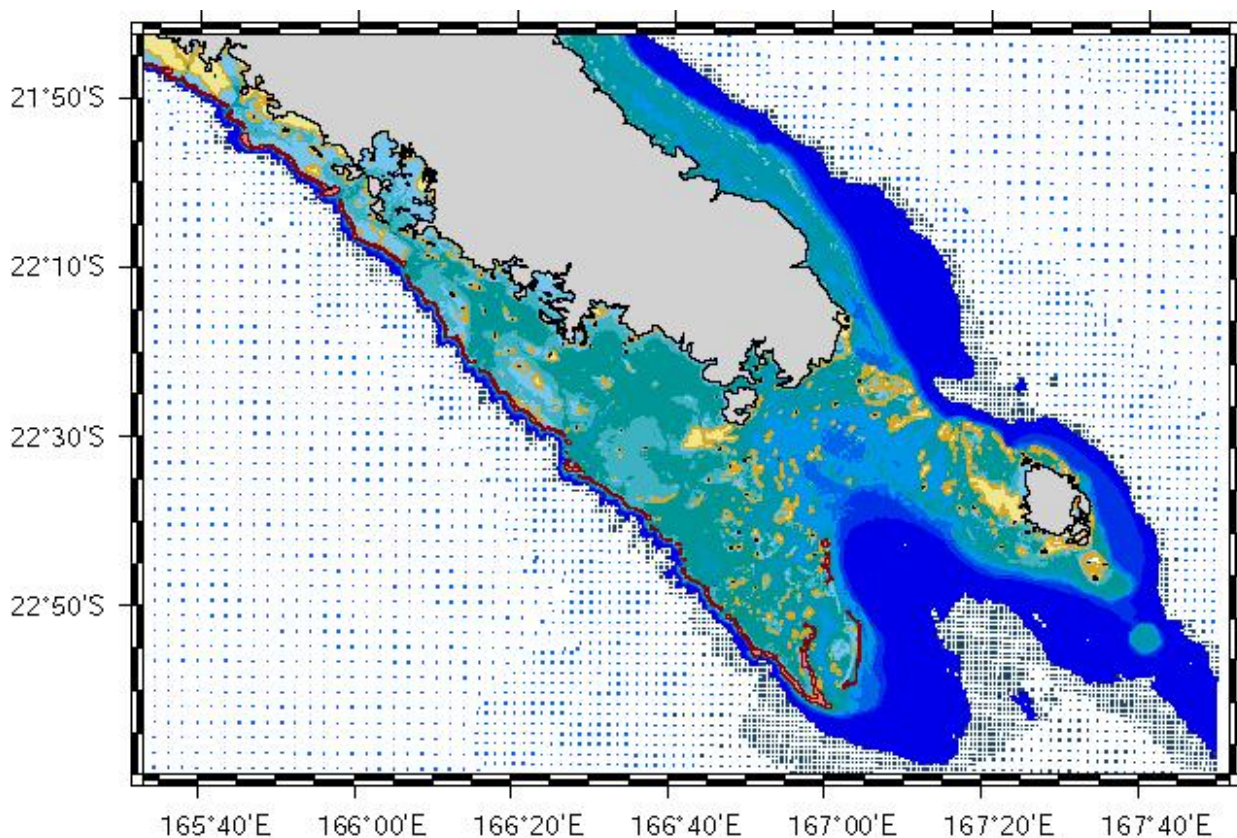


Figure 35 : Carte bathymétrique finale et interpolée de la zone d'étude.

II.2.1.b. Validation du modèle atmosphérique

Le modèle atmosphérique WRF a été validé à l'aide de données provenant de 5 stations météorologiques dont 2 (Ilot Maitre et récif Ioro) spécifiquement implantées pour le programme (Figure 36).

Les vents dominants (alizés des secteurs est/nord-est à sud/sud-est), ainsi que les autres directions, sont correctement prédites ce qui conduit à conclure que pour l'ensemble des stations de mesures, la capacité de prédiction du modèle se révèle être extrêmement bonne : 91% pour la direction et 87% pour la force du vent. Il est à remarquer néanmoins que la station météorologique de MAGENTA a l'indice d'agrément IOA⁷ le plus faible pour la vitesse du vent (73%), en raison probablement de sa localisation géographique. Bien que ces corrélations avec la réalité soient très bonnes, il est à noter que le modèle a tendance à légèrement sous-estimer l'intensité du vent, de 1,6m/s en moyenne. En conclusion, au vu de l'ensemble de ces résultats, il est tout à fait pertinent d'utiliser le modèle WRF en tant qu'élément d'entrée de forçage au modèle MARS-3D.

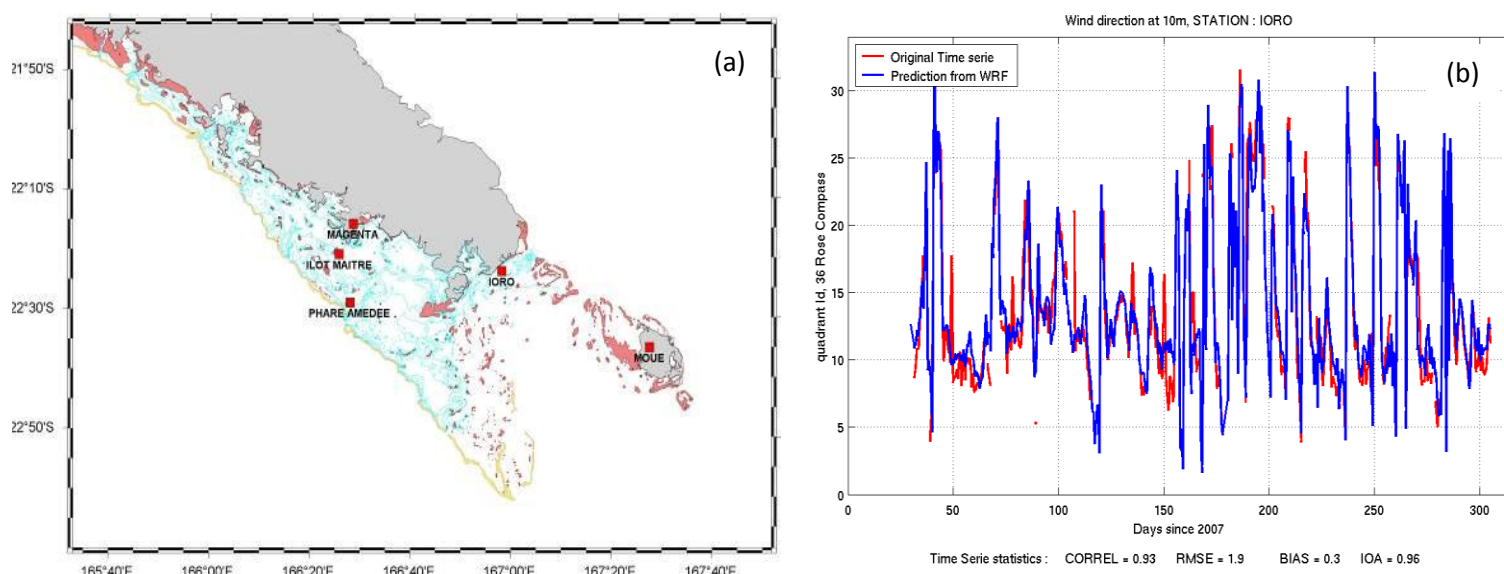


Figure 36 : Réseau des 5 stations météorologiques de validation (a). Exemple de la station de Ioro : Direction du vent à 10 m, Année 2007 (b).

II.2.1.c. Validation et calibration du modèle Hydrodynamique

Le modèle implémenté (MARS-3D) a été validé par des mesures de terrain provenant de quatre sources d'informations permettant d'étudier les deux grands phénomènes naturels de forçage agissant sur le lagon, c'est-à-dire la marée et le vent dont les données nécessaires ont été collectées à partir d'un réseau comprenant (Figure 37 et Figure 38) :

- Des marégraphes disponibles pour le lagon depuis les années 80 (données SHOM et IRD) ;
- Des courantomètres à effet Doppler mouillés à plusieurs reprises durant l'année 2007 ;
- Des bouées dérivantes dans la zone d'étude pour tracer les courants à différentes profondeurs ;
- Une station météorologique installée sur la balise du récif Ioro situé à proximité du futur émissaire.

⁷ IOA : Indice de Willmott (1981) est défini comme suit :

$$IOA = 1 - \frac{\overline{(P - O)^2}}{(\overline{|P - \bar{O}|} + \overline{|O - \bar{O}|})^2}$$

Une valeur d'IOA supérieure à 0,5 traduit une bonne capacité du modèle (valeurs de P= prédiction et O=observation).

En ce qui concerne la hauteur de marée, la collecte des données s'est étalée, pour certaines stations, sur plus de 700 jours de mesures. Ces données ont pu être doublement utilisées pour étudier d'une part les courants générés par la marée et d'autre part, pour la comparaison directe des courants mesurés par les courantomètres et calculés par le modèle.

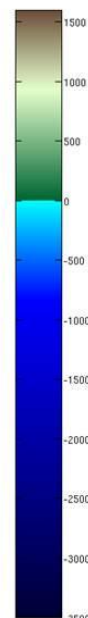
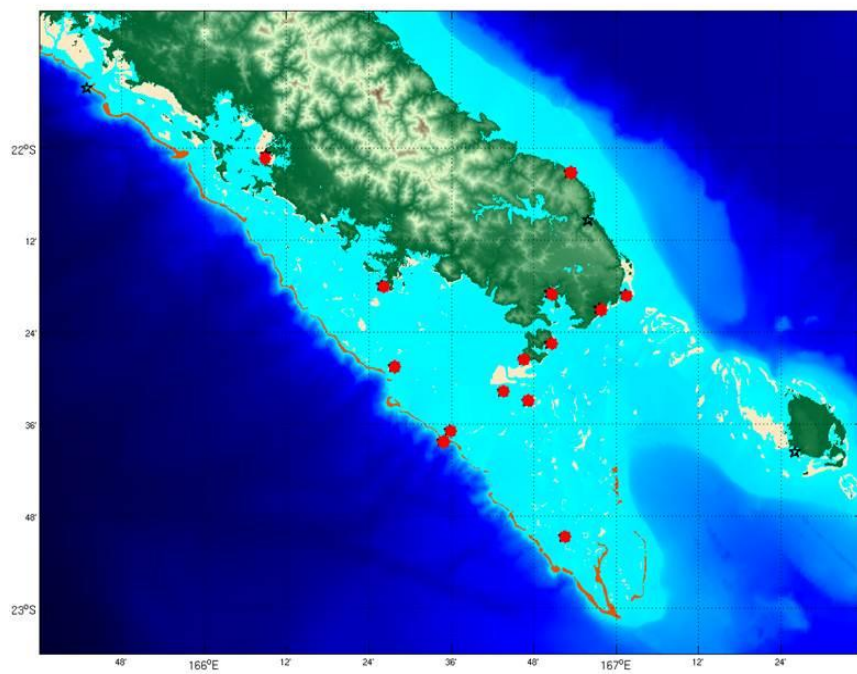


Figure 37 : Carte de localisation des marégraphes utilisés (points rouges) pour la calibration/validation du modèle.

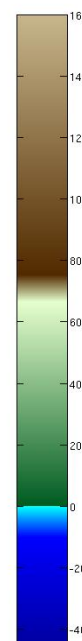
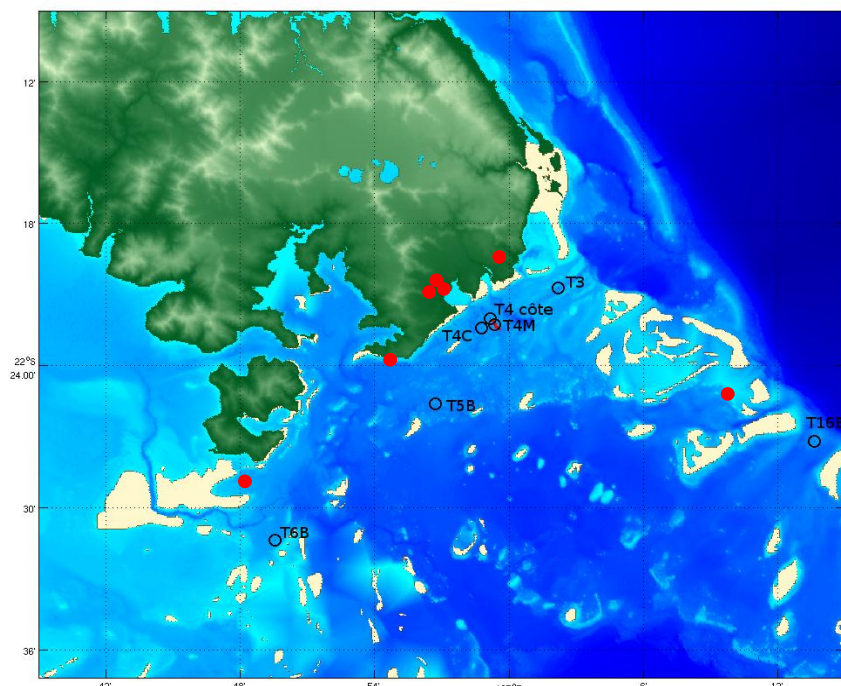


Figure 38 : Carte des emplacements des mouillages des courantomètres ADCP utilisés pour la calibration/validation du modèle.

(1) Amplitude et phase des ondes de marée calculées

La marée se décompose sous la forme d'onde dont la période est liée aux astres qui entourent la terre. Ces ondes peuvent être classées par leur période mais aussi par l'amplitude de leur signal. Les plus importantes sont liées à l'influence de la lune et du soleil. Pour cette étude, seules les cinq premières ont été conservées car elles représentent à elles seules plus de 85 % du signal de variation du niveau de la mer et plus de 90% du signal de courant dû à la marée (Douillet, 1998). Par ordre d'importances, on dénombre :

- M_2 : onde lunaire semi-diurne ;
- S_2 : onde solaire semi diurne ;
- K_1 : onde luni-solaire diurne ;
- O_1 : onde lunaire diurne ;
- N_2 : onde lunaire semi-diurne.

Pour la simulation des courants avec MARS-3D, les résultats de plusieurs modèles mondiaux de marée ont été testés ; le choix final s'est porté sur le modèle TPXO (version 7) qui présentait le meilleur accord avec les mesures de marée disponibles. Pour la Nouvelle-Calédonie, les calculs ont été raffinés par des codes de calcul IRD (modèles en éléments finis FVCOM ou ADCIRC).

La première étape de validation du modèle MARS-3D, en termes de marée, a consisté à retoucher les valeurs des amplitudes et des phases de chaque onde aux limites du domaine, afin de s'approcher au plus près de celles mesurées sur le terrain. Dans ce document, seuls les résultats de l'onde principale lunaire semi-diurne M_2 et de l'onde diurne K_1 sont pris en compte car elles ont été considérées comme suffisamment exactes pour décrire la marée.

Les résultats ont permis de conclure que le modèle hydrodynamique est correctement calé et validé en ce qui concerne l'effet de la marée (Figure 39) ; les écarts entre le modèle et la mesure sont de l'ordre de quelques centimètres pour M_2 (voire inférieurs pour K_1) et de seulement quelques degrés pour les deux ondes.

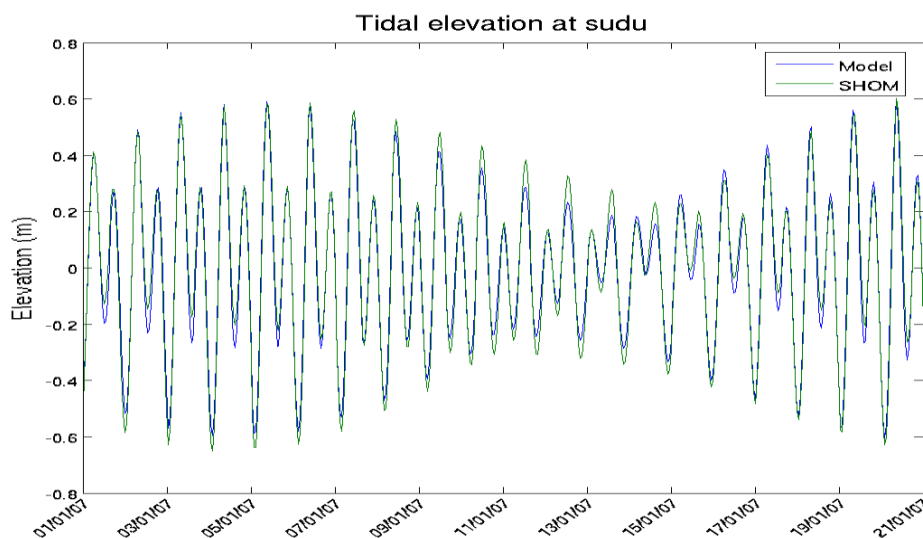


Figure 39 : Élévations comparées de la surface libre entre les calculs de MARS-3D et les données fournies par le SHOM pour la station du Récif U (Ile Ouen).

(2) Courants instantanés

Jusqu'à 5 courantomètres à effet Doppler ont été déployés simultanément dans toute la zone pendant des périodes de temps pouvant atteindre un mois en continu.

L'ensemble des indices utilisés pour la comparaison entre courants instantanés mesurés (courantomètres Doppler) et courants estimés (MARS-3D) montre un bon accord général entre les deux modes d'évaluation. Très majoritairement, les valeurs de l'indice d'agrément IOA (ou indice de Willmott, 1981) sont supérieures à 0.5 ($0,75 < IOA < 0,97$), démontrant ainsi que le modèle a une bonne capacité à prévoir les écarts avec les observations ; plus l'indice est proche de 1, plus la concordance entre observation et prévision est bonne.

Cependant, les courants calculés par composantes montrent que les résultats de mesures et de simulations les plus cohérents sont obtenus près du fond (Figure 40) ; en surface des différences sont visibles. Cet écart entre « *modélisation* » et « *mesure* » s'explique au moins en partie par le vent. Le vent utilisé dans la modélisation est en effet un vent moyen constant dans l'espace, ne tenant pas compte des rafales ponctuelles. Bien évidemment, le vent réel présente de fortes variations spatiales et temporelles dans le lagon. Ceci se traduit par un léger effet de « *lissage* » des valeurs maximales des courants calculés en surface. Le modèle reproduit néanmoins correctement les changements généraux de direction des courants dus aux variations de vent.

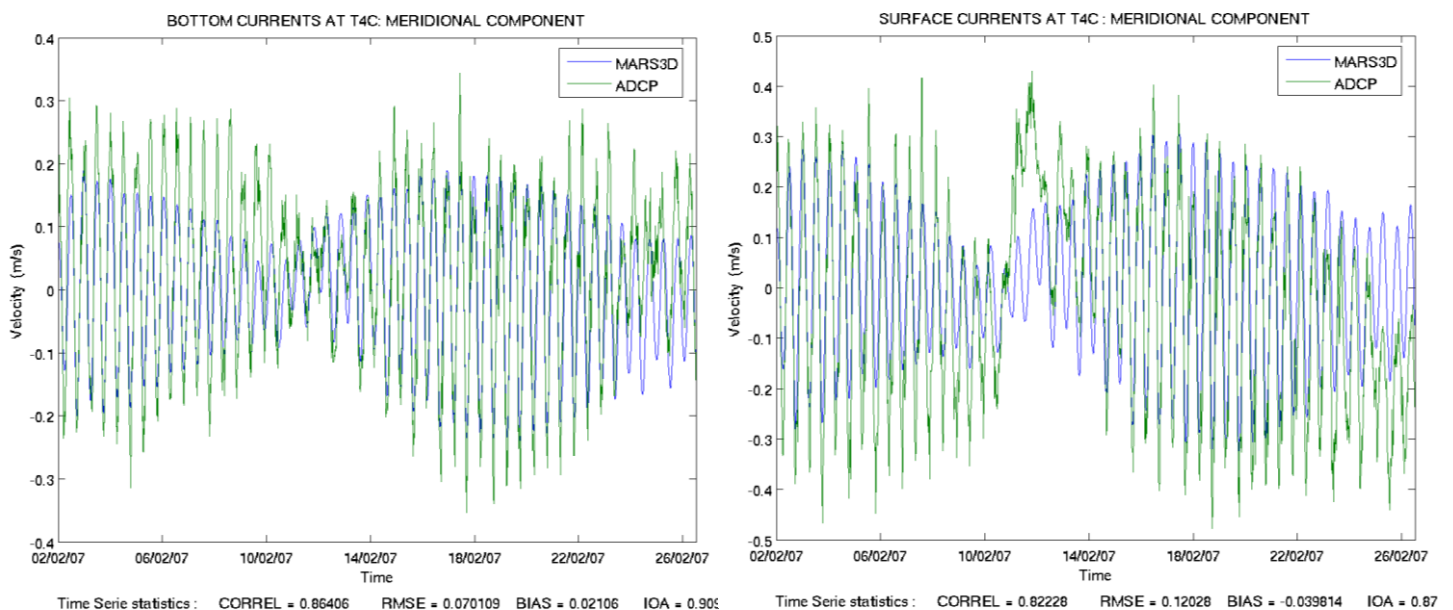


Figure 40 : Inter-comparaison des courants instantanés mesurés et calculés par le modèle à proximité du diffuseur (station T4C) en surface (gauche) et au fond (droite). A titre d'exemple seule est représentée ici la composante méridionale (axe nord-sud).

(3) Trajectoires mesurées et calculées

La dernière phase de la validation physique du modèle hydrodynamique a consisté à reproduire le déplacement de bouées dérivantes larguées à différentes profondeurs dans le lagon pour des périodes de quelques jours ; l'acquisition de leurs positions d'effectuant en temps réel par relevés satellitaires toutes les heures.

Durant la campagne de septembre 2007, ce sont 6 bouées dérivantes qui ont été larguées à 2

reprises de part et d'autres de l'émissaire. Les drogues de ces bouées ont été placées à plusieurs profondeurs (12.5 m et 22.5 m) afin de suivre les courants de fonds. Le largage a été effectué à marée montante puis descendante pour des durées de deux à trois jours, au-delà de ce laps de temps, le suivi devient problématique en raison des forts courants existants dans la zone et du trait de côte découpé.

Les résultats ont montré que les trajectoires de courants simulées par MARS-3D et mesurées par des bouées dérivantes mouillées ont généralement une bonne cohérence (Figure 41).

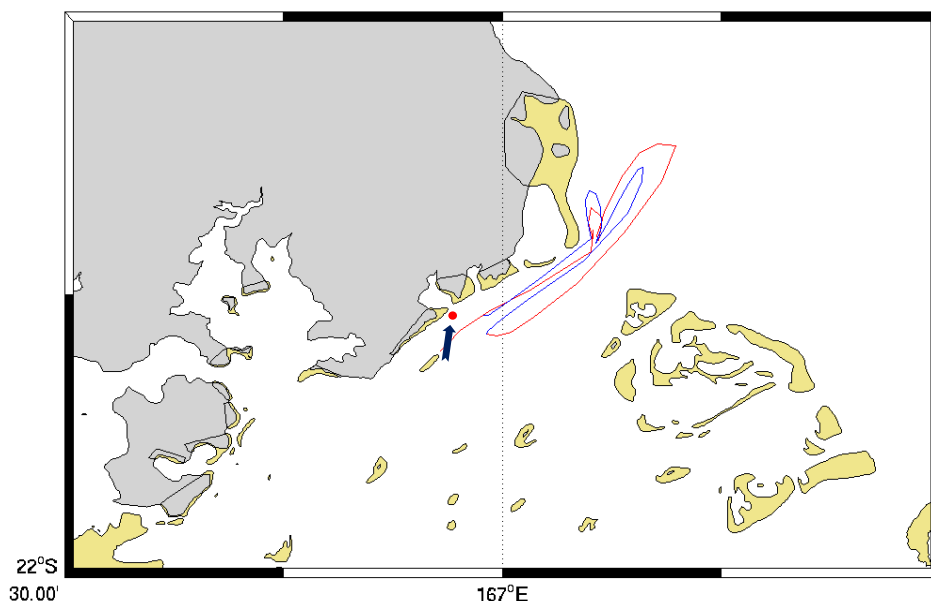


Figure 41 : Exemple de suivi de trajectoires observées à partir de bouées dérivantes (trait rouge) et calculées par le modèle (trait bleu). La flèche bleue sombre indique le point de largage des bouées dérivantes (rouge). En jaune sont représentées les aires récifales.

Ce qu'il faut retenir

L'ensemble des indices utilisés pour la comparaison entre des courants instantanés mesurés et les courants calculés par le modèle montre un bon accord entre les types de valeurs obtenues. Le modèle reproduit donc correctement les courants mesurés même s'il en sous-estime légèrement les maxima : le modèle hydrodynamique est bien calé et validé en fonction du vent et de la marée puisque les deux forçages ont été introduits dans le modèle et leurs influences se retrouvent bien dans les résultats de calcul.

On peut donc considérer que le modèle hydrodynamique peut être utilisé avec un bon degré de confiance et sous réserve des limites constatées.

II.2.2. Atlas des courants dans le canal de la Havannah

L'objectif de l'Atlas a été de recenser l'ensemble des situations courantologiques qui peuvent se présenter dans une zone comprise entre l'île Ouen et la passe de La Havannah en incluant la Baie du Prony et la réserve Merlet. Toutefois, chacune des situations présentées n'a pas la même probabilité d'existence, mais elle est fonction de l'intensité des marées (vive-eau ou morte-eau) et des conditions météorologiques du moment.

II.2.2.a. Courants de morte-eau et vive-eau

Les marées de morte-eau et de vive-eau ne se rencontrent que durant quelques jours dans l'année ; celles-ci ne sont présentes que 4 fois par an lors des deux équinoxes et des deux solstices.

(1) Marée de morte-eau

Les courants calculés sont relativement faibles sur l'ensemble du domaine d'étude sauf dans les passes de la Havannah et de la Sarcelle où ils peuvent atteindre encore des valeurs supérieures à 1 m/s (~2 nœuds). Bien que les courants de marée soient barotropes, en surface (Figure 42), ils sont plus forts qu'au fond.

Dans le Canal de La Havannah, il apparaît schématiquement que :

- à marée haute, les courants sont maximums et entrent à l'intérieur du lagon ;
- à « marée haute + 3 heures », les courants sont pratiquement nuls ;
- à marée basse, les courants sont dirigés vers l'extérieur du lagon ;
- à « marée basse + 3 heures », les courants sont toujours dirigés vers l'extérieur du lagon mais ont des valeurs très faibles ;
- à « marée basse + 5 heures », les courants sont à nouveau dirigés vers l'intérieur.

Dans les passes, les courants peuvent être particulièrement complexes ; des tourbillons transitoires apparaissent au cours du cycle de marée.

D'un point de vue statistique, le pourcentage de temps où le courant reste inférieur à 0,1 m/s au cours d'un cycle de marée est plus important au fond (courants plus faibles) qu'en surface (courants plus forts), (Figure 43 et Figure 44). Dans les passes, le pourcentage est proche de zéro, la renverse de courants s'opérant en moins de 10 minutes.

Dans la zone de l'émissaire, le pourcentage de temps où le courant est inférieur à 0,1 m/s est de 30 % au fond et plus faible près de la surface. En termes d'intensités, au fond le courant sera toujours inférieur à 0,2 m/s (0,4 nœuds) et 0,3 m/s (0,6 nœuds) en surface.

(2) Marée de vive-eau

Les courants calculés sont relativement forts sur l'ensemble du domaine d'étude et très forts dans les passes de la Havannah et de la Sarcelle où ils peuvent atteindre des valeurs supérieures à 1,5 m/s (3 nœuds), voire occasionnellement 2 m/s (4 nœuds). Bien que les courants de marée soient barotropes, en surface (Figure 42), ils sont toujours plus forts qu'au fond.

Dans le Canal de La Havannah, les courants sont :

- maximums un peu avant la marée haute et entrent à l'intérieur du lagon ;
- à « marée haute + 3 heures », les courants se sont inversés partiellement dans la passe et le long de la côte de la Grande Terre, alors qu'il est encore entrant plus au large ;
- à marée basse, les courants sont dirigés vers l'extérieur du lagon ;
- à « marée basse + 3 heures », les courants sont à nouveau dirigés vers l'intérieur du lagon avec des valeurs déjà fortes ;

- à « marée basse + 5 heures », les courants sont encore dirigés vers l'intérieur du lagon mais avec des valeurs plus fortes. Dans le chenal, les courants sont majoritairement dirigés vers l'intérieur.

Dans la Havannah, les courants peuvent être particulièrement complexes et de forts tourbillons transitoires apparaissent au large de Port Boisé et de la Baie Kwé.

Le pourcentage de temps où le courant est inférieur à 0,1 m/s (0,2 nœuds) au cours d'un cycle de marée, les courants de surface (Figure 43 et Figure 44) sont légèrement plus faibles qu'au fond. Le pourcentage dans les passes est proche de zéro considérant que la renverse de courants s'opère en moins de 10 mn.

Dans la zone de l'émissaire, le pourcentage de temps où le courant est inférieur à 0,1 m/s est de l'ordre de 5 à 10% au fond et seulement de 5 % en surface. En termes d'intensités, au fond le courant sera toujours inférieur à 0,5 m/s (1,0 nœuds) et 0,6 m/s (1,2 nœuds) en surface.

II.2.2.b. Courants de morte-eau et vive-eau + ALIZES

Dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie, la situation la plus fréquente combine le cas d'une marée moyenne de vive-eau cumulée avec un alizé de sud-est modéré de l'ordre de 8 m/s (16 nœuds).

(1) Marée de morte-eau + vent 8m/s

Les courants calculés pour les conditions d'alizé modéré de 8 m/s (16 nœuds) diffèrent entre la surface et le fond.

En effet, près du fond les courants sont faibles sur l'ensemble du domaine d'étude sauf dans les passes où ils peuvent atteindre des valeurs supérieures à 1 m/s (2 nœuds). Ils dépendent presque exclusivement de la marée mais sont naturellement renforcés lorsque le vent et la marée sont orientés dans le même sens (courants entrants), (Figure 45). Près de la surface, les courants sont largement influencés par le vent tant en direction qu'en intensité. Il faut que la marée soit basse pour que les courants s'inversent et soient sortants dans la passe de La Havannah.

Au fond : dans le canal de la Havannah, les courants sont :

- maximums entre la « marée basse +5 heures » et marée haute. Ils entrent à l'intérieur du lagon ;
- à « marée haute + 3 heures », les courants entrent encore dans la passe mais sont très faibles près de l'émissaire ;
- à marée basse, les courants sont dirigés vers l'extérieur du lagon ;
- à « marée basse + 3 heures » les courants sont de nouveau dirigés vers l'intérieur du lagon mais ils ont des valeurs très faibles ;
- à « marée basse + 5 heures », les courants sont à nouveau dirigés vers l'intérieur du lagon.

En surface : dans le Canal, les courants sont :

- maximums entre la « marée basse +5 heures » et la marée haute. Ils entrent à l'intérieur du lagon ;
- à « marée haute + 3 heures », les courants sont toujours dirigés vers l'intérieur du lagon mais sont orientés plus vers le nord-est comme l'est le vent ;

- à marée basse, les courants sont dirigés vers le nord et vers l'extérieur du lagon ;
- à « marée basse + 3 heures » les courants sont de nouveau dirigés vers l'intérieur du lagon et ont une composante nord plus importante ;
- à « marée basse + 5 heures », les courants sont dirigés vers l'intérieur du lagon avec une direction générale qui est plus dans l'axe général du chenal.

Le pourcentage de temps au cours d'un cycle de marée où le courant est inférieur 0,1 m/s est plus fort au fond qu'en surface (Figure 46 et Figure 47). En surface le courant n'est pratiquement jamais inférieur à 0,1 m/s, au fond les résultats sont très proches du cas d'une marée de morte-eau seule.

Le pourcentage de temps au cours d'un cycle de marée où le courant est inférieur 0,3 m/s est limité aux passes, pour les eaux de fond (Figure 46 et Figure 47). En surface, les zones du lagon concernées sont beaucoup moins étendues ; dans le chenal et en particulier au niveau de l'émissaire, les courants sont supérieurs à 0,3 m/s pendant au moins 30 % du temps. Au sud de l'île Ouen ainsi que dans la Baie du Prony, les courants sont toujours particulièrement faibles près du fond ; ils augmentent en revanche près de la surface.

(2) Marée de vive-eau + vent 8 m/s

Les courants calculés pour les conditions d'alizé modéré de 8 m/s (16 nœuds) sont très différents entre la surface et le fond.

Près du fond, les courants sont forts sur l'ensemble du domaine d'étude, et très forts dans les passes où ils peuvent atteindre des valeurs supérieures à 1,5 m/s (3 nœuds, Figure 45). Ils dépendent presque exclusivement de la marée et sont naturellement plus intenses lorsque le vent et la marée sont dans la même direction (courants entrants). Près de la surface, les courants restent largement influencés par la marée tant en direction qu'en intensité même si les vents y participent clairement.

Au fond : dans le canal de La Havannah les courants sont :

- maximums entre la « marée basse + 5 heures » et marée haute. Ils entrent à l'intérieur du lagon ;
- à « marée haute + 3 heures », les courants sortent dans la passe mais sont encore entrant près de l'émissaire ;
- à marée basse, les courants sont dirigés vers l'extérieur du lagon ;
- à « marée basse + 3 heures », les courants sont de nouveau dirigés vers l'intérieur du lagon ;
- à « marée basse + 5 heures », les courants sont encore dirigés vers l'intérieur.

En surface : dans le canal de La Havannah, les courants sont :

- maximums entre la « marée basse + 5 heures » et marée haute. Ils entrent à l'intérieur du lagon ;
- à « marée haute + 3 heures », les courants sortent dans la passe mais sont encore entrant près de l'émissaire ;
- à marée basse, les courants sont dirigés vers l'extérieur du lagon ;
- à « marée basse + 3 heures », les courants sont de nouveau dirigés vers l'intérieur ;
- à « marée basse + 5 heures », les courants sont dirigés vers l'intérieur du lagon avec une direction générale qui est plus dans l'axe général du chenal.

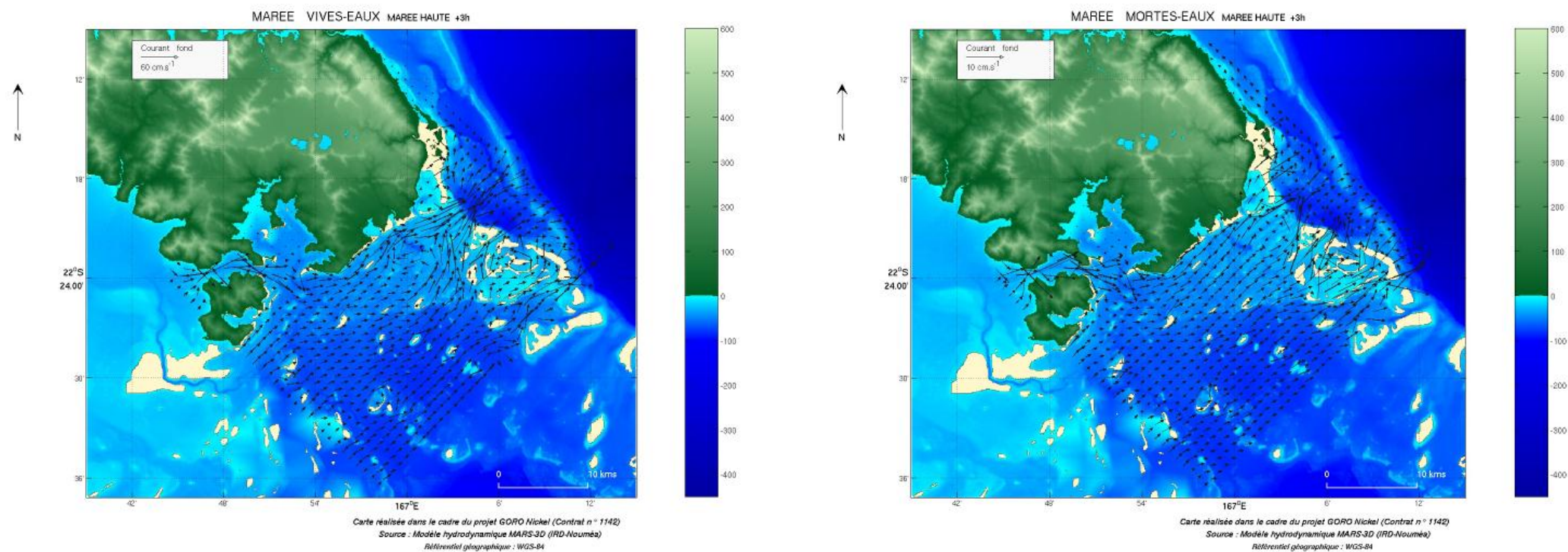


Figure 42 : Courant par marée de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) à marée haute + 3 heures (courants au fond).

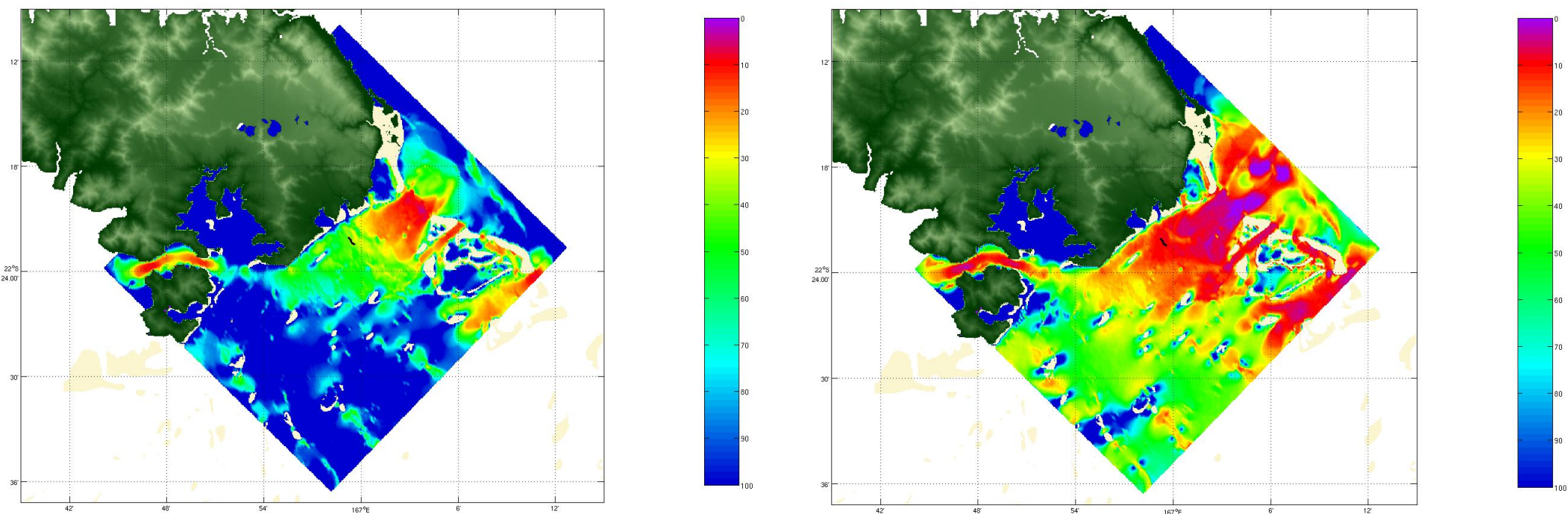


Figure 43 : Pourcentage du temps durant un cycle de marée de morte-eau (gauche) et vive-eau (droite) où le courant est inférieur à 0,1 m/s (0,2 nœuds) (courant au fond). Le trait noir symbolise le diffuseur.

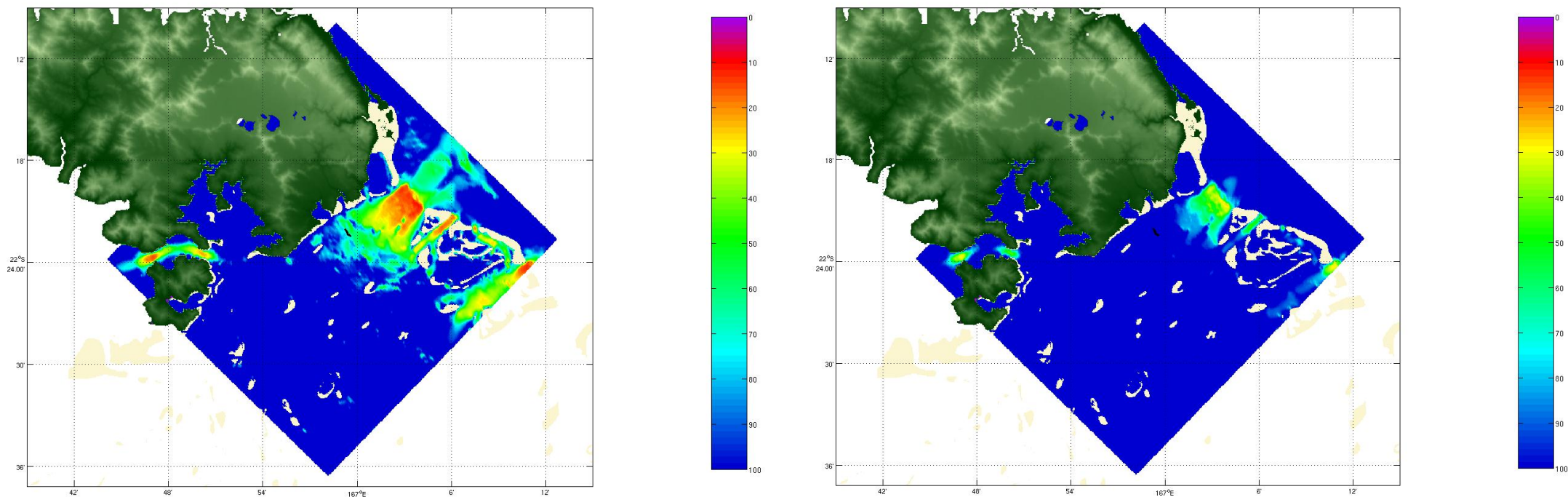


Figure 44 : Pourcentage du temps durant un cycle de marée de morte-eau (gauche) et vive-eau (droite) où le courant est inférieur à 0,3 m/s (0.6 nœuds) (courant au fond). Le trait noir symbolise le diffuseur.

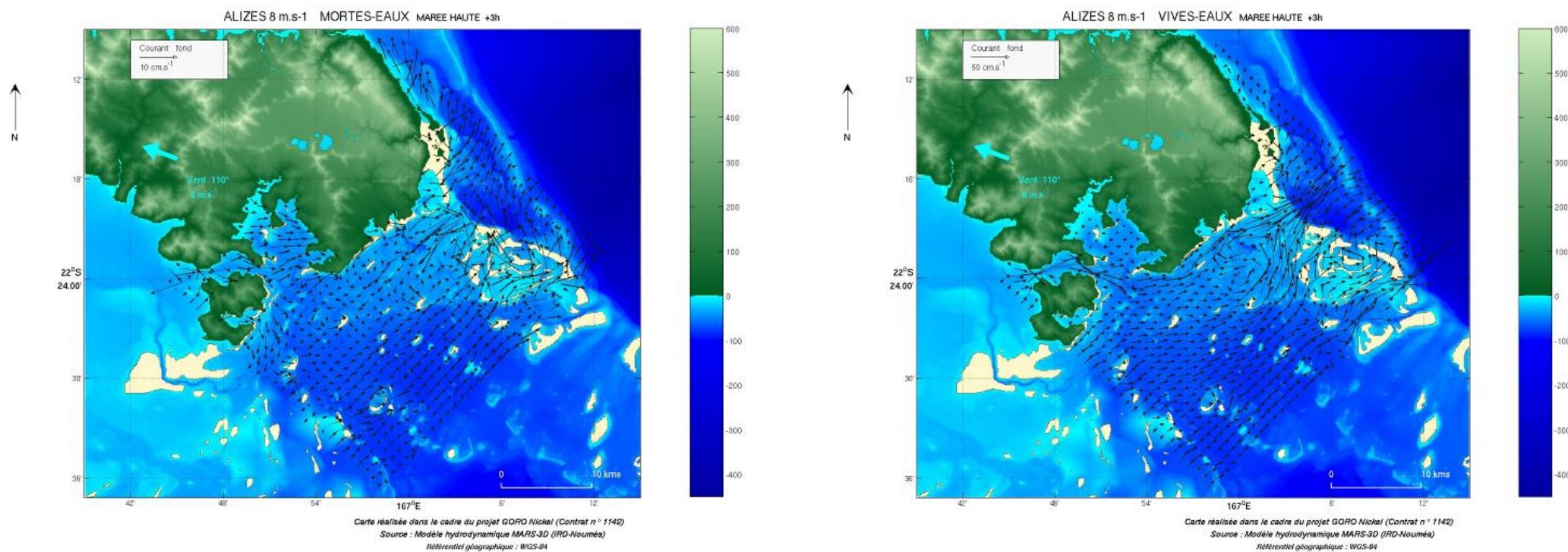


Figure 45 : Courant par marée de morte-eau (gauche) et vive-eau (droite) + alizé de 8 m/s à marée haute + 3 heures (courant au fond).

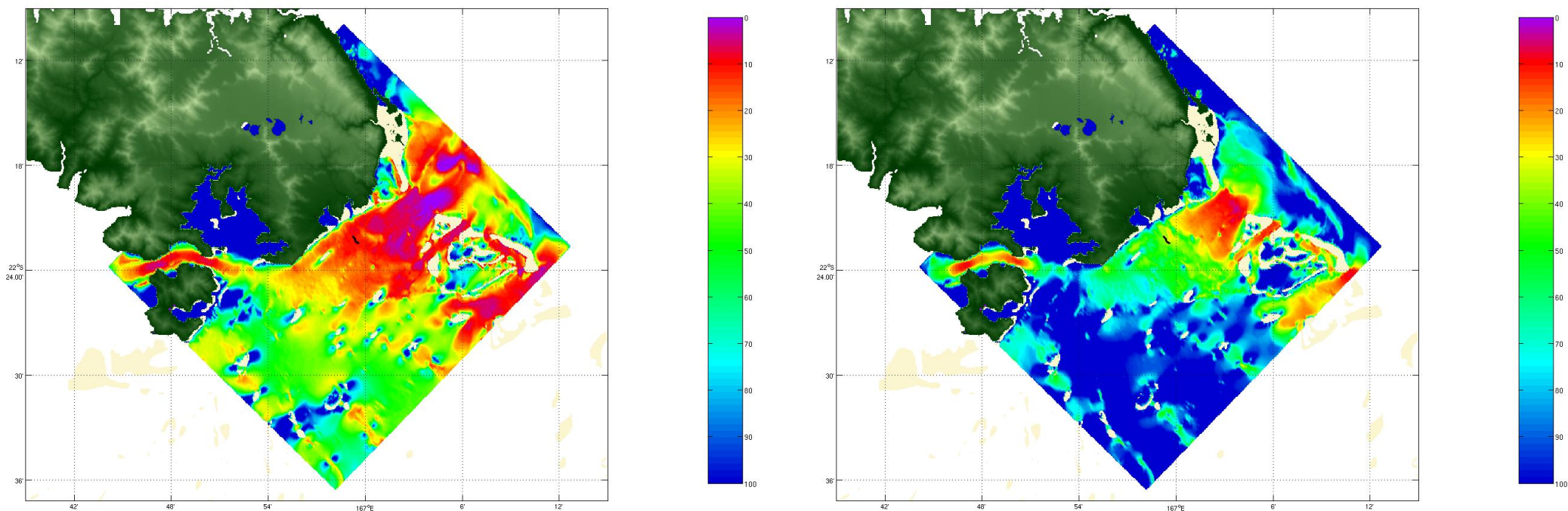


Figure 46 : Pourcentage du temps durant un cycle de marée de morte-eau (gauche) et vive-eau (droite) + alizé de 8 m/s où le courant est inférieur à 0,1 m/s (0.2 nœuds) (courant au fond). Le trait noir symbolise le diffuseur.

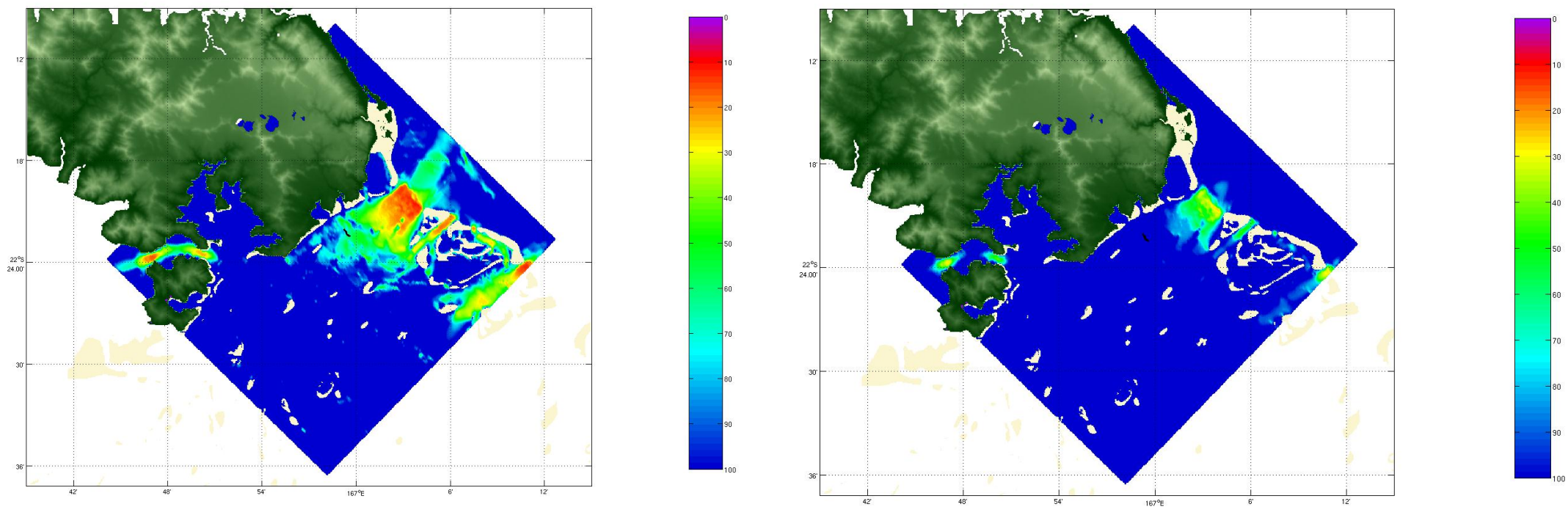


Figure 47 : Pourcentage du temps durant un cycle de marée de morte-eau (gauche) et vive-eau (droite) + alizé de S-SE de 8 m/s où le courant est inférieur à 0,3 m/s (0.2 nœuds) (courant au fond). Le trait noir symbolise le diffuseur.

Les pourcentages de temps au cours d'un cycle de marée où le courant est inférieur 0,1 m/s sont plus forts au fond qu'en surface. En surface le courant n'est pratiquement jamais inférieur à 0,1 m/s. Au fond les résultats sont très proches du cas d'une marée de vive-eau seule. Dans la zone de l'émissaire, le pourcentage est de l'ordre de 5 à 10% au fond et proche de zéro en surface (Figure 47).

Les zones du lagon où le pourcentage de temps au cours d'un cycle de marée où le courant est inférieur 0,3 m/s, sont limitées aux passes pour les eaux du fond. En surface, les zones du lagon concernées sont beaucoup moins étendues. En particulier au niveau de l'émissaire, les courants sont supérieurs à 0,3 m/s pendant au moins 30 % du temps. Au sud de l'île Ouen ainsi que dans la Baie du Prony, les courants sont toujours particulièrement faibles près du fond. Par contre ils augmentent près de la surface.

II.2.2.c. Courants de morte-eau et vive-eau + VENT de SUD de 8 m/s

Au fond, les courants calculés, dans le cas des marées de morte-eau et de vent de sud de 8 m/s, sont très similaires à ceux calculés dans le cas de la marée seule.

En surface, le vent influence plus largement les courants. Lorsque la marée et le vent sont dans le même sens, à « marée haute + 3 heures » et jusqu'à « marée basse + 3 heures », les courants sont plus forts que pour la marée seule. A marée haute, le vent et la marée sont en opposition et les courants sont plus faibles que dans le cas d'une marée seule ; les courants restent entrants dans la passe.

Par marée de vive-eau ces phénomènes sont amplifiés.

II.2.2.d. Courants de morte-eau et vive-eau + VENT d'OUEST de 8 m/s

Au fond, les courants calculés dans le cas des marées de morte-eau et de vent d'ouest de 8 m/s sont très similaires à ceux calculés dans le cas de la marée seule.

Par contre, en surface, le vent influence plus largement les courants. Lorsque la marée et le vent sont dans le même sens, à « marée haute + 3 heures » et jusqu'à « marée basse + 3 heures », les courants calculés sont plus forts que pour la marée seule. A l'inverse, à marée haute, le vent et le courant sont en opposition, les vitesses sont alors plus faibles que dans le cas d'une marée seule.

Par marée de vive-eau ces phénomènes sont amplifiés.

II.2.2.e. Courants de morte-eau et vive-eau + VENT de NORD de 8 m/s

Au fond, les courants calculés dans le cas des marées de morte-eau et de vent de nord de 8 m/s sont modifiés par rapport à ceux calculés dans le cas de la marée seule. Les courants au fond restent entrants à « haute mer + 3 heures ». A basse mer, les courants sont plus faibles que dans le cas de la marée seule. A « basse mer + 3 heures », ils sont sortants. A « basse mer + 5 heures », ils sont relativement faibles. Pour les périodes de vive-eau, les courants calculés sont très similaires à ceux calculés dans le cas de la marée seule.

En surface et pour les marées de morte-eau, le vent influence plus largement les courants. Lorsque la marée et le vent sont dans le même sens, à marée haute et « marée haute + 3 heures », les courants sont plus forts que pour la marée seule et ils sont entrants. A marée basse, le vent et la marée sont

en opposition et les courants sont plus faibles que dans le cas d'une marée seule. Les courants, en surface de marée basse à « marée basse + 5 heures », prennent une forte composante sud.

Par marée de vive-eau, si le vent influence largement les courants, la marée reste prédominante. Lorsque la marée et le vent sont dans le même sens, à marée haute et à « marée basse + 5 heures », les courants sont plus forts que pour la marée seule.

Ce qu'il faut retenir

A partir des seuls calculs de marées correspondants aux cas les plus défavorables en termes de vitesses, le pourcentage de temps où le courant est inférieur **0,05 m/s** (0,1 nœud) a été estimé pour un cycle lunaire entier englobant une alternance complète de « marées de morte-eau + vive-eau » (Figure 48). Le calcul montre que dans la zone proche de la passe de La Havannah, ce pourcentage est inférieur à 5% et à la verticale de l'émissaire, cette valeur est située autour de 10%. Ce temps correspond en grande partie au temps nécessaire pour que le courant s'inverse au cours d'un cycle de marée.

La résultante des courants (courant résiduel) d'un cycle lunaire complet est orientée du nord-est vers le sud-ouest, en d'autres termes la direction suivie va de la passe de la Havannah vers l'intérieur du lagon. La marée pondère quelque peu cette direction de propagation et permet une légère diffusion vers le nord-est.

POURCENTAGE DE TEMPS DURANT UN CYCLE LUNAIRE DE MAREE
OU LE COURANT EST INFERIEUR A 0.05M/S (FOND)

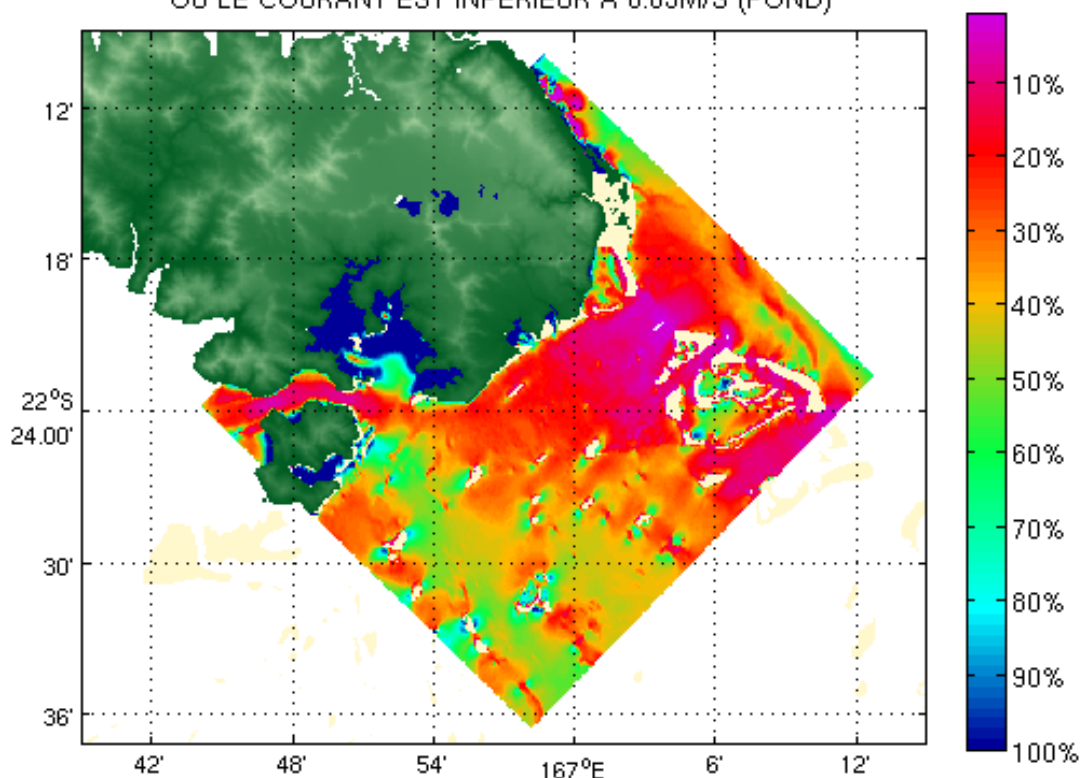


Figure 48 : Pourcentage du temps durant un cycle lunaire de marée (soit 28 jours) où le courant près du fond est inférieur à 0,05 cm/s (0,1 nœud).

II.2.3. Conclusion

L'étude des courants et notamment la modélisation hydrodynamique des phénomènes ont permis de mettre en évidence, pour le Canal de la Havannah, les mécanismes de circulation des masses d'eau entre l'océan ouvert et le lagon sud de la Nouvelle Calédonie. Ces échanges sont d'une grande intensité et génèrent des courants dont la vitesse est maximale dans un marge secteur compris entre le récif loro et la Passe de la Havannah, les renverses de courant étant, par ailleurs, asynchrones par rapport aux ondes marégraphiques.

Ce contexte met en évidence l'existence d'une frontière hydrodynamique orientée NE-SW qui divise longitudinalement le Canal de La Havannah durant toute l'année. Cette frontière est matérialisée par la mise en place de deux tourbillons qui se font face au droit de Port Boisé. Les sens de rotation de ces gyres sont inversés, l'un est cyclonique, l'autre anticyclonique ; le premier longeant la côte sud de la Nouvelle-Calédonie (Figure 49).

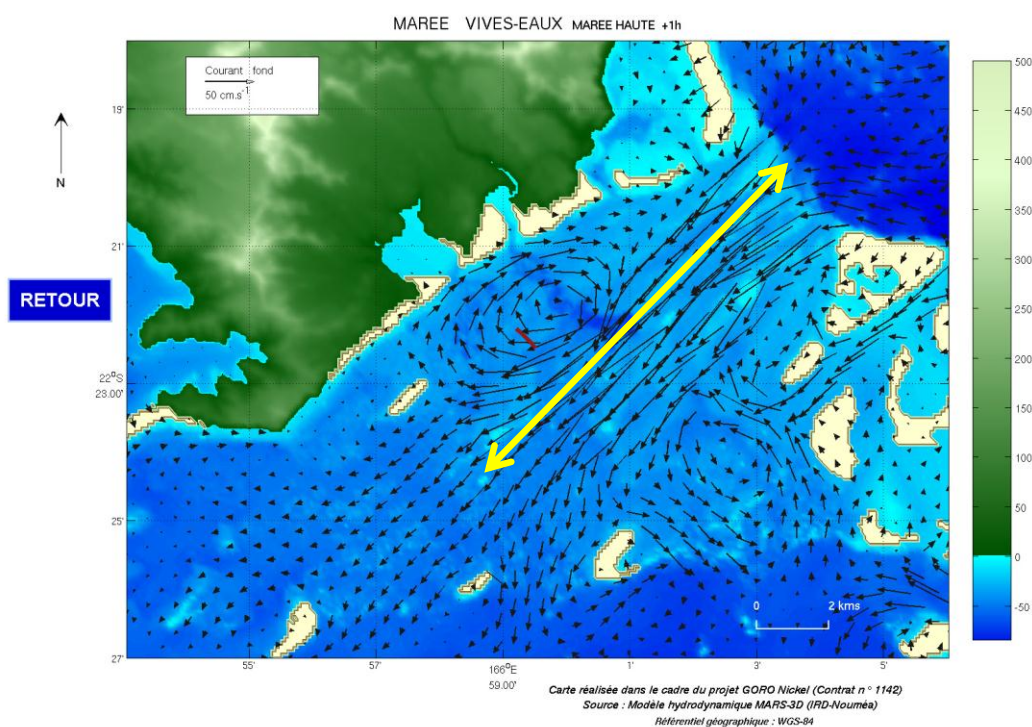


Figure 49 : Formation de deux gyres (tourbillons), l'un anticyclonique au nord-ouest d'une ligne médiane (flèche jaune) et l'autre cyclonique au sud-est. Le diffuseur est représenté par le trait rouge.

II.3. BIOSURVEILLANCE DU MILIEU MARIN

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus lors des campagnes de caractérisation de l'état de référence réalisées en 2009 en matière de bioconcentration d'éléments métalliques constitutifs du cortège latéritique.

Deux méthodes de bio-surveillance ont été retenues, la bio-surveillance active (transplantation d'organismes marins ou « caging ») et la bio-surveillance passive (collecte ciblée d'organismes marins sédentaires).

Remarque : en matière de risque ciguatérique, des études complémentaires ont été produites durant la même période par l'IRD. Ce travail a fait l'objet d'un rapport de synthèse pour l'ÆIL (Kerbrat et Kumar-Roiné, 2013).

II.3.1. Biosurveillance active par transplantation de bioindicateurs

II.3.1.a. Objectif de la méthodologie

La méthode de transplantation d'espèces bioindicatrices en stations artificielles consiste à immerger pendant trois mois deux espèces bioindicatrices accumulatrices de métaux (une algue et un bivalve) placées dans des cages immergées à une profondeur et une localisation géographique choisies par l'opérateur. A l'issue de cette période d'immersion des spécimens-tests dans le milieu récepteur à surveiller, divers paramètres physiologiques des bivalves ainsi que les concentrations en différents métaux accumulés dans les tissus des deux espèces sont étudiés.

Cette méthode a fait l'objet d'une standardisation au niveau international (norme E2122-02, ASTM, 2002) sur laquelle se base le travail réalisé en Nouvelle Calédonie.

Les données ainsi obtenues avant le début des rejets liquides dans le milieu marin permettent donc d'évaluer quantitativement les apports naturels en métaux biodisponibles dans le milieu marin côtier et serviront de données de base auxquelles pourront être comparés les résultats des études ultérieures de suivi écotoxicologique du milieu.

Identifiés comme des organismes adaptés pour l'étude de la plupart des métaux étudiés (Breau, 2003 ; Breau *et al.*, 2003), les bivalves *Isognomon isognomon* Linnaeus et les macroalgues brunes *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley (Figure 50) ont été récoltés (juillet 2009) dans la Baie Maa pour conduire les études de définition de l'état de référence du lagon sud (Canal de la Havannah et Baie du Prony).

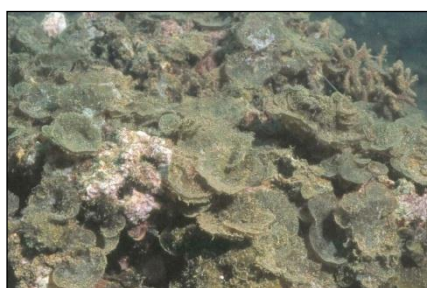


Figure 50 : Photographies des espèces bioaccumulatrices sélectionnées : le bivalve *Isognomon isognomon* et l'algue brune *Lobophora variegata*.

II.3.1.b. Localisation des stations de transplantation

En 2009, un ensemble de huit stations localisées dans toute la zone sud a été sélectionné pour le suivi environnemental par transplantation (Figure 51) : St03 (Port Boisé), St05 (Illet Kié), St06 (Baie Kwé), St07 (Récif Ioro), St13 (Ile Ouen), St14 (Port de Goro), St16 (Port de commerce) et St18 (Illet Casy) ; toutes ces stations de suivi correspondant à des stations de suivi physicochimique des eaux. En 2010, une nouvelle station de référence St31 (Nouaré) a été créée en remplacement de la station St05 (Kié), où les courants marins sont trop forts pour déployer sans risque le dispositif gréé sur une ligne de mouillage.

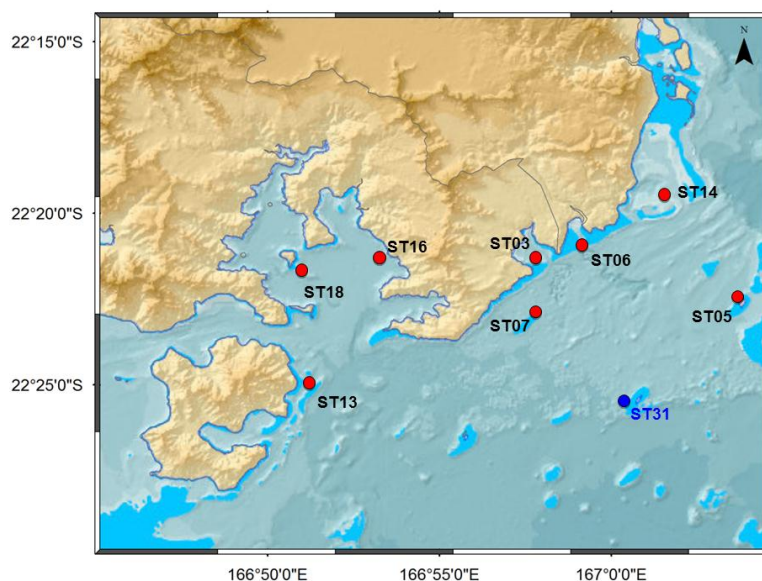


Figure 51: Localisation géographique des 8 stations de biosurveillance du milieu marin par transplantation d'espèces bioaccumulatrices. La station St31 figure dans les suivis seulement à partir de 2010 et remplace la station St05.

II.3.1.c. Méthodologie

L'étude a nécessité un total de 160 spécimens de *Isognomon isognomon* (soit 20 par station) de poids frais les plus homogènes possible. Il a donc été sélectionné des individus dont le poids frais était compris entre 12 et 18 g, soit avec une moyenne de 15 ± 3 g.

La constitution des 8 lots a été réalisée par tirage aléatoire au sein des 160 spécimens sélectionnés. La structure de taille (poids frais total) de la population transplantée et l'homogénéité des lots ont ensuite été vérifiées. Les poids frais moyens varient de $14,38 \pm 1,90$ g à $15,89 \pm 1,99$ g et ne diffèrent pas statistiquement entre les huit lots ($p=0,117$) ; les longueurs moyennes des coquilles variant de $73,9 \pm 4,3$ mm (St 06) à $79,8 \pm 6,0$ mm (St 07 et St 16), soit une moyenne globale de 77,6 mm.

Les algues *Lobophora variegata* récoltées ont été triées afin de sélectionner les frondes de taille supérieure à la maille des cages de transplantation. Huit lots de vingt algues chacun ont été également constitués.

Les métaux analysés sont : As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn.

II.3.1.d. Résultats

En fin d'expérience, soit au terme de 3 mois d'exposition, les poids frais totaux moyens ont montré que le taux de croissance moyen pour la période d'exposition a été compris entre 8,3 % (St03-Port Boisé et St06-Kwé) à 16,0 % (St16-Port usine), cette différence observée étant significative (test pour échantillons appariés, $p<0,05$) pour toutes les stations à l'exception de St 06-Kwé ($p=0,080$) et St 13-Ouen ($p=0,140$). A contrario, d'un point de vue spatial, aucune différence significative de poids frais total n'a été détectée entre les stations (ANOVA, $p=0,084$) ; la longueur des coquilles suivant un schéma d'évolution identique.

Les taux de croissance journaliers (TCJ) moyens correspondants varient donc de 0,09 % (St 03-Port Boisé, St 06-Kwé et St 13-Ouen) à 0,16 % (St 16-Port usine) pour le poids frais total, et de 0,07 % (St 07-Ioro, St 18-Casy et St 06-Kwé) à 0,10 % (St 03-Port Boisé et St 13-Ouen) pour la longueur des coquilles (Figure 52).

Ces valeurs complétées par les indices de conditions physiologiques calculés (IC) montrent que malgré les différences significatives observées, celles-ci restent modestes et reflètent une assez faible hétérogénéité des conditions de milieu, notamment trophique, pour tout le domaine étudié.

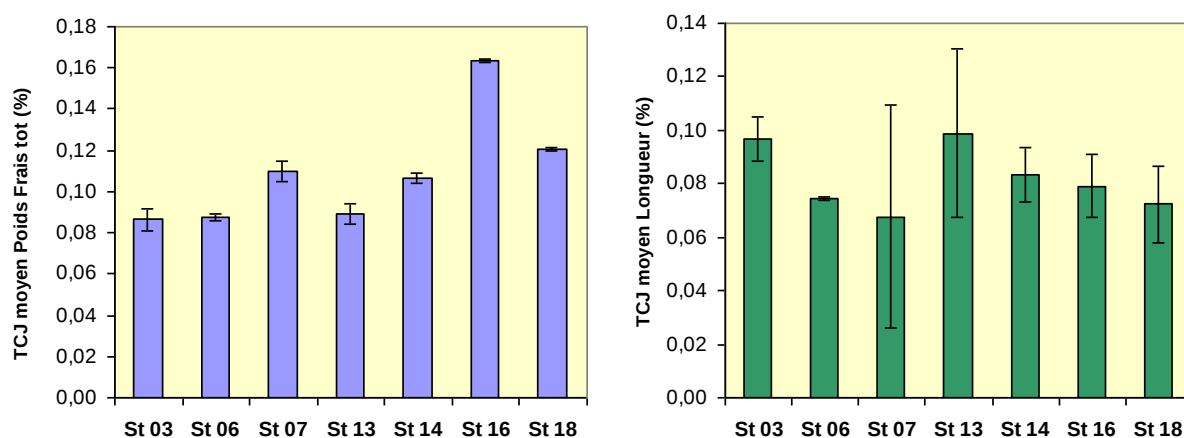


Figure 52 : Taux moyens de croissance journalière d' *Isognomon isognomon* (en %, $\pm$ intervalle de confiance à 95 %) (GAUCHE : poids frais total ; DROITE : longueur coquille).

(1) Variabilité spatiale et temporelle des concentrations en métaux chez les bivalves

Les concentrations médianes en métaux mesurées dans les chairs entières des bivalves transplantés varient entre les stations selon les fourchettes suivantes : 52,9-56,6 $\mu\text{g/g}$ de poids sec pour l'arsenic (As), 0,24-0,47 $\mu\text{g/g}$ pour le cobalt (Co), 2,0-2,6 $\mu\text{g/g}$ pour le chrome (Cr), 11,4-17,9 $\mu\text{g/g}$ pour le cuivre (Cu), 152-189 $\mu\text{g/g}$ pour le fer (Fe), 18,3-43,9 $\mu\text{g/g}$ pour le manganèse (Mn), 2,6-4,4 $\mu\text{g/g}$ pour le nickel (Ni), et 728-902 $\mu\text{g/g}$ pour le zinc (Zn) (Figure 53).

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans les baies de Nouméa selon la même méthode de transplantation (Breau *et al.*, 2009b) permet d'évaluer l'importance des concentrations mesurées tout en nuancant en raison des durées d'exposition qui diffèrent pour les deux sites (3 mois dans le lagon sud contre 5 mois dans la Grande Rade), ainsi :

- **As** : les concentrations mesurées sur l'ensemble des stations sont équivalentes aux concentrations maximales précédemment trouvées dans la région de Nouméa ;
- **Co** : les concentrations à la station St 18-Casy sont semblables aux plus faibles valeurs mesurées lors de ces deux précédentes campagnes de Nouméa (2007-2008) ; les valeurs obtenues aux autres stations sont très proches de celles observées dans la partie la plus contaminée du gradient, et reflètent donc l'existence d'apports naturels biodisponibles significatifs mais modérés dans la région sud ;
- **Cr** : comme pour le cobalt, les concentrations en Cr mesurées dans la présente étude sont identiques à celles précédemment trouvées aux stations les plus contaminées du gradient ;
- **Cu** : les concentrations en Cu sont du même ordre de grandeur, voire supérieures (St 16-Port usine et St 18-Casy) à celles précédemment mesurées le long du gradient en 2007-2008 ;
- **Fe** : les concentrations en Fe obtenues sur l'ensemble des sept stations correspondent aux plus faibles valeurs enregistrées lors des campagnes réalisées à Nouméa ;
- **Mn** : de même que pour le cuivre, les concentrations en Mn mesurées sont significativement supérieures (St 16-Port usine et St 18-Casy) ou similaires (autres stations) à celles

précédemment obtenues sur l'ensemble du gradient de contamination étudié en 2007 et 2008 ;

- **Ni** : les teneurs en Ni dans les bivalves des sept stations sont représentatives d'apports modérés, et sont environ trois fois plus faibles que les plus fortes valeurs précédemment mesurées à la station la plus contaminée du gradient de 2007-2008 ;
- **Zn** : les concentrations en Zn sont typiques de zones ne recevant pas d'apports significatifs.

En termes de variabilité des concentrations, les écarts entre les diverses stations varient selon les métaux considérés (Figure 53). Pour As et Fe, aucune différence significative de concentration n'est détectée entre les stations (Test de Kruskal-Wallis, $p=0,773$ et $p=0,196$, respectivement). En revanche, des différences significatives (Zn : $p=0,023$) à très hautement significatives (Co, Cu, Mn, Ni, $p<0,0001$) sont observées pour les six autres métaux étudiés. Les écarts correspondants sont cependant peu importants ; seuls le cobalt et le manganèse montrent en effet des concentrations variant d'un facteur deux, les autres métaux montrant des rapports inférieurs. Les plus fortes concentrations en As, Co, Cr et Fe ont été mesurées à la station St 03-Port Boisé, tandis que la station St 16-Port usine révèle les concentrations en Cr (même valeur qu'en St 03), Cu et Mn les plus élevées. Des concentrations en As, Cu, Mn et Ni parmi les plus élevées ont été trouvées à la station St 18-Casy. La station St 13-Ile Ouen montre au contraire les concentrations en Cr, Fe, Mn et Ni les plus basses.

(2) Variabilité spatiale et temporelle des concentrations en métaux chez les algues

Les concentrations médianes en métaux mesurées dans les frondes des macroalgues transplantées varient entre les stations selon les fourchettes suivantes : 30,9-43,5 $\mu\text{g/g}$ de poids sec pour As, 2,7-7,7 $\mu\text{g/g}$ pour Co, 3,9-38,2 $\mu\text{g/g}$ pour Cr, 14,2-33,8 $\mu\text{g/g}$ pour Cu, 146-1831 $\mu\text{g/g}$ pour Fe, 7,9-83,3 $\mu\text{g/g}$ pour Mn, 4,9-34,8 $\mu\text{g/g}$ pour Ni, et 3,3-9,0 $\mu\text{g/g}$ pour Zn (Figure 54).

De même qu'avec les bivalves, la comparaison de ces résultats avec ceux précédemment obtenus lors de la campagne de transplantation de 2007 dans la Grande Rade permet de situer l'importance des apports naturels en métaux biodisponibles dans le milieu environnant (Breau *et al.*, 2009b) :

- **As** : les concentrations aux stations St 16-Port usine et St 18-Casy sont semblables aux plus faibles concentrations mesurées en 2007 dans la Grande Rade ; celles trouvées aux autres stations sont du même ordre de grandeur que les valeurs précédemment mesurées aux stations les plus contaminées du gradient ;
- **Co** : les concentrations en Co mesurées dans les algues reflètent la présence d'apports dissous biodisponibles faibles (St 14-Baie de Goro et St 16-Port usine) à modérés (St 03-Port Boisé, St 06-Kwé, St 07-Ioro) ; ces concentrations sont trois à huit fois inférieures aux plus fortes valeurs précédemment trouvées à une station fortement contaminée lors de la campagne de 2007 dans la Grande Rade ;
- **Cr** : les plus faibles concentrations mesurées (St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro notamment) sont caractéristiques de stations ne recevant pas d'apports significatifs en chrome. Les concentrations aux stations St 18-Casy et surtout St 06-Kwé reflètent en revanche l'existence d'apports non négligeables, lesquels restent cependant inférieurs à ceux observés à la station la plus contaminée du gradient étudié en 2007 ;
- **Cu** : les concentrations en cuivre mesurées sur l'ensemble des sept stations sont du même ordre de grandeur que celles trouvées aux deux stations les plus contaminées du gradient

précédemment étudié, suggérant l'existence d'apports naturels significatifs en cuivre dissous ;

- **Fe** : les concentrations en Fe obtenues aux stations St 03-Port Boisé, St 07-Ioro, St 14-Baie de Goro et St 16-Port usine sont similaires aux plus faibles valeurs précédemment trouvées le long du gradient ; les concentrations mesurées à la station St 06-Kwé révèlent l'existence d'apports importants, lesquels restent toutefois inférieurs à ceux observés à la station la plus contaminée du gradient précédemment étudié ;
- **Mn** : les concentrations mesurées sur l'ensemble des stations sont inférieures ou égales aux deux plus faibles valeurs trouvées lors de la campagne de 2007 ;
- **Ni** : les concentrations en nickel sont du même ordre de grandeur que celles mesurées sur quatre des cinq stations du gradient de 2007 ; ces valeurs sont très inférieures aux plus fortes concentrations trouvées à la station la plus contaminée du gradient ;
- **Zn** : les concentrations en Zn mesurées sur toutes les stations sont inférieures ou égales aux plus faibles valeurs précédemment observées sur l'ensemble du gradient.

En termes de variabilité des concentrations, les écarts entre les différentes stations sont beaucoup plus marqués chez les algues que chez les bivalves et sont tous très hautement significatifs ($p < 0,0001$) (Figure 54). Les concentrations médianes maximales/minimales varient en effet d'un facteur inférieur à 2 (As) et d'un facteur 2 à 3 (Co, Cu, Zn) jusqu'à des facteurs 7 (Ni), 10 (Cr et Mn), voire de plus de 12 (Fe). La station St 03-Port Boisé se caractérise par de plus fortes concentrations en Co et Mn, les stations St 06-Kwé et St 18-Casy par de plus fortes concentrations en Cr, Fe, Ni (ainsi que Zn pour St 18). Les stations St 07-Ioro et St 14-Baie de Goro révèlent les plus fortes concentrations en As ainsi que Zn (St 07) ou Cu (St 14). Les stations St 13-Ouen, St 16-Port usine et St 18-Casy montrent au contraire les concentrations les plus faibles en Cr, Fe, Mn et dans une moindre mesure, Zn (St 13), en Co, Cu, Mn, et dans une moindre mesure, As (St 16), et en As et Cu (St 18). La station St 13-Ouen montre au contraire les plus faibles concentrations en Cr, Fe, Ni et dans une moindre mesure Zn. Les concentrations en Co, Cu, Mn (et dans une moindre mesure, As) les plus basses sont trouvées à la station St 16-Port usine, tandis que la station St 18 montre les plus faibles concentrations en As, Cu, et dans une moindre mesure, Mn.

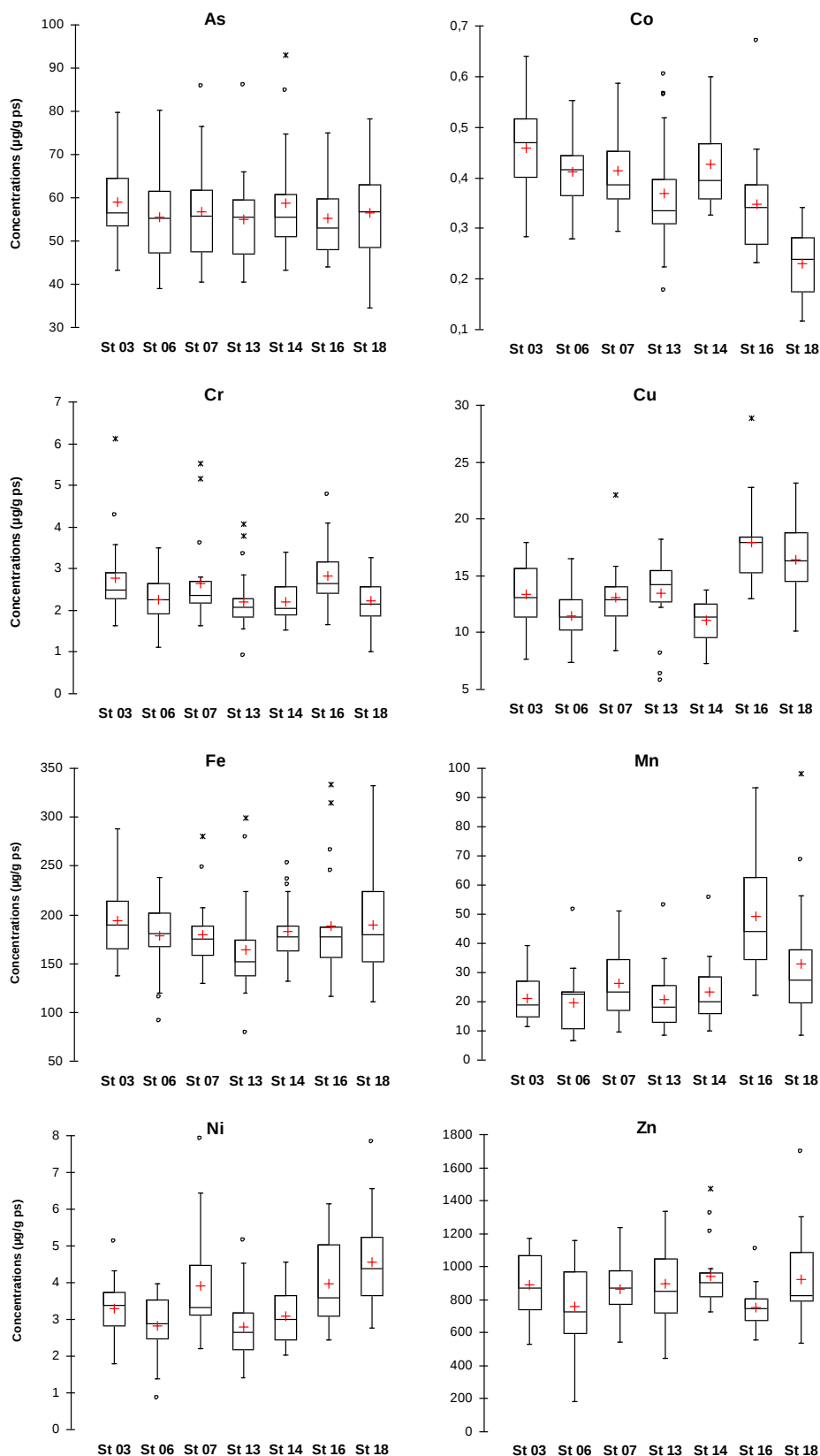


Figure 53 : Variabilité interindividuelle et inter-stations des concentrations en métaux ($\mu\text{g/g}$ poids sec de chair) chez le bivalve *Isognomon isognomon* transplanté. Le suivi à la station St31 n'a été initialisé qu'à partir de 2010 et ne figure donc pas dans cette étude.

Remarque : La station St31 n'a été étudiée qu'à partir de la mise en place du suivi environnemental de 2010. Les résultats d'exposition ne sont donc pas inclus à ces graphiques.

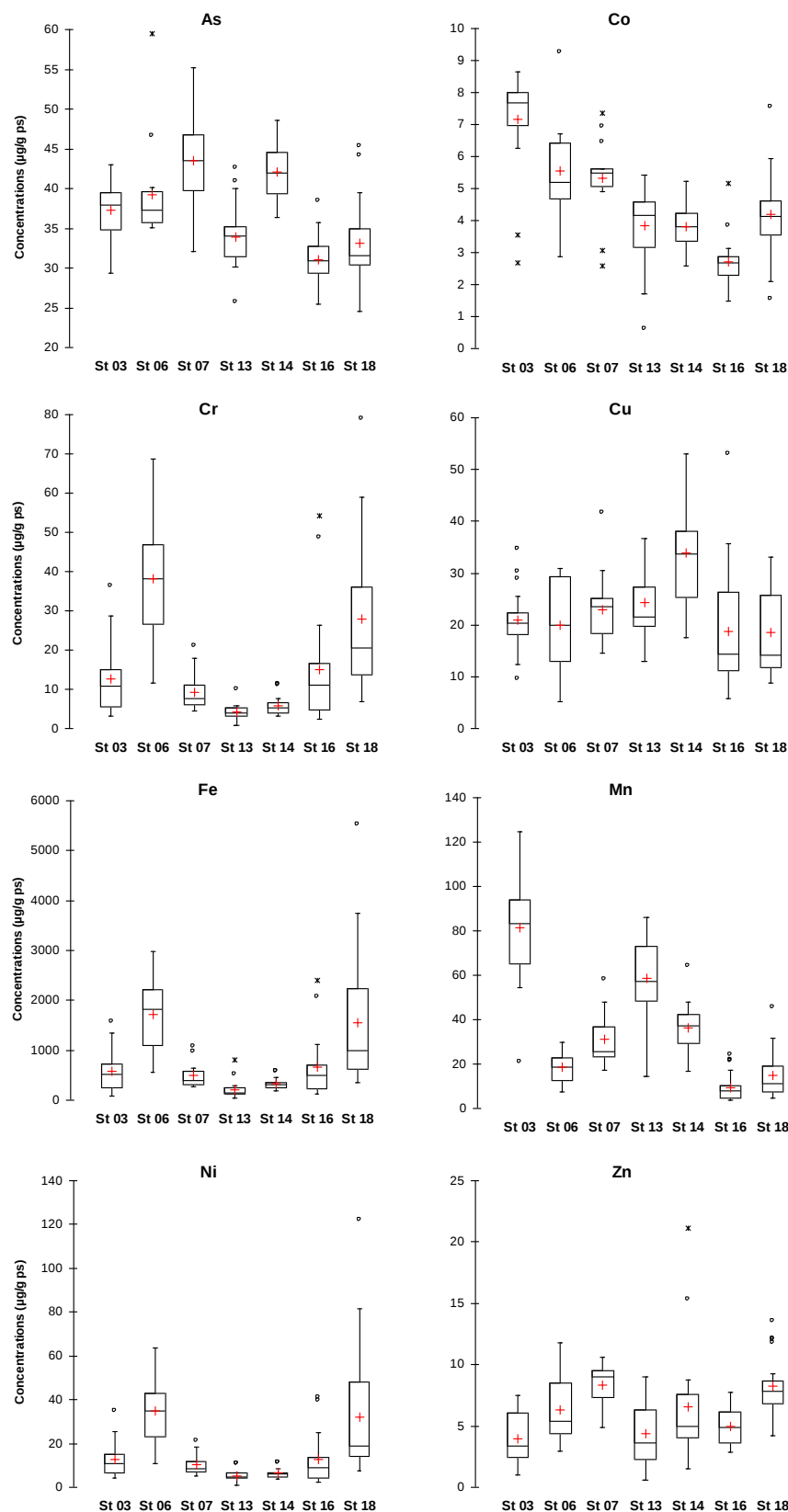


Figure 54 : Variabilité interindividuelle et interstations des concentrations en métaux ($\mu\text{g/g}$ poids sec de fronde) chez la macroalgue brune *Lobophora variegata* transplantée.

Remarque : La station St 31 n'a été étudiée qu'à partir de la mise en place du suivi environnemental de 2010. Les résultats d'exposition ne sont donc pas inclus à ces graphiques.

Ce qu'il faut retenir

Ces résultats indiquent que les conditions naturelles du milieu environnant à chacune des stations conviennent bien, notamment, à la survie des *Isognomon isognomon* transplantés et permettent une bonne croissance des spécimens.

Par ailleurs, les résultats de la campagne indiquent que les concentrations en métaux bioaccumulés varient selon 2 paramètres :

1 - l'espèce : dans les chairs des bivalves *Isognomon isognomon*, les métaux sont bioaccumulés selon l'ordre suivant : $Zn > Fe > As > Mn > Cu > Ni > Cr > Co$. Chez les algues *Lobophora variegata* l'ordre est plus variable : $Fe > As, Mn > Cr, Ni, Zn \geq Cu, Co$.

2 - la station : Les stations qui montrent les plus fortes concentrations sont, le plus souvent, St06 (Kwé), St14 (Port Goro) et St18 (Casy). Les stations St06 et St18 sont soumises à une influence terrigène, la station St14 étant située à proximité de plusieurs estuaires de rivières (la Trou et la Kuebini notamment) et proche de la tribu de Goro (rejets anthropiques ?). Bien que parfois significatifs, d'une manière générale les apports en métaux demeurent néanmoins relativement faibles à modérés.

II.3.2. Biosurveillance passive et analyse du risque sanitaire

II.3.2.a. Objectif de la méthodologie

La pêche et la consommation humaine des produits de la mer (poissons et coquillages principalement) constituent la voie prépondérante de transfert vers l'Homme des contaminants chimiques présents dans l'environnement marin. L'ingestion régulière d'organismes marins peut donc entraîner l'apparition de troubles physiologiques, voire de maladies, et présente donc un risque sanitaire qui ne peut pas être négligé.

Il s'est donc agi de déterminer les concentrations naturelles de 8 métaux (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) et 1 métalloïde (As) dans les chairs des principales espèces marines consommées localement. Les pêches ont été organisées dans la région sud du lagon de Nouvelle-Calédonie et programmées autour de 2 campagnes saisonnières pour :

- i) évaluer les niveaux naturels avant la mise en opération de l'usine et les premiers rejets d'effluent ;
- ii) réaliser une évaluation initiale du risque sanitaire permettant d'estimer la marge d'augmentation tolérable pour la consommation et la santé humaine.

II.3.2.b. Localisation des aires de pêche

Quatre zones de pêche ont été retenues pour la définition de l'état de référence, elles correspondent à la moitié Est de la Baie du Prony (Zone 1), la zone côtière et estuarienne bordant le Canal de la Havannah (Zone 2), elle-même subdivisée en cinq sites (récifs frangeants côtiers : 2A et 2D, Baie de Port Boisé : 2B, Baie Kwé 2C, Baie de Goro : 2E), le Canal de la Havannah (Zone 3), ainsi que le bord Est de l'Île Ouen (Zone 4) (Figure 55).

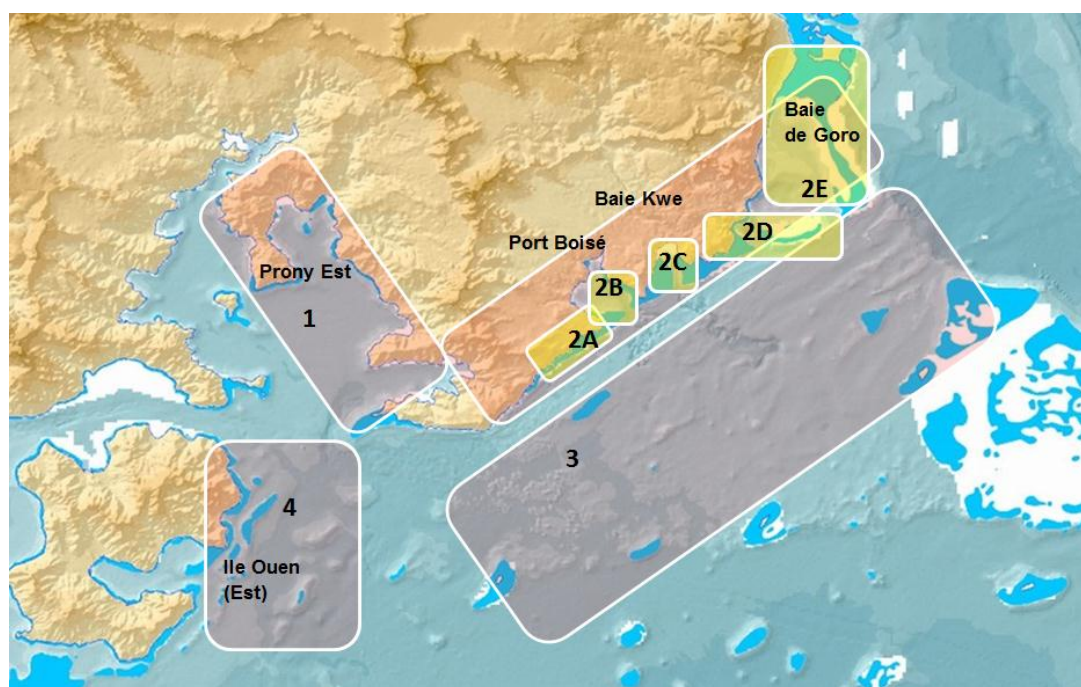


Figure 55 : Carte des différentes zones de pêche définies dans le lagon sud.

II.3.2.c. Méthodologie

En collaboration avec le Service des Pêches et de l'Aquaculture de la Direction du Développement Rural de la province Sud, un réseau de pêcheurs a donc été constitué. Des enquêtes de pêche ont été réalisées auprès de ces pêcheurs afin :

- i) de dresser la liste des espèces de poissons et d'invertébrés les plus pêchées et consommées par les populations vivant dans le sud ou vendues sur les marchés de Nouméa ;
- ii) de préciser pour chacune de ces espèces la(les) zone(s) préférentielle(s) de pêche de chaque pêcheur interrogé ;
- iii) d'obtenir des informations diverses concernant les conditions de pêche (type d'embarcation et capacité d'embarquement, matériel utilisé), ainsi que les filières de vente des produits pêchés.

Deux campagnes de pêche ont été réalisées en **saison fraîche mi-2009** et **saison chaude début 2010** afin d'évaluer la bioaccumulation chez les poissons et les mollusques (bivalves et gastéropodes).

L'analyse des 9 éléments a été réalisée dans les filets, pour les poissons, dans la chair totale pour les bivalves et les muscles chez les gastéropodes.

Les espèces ciblées présentent des modes alimentaires variés (herbivores, carnivores d'invertébrés benthiques, piscivores, consommateurs de phytoplancton, alguivores) et se contaminent donc à partir de l'ingestion de proies ayant elles-mêmes des niveaux de contamination différents.

L'échantillonnage a ciblé 27 espèces et 10 familles de poissons (Acanthuridae, Carangidae, Haemulidae, Labridae, Lethrinidae, Lutjanidae, Mugilidae, Scaridae, Serranidae et Siganidae).

Pour les invertébrés, 5 espèces de mollusques (les bénitiers *Hippopus hippopus* et *Tridacna maxima*, la clovisse *Atactodea striata*, la grisette *Gafrarium tumidum* et la palourde *Anadara antiquata*) et de

4 espèces de gastéropodes (le bigorneau *Turbo setosus*, l'araignée (sept doigts) *Lambis lambis*, le sauteur *Strombus luhuanus*, et le troca *Trochus niloticus*) ont été ciblées.

II.3.2.d. Résultats

(1) Concentrations en métaux chez les poissons

Un total de 144 poissons (Tableau 14) a été analysé au cours des deux campagnes saisonnières soit 53 poissons pêchés sur quatre sites en 2009 et 91 poissons pêchés sur cinq sites en 2010.

Les concentrations médianes minimales et maximales des 9 éléments analysés dans les muscles des poissons pêchés lors des deux campagnes (toutes espèces et tous sites confondus) sont présentées dans le Tableau 12. Les métaux les plus présents dans les muscles des spécimens étudiés sont le fer, le zinc et l'arsenic, puis dans une moindre mesure le cuivre ; les concentrations les plus basses sont observées pour le cadmium, le nickel et le cobalt.

Tableau 12 : Concentrations minimales et maximales dans les muscles des poissons analysés (en µg de métal/g de poids sec de chair), toutes espèces et toutes zones confondues.

As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1,2 – 52,5	<0,06	<0,1 – 1,1	<0,1 – 5,7	0,25 – 3,0	4,0 – 211	<0,03 – 3,3	<0,06 – 1,35	11,2 – 49,7

(2) Concentrations en métaux chez les Invertébrés

Au total pour les deux campagnes, 329 spécimens de mollusques ont été analysés (individuellement, à l'exception des clovisse, groupés par lots de trois), soit 182 bivalves appartenant à 5 espèces (les bénitiers *Hippopus hippopus* et *Tridacna maxima*, la clovisse *Atactodea striata*, la grisette *Gafrarium tumidum* et la palourde *Anadara antiquata*) et 147 gastéropodes de quatre espèces (le bigorneau *Turbo setosus*, l'araignée (sept doigts) *Lambis lambis*, le sauteur *Strombus luhuanus*, et le troca *Trochus niloticus*).

Les concentrations médianes minimales et maximales des métaux analysés dans les muscles des Mollusques pêchés lors des deux campagnes sont présentées dans le Tableau 13. Chez les bivalves, les valeurs maximales de concentrations décroissent selon l'ordre Fe > Mn > Zn > Ni > As > Cr > Cu > Cd > Co. Chez les gastéropodes, l'ordre des concentrations est sensiblement différent, soit Fe > Zn > As > Mn > Cu > Ni > Cr, Cd > Co. Les concentrations médianes maximales sont observées chez les bivalves pour tous les métaux à l'exception du cuivre.

Tableau 13: Concentrations médianes minimales et maximales dans les chairs des Mollusques (en µg/g de ps).

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Bivalves	19,1-73,4	0,22-9,5	<0,1-0,67	0,37-34,2	0,55-11,4	8,7-1279	1,1-390	3,7-102	5,8-155
Gastéropodes	8,1-39,6	0,25-4,1	<0,1-0,35	0,76-4,5	3,4-22,0	56-269	0,44-31,6	0,46-11,7	5,8-45,6

Tableau 14 : Liste des espèces de poissons analysés suite aux deux campagnes conduites sur les quatre zones de pêche. (H : Herbivores ; C : Carnivores ; C(+P) : Carnivores et occasionnellement piscivores).

Famille	Espèce	Nom local	Zone pêche	Campagne	n	Classe Trophique
Acanthuridae	<i>Naso unicornis</i>	Daw a	2D	1	3	H
			4	1	2	
Carangidae	<i>Caranx papuensis</i>	Carangue à points noirs	2D	2	2	P
Haemulidae	<i>Diagramma pictum</i>	Loche castex	2C	2	2	C (+P)
Labridae	<i>Bodianus perditio</i>	"Perroquet" banane	2A	2	1	C
	<i>Cheilinus chlorourus</i>	Vieille tacheté	4	1	1	C
	<i>Choerodon graphicus</i>	Labre bariolé	2C	2	3	C
Lethrinidae	<i>Gymnocranius grandoculus</i>	Bossu blanc	3	2	3	C (+P)
	<i>Lethrinus atkinsoni</i>	Bossu doré	2C	1	5	C (+P)
			4	1	1	
			2C	2	2	
			2B	2	5	
			2D	2	3	
	<i>Lethrinus harak</i>	Bossu taché	2C	2	1	C (+P)
	<i>Lethrinus lentjan</i>	Bossu d'herbe	2B	2	8	C (+P)
			2D	2	4	
	<i>Lethrinus mahsena</i>	Bossu doré	2D	2	10	C (+P)
	<i>Lethrinus miniatus</i>	Gueule rouge	4	1	4	C (+P)
	<i>Lethrinus nebulosus</i>	Bec de cane	2C	1	5	C
			2C	2	6	
			3	2	2	
Lutjanidae	<i>Lutjanus adetii</i>	Rouget de nuit	3	2	8	P
	<i>Lutjanus vitta</i>	Jaunet	4	1	1	C (+P)
			3	1	6	
			2A	2	1	
			2B	2	1	
Mugilidae	<i>Moolgarda (Valamugil) seheli</i>	Mulet à queue bleue	4	1	3	H
Scaridae	<i>Chlorurus (Scarus) sordidus</i>	Perroquet	4	1	2	H
	<i>Scarus ghobban</i>	Perroquet	2E	1	3	H
			4	1	1	
			2D	2	3	
Serranidae	<i>Epinephelus aerolatus</i>	Loche aérolée	4	1	2	C (+P)
			3	1	4	
	<i>Epinephelus coioides</i>	Loche à tâches oranges	3	1	1	C (+P)
	<i>Epinephelus fasciatus</i>	Loche rouge du large	2B	2	1	C (+P)
			2C	2	1	
	<i>Epinephelus macrospilos</i>		4	1	1	C (+P)
	<i>Epinephelus merra</i>	Loche rayon de miel	2C	1	2	C + P
			2A	2	1	
	<i>Epinephelus polyphekadion</i>	Loche crasseuse	2C	2	2	C (+P)
	<i>Plectropomus leopardus</i>	Loche saumonée	4	1	3	P
Siganidae			3	2	5	
	<i>Siganus canaliculatus</i>	Picot gris	2D	2	2	H
	<i>Siganus lineatus</i>	Picot rayé	2D	1	3	H
			2B	2	7	
			3	2	4	

Ce qu'il faut retenir

La comparaison des concentrations médianes, minimales et maximales en métaux chez les poissons avec celles observées chez les mollusques indique que ces derniers, en particulier les bivalves, bioaccumulent davantage certains métaux comme Cd, Cu, Mn et Ni.

En outre, seuls les bivalves bioaccumulent plus fortement Cr, Fe et Zn que les poissons.

Pour le cobalt en revanche, les concentrations médianes restent dans les mêmes ordres de grandeurs pour les trois groupes étudiés. Les gammes de valeurs médianes sont également similaires entre les gastéropodes et les poissons pour As, Cr, Fe et Zn.

(3) Analyse du risque sanitaire initial

Une récente étude réalisée en Province Nord a montré que 98,7 % de la population interrogée consommait du poisson, selon une fréquence de $4,8 \pm 0,7$ repas par semaine. La quantité moyenne consommée a été estimée à 233 ± 16 g par repas, et la consommation annuelle à 28 ± 2 kg de poisson par personne (Labrosse *et al.*, 2006). Globalement, la moyenne annuelle s'établit autour de 20-30 kg/adulte/an. Ainsi, selon ces données, en Nouvelle Calédonie, la consommation hebdomadaire moyenne de poissons serait donc d'environ 538 g, avec une moyenne maximale de 1211 g pour un adulte.

En ce qui concerne les Invertébrés, seule une étude (Kronen *et al.*, 2009) incluant des données de consommation a été réalisée en Nouvelle Calédonie à notre connaissance. Au moment de nos travaux, la même année, ces résultats n'étaient pas connus et l'évaluation du risque associé à la consommation d'invertébrés n'a donc pas pu être réalisée. L'ensemble des données nécessaires étant actuellement disponible, l'évaluation des risques sera réalisée suite à la prochaine campagne de pêche, actuellement en cours. La consommation de Mollusques est susceptible d'être significativement inférieure à celle des poissons ; cette diminution supposée des apports métalliques hebdomadaires pourrait cependant être contrebalancée par l'existence de concentrations souvent supérieures dans les bivalves par rapport à celles mesurées dans les muscles des poissons (Tableau 12 et Tableau 13).

A partir de ces données de consommation et des concentrations mesurées dans les diverses espèces de poissons, les apports hebdomadaires minimaux et maximaux en métaux et en particulier, l'arsenic ont été calculés et comparés avec les doses d'ingestion hebdomadaire tolérable pour l'Homme (PTWI : Provisional Tolerable Weekly Intake) fournies par le JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee for Food Additives), et les valeurs seuil obtenues pour un adulte standard de 70 kg (Tableau 15).

Tableau 15 : Synthèse de l'évaluation du risque sanitaire chez une personne de 70 kg (*) lié à la consommation des poissons pêchés.

Elément		As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Conc mesurée (mg/g)	Min	0,001		<0,0001	<0,0001	0,00025	0,004	<0,03	<0,06	11,20
	Max	0,053	<0,00006	0,0011	0,0057	0,00300	0,211	3,30	1,35	49,70
Apport minimal pour 538 g/sem (mg)		0,65	<0,03	0,05	0,05	0,14	2,15	0,02	0,03	6,03
Apport maximal pour 1211 g/sem (mg)		63,58	<0,073	1,33	6,90	3,63	255	4,00	1,63	60,20
PTWI (mg/kg/sem)		-	0,007	-	-	3,5	5,6	-	0,035	7,00
Valeur-seuil * (mg/sem)		-	0,490	-	-	245	392	-	2,45	490
Bilan (apport vs. valeur seuil)	Min	-	<0,07	-	-	0,00	0,01	-	0,01	0,01
	Max	-	<0,15	-	-	0,01	0,65	-	0,67	0,12

Ce qu'il faut retenir

Ces résultats indiquent que ces apports naturels sont généralement très inférieurs aux doses maximales préconisées par le groupe d'experts de la FAO et de l'OMS (JECFA) pour 5 des 9 éléments métalliques analysés chez les poissons. Seuls les apports en Fe et en Ni montrent des écarts plus réduits avec la valeur-seuil. La surveillance régulière (annuelle de préférence) des concentrations en métaux dans les principales espèces consommées doit donc impérativement être réalisée afin de vérifier que les apports en métaux chez l'homme restent inférieurs aux doses d'ingestion tolérables fixées par le JECFA une fois les rejets industriels effectifs.

II.3.3. Conclusion

L'étude comparative des concentrations en As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn accumulées dans les tissus des deux espèces bioaccumulatrices (*Isognomon isognomon* et *Lobophora variegata*) révèle l'existence d'apports naturels en métaux biodisponibles en quantité parfois significative dans la zone d'impact potentiel du complexe minier.

Outre une variabilité géographique, une variabilité saisonnière semble se surajouter, mais cette dernière n'a cependant pas été évaluée.

Toutefois, il convient d'attirer l'attention sur le cas de la **station St 16** (Port de commerce). En effet, elle se caractérise par des concentrations en cuivre significativement plus fortes chez les deux espèces par rapport au reste du réseau de suivi. Ces fortes concentrations peuvent être attribuées à une contamination provenant des anti-fouling des coques de navires et/ou de certaines activités portuaires. Toutefois, cette hypothèse doit encore être considérée avec prudence tant que de nouvelles valeurs de bio-accumulation n'auront pas été acquises.

En ce qui concerne l'analyse des espèces consommables, cette étude a permis d'établir des niveaux de concentrations dans les chairs des principales espèces de poissons, de bivalves et de gastéropodes régulièrement pêchées dans la partie sud du Territoire.

Les résultats obtenus montrent que les muscles de poissons accumulent préférentiellement certains métaux tels que le zinc, le fer, l'arsenic, et dans une moindre mesure le cuivre. Les concentrations les plus basses sont en revanche observées avec le cadmium, le nickel et le cobalt.

L'existence d'une variabilité des concentrations entre les différentes espèces a été mise en évidence chez les mollusques pêchés sur des zones communes, les espèces montrant les valeurs médianes les plus élevées étant généralement des bivalves, à l'exception toutefois du cuivre. Cependant, une distinction entre l'ensemble des espèces de bivalves et l'ensemble des espèces de gastéropodes n'apparaît que pour l'arsenic, plus concentré chez les bivalves.

L'analyse comparative des concentrations médianes minimales et maximales entre les poissons et les invertébrés indique que ces derniers, en particulier les bivalves, sont capables d'accumuler plus fortement le cadmium, le cuivre, le manganèse et le nickel (ainsi que le chrome, le fer et le zinc pour les bivalves considérés seuls) que les poissons. Aucune différence marquée n'apparaît en revanche pour le cobalt entre les trois groupes.

La mise en évidence d'une certaine variabilité temporelle, potentiellement saisonnière, des concentrations entre les deux campagnes souligne l'importance d'une évaluation semestrielle des niveaux de concentration. Il est donc important de noter que cet état de référence n'a été réalisé que sur deux campagnes consécutives et ne fournit donc qu'une information partielle sur la réelle variabilité temporelle naturelle des concentrations. Les données présentées doivent donc être considérées comme des ordres de grandeurs des concentrations en métaux dans le milieu marin à l'état naturel, autour desquels celles-ci peuvent varier de manière également naturelle.

Enfin, l'évaluation des apports hebdomadaires en métaux consécutifs à une consommation de poissons révèle que ces apports naturels sont généralement très inférieurs aux doses maximales préconisées par le groupe d'experts de la FAO et de l'OMS (JECFA). La surveillance régulière (au minimum biannuelle) des concentrations en métaux dans les principales espèces consommées est donc recommandée.

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 nickel et le cobalt du minerai. Cette nouvelle technologie fait appel à un procédé de solubilisation par voie humide à l'aide d'une solution d'acide concentré. De ce fait, cette méthodologie (l'hydrométallurgie) requière de grands volumes d'eau qui, après traitement pour rabaisser les concentrations en impuretés contenues dans la solution, sont rejetés dans le milieu naturel. En Nouvelle Calédonie, le rejet a été projeté dans le Canal de la Havannah, milieu relativement profond, où les courants semblent suffisamment importants pour assurer la dispersion des effluents industriels.

Les domaines potentiellement impactés par le projet minier, 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 au 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.

Le domaine d'études pris en compte se compose de deux ensembles, le Canal de la Havannah et de la Baie du Prony. Eux-mêmes subdivisés en sous-ensembles, ils sont soumis à des influences terrigènes fortes, c'est à dire à l'apport de matériel dissous et particulaire issu des bassins versants sous l'action des précipitations atmosphériques ; la quantité de matériel particulaire étant notamment fonction de l'intensité des pluies et de l'état de stabilité des sols.

Ces deux principales unités physiographiques se distinguent très nettement l'une de l'autre par les compositions respectives de leurs eaux, habitats et dépôts sédimentaires : le Canal de la Havannah reçoit des quantités importantes de particules de nature latéritique apportées par la rivière Kwé. Toutefois, celles-ci sont rapidement diluées par des apports conséquents de nature carbonatée provenant de l'érosion des constructions récifales de la baie. A l'inverse, dans la Baie du Prony, les apports latéritiques sont directement déversés dans les rades par les différents creeks.

La dispersion de ces influences terrigènes est attribuable à l'hydrodynamisme comme principal moteur du mécanisme. Ainsi, les panaches sortant de la rivière Kwé sont transportés dans le canal de la Havannah et confinés le long d'une frange côtière de 1 à 2 miles de distance ; l'influence des eaux océaniques dominant très largement grâce à de forts courants laissant entrer dans le lagon l'eau du large pauvre en métaux dissous. A l'inverse, en Baie du Prony, l'absence de courants favorise la persistance des apports en matériel terrigène ; dans ces milieux, les concentrations en métaux (dissous et particulaires) sont nettement plus élevées que dans le Canal et dans les sédiments. Pour certains métaux, les quantités potentiellement remobilisables (donc disponibles pour les organismes benthiques) sont naturellement importantes : 55% du manganèse total et 25% du cobalt. Pour le nickel et le chrome, les proportions sont inférieures à 5%.

Les valeurs en matière de biodisponibilité des métaux obtenues avec les organismes transplantés, ne permettent pas encore de formuler d'hypothèses pertinentes sur les variations observées, tant d'un

point de vue spatial que temporel. Toutefois, les concentrations obtenues jusqu'à présent figurent dans la gamme des valeurs de bioaccumulation habituellement prises en considération pour le bivalve *Isognomon isognomon* (Tableau 16).

Tableau 16 : Exemple de gammes de concentrations mesurées dans les chairs des bivalves *Isognomon isognomon* transplantés.

METAUX en µg/g de ps	Influence terrigène		Influence anthropique
	Faible	Forte	
Arsenic	37 - 47	49 - 57	-
Cobalt	0,2 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 0,6
Chrome	1,0 – 1,5	1,9 – 2,6	2,5 – 3,0
Cuivre	-	5 - 14	10 – 18
Fer	105 - 190	140 - 190	220 - 255
Manganèse	10 - 18	18 - 23	12 – 44
Nickel	2 - 3	2 - 4	6 - 11
Zinc	530 - 1000	530 - 1000	1200 - 1850

Pour les poissons et mollusques pêchés dans le cadre du suivi sanitaire, la comparaison des concentrations médianes minimales et maximales montre que ces derniers, en particulier les bivalves, possèdent de fortes capacités de bioaccumulation de Cd, Cu, Mn et Ni. Toutefois, ces résultats traduisent que les apports naturels sont généralement très inférieurs aux doses maximales préconisées par la FAO et l'OMS (JECFA), même si les apports en Fe et en Ni montrent des écarts plus réduits avec les valeurs-seuil préconisées ; la surveillance régulière (annuelle de préférence) des concentrations en métaux dans les principales espèces consommées est donc recommandée.

Si la charge naturelle en métaux et métalloïdes ne semble pas globalement devoir être considérée comme problématique, une surveillance des effets potentiels sur les écosystèmes, pour le Co, Cr(VI) et le Mn, s'avère quand même souhaitable.

Quoi qu'il en soit, la résultante des courants de marées est toujours orientée du nord-est vers le sud-ouest et les différents mécanismes hydrodynamiques génèrent une « *frontière hydrodynamique* » qui isole la réserve Merlet du reste du Canal de la Havannah.

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.
- Ankley, G. T., D. M. Di Toro, et al. (1996). "Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals." *Environmental Toxicology and Chemistry* 15(12): 2056-2066.
- ASTM, 2002. E2122-02 : Standard Guide for conducting *in-situ* field bioassays with caged bivalves. *American Society for Testing and Material – International*, West Conshohocken, PA, United States, 30p.
- Baltzer, F., Trescases, J.J. 1971. Erosion, transport et sédimentation liés aux cyclones tropicaux dans les massifs d'ultrabasites de Nouvelle-Calédonie. *Cahiers ORSTOM Série Géologie III* (2), 221-244.
- 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", 169p.
- Binet D., Le Borgne R., 1996. La station côtière de Nouméa dix ans d'observations sur l'hydrologie et le pelagos du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *Archives Sciences de la Mer Biologie Marine* n°2, Editions IRD, Nouméa, 37p.
- Breau L, Amiard J-C, Radenac G, 2005. Bioessais et biomarqueurs. Fiche 3, rapport final, Convention IRD/Goro-Nickel n°9104, 15p
- BREAU L., 2003. Etude de la bioaccumulation des métaux dans quelques espèces marines tropicales : Recherche de bioindicateurs de contamination et application à la surveillance de l'environnement côtier dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. *Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle*, Spécialité « Océanologie Biologique et Environnement Marin », La Rochelle, France, 318p. + Annexes.
- Campbell, P. G. C. (1995). Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model. Metal speciation and bioavailability in aquatic systems. D. R. Turner.
- Chevillon C., 2005. Caractérisation des types de fonds et habitats benthiques par système de discrimination acoustique dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. *ZoNéCo, Programme d'évaluation des ressources marines de la zone économique de Nouvelle-Calédonie. Rapport final*, 68p.
- Coquery M, Magaud H., Bonnomet V., Le Goff F., Monbet P., 2004. Analyse critique des méthodologies pour la détermination et l'application de normes de qualité environnementales pour les métaux. Rapport de synthèse, Convention DE n° CV03000081 –Opération n°2. DRC-03-46822-HMa/JL-03.0681, 27p.
- Crommentuijn, T., M. Polder, et al. (2000). "Evaluation of the Dutch environmental risk limits for metals by application of the added risk approach." *Environmental Toxicology and Chemistry* 19(6): 1692-1701.
- 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, 97–111.
- Derex P et Douillet P, 2008a. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle hydrodynamique, Atlas des courants. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 83p.
- Derex P, Douillet P, Le Gendre R, 2008a. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle hydrodynamique, description de MARS-3D. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 56p.
- Douillet P et Le Gendre R, 2008. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle hydrodynamique, notice technique – validation. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 54p.
- Dugas, F., Debenay, J.P. 1982. Carte sédimentologique et carte annexe du lagon de Nouvelle Calédonie au 1/50000 – Noumea, Mont Dore, La Tontouta, Prony. Notices explicatives n° 76, 86, 91 et 95. ORSTOM, Paris.
- 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.
- Fichez R, Moreton Benjamin, Pringault O et Viret H, 2005a. Caractéristiques physico-chimiques des eaux. Fiche 1, Rapport final, Convention IRD/Goro-Nickel n°9104, 56p.
- Fichez R, Adjerooud M, Bozec YM, Breau L, Chancerelle Y, Chevillon C, Douillet P, Fernandez JM, Frouin P, Kulbicki M, Moreton B, Ouillon S, Payri C, Perez T, Sasal P, Thébaud J (2005). A review of selected indicators of particle, nutrient and metals inputs in coral reef lagoon systems, *Aquatic Living Resources*, 18: 125-147.

- 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.
- Huetz de Lempis A, Legand M, Sautter G, Dubois H., 1981. Atlas de la Nouvelle-Calédonie et dépendances. Paris, ORSTOM
- IFREMER, 1995. RNO : Surveillance du milieu marin Ed IFREMER.
- IFREMER, 2005. RNO : Surveillance du milieu marin Ed IFREMER.
- INERIS, 2002. Analyse critique du dossier de demande d'autorisation du Projet Goro Nickel. *H. Baroudi, J. Bureau, J.P. Pineau, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*, INERIS-DRC-02-39575/DESP-R04a, Août 2002, 29p.
- INERIS, 2003. Analyse critique de l'acceptabilité du niveau de rejet de manganèse dans le milieu marin – Rapport Final, Goro Nickel. *H. Baroudi, J. Bureau, C. Rollin, Institut de l'Environnement Industriel et des Risques – Direction des Risques Chroniques*, INERIS-DRC-03-53097/DESP-R02, 17 décembre 2003, 37 p. + Annexes.
- INERIS, 2004. Projet Goro-Nickel. Rapport de synthèse sur l'impact du rejet en mer de l'effluent. 47910-000-30R-GEH-40002, 39p.
- JACQUET S., 2005. Impact des apports en nutriments sur le réseau trophique planctonique du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Spécialité « Océanologie Biologique et Environnement Marin »*, Paris, France, 226 p. + Annexes.
- Kerbrat AS et Kumar-Roiné S, 2013. Risque ciguatérique dans la région Sud de la Nouvelle-Calédonie : compilation des "données historiques", analyse et tendances pour la période 2005-2012. Rapport AEL réalisé pour l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL), contrat AEL/OEIL, 111115-OE-04, 52p.
- Le Goff, F. and V. Bonnomet, 2003. Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM. DRC-03-46822-FLG/JL/03.0693. Verneuil en Halatte (France), INERIS: 80p.
- Lepper, P., 2002. Towards the derivation of quality standards for priority substances in the context of the water framework directive. Final report of the study contract n° B4-3040/2000/30637/MAR/E1: Identification of quality standards for priority substances in the field of water policy, Fraunhofer-Institute Molecular Biology and Applied Ecology.
- Mayer LM, Fink LK, 1979. Granulometric control of chromium accumulation in estuarine sediments in Maine. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11, pp 491–503.
- Moreton BM, Fernandez JM, Dolbecq MBD, 2009 - Development of a field preconcentration/elution unit for routine determination of dissolved metal concentrations by ICP-OES in marine waters: Application for monitoring of the New Caledonia lagoon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol.33, N°2, pp205-218.
- Newman, M. C. and C. H. Jagoe, 1994. Ligands and the bioavailability of metals in aquatic environments. Bioavailability: physical, chemical and biological interactions. W. H. Benson. Boca Raton, USA, Lewis Publishers.
- Partensky F. et al., 1996. Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical NE Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research*, 43: 1191-1213.
- 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.
- Richer de Forges B., Bargibant G., Menou J.L., Garrigue C., 1987. Le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie : observations préalables à la cartographie bionomique des fonds meubles. *Rapports Scientifiques et Techniques « Sciences de la mer, Biologie marine »*, Vol. 45, ORSTOM Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 72 p. + Annexes.
- Struijs J., Van de Meent D., 1997. "Added risk approach to derive maximum permissible concentrations for heavy metals: how to take natural background levels into account." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 37 : 112-118.
- Tessier A., Campbell P. G. C. et Bisson M., 1979. "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals." *Analytical Chemistry* 51(7) : 844-851.

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 : ETAT 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 (JUN 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 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES 18 STATIONS DE PRELEVEMENTS DANS LA COLONNE D'EAU ET DANS LA COUVERTURE SEDIMENTAIRE (ICPE 2004). LE SUIVI ENVIRONNEMENTAL EST BASE, LUI, SUR 14 STATIONS DECRITES SUR L'ARRETE ICPE 2008 (CF : IMPACT POTENTIEL DE VALE-NC : SUIVI MILIEU MARIN 2009-2013 : VOLUME 3/3). LE TRAIT BISTRE REPRESENTA LA POSITION DU DIFFUSEUR.	18
FIGURE 9 : CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DE LA GRANDE TERRE. REPARTITION DES PERIDOTITES (VERT FONCE).	21
FIGURE 10 : PROFIL D'ALTERATION DE LA SEQUENCE GEOLOGIQUE NICKELIFERE (D'APRES B.PELLETIER/SLN).	21
FIGURE 11 : CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS : EXEMPLE DE NI DANS LES EAUX DES LAGONS SUD ET SUD-OUEST DE NOUVELLE-CALÉDONIE (MORETON ET AL., 2009).	22
FIGURE 12 : CONCENTRATION TYPE EN CHLOROPHYLLE A DANS LA COLONNE D'EAU ; ECHANTILLONS DE SURFACE (+3 M), MI-PROFONDEUR ET FOND (-3 M) COLLECTES EN SAISON FRAICHE (AOUT 2008).	28
FIGURE 13 : EVOLUTION SPATIALE DES CONCENTRATIONS EN NI DISSOUS EN FONCTION DE L'ÉLOIGNEMENT A LA COTE. MISE EN EVIDENCE DE L'INFLUENCE DES APPORTS DE LA RIVIERE KWE (St06) ET DU CREEK DE RADE NORD (St15) LORS DE LA CAMPAGNE EN SAISON HUMIDE (MARS 2009).	30
FIGURE 14 : SAISON HUMIDE : CONCENTRATION EN NI DISSOUS EN SURFACE (-3M), MI-PROFONDEUR ET FOND (+3M). CAMPAGNE DE MARS 2009.	31
FIGURE 15 : SAISON SECHE : CONCENTRATION EN NI DISSOUS EN SURFACE (-3M), MI-PROFONDEUR ET FOND (+3M). CAMPAGNE D'AOUT 2009.	31
FIGURE 16 : SAISON HUMIDE : CONCENTRATION EN MN DISSOUS EN SURFACE (-3M), MI-PROFONDEUR ET FOND (+3M). CAMPAGNE DE MARS 2009.	32
FIGURE 17 : SAISON SECHE : CONCENTRATION EN MN DISSOUS EN SURFACE (-3M), MI-PROFONDEUR ET FOND (+3M). CAMPAGNE D'AOUT 2009.	32
FIGURE 18 : PIEGES A SEDIMENTS SEQUENTIELS ET DISPOSITIF DE COLLECTE AUTOMATISE POUR L'ETUDE TEMPORELLE DES FLUX DE PARTICULES.	34
FIGURE 19 : CARTE DE LOCALISATION DES STATIONS DE CAROTTAGE DES SEDIMENTS ET DE MOUILLAGE DES PIEGES A SEDIMENT (EN ROUGE : St15 ET St06) POUR LES BAIES DU PRONY ET DE LA KWE. EN VERT, SONT REPRESENTES LES 5 SITES DE MOUILLAGE DES PIEGES A SEDIMENTS POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH (T4B, T4C, T4M, T4L ET T5B). LE TRAIT BISTRE REPRESENTA LE DIFFUSEUR.	34
FIGURE 20 : EVOLUTION DES FLUX PARTICULAIRES POUR LES SAISONS SECHE (OCTOBRE 2006) ET HUMIDE (MARS 2007) AU DROIT DES EMBOUCHURES DU CREEK DE LA RADE DU NORD ET DE LA RIVIERE KWE.	35
FIGURE 21 : EVOLUTION DES FLUX PARTICULAIRES POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH, LE LONG D'UN TRANSECT ORIENTE N-S LONGEANT LA POSITION DU DIFFUSEUR. MESURES EFFECTUEES POUR LA SAISON HUMIDE (DECEMBRE 2007-JANVIER 2008, A GAUCHE ET CENTREE SUR AVRIL 2008 A DROITE). T4C EST POSITIONNEE A L'EXTREMITÉ NORD DU DIFFUSEUR, T4M EST LA STATION MEDIANE ET T4L CORRESPOND A L'EXTREMITÉ SUD DU DIFFUSEUR.	37
FIGURE 22 : SCHEMA SYNTHETIQUE DES FLUX DE PARTICULES ET DES FACTEURS D'INFLUENCE (QUANTITE DE PRECIPITATION, VITESSE ET DIRECTION DU VENT) AU DROIT DES EMBOUCHURES DU CREEK DE LA RADE DU NORD ET LA KWE.	38
FIGURE 23 : REPRESENTATION DE LA NATURE DES FONDs SEDIMENTAIRES ET REPARTITION DES HABITATS DANS LA BAIE DU PRONY.	41
FIGURE 24 : CARTE INTERPOLEE REPRESENTANT LE TYPE DE FOND OU D'HABITAT DU CANAL DE LA HAVANNAH.	41
FIGURE 25 : CARTE DE POSITIONNEMENT DES STATIONS DE PRELEVEMENT (ETOILES) ET DE DISTRIBUTION DES PELITES (PARTICULES <40µm) DANS LES SEDIMENTS SUPERFICIELS EN RADE NORD ET NORD-EST, BAIE DU PRONY. RESULTATS EXPRIMES EN (%) DE LA MASSE TOTALE DE SEDIMENT BRUT.	42
FIGURE 26 : CARTE DE POSITIONNEMENT DES STATIONS DE PRELEVEMENT (ETOILES) ET DE DISTRIBUTION DES FRACTIONS PELITIQUES. COMPOSITION EN CARBONATES EXPRIMEE EN (%) DE LA MASSE TOTALE DU SEDIMENT BRUT.	43

FIGURE 27 : DISTRIBUTION SPATIALE DES CONCENTRATIONS EN NI TOTAL DANS LES FRACTIONS PELITIQUES DES SEDIMENTS DE LA BAIE DU PRONY.....	44
FIGURE 28 : DISTRIBUTION SPATIALE DES CONCENTRATIONS EN CR TOTAL DANS LES FRACTIONS PELITIQUES DES SEDIMENTS DE LA BAIE DU PRONY.....	44
FIGURE 29 : CARTE DE DISTRIBUTION DES PELITES (PARTICULES <40µm) DANS LES SEDIMENTS SUPERFICIELS EN BAIE KWE ET AUX ABORDS DU CANAL DE LA HAVANNAH. RESULTATS EXPRIMES EN (%) DE LA MASSE TOTALE DE SEDIMENT BRUT.	45
FIGURE 30 : CAROTTES EXTRAITES DE LA BAIE DU PRONY POUR L'ETUDE DE LA GEOCHRONOLOGIE ET LE CALCUL DES TAUX DE SEDIMENTATION.	46
FIGURE 31 : PROFILS DE DENSITES SECHE ET HUMIDE, POURCENTAGE EN FRACTION PELITIQUE ET RADIOACTIVITE DU « ²¹⁰ Pb EN EXCES » DANS LES SEDIMENTS DE LA CAROTTE DE LA STATION St15 (RADE DU NORD).	46
FIGURE 32 : PROFILS DE DENSITES SECHE ET HUMIDE, POURCENTAGE EN FRACTION PELITIQUE ET RADIOACTIVITE DU « ²¹⁰ Pb EN EXCES » DANS LES SEDIMENTS DE LA CAROTTE KW-1 DE LA STATION St06 (BAIE KWE).	47
FIGURE 33 : HISTOGRAMME CUMULE DES COMPOSITIONS MOYENNES DES FRACTIONS PELITIQUES POUR LES PRINCIPAUX METAUX DU CORTEGE LATERITIQUE POUR CHACUNE DES 4 PHASES GEOCHIMIQUES, TOUTES STATIONS CONFONDUES.	50
FIGURE 34 : CARTE DE LA STRUCTURE HORIZONTALE DES MASSES D'EAUX DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ET LA BAIE DU PRONY : DELIMITATION DES AIRES D'INFLUENCES TERRIGENES (LIGNES VERTES POUR LES INFLUENCES DUES A L'ILE OUEEN, AUX CREEKS DE LA BAIE DU PRONY ET A L'ENSEMBLE PORT BOISE-PORT DE GORO) ET DES AIRES OCEANIQUES (LIGNE JAUNE). LE TRAIT ORANGE DELIMITE APPROXIMATIVEMENT LA ZONE DE MELANGE DES EAUX LAGONAIRES ET OCEANIQUES.	52
FIGURE 35 : CARTE BATHYMETRIQUE FINALE ET INTERPOLEE DE LA ZONE D'ETUDE.	54
FIGURE 36 : RESEAU DES 5 STATIONS METEOROLOGIQUES DE VALIDATION (A). EXEMPLE DE LA STATION DE IORO : DIRECTION DU VENT A 10 M, ANNEE 2007 (B).	55
FIGURE 37 : CARTE DE LOCALISATION DES MAREGRAPHES UTILISES (POINTS ROUGES) POUR LA CALIBRATION/VALIDATION DU MODELE.	56
FIGURE 38 : CARTE DES EMPLACEMENTS DES MOUILLAGES DES COURANTOMETRES ADCP UTILISES POUR LA CALIBRATION/VALIDATION DU MODELE.	56
FIGURE 39 : ÉLEVATIONS COMPAREES DE LA SURFACE LIBRE ENTRE LES CALCULS DE MARS-3D ET LES DONNEES FOURNIES PAR LE SHOM POUR LA STATION DU RECIF U (ILE OUEEN).	57
FIGURE 40 : INTER-COMPARAISON DES COURANTS INSTANTANES MESURES ET CALCULES PAR LE MODELE A PROXIMITE DU DIFFUSEUR (STATION T4C) EN SURFACE (GAUCHE) ET AU FOND (DROITE). A TITRE D'EXEMPLE SEULE EST REPRESENTEE ICI LA COMPOSANTE MERIDIONALE (AXE NORD-SUD).	58
FIGURE 41 : EXEMPLE DE SUIVI DE TRAJECTOIRES OBSERVEES A PARTIR DE BOUEES DERIVANTES (TRAIT ROUGE) ET CALCULEES PAR LE MODELE (TRAIT BLEU). LA FLECHE BLEUE SOMBRE INDIQUE LE POINT DE LARGAGE DES BOUEES DERIVANTES (ROUGE). EN JAUNE SONT REPRESENTEES LES AIRES RECIFALES.	59
FIGURE 42 : COURANT PAR MAREE DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET DE VIVE-EAU (DROITE) A MAREE HAUTE + 3 HEURES (COURANTS AU FOND).	63
FIGURE 43 : POURCENTAGE DU TEMPS DURANT UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET VIVE-EAU (DROITE) OU LE COURANT EST INFÉRIEUR A 0,1 m/s (0,2 NŒUDS) (COURANT AU FOND). LE TRAIT NOIR SYMBOLISE LE DIFFUSEUR.	64
FIGURE 44 : POURCENTAGE DU TEMPS DURANT UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET VIVE-EAU (DROITE) OU LE COURANT EST INFÉRIEUR A 0,3 m/s (0,6 NŒUDS) (COURANT AU FOND). LE TRAIT NOIR SYMBOLISE LE DIFFUSEUR.	65
FIGURE 45 : COURANT PAR MAREE DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET VIVE-EAU (DROITE) + ALIZE DE 8 m/s A MAREE HAUTE + 3 HEURES (COURANT AU FOND).	66
FIGURE 46 : POURCENTAGE DU TEMPS DURANT UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET VIVE-EAU (DROITE) + ALIZE DE 8 m/s OU LE COURANT EST INFÉRIEUR A 0,1 m/s (0,2 NŒUDS) (COURANT AU FOND). LE TRAIT NOIR SYMBOLISE LE DIFFUSEUR.	67
FIGURE 47 : POURCENTAGE DU TEMPS DURANT UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET VIVE-EAU (DROITE) + ALIZE DE S-SE DE 8 m/s OU LE COURANT EST INFÉRIEUR A 0,3 m/s (0,2 NŒUDS) (COURANT AU FOND). LE TRAIT NOIR SYMBOLISE LE DIFFUSEUR.	68
FIGURE 48 : POURCENTAGE DU TEMPS DURANT UN CYCLE LUNAIRE DE MAREE (SOIT 28 JOURS) OU LE COURANT PRES DU FOND EST INFÉRIEUR A 0,05 cm/s (0,1 NŒUD).	70
FIGURE 49 : FORMATION DE DEUX GYRES (TOURBILLONS), L'UN ANTICYCLONIQUE AU NORD-OUEST D'UNE LIGNE MEDIANE (FLECHE JAUNE) ET L'AUTRE CYCLONIQUE AU SUD-EST. LE DIFFUSEUR EST REPRESENTÉ PAR LE TRAIT ROUGE.	71
FIGURE 50 : PHOTOGRAPHIES DES ESPECES BIOACCUMULATRICES SELECTIONNEES : LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> ET L'ALGUE BRUNE <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i>	72
FIGURE 51 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES 8 STATIONS DE BIOSURVEILLANCE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIOACCUMULATRICES. LA STATION St31 FIGURE DANS LES SUIVIS SEULEMENT A PARTIR DE 2010 ET REMPLACE LA STATION St05.	73
FIGURE 52 : TAUX MOYENS DE CROISSANCE JOURNALIERE D' <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> (EN %, ± INTERVALLE DE CONFIANCE A 95 %) (GAUCHE : POIDS FRAIS TOTAL ; DROITE : LONGUEUR COQUILLE).	74
FIGURE 53 : VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE ET INTER-STATIONS DES CONCENTRATIONS EN METAUX (µg/g POIDS SEC DE CHAIR) CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTE. LE SUIVI A LA STATION St31 N'A ETE INITIALISE QU'A PARTIR DE 2010 ET NE FIGURE DONC PAS DANS CETTE ETUDE.	77

FIGURE 54 : VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE ET INTERSTATIONS DES CONCENTRATIONS EN METAUX ($\mu\text{g/g}$ POIDS SEC DE FRONDE) CHEZ LA MACROALGUE BRUNE <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> TRANSPLANTEE.	78
FIGURE 55 : CARTE DES DIFFERENTES ZONES DE PECHE DEFINIES DANS LE LAGON SUD.	80

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DES 18 STATIONS DE PRELEVEMENTS DANS LA COLONNE D'EAU ET DANS LA COUVERTURE SEDIMENTAIRE (ICPE 2004). POUR UNE MEME STATION, LES COORDONNEES DIFFERENT LEGEREMENT D'UN TYPE DE PRELEVEMENT A L'AUTRE EN CAS D'ABSENCE DE SEDIMENTS MEUBLES A LA VERTICALE DE LA « STATION EAU ».	18
TABLEAU 2 : TENEURS MOYENNES DES SEDIMENTS FINS (< 63 MICRONS) EN METAUX TOTAUX (µG/G) DANS LES EMBOUCHURES DE DIFFERENTES RIVIERES DU SUD DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE (FERNANDEZ ET AL., 2006). COMPARAISON AVEC LES TENEURS MESUREES AUX EMBOUCHURES DE QUELQUES FLEUVES METROPOLITAINS.	22
TABLEAU 3 : CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS (COBALT, FER, MANGANESE ET NICKEL) EXPRIMEES EN MICRO-G/L POUR DIFFERENTS SITES DES LAGONS SUD ET SUD-OUEST DE NOUVELLE-CALÉDONIE. (N = NB DE STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE ; R = NB DE REPLICAS POUR UNE MEME STATION : <QL = INFÉRIEUR A LA LIMITE DE QUANTIFICATION), D'APRES MORETON ET FERNANDEZ (2009).	22
TABLEAU 4 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DE LA TEMPERATURE (°C), SALINITE (‰) ET TURBIDITE (NTU) DES EAUX DE SURFACE POUR LA BAIE DU PRONY (ST16) ET LE CANAL DE LA HAVANNAH (ST09), POUR L'ANNEE 2004 (FICHEZ ET AL., 2005).	24
TABLEAU 5 : CONCENTRATIONS MOYENNES ET ECART-TYPES EN SELS NUTRITIFS ET COMPOSES ORGANIQUES DISSOUS ET PARTICULAIRES ANALYSES DANS LES EAUX DU LAGON SUD DE NOUVELLE CALÉDONIE. VALEURS RETENUES POUR LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE PHYSICOCHIMIQUES DE LA COLONNE D'EAU.	27
TABLEAU 6 : VALEURS MOYENNES ET DOMAINES DE VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS, TOUTES CAMPAGNES (SAISON SECHE ET SAISON FRAICHE) ET NIVEAUX (SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND) CONFONDUS MESUREES POUR LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE.	30
TABLEAU 7 : FLUX DE PARTICULES MESURES POUR TOUTE LA COLONNE D'EAU ET VALEURS MOYENNES ET EXTREMES CALCULEES AU DROIT DES CREEK DE LA RADE DU NORD (ST15) ET DE LA RIVIERE KWE (ST06).	34
TABLEAU 8 : COMPOSITION TYPE DES PARTICULES COLLECTEES DANS LES PIEGES A SEDIMENT PLACES AU DROIT DES EMBOUCHURES DU CREEK DE LA RADE DU NORD, DE LA RIVIERE KWE ET DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH. ANALYSE D'UN ECHANTILLON COMPOSITE DE 12 GODETS, EXPRIMEE EN MG/KG DE MES, POUR CHACUNE DES UNITES ETUDIEES ET INCERTITUDE ASSOCIEE SUR LA MESURE (%).	36
TABLEAU 9 : FLUX DE PARTICULES MESURES ET VALEURS MOYENNES ET EXTREMES CALCULEES POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH, LE LONG D'UN AXE MEDIAN ORIENTE NE-SW. CALCULS EFFECTUES POUR LA SAISON HUMIDE (AVRIL 2008).	36
TABLEAU 10 : FLUX DE PARTICULES MESURES ET VALEURS MOYENNES CALCULEES POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH, LE LONG D'UN TRANSECT ORIENTE N-S LONGEANT LA POSITION DU DIFFUSEUR. MESURES EFFECTUEES EN SAISON SECHE (NOVEMBRE 2007) ET HUMIDE (AVRIL 2008). T4C EST POSITIONNEE A L'EXTREMITÉ NORD DU DIFFUSEUR, T4M EST LA STATION MEDIANE ET T4L CORRESPOND A L'EXTREMITÉ SUD DU DIFFUSEUR, NON OPERATIONNEL AU MOMENT DES MESURES.	37
TABLEAU 11 : COMPOSITIONS MOYENNES ET ECART-TYPES DES FRACTIONS PELITIQUES DES SEDIMENTS POUR LES PRINCIPAUX METAUX DU CORTEGE LATERITIQUE EXTRAITS SELON LE PROTOCOLE DE DIGESTION SEQUENTIELLE. RESULTATS CONCERNANT L'ENSEMBLE DE LA ZONE ETUDIEE.	49
TABLEAU 12 : CONCENTRATIONS MINIMALES ET MAXIMALES DANS LES MUSCLES DES POISSONS ANALYSES (EN µG DE METAL/G DE POIDS SEC DE CHAIR), TOUTES ESPECES ET TOUTES ZONES CONFONDUES.	81
TABLEAU 13 : CONCENTRATIONS MEDIANES MINIMALES ET MAXIMALES DANS LES CHAIRS DES MOLLUSQUES (EN µG/G DE PS).	81
TABLEAU 14 : LISTE DES ESPECES DE POISSONS ANALYSES SUITE AUX DEUX CAMPAGNES CONDUITES SUR LES QUATRE ZONES DE PECHE. (H : HERBIVORES ; C : CARNIVORES ; C(+P) : CARNIVORES ET OCCASIONNELLEMENT PISCIVORES).	82
TABLEAU 15 : SYNTHESE DE L'EVALUATION DU RISQUE SANITAIRE CHEZ UNE PERSONNE DE 70 KG (*) LIE A LA CONSOMMATION DES POISSONS PECHEES.	84
TABLEAU 16 : EXEMPLE DE GAMMES DE CONCENTRATIONS MESUREES DANS LES CHAIRS DES BIVALVES <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTES.	87