



**SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DES
PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, LA
BAIE KWE ET LA RADE NORD DE PRONY: MISSIONS
JANVIER-MARS ET AVRIL-JUIN 2014**



3 septembre 2014

Photos de couverture AEL : Observation au microscope d'échantillons de MES récolté dans le Canal de la Havannah (à gauche) et en Rade Nord (à droite).

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

Convention n° 3052-2013

Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la rade nord de prony: missions janvier-mars et avril-juin 2014

Achard Romain

Fernandez Jean Michel

Benjamin Moreton

Haddad Laurent

	N/Ref	V/Ref	
Identification	121205-VI-18	Contrat C3052 / PO E55912/0001	
Titre complet	Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la rade nord de prony: missions janvier-mars et avril-juin 2014		
Auteurs	Achard R, Fernandez JM, Moreton B, et L.Haddad		
Résumé	<p>Le programme de travail présenté fait suite à la définition de « l'Etat de référence » des densités de flux verticaux de particules déterminés pour le Canal de la Havannah, la Rade Nord et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230) et aux suivis de ces flux pour la période 2011-2013. Ce programme constitue la première campagne de suivi semestriel de 2013-2015. L'étude consiste au suivi temporel des densités de flux verticaux afin d'estimer les apports métalliques véhiculés par les particules fines au niveau de la Kwé, du diffuseur marin et de la Rade Nord. A cet effet, trois mouillages de lignes équipées de pièges à sédiments séquentiels ont été réalisés.</p> <p>Les principaux résultats montrent qu'en saison chaude comme en saison fraîche, la distribution des MES dans les eaux, en Baie Kwé, en Rade Nord et dans le Canal de la Havannah, est grandement régie par les conditions météorologiques, notamment les régimes de vents qui conditionnent le panache d'apport terrigène en Rade Nord et l'action mécanique de la houle en Baie Kwé ainsi que dans le Canal Havannah.</p> <p>Les paramètres physico-chimiques et géochimiques analysés montrent des évolutions temporelles pour les trois stations étudiées. Pour la Baie Kwé et le Canal Havannah, les valeurs de flux de MES et de métaux présentent des différences significatives par rapport aux campagnes précédentes de 2013 : en les flux massiques sont en augmentation alors que les flux métalliques sont en baisse significative, si bien que ces derniers se retrouvent sous les niveaux enregistrés en 2011. Pour la Baie Kwé, les informations relatives au bassin versant permettraient d'affiner les interprétations des résultats observés. Pour le Canal Havannah, les densités de flux métalliques deviennent légèrement inférieures à celles définies par l'état de référence, en lien possible avec la baisse des concentrations enregistrée en Baie Kwé. De plus, pour le Canal de la Havannah, les données relatives à l'effluent pourraient aider l'interprétation, les concentrations en soufre dans les MES étant mesurée en hausse. Concernant la Rade Nord, les flux de MES et les flux métalliques associés sont en forte hausse par rapport à l'état de référence de 2007.</p>		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Achard R.		25/08/2014
Vérificateur 1	Fernandez J-M.		28/08/2014
Vérificateur 2	Pousse Céline		29/08/2014
Approbateur(s)	Fernandez J-M.		01/09/2014
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V1.0	Rapport initial		01/09/2014
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Casalis C.	Département environnement Vale-NC		

Ce rapport est cité comme suit :

Achard R, Fernandez JM, Moreton B. et Haddad L., 2014. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah, la Rade Nord et la Baie Kwé : mission de janvier-mars et avril-juin 2014. Contrat Vale-NC/AEL n° 3052-2013, Rapport AEL 121205-VI-18, 70p.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	7
2	OBJECTIFS.....	8
3	METHODOLOGIE	9
3.1	SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES	9
3.2	ECHANTILLONNAGE	11
3.3	PARAMETRES PHYSIQUES, GEOCHIMIQUES ET ANALYSES	11
4	RESULTATS	12
4.1	PARAMETRES METEOROLOGIQUES	12
4.1.1	Précipitations atmosphériques (station « Usine-pilote Vale-NC »)	12
4.1.2	Direction du vent (station récif « loro»).....	13
4.1.3	Vitesse du vent (station du récif « loro»).....	13
4.2	CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION	16
4.2.1	Baie Kwé (station St06-KW1).....	16
4.2.2	Canal de la Havannah (station St60-NE).....	19
4.2.3	Rade Nord de Prony (station St15).....	21
4.3	COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION	24
4.3.1	Baie Kwé (station St06-KW1).....	25
4.3.2	Canal de la Havannah (station St60-NE).....	27
4.3.3	Rade Nord (station St15).....	30
5	INTERPRETATION	33
5.1	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES.....	33
5.1.1	Baie Kwé (Figure 19).....	33
5.1.2	Canal de la Havannah (Figure 20).....	34
5.1.3	Rade Nord (Figure 21)	34
5.2	CALCUL DES FLUX DE MATIERES	38
6	CONCLUSION	43
	REFERENCES	45
	LISTE DES FIGURES	46
	LISTE DES TABLEAUX	48
	LISTE DES ANNEXES	50

1 INTRODUCTION

Le travail, présenté ici, a été défini en accord avec la Convention pour la Conservation de la Biodiversité (CCB, 2009) passée entre Vale-NC et la Province Sud.

Cette étude fait suite, d'une part à la définition de « l'Etat de référence » des densités de flux verticaux de particules, déterminées pour le Canal de la Havannah et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230), et d'autre part, elle assure la continuité du suivi en matière de flux de particules de la période 2011-2013.

Si les effets de l'hyper-sédimentation sont mesurables à moyen et long termes par le calcul des taux d'accumulation (géochronologie à l'échelle pluriannuelle), pour des laps de temps plus courts, les apports sédimentaires sont quantifiables grâce à la mesure de la densité de flux vertical des particules à des échelles qui peuvent être journalière, hebdomadaire ou encore mensuelle. Cette mesure constitue un indicateur précoce de la sédimentation.

Les conséquences de l'augmentation des flux particulaires sont la réduction de la lumière, de l'oxygène dissous et notamment l'augmentation de la pollution par les éléments métalliques associés aux particules. En effet, les particules sont reconnues comme étant le principal vecteur des polluants dans la contamination des organismes pélagiques, dont les poissons qui sont, en bout de chaîne, consommés par l'homme.

Dans le contexte de la mise en exploitation de l'usine de Vale-NC, l'étude consiste à estimer les apports en particules fines :

- D'une part, générées consécutivement aux différents travaux d'excavation et de mise en exploitation progressive de la mine (baie Kwé et rade Nord) ;
- D'autre part, persistantes dans les effluents industriels traités et rejetés dans le Canal de la Havannah via le diffuseur.

2 OBJECTIFS

Dans chacune des trois zones d'étude, que sont la baie Kwé, la Rade Nord de la Baie du Prony et le Canal de la Havannah, ont été effectués:

- Le suivi temporel des apports terrigènes issus des bassins versants de la Baie Kwé, dans un secteur de relative profondeur ($h > 15\text{m}$). Pour effectuer ce suivi, il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage des grosses particules sur le fond, il n'est donc pris en compte dans les pièges que les fractions fines en suspension potentiellement transportables sur de longues distances par les courants, comme le suggère la modélisation (Convention IRD/Goro-Ni n° n°1124, Volet « Simulation hydrodynamique »);
- Le suivi temporel des apports terrigènes et anthropiques, consécutifs à l'implantation de l'usine de valorisation du minerai, dans la Rade Nord de la Baie du Prony ;
- Le suivi temporel des apports industriels issus du procédé chimique au voisinage immédiat du diffuseur dans le Canal Havannah. Ce suivi a pour objet de répondre aux questions de la double rémanence supposée :
 - D'une part, du gypse (CaSO_4) formé après l'étape de neutralisation des solutions d'extraction acides du Ni par la pulpe de calcaire et de chaux;
 - D'autre part, des précipités de CaCO_3 et d'hydroxydes de Mn supposés être générés lors de l'entrée en contact de l'effluent avec l'eau de mer, phénomène qui pourrait entraîner (par précipitation, co-précipitation et adsorption) une fraction non négligeable des métaux (McBride *et al.*, 1994 ; Hiemstra *et al.*, 1989) à la surface des sédiments. Les expériences de laboratoire et la modélisation associée (Convention IRD/Goro-Ni, n° 1124 ; Volet « Réactivité chimique de l'effluent ») montraient que seule une formation négligeable de précipités de calcite devrait se produire. La mesure in-situ permet de discuter de cette hypothèse, dans l'état actuel du niveau des rejets (phase de montée en puissance de l'usine entrecoupée d'arrêt).

Ce rapport présente les résultats relatifs aux flux particuliers dans la zone d'influence de l'usine VALE-NC, obtenus pour la **deuxième campagne de mouillage semestrielle** des 5 qui compte le programme de suivi environnemental passé entre Vale- NC et AEL (Contrat Vale/AEL n° 3052) pour la période 2013-2015.

3 METHODOLOGIE

3.1 SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES

Cette campagne d'étude des flux a été conduite du 18 janvier au 6 mars 2014 pour la Rade Nord (St15) et la Baie Kwé (St06-KW1), et du 17 avril au 4 juin 2014 pour le Canal de la Havannah (St60-NE). Les missions de mouillage et de récupération des lignes instrumentées ont été réalisées à bord de l'embarcation « Slavko ».

De manière plus détaillée, les mouillages sont trois lignes équipées chacune d'un piège à sédiments séquentiel, d'un lest associé à un largueur acoustique et d'un flotteur de sub-surface.

Les sites instrumentés sont les suivants (Figure 1 et Tableau 1) :

- Zone d'influence du rejet d'effluent : Il s'agit de la station St60-NE (localisée perpendiculairement à 60 m du diffuseur, site défini pour l'étude de traçage colorimétrique, Contrat AEL/Vale-NC n° 20233) qui fait aussi l'objet d'une surveillance de la physico-chimie de la colonne d'eau (St09 ; Contrat AEL/Vale-NC n°E22584) ;
- Zone d'influence de la mine : Il s'agit d'une station dans l'embouchure de la rivière Kwé (St06-KW1) et qui a permis la définition de l'état de référence des flux particulaires en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n°1230) afin d'assurer le suivi des apports induits par le bassin d'exploitation minière.
- Zone d'influence de l'usine de valorisation du minerai : il s'agit de la station St15 située en face du creek qui jouxte le site de l'usine. Cette station qui a fait l'objet d'un état de référence en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n°1230) permet d'assurer un suivi des apports induits par l'activité de l'usine.

Tableau 1 : Localisation des trois stations de mouillage des pièges à particules séquentiels : Canal de la Havannah (St60-NE), en Rade Nord (St15) et en Baie Kwé (St06-KW1). Ces coordonnées sont conformes au référentiel WGS-84.

STATION	St15	St60-NE	St06-KW1
Longitude Est	166°59,590	166°59.678	166°59,140
Latitude Sud	22°20,037	22° 22,109	22°20,747
Profondeur (m)	37	39	18

L'orifice du dispositif de collecte (piège) a été placé à 3 mètres au-dessus du fond. Cette cote est particulièrement importante à respecter, notamment à proximité du diffuseur pour échantillonner les particules véhiculées par l'effluent, même lorsque les conditions hydrodynamiques des marées de vive-eau s'exercent. Ce prérequis s'appuie sur les résultats du traçage réalisé à la rhodamine-WT (Contrat AEL/Vale-NC n° 20233 ; Figure 2) ; la couche affectée par l'effluent n'étant que d'environ 5 m d'épaisseur lors des marées de vive-eau alors qu'elle dépasse amplement les 10 m par courants faibles (marées de morte-eau).

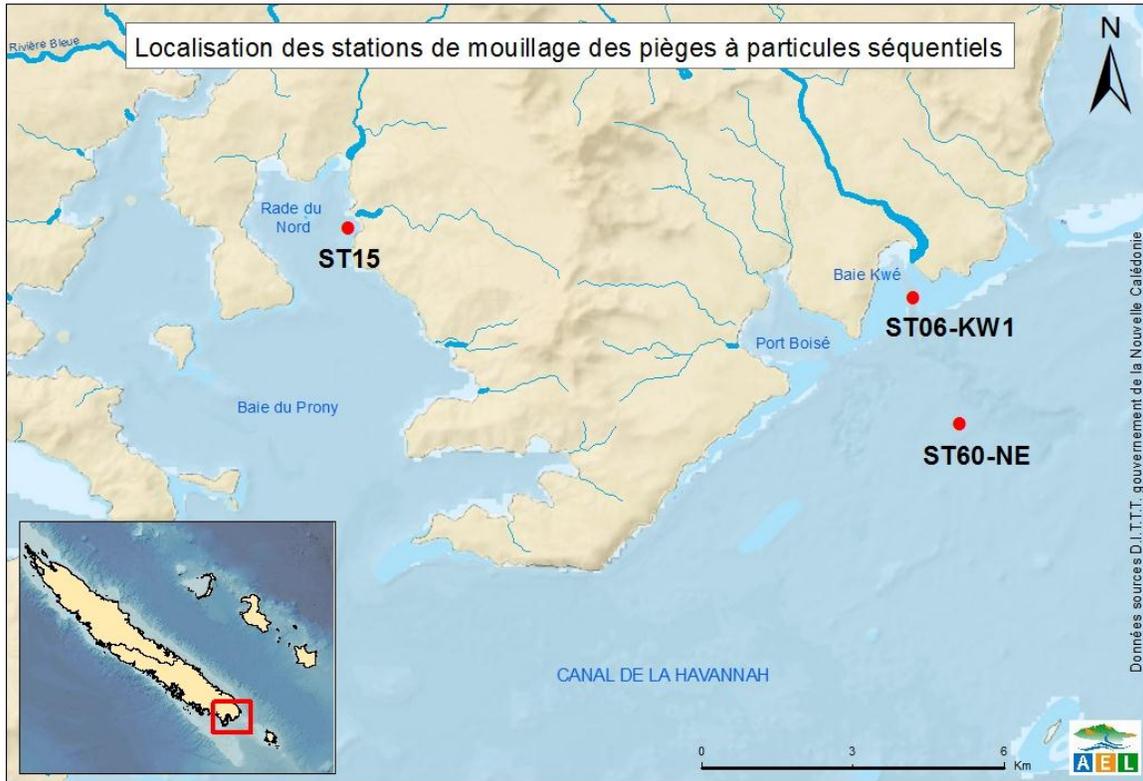


Figure 1: Aire d'étude pour le suivi des flux verticaux de particules issues du process de transformation du minerai de l'usine de production et des activités d'excavation de mine de Vale-NC. La station St60-NE est localisée à 60m du rejet de l'effluent minier de Vale-NC. En Baie Kwé le piège à sédiments a été mouillé à la station St06-KW1. La station St15 se situe à l'embouchure du Creek de la Rade Nord.

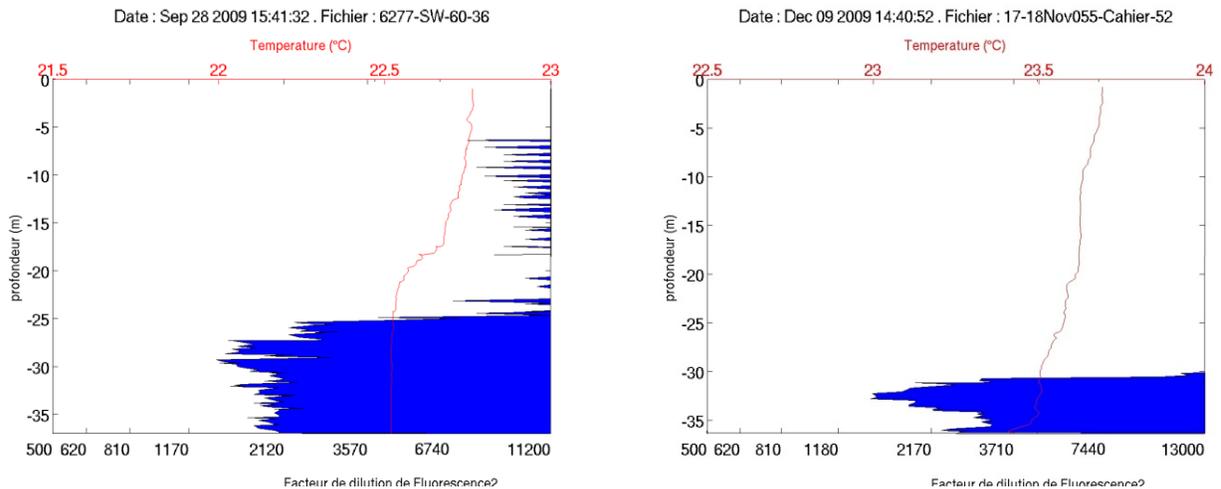


Figure 2 : Puissance type de l'épaisseur de marquage par l'effluent (rhodamine-WT) pour des conditions courantologiques de marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

3.2 ECHANTILLONNAGE

Les lignes de mouillage sont dotées de pièges à sédiments de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) d'une section efficace de 0,050 m² et équipés de carrousels de 12 godets pour permettre la collecte d'une série temporelle des particules sédimentées. Les lignes ont été immergées le 17 janvier 2014 pour les stations St15 et St06-KW1 puis récupérées le 20/03/14. Pour la station NE60, la ligne a été immergée le 15/04/2014 et puis récupérée le 05/06/2014.

Note : Initialement, les trois lignes ont été simultanément immergées en janvier 2014, toutefois, la disparition de la ligne instrumentée de la station St60-NE a été constatée au moment de la mission de relevage. Cette perte a conduit à l'achat d'un nouveau piège à sédiment dont le mouillage n'a pu être réalisé qu'en avril 2014.

La collecte des particules, pour les stations St15 et St06-KW1, a été programmée pour débuter le 18 janvier 2014 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 06 mars à 00h00. Pour la station NE60, la collecte a débuté le 17 avril à 00h00 pour terminer le 04 juin 2014 à 00h00. Au total 12 échantillons de matériel particulaire ont été prélevés pour chacun des trois sites d'immersion (Tableau 2).

Tableau 2 : Liste des échantillons collectés aux stations de mouillage des pièges à sédiments (St60-SW, St60-NE et St06-KW1) et périodes de collecte entre juillet et août 2013.

STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE
St06-KW1-1	18-21 janvier	St15-1	18-21 janvier	St60-NE-1	17-20 avril
St06-KW1-2	22-25 janvier	St15-2	22-25 janvier	St60-NE -2	21-24 avril
St06-KW1-3	26-29 janvier	St15-3	26-29 janvier	St60-NE -3	25-28 avril
St06-KW1-4	30 janvier- 02 février	St15-4	30 janvier- 02 février	St60-NE -4	29 avril- 02 mai
St06-KW1-5	03-06 février	St15-5	03-06 février	St60-NE -5	03-06 mai
St06-KW1-6	07-10 février	St15-6	07-10 février	St60-NE -6	07-10 mai
St06-KW1-7	11-14 février	St15-7	11-14 février	St60-NE -7	11-14 mai
St06-KW1-8	15-18 février	St15-8	15-18 février	St60-NE -8	15-18 mai
St06-KW1-9	19-22 février	St15-9	19-22 février	St60-NE -9	19-22 mai
St06-KW1-10	23-26 février	St15-10	23-26 février	St60-NE -10	23-26 mai
St06-KW1-11	27 février-02 mars	St15-11	27 février-02 mars	St60-NE -11	27-30 mai
St06-KW1-12	03- 06 mars	St15-12	03- 06 mars	St60-NE -12	31-03 juin

Dès le retour des pièges à bord de l'embarcation, les échantillons de MES (matière en suspension) collectés dans les godets des carrousels, ont été conservés au frais (4°C) jusqu'à la phase de leur traitement au laboratoire.

3.3 PARAMETRES PHYSIQUES, GEOCHIMIQUES ET ANALYSES

Les méthodes de traitements et d'analyses sont décrites en Annexe 1.

4 RESULTATS

Avertissement : Dans ce rapport, les données des stations St06-KW1 et St15 collectées entre le 18 janvier et le 06 mars seront logiquement rapprochées aux résultats obtenus en saison chaude pour les campagnes précédentes. A contrario, les données de la station St60-NE, collectées entre le 17 avril et le 03 juin 2014 seront comparées avec les résultats des saisons chaudes et froides, compte tenu du décalage de la période de mouillage engendré par la perte de la première de mouillage.

4.1 PARAMETRES METEOROLOGIQUES

Les valeurs des paramètres météorologiques sont regroupées en Annexe 2.

Les paramètres météorologiques (pluie journalière, vitesse et direction du vent maximum moyen) sont donnés par les stations météorologiques se trouvant sur le récif loro et dans l'« usine-pilote Vale-NC », elles fournissent avec un degré de précision acceptable les conditions de pluie sur l'ensemble des sites d'influence étudiés.

4.1.1 Précipitations atmosphériques (station « Usine-pilote Vale-NC »)

Stations St15 et St06-Kw1

La période du 11 janvier au 6 mars 2014 a été marquée par 3 épisodes pluvieux significatifs (accompagnés de précipitations > 40 mm/j) qui ont été enregistrés du 17 au 19 janvier, du 23 au 24 janvier ainsi que du 03 au 6 février 2014 (avec respectivement 151,1 ; 413 et 260,7 mm ; Figure 3). En dehors de ces épisodes notables, des précipitations d'intensités variables ont été enregistrées ($0,2 < \text{pluies} < 33,8$ mm) lors de la période de collecte. Par contre, il a été constaté une absence de précipitation une semaine avant (11-17 janvier) le premier jour de collecte (18 janvier). Au cours de la période d'étude, on compte 34 jours de pluies cumulant 928,8 mm, soit cinq fois plus de précipitations que la collecte de l'année précédente qui s'était déroulée du 9 janvier au 25 février 2013.

Station NE-60

La période du 17 avril au 4 juin 2014 a été accompagnée d'un épisode pluvieux significatif (95 mm le 6 mai ; Figure 4) et de trois épisodes notables mais de moindre intensité. En dehors de ces épisodes pluvieux, 21 jours de précipitations d'intensité variable ($0,2$ à $12,4$ mm) ont été enregistrés lors de la période de collecte. Au total 263,5mm de précipitations cumulées sont tombées.

4.1.2 Direction du vent (station récif « Ioro »)

Stations St15 et St06-Kw1

Durant les périodes de mouillage des pièges à particules, la direction des vents n'est pas restée constante puisque quelques rotations ont été constatées (Figure 3). En effet, les « directions des vents moyens journaliers » enregistrées (DD) ont montré que des régimes majoritairement du secteur S à E-SE ont soufflé avec des rotations dans les secteurs NW (qui ont été précédées ou suivies d'incursions de secteur N à NE) ; on note aussi deux régimes de secteur W-SW. Plus en détail, il a été enregistré les quatre principaux épisodes suivants :

- 11 janvier - 20 janvier : les vents ont majoritairement soufflé du secteur E-SE pour tourner vers un secteur N-NE suivie d'une rotation W-NW ;
- 21 janvier- 1^{er} février: la direction des vents était de secteur S-SE et de secteur E-SE avec une brève incursion de NE (25 janvier);
- 02 - 18 février : d'abord de secteur W-SW, les vents ont basculés progressivement secteurs E-SE puis NE-NNE pour revenir secteur W-SW (7février). Par la suite, une brève incursion apparaît de secteur E (8 février) qui est suivie par une stabilisation de la direction des vents autour du secteur S-SE ;
- 19 février - 6 mars : de secteur W-NW puis de secteur N-NE, les vents repassent en secteur W-NW brièvement, pour ensuite finir de secteur S à S-SE (pendant 12 jours).

Station NE-60

Au cours de la période de mouillage du piège, la direction des vents était orientée majoritairement d'un large secteur E-SE à SSE avec quelques incursions de secteur W, W-SW, E et E-NE (Figure 4). Dans le détail, quatre épisodes apparaissent :

- 17 avril – 28 avril : d'abord de secteur W et W-SW, la direction des vents passe en secteur E-SE pour terminer brièvement en secteur E-NE ;
- 29 avril – 9 mai : la direction des vents est de secteur S à S-SE malgré deux jours d'incursion de secteurs E-NE ;
- 10 mai – 26 mai : la direction des vents est restée globalement proche d'un secteur S-SE pour ensuite tourner, juste avant une brève incursion de secteur E, vers le secteur S puis W-SW ;
- 27 mai – 4 juin : la direction des vents était d'un large secteur S à SE.

4.1.3 Vitesse du vent (station du récif « Ioro »)

Stations St15 et St06-Kw1

Durant la période d'étude, l'intensité des vents moyens journaliers (FF) a été très variable (Figure 3) ; les valeurs extrêmes ont été enregistrées, le 7 février pour la minimale (0,4 m/s de secteur N-NE) et le 19 janvier pour la maximale (13,5 m/s de secteur W-NW).

Pour toute la durée de la campagne, la « vitesse des vents moyens journaliers » (FF) a été de $6,8 \pm 2,8$ m/s. Cette

valeur est deux fois plus faible que celle mesurée lors des campagnes de janvier- février 2013 ($12,0 \pm 2,2$ m/s) ou encore de janvier-février 2012 ($12,0 \pm 2,4$ m/s).

Station NE-60

Au cours de la période d'étude, la vitesse des vents a été variable. En effet, une valeur minimale de 2,3 m/s a été enregistrée le 5 mai (vents de secteur S) tandis qu'une valeur maximale de 12,4 m/s a été enregistrée le 17 mai (pour des vents de secteur S-SE).

La « *vitesse des vents moyens journaliers* » (FF) était de $6,9 \pm 2,5$ m/s ce qui reste faible pour la fin de la saison chaude (Figure 4).

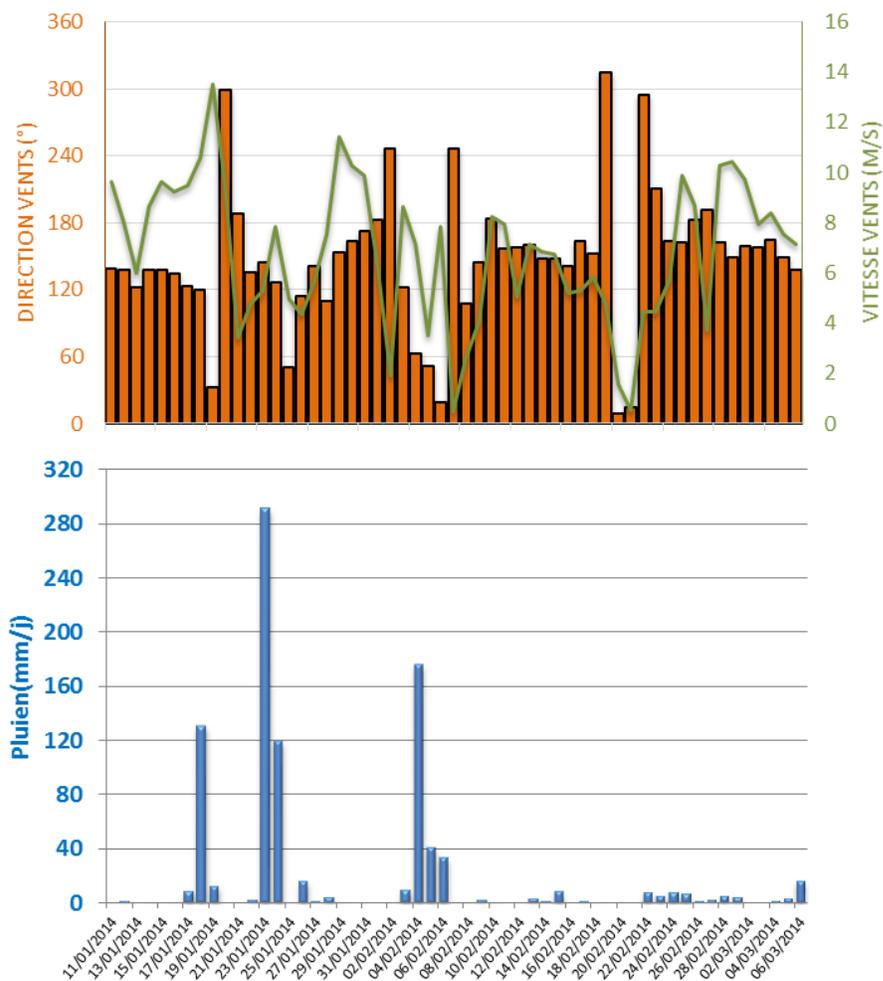


Figure 3 : Enregistrement des « *taux de précipitations journaliers (RR)* » en (mm/j) à la station météorologique de l'« *usine-pilote* » de Vale-NC, « *direction des vents moyens journaliers (DD)* » en (°) et « *vitesse des vents moyens journaliers (FF)* » en (m/s) à la station du récif loro, pour la période du 11 janvier au 6 mars 2014.

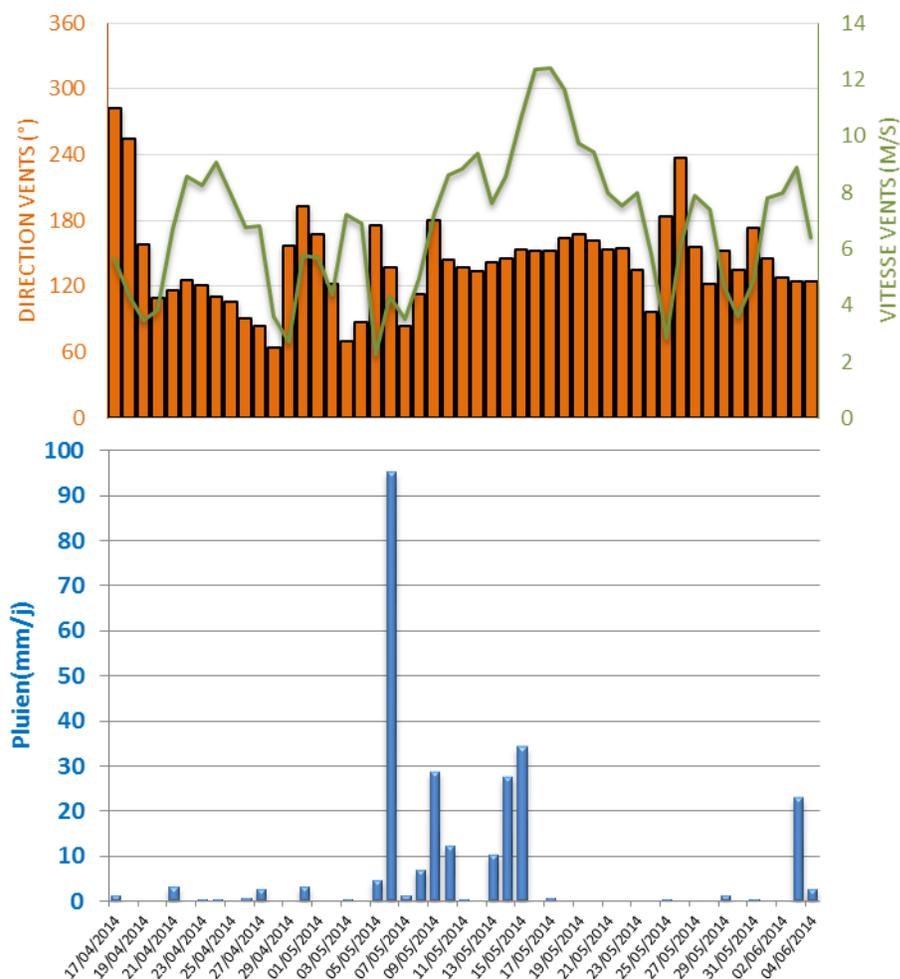


Figure 4 : Enregistrement des « taux de précipitations journaliers (RR) » en (mm/j) à la station météorologique de l'« usine-pilote » de Vale-NC, « direction des vents moyens journaliers (DD) » en (°) et « vitesse des vents moyens journaliers (FF) » en (m/s) à la station du récif loro, pour la période du 17 avril au 4 juin 2014.

CE QU'IL FAUT RETENIR

Stations St15 et St06-Kw1 (18 janvier – 06 mars 2014)

La période de mouillage (18 janvier au 6 mars) a été marquée par 3 épisodes pluvieux d'importance. Il a été enregistré 34 jours de pluies cumulant 928,8 mm de précipitations, ce qui revêt un caractère exceptionnel pour la saison chaude (si l'on compare les données acquises lors des missions de janvier-février 2012 et 2013).

Le régime des vents a été irrégulier, bien que majoritairement d'un large secteur S-SE (alizées), quelques rotations dans le secteur W-NW et quelques incursions de N-NE ont été enregistrées.

La période de mouillage est caractérisée par une vitesse des vents moyens journaliers ($6,8 \pm 2,8$ m/s) bien inférieure aux normales saisonnières ($11,3 \pm 3,2$ m/s, $12,0 \pm 2,4$ m/s et $12,0 \pm 2,2$ m/s respectivement mesurées en janvier-février 2011, 2012 et 2013).

Station NE-60 (17 avril – 04 juin 2014)

La période de collecte (17 avril au 4 juin) a été accompagnée par un épisode pluvieux significatif (95mm) et par quatre épisodes de moindre intensité (23,1 à 34,3 mm). Au total 263,5mm de précipitations ont été enregistrés lors

de la période de la collecte.

Au cours de la période de mouillage des pièges à particules, la direction des vents était majoritairement orientée secteur E-SE à S-SE bien que quelques incursions de secteur W, W-SW, E et E-NE aient été enregistrées. La vitesse des vents moyens journaliers, de l'ordre de $6,9 \pm 2,5$ m/s, reste inférieure aux normales saisonnières ($11,3 \pm 3,2$ m/s, $12,0 \pm 2,4$ m/s et $12,0 \pm 2,2$ m/s, respectivement mesurées en janvier-février 2011, 2012 et 2013).

4.2 CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

Les résultats d'analyses et des mesures sont regroupés en Annexe 3.

Les résultats concernent les masses collectées, la granulométrie des populations de grains, la composition minéralogique, les teneurs en carbonates et les observations de MES au microscope optique.

4.2.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

4.2.1.1 Masses collectées

Les masses totales collectées varient dans le temps (Figure 5), elles se distribuent entre 6,13 g (7-10 février ; KW1-6) et 29,67 g (27 février – 2 mars; KW1-11). La masse moyenne collectée est de 12,14 g, ce chiffre est en augmentation par comparaison à la valeur moyenne de 9,29 g calculée pour les campagnes de janvier-février 2013.

Les plus faibles quantités de MES ont été collectées entre le 7 et le 22 février, cette période est associée à des vents de secteur S-SE de faible intensité ($4,97 \pm 2,44$ m/s) et de très faibles précipitations cumulées (26,5 mm de précipitations). Les plus fortes proportions de MES, échantillonnées entre le 23 février et le 2 mars, correspondent à une période où le régime des vents est passé rapidement d'un secteur W-NW (22 février) au secteur S-SW (23 février) pour ensuite se stabiliser en secteur S à SE (25 février au 2 mars).

Au cours de cette période, les précipitations cumulées ont été très faibles (33,2 mm), seuls les vents modérés ($7,85 \pm 2,76$ m/s) avec de pointes d'environ 10 m/s entraînant des phénomènes de remise en suspension peuvent expliquer cette masse de MES collectées. Les fortes précipitations du 18, 23 et 24 janvier ainsi que du 4 février (associées à des vents modérés à faibles < 8 m/s) ne semblent pas entraîner une augmentation notable du flux de particules.

Les fractions fines ($\phi < 40 \mu\text{m}$) dominent quantitativement dans l'ensemble des 12 godets. La masse maximale de particules fines est observée dans le godet KW1-11 (29,17 g ; 27 février-2 mars) et la masse minimale est constatée dans le godet KW1-6 (5,07 g ; 7-10 février). Proportionnellement, le pourcentage de fraction fine oscille entre 74,5% (KW1-1 ; 18-21 janvier) et 91,62% (KW1-2 ; 22-25 janvier) alors que dans la campagne de janvier-février 2013, le pourcentage de fraction fine oscillait entre 68% et 86%.

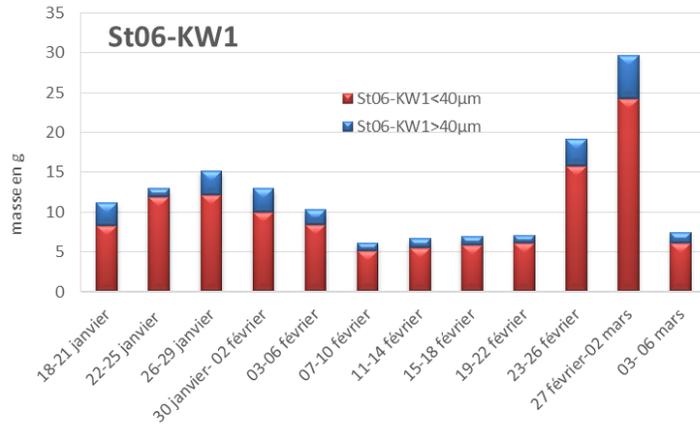


Figure 5 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 6 mars 2014 en Baie Kwé (St06-KW1). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (<math><40\mu\text{m}</math>) et fractions grossières (>math>>40\mu\text{m}</math>).

4.2.1.2 Compositions granulométriques

La fraction fine (<math><40\mu\text{m}</math>) des matières en suspension, collectées au niveau de la Baie Kwé, est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 μm (silts fins) avec des proportions autour de 53,7 à 57 % du volume (Figure 6). Des observations similaires ont été faites lors des campagnes de janvier-mars 2012 et de janvier-février 2013. Les argiles ($\varnothing <2\mu\text{m}</math>) composent la seconde population granulométrique, avec des valeurs comprises entre 24,9% et 29,9%, cette observation diffère de celles effectuées lors des missions précédentes (où les silts représentaient la seconde population granulométrique). Depuis la campagne de janvier-février 2012, une augmentation progressive du pourcentage d'argiles est observée (au détriment des silts grossiers). Les silts grossiers ($\varnothing 20-40\mu\text{m}</math>) sont de moins en moins représentés au fil des différentes campagnes de prélèvements. Ces résultats montrent une variation temporelle importante de la granulométrie des MES qui devient de plus en plus fine au fur à mesure des campagnes.$$

Pendant la période de collecte, une faible évolution temporelle des fractions les plus fines (classe 0,02-2 μm) est observée ; la fraction la plus importante est relevée pour le prélèvement KW1-11 (27 février-02 mars) correspondant à la masse de MES maximale collectée. Parallèlement, ce prélèvement montre la fraction de silts grossiers la plus faible.

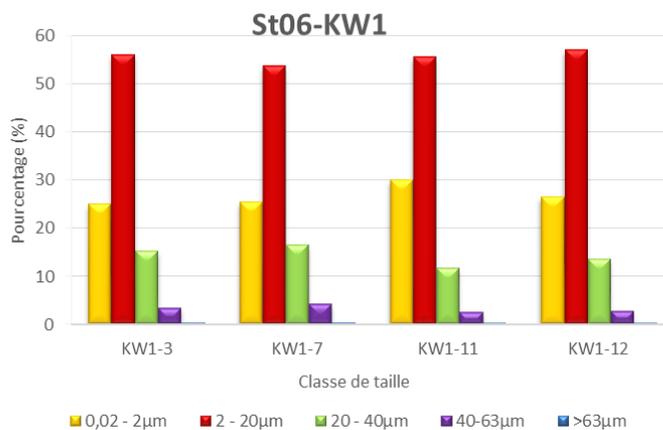


Figure 6 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés en Baie Kwé par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 6 mars 2014.

4.2.1.3 Compositions minéralogiques

La composition minéralogique a été établie par diffractométrie de rayons X (Tableau 3) sur les MES des godets St06-KW1-3, St06-KW1-7, St06-KW1-11 et St06-KW1-12.

Les résultats montrent que les MES sont composées d'une part de goethite, signature minéralogique des formations latéritiques, et d'autre part de calcite magnésienne (phase majoritaire), d'aragonite ou de calcite, qui sont autant de signatures de l'influence marine ; l'aragonite étant un des constituants majeurs des coquilles d'invertébrés. Les résultats d'analyses DRX semi-quantitatives tendent à montrer que les proportions de chacune des phases minérales sont équivalentes d'un prélèvement à l'autre, excepté pour le godet KW1-3 (26-29 janvier) qui présente un pourcentage en goethite significativement plus élevé suggérant une influence terrigène, plus marquée, qui serait consécutive aux fortes précipitations du 23 et 24 janvier. Une observation similaire avait été réalisée sur la composition minéralogique après un épisode pluvieux de forte intensité (28 juillet 2013 ; 203,7 mm).

La composition minéralogique des particules demeure généralement proche de celle des campagnes réalisées antérieurement de janvier-février 2012 et janvier-février 2013.

Tableau 3 : Composition minéralogique des MES collectées en Baie Kwé (station St06-KW1) par le piège à particules, du 17 avril au 4 juin 2014.

ECHANTILLON	% Calcite-magnésienne	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autres
St06-KW1- 3	39,1	-	24,1	36,8	-
St06-KW1- 7	47,1	-	28,8	24,0	-
St06-KW1-11	48,8	29,7	-	21,5	-
St06-KW1-12	47,8	31,5	-	20,6	-

4.2.1.4 Teneurs en carbonates

En Baie Kwé, les MES collectées sont constituées d'une fraction carbonatée majoritaire pour l'ensemble des godets qui représente entre 78,4 % (St06-KW1-7 ; 11-14 janvier) et 89,5% (St06-KW1-1 ; 18-21 janvier - Figure 7).

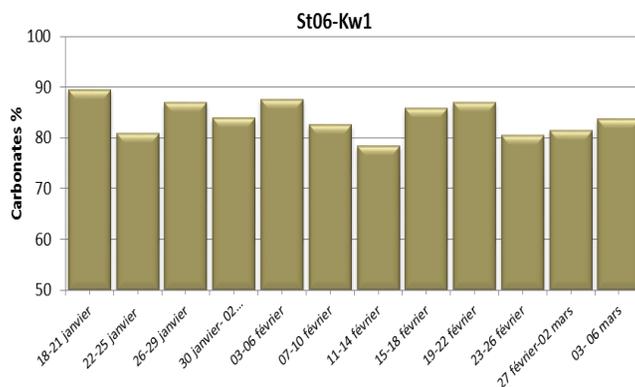


Figure 7 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 6 mars 2014 en Baie Kwé (St06-KW1).

La teneur moyenne en carbonate des MES est de 84,1 ±3,4 %, soulignant une homogénéité des apports (les fortes précipitations ne semblent pas avoir impacté la nature des apports en MES). La plus faible teneur de carbonates constatée est associée à un régime de vents de secteur S-SE d'environ 7 m/s et l'absence de précipitation, tandis que la plus forte teneur en carbonates est associée à des vents d'environ 11 m/s de secteur E-SE tournants secteur N-NE puis W-NW pour finir secteur S. En janvier-février 2013, les teneurs maximales coïncidaient avec les forts alizés de secteurs SE installés en fin de période (14-17 février et 22-25 février 2013).

Les teneurs observées pour cette campagne de janvier-février 2014 sont en moyenne supérieures à celles obtenues

pour les campagnes précédentes ($79,7 \pm 2,6$ % en janvier-février 2012 ; $66,9 \pm 8,3$ % en janvier-février 2013), soulignant ainsi une plus forte influence marine pour la saison chaude 2014. Contrairement à la période de juillet-août 2013, les fortes précipitations n'ont pas occasionnées de diminution significative de la teneur en carbonates.

4.2.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

4.2.2.1 Masses collectées

A la station St60-NE (Figure 8), les masses collectées sont bien plus faibles qu'en Baie Kwé puisqu'elles sont comprises entre 0,18 g (godet St60-NE-5) et 3,18 g (godet St60-NE09). La plus forte quantité de MES collectée (3,18 g ; godet St60-NE-9, 19-22 mai) coïncide avec un régime de vents de secteur S à SE modérés (7,5 à 9,8 m/s), la seconde plus forte quantité de MES échantillonnée (2,98 g, godet St60-NE-12, 31 mai-3 juin) correspond à des vents d'un large secteur S à E-SE. Une masse importante de MES (2,23 g ; godet St60-NE-1, 17-20 avril) a aussi été récupérée lorsque les vents faibles de secteur W-NW ont tourné secteur W-SW puis S-SE, pour finir E-SE. Lors de la précédente campagne (juillet-août 2013), la quantité maximale collectée (20-23 juillet) était lié au régime de vents de secteur SE à E faiblissant de 20 à 5 m/s avec une brève incursion de secteur W-NW et de faibles précipitations (18,8 mm cumulés). En janvier-février 2013, la quantité maximale de MES avaient été collectée pour des vents de secteurs SW soufflant autour de 14 m/s et de faibles précipitations (8,1 mm cumulés).

La fraction fine est quantitativement supérieure à la fraction grossière ($\phi > 40 \mu\text{m}$). Elle représente entre 65,6 % (St60-NE-10, 23-26 mai) et 93,2 % (St60-NE-7, 11-14 mai) mais demeure globalement inférieure à celle mesurée pour la Baie Kwé. Les plus fortes proportions de fraction grossière sont en général calculées pour les périodes de très faible piégeage du début et milieu d'étude. La fraction grossière étant composée essentiellement de tests carbonatés. Toutefois, la faiblesse des quantités pesées augmentent les incertitudes et ne permettent pas d'être totalement affirmatif.

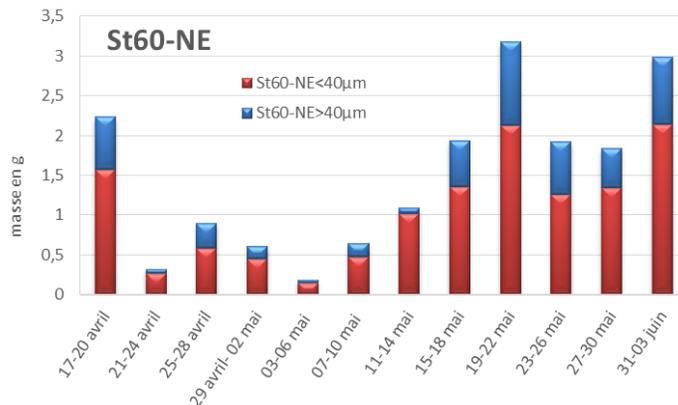


Figure 8 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 17 avril au 4 juin 2014 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines ($< 40 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($> 40 \mu\text{m}$)

Lors de la mission de juillet-août 2013, les fractions grossières étaient quantitativement plus importantes que les fractions fines dans l'ensemble des échantillons à l'exception du godet NE-12 où les particules fines représentaient 53% de la masse (observation effectuée pour un régime de vents de secteur S-E modéré à $9,8 \pm 0,6$ m/s du 25-28 août 2013). Cette différence significative de granulométrie entre les deux missions pourrait être causée par des phénomènes de remise en suspension de particules grossières provoqués par des vents forts. La vitesse des vents moyens était de $11,3 \pm 3,6$ m/s en juillet-août 2013 tandis que pour la période de collecte d'avril-juin 2014, la vitesse n'était que de $6,9 \pm 2,5$ m/s.

En termes de variabilité interannuelle, la comparaison des masses collectées à cette campagne avec les campagnes

précédentes de juillet-août 2013 et celle de septembre-octobre 2012 montre que les valeurs maximales de MES collectées sont exactement du même ordre (4,09 et 3,55 g respectivement). Par contre en janvier-février 2012, la masse maximale de MES était de 8,77 g, correspondant à un régime de vents passant temporairement au secteur SW avec des vitesses atteignant les 14 m/s.

4.2.2.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations granulométriques montre de légères variations (Figure 9) dans le temps qui affectent principalement les classes de grains les plus fines ($\phi < 2\mu\text{m}$) et intermédiaires (ϕ compris entre $20-40\mu\text{m}$). La distribution granulométrique est très proche de celle observée en juillet-août 2013. Les fractions fines ($<40\mu\text{m}$) des matières en suspension collectées au niveau de la station St60-NE sont composées majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe $2-20\mu\text{m}$ (silts fins) avec des proportions autour de 40 à 49 % du volume (Figure 9). Les silts grossiers ($\phi 20-40\mu\text{m}$) composent la seconde population granulométrique, avec des valeurs comprises entre 23,3% et 27,9%, des observations similaires ont été faites lors des campagnes de janvier-mars 2012, septembre-octobre 2012 ainsi que lors de la campagne de juillet-août 2013.

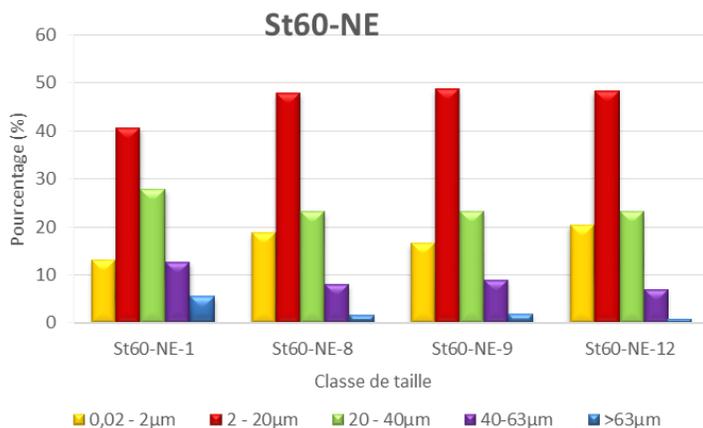


Figure 9 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel, du 17 avril au 4 juin 2014.

4.2.2.3 Compositions minéralogiques

Les analyses de diffractométrie ont été réalisées sur des MES provenant des godets St60-NE-1, St60-NE-8, St60-NE-9 et St60-NE-12.

Les analyses réalisées montrent que les MES sont composés principalement de minéraux comme la calcite, l'aragonite et la calcite magnésienne (Tableau 4), ce dernier minéral étant amplement majoritaire. Ces minéraux mettent en évidence la dominance quasi-totale de l'influence marine, l'aragonite en particulier, étant un des constituants des coquilles des invertébrés. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques n'est pas caractérisée dans les prélèvements de cette campagne alors qu'elle était présente à l'état de trace dans la campagne de juillet-août 2013.

Tableau 4 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-NE) par le piège à sédiments séquentiel, du 17 avril au 4 juin 2014.

ECHANTILLON	% Calcite-magnésienne	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autres
St60-NE-1	56,6	4,9	37,5	-	-
St60-NE-8	56,6	6,2	37,6	-	-
St60-NE-9	55,3	7,1	37,6	-	-
St60-NE-12	58,2	5,6	36,2	-	-

4.2.2.4 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 10) sont élevées et montrent une certaine homogénéité: Les teneurs en carbonates oscillent entre 78,3 et 86,6 %, la valeur moyenne étant de $83,2 \pm 2,4$ %. Ces teneurs sont du même ordre que celles observées pour les campagnes précédentes de janvier-mars 2012 ($84,3 \pm 4,9$ %), de janvier-février 2013 ($77,1 \pm 1,0$ %) ainsi que celles des campagnes de juillet-août 2011 ($91,0 \pm 3,0$ %) et septembre-octobre 2012 ($85,1 \pm 1,4$ %).

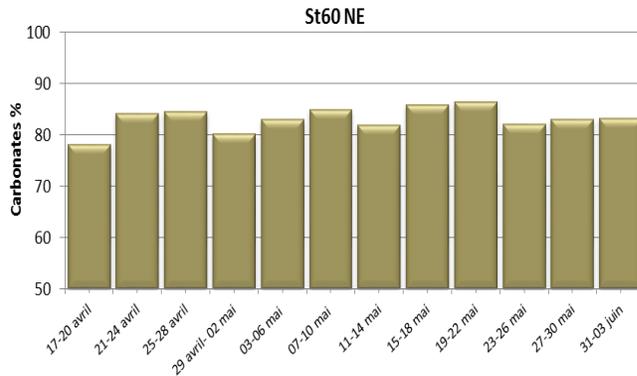


Figure 10 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 17 avril au 4 juin 2014 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

4.2.3 Rade Nord de Prony (station St15)

4.2.3.1 Masses collectées

A la station St15, les masses de MES collectées sont très variables et sont comprises entre 0,55 g (godet St15-11, 27 février- 2 mars) et 32,30 g (godet St15-2, 22-25 janvier). Cette station localisée face à l'embouchure du Creek de la Rade Nord, est donc directement soumise à l'influence d'apports terrigènes lors d'évènements pluvieux. De ce fait, la plus forte quantité de MES collectées (32,30 g ; godet St15-2, 22-25 janvier) coïncide avec les précipitations soutenues du 23 et 24 janvier (291,7 et 119,3 mm respectivement) accompagnées par un régime de vents modérés (<6m/s) de secteurs SE tournant au NE.

De plus, une masse de 5,71 g de MES a été collectée entre le 3 et le 6 février (godet St15-5) pour des conditions météorologiques N à NE, vents faibles (<6m/s) et des précipitations de 175,6 mm ; 41,5 mm et 33,8 mm enregistrées respectivement les 4, 5 et 6 février. Par contre, les fortes précipitations du 18 janvier (130,3 mm) accompagnées de vents moyens de 10 à 14 m/s de secteurs SE, puis NE en fin de d'épisode, n'ont permis de collecter seulement que 0,60g de MES.

La variabilité des masses collectées lors des différents épisodes pluvieux est, sans doute, principalement le reflet des régimes de vents associés, l'orientation SE favorisant un confinement des panaches turbides le long de la côte nord de la petite anse. A l'inverse, l'absence de vents forts et/ou d'orientation autre que SE, permettent l'expansion des panaches.

Dans l'ensemble des godets, la fraction fine (<40 µm) est majoritaire et représente 74,36 à 95,63 % des MES collectées.

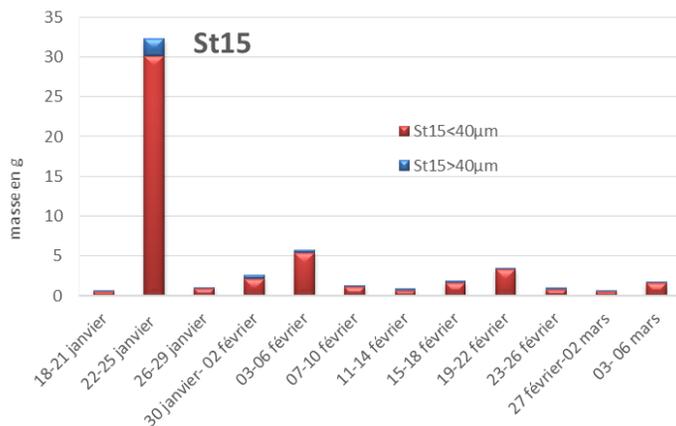


Figure 11 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 6 mars 2014 dans le Canal de la Havannah, au sud-ouest du diffuseur (St60-SW). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (<40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

4.2.3.2 Compositions granulométriques

Les profils de distribution des populations de grains sont relativement similaires d’un godet à l’autre (Figure 12).

Les fractions fines (<40µm) des matières en suspension collectées au niveau de la station St15 sont composées majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 µm (silts fins) avec des proportions autour de 55,4 à 58,6 % du volume (Figure 12). Les argiles (<2 µm) composent la seconde population granulométrique, avec des valeurs comprises entre 19% et 27,7% volumique ; une augmentation des silts moyens et grossiers (classes 20-40 µm et 40-63 µm) au détriment des argiles est constatée en fin de période de collecte (godet St15-12).

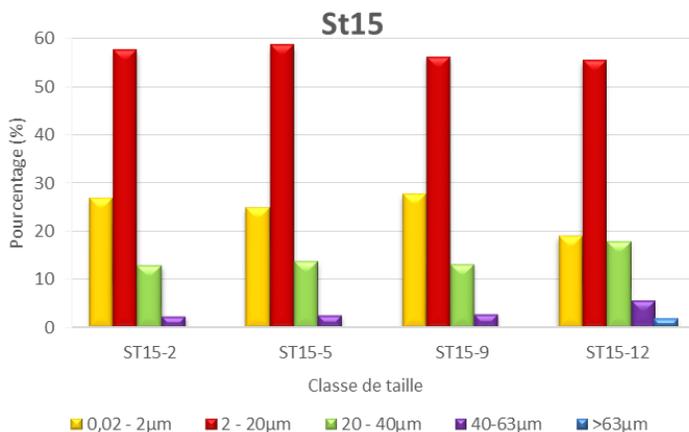


Figure 12 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés dans la Rade Nord (St15) par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 6 mars 2014.

4.2.3.3 Compositions minéralogiques

Les analyses DRX ont été réalisées sur la fraction fine des MES provenant des godets St15-2, St15-5, St15-9 et St15-12.

Les diffractogrammes montrent, comme attendu, que les MES sont composées essentiellement de minéraux d’origine terrigène, comme la goethite, l’hématite ainsi que des traces de tridymite qui est un silicate. En matière d’apport sédimentaires, l’influence marine est, au niveau de cette station, quasi inexistante.

Tableau 5 : Composition minéralogique des MES collectées dans la Rade Nord de Prony (station St15) par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 6 mars 2014.

ECHANTILLON	% Calcite magnésienne	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Hématite	% Tridymite
St15-2	-	-	-	92,9	7,1	-
St15-5	-	-	-	100	-	-
St15-9	-	-	-	94,8	-	5,2
St15-12	-	-	-	100	-	-

4.2.3.4 Teneurs en carbonates

Globalement, la teneur en carbonates à la station St15, est relativement constante autour de $8,6 \pm 4,0\%$, excepté pour les godets St15-1 et St-15-12 où les concentrations en carbonates étaient de 18,2 et 15,4 % respectivement. A ce stade, aucune relation directe ne peut clairement expliquer les écarts constatés pour le début (St15-01) et la fin (St15-12) de période de collecte, compte tenu des erreurs analytiques induites par les faibles masses collectées.

Les faibles concentrations de carbonates rencontrées à cette station s'expliquent par l'influence terrigène forte, directement liée à l'écoulement du Creek de la Rade Nord. Ces résultats confirment ceux obtenus par l'analyse minéralogique en DRX et qui suggéraient la dominance quasi-totale de l'influence terrigène dans cette zone.

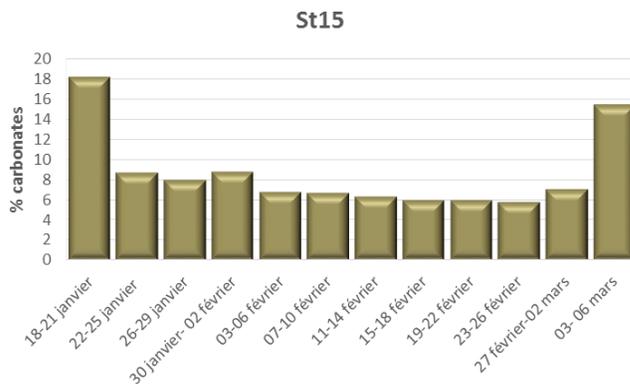


Figure 13 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 6 mars 2014 dans la rade Nord (St15).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Station St06-KW1 (18 janvier – 06 mars 2014)

La masse moyenne des MES collectées est de 12,14 g, ce chiffre est en légère augmentation par comparaison à la valeur moyenne de 9,29 g calculée pour la campagne de janvier-février 2013. Les fortes précipitations du 18, 23 et 24 janvier ainsi que du 4 février (associées à des vents modérés < 8 m/s) ne semblent pas entraîner une augmentation du flux de particules.

La fraction fine ($\phi < 40 \mu\text{m}$) est quantitativement en augmentation dans l'ensemble des godets. Depuis la campagne de janvier-février 2012, la granulométrie présente un accroissement progressif du pourcentage d'argiles (au détriment des silts grossiers), cette augmentation pourrait être causée par l'origine différente des MES en relation avec les activités minières (ou encore un défaut dans la gestion des eaux de ruissellement).

Les MES collectées sont constituées d'une fraction carbonatée majoritaire ($84,1 \pm 3,4 \%$) pour l'ensemble des godets soulignant une homogénéité dans les apports marins. L'influence marine est plus soutenue par rapport à

janvier-février 2013. La composition minéralogique montre que la fraction fine est composée, d'une part de goethite (signature minéralogique des formations latéritiques) et d'autre part de calcite magnésienne (phase majoritaire), d'aragonite ou de calcite, qui sont autant de signatures de l'influence marine.

Les proportions de chacune des phases minérales sont équivalentes d'un prélèvement à l'autre, excepté pour le godet KW1-3 qui présente un pourcentage en goethite significativement plus élevé suggérant une influence terrigène plus marquée consécutivement aux fortes précipitations.

Station St60-NE (17 avril – 04 juin 2014)

A la station St60-NE, les masses de MES collectées sont comprises entre 0,18 g (godet St60-NE-5) et 3,18 g (godet St60-NE09). La plus forte quantité collectée (3,18 g ; godet St60-NE-9, 19-22 mai) coïncide avec un régime de vents de secteur S à SE modérés (7,54 et 9,75 m/s), la seconde plus forte quantité de MES échantillonnée (2,98 g, godet St60-NE-12, 31 mai-3 juin) correspond à des vents d'un large secteur S à E-SE.

La fraction fine (< 40 µm) est quantitativement supérieure à la fraction grossière (> 40 µm) et représente entre 65,6 % (St60-NE-10, 23-26 mai) et 93,2 % (St60-NE-7, 11-14 mai), ces valeurs oscillaient entre 36% et 80% en janvier-février 2013. En juillet-août 2013, les fractions grossières étaient quantitativement plus importantes dans l'ensemble des échantillons. Cette différence significative de granulométrie entre les deux missions pourrait être expliquée par le fait que des particules carbonatées grossières restent en suspension à la faveur de vents forts.

L'analyse minéralogique semi-quantitative révèle que la fraction fine des MES est composée très majoritairement de calcite, d'aragonite ou encore de calcite-magnésienne qui soulignent la dominance quasi-totale de l'influence marine, confirmée par l'analyse des teneurs en carbonates ($83,2 \pm 2,4$ %).

Station St15 (18 janvier – 06 mars 2014)

Les masses de MES collectées sont comprises entre 0,55 g (godet St15-11, 27 février- 2 mars) et 32,30 g (godet St15-2, 22-25 janvier). L'influence des apports terrigènes semble particulièrement notable lors d'évènements pluvieux conséquents (>100 mm) combinés à des régimes de vents faibles à modérés (<6 m/s). Ainsi, la plus forte quantité de MES collectées (32,30 g ; godet St15-2, 22-25 janvier) coïncide avec un très fort cumul de précipitations de 411 mm avec des vents faibles de 6 à 8 m/s. Par contre, les fortes précipitations du 18 janvier (130,3 mm) accompagnées de vents de secteurs successifs SE (puis NE), n'ont permis de collecter seulement que 0,60 g de MES.

Dans l'ensemble des godets, la fraction fine est majoritaire et représente 74,4 à 95,6 % des MES collectées. Les profils de distribution des populations de grains sont similaires d'un godet à l'autre. Les analyses DRX réalisées sur les MES soulignent l'influence quasi-totale des apports terrigènes puisque seules la goethite, l'hématite et la tridymite ont été détectées. Globalement, les résultats de la teneur en carbonates confirment les analyses minéralogiques, les teneurs en carbonates à cette station sont les plus faibles mesurées ($8,6 \pm 4,0$ %) et s'expliquent par l'influence terrigène directe, liée à la configuration géomorphologique de la petite anse qui reçoit le Creek de la Rade Nord.

4.3 COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

Les valeurs des concentrations en métaux totaux, calcium et soufre dans les MES collectées par les pièges à sédiment séquentiels sont regroupées en Annexe 4.

4.3.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

Les éléments métalliques analysés dans les MES de la Baie Kwé ont permis de mettre en évidence les influences respectives des apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) et marins (Ca). Pour tous les métaux, les concentrations obtenues peuvent montrer un écart-type maximum (RSD) de l'ordre de 20,4% (Cr) à 44,5 % (Tableau 7).

Du point de vue de l'évolution temporelle, les concentrations en métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) ont toutes présenté des valeurs maximales pour la période du 22-25 janvier (godet KW1-2, voir Annexes 4) correspondant à la collecte qui a suivi les très fortes précipitations du 23 et 24 janvier (291,7 et 119,3 mm respectivement). Ensuite, les concentrations présentent une diminution progressive jusqu'à la période du 7-10 janvier (St06-Kw1-6) où les concentrations remontent suite, notamment aux fortes pluies du 04 février (175,6 mm). Ces résultats soulignent, qu'en fonction de l'intensité des événements pluvieux le transport de particules latéritiques enrichies en métaux est bien favorisé, ce que confirment les ratios Ca/Fe (Figure 14).

Pour cette campagne, les concentrations moyennes, minimales et maximales de Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont toutes inférieures à celles de janvier-février 2013 (Tableau 8) ; une baisse d'un facteur 2,7 ; 3,7 ; 4 ; 2,4 et 3,8 des concentrations moyennes de Co, Cr, Fe, Mn et Ni, respectivement, est enregistrée. Par contre, une augmentation d'un facteur 1,3 est observée pour la concentration moyenne en Ca.

Pour la campagne de janvier-février 2013, 181mm de précipitations cumulées avaient été enregistrés entraînant le relargage de particules enrichies en métaux. Par contre en 2014, les 928,8 mm de précipitations cumulées n'ont pas eu le même impact sur l'enrichissement métallique des MES.

Les concentrations moyennes du Co, Cr, Fe, Mn et Ni, enregistrées pour cette campagne, sont inférieures aux concentrations définies lors de l'état de référence de 2007 (Tableau 8) d'un facteur 1,3 ; 2,1 ; 2,2 ; 1,1 et 1,9 pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni respectivement.

La matrice de corrélation confirme, une nouvelle fois, la grande similarité ($0,878 \geq R \geq 0,950$) d'évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn (Tableau 9), éléments métalliques appartenant au cortège des formations latéritiques ultramafiques exploitées. La matrice de corrélation montre également l'anti-corrélation entre le calcium (signature de l'influence marine) et les 5 métaux latéritiques (Tableau 9).

Tableau 6 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 18 janvier et le 6 mars 2014 (Station St06-KW1 ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	287 409	26	931	20 679	275	374
MAX	328 396	92	1 878	50 512	1 057	1 057
MOYENNE	308 430	46	1 259	31 190	471	588
ECART-TYPE	13 137	18	257	8 849	210	2195
% RSD	4,3%	39,7%	20,4%	28,4%	44,5%	33,2%

Tableau 7 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 9 janvier et 25 février août 2013 (Station St06-KW1 ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	209 946	106	3 987	104 412	878	1 916
MAX	257 691	162	5 716	151 085	1 424	2 845
MOYENNE	236 752	126	4 634	123 394	1 123	2 258
ECART-TYPE	14 017	19	547	15 208	162	321
% RSD	6%	15%	12%	12%	14%	14%

Tableau 8 : Concentrations moyennes en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé lors de la définition de l'état de référence et pour la campagne de janvier à mars 2014

VALEURS MOYENNES	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
ETAT DE REFERENCE 2007	290 310	58	2 667	68 940	577	1 142
CAMPAGNE JANVIER-FEVRIER 2013	236 752	126	4 634	123 394	1 123	2 258
CAMPAGNE JUILLET-AOUT 2013	164 584	214	7 111	189 732	1 687	3 539
MOYENNE CAMPAGNE JANVIER-MARS 2014	308 430	46	1 259	31 190	471	588

Tableau 9 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 18 janvier et le 6 mars 2014 (Station St06-KW1 ; n=12).

Variables	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,481	1				
Cr	-0,651	0,934	1			
Fe	-0,606	0,926	0,952	1		
Mn	-0,441	0,980	0,904	0,878	1	
Ni	-0,574	0,950	0,955	0,993	0,921	1

La normalisation des concentrations du calcium par le fer (Ca/Fe) souligne de manière notable les évolutions relatives de ces deux éléments qui représentent l'influence des pôles marins (Ca) et terrigènes (Fe), respectivement (Figure 14) ; les valeurs minimale et maximale du rapport Ca/Fe sont respectivement de 5,8 (KW1-2; 22-25 janvier) et 15,5 (KW1-9 ; 19-22 février). Ces ratio Ca/Fe sont bien supérieurs à la valeur maximale, calculée pour la campagne de janvier-février 2013 qui n'était que de 2,4. Cette augmentation significative des rapports Ca/Fe confirme la forte proportion des apports marins dans les MES collectées. Il est important de souligner que lors d'épisodes pluvieux identifiés le ratio Ca/Fe chute dû à l'augmentation des proportions en apports terrigènes consécutifs à la lixiviation des sols latéritiques.

Compte tenu de la relative constance des concentrations en calcium dans le milieu marin, les ratios Ca/Fe permettent de montrer que l'influence terrigène à la station St06-KW1 est bien moins importante que pour les campagnes « saison chaude » précédentes et la campagne de définition de l'état de référence de mars 2007 (Tableau 10). Ce ratio Ca/Fe est en marge de la tendance décrite au fur et à mesure des années depuis l'état de référence (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230), les résultats montraient une influence terrigène de plus en plus accentuée.

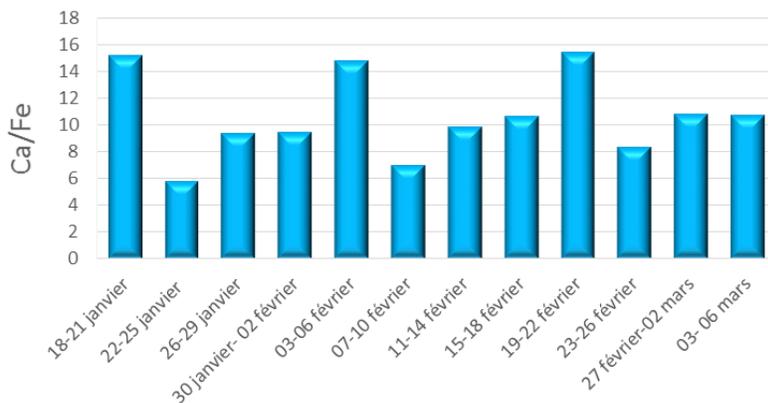


Figure 14 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé (St06-KW1) entre le 18 janvier et le 6 mars 2014.

Tableau 10 : Evolution temporelle entre 2012 et 2014 du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St06-KW1 aux cours de différentes campagnes. Comparaison avec les valeurs de 2007/2008.

Ca/Fe	Janv-mars 2014	Janv-fév 2013	Janv-fév 2012	2007-2008*
Moyenne	10,65	1,95	2,32	3,85
Ecart-type	3,12	0,33	0,18	0,51

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

4.3.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

4.3.2.1 Concentration en métaux et calcium

Les éléments analysés dans les MES collectées à l'est du diffuseur (St60-NE) mettent en évidence une influence marine très marquée. Toutefois et comme à l'accoutumé, les apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) sont décelables, mais à des niveaux de concentrations respectifs bien moindres que dans les MES de la Baie Kwé.

Pour tous les éléments métalliques, les concentrations observées en janvier-mars 2014 (Tableau 11) sont plus faibles que pour les campagnes de janvier-février et juillet-août 2013 (Tableau 12). La baisse est de 46,5 ; 47,3 ; 34,4 et 48,4 % pour Cr, Fe, Mn et Ni, respectivement, par rapport à la campagne de janvier-février 2013 ; par rapport à juillet-août 2013, la baisse est comprise entre 40,7 % (Cr) et 48,5 % (Mn). A contrario, la concentration moyenne de Ca a légèrement augmenté.

Les résultats relatifs aux concentrations de la campagne d'avril-juin 2014 et celles de l'état de référence (Tableau 13 et Figure 15), montrent que les niveaux de concentration de calcium sont proches, ceux des métaux (Co, Cr, Mn et Ni, voire Fe) demeurent à peine 2 fois plus élevés pour la campagne d'avril-juin 2014.

Tableau 11 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah du 17 avril au 4 juin 2014 (Station St60-NE ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	282 702	17	504	15 011	130	261
MAX	315 035	24	628	20 564	267	392
MOYENNE	302 211	20	569	17 740	195	322
ECART-TYPE	9 478	2	41	1 958	32	36
% RSD	3,1%	11,7%	7,1%	11,0%	16,3%	11,1%

Tableau 12 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 12 juillet et 28 août 2013 (Station St60-NE ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	249 423	20	682	22 509	545	769
MAX	295 879	54	1 279	45 301	233	396
MOYENNE	278 794	37,5	960	34 045	379	565
ECART-TYPE	15 543	10,9	193	7 272	101	99
% RSD	5,6	29,1	20,1	21,4	26,6	7,8

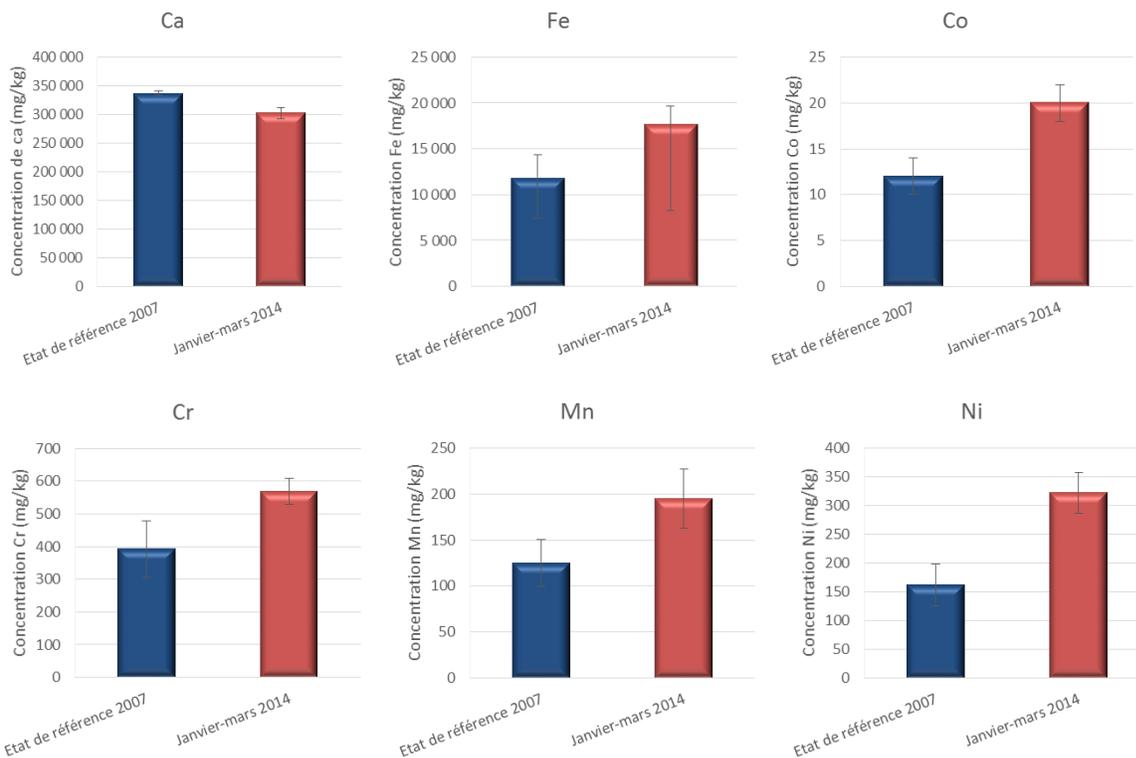


Figure 15 Comparaison des concentrations de Ca, Fe, Co, Cr, Mn et Ni contenus dans les MES dans le canal Havannah pour l'état de référence et pour la campagne d'avril-juin 2014

Tableau 13 : Concentrations moyennes en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal Havannah pour les campagnes d'avril-juin 2014 et de 2007 (Etat de référence).

VALEURS MOYENNES	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
ETAT DE REFERENCE 2007	337 350	12	393	11 760	125	162
ECARTYPE	4 327	2	86	2 616	26	36
CAMPAGNE JANVIER-MARS 2014	302 211	20	569	17 740	195	322
ECARTYPE	9 478	2	41	1 958	32	36

La matrice de corrélation (Tableau 14) permet de dégager plusieurs similarités de distribution significatives entre Cr, Fe et Ni avec des coefficients de Pearson compris entre $0,850 > R > 0,911$ et des tendances affirmées pour Co vis-à-vis de Cr, Mn et Ni ($0,745 > R > 0,772$). Ces observations suggèrent que des apports d'origine terrigène influencent toujours le secteur du Canal de la Havannah en avril-juin 2014, bien que cette influence terrigène soit de moindre intensité par comparaison à la campagne précédente de juillet-août 2013 (Tableau 12) Tableau 15.

Remarque : En janvier-février 2013, seules quelques similarités significatives étaient observées entre Fe et Ni (Coefficient de Pearson $R > 0,988$), à noter que Cr montrait également une tendance de comportement équivalente. Il doit être rappelé, qu'une corrélation significative entre les différents métaux ($0,831 > R \text{ Pearson} > 0,972$) à la station St60-NE, avait été mise en évidence pour la campagne de janvier-février 2012.

Tableau 14 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 17 avril et le 6 juin août (Station St60-NE ; n=12).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	0,423	1				
Cr	0,444	0,745	1			
Fe	0,334	0,534	0,850	1		
Mn	0,543	0,747	0,476	0,162	1	
Ni	0,367	0,772	0,857	0,911	0,457	1

Tableau 15 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 12 juillet et le 28 août 2013 (Station St60-NE ; n=12).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,774	1				
Cr	-0,649	0,974	1			
Fe	-0,749	0,996	0,984	1		
Mn	-0,669	0,979	0,983	0,979	1	
Ni	-0,841	0,877	0,777	0,864	0,771	1

Dans le Canal de la Havannah, les valeurs de normalisation des concentrations du calcium par le fer oscillent entre 14,6 et 19,7 (Figure 16) ; ces valeurs sont plus élevées que le ratio Ca/Fe le plus haut des campagnes de janvier-février et de juillet-août 2013 qui était de 13,3 et 13,1 respectivement. Ces observations montrent que l'influence marine est très forte pour la période d'avril à juin.

Les valeurs minimales du ratio Ca/Fe sont enregistrées pour les godets St60-NE-6 à St60-NE-12 suite aux fortes précipitations discontinues enregistrées du 06 au 10 mai ; des observations similaires avaient été réalisées en juillet-août 2013. Ces observations suggèrent, d'une part, que les apports terrigènes sont irréguliers et d'autre part, qu'ils peuvent impacter fortement le Canal de la Havannah, en cas de précipitations intenses, cette empreinte pouvant perdurer plusieurs jours.

D'un point de vue temporel et d'une manière générale, le ratio Ca/Fe a tendance à décroître, traduisant un impact terrigène croissant (Tableau 16), cependant le dernier ratio obtenu lors de cette mission, montre une valeur à la hausse, comprise entre l'état de référence et la campagne de janvier-février 2012.

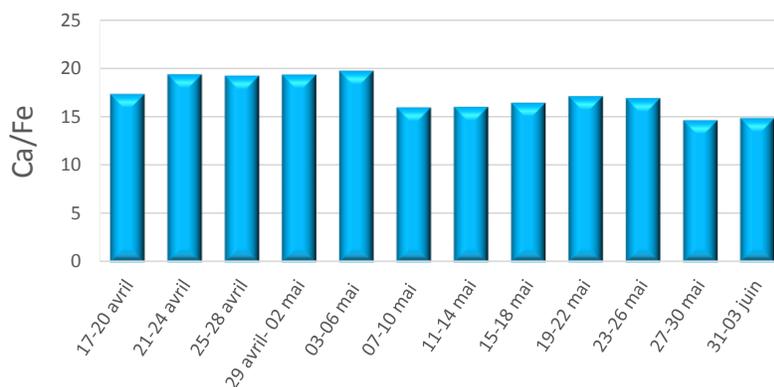


Figure 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal Havannah (St60-NE) entre le 17 avril et le 4 juin 2014.

Tableau 16 : Evolution temporelle entre 2011 et 2014 du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St60-NE. Comparaison avec les valeurs de 2007/2008.

Ca/Fe	Avril-juin 2014	Juil-août 2013	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	2007-2008*
Moyenne	17,2	8,6	11,8	19,0	14,3	Perte	26,8
Ecart-type	1,8	2,3	1,0	2,7	2,4	piège	6,7

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

4.3.2.2 Teneurs en soufre

La concentration moyenne en soufre est de 3900 ±821 mg/kg et présente une variabilité importante puisque la concentration minimale est de 2935 mg/kg et la concentration maximale s'élève à 5630 mg/kg de MES. La concentration moyenne est en augmentation de 25 et 46% par rapport aux campagnes de janvier-février et juillet-août 2013, respectivement.

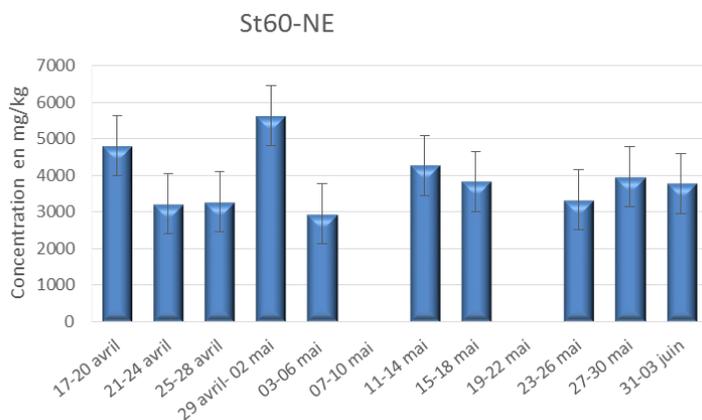


Figure 17 : Concentration du soufre dans les godets s entre le 17 avril et 4 juin août 2014 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

Cette augmentation significative des concentrations, ne semble pouvoir trouver une explication que par le rejet d'un effluent industriel enrichi en soufre. En effet, la concentration maximale est mesurée pour la période du 29 avril au 2 mai 2014, laquelle est associée à des précipitations éparses et des vents faibles de secteurs S à SE peu propices à la formation de néphéloïdes. Par ailleurs, le ratio Ca/Fe, plus fort pendant cette même période de collecte, suggère que l'influence terrigène a été faible.

4.3.3 Rade Nord (station St15)

4.3.3.1 Concentration en métaux et calcium

Les éléments analysés (Tableau 17) dans les MES, collectées à la station St15, mettent en évidence l'influence terrigène quasi-exclusive par rapport à St06-KW1 et St60-NE. Les résultats analytiques confirment les données minéralogiques précédemment décrites (Tableau 5) qui montraient que seules la goethite et l'hématite (signatures de minéraux d'origine terrigènes) étaient présentes dans les MES.

Les concentrations obtenues pour cette campagne montrent, par rapport à l'état de référence de 2007 (Tableau 18), une légère augmentation d'un facteur 1,4 ; 1,6 ; 1,2 ; 1,2 et 1,4 pour le Co, Cr, Fe, Mn et Ni respectivement, tandis que la concentration en Ca a chuté d'un facteur 5,6 ; ces résultats montrent que l'empreinte terrigène est plus marquée que pour mars 2007.

Tableau 17 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans la rade nord entre le 18 janvier et le 6 mars 2014 (Station St15 ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	783	236	10 119	205 324	1 650	2 888
MAX	53 002	336	15 513	257 831	3 127	4 616
MOYENNE	11 118	295	13 796	245 119	2 368	3 927
ECART-TYPE	16 960	27	1 654	15 893	547	665
% RSD	153	9	12	6	23	17

Tableau 18 : Concentrations moyennes en métaux et calcium dans les MES collectées dans la rade nord lors de la campagne d'avril-juin 2014 et lors de l'état de référence de mars 2007

VALEURS MOYENNES	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
ETAT DE REFERENCE MARS 2007	61 870	208	8 500	205 660	1 949	2 742
CAMPAGNE JANVIER-MARS 2014	11 118	295	13 796	245 119	2 368	3 927

La matrice de corrélation (Tableau 19) permet de dégager une corrélation significative entre Cr et Fe avec un coefficient $R > 0,960$. Ce résultat montre que les comportements géochimiques du Fe et Cr sont proches et que les apports terrigènes correspondraient à la lixiviation d'horizons superficiels enrichis en Fe et Cr, comme le suggère la présence de nombreuses traces de chromite à l'embouchure du Creek de la Rade Nord.

Tableau 19 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 18 janvier et le 6 mars 2014 (Station St15; n=12).

Variables	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,222	1				
Cr	-0,877	0,466	1			
Fe	-0,917	0,439	0,960	1		
Mn	0,516	0,409	-0,329	-0,358	1	
Ni	-0,501	0,558	0,601	0,543	-0,418	1

Les valeurs du ratio Ca/Fe enregistrées sont très faibles (Figure 18), indiquant que l'influence terrigène est quasi-totale. La plus forte valeur qui est observée correspond avec les vents de secteur SE tournants NE puis N-NW.

Au niveau de l'évolution du ratio Ca/Fe (Tableau 20), une diminution est constatée depuis l'état de référence soulignant une influence terrigène encore plus prononcée.

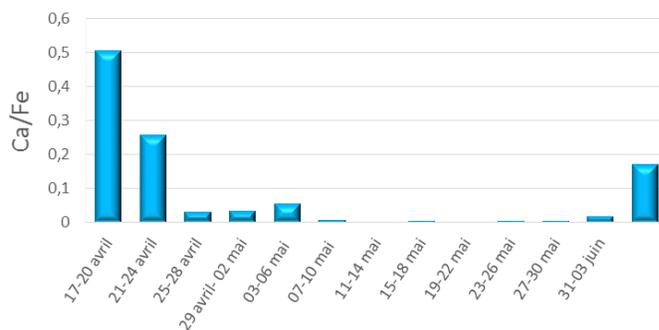


Figure 18 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal Havannah (St60-NE) entre le 18 janvier et le 6 mars 2014.

Tableau 20 : Comparaison temporelle du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St15 entre les campagnes de 2014 et de mars 2007.

Ca/Fe	Janv-mars 2014	Mars 2007*
Moyenne	0,08	0,3
Ecart-type	0,14	-

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

CE QU'IL FAUT RETENIR

Station St06-Kw1 (18 janvier – 06 mars 2014)

Les concentrations métalliques maximales sont observées consécutivement aux épisodes pluvieux conséquents (>100 mm). Par contre, le niveau d'enrichissement en métaux est inférieur à celui de la campagne de janvier-février 2013, malgré des précipitations cumulées bien plus fortes en 2014 (181,2 et 928,8 mm, respectivement). Cet enrichissement métallique est aussi inférieur à celui défini lors de l'état de référence en 2007.

La matrice de corrélation inter-éléments confirme les fortes similarités de comportement entre l'ensemble des métaux appartenant aux formations latéritiques ultramafiques exploitées.

L'influence marine est majoritaire au vu des ratios Ca/Fe, les plus élevés jusqu'à présent mesurés. Le ratio Ca/Fe étant conditionné par les précipitations (lixiviation de particules ferrugineuses), les valeurs minimales sont enregistrées pour les événements pluvieux intenses et/ou des régimes de vents modérés de secteurs S à SE qui favorisent la remise en suspension de particules latéritiques du fond de baie.

Station St60-NE (17 avril – 04 juin 2014)

Les concentrations moyennes en métaux sont inférieures aux valeurs des campagnes précédentes de janvier-février et juillet-août 2013. Par ailleurs, ces concentrations sont proches de celles enregistrées lors de la définition de l'état de référence en mars 2007. Par rapport à la campagne de juillet-août 2013, il est enregistré une baisse significative des concentrations en métaux, comprise entre 40,7 % (Cr) et 48,5 % (Mn) ;

L'influence terrigène est encore décelable, essentiellement au regard des coefficients de corrélations inter-éléments entre le Cr, Fe et Ni mais elle est moins prononcées que celle de la période de juillet-août 2013.

L'évolution temporelle du ratio moyen Ca/Fe montre une rupture de la tendance décroissante observée depuis mars 2007, la valeur actuelle du ratio se situant sensiblement au-dessus de celle établie pour la définition de l'état de référence.

La concentration en soufre dans les MES a augmenté significativement par rapport à 2013.

Station St15 (18 janvier – 06 mars 2014)

Les éléments métalliques analysés dans les MES et les déterminations minéralogiques mettent en évidence l'influence terrigène quasi-exclusive par rapport à St06-KW1 et St60-NE.

Les concentrations métalliques sont en légère augmentation par rapport à l'état de référence de 2007 d'un facteur 1,4 ; 1,6 ; 1,2 ; 1,2 et 1,4 pour le Co, Cr, Fe, Mn et Ni respectivement, tandis que, parallèlement, la concentration en Ca a chuté d'un facteur 5,6.

La corrélation ($R > 0,960$) entre les concentrations entre Cr et Fe suggère que les apports terrigènes correspondraient à la lixiviation d'horizons superficiels enrichis en Fe et Cr avec la présence de chromite.

L'évolution du ratio Ca/Fe, en diminution par rapport à mars 2007, souligne par ailleurs, une influence terrigène encore plus prononcée qu'en Baie Kwé.

5 INTERPRETATION

5.1 INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

5.1.1 Baie Kwé (Figure 19)

Les campagnes réalisées entre 2011 et 2013 permettaient d'établir un parallèle entre la quantité de MES collectée, la distribution des populations granulométriques et l'action mécanique induite par certaines conditions météorologiques (directions des vents, force des vents et précipitations).

Comparées aux campagnes de janvier-février 2012 et 2013, les précipitations cumulées, pour la période de piégeage du 18 janvier au 6 mars 2014, ont été respectivement 5,1 et 2,5 fois plus abondantes, ce qui revêt un caractère exceptionnel et la masse de particules collectée a été en augmentation de près de 30%. Dans le détail, les principaux épisodes marquants ont été les suivants :

- Les plus faibles proportions collectées (du 07 au 22 février) sont associées à des vents de secteur S-SE de faible intensité ($5,0 \pm 2,4$ m/s) et à de très faibles précipitations cumulées (26,5 mm) ;
- Les plus fortes proportions collectées (du 23 février au 02 mars), correspondent à une période où les vents sont passés rapidement d'un secteur W-NW (22 février) au secteur S-SW (23 février) pour ensuite se stabiliser en secteur S à SE (25 février au 2 mars), où les vitesses ont dépassé les 10 m/s. Au cours de cette période, les vents étaient modérés ($7,85 \pm 2,76$ m/s) et les précipitations cumulées très faibles (33,2 mm). A la faveur de régimes de vents de secteur S et SE, il est communément observé une remise en suspension des particules latéritiques déposées dans la baie ;
- La fraction fine ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) est quantitativement la plus importante observée, par ailleurs, elle est en augmentation progressive depuis la campagne de janvier-février 2012. De plus, la fraction argileuse progresse au détriment des silts grossiers. Les changements de granulométrie pourraient être liés à des modifications dans les opérations d'excavation ou encore dans la gestion des eaux de ruissellement ;
- Les précipitations entraînent une augmentation significative de la concentration métallique et occasionnent la baisse du ratio Ca/Fe. Toutefois d'une manière générale, les concentrations en métaux diminuent par rapport aux campagnes des années précédentes.

Rappel : les régimes à dominantes E, N et W ne favorisent pas la formation d'un clapot suffisant pour engendrer des remises en suspension des particules, notamment en raison du relief environnant et de l'orientation de la baie ouverte vers le sud. De ce fait, seuls les régimes de secteurs S forts ($FIX > 10$ m/s) permettent l'entrée dans la baie d'une houle capable de brasser les fonds et générer le remaniement des vases latéritiques.

L'importance des fractions carbonatées augmente proportionnellement (ratio Ca/Fe), principalement par l'installation de régimes forts globalement de secteurs SE à S ($FIX > 14$ m/s) capables de mettre en suspension les particules carbonatées plus grossières résultant de l'altération mécanique du platier. Des observations montrent que l'action des vents faibles provenant des secteurs E, N et W contribue au déplacement des masses d'eau enrichies en tests de micro-organismes marins comme les foraminifères.

5.1.2 Canal de la Havannah (Figure 20)

Pour la station du Canal de la Havannah (St60-NE), le dépôt maximal correspond avec un régime de vents de secteurs S à SE modérés (7,5 à 9,8 m/s) et coïncide avec une absence de précipitations ; la quantité la plus faible a été collectée du 03 au 06 mai, alors que plus de 95 mm de précipitations sont tombés. L'augmentation des masses de MES s'expliquerait, en partie, par des apports terrigènes sous formes de néphéloïdes issus de la Baie Kwé qui suivent le courant résiduel de marée. En effet après le 06 mai, une légère baisse du ratio Ca/Fe est observée, passant de 19,7 à 15,9 ; cette modification de la composition géochimique conforte cette hypothèse. Ce phénomène aurait aussi été favorisé par la dominance des vents de secteurs S à SE au cours de cette période qui poussent des masses d'eau chargée en zooplacton.

Contrairement aux régimes de vents, les fortes précipitations enregistrées n'ont pas impacté la quantité de MES collectées dans le secteur du Canal de la Havannah, ce qui confirmerait que les particules collectées ont une origine autre que terrigène. Dans le détail, les principaux épisodes marquants ont été les suivants :

- En termes de variabilité interannuelle, les masses maximales de MES collectées sont exactement du même ordre que pour les campagnes précédentes de juillet-août 2013 et de septembre-octobre 2012 ;
- La fraction fine est quantitativement supérieure à la fraction grossière, elle est comprise entre 65,6 % et 93,2 % alors qu'en juillet-août 2013, les proportions de fractions grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) étaient plus importantes. Outre la sédimentation de tests carbonatés, cette différence significative de granulométrie entre les deux missions pourrait être attribuable à des phénomènes de remise en suspension de particules carbonatées récifales sous l'action mécanique des houles engendrées par des vents forts (la vitesse des vents moyens était de $11,3 \pm 3,6 \text{ m/s}$ en juillet-août 2013 tandis que pour la période de collecte d'avril-juin 2014, la vitesse n'était que de $6,9 \pm 2,5 \text{ m/s}$) ;
- L'analyse minéralogique semi-quantitative a révélé que les MES étaient composées principalement de calcite, d'aragonite ou encore de calcite-magnésienne qui soulignent la dominance quasi-totale de l'influence marine ; ces résultats confirment l'hypothèse de la présence de fortes proportions de tests zoo-planctoniques dans les MES.

5.1.3 Rade Nord (Figure 21)

A la station St15, la variabilité des masses de MES collectées qui sont comprises entre 0,55 g et 32,30 g, est le reflet des effets combinés de la localisation géographique et des contraintes qu'exercent l'ensemble des conditions météorologiques. En effet, cette station se trouve directement exposée à l'influence d'apports terrigènes provenant du Creek de la Rade Nord mais la dispersion du panache est pleinement sujette à la direction du vent. Ainsi, la plus forte quantité de MES collectées (32,30 g) coïncide avec un cumul important de précipitations (411 mm en 48 heures) dans un régime de vents faibles à modérés de secteur SE, tournant secteur NE : ce contexte hydro-climatique autorise l'expansion du panache issu du creek. A contrario, les régimes de vents forts de secteurs S à SE contraignent le panache vers la bordure nord de l'anse, même pour des conditions de précipitations atmosphériques fortes à intenses, comme observées le 18 janvier où 130,3 mm ont été enregistrés et seulement 0,60 g de MES ont été collectés.

L'influence terrigène à cette station se caractérise par :

- La fraction fine ($< 40 \mu\text{m}$) majoritaire, représentant 74,4 à 95,6 % des MES collectées ;
- Des compositions minéralogiques présentant exclusivement de la goéthite et de l'hématite ;
- Des concentrations fortes en Co, Cr, Fe, Mn et Ni, supérieures à celles observées en St06-Kw1, qui progressent respectivement d'un facteur 1,4 ; 1,6 ; 1,2 ; 1,2 et 1,4 par rapport au niveau défini pour l'état de référence de 2007, parallèlement, la concentration en Ca ayant considérablement diminué d'un facteur 5,6.

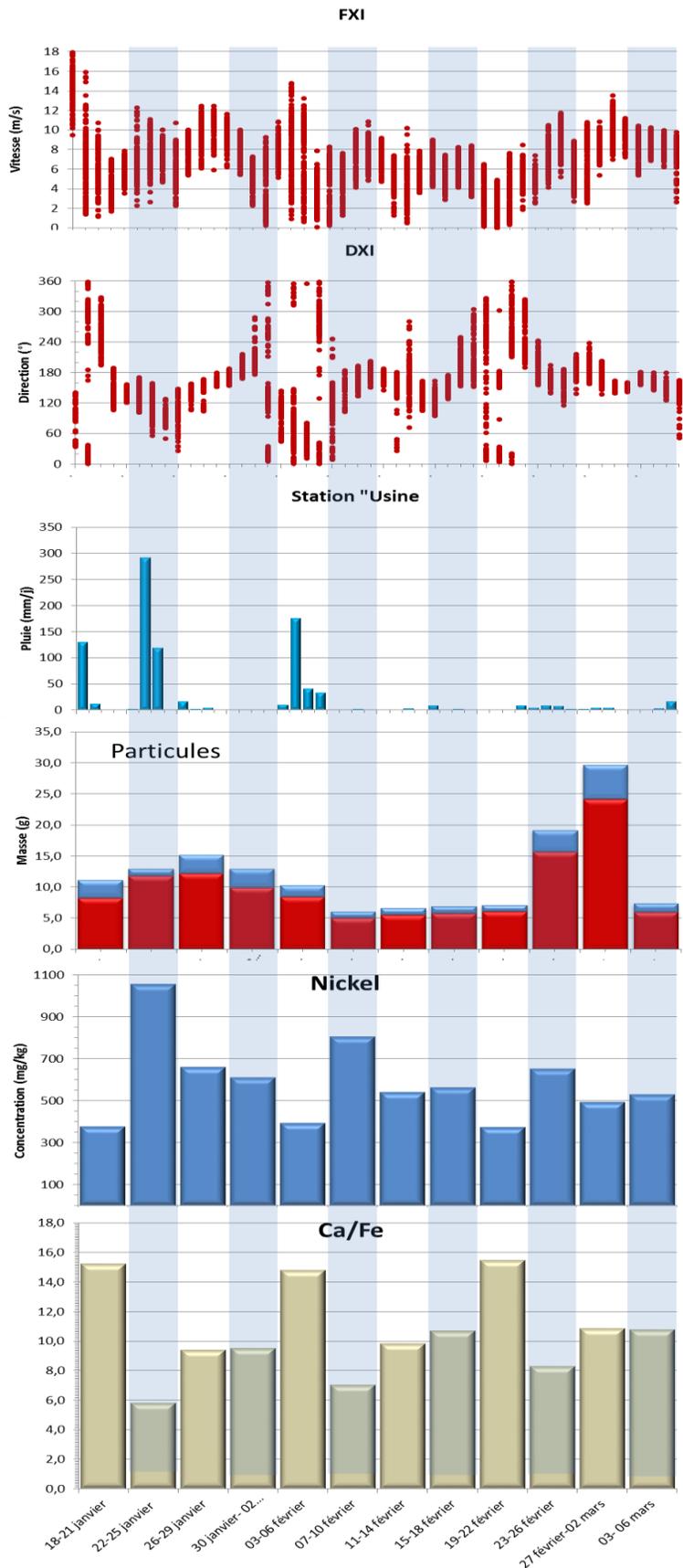


Figure 19 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St06-KW1 pour la période du 18 janvier au 6 mars 2014.

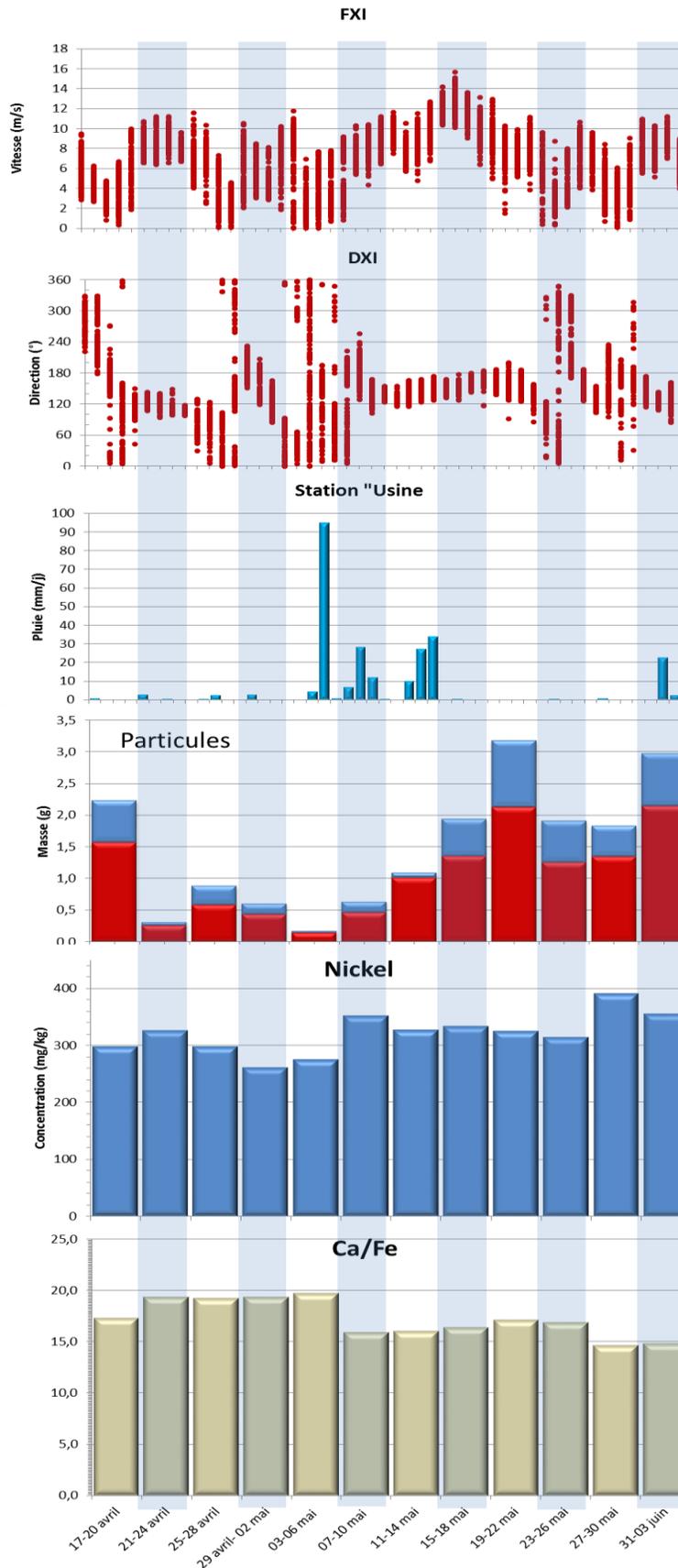


Figure 20 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St60-NE pour la période du 17 avril au 4 juin 2014.

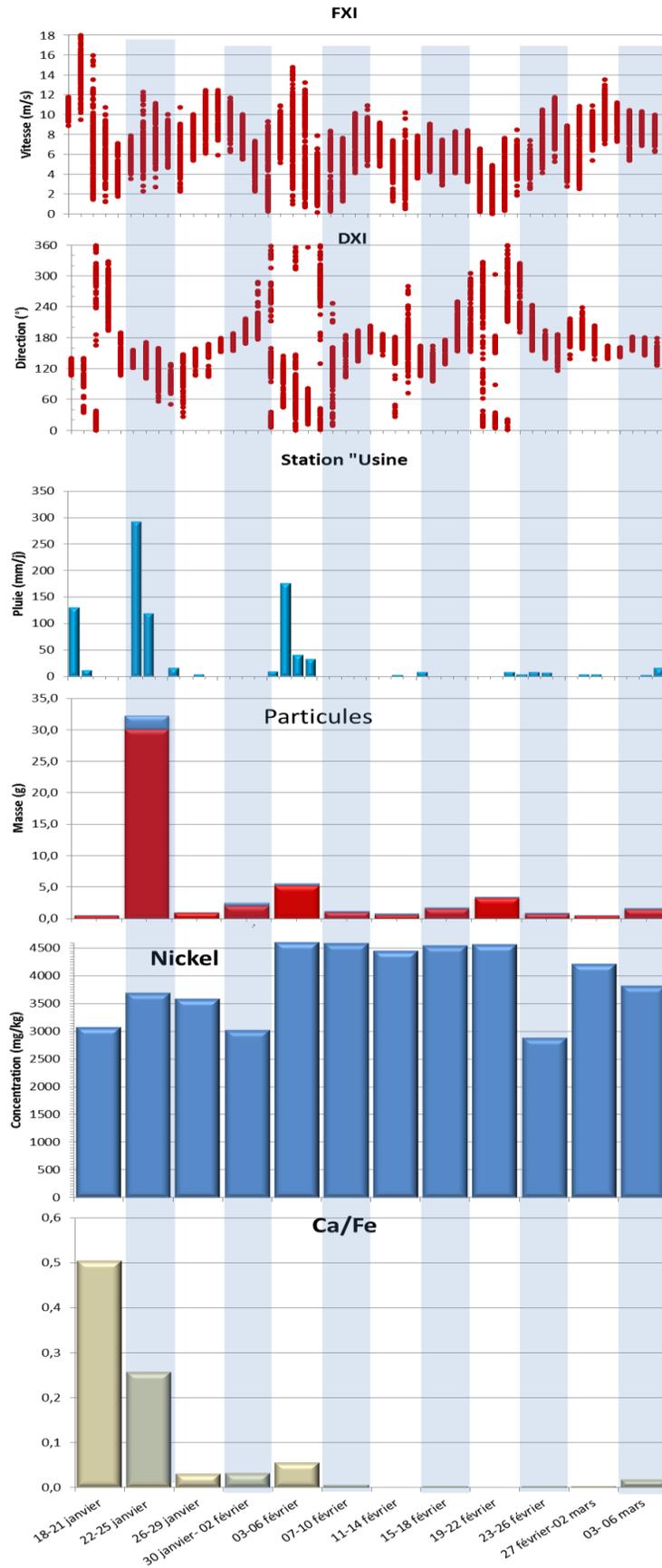


Figure 21 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 μm , concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St15 pour la période du 18 janvier au 6 mars 2014.

5.2 CALCUL DES FLUX DE MATIERES

Les valeurs de densité de flux verticaux en MES et en métaux sont regroupées en Annexe 5.

MATIERE EN SUSPENSION

Les valeurs moyennes et écart-types des flux de particules ont été calculés sur l'ensemble des campagnes réalisées entre juillet 2011 et juin 2014 pour la Baie Kwé, la rade Nord et le Canal de la Havannah (Tableau 21).

Baie Kwé

Entre juillet 2011 et janvier 2014, les flux moyens de MES sont compris entre $27,1 \pm 30,0$ et $60,7 \pm 34,1$ g/m²/j (Tableau 21). Les flux étant généralement plus élevés en saison chaude qu'en saison fraîche, toutes saisons confondues, une tendance à l'augmentation des flux massiques apparaît clairement, la masse collectée étant multipliée par 4 entre novembre 2006 et janvier 2014.

A l'instar des états de référence de novembre 2006 et mars 2007, ces valeurs mettent en évidence une grande variabilité temporelle des flux associée à une périodicité saisonnière. Toutefois, globalement, la progression des flux d'une année sur l'autre est manifeste, comme le montre la mesure des flux pour les mois de mars 2007, janvier 2012, janvier 2013 et janvier 2014 de la saison chaude (Tableau 21) ; pour la campagne de janvier 2014, les flux moyens sont 1,3 fois plus élevés qu'un an auparavant et 2,1 fois plus intenses qu'en mars 2007. Toutefois, il convient de rappeler que la fraction carbonatée a augmenté considérablement, passant de moins de 50% à plus de 80%. Cette augmentation est en accord avec la dilution du signal latéritique des MES collectées.

Canal de la Havannah

Entre juillet 2011 et avril 2014, les flux ont été compris entre $3,5 \pm 3,0$ et $12,7 \pm 15,4$ g/m²/j (Tableau 21). Comme pour la Baie Kwé, une périodicité apparaît montrant que les apports sont plus importants en saison chaude par rapport à la saison fraîche.

Par ailleurs, la période de collecte étant décalée pour des raisons techniques (avril-juin 2014), il semble plus judicieux de rapprocher les résultats de cette campagne aux mesures réalisées en saison fraîche, compte tenu des taux de précipitations. Dès lors, la valeur moyenne de flux d'avril 2014 montre, par rapport à juillet 2013, une progression de l'ordre de 20%, toutefois, elle est similaire à celle de novembre 2007.

Rade du Nord

Le flux moyen mesuré en janvier 2014 est de $22,2 \pm 44,5$ g/m²/j (Tableau 21). L'importance de l'écart-type souligne l'extrême variabilité des flux constatée tout au long de la période de collecte.

Par ailleurs, le flux calculé pour janvier 2014 est de 25 à 40 fois plus fort que les valeurs mesurées en mars 2007 et novembre 2006 pour la définition des états de référence, respectivement des saisons fraîche et chaude. Toutefois, il convient de préciser que les flux mesurés en 2007 ont coïncidé avec des régimes de précipitations peu abondantes (250 mm) réparties régulièrement pendant toute la période de collecte (10 mm en moyenne par jour).

Tableau 21 : Valeurs moyennes et écart-types des densités de flux en matière particulaire au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah) et masse totale sédimentée au cours de la période. Valeurs calculées pour l'ensemble des campagnes de juillet 2011 à avril 2014 ; comparaison avec les valeurs mesurées en 2006 et 2007 (Etat de Référence) aux stations St06-KW1 pour la Baie Kwé et T4B, T4C et TCM) pour le Canal de la Havannah.

Baie Kwé (St06-KW1)

	nov-06	mars-07	juil-11	janv-12	sept-12	janv-13	juil-13	janv-14
Moyenne (g/m ² /j)	14,6	28,3	27,1	39,5	26,4	46,5	58,1	60,7
Ecart-type	7,4	9,2	30,0	33,2	13,1	29,5	87,8	34,1
Masse sédimentée (g/m ²)	700	1132	1299	1894	1267	2231	2786	2914

Canal de la Havannah (St60-NE)

	mars-07	nov-07	juil-11	janv-12	sept-12	janv-13	juil-13	avril-14
Moyenne (g/m ² /j)	26,4	7,8	3,5	10,1	4,9	12,7	6,3	7,4
Ecart-type	33,2	7,7	3,0	9,6	6,5	15,4	7,3	5,1
Masse sédimentée (g/m ²)	527	366	167	483	233	611	300	356

Rade Nord (St15)

	nov-06	mars-07	janv-14
Moyenne (g/m ² /j)	1,1	1,7	22,2
Ecart-type	0,7	1,5	44,5
Masse sédimentée (g/m ²)	26	41	1063

ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM

Baie Kwé

Les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux, dont le Ni, ont augmenté entre 2011 et 2013 (Figure 22). Par contre, pour la campagne de janvier-mars 2014, le flux moyen de Ni est retombé aux valeurs proches définies lors de l'état de référence en mars 2007.

Il est à noter que les valeurs extrêmes du flux de métaux pour cette campagne (janvier-mars 2013) sont toutefois supérieures à celles définies lors de l'état de référence de mars-avril 2007, à l'exception des valeurs minimales en Fe et Ni qui sont plus faibles en 2014 (Tableau 22 et Tableau 23) ; les valeurs maximales du flux de Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont 4,1 ; 2,9 ; 1,4 ; 9,6 et 1,5 fois supérieures par rapport à l'état de référence.

Une telle diminution des flux métalliques doit probablement être recherchée dans une modification potentielle des opérations minières situées sur l'ensemble du bassin versant (préparation de pulpe, niveau de remplissage des bassins de rétention, ouverture des horizons ultramafiques....

Canal de la Havannah

Les densités de flux métalliques sont présentées dans la Figure 22, Tableau 22 et Tableau 23. Les flux moyens ont été calculés pour chaque campagne et leur évolution temporelle peut être illustrée par le cas du nickel (Figure 22). A saison équivalente, celui-ci montre clairement pour la Baie Kwé et le Canal de la Havannah, une diminution notable des flux pour cette campagne alors que la tendance globale, depuis juillet 2011, était à la hausse.

Il est complexe d'expliquer la tendance des flux pour cette campagne car un arrêt des rejets a été exigé par la province Sud en mai 2014, suite au déversement de solution acide dans le Creek de la Rade Nord. Par ailleurs, l'hypothèse concomitante qui lie la diminution des flux métalliques observés à cette station, à la baisse très prononcée des concentrations en métaux dans les particules issues de la Kwé (St06), est également à prendre en considération. En effet, à l'instar des hypothèses émises pour la station St06-KW1, le principal facteur pouvant influencer sur les concentrations en métaux demeure l'activité industrielle et son ralentissement.

Rade Nord

Les densités de flux métalliques sont présentées dans la Figure 22 et les Tableau 22 et Tableau 23.

Les flux moyens métalliques sont en augmentation par rapport à l'état de référence de mars-avril 2007. En effet, ils augmentent d'un facteur 18,7 ; 925 ; 16,1 ; 16,9 et 19,5 pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni, respectivement. A contrario, le flux moyen en Ca présente une diminution d'un 2,7 par rapport à l'état de référence de mars 2007.

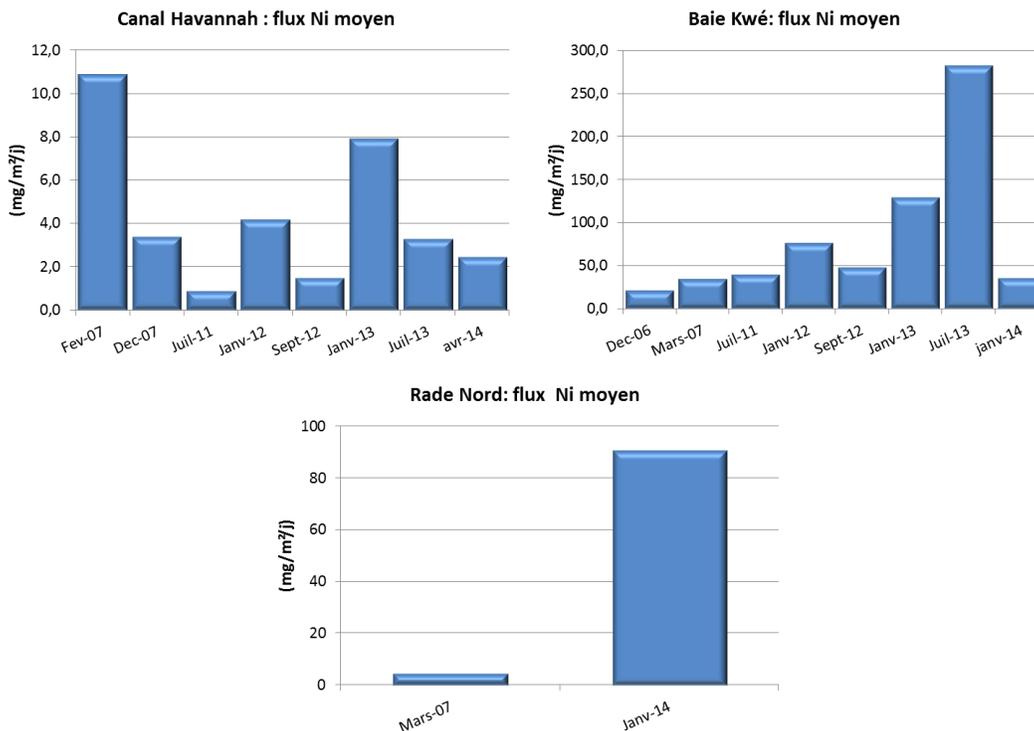


Figure 22 : Evolution temporelle des flux de nickel moyens (mg/m²/j) mesurés au niveau des stations St60-NE, St06-KW1 et St15 depuis 2007 (définition Etat de Référence).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Dans la Baie Kwé, comme dans le Canal Havannah et la Rade Nord, la distribution et la composition des flux de MES dans les eaux, sont régies par :

- l'action combinée de la houle générée par les vents et de la lixiviation des bassins versants lors d'épisodes pluvieux ;
- Les régimes de vent d'un large secteur S qui sont susceptibles de remettre en suspension les particules latéritiques sédimentées (Baie Kwé, ainsi que le long des côtes) pour des vents modérés d'au-moins 10 m/s ;
- Les vitesses des vents supérieures à 10 m/s entraînent aussi la remise en suspension des particules carbonatées issues des récifs frangeants et des platiers récifaux de la baie Kwé et du Canal de la Havannah ;

Dans le Canal de la Havannah, les plus fortes quantités de MES ont été enregistrées bien après trois épisodes pluvieux et un régime de vents forts de secteurs S à SE favorisant les apports océaniques riches en organismes carbonatés. Les flux massiques sont en légère hausse, alors que les flux métalliques diminuent très notablement.

E Baie Kwé, comme dans le Canal Havannah, les flux métalliques moyens, depuis juillet 2011, ont montré une tendance à l'augmentation. De manière inattendue, pour cette campagne de janvier-février 2014, **les flux de métaux ont fortement diminué, si bien que les valeurs ont été proches des états de référence, voire inférieures.**

Parallèlement, le flux de particule a augmenté sensiblement, mais cet accroissement est à relier à l'augmentation de la composante carbonatée des MES

Dans la Rade Nord, la variabilité des masses de MES collectées est le reflet des effets combinés de proximité du Creek de la Rade Nord, de l'intensité des épisodes pluvieux et des conditions de vent qui par alizés soutenus peuvent confiner le panache au nord de l'anse. A l'inverse, par exemple, la plus forte quantité de MES collectées coïncide avec de fortes précipitations (411 mm en 48 heures) dans un régime de vents faibles de secteur SE, tournant secteur NE qui autorisent l'expansion du panache issu du creek. Pour la Rade Nord, les flux métalliques moyens sont en augmentation par rapport à l'état de référence de 2007, notamment pour le Cr.

Tableau 22 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE (Canal de la Havannah) et St15 (rade nord).

ST06-KW1		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison fraîche juillet-août 2011	Min	1 283	0,4	14,6	409	3,5	7,4
	Max	24 519	11,4	392,8	10 460	94,5	185,8
Saison chaude janvier-février 2012	Min	2 501	1,0	31,8	999	7,5	18,0
	Max	29 794	14,6	492,5	14 378	118,8	267,1
Saison fraîche sept-octobre 2012	Min	4 125	1,6	57,1	1 648	12,4	25,9
	Max	15 490	6,1	219,0	6 531	50,9	110,6
Saison chaude janvier-février 2013	Min	3 145	1,9	68,9	1 805	15,2	33,1
	Max	25 147	12,8	478,5	12 630	116,4	228,6
Saison fraîche Juillet-août 2013	Min	810	0,8	25,2	746	5,7	13,8
	Max	12 577	124,4	4 541	105 584	1 098	2 255
Saison chaude de janvier-mars 2014	Min	9 269	0,9	37	735	11	13
	Max	44 440	6,2	192	4 090	68	73

ST60-NE		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison fraîche juillet-août 2011	Min	122	0,01	0,17	5,4	0,08	0,14
	Max	3 732	0,16	5,03	156,9	1,59	2,74
Saison chaude janvier-février 2012	Min	314	0,03	0,7	22	0,20	0,46
	Max	9 543	0,93	21,4	736	9,16	13,38
Saison fraîche sept-octobre 2012	Min	nd	nd	nd	Nd	nd	nd
	Max	6110	0,60	9,8	333	3,22	6,49
Saison chaude janvier-février 2013	Min	152	0,14	0,6	16	0,1	0,3
	Max	16 479	1,05	43,8	1 364	14,3	24,6
Saison fraîche Juillet-août 2013	Min	219	0,1	1,0	34	0,5	0,5
	Max	7093	0,7	19,1	664	6,5	11,9
Saison Chaude avril- juin 2014	Min	272	0,01	0,5	14	0,2	0,2
	Max	5 007	0,3	9,3	304	3,1	5,3

ST15		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison fraîche Janvier-mars 2014	Min	4	1	30	616	7	9
	Max	1 335	48	2 430	41 519	429	598

Tableau 23 : Valeurs minimales, maximales et moyenne des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), T4B et T4C (Canal de la Havannah) obtenues lors de la phase de définition de l'Etat de Référence (2007-2008).

		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
ST06-KW1							
Saison fraiche	Min	1 781	0,3	11,8	515	0,9	8,6
nov-déc 2006	Max	8 957	1,5	63,4	2 739	6,3	45,8
Saison chaude	Min	4 953	0,6	25,2	1 105	1,1	18,7
mars-avril 2007	Max	1 1267	1,5	67,1	2 927	7,1	49,5
T4C ET T4B							
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison chaude	Min	2 057	1,30	0,17	106	13,1	1,6
février/mars 2007	Max	42 564	1,39	0,97	1700	13,8	26,7
Saison fraiche	Min	611	0,25	0,05	26	-	0,4
nov-déc 2007	Max	8 418	0,51	9,14	540	-	11,0
ST15							
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Saison chaude	Moyenne	494	0,4	0,4	350	3	5
mars-avril 2007							

6 CONCLUSION

Pour la période d'étude comprise entre le 18 janvier et le 6 mars 2014 (saison chaude), les vents ont montré une variabilité temporelle passant du secteur S à E-SE avec des rotations dans les secteurs NW (qui ont été précédées ou suivies d'incursions de secteur N à NE). La période a été marquée par des épisodes pluvieux d'importance pour lesquels il a été enregistré 928,8 mm de précipitations cumulées, ce qui revêt un caractère exceptionnel pour la saison, en janvier-février 2012 et 2013 les précipitations cumulées n'ont été respectivement que de 5,1 et 2,5 fois moins abondantes.

La période du 17 avril au 4 juin a été marquée par un seul épisode pluvieux significatif (95mm) et par quatre épisodes de moindre intensité (23,1 à 34,3 mm). Au total 263,5mm de précipitations ont été enregistrés lors de la période de la collecte. La direction des vents était majoritairement orientée secteur E-SE à S-SE bien que quelques incursions de secteur W, W-SW, E et E-NE aient été enregistrées. La vitesse des vents moyens journaliers, de l'ordre de $6,9 \pm 2,5$ m/s, reste inférieure aux normales saisonnières.

1. BAIE KWE (St06)

En Baie Kwé, la quantité de MES en suspension est tributaire des apports terrigènes liés à la pluviométrie, mais également, des phénomènes de remobilisation des particules qui sont favorisés par des régimes de vents principalement de secteurs S à SE. Le contexte hydro-climatique ci-dessus a conduit aux observations suivantes :

- Les MES collectées sont majoritairement composées de particules fines ($\phi < 40 \mu\text{m}$) ;
- Les quantités de MES les plus faibles sont associées à des vents de secteur S-SE de faible intensité ($5,0 \pm 2,4$ m/s) et de très faibles précipitations cumulées (26,5 mm) ;
- Les plus fortes proportions de MES, correspondent à une période de faibles précipitations cumulées (33,2 mm) mais où les vents se sont stabilisés au secteur S à SE avec des vitesses dépassant les 10-12 m/s ;
- Depuis juillet 2011, les flux métalliques moyens décrivaient une tendance à l'augmentation. En 2014, les flux métalliques ont présenté une baisse significative, si bien que les valeurs sont inférieurs à celles établies en juillet-août 2011. Par contre, les flux maxima de Co, Cr, Fe, Mn et Ni demeurent, respectivement 4,1 ; 2,9 ; 1,4 ; 9,6 et 1,5 fois supérieurs, à celui mesuré pour l'état de référence de 2007.

2. RADE NORD (St15)

Les masses de MES collectées sont extrêmement variables. Cette variabilité est le fait conjoint, d'une part, de l'exposition directe aux apports terrigènes du Creek de la Rade Nord et, d'autre part, le forçage des mécanismes de dispersion du panache sous influence des conditions météorologiques. Dans ces conditions de fin de saison chaude 2014, les observations suivantes ont été réalisées :

- Les plus fortes quantités de MES collectées coïncident avec des précipitations soutenues et un régime de vents faibles à modérés de secteur SE, tournant secteur NE ; les plus faibles, aux régimes de secteur E-SE de forte intensité (>10 m/s), indépendamment du taux de précipitations ;
- L'influence terrigène est quasi-totale et se caractérise par :
 - La fraction fine majoritaire, représentant 74,4 à 95,6 % des MES collectées ;
 - Une composition minéralogique quasi-exclusivement représentée par la goethite et l'hématite ;

- Des concentrations fortes en Co, Cr, Fe, Mn et Ni (supérieures à celles régulièrement observées en St06-Kw1) ;
- Des flux de MES et des flux métalliques moyens en nette progression par rapport à l'état de référence de 2007.

3. CANAL DE LA HAVANNAH (NE-60)

Le contexte hydro-climatique, ci-dessus, a conduit aux observations suivantes :

- Le dépôt maximal de MES, étant donné que l'usine a dû stopper progressivement ses activités suite au déversement d'acide du 7 mai, ces MES proviendraient de néphéloïdes qui prennent naissance en baie Kwé plusieurs jours avant, sous l'effet combiné de fortes précipitations et de la dominance des vents de secteurs S à SE (cette interprétation semble confortée par une légère baisse du ratio Ca/Fe passant de 19,7 à 15,9). Une possibilité serait qu'elles proviendraient aussi de masses d'eau enrichies en zooplancton ;
- La seconde plus forte quantité de MES échantillonnées (2,98 g, godet St60-NE-12, 31 mai-3 juin) correspond à des vents d'un large secteur S à E-SE accompagnés de faibles pluies (Figure 20). Cette observation suggère que les régimes de vents ont une plus forte influence sur les quantités de MES collectées que les précipitations;
- Dans les MES, la fraction fine est majoritaire (oscillant entre 65,57 et 93,23 %) alors qu'en juillet-août 2013, la fraction grossière ($\varnothing > 40 \mu\text{m}$) était plus importante. Cette différence pourrait s'expliquer par l'action de vents forts ($11,3 \pm 3,6 \text{ m/s}$) en juillet-août 2013 par rapport à avril-juin 2014 où la vitesse des vents n'était que de $6,9 \pm 2,5 \text{ m/s}$;
- L'analyse minéralogique semi-quantitative a révélé que les MES étaient composées principalement de calcite, d'aragonite ou encore de calcite-magnésienne qui soulignent la dominance quasi-totale de l'influence marine, ce résultat étant largement appuyé par les valeurs du ratio Ca/Fe qui sont élevées pour cette campagne ;
- La concentration en soufre dans les MES est variable pour cette campagne et la concentration moyenne en soufre est en augmentation comparée aux campagnes précédentes à mettre en parallèle aux concentrations de soufre de l'effluent marin ;
- La baisse des densités de flux métalliques est complexe à expliquer, probablement influencée par l'arrêt total ou partiel des activités industrielles. Les flux métalliques présentent des valeurs légèrement plus faibles que celles définies par l'état de référence. Cette baisse pourrait aussi être causée par une baisse de la fréquence des apports terrigènes sous forme de néphéloïdes.

Les multiples accidents (rupture de l'émissaire marin, déversement acide...) rendent les interprétations sur les flux difficiles pour les campagnes de janvier-mars et avril-juin 2014, le fait qu'aucune donnée relative au bassin versant de la Kwé ne soit fournie complique les interprétations, de plus, les données relatives à l'effluent pourraient aider l'interprétation sur l'augmentation des concentrations en soufre dans les MES du Canal Havannah.

REFERENCES

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, 1997. E1850 – 97 : Standard Guide for Selection of Resident Species as Test Organisms for Aquatic and Sediment Toxicity Tests. American Society for Testing and Material – International, West Conshohocken, PA, United States, 13 p.

Bodeř & Pointeau, 2009 – Bilan de la réactivité géochimique de l'effluent. Modélisation chimie-transport en champs proche du diffuseur. DEN/DTN/SMTM/LMTE/NT/2009/05 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1124), 58p.

Chaurand, P.: Apport de la cristallographie et de la spéciation du chrome et du vanadium à la modélisation de l'altération de granulats artificiels (sous-produits d'aciérie) thèse. (2006)

Douillet P. et Fernandez JM, 2009. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Simulation annuelle de la sédimentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 55p.

Derex P, Douillet P, Le Gendre R, 2008b. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle de transport. Simulation annuelle du rejet. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 196p.

McBride M.B., *Environmental chemistry of soils*, Oxford University Press, Oxford, 1994.

Hiemstra T., De Wit J.C.M., Van Riemsdijk W.H., Multisite proton adsorption modeling at the solid/solution interface of (hydr)oxides: A new approach. II. Application to various important (hydr)oxides, *J. Colloid Interface Sci.* 133 (1989) 105-117.

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.

ISO, 2006a. ISO 10253: Qualité de l'eau – Essai d'inhibition de la croissance des algues marines avec *Skeletonema costatum* et *Phaeodactylum tricornutum*. Organisation Internationale de Standardisation (ISO), Genève, Suisse, 12 p.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : AIRE D'ETUDE POUR LE SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES ISSUES DU PROCESS DE TRANSFORMATION DU MINERAI DE L'USINE DE PRODUCTION ET DES ACTIVITES D'EXCAVATION DE MINE DE VALE-NC. LA STATION St60-NE EST LOCALISEE A 60M DU REJET DE L'EFFLUENT MINIER DE VALE-NC. EN BAIE KWE LE PIEGE A SEDIMENTS A ETE MOUILLE A LA STATION St06-KW1. LA STATION St15 SE SITUE A L'EMBOUCHURE DU CREEK DE LA RADE NORD.	10
FIGURE 2 : PUISSANCE TYPE DE L'EPaisseur DE MARQUAGE PAR L'EFFLUENT (RHODAMINE-WT) POUR DES CONDITIONS COURANTOLOGIQUES DE MI-MAREES DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET DE VIVE-EAU (DROITE) AU NIVEAU DE LA STATION St60-SW.	10
FIGURE 3 : ENREGISTREMENT DES « TAUX DE PRECIPITATIONS JOURNALIERS (RR) » EN (MM/J) A LA STATION METEOROLOGIQUE DE L'« USINE-PILOTE » DE VALE-NC, « DIRECTION DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (DD) » EN (°) ET « VITESSE DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (FF) » EN (M/S) A LA STATION DU RECIF IORO, POUR LA PERIODE DU 11 JANVIER AU 6 MARS 2014.....	14
FIGURE 4 : ENREGISTREMENT DES « TAUX DE PRECIPITATIONS JOURNALIERS (RR) » EN (MM/J) A LA STATION METEOROLOGIQUE DE L'« USINE-PILOTE » DE VALE-NC, « DIRECTION DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (DD) » EN (°) ET « VITESSE DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (FF) » EN (M/S) A LA STATION DU RECIF IORO, POUR LA PERIODE DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014.....	15
FIGURE 5 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GOGETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014 EN BAIE KWE (St06-KW1). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM).....	17
FIGURE 6 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES EN BAIE KWE PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014.	17
FIGURE 7 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GOGETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014 EN BAIE KWE (St06-KW1).....	18
FIGURE 8 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GOGETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, AU NORD-EST DU DIFFUSEUR (St60-NE). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM).....	19
FIGURE 9 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014.	20
FIGURE 10 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GOGETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE).	21
FIGURE 11 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GOGETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, AU SUD-OUEST DU DIFFUSEUR (St60-SW). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (<40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM).	22
FIGURE 12 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES DANS LA RADE NORD (St15) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014.	22
FIGURE 13 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GOGETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014 DANS LA RADE NORD (St15).	23
FIGURE 14 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (St06-KW1) ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014.....	26
FIGURE 15 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE CA, FE, CO, CR, MN ET NI CONTENUS DANS LES MES DANS LE CANAL HAVANNAH POUR L'ETAT DE REFERENCE ET POUR LA CAMPAGNE D'AVRIL-JUIN 2014.....	28
FIGURE 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL HAVANNAH (St60-NE) ENTRE LE 17 AVRIL ET LE 4 JUIN 2014.	29
FIGURE 17 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES GOGETS S ENTRE LE 17 AVRIL ET 4 JUIN AOUT 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE).	30

FIGURE 18 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL HAVANNAH (St60-NE) ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014.	31
FIGURE 19 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI), TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO Ca/Fe A LA STATION St06-KW1 POUR LA PERIODE DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014.	35
FIGURE 20 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI), TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO Ca/Fe A LA STATION St60-NE POUR LA PERIODE DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014.	36
FIGURE 21 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI), TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO Ca/Fe A LA STATION St15 POUR LA PERIODE DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014.	37
FIGURE 22 : EVOLUTION TEMPORELLE DES FLUX DE NICKEL MOYENS (MG/M ² /j) MESURES AU NIVEAU DES STATIONS St60-NE, St06-KW1 ET St15 DEPUIS 2007 (DEFINITION ETAT DE REFERENCE).	40

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LOCALISATION DES TROIS STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A PARTICULES SEQUENTIELS : CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE), EN RADE NORD (St15) ET EN BAIE KWE (St06-KW1). CES COORDONNEES SONT CONFORMES AU REFERENTIEL WGS-84.	9
TABLEAU 2 : LISTE DES ECHANTILLONS COLLECTES AUX STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A SEDIMENTS (St60-SW, StSt60-NE ET St06-KW1) ET PERIODES DE COLLECTE ENTRE JUILLET ET AOUT 2013.	11
TABLEAU 3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (STATION St06-KW1) PAR LE PIEGE A PARTICULES, DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014.	18
TABLEAU 4 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-NE) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014.	20
TABLEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LA RADE NORD DE PRONY (STATION St15) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 6 MARS 2014.	23
TABLEAU 6 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014 (STATION St06-KW1 ; n=12).	25
TABLEAU 7 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 9 JANVIER ET 25 FEVRIER AOUT 2013 (STATION St06-KW1 ; n=12).	25
TABLEAU 8 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE LORS DE LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE ET POUR LA CAMPAGNE DE JANVIER A MARS 2014.	26
TABLEAU 9 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014 (STATION St06-KW1 ; n=12).	26
TABLEAU 10 : EVOLUTION TEMPORELLE ENTRE 2012 ET 2014 DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 AUX COURS DE DIFFERENTES CAMPAGNES. COMPARAISON AVEC LES VALEURS DE 2007/2008.	27
TABLEAU 11 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH DU 17 AVRIL AU 4 JUIN 2014 (STATION St60-NE ; n=12).	27
TABLEAU 12 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 12 JUILLET ET 28 AOUT 2013 (STATION St60-NE ; n=12).	27
TABLEAU 13 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL HAVANNAH POUR LES CAMPAGNES D'AVRIL-JUIN 2014 ET DE 2007 (ETAT DE REFERENCE).	28
TABLEAU 14 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 17 AVRIL ET LE 6 JUIN AOUT (STATION St60-NE ; n=12).	29
TABLEAU 15 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 12 JUILLET ET LE 28 AOUT 2013 (STATION St60-NE ; n=12).	29
TABLEAU 16 : EVOLUTION TEMPORELLE ENTRE 2011 ET 2014 DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St60-NE. COMPARAISON AVEC LES VALEURS DE 2007/2008.	30
TABLEAU 17 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LA RADE NORD ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014 (STATION St15 ; n=12).	31
TABLEAU 18 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LA RADE NORD LORS DE LA CAMPAGNE D'AVRIL-JUIN 2014 ET LORS DE L'ETAT DE REFERENCE DE MARS 2007.	31
TABLEAU 19 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014 (STATION St15; n=12).	31
TABLEAU 20 : COMPARAISON TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St15 ENTRE LES CAMPAGNES DE 2014 ET DE MARS 2007.	32

TABLEAU 21 : VALEURS MOYENNES ET ECART-TYPES DES DENSITES DE FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH) ET MASSE TOTALE SEDIMENTEE AU COURS DE LA PERIODE. VALEURS CALCULEES POUR L'ENSEMBLE DES CAMPAGNES DE JUILLET 2011 A AVRIL 2014 ; COMPARAISON AVEC LES VALEURS MEASUREES EN 2006 ET 2007 (ETAT DE REFERENCE) AUX STATIONS St06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET T4B, T4C ET TCM) POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH.	39
TABLEAU 22 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE (CANAL DE LA HAVANNAH) ET St15 (RADE NORD).....	41
TABLEAU 23 : VALEURS MINIMALES, MAXIMALES ET MOYENNE DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), T4B ET T4C (CANAL DE LA HAVANNAH) OBTENUES LORS DE LA PHASE DE DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE (2007-2008).....	42

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DES METHODES DE TRAITEMENT ET D'ANALYSES DES ECHANTILLONS.

**ANNEXE 2 : VALEURS JOURNALIERES DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES (DONNEES VALE-NC) :
PRECIPITATIONS, DIRECTION ET VITESSE DU VENT.**

**ANNEXE 3 : RESULTATS D'ANALYSES ET MESURES DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH ET DE LA
BAIE KWE : MASSES COLLECTEES, GRANULOMETRIES DES POPULATIONS DE GRAINS,
COMPOSITIONS MINERALOGIQUES, TENEURS EN CARBONATES ET OBSERVATIONS
MICROSCOPIQUES.**

**ANNEXE 4 : CONCENTRATIONS EN METAUX TOTAUX, CALCIUM ET SOUFRE DANS LES MES DE LA BAIE
KWE ET DU CANAL DE LA HAVANNAH.**

ANNEXE 5 : RESULTATS DE CALCULS DES VALEURS DE DENSITE DE FLUX EN MES ET EN METAUX.

ANNEXE – 1

Description des méthodes de traitement et d'analyses des échantillons

Evaluation des flux de MES

Les flux verticaux de particules apportées par le réseau hydrologique sont estimés par collecte de séries temporelles d'échantillons de MES. Cette opération est assurée par le déploiement de pièges à sédiment de type séquentiel de 0,05 m² de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui sont grésés sur une ligne de mouillage équipée avec un largueur acoustique. La durée d'immersion a été de 1,5 mois (du 18 janvier au 20 mars 2014 pour les stations ST15 et ST06-KW1 ; du 17 avril au 05 juin 2014 pour la station NE60).

La collecte séquentielle est réalisée avec un pas de temps programmé de 96 heures (4 jours), soit un total de 12 échantillons pour 48 jours.

Les matières en suspension collectées sont traitées au laboratoire, conditionnées puis conservées par congélation dans des sachets à usage unique. Les MES sont ensuite caractérisées de manière à évaluer les fractions terrigènes et marines (carbonates). Les flux sont estimés (g/m²/j) et confrontés aux différents régimes météorologiques et/ou hydrodynamiques.

Techniques et analyses

Dosage des carbonates

Les teneurs en carbonate sont déterminées sur les fractions pélitiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) par la méthode dite du « calcimètre de Bernard ». Cette méthode consiste en une attaque du sédiment grâce à une solution d'acide chlorhydrique qui génère la formation de CO₂. Le volume de gaz (CO₂) est titré et la concentration en carbonate de calcium est déterminée par relation stœchiométrique.

Granulométrie

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction $< 40 \mu\text{m}$ après élimination des organismes « actifs » (Swimmers). La détermination de la distribution de ces populations est réalisée sur quatre échantillons par granulométrie laser (Malvern master Sizer 2000) sur la fraction inférieure à 40 μm . La granulométrie laser est réalisée à l'Université de Nouvelle-Calédonie.

Minéralogie

Les sources et l'évolution temporelle des matériaux sont estimées en fonction des espèces minérales décelées. Les déterminations de ces espèces sont effectuées par diffraction de rayons X (DRX) sur les 4 échantillons pélitiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) de l'étude granulométrique. Cette analyse a été confiée à l'Université d'Auckland (School of Environment), Nouvelle-Zélande.

Dosage des métaux dans les MES

Le dosage des métaux, nécessaire pour le suivi des flux de polluants, est conduit par attaque totale des fractions

péltiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) des sédiments par fusion alcaline. Seuls, Ca et 5 métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont analysés par ICP-OES. Des échantillons de référence (MESS-3 et PACS-2) ont été attaqués selon le même protocole pour la validation des résultats de mesures.

Dosage du soufre

Le dosage du soufre est conduit par attaque totale des fractions péltiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) des sédiments, il s'agit d'une attaque acide à haute température en conditions hyperbares. L'analyse du soufre est effectuée par ICP-OES. Ce dosage est effectué seulement à la station NE60 pour déterminer les éventuelles formations de gypse lors du rejet de l'effluent.

Dosage des HCT

L'analyse des hydrocarbures totaux est effectuée sur le sédiment brut par la norme NF EN ISO 9377-2. Ce dosage n'a pas pu être conduit en raison du manque de masse récoltée dans les godets des pièges à sédiments.

ANNEXE – 2

Valeurs journalières des paramètres météorologiques (données Vale-NC et station météo IORO) : précipitations, direction et vitesse du vent.

Date	Pluie (mm)	FXI (m/s)	DXI (°)
11/01/2014	0	0,2	9,63
12/01/2014	3,4	1,6	8
13/01/2014	0	0	5,98
14/01/2014	0	0,2	8,62
15/01/2014	3,6	0	9,63
16/01/2014	32	0,2	9,25
17/01/2014	29,7	8,6	9,48
18/01/2014	5,4	130,3	10,57
19/01/2014	10,8	12,2	13,52
20/01/2014	7,2	0	9,4
21/01/2014	0,8	0	3,42
22/01/2014	0	2	4,74
23/01/2014	0	291,7	5,28
24/01/2014	4,6	119,3	7,85
25/01/2014	0,2	0,4	4,97
26/01/2014	17,2	16,2	4,35
27/01/2014	207,3	1,8	5,67
28/01/2014	3,6	4	7,54
29/01/2014	2,6	0,4	11,42
30/01/2014	0,2	0	10,26
31/01/2014	1,2	0	9,87
01/02/2014	0,2	0	6,14
02/02/2014	0	0	1,94
03/02/2014	0	9,8	8,62
04/02/2014	1,6	175,6	7,15
05/02/2014	7,2	41,5	3,5
06/02/2014	0	33,8	7,85
07/02/2014	80	0	0,47
08/02/2014	3,6	0,2	2,56
09/02/2014	0	2	4,12
10/02/2014	0,2	0,6	8,24
11/02/2014	0	0	7,93
12/02/2014	0	0	5,05
13/02/2014	0	3	7,15
14/02/2014	0	1,4	6,84
15/02/2014	0,4	8,9	6,76
16/02/2014	0	0	5,21

Date	Pluie (mm)	FXI (m/s)	DXI (°)
17/02/2014	1,8	5,28	163
18/02/2014	0,2	5,83	152
19/02/2014	0	4,74	315
20/02/2014	0	1,55	9
21/02/2014	0	0,54	14
22/02/2014	8,4	4,43	295
23/02/2014	4,8	4,43	211
24/02/2014	8,4	5,75	163
25/02/2014	7,2	9,87	162
26/02/2014	1,6	8,7	183
27/02/2014	2,2	3,73	191
28/02/2014	4,8	10,26	162
01/03/2014	4,2	10,41	149
02/03/2014	0	9,71	159
03/03/2014	0	7,93	158
04/03/2014	1,4	8,39	165
05/03/2014	3,4	7,54	149
06/03/2014	16,7	7,15	138

Date	Pluie (mm)	FXI (m/s)	DXI (°)
17/04/2014	1,2	5,67	282,56
18/04/2014	0	4,31	254,92
19/04/2014	0	3,44	157,78
20/04/2014	0	3,84	109,88
21/04/2014	3,2	6,69	116,60
22/04/2014	0	8,55	125,46
23/04/2014	0,6	8,24	120,48
24/04/2014	0,4	9,06	110,10
25/04/2014	0,2	7,96	105,42
26/04/2014	0,8	6,76	90,92
27/04/2014	2,6	6,80	83,53
28/04/2014	0	3,61	63,95
29/04/2014	0	2,72	157,54
30/04/2014	3,2	5,75	192,97
01/05/2014	0	5,65	167,12
02/05/2014	0	4,35	121,82
03/05/2014	0,4	7,20	69,51
04/05/2014	0	6,88	87,13
05/05/2014	4,6	2,25	175,47
06/05/2014	95	4,31	137,74
07/05/2014	1,2	3,52	83,75
08/05/2014	7	4,94	112,63
09/05/2014	28,7	7,27	180,54
10/05/2014	12,4	8,62	143,99
11/05/2014	0,6	8,83	137,44
12/05/2014	0	9,38	133,85
13/05/2014	10,4	7,60	142,13

Date	Pluie (mm)	FXI (m/s)	DXI (°)
14/05/2014	27,6	8,57	145,81
15/05/2014	34,3	10,63	153,01
16/05/2014	0	12,37	152,15
17/05/2014	0,8	12,38	152,80
18/05/2014	0,2	11,62	163,63
19/05/2014	0	9,75	167,26
20/05/2014	0	9,43	161,79
21/05/2014	0	7,96	153,59
22/05/2014	0	7,54	155,12
23/05/2014	0	7,96	134,44
24/05/2014	0	5,81	96,53
25/05/2014	0,6	2,85	183,88
26/05/2014	0	6,15	237,25
27/05/2014	0,2	7,87	155,81
28/05/2014	0	7,38	122,72
29/05/2014	1,2	4,66	152,68
30/05/2014	0	3,60	135,38
31/05/2014	0,4	4,87	173,26
01/06/2014	0	7,79	145,41
02/06/2014	0	7,97	128,18
03/06/2014	23,1	8,90	124,55
04/06/2014	2,6	6,40	124,15

Valeurs horaires des paramètres météorologiques (données Station « Usine-pilote » de Vale et station « récif loro ») : direction et vitesse du vent (DXI et FXI).

Etant donné la grande quantité d'information enregistrée (1552 lignes), les valeurs ne figurent pas en annexe mais peuvent être obtenues sur simple demande à AEL.

ANNEXE – 3

Résultats d'analyses et mesures des MES du Canal de la Havannah et de la Baie Kwé: masses collectées, granulométries des populations de grains, compositions minéralogiques, teneurs en carbonates et observations microscopiques.

MES SEDIMENTEE

PERIODE DE COLLECTE	STATION	MASSE COLLECTEE (g)	STATION	MASSE COLLECTEE (g)
18-21 janvier	St06-KW1-1	11,142	ST15-1	0,600
22-25 janvier	St06-KW1-2	12,943	ST15-2	32,296
26-29 janvier	St06-KW1-3	15,203	ST15-3	1,103
30 janvier- 02 février	St06-KW1-4	12,963	ST15-4	2,570
03-06 février	St06-KW1-5	10,353	ST15-5	5,706
07-10 février	St06-KW1-6	6,126	ST15-6	1,292
11-14 février	St06-KW1-7	6,692	ST15-7	0,893
15-18 février	St06-KW1-8	6,936	ST15-8	1,880
19-22 février	St06-KW1-9	7,112	ST15-9	3,521
23-26 février	St06-KW1-10	19,122	ST15-10	1,019
27 février-02 mars	St06-KW1-11	29,674	ST15-11	0,548
03- 06 mars	St06-KW1-12	7,412	ST15-12	1,743

PERIODE DE COLLECTE	STATION	MASSE COLLECTEE (g)
17-20 avril	NE60-1	2,232
21-24 avril	NE60-2	0,319
25-28 avril	NE60-3	0,895
29 avril- 02 mai	NE60-4	0,610
03-06 mai	NE60-5	0,180
07-10 mai	NE60-6	0,637
11-14 mai	NE60-7	1,093
15-18 mai	NE60-8	1,940
19-22 mai	NE60-9	3,179
23-26 mai	NE60-10	1,917
27-30 mai	NE60-11	1,838
31-03 juin	NE60-12	2,982

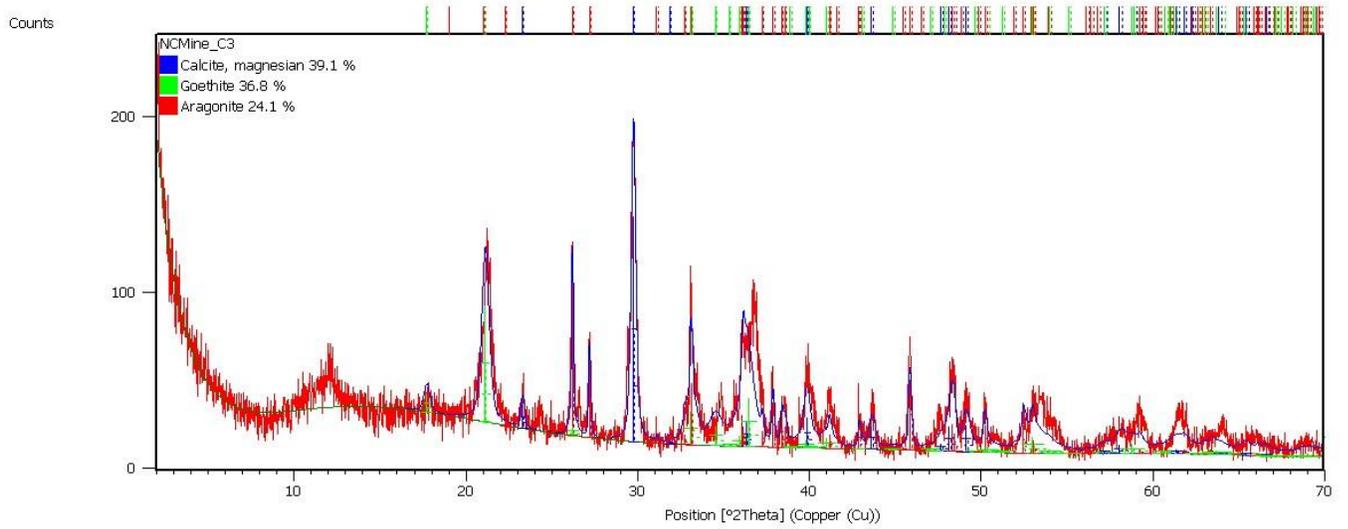
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

POURCENTAGE VOLUMETRIQUE ENTRE LES CLASSES GRANULOMETRIQUES							
	0,02-2 µm	2-20 µm	20-40 µm	40-50 µm	50-63 µm	63-200 µm	> 200 µm
KW1-3	24,9	56,1	15,3	2,3	1,1	0,3	0,0
KW1-7	25,4	53,7	16,5	2,7	1,4	0,3	0,0
KW1-11	30,0	55,6	11,7	1,7	0,8	0,1	0,0
KW1-12	26,4	57,0	13,6	1,9	0,9	0,2	0,0
NE60-1	13,1	40,7	28,0	7,4	5,3	3,6	1,9
NE60-8	18,9	48,0	23,3	5,1	3,1	1,5	0,0
NE60-9	16,7	48,9	23,4	5,5	3,6	1,9	0,0
NE60-12	20,4	48,4	23,3	4,5	2,5	0,9	0,0
St15-2	26,8	57,7	13,0	1,6	0,8	0,2	0,0
St15-5	24,8	58,6	13,8	1,8	0,8	0,1	0,0
St15-9	27,7	56,1	13,3	1,9	0,9	0,2	0,0
St15-12	19,1	55,4	18,0	3,5	2,2	1,8	0,1

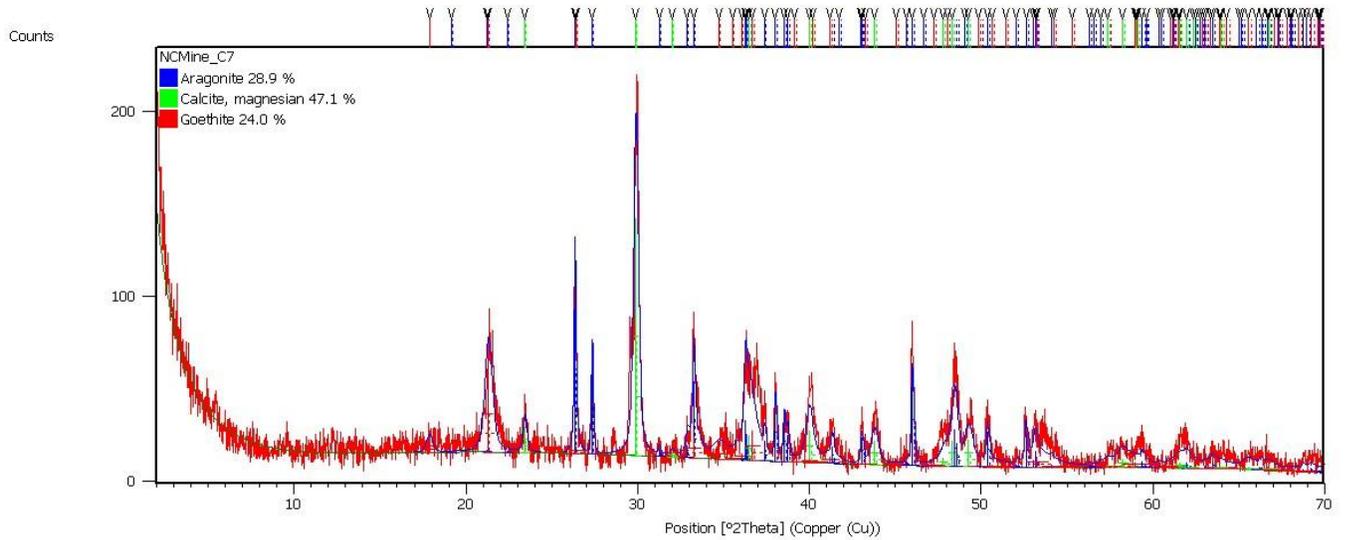
Nd = non déterminée par manque de matière

COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DE LA BAIE KWE

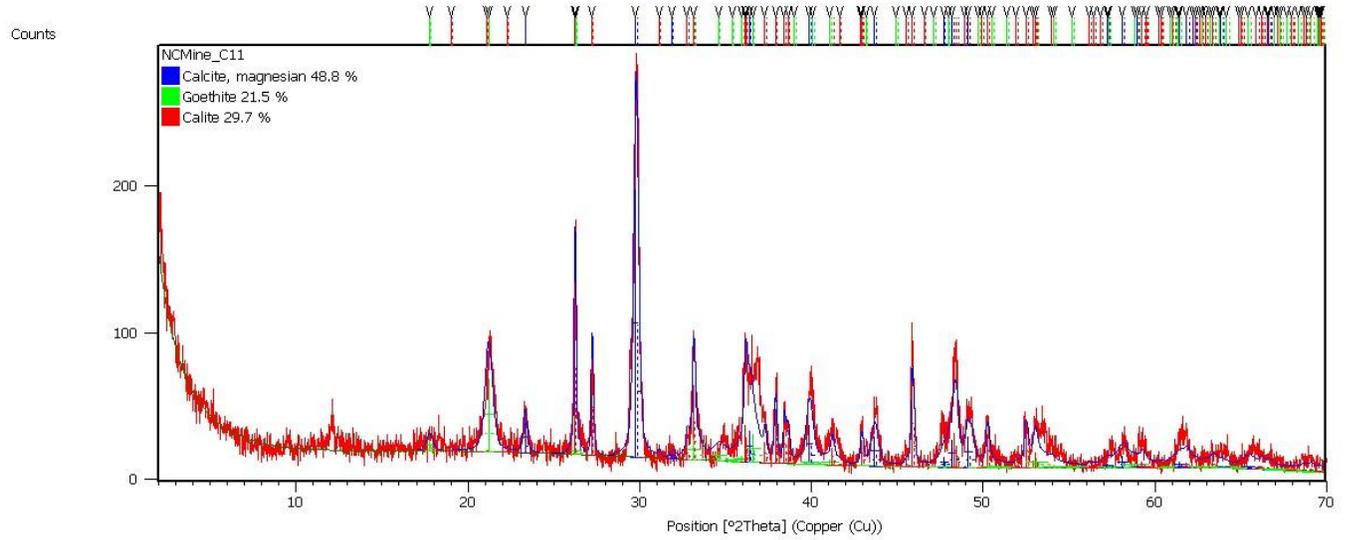
Station St06-KW1 ; godet 3



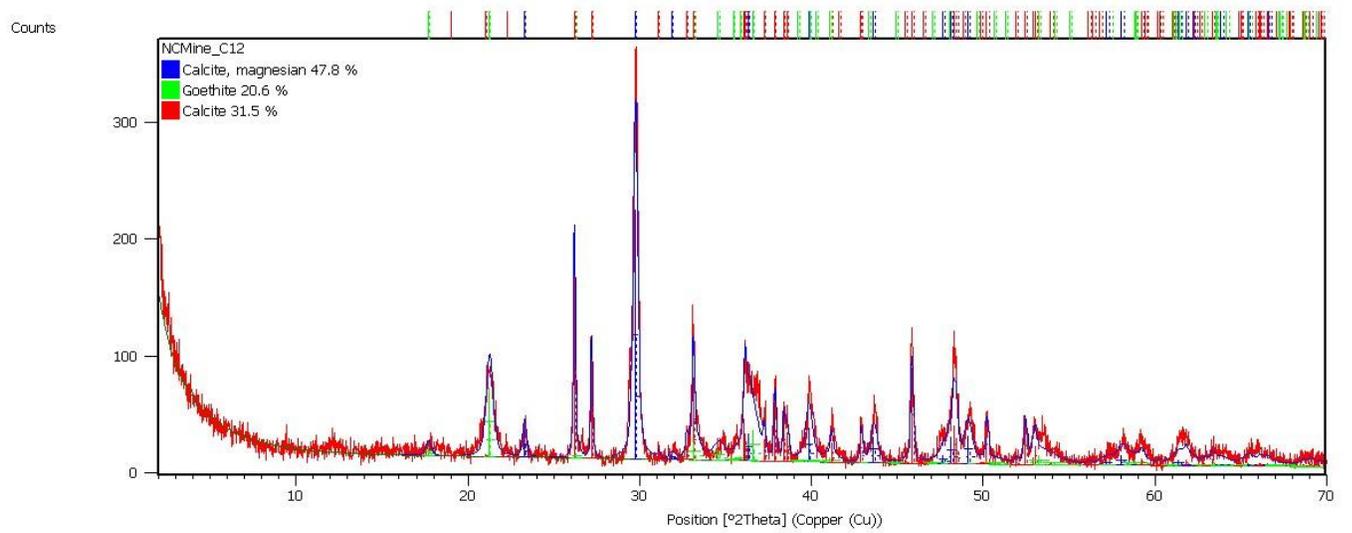
Station St06-KW1 ; godet 5



Station St06-KW1 ; godet 11

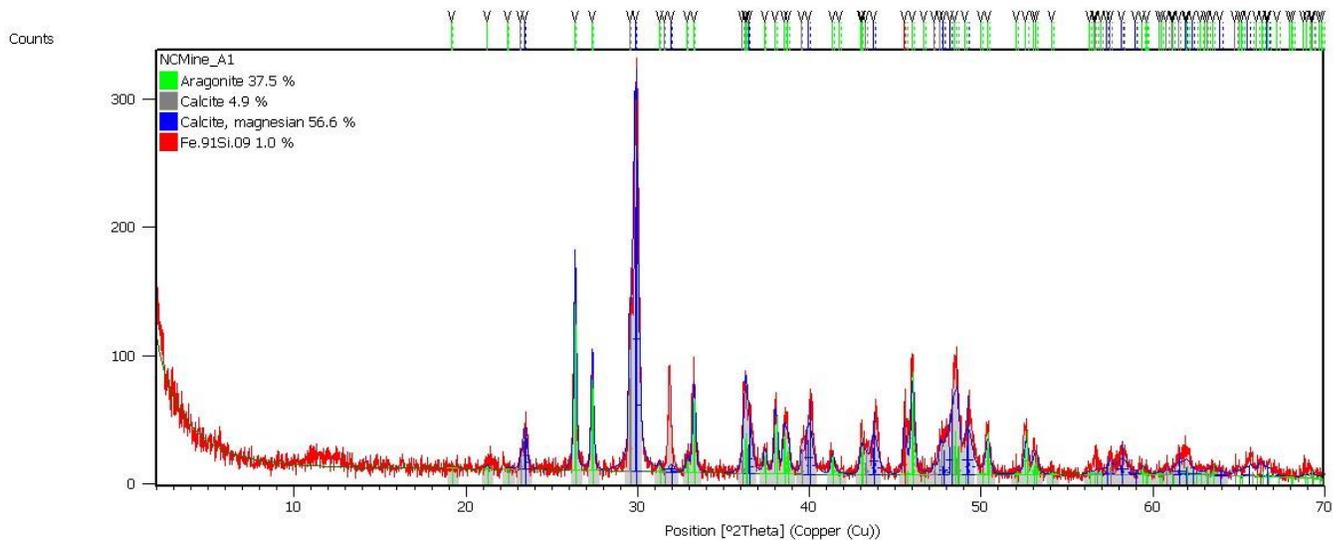


Station St06-KW1 ; godet 12

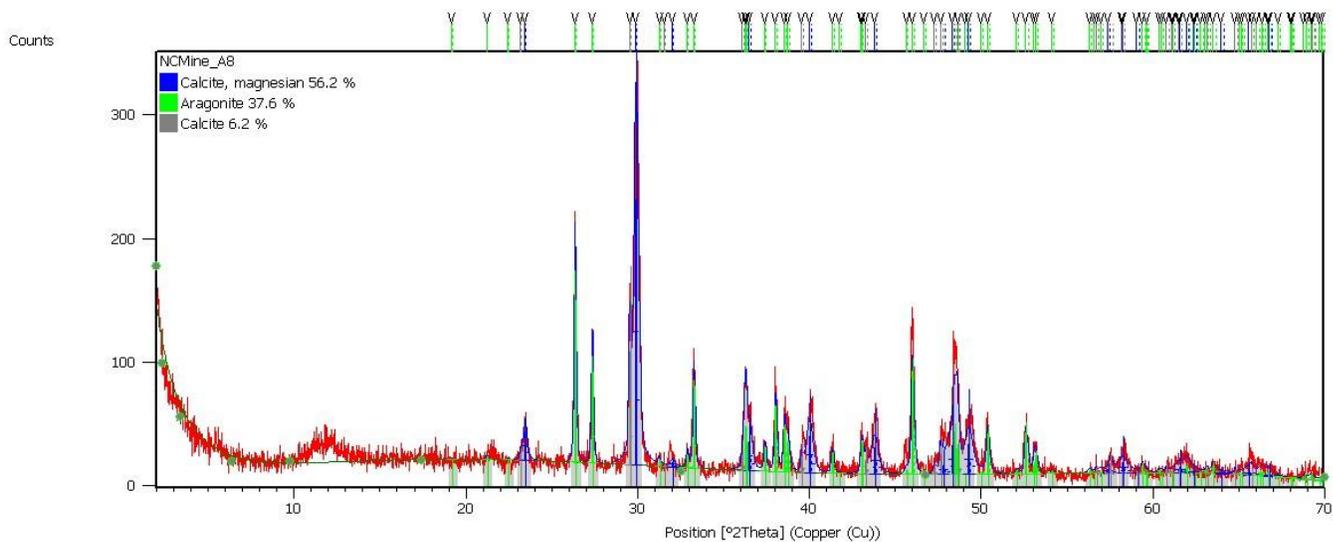


COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH

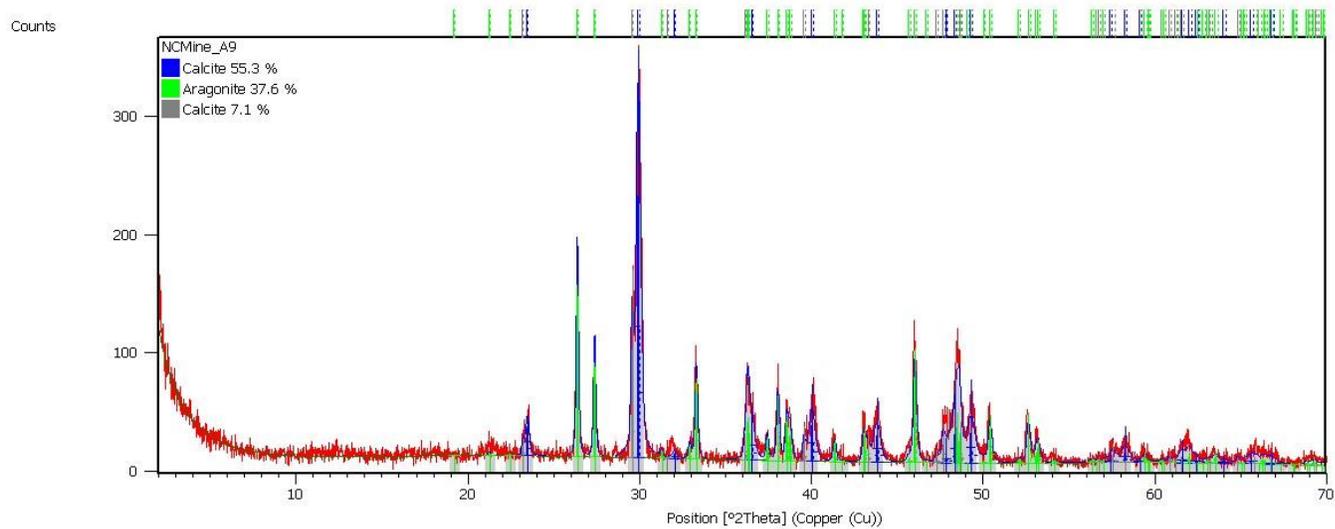
Station St60-NE ; godet 1



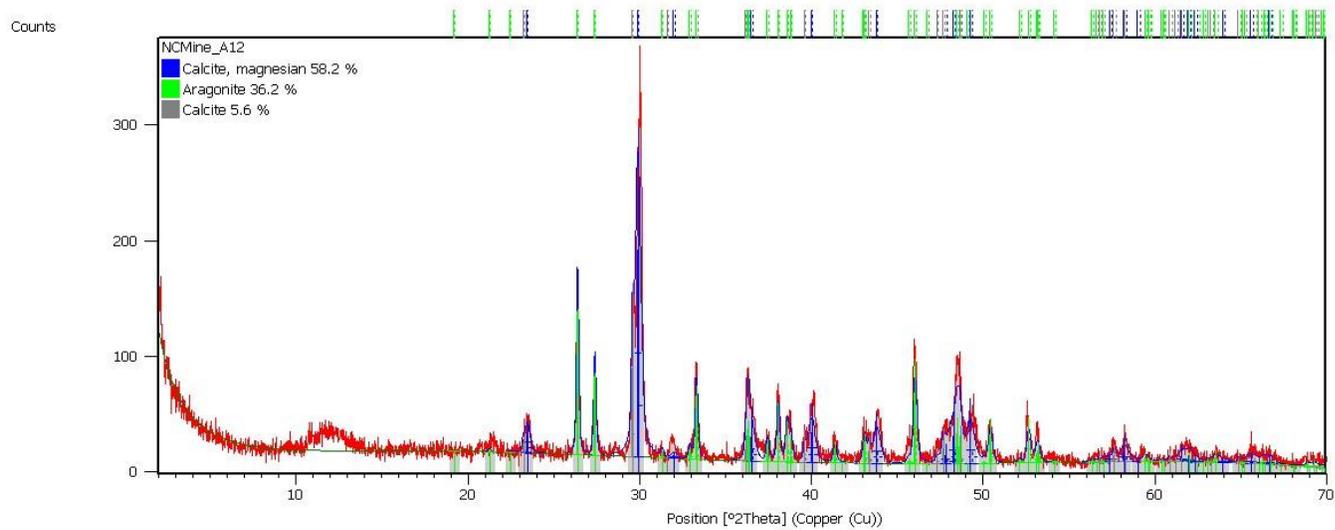
Station St60-NE ; godet 8



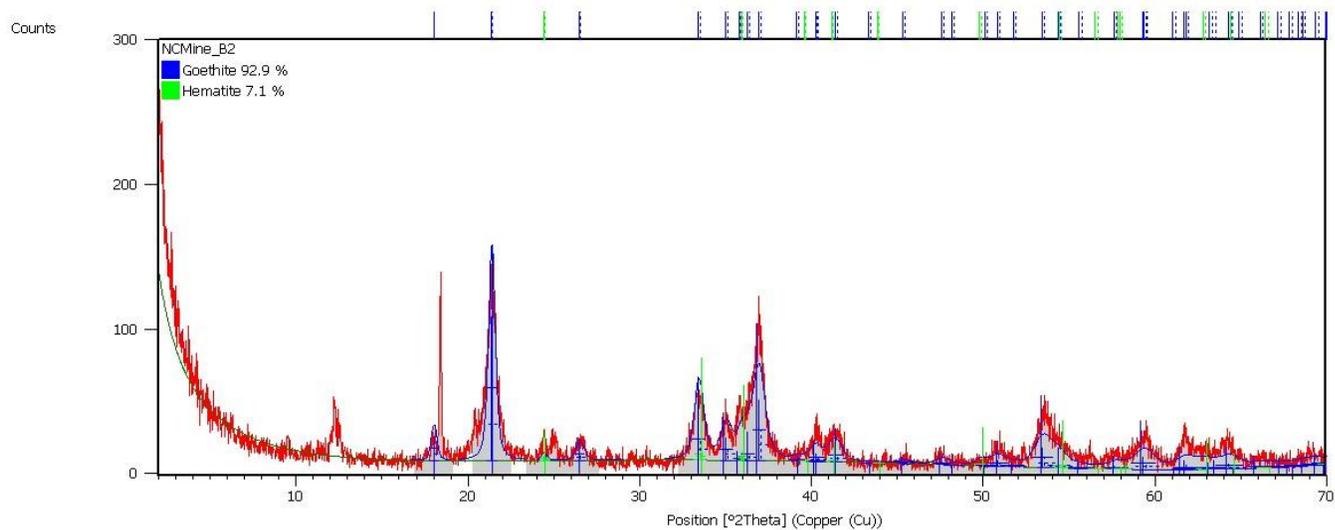
Station St60-NE ; godet 9



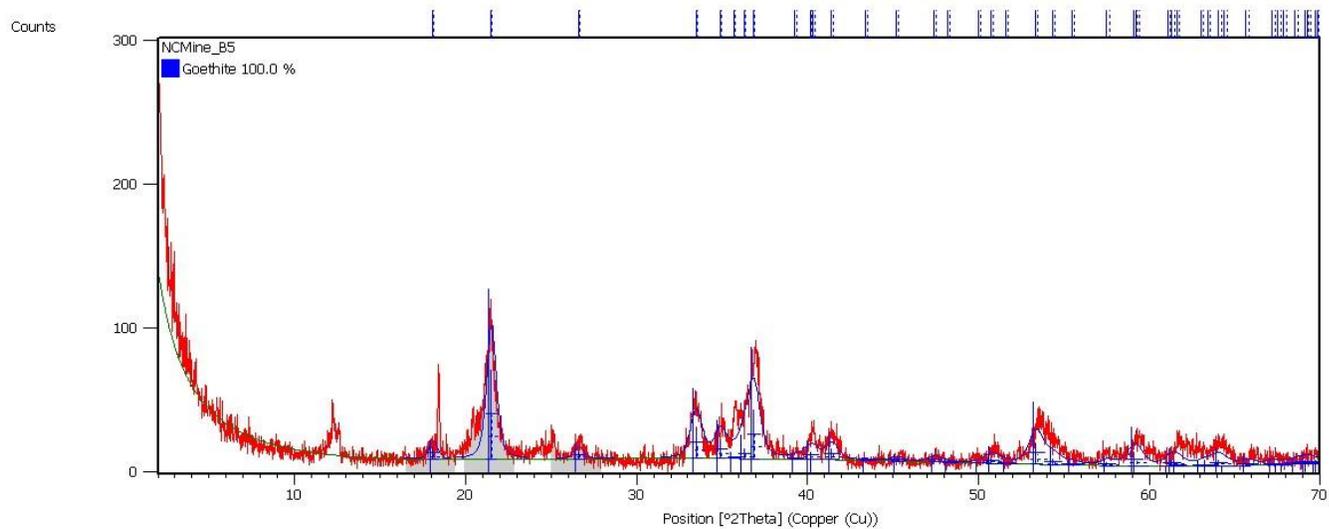
Station St60-NE ; godet 12



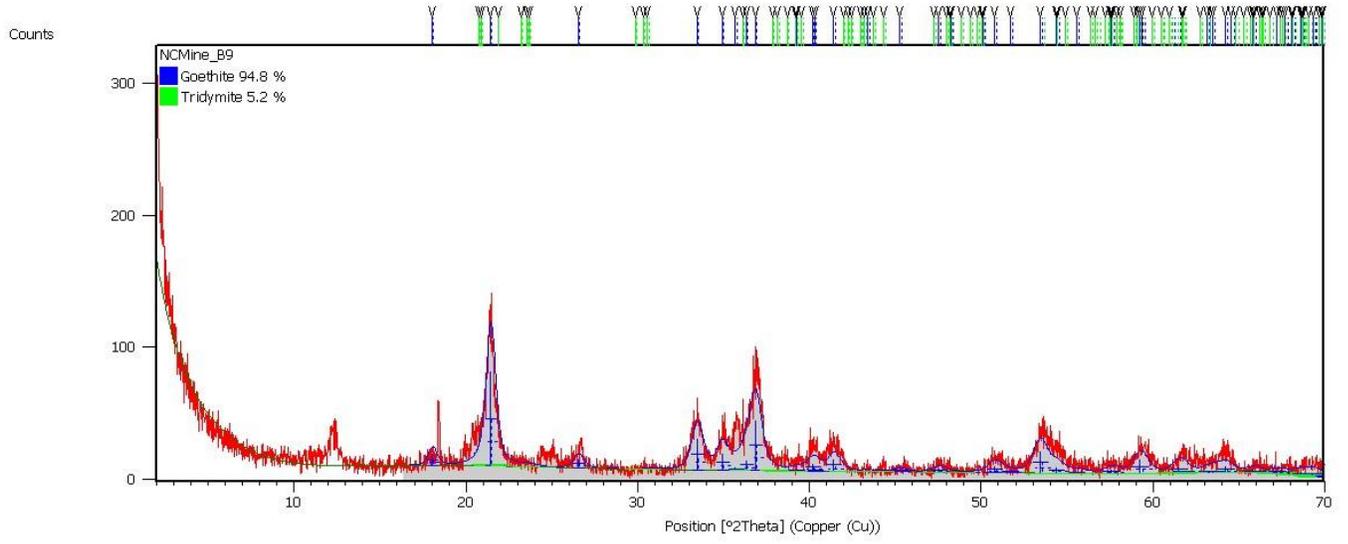
Station St15 ; godet 2



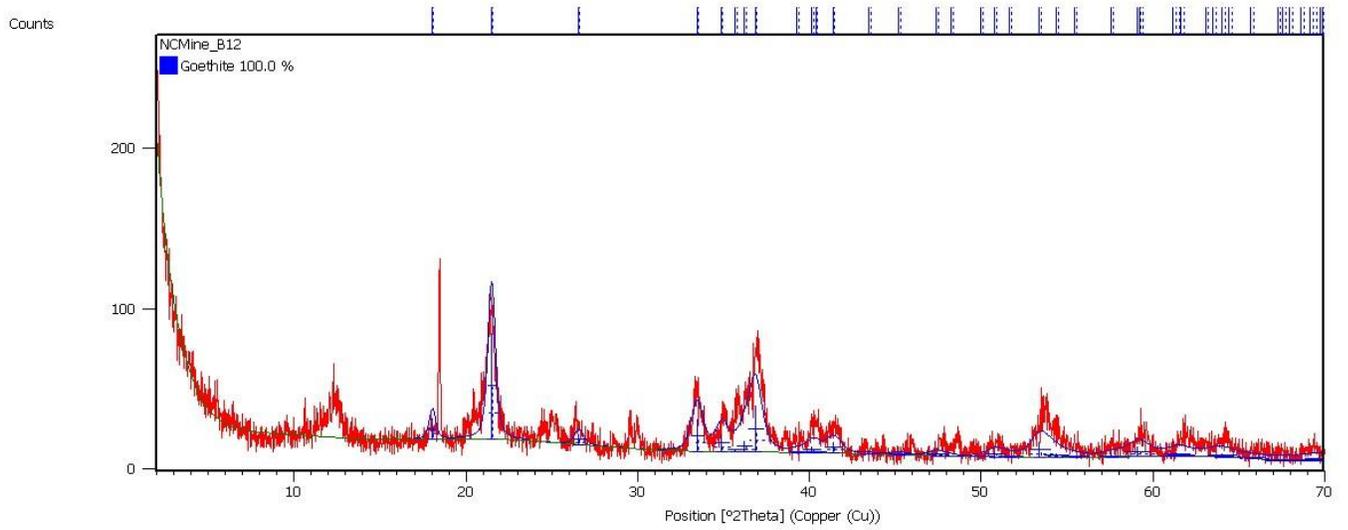
Station St15 ; godet 5



Station St15 ; godet 9



Station St15 ; godet 12



TENEURS EN CARBONATES

PERIODE DE COLLECTE	STATION	CaCO ₃ (%)	STATION	CaCO ₃ (%)
18-21 janvier	KW1-1	89,5	St15-1	18,2
22-25 janvier	KW1-2	81,1	St15-2	8,6
26-29 janvier	KW1-3	87,1	St15-3	7,9
30 janvier- 02 février	KW1-4	84,0	St15-4	8,7
03-06 février	KW1-5	87,6	St15-5	6,8
07-10 février	KW1-6	82,7	St15-6	6,6
11-14 février	KW1-7	78,4	St15-7	6,3
15-18 février	KW1-8	86,0	St15-8	5,9
19-22 février	KW1-9	87,1	St15-9	5,9
23-26 février	KW1-10	80,6	St15-10	5,8
27 février-02 mars	KW1-11	81,5	St15-11	7,0
03- 06 mars	KW1-12	83,9	St15-12	15,4

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

PERIODE DE COLLECTE	STATION	CaCO ₃ (%)
17-20 avril	NE60-1	78,3
21-24 avril	NE60-2	84,3
25-28 avril	NE60-3	84,7
29 avril- 02 mai	NE60-4	80,3
03-06 mai	NE60-5	83,1
07-10 mai	NE60-6	85,1
11-14 mai	NE60-7	82,1
15-18 mai	NE60-8	86,1
19-22 mai	NE60-9	86,6
23-26 mai	NE60-10	82,2
27-30 mai	NE60-11	83,2
31-03 juin	NE60-12	83,3

OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE (GROSSISSEMENT X 11,5)

KW1-10



KW1-10

Matières en suspension collectée dans les godets St06-KW1-10 et St06-KW1-11 : Présence de nombreuses particules carbonatées (tests d'organismes invertébrés marins plus ou moins fortement altérés) et dans une moindre mesure de particules latéritiques de couleur brune. La quantité de particules carbonatées est importante malgré la proximité de l'embouchure de la Kwé.



ST60-NE-1



ST60-NE-10

Matières en suspension collectée dans les godets St60-NE-1 et St60-NE-10 : Présence de nombreux débris de tests de microorganismes marins imbriqués dans des substances organiques ou de micro-coquillages dans un état d'altération faible.



St15-4



St15-7

Matières en suspension collectées au niveau de l'embouchure du creek de la rade nord dans les godets St15-4 et St15-7 : Présence de nombreuses particules latéritiques de couleur rouge-brun avec la présence de quelques tests d'organismes marins (couleur blanche)

ANNEXE – 4

Concentrations en métaux totaux, calcium et soufre dans les MES de la Baie Kwé (KW1), de la rade nord (St15) et du Canal de la Havannah station (St60-NE).

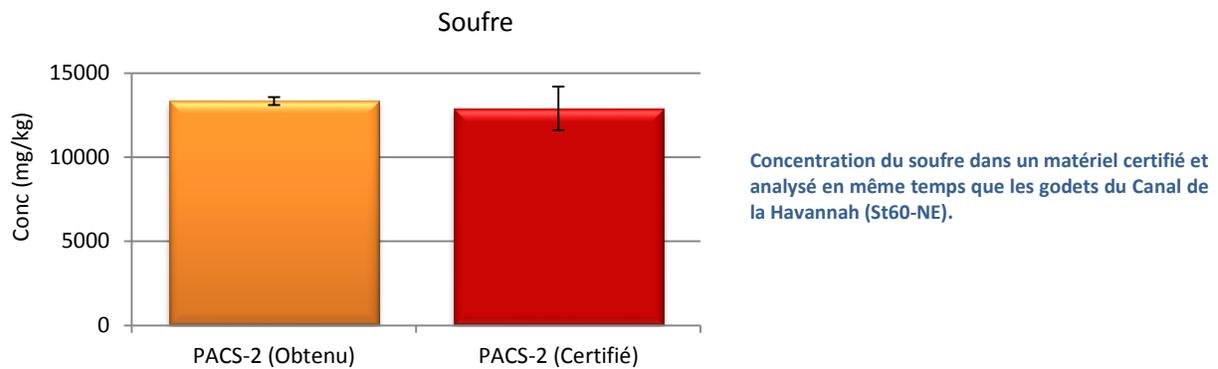
PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
18-21 janvier	KW1-1	328 396	28	963	21 552	275	378
22-25 janvier	KW1-2	293 109	92	1 878	50 512	1 057	1 057
26-29 janvier	KW1-3	320 608	64	1 336	34 076	638	660
30 janvier- 02 février	KW1-4	308 095	49	1 225	32 391	492	610
03-06 février	KW1-5	322 326	32	931	21 746	343	394
07-10 février	KW1-6	302 598	55	1 454	43 046	496	805
11-14 février	KW1-7	287 409	39	1 166	29 184	399	541
15-18 février	KW1-8	315 209	40	1 169	29 430	410	564
19-22 février	KW1-9	320 374	26	1 047	20 679	296	374
23-26 février	KW1-10	295 030	52	1 447	35 461	485	651
27 février-02 mars	KW1-11	299 520	42	1 295	27 567	400	493
03- 06 mars	KW1-12	308 482	34	1 200	28 635	362	530

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
17-20 avril	NE60-1	282 702	17	538	16 337	173	298
21-24 avril	NE60-2	307 441	24	576	15 902	267	327
25-28 avril	NE60-3	308 841	18	504	16 102	198	298
29 avril- 02 mai	NE60-4	289 761	17	512	15 011	130	261
03-06 mai	NE60-5	301 705	17	543	15 310	207	276
07-10 mai	NE60-6	309 731	22	628	19 458	218	352
11-14 mai	NE60-7	296 707	20	564	18 559	181	328
15-18 mai	NE60-8	313 056	20	597	19 090	188	334
19-22 mai	NE60-9	315 035	19	586	18 446	193	326
23-26 mai	NE60-10	299 271	18	550	17 738	181	314
27-30 mai	NE60-11	300 424	22	608	20 564	203	392
31-03 juin	NE60-12	301 859	21	619	20 361	206	356

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
18-21 janvier	St15-1	53 002	265	10 119	205 324	3 127	3 076
22-25 janvier	St15-2	8 265	295	15 050	257 114	2 654	3 703
26-29 janvier	St15-3	8 643	327	14 454	257 532	3 020	3 594
30 janvier- 02 février	St15-4	13 703	292	13 681	240 937	2 872	3 027
03-06 février	St15-5	1 800	336	15 513	256 024	2 677	4 616
07-10 février	St15-6	783	310	14 914	253 320	2 173	4 589
11-14 février	St15-7	949	285	14 974	249 629	1 793	4 454
15-18 février	St15-8	871	282	14 344	253 532	1 650	4 555
19-22 février	St15-9	1 129	297	15 081	257 831	1 723	4 569
23-26 février	St15-10	1 186	236	13 009	242 957	1 704	2 888
27 février-02 mars	St15-11	4 645	313	13 032	242 865	2 702	4 222
03- 06 mars	St15-12	38 437	297	11 382	224 362	2 324	3 830

STATION	Soufre (mg/kg)
St60-NE-1	4800
St60-NE -2	3218
St60-NE -3	3271
St60-NE -4	5630
St60-NE -5	2935
St60-NE -7	4269
St60-NE -8	3827
St60-NE -10	3327
St60-NE -11	3950
St60-NE -12	3778

Les analyses du soufre sont satisfaisante au regard des concentrations obtenus sur un matériel certifié qui a subi les mêmes manipulations que les MES du Canal Havannah.



ANNEXE – 5

Résultats de calculs de densités de flux de matière particulaire (MES) et métaux pour la Baie Kwé (St06-KW1), pour la rade Nord (St15) et le Canal de la Havannah (St60-NE).

MES

PERIODE DE COLLECTE	STATION	Flux MES (g/m ² /j)	STATION	Flux MES (g/m ² /j)
18-21 janvier	KW1-1	55,7	St15-1	3,0
22-25 janvier	KW1-2	64,7	ST15-2	161,5
26-29 janvier	KW1-3	76,0	ST15-3	5,5
30 janvier- 02 février	KW1-4	64,8	ST15-4	12,8
03-06 février	KW1-5	51,8	ST15-5	28,5
07-10 février	KW1-6	30,6	ST15-6	6,5
11-14 février	KW1-7	33,5	ST15-7	4,5
15-18 février	KW1-8	34,7	ST15-8	9,4
19-22 février	KW1-9	35,6	ST15-9	17,6
23-26 février	KW1-10	95,6	ST15-10	5,1
27 février-02 mars	KW1-11	148,4	ST15-11	2,7
03- 06 mars	KW1-12	37,1	ST15-12	8,7

PERIODE DE COLLECTE	STATION	Flux MES (g/m ² /j)
17-20 avril	ST60-NE-1	11,2
21-24 avril	ST60-NE-2	1,6
25-28 avril	ST60-NE-3	4,5
29 avril- 02 mai	ST60-NE-4	3,1
03-06 mai	ST60-NE-5	0,9
07-10 mai	ST60-NE-6	3,2
11-14 mai	ST60-NE-7	5,5
15-18 mai	ST60-NE-8	9,7
19-22 mai	ST60-NE-9	15,9
23-26 mai	ST60-NE-10	9,6
27-30 mai	ST60-NE-11	9,2
31-03 juin	ST60-NE-12	14,9

Métaux particuliers

PERIODE DE COLLECTE	Ca (mg/m ² /j)	Co (mg/m ² /j)	Cr (mg/m ² /j)	Fe (mg/m ² /j)	Mn (mg/m ² /j)	Ni (mg/m ² /j)
St06-KW1						
18-21 janvier	18 295	1,5	54	1 201	15	21
22-25 janvier	18 969	5,9	122	3 269	68	68
26-29 janvier	24 371	4,8	102	2 590	48	50
30 janvier- 02 février	19 969	3,2	79	2 099	32	40
03-06 février	16 685	1,7	48	1 126	18	20
07-10 février	9 269	1,7	45	1 319	15	25
11-14 février	9 617	1,3	39	976	13	18
15-18 février	10 931	1,4	41	1 021	14	20
19-22 février	11 392	0,9	37	735	11	13
23-26 février	28 208	5,0	138	3 390	46	62
27 février-02 mars	44 440	6,2	192	4 090	59	73
03- 06 mars	11 432	1,3	44	1 061	13	20

PERIODE DE COLLECTE	Ca (mg/m ² /j)	Co (mg/m ² /j)	Cr (mg/m ² /j)	Fe (mg/m ² /j)	Mn (mg/m ² /j)	Ni (mg/m ² /j)
St60-NE						
17-20 avril	3 155	0,2	6,0	182	1,9	3,3
21-24 avril	490	0,0	0,9	25	0,4	0,5
25-28 avril	1 382	0,1	2,3	72	0,9	1,3
29 avril- 02 mai	884	0,1	1,6	46	0,4	0,8
03-06 mai	272	0,0	0,5	14	0,2	0,2
07-10 mai	986	0,1	2,0	62	0,7	1,1
11-14 mai	1 622	0,1	3,1	101	1,0	1,8
15-18 mai	3 037	0,2	5,8	185	1,8	3,2
19-22 mai	5 007	0,3	9,3	293	3,1	5,2
23-26 mai	2 869	0,2	5,3	170	1,7	3,0
27-30 mai	2 761	0,2	5,6	189	1,9	3,6
31-03 juin	4 501	0,3	9,2	304	3,1	5,3

PERIODE DE COLLECTE	Ca (mg/m ² /j)	Co (mg/m ² /j)	Cr (mg/m ² /j)	Fe (mg/m ² /j)	Mn (mg/m ² /j)	Ni (mg/m ² /j)
St15						
18-21 janvier	159	1	30	616	9	9
22-25 janvier	1 335	48	2 430	41 519	429	598
26-29 janvier	48	2	80	1 420	17	20
30 janvier- 02 février	176	4	176	3 096	37	39
03-06 février	51	10	443	7 304	76	132
07-10 février	5	2	96	1 636	14	30
11-14 février	4	1	67	1 115	8	20
15-18 février	8	3	135	2 383	16	43
19-22 février	20	5	266	4 539	30	80
23-26 février	6	1	66	1 238	9	15
27 février-02 mars	13	1	36	665	7	12
03- 06 mars	335	3	99	1 955	20	33

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée