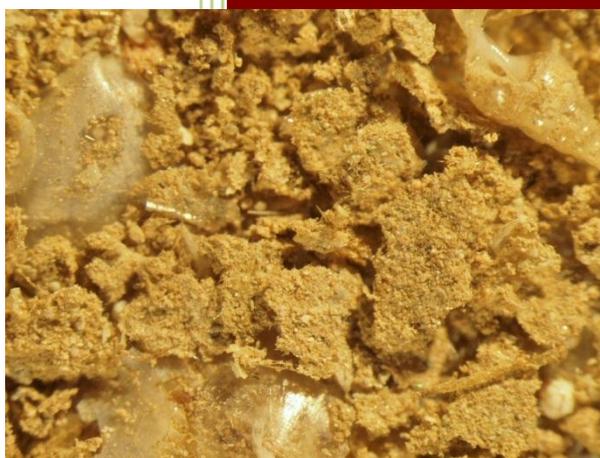
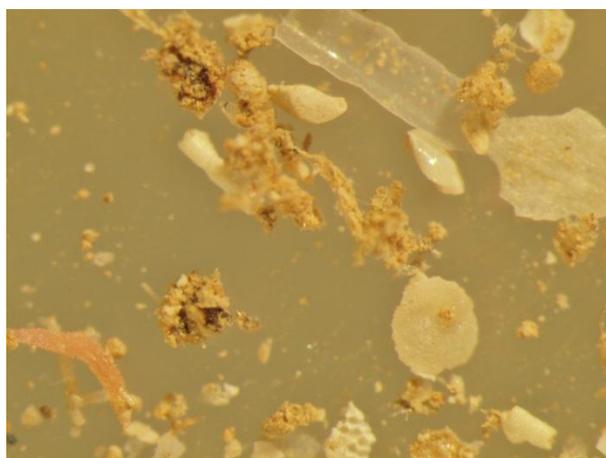




**SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DE
PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ET
LA BAIE KWE : MISSION JANVIER-FEVRIER 2013**



25 juillet 2013

Photos de couverture AEL : Observation au microscope d'un échantillon de MES récoltée dans le Canal de la Havannah

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

Convention n° 110308-VI-11

Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la Baie Kwé : mission janvier-février 2013

Fernandez Jean Michel

Moreton Benjamin

Le Grand Hélène

Pluchino Stéphanie

	N/Ref	V/Ref	
Identification	110308-VI-11	Contrat 2684	
Titre complet	Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la Baie Kwé : mission janvier-février 2013		
Auteurs	Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H et Pluchino Stéphanie		
Résumé	<p>Le programme de travail ici 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 et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230) et constitue la quatrième campagne de suivi semestriel.</p> <p>Dans le contexte de la mise en exploitation de l'usine de Vale-NC, l'étude a consisté en un suivi temporel des densités de flux verticaux afin d'estimer les apports en particules fines issues de la rivière Kwé et rejetées par le diffuseur entre le 12 septembre et le 29 octobre. A cet effet, trois mouillages de lignes équipées de pièges à sédiments séquentiels ont été réalisés.</p> <p>En fin de saison fraîche, la distribution des MES dans les eaux, tant en Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah, est grandement régie par l'action mécanique de la houle, elle-même générée par les vents notamment d'un large secteur sud.</p> <p>Toutefois, en Baie Kwé la conjonction des facteurs hydro-climatique permet de générer des panaches turbides de plus grande intensité.</p> <p>Les paramètres physico-chimiques et géochimiques analysés montrent des évolutions temporelles tant au niveau de la Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah. Les valeurs de flux de matière (MES et métaux) entrent globalement dans les gammes observées antérieurement bien qu'une nette augmentation des flux de matière (MES et métaux) soit observée depuis 2 ans.</p>		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Fernandez JM		19/07/2013
Vérificateur 1	Moreton B		22/07/2013
Vérificateur 2	Kumar-Roiné S		23/07/2013
Approbateur(s)	Fernandez JM		25/07/2013
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE	
V1.0	Rapport définitif	26/07/2013	
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Casalis C	Département environnement Vale-NC		

Ce rapport est cité comme suit :

Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H, et Pluchino Stéphanie, 2013. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la baie Kwé : mission de janvier et février 2013. Contrat Vale-NC/AEL n° 2684, Rapport AEL 110308-VI-11, 60p.

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	PARAMETRE METEOROLOGIQUES	12
4.1.1	Précipitations atmosphériques (station « Usine Vale »)	12
4.1.2	Direction du vent (station « Usine Vale »)	12
4.1.3	Vitesse du vent (station « Usine Vale »)	13
4.2	CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION	14
4.2.1	Baie Kwé (station St06-KW1)	14
4.2.2	Canal de la Havannah (station St60-NE)	16
4.2.3	Canal de la Havannah (station St60-SW)	19
4.3	COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION	22
4.3.1	Baie Kwé (station St06-KW1)	22
4.3.2	Canal de la Havannah (station St60-NE)	24
4.3.3	Canal de la Havannah (station St60-SW)	25
5	INTERPRETATION	28
5.1	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES	28
5.1.1	Baie Kwé,	28
5.1.2	Canal de la Havannah	29
5.2	CALCUL DES FLUX DE MATIERES	33
6	CONCLUSION	37
7	REFERENCES	39
8	LISTE DES FIGURES	40
9	LISTE DES TABLEAUX	42
10	LISTE DES ANNEXES	43

1 INTRODUCTION

Le travail ici présenté 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 à la définition de « l'Etat de référence » des densités de flux verticaux de particules déterminée pour le Canal de la Havannah et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230).

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 à pluri-mensuelle. Cette mesure constitue un indicateur précoce de la sédimentation.

Les conséquences de l'augmentation de ces flux sont la réduction de la lumière, de l'oxygène dissous et en particulier de la pollution par les éléments métalliques. En effet, les particules sont reconnues comme 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 ;
- D'autre part, persistantes dans les effluents industriels traités et rejetés dans le Canal de la Havannah via le diffuseur.

2 OBJECTIFS

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

- le suivi temporel des apports terrigènes générés par l'activité minière en sortie de la Baie Kwé, dans un secteur de relative profondeur ($h > 15\text{m}$). En effet, il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage des grosses particules sur le fond, il n'est donc pris en compte que les fractions fines en suspension potentiellement transportables par les courants sur de longues distances, comme le suggère la modélisation (Convention IRD/Goro-Ni n° n°1124, Volet « Simulation hydrodynamique »);
- le suivi temporel des apports industriels issus du procédé chimique au voisinage immédiat du diffuseur. Ce suivi avait pour objet de répondre aux questions de la double rémanence supposée :
 - d'une part, du gypse formé après l'étape de neutralisation des solutions acides d'extraction du Ni par le calcaire ;
 - d'autre part, des précipités de CaCO_3 et d'hydroxydes de Mn supposés être générés lors de l'entrée en contact de l'effluent avec l'eau de mer, phénomène qui pourrait entraîner une fraction non négligeable des métaux (dont Mn). Les expériences de laboratoire et la modélisation associée (Convention IRD/Goro-Ni, n° 1124 ; Volet « Réactivité chimique de l'effluent ») montrent 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 démarrage de l'usine).

Ce rapport présente les résultats obtenus pour la **quatrième campagne de mouillage semestrielle** des 4 que compte le programme de suivi environnemental relatif aux flux particulaires dans le Canal de la Havannah passé entre Vale- NC et AEL (Contrat Vale/AEL n° 2684).

3 METHODOLOGIE

3.1 SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES

Cette quatrième campagne d'études des flux a été conduite de début janvier à fin février 2013. 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 concernent 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 : il s'agit de deux stations (St60-SW et St60-NE) localisées perpendiculairement à 60 m de part et d'autre du diffuseur. Ces sites, définies pour l'étude de traçage colorimétrique (Contrat AEL/Vale-NC n° 20233), font l'objet d'une surveillance de la physico-chimie de la colonne d'eau à proximité (St09 ; Contrat AEL/Vale-NC n°E22584) ;
- Zone d'influence de la mine : Il s'agit d'une station dans la proche embouchure de la rivière Kwé (St06-KW1) et qui a permis la définition de l'état de référence des flux particuliers en 2006 (Convention IRD/Goro-Ni n°1230) afin d'assurer le suivi des apports induits par le bassin d'exploitation minière.

Tableau 1 : Localisation exacte des trois stations de mouillage des pièges à particules séquentiels : Canal de la Havannah (St60-SW et St60-NE) et en baie Kwé (StKW1). Ces coordonnées sont conformes au référentiel WGS-84.

STATION	St60-SW	St60-NE	St06-KW1
Longitude Est	166° 59,620	166°59.678	166°59,140
Latitude Sud	22° 22,158	22° 22,109	22°20,747
Profondeur (m)	37	39	18

Le dispositif de collecte a été placé à 3 mètres au-dessus du fond. Cette cote est particulièrement importante à respecter pour les pièges mouillés à proximité du diffuseur pour que les orifices de collecte demeurent en contact avec l'effluent même lorsque les conditions hydrodynamiques des marées de vive-eau s'exercent. Ce prérequis est conforme aux résultats 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 alors qu'elle dépasse amplement les 10 m par courants faibles (marées de morte-eau).

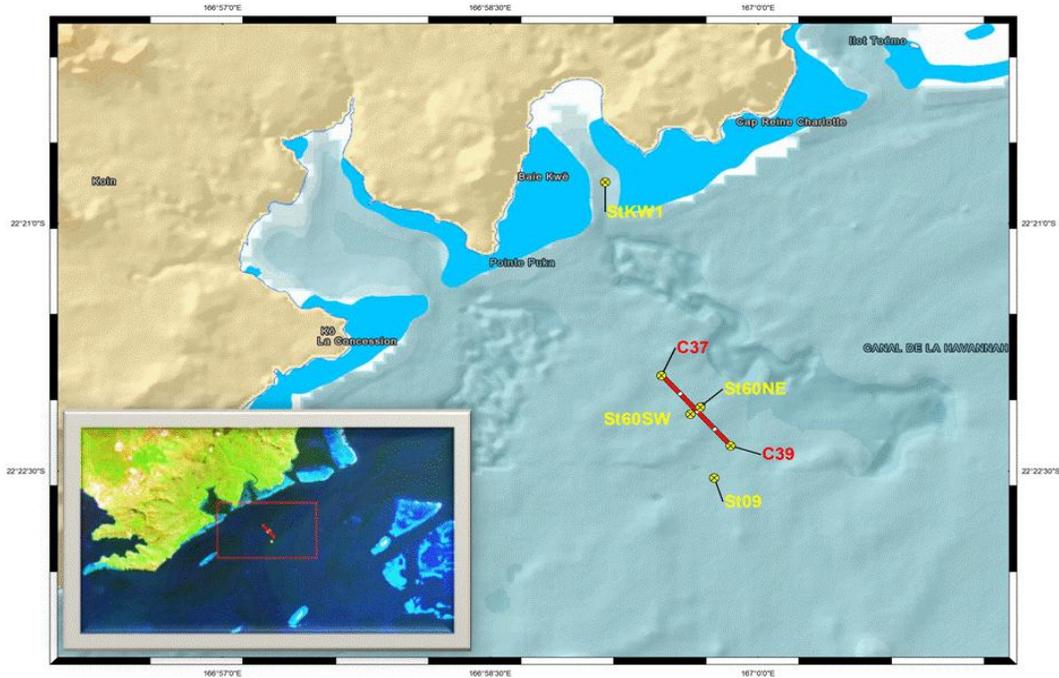


Figure 1: Aire d'étude pour le suivi des flux verticaux de particules issues du process de production de l'usine et des activités d'excavation de mine de Vale-NC. Le trait rouge représente le diffuseur, de part et d'autre figurent les deux stations St60-SW et St60-NE localisées à 60m du rejet. En Baie Kwé le piège à sédiments a été mouillé à la station St06-KW1. La station St09 appartient au réseau semestriel de surveillance physico-chimique de la colonne d'eau.

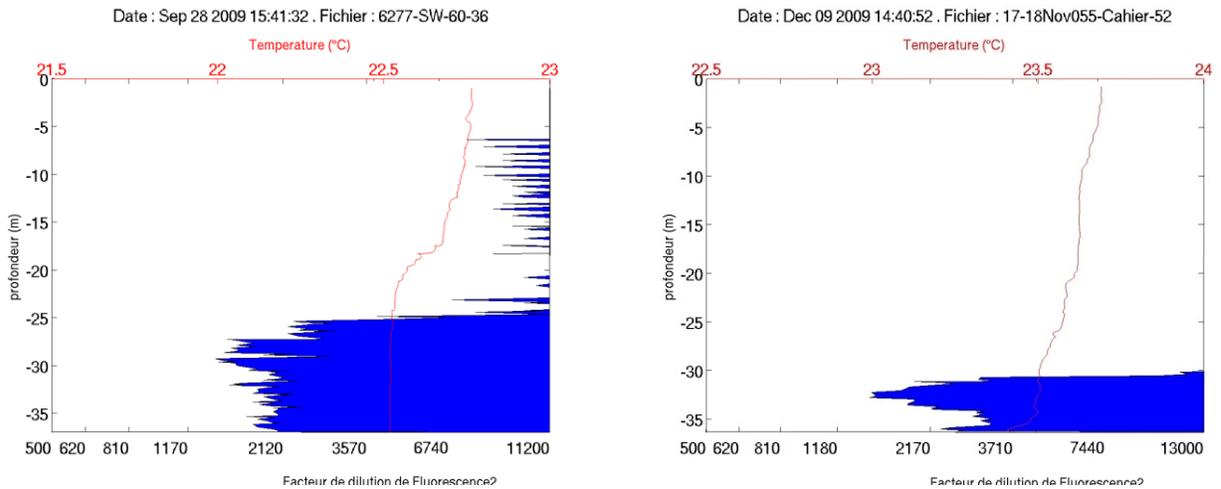


Figure 2 : Puissance type de l'épaisseur de marquage par l'effluent (rhodamine-WT) pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

3.2 ECHANTILLONNAGE

Les lignes de mouillage étaient 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 08 janvier 2013 puis récupérées le 28 février 2013.

La collecte des particules a été programmée pour débuter le 09 janvier 2013 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 26 février 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, StSt60-NE et St06-KW1) et périodes de collecte entre janvier et février 2013.

STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE
KW1-1	09-12 janvier	SW-1	09-12 janvier	NE-1	09-12 janvier
KW1-2	13-16 janvier	SW-2	13-16 janvier	NE-2	13-16 janvier
KW1-3	17-20 janvier	SW-3	17-20 janvier	NE-3	17-20 janvier
KW1-4	21-24 janvier	SW-4	21-24 janvier	NE-4	21-24 janvier
KW1-5	25-28 janvier	SW-5	25-28 janvier	NE-5	25-28 janvier
KW1-6	29 janvier - 01 février	SW-6	29 janvier - 01 février	NE-6	29 janvier - 01 février
KW1-7	02-05 février	SW-7	02-05 février	NE-7	02-05 février
KW1-8	06-09 février	SW-8	06-09 février	NE-8	06-09 février
KW1-9	10-13 février	SW-9	10-13 février	NE-9	10-13 février
KW1-10	14-17 février	SW-10	14-17 février	NE-10	14-17 février
KW1-11	18-21 février	SW-11	18-21 février	NE-11	18-21 février
KW1-12	22-25 février	SW-12	22-25 février	NE-12	22-25 février

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

3.3 PARAMETRES PHYSIQUES, GEOCHIMIQUES ET ANALYSES

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

4 RESULTATS

4.1 PARAMETRE METEOROLOGIQUES

Les valeurs des paramètres météorologiques sont regroupées en Annexe 2.

Les paramètres météorologiques (pluie journalière-RR-, vitesse -FXI- et direction -DXI- du vent maximum moyen) sont donnés par la station météorologique dite de l' « Usine Vale » qui fournit approximativement les conditions de pluie sur l'ensemble des bassins versants de la Kwé. Par ailleurs, cette station ne reflète pas exactement les régimes de vents le long de la côte sud de la Grande Terre en raison des effets de relief. D'ordinaire, ces deux derniers paramètres sont explicités par la station météorologique d'AEL installée sur la balise du récif loro. Toutefois, en raison d'une panne, la station AEL n'a pu enregistrer les paramètres météorologiques pour cette campagne de mouillage des pièges. Les interprétations sont donc basées sur la seule station de l'« Usine » de Vale-NC.

4.1.1 Précipitations atmosphériques (station « Usine Vale »)

La période du 9 janvier au 25 février a été marquée par un seul épisode pluvieux réellement significatifs (pluies > 40 mm/j) qui a été enregistré le 16 février (50,1 mm ; Figure 3). D'un point de vue général, ce début de saison chaude a été caractérisé par un déficit en précipitations.

En dehors de cet unique épisode notable, les précipitations sporadiques ont été relativement régulières mais peu abondantes (1,2 < pluies < 20 mm) ; pendant la période d'études, on compte 24 jours de pluies cumulant 181,2 mm.

4.1.2 Direction du vent (station « Usine Vale »)

Durant toute la période de mouillage des pièges à sédiments, les vents sont restés très constants et aucune rotation ne s'est produite (Figure 3). En effet, les « *directions des vents moyens journaliers* » enregistrés (DD) ont soufflé avec régularité du secteur E-SE, avec une très courte incursion au secteur NE (50°) et plus durables au secteur SW (240°). Dans le détail, il a été enregistré les 3 principaux épisodes suivants :

- 9-26 janvier : les vents ont soufflé du secteur E et ont progressivement tourné à l'E-SE puis au S (17 janvier) avant de revenir à l'E ;
- 27 janvier-08 février : d'abord de secteurs E puis SE, il a brusquement basculé au S (31 janvier) puis au SW (01 février) avant de revenir au S (04 février) ;
- 08 février-25 février : la direction du vent a oscillé entre l'E et le SE avec régularité. On enregistre également une journée de secteur NE (13 février).

4.1.3 Vitesse du vent (station « Usine Vale »)

Pour la campagne, la « vitesse des vents moyens journaliers » (FF) a été de $12,0 \pm 2,2$ m/s (Figure 3). Cette valeur qui est normale pour un début de « saison chaude », est exactement du même ordre que celle mesurée pendant la première campagne de saison chaude de janvier-février 2012 ($12,0 \pm 2,4$ m/s).

Note : les valeurs moyennes de FF pour les deux campagnes réalisées en saison fraîche (juillet-août 2011 et septembre-octobre 2012) sont respectivement de $11,3 \pm 3,2$ m/s et $11,9 \pm 2,4$ m/s.

Les valeurs extrêmes ont été enregistrées le 14 janvier pour la minimale (9,0 m/s) et le 18 février pour la maximale (18,1 m/s).

Durant les 2/3 de la période d'études (9 janvier-8 février) les vents ont soufflé à des vitesses moyennes de $11,1 \pm 1,5$ m/s. Au-delà et jusqu'à la fin du mouillage, les vents moyens ont légèrement fraîchi à $13,5 \pm 2,3$ m/s ; les vitesses maximale et minimale correspondant à des régimes d'alizés.

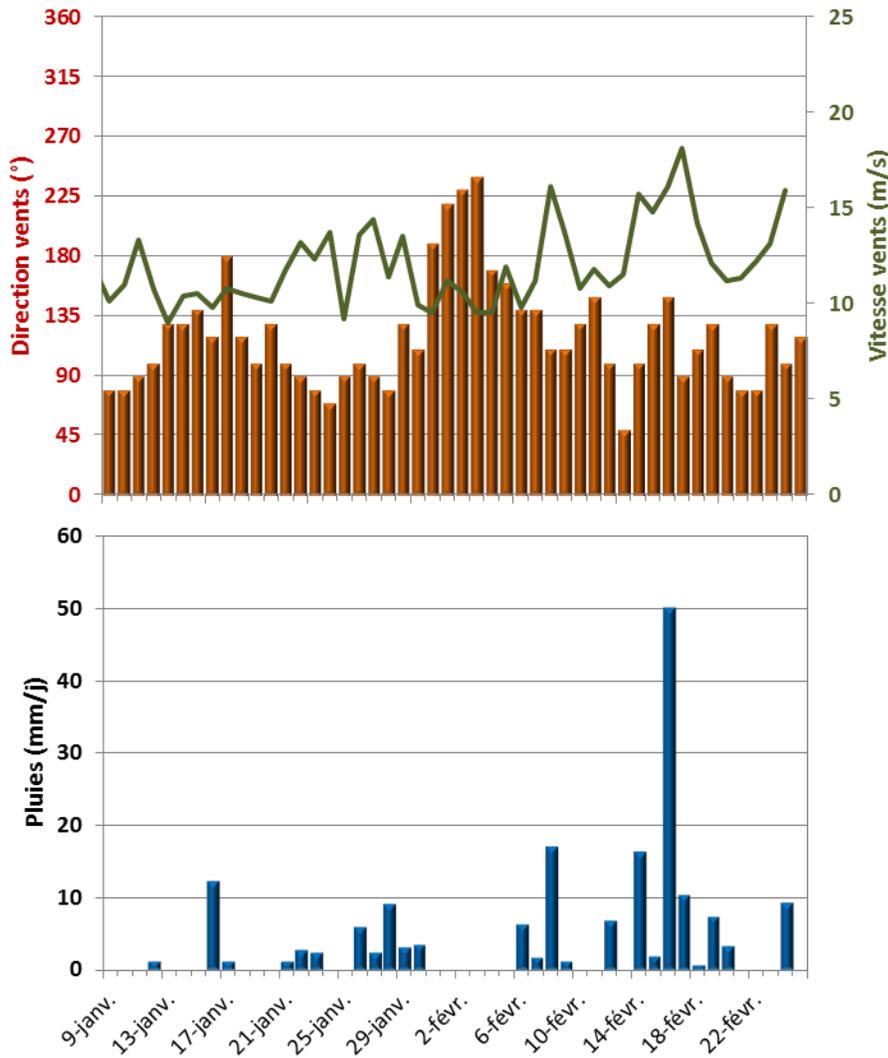


Figure 3 : Enregistrement des « taux de précipitations journaliers (RR) » en (mm/j), « direction des vents moyens journaliers (DD) » en (°) et « vitesse des vents moyens journaliers (FF) » en (m/s), à la station météorologique de l'« usine » de Vale-NC pour la période du 9 janvier au 25 février 2013.

CE QU'IL FAUT RETENIR

La période a été marquée par un épisode pluvieux de moyenne importance (50,1 mm) le 16 février. D'une manière générale, les précipitations ont été régulières avec 24 jours cumulant 181,2 mm.

Un régime d'alizés s'est installé environ du 12 au 30 janvier, cédant la place à des vents de secteurs S à SW avant de de tourner à nouveau au SE à partir du 6 février puis à un large secteur E-ES jusqu'au 25 février.

Les valeurs de vents sont conformes aux normales saisonnières. Toutefois, du 9 janvier au 8 février, les vents ont soufflé à des vitesses moyennes de $11,1 \pm 1,5$ m/s, puis à $13,5 \pm 2,3$ m/s jusqu'à la fin de la période.

4.2 CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

Les résultats d'analyses et 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 collectées montrent des valeurs très évolutives dans le temps (Figure 4). Elles se distribuent entre 3,00 g (17-20 janvier ; KW1-3) et 21,66 g (29 janvier-01 février ; KW1-6). Sur les 12 prélèvements, 9 dépassent les 5 g de matière, dans les 3 autres on mesure entre 3 et 4 g.

Les quantités les plus faibles (autour de 4 g) ont été obtenues dans les 4 premiers godets (9-24 janvier). Au-delà, hormis la masse maximale piégée dans le godet KW1-6 (21,66 g ; 29 janvier-01 février), la valeur moyenne des 8 autres échantillons est approximativement de 10 g.

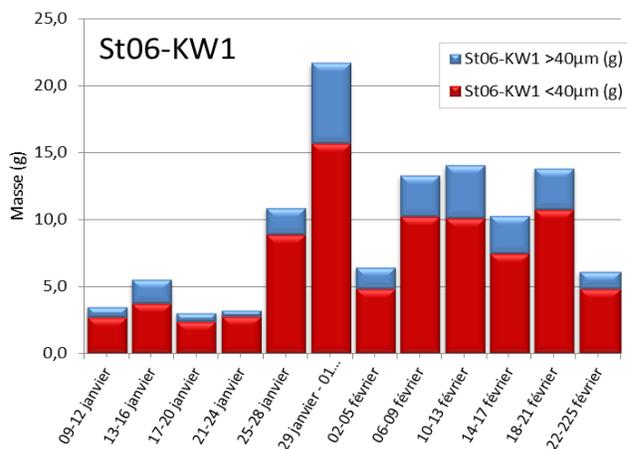


Figure 4 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 9 janvier au 25 février 2013 en Baie Kwé (St06-KW1). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

Les fractions grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) sont quantitativement plus importantes dans le godet KW1-6 (6,04 g ; 29 janvier-01 février) et de manière relativement équivalente dans les godets KW1-08 (3,08 g ; 6-9 février), KW1-9 (3,98 g ; 10-13 février) KW1-10 (2,80 g ; 14-17 février) et KW1-11 (3,06 g ; 18-21 février). La valeur minimale est observée dans le godet KW1-4 (0,45 g ; 21-24 janvier).

Proportionnellement, la masse de fraction grossière oscille entre 14% (KW1-4) et 32% (KW1-2)

Pour cette quatrième campagne, la masse minimale de MES collectée est 3,00 g. Cette valeur est exactement la même que celle mesurée en septembre-octobre 2012. Pour les deux premières campagnes (juillet-août 2011 et janvier-février 2012), les valeurs minimales étaient inférieures (1,00 g et 2,10 g, respectivement). En ce qui concerne les maximales, la valeur de janvier-février 2012 (25,61 g) est comparable à celle obtenue dernièrement en janvier-février 2013 (21,66 g). Pour les deux autres campagnes antérieures (juillet-août 2011 et septembre-octobre 2012) elles étaient de 23,71 g et 11,82 g.

4.2.1.2 Compositions granulométriques

Les matières en suspension collectées au niveau de la Baie Kwé sont composées de particules dont le mode n'est pas bien exprimé mais que l'on situe globalement dans la classe 2-20 μm (argiles et silts fins) avec des proportions tournant autour 34,54 à 39,70% du volume (Figure 5). Les silts moyens (20-40 μm) composent la deuxième population granulométrique, avec des valeurs très proches du mode comprises entre 30,12% et 36,39%. Les autres populations (silts grossiers) ne représentent chacune qu'au maximum 10 %.

La distribution des populations granulométriques (Figure 5) ne permet pas de mettre clairement en évidence une variation temporelle des particules pour aucune des classes granulométriques étudiées.

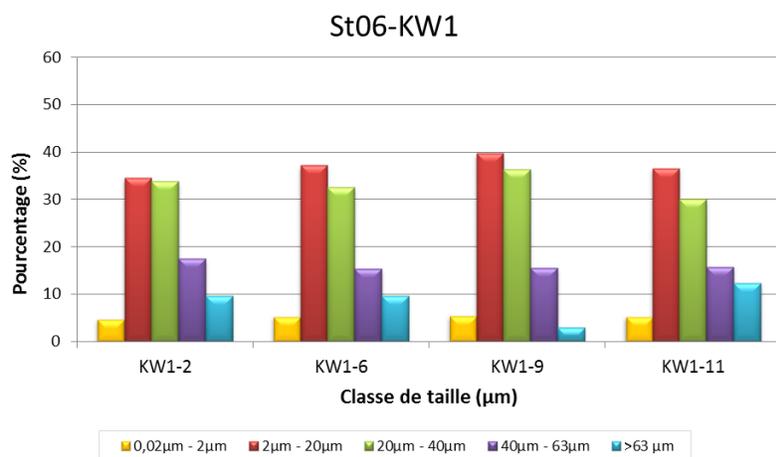


Figure 5 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés en Baie Kwe par le piège à sédiments séquentiel, du 9 janvier au 25 février 2013.

4.2.1.3 Compositions minéralogiques

Les analyses réalisées par diffractométrie de rayons X (Tableau 3) ont été réalisées sur les MES des godets KW1-2, KW1-7, KW1-9 et KW1-11. Les résultats montrent que les MES sont composées d'une part de goethite, signature minéralogique des formations latéritiques, et d'autre part de calcite, calcite magnésienne (phase majoritaire) et d'aragonite, qui autant de signatures des influences marines ; l'aragonite étant un des constituants majeurs des coquilles d'invertébrés.

Les résultats d'analyses semi-quantitatives tendent à montrer que les proportions de chacune des phases minérales sont équivalentes d'un prélèvement à l'autre.

La composition des particules demeure identique aux trois campagnes réalisées antérieurement (juillet-août 2011, janvier-février 2012 et septembre-octobre 2012).

Comparativement aux deux premières campagnes (janvier-février 2011 et juillet-août 2012), la goethite est présente en très faibles proportions, quant à l'hématite, elle n'a été décelable que dans les échantillons de la première campagne de juillet-août 2011.

Tableau 3 : Composition minéralogique des MES collectées en Baie Kwé (station (St06-KW1) par le piège à sédiments séquentiel, du 9 janvier au 25 février 2013.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
KW1- 2	M	m	m	m	-
KW1- 7	M	m	m	m	-
KW1- 9	M	m	m	m	-
KW1-11	M	m	m	m	-

M = composant majoritaire ; m = composant minoritaire ; t = composant trace

4.2.1.4 Teneurs en carbonates

En Baie Kwé, les MES collectées sont constituées d'une fraction carbonatée qui reste majoritaire puisque celle-ci oscille entre 58,2 et 81,2 % (Figure 6), la valeur moyenne observée étant de 66,9 ±8,4 %.

Les teneurs observées pour cette campagne de janvier-février 2013 sont en moyenne bien inférieures à celles obtenues pour la campagne de la saison chaude précédente (janvier-février 2012 ; 79,7 ±2,6%) pour laquelle les valeurs minimale et maximale étaient de 74,9 et 83,4%, respectivement ; la teneur mesurée en 2013 se rapproche davantage des valeurs obtenues durant la saison fraîche (juillet-août 2011 et septembre-octobre 2012) période pour lesquelles il a été observé 67,7 ±3,2 % et 69,3 ±3,6 %, respectivement.

Les teneurs maximales entrent en coïncidence avec les forts alizés de secteurs SE installés en fin de période (14-17 février et 22-25 février).

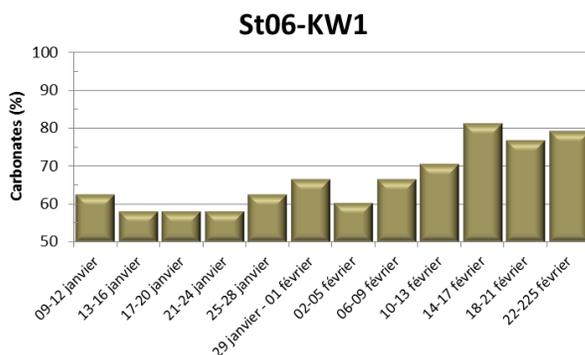


Figure 6 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 9 janvier au 25 février 2013 en Baie Kwé (St06-KW1).

4.2.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

Note : La quantité de matière particulaire collectée dans les 3 godets notés NE60-3 à NE60-5 a été très faible ($m < 0,07$ g). De plus, la fraction fine ($\varnothing < 40\mu\text{m}$) ne représentant qu'au maximum 0,03 g (NE60-5), la détermination des

compositions minéralogiques et des teneurs en carbonates n'ont pu être réalisées. Seules, les analyses en métaux et les granulométries ont été conduites sur ces 3 échantillons.

4.2.2.1 Masses collectées

A la station St60-NE (Figure 7), les masses collectées sont respectivement, infinitésimales entre le 17 et 28 janvier (0,05 g en NE60-3 ; 0,04 g en NE60-4 et 0,07 g en NE60-5) et maximale pour la période 10-13 février (8,77 g ; NE60-9). Par ailleurs, les masses collectées sont inférieures à 2 g jusqu'au 9 février puis augmentent subitement à la valeur maximale (NE60-9) avant de décroître progressivement à 2,51 g (NE60-12). Cette grande quantité de MES coïncide avec un vent passant temporairement au secteur SW avec des vitesses atteignant les 14 m/s.

Les fractions grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) sont quantitativement plus importantes dans les godets NE60-9 (3,17 g ; 10-13 février) et NE60-10 (2,73 g ; 14-17 février) ; la valeur minimale est de 0,03 g (NE60-4 ; 21-24 janvier).

Proportionnellement, la fraction grossière représente entre 36% (NE60-9 ; 10-13 février) et 80% (NE60-4 ; 21-24 janvier). Les plus fortes proportions de fraction grossière sont en général calculées pour les godets qui correspondent avec les périodes de très faible piégeage du début et milieu d'étude. Toutefois, la faiblesse des quantités pesées augmentent les incertitudes et ne permettent pas d'être affirmatif.

La série temporelle de piégeage de la station St60-NE est, en tous points, similaires à celle obtenue à la station St60-SW dont les valeurs minimale et maximale sont : 0,11 g (SW60-5) et 10,71 g (SW60-9).

En termes de variabilité interannuelle, la comparaison avec la campagne de janvier-février 2012 montre que les valeurs minimales sont exactement du même ordre (0,20 g) alors que pour les maximales celles de 2013 sont quasiment deux fois plus élevées qu'en 2012 (8,77 g et 5,39 g respectivement).

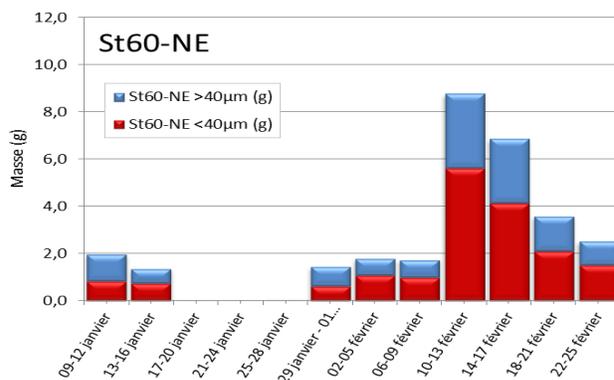


Figure 7 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 9 janvier au 25 février 2013 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm)

4.2.2.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations granulométriques montre une variation qui affecte de manière relative les classes de grains les plus grossières (Figure 8). Cette observation est particulièrement avérée pour les populations de très grandes tailles ($\phi > 63 \mu\text{m}$) et intermédiaires. En effet, les proportions de particules de grande taille sont minimales pour des conditions météorologiques d'alizés moyens, alors qu'elles sont maximales suite à l'épisode pluvieux du 17 février (NE60-11). Cette situation météorologique entraîne également une diminution générale des populations de particules les plus fines et en particulier celles dont les diamètres sont compris entre 2 et 40 µm.

La distribution des populations granulométriques est en concordance avec les résultats de la campagne 2012 qui permettait d'observer la présence d'importantes populations de particules d'un diamètre supérieur à 63 µm en

saison chaude.

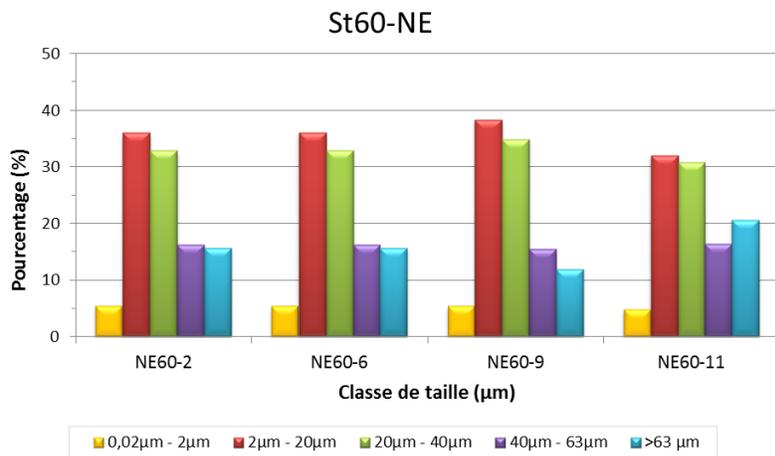


Figure 8 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel, du 9 janvier au 25 février 2013.

4.2.2.3 Compositions minéralogiques

Les analyses diffractométriques ont été réalisées sur des MES provenant d’une part des godets NE60-10 et NE60-11 et d’autre part, d’échantillons composites en raison de la faible quantité récoltée pendant certaines périodes : les MES des godets NE60-1 et NE60-2 ont été regroupées, ainsi que celles de NE60-7 et NE-60-8.

Comme pour la station St60-SW, les analyses réalisées (Tableau 4) montrent que les MES sont composés principalement de minéraux comme la calcite, l’aragonite et la calcite magnésienne, cette dernière étant amplement majoritaire. Ici, aussi, 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 présente qu’à l’état de traces dans les quatre godets sélectionnés.

Tableau 4 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-NE) par le piège à sédiments séquentiel, du 9 janvier au 25 février 2013.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
NE60-1+2	M	m	m	t	-
NE60-7+8	M	m	m	t	-
NE60-10	M	m	m	t	-
NE60-11	M	m	m	t	-

M = composant majoritaire ; m = composant minoritaire ; t = composant trace

4.2.2.4 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 9) sont relativement élevées et très homogènes : la valeur moyenne est de 77,1±1,0 % et les extrêmes de 75,1 et 79,2%.

Les teneurs en carbonates sont les plus faibles mesurées comparativement à la campagne de la précédente saison chaude (janvier-février ; 84,3 ±4,9 %) mais également par rapport aux campagnes de la saison fraîche de juillet-août 2011 (91,0 ±3,0 %) et septembre-octobre 2012 (85 ±1,4 %).

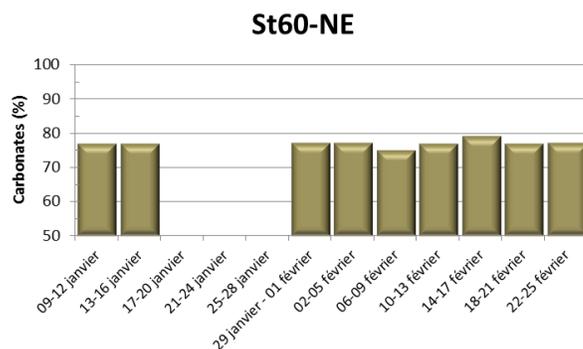


Figure 9 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 9 janvier au 25 février 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-NE). Les échantillons NE60-3 à NE60-5 n'ont été analysés par manque de matière.

4.2.3 Canal de la Havannah (station St60-SW)

Note : La quantité de matière particulaire collectée dans les 4 godets notés NE60-3 à NE60-6 a été très faible ($m < 0,26$ g). De plus, la fraction fine ($\varnothing < 40\mu\text{m}$) ne représentant qu'au maximum 0,15 g (NE60-6), la détermination des compositions minéralogiques et des teneurs en carbonates n'ont pu être réalisées. Seules, les analyses en métaux et les granulométries ont été conduites sur ces 4 échantillons.

4.2.3.1 Masses collectées

A la station St60-SW (Figure 10), les échantillons étudiés montrent une très grande similarité avec ceux analysés pour la station jumelle St60-NE. En effet, les quantités minimale et maximale vont respectivement de 0,11 g (SW60-05 ; 25-28 janvier) à 10,71 g (SW60-9 ; 10-13 février). Toutefois, il est à noter que d'une manière globale les quantités collectées à cette station sont quelque peu supérieures à celles mesurées en St60-NE (0,04 g et 8,77 g, respectivement).

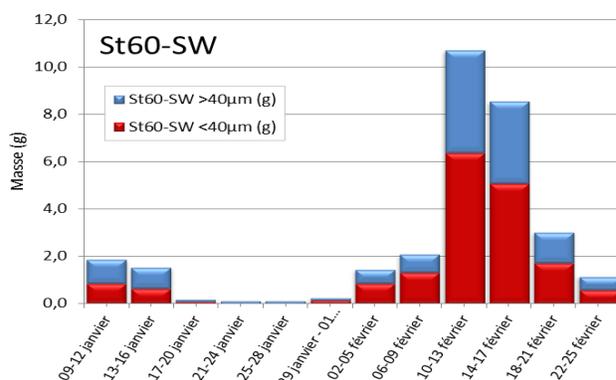


Figure 10 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 9 janvier au 25 février 2013 dans le Canal de la Havannah, au sud-ouest du diffuseur (St60-SW). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines ($< 40\mu\text{m}$) et fractions grossières ($> 40\mu\text{m}$).

En ce qui concerne les fractions grossières ($\varnothing > 40\mu\text{m}$), celles-ci sont quantitativement plus importantes dans le godet SW60-9 (4,33 g ; 10-13 février) et minimale dans le godet SW60-5 (0,04 g ; 25-28 février). En termes de proportions, les masses de fractions grossières les plus importantes ($> 50\%$) semblent correspondre avec les périodes de très faible piégeage du début et de milieu d'étude (9 janvier au 9 février). Toutefois, la faiblesse des quantités pesées augmente les incertitudes et ne permet pas d'être affirmatif.

En termes de variabilité interannuelle, les quantités collectées sont relativement proches de celles de la campagne antérieure obtenues pour la saison chaude (0,17-6,67 g ; janvier-février 2012).

4.2.3.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations de grains est quasiment identique à celle observée à la station St60-NE (Figure 8 et Figure 11). Les fluctuations sont similaires et seules, les populations de silts fins et moyen est modifiée, celles-ci augmentant dans le dernier godet (SW60-11).

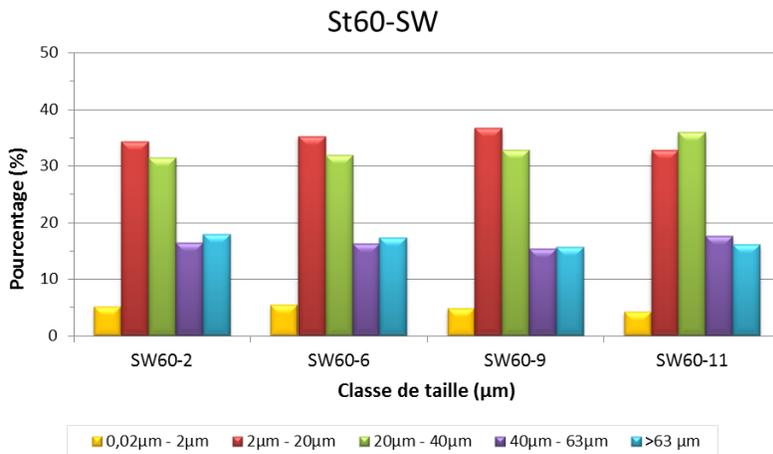


Figure 11 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel, du 9 janvier au 25 février 2013.

4.2.3.3 Compositions minéralogiques

Comme pour la station St60-NE, les analyses diffractométriques ont été réalisées sur des MES provenant d'une part des godets NE60-10 et NE60-11 et d'autre part, d'échantillons composites en raison de la faible quantité récoltée pendant certaines périodes : les MES des godets NE60-1 et NE60-2 ont été regroupées, ainsi que celles de NE60-7 et NE-60-8

Les analyses réalisées (Tableau 5) montrent que les MES sont composés des mêmes minéraux qu'en St60-NE, comme la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite, principalement. De la même manière, 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 est présente dans des proportions identiques pour les 4 prélèvements.

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

Tableau 5 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-SW) par le piège à sédiments séquentiel, du 9 janvier au 25 février 2013.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
SW60-1+2	M	m	m	t	-
SW60-7+8	M	m	m	t	-
SW60-10	M	m	m	t	-
SW60-11	M	m	m	t	-

M = composant majoritaire ; **m** = composant minoritaire ; **t** composant à l'état de traces

4.2.3.4 Teneurs en carbonates

Globalement, comme pour sa station jumelle, les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 12) sont relativement élevées et très homogènes : la valeur moyenne est de $75,2 \pm 5,1$ % et les extrêmes oscillent de 62,6 à 77,2 %.

De même, les teneurs en carbonates observées sont les plus faibles mesurées : $89,7 \pm 7,5$ % pour la campagne de la saison chaude janvier-février 2012, $91,0 \pm 3,0$ % et $82,7 \pm 2,4$ % pour les campagnes de la saison fraîche de juillet-août 2011 et septembre-octobre 2012, respectivement.

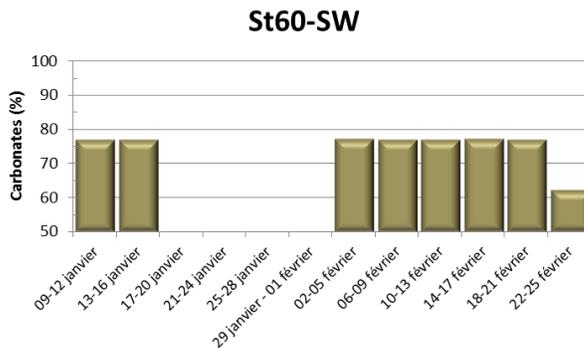


Figure 12 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 9 janvier au 25 février 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-SW).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Les précipitations atmosphériques du 17 février (50,1 mm) n'ont que très légèrement modifié les flux verticaux des particules au niveau de la Baie Kwé. Dans le Canal de la Havannah, aucune augmentation du flux n'est perceptible relié à cet événement.

Pour cette quatrième campagne, la masse minimale de MES collectée à la station St06-KW1 est 3,00 g. Cette valeur est exactement la même que celle mesurée en septembre-octobre 2012. En ce qui concerne les maximales, la valeur de janvier-février 2012 (25,61 g) est comparable à celle obtenues dernièrement en janvier-février 2013 (21,66 g).

Dans le Canal de la Havannah, la comparaison avec la campagne de janvier-février 2012 montre que les valeurs minimales sont exactement du même ordre (0,20 g) alors que pour les maximales, en 2013 les masses sont quasiment deux fois plus élevées (8,77 g et 5,39 g respectivement). Pour la station jumelle St60-SW, les quantités collectées (0,11 g à 10,71 g) sont relativement proches de celles de la campagne 2012 (0,17-6,67 g).

D'une manière générale pour cette saison chaude, les MES collectées dans la Baie Kwé ont une granulométrie un peu plus fine que dans le Canal ; 18,5 à 28% des particules mesurent plus de 40 μm , contre 27,5 à 37,0 %, respectivement.

Pour la Baie Kwé, la concentration moyenne en carbonates ($66,9 \pm 8,4$ %) est notablement inférieure à celle de la campagne précédente de janvier-février 2012 ($79,7 \pm 2,6$ %). Plus faibles qu'en Baie Kwé, dans le Canal de la Havannah les teneurs sont aussi en notable baisse par rapport aux 3 autres campagnes.

Les principaux minéraux sont : la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite pour le domaine marin et la goéthite pour l'influence terrigène que l'on ne retrouve bien identifiée que dans la Baie Kwé.

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 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 maximum de l'ordre de 30 à 38 % (Tableau 6) ; le calcium ne montrant que 19 % d'écart entre les valeurs extrêmes. En conclusion, globalement, les variations constatées sont plus élevées qu'en saison fraîche (septembre- octobre 2012).

D'un point de l'évolution temporelle, les concentrations en métaux ont toutes enregistré les valeurs maximales pour la période 21-24 janvier (godet KW1-4) ; de part et d'autre de ce pic de concentration, les valeurs sont demeurées stables et du même ordre. Pour le calcium un schéma inverse s'est produit traduisant la diminution temporaire simultanée des influences marines.

Les niveaux de concentrations sont tous, sans exception, supérieurs à ceux de la campagne de la saison chaude précédente (janvier-février 2012). L'augmentation constatée oscille entre 16% (Fe) et 27% (Mn). Comme pour cette dernière, les résultats montrent ainsi, une légèrement augmentation par rapport à la campagne de juillet-août 2011 (Contrat Vale-NC/AEL, n°2684) et à ceux de l'Etat de Référence défini en 2007 (Contrat CEIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012).

Tableau 6 : 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 le 25 février 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%

La matrice de corrélation met en évidence, une nouvelle fois, une grande similarité (seuil > 0,95) d'évolution des concentrations massiques inter-éléments pour Co, Cr, Fe et Ni (Tableau 7) ; l'évolution des concentrations en Mn montrent un niveau de similarité moindre, comparativement aux résultats obtenus en janvier-février 2012. Toutefois, cette similarité globalement satisfaisante souligne que ces éléments métalliques appartiennent au cortège des formations latéritiques exploitées.

Les concentrations en calcium évoluent peu dans le temps mais la matrice de similarités montre qu'il existe bien une anti-corrélation entre celui-ci et les 5 métaux latéritiques (Tableau 7).

La normalisation des concentrations du calcium par le fer (Ca/Fe) souligne de manière notable les évolutions relatives distinctes des deux éléments qui représentent les pôles marins et terrigènes, respectivement (Figure 13) ; les valeurs minimale et maximale sont respectivement de 1,43 (KW-3 ; 17-20 janvier) et 2,41 (KW-1 ; 17-20 janvier) et sont comparables, pour les maximas, à celles des 2012. Pour les minimas les valeurs diffèrent puisqu'elles accusent une forte baisse en 2013.

Ainsi, les deux valeurs maximales des ratios Ca/Fe des godets KW-1 (9-12 janvier) et KW-10 (14-17 février) traduisent la mise en place de périodes de forte empreinte marine, à l'inverse, les valeurs minimales (KW-3 ; 17-20 janvier et KW4 ; 21-24 janvier) soulignent l'augmentation des apports terrigènes en coïncidence avec les pics de concentration en métaux. Entre les valeurs extrêmes, les ratios évoluent de manière relativement progressive.

Les deux valeurs maximales du ratio correspondent avec des régimes globalement de SE forts à modérés. La valeur minimale coïncide avec un régime de tendance E modéré.

Tableau 7 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 9 janvier et le 25 février 2013 (Station St06-KW1 ; n=12).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,932	1				
Cr	-0,865	0,964	1			
Fe	-0,930	0,986	0,956	1		
Mn	-0,900	0,930	0,886	0,962	1	
Ni	-0,908	0,971	0,938	0,986	0,925	1

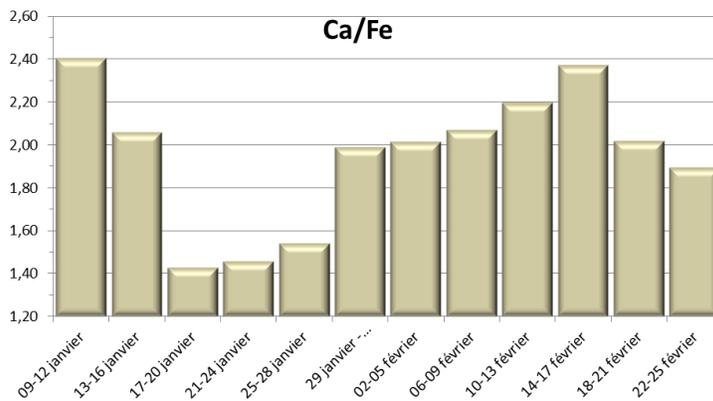


Figure 13 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé (St06-KW1) entre le 9 janvier et le 25 février 2013.

Compte tenu de la constance des concentrations en calcium dans le milieu marin (Tableau 6), les ratios Ca/Fe permettent de montrer que l'influence terrigène à la station St60-KW1 :

- d'une part, semble plus importante en saison chaude en raison de l'ensemble des conditions hydro-climatiques ;
- d'autre part, paraît s'accroître notablement avec le temps (Tableau 8). En effet, les valeurs moyennes du rapport Ca/Fe, toutes saisons confondues, diminuent progressivement d'une campagne à l'autre passant de $3,17 \pm 0,5$ (juillet-août 2011) à $1,95 \pm 0,33$ (janvier-février 2013).

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

Tableau 8 : Evolution temporelle du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St06-KW1 entre le 9 janvier et le 25 février 2013.

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

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

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) ont logiquement permis de mettre en évidence une influence marine très marquée (Ca). Toutefois 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 excepté Co, les concentrations observées en janvier-février 2013 sont plus élevées que pour la même période de 2012. Cette augmentation est comprise entre 3 % (Mn) et 19 % (Cr). Par rapport à la campagne de septembre-octobre 2012 de fin de saison fraîche, les écarts sont encore plus prononcés puisqu'ils passent de 28 % (Mn) à 32 % (Cr) d'augmentation en janvier-février 2013 ; le cobalt montrant une tendance inverse (-38%). De surcroît, comparativement à l'Etat de Référence 2007/2008 (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230) l'augmentation est encore plus notable puisque celle-ci affecte tous les éléments métalliques et se situe entre 35-49 % pour Co et 61-72 % pour Ni.

La matrice de corrélation (Tableau 10) ne permet de dégager qu'une seule similarité hautement significative entre Fe et Ni (Coefficient de Pearson $R > 0,988$), à noter que Cr montre également une tendance de comportement équivalente bien que moins prononcée.

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

Tableau 9 : 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 9 janvier et le 25 février 2013 (Station St60-NE ; n=10).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	297 003	18	763	23 325	232	429
MAX	314 410	26	928	30 345	296	566
MOYENNE	306 914	21	834	26 131	262	478
ECART-TYPE	5 220	2	58	2 022	25	39
% RSD	2%	11%	7%	8%	9%	8%

Tableau 10 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 9 janvier et le 25 février 2013 (Station St60-NE; n= 10).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,307	1				
Cr	-0,539	0,589	1			
Fe	-0,412	0,694	0,909	1		
Mn	-0,540	0,555	0,528	0,466	1	
Ni	-0,414	0,717	0,877	0,988	0,522	1

Dans le Canal de la Havannah, la normalisation des concentrations du calcium par le fer oscille entre 10,0 et 13,3 et montre, d'une part, que les apports terrigènes sont faibles, et d'autre, part que ceux-ci ont été relativement constants au cours de la période.

D'un point de vue temporel et d'une manière générale, la variabilité du ratio Ca/Fe est faible et il ne diffère pas fortement selon les saisons, même si, effectivement, l'impact terrigène semble plus marqué pendant la saison

chaude (Tableau 11). Si ces observations démontrent que l'impact des apports terrigènes demeure modéré dans cette zone, quelle que soit la saison, il apparaît toutefois assez clairement que les apports en particules latéritiques fines riches en métaux tendent à augmenter depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007/2008.

Tableau 11 : Evolution temporelle du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St60-NE.

Ca/Fe	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	2007-2008*
Moyenne	11,8	19,0	14,3	Perte	26,8
Ecart-type	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 3112 ± 284 mg/kg. Cette valeur montre que l'élément ne varie pas en fonction des conditions hydro-climatiques régnantes dans le Canal de la Havannah (Figure 14).

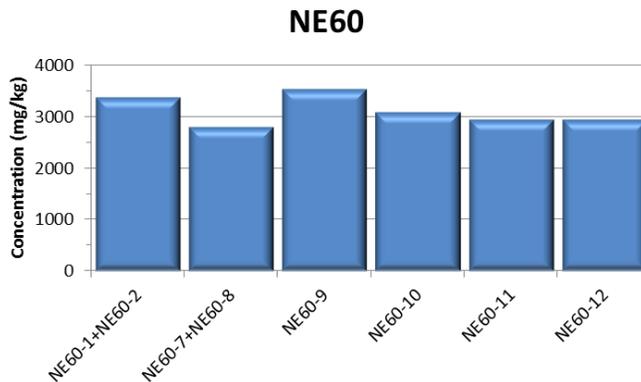


Figure 14 : Concentration du soufre dans les 6 godets correspondant aux événements météorologiques marquants enregistrés entre le 9 janvier et le 25 février 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

4.3.3 Canal de la Havannah (station St60-SW)

4.3.3.1 Concentration en métaux et calcium

Comme pour la station jumelle St60-NE, les éléments analysés dans les MES collectées au sud-ouest du diffuseur (St60-SW) ont logiquement permis de mettre évidence principalement l'influence marine (Ca) et une composante terrigène affaiblie (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni). Bien qu'incomplètes, les séries de résultats relatives aux stations St60-SW et St60-NE sont très proches.

Les apports terrigènes sont encore décelables bien que beaucoup moins exprimés que dans la Baie Kwé. Globalement, la variabilité des résultats est très comparable à celle observée à la station St60-NE (Tableau 9 et Tableau 12), toutes les deux présentant des concentrations un peu plus fortes qu'en janvier-février 2012. En effet, pour tous les éléments métalliques excepté Co, l'augmentation est comprise entre 3 % (Mn) et 19 % (Cr). Par rapport à la campagne de septembre-octobre 2012 de fin de saison fraîche, les écarts sont encore plus prononcés puisqu'ils passent de 25 % (Mn) à 29 % (Cr) d'augmentation en janvier-février 2013 ; le cobalt montrant, comme pour St60-NE, une tendance inverse (-45%).

Comparativement à l'Etat de Référence 2007/2008 (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230) l'augmentation est encore plus marquée puisque celle-ci affecte tous les éléments métalliques et se situe entre 32-47 % pour Co et 61-72 % pour Ni.

La matrice de corrélation (Tableau 13) ne permet de dégager que des tendances de similarité de comportement pour Cr, Fe et Ni (Coefficient de Pearson R < 0,95 ; Tableau 13).

Il doit être rappelé qu'aucune corrélation significative au seuil de similarité de 0,95 n'avait été mise en évidence pour la campagne de janvier-février 2012. Cette statistique démontre que l'influence des apports terrigènes n'est pas prépondérante dans ce secteur du Canal de la Havannah et en particulier à la station St60-SW.

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 9 janvier et le 25 février 2013 (Station St60-SW ; n=9).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	276308	10	762	23819	203	435
MAX	312663	27	1009	29939	307	546
MOYENNE	302643	20	839	26127	254	480
ECART-TYPE	10339	4	78	2164	34	38
% RSD	3%	22%	9%	8%	13%	8%

Tableau 13 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 9 janvier et le 25 février 2013 (Station St60-SW ; n=9).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	0,583	1				
Cr	-0,622	-0,693	1			
Fe	-0,577	-0,509	0,933	1		
Mn	0,237	0,666	-0,616	-0,536	1	
Ni	-0,642	-0,267	0,813	0,917	-0,226	1

Pour cette station, la normalisation des concentrations du calcium par le fer montre la même fourchette de valeurs que pour la station jumelle St60-NE. En effet, elle oscille entre 9,2 et 13,1, ce qui suggère que les apports terrigènes sont faibles et que ceux-ci ont été relativement constants au cours de la période.

Toutefois, il est à noter que des évolutions très modérément distinctes sont observables entre les stations St60-NE et St60-SW, comme l'on montré les campagnes antérieures, quelle que soit la saison étudiée. Il semble donc admissible de considérer que les influences terrigènes sont plus estompées au niveau de la station St60-SW, malgré la proximité des deux point de mesures.

D'un point de vue temporel et d'une manière générale, la variabilité du ratio Ca/Fe est faible et il ne diffère pas fortement selon les saisons, même si l'impact terrigène semble nettement plus marqué pendant la saison chaude (Tableau 14). Toutefois, il apparait tout aussi clairement que les apports en particules latéritiques riches en métaux tendent à augmenter depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007/2008.

Tableau 14 : Evolution temporelle du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St60-SW.

Ca/Fe	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	2007-2008*
Moyenne	11,7	17,3	13,9	31,3	26,8
Ecart-type	1,2	1,2	1,0	1,1	6,7

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

4.3.3.2 Teneurs en soufre

La concentration moyenne en soufre est de 2920 ± 615 mg/kg. Cette valeur montre que l'élément ne varie pas en fonction des conditions hydro-climatiques régnantes dans le Canal de la Havannah (Figure 15).

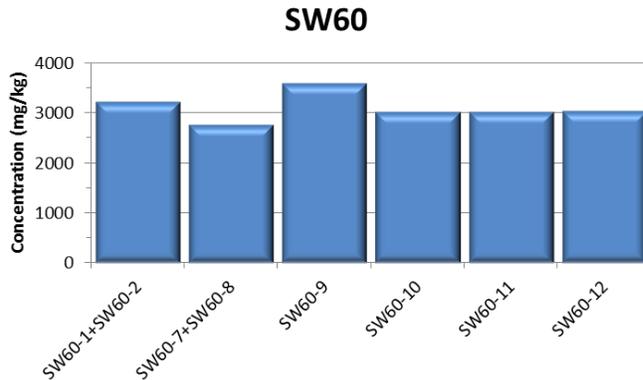


Figure 15 : Concentration du soufre dans les 6 godets correspondant aux événements météorologiques marquants enregistrés entre le 9 janvier et le 25 février 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-SW).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Les conditions hydro-climatiques influent sur la valeur des paramètres géochimiques analysés qui montrent des évolutions temporelles tant en Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah : ces variations sont d'ordre qualitatif et quantitatif.

En Baie Kwé (St06-KW1), les concentrations des métaux analysés sont hausses sensibles (21 ± 5 %) par rapport à celles de la campagne de la saison chaude précédente (janvier-février 2012). Plus généralement, ces valeurs montrent également une augmentation notable (60 ± 20 %) par rapport aux résultats de l'Etat de Référence défini en 2007.

Pour les stations du Canal de la Havannah (St60-NE et St60-SW), globalement, les concentrations ont augmenté de manière plus modérée (16 ± 8 %), pour tous les métaux sauf le cobalt dont la teneur décroît depuis septembre 2012. Toutefois, d'une manière générale, par rapport à l'Etat de référence de 2007, tous métaux confondus, l'accroissement est de 49 ± 10 %.

Les compositions en métaux signalent clairement l'origine latéritique des particules dans la Baie Kwé, alors que cette influence est très amoindrie dans le Canal, notamment en progressant vers l'ouest c'est-à-dire de St60-NE à St60-SW.

La station St60-SW semble moins influencée par les apports terrigènes que sa jumelle St60-NE.

5 INTERPRETATION

5.1 INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

5.1.1 Baie Kwé,

Dès la première campagne (juillet-septembre 2011), le mouillage des pièges à sédiments avait conduit à établir un parallèle entre la quantité collectée, la distribution des populations granulométrique et l'action mécanique induite par certaines directions de vents. Des conditions météorologiques semblables ont été observées durant cette quatrième campagne (janvier-février 2013) et dans l'ensemble, elles ont donné lieu à la collecte d'une plus grande quantité de MES qu'en saison fraîche (septembre-octobre 2012), comme attendu.

Il ressort également qu'une forte proportion de ces particules est remise en suspension à la faveur de régimes de SE à S lorsque celui-ci est de relativement forte intensité (10 à 14 m/s ; Figure 16). Une telle conjonction de conditions climatiques s'est présentée entre 29 janvier et le 1 février 2013, période qui a permis de collecter la quantité maximale de MES de l'étude (21,7 g) ; aucune pluie significative n'a accompagné cet événement. Durant la période suivante, la masse collectée est tombée à 6,4 g en raison de l'installation de vents modérés ($0 < \text{FIX} < 12$ m/s) de secteur W ne générant pas de clapot à l'intérieur de la Baie Kwé.

Un épisode pluvieux modéré, accompagné de vents de secteurs SE et de force moyenne (8-12 m/s), a permis de collecter environ 14 g de MES, masse également collectée quelques jours auparavant sous l'action unique d'un alizé de même direction.

L'influence des apports terrigènes est maximale entre le 17 et 28 janvier et s'est traduite par une forte diminution du rapport Ca/Fe parallèlement à une augmentation importante des concentrations en métaux, comme le montre l'évolution de Ni. Cette variation des concentrations correspond avec les masses de MES collectées les plus faibles (Figure 16). Par ailleurs, durant cette période, les conditions hydro-climatiques coïncidaient avec un épisode de vents de SE d'intensité faible (4-10 m/s) basculant progressivement à l'E, avec des vitesses plus importantes (8-14 m/s). Dans ce contexte, seules les particules fines d'origine latéritique, riches en métaux, peuvent rester en suspension, ce mécanisme expliquant alors les fortes concentrations analysées.

A l'inverse, l'influence marine a été maximale (Ca/Fe en hausse) pour deux épisodes météorologiques différents. Le premier (09-12 janvier) s'explique par la persistance de vents de secteur NE-SE d'intensité variable (2-12 m/s ; Figure 16). Le deuxième (14-17 février) est généré par l'installation d'alizés d'E-SE constants et de forte intensité (12-18 m/s). Ces régimes sont alors capables de remettre en suspension les particules de gros diamètre issues de l'altération du platier corallien qui borde la Baie Kwé.

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 secteur S et S-E forts ($\text{FIX} > 10$ 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), soit sous l'action des vents

faibles provenant des secteurs E, N et W qui contribuent au déplacement des masses d'eau enrichies en tests de micro-organismes marins comme les foraminifères, soit 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.

5.1.2 Canal de la Havannah

Pour les deux stations du Canal de la Havannah (St60-NE et St60-SW), les répartitions temporelles sont identiques et montrent que le dépôt maximal (8,8 g et 8,6 g respectivement) coïncide avec une période d'influence terrigène minimale (Figure 17 et Figure 18). En effet, le ratio Ca/Fe devient maximum quand la concentration en Ni, respectivement 13,3 et 429 mg/kg est maximale. D'un point de vue des conditions météorologiques, cette période correspond à des régimes de secteurs NE à SE modérés ($6 < \text{FIX} < 12$ m/s), sans précipitations significatives. L'ensemble de ces conditions hydro-climatiques favorisent la circulation d'est en ouest des eaux enrichies en tests de micro-organismes provenant du récif barrière.

L'appauvrissement drastique en MES constaté entre le 17 et 29 janvier est en concordance avec des régimes météorologiques faibles à modérés de secteurs N à E principalement (Figure 17 et Figure 18). Dans ces conditions les eaux sont repoussées au large de la ligne de côte et, en l'absence de précipitations atmosphériques, ne transportent que peu de matière en suspension. A noter durant cette dernière période d'études que les précipitations atmosphériques enregistrées n'ont eu aucune conséquence sur la collecte des MES.

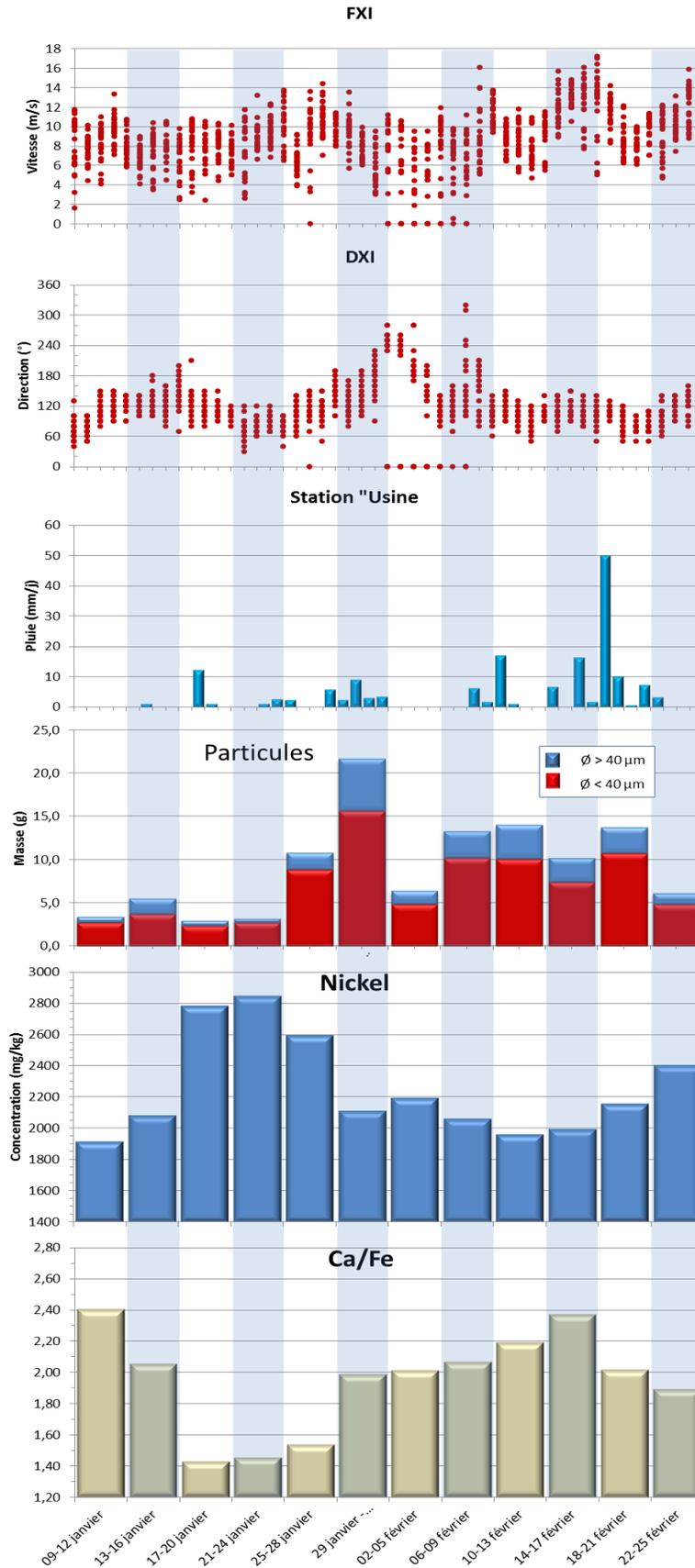


Figure 16 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St06-KW1 pour la période du 9 janvier au 25 février 2013.

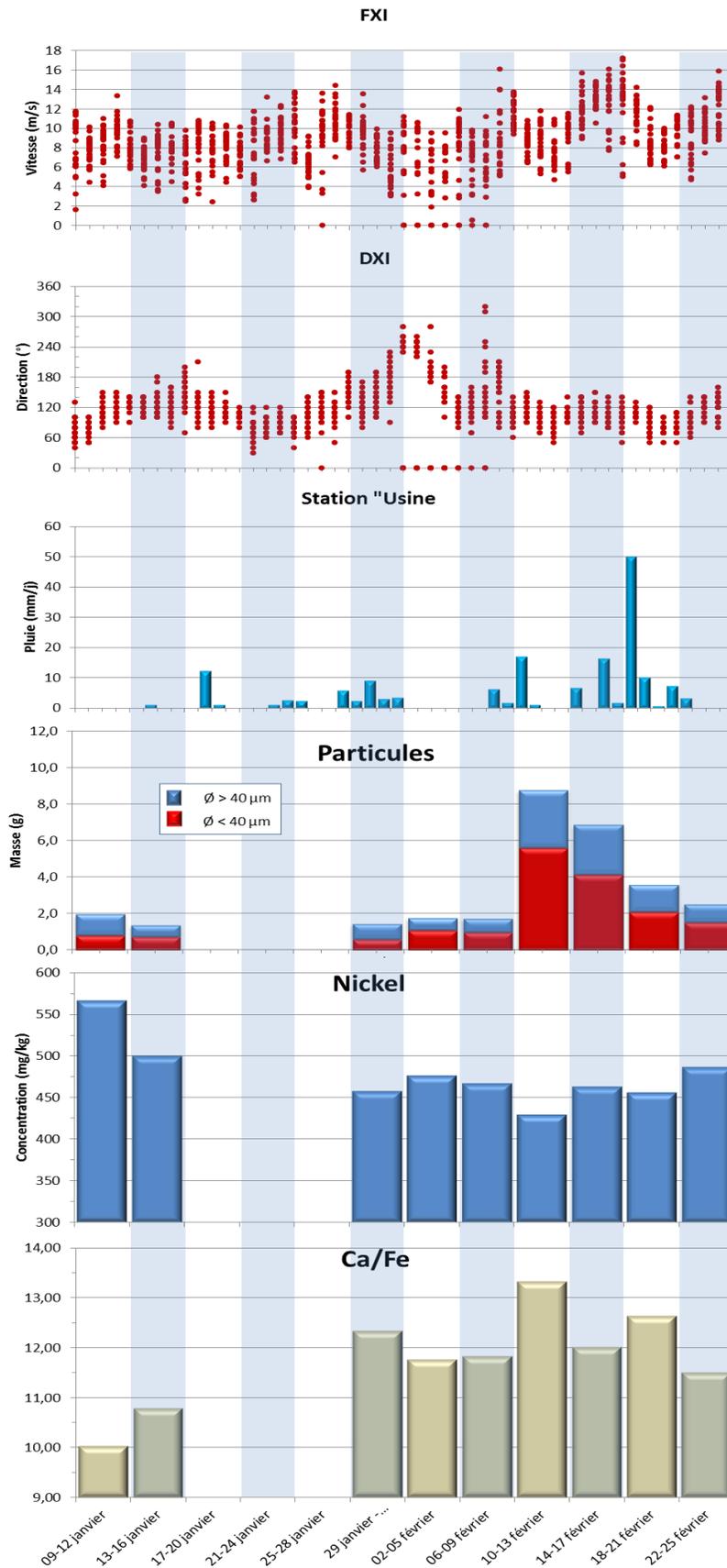


Figure 17 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St60-NE pour la période du 9 janvier au 25 février 2013.

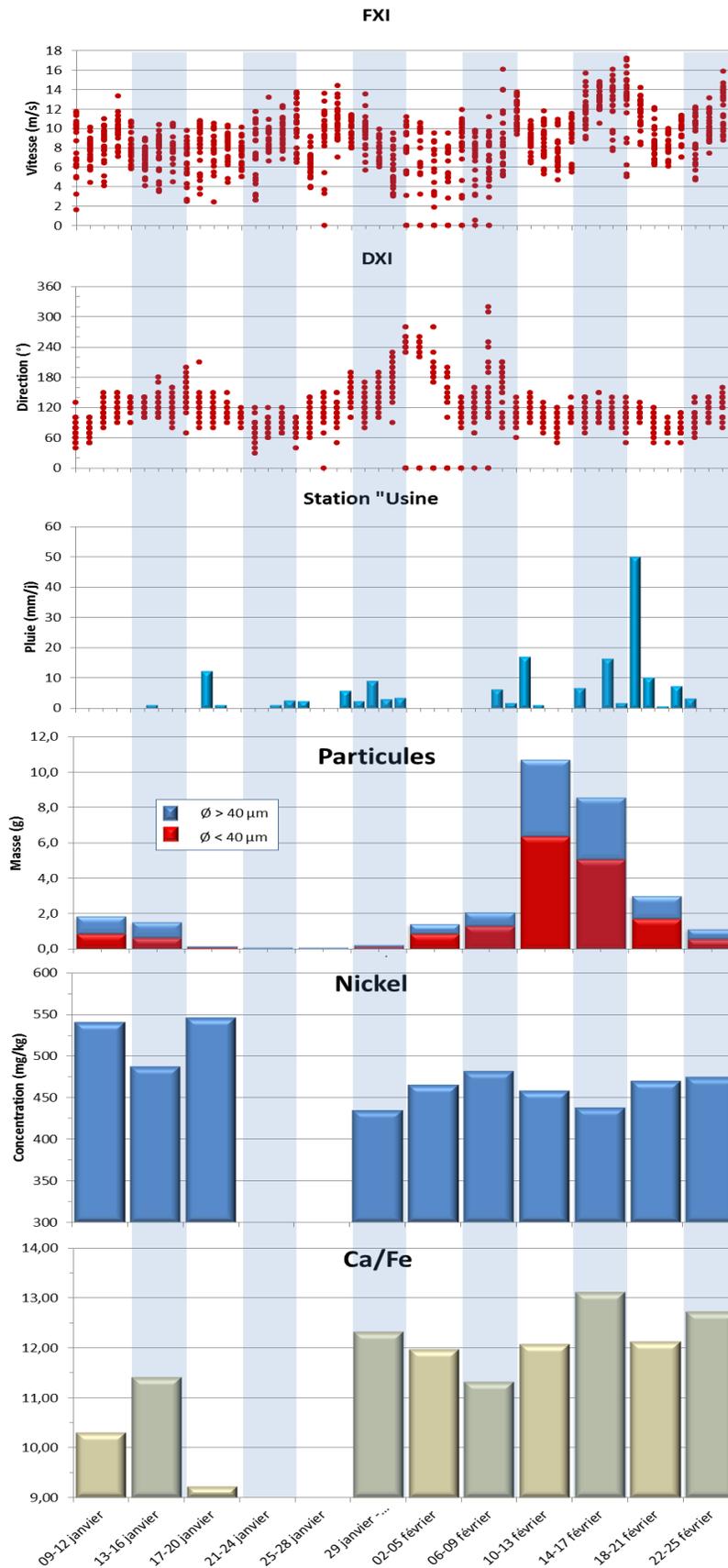


Figure 18 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St60-SW pour la période du 9 janvier au 25 février 2013.

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 la base des 4 campagnes réalisées entre juillet 2011 et janvier 2013 pour les deux ensembles, Baie Kwé et Canal de la Havannah. Une évaluation similaire a été également réalisée sur la base des résultats issus de la définition de l'Etat de Référence de 2007 (Tableau 15).

Pour la Baie Kwé, entre juillet 2011 et janvier 2013, les flux moyen de MES sont compris entre $27,1 \pm 30,0$ et $46,2 \pm 9,5$ g/m²/j. Ces valeurs mettent en évidence une grande variabilité temporelle des flux mais aussi, et malgré tout, une périodicité entre les saisons fraîches et chaudes ; durant ces dernières les flux étant bien plus élevées qu'en saison fraîche (Tableau 15). Par ailleurs, si aucun accroissement des flux ne semble vraiment notable, une tendance à l'augmentation paraît tout de même se dessiner, bien exprimée en janvier-février 2013. En revanche, les flux mesurés en 2006 et 2007 conduisent à devoir prendre en considération les valeurs pour une même saison et leur progression d'une année sur l'autre, comme le montrent les calculs effectués pour les mois de mars 2007, janvier 2012 et janvier 2013 (Tableau 15), par exemple.

Pour le Canal de la Havannah, entre juillet 2011 et janvier 2013, les flux sont compris entre $3,5 \pm 3,0$ et $12,7 \pm 15,4$ g/m²/j (Tableau 15). Comme pour la Baie Kwé, une périodicité apparaît montrant clairement que les apports sont au moins 2 fois plus importants en saison chaude qu'en saison fraîche. Par ailleurs, les valeurs observées en février 2007 semblent anormalement élevées, les résultats de celle de novembre 2007 étant dans l'ordre de grandeurs actuel. Toutefois, exception faite de ces flux calculés pour février 2007, dans le Canal de la Havannah (comme en Baie Kwé) les valeurs suivent une tendance à la hausse d'une saison froide/chaude à l'autre.

Tableau 15 : Valeurs moyennes et écart-types des densités de flux en matière particulaire au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah). Valeurs calculées pour l'ensemble des 4 campagnes de juillet 2011 à janvier 2013 ; comparaison des valeurs obtenues avec celles mesurées en 2006 et 2007 pour la définition de l'Etat de Référence aux stations St06-KW1 pour la Baie Kwé et T4B, T4C et TCM) pour le Canal de la Havannah.

Baie Kwé (St06-KW1)

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

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

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

ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM

Pour la Baie Kwé, les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux ont augmenté entre 2011 et 2013. En effet, si les valeurs maximales sont restées du même ordre de grandeur, les minimales ont fortement progressé puisqu'entre juillet-août 2011 (1^{ère} campagne) et janvier-février 2013 (4^{ème} campagne) le bruit de fond géochimique

moyen a été multiplié par un facteur de 4,5 (Tableau 16). Cette augmentation est explicitée par l'**accroissement régulier des flux de matière terrigène particulaire de faible diamètre**, donc de plus forte concentration spécifique en métaux ; ces apports étant liés au débit solide du creek Kwé.

Il est à noter que le flux minimale de métaux mesuré lors de la première campagne (juillet-août 2011) était du même ordre de grandeur que celui observé lors de la définition de l'Etat de Référence (Tableau 17 et Figure 19), à contrario, les valeurs maximales étant déjà très différentes.

Pour le Canal de la Havannah, une augmentation moyenne des densités de flux en métaux est également observée entre 2011 et 2013 (Tableau 17 et Figure 19). Cependant et contrairement aux observations effectuées pour la Baie Kwé, l'augmentation des valeurs minimales, qui constituent le bruit de fond géochimique, ne semble pas être la raison principale, les masses d'eau étant cycliquement renouvelées par les courants provenant de la Passe de la Havannah. Il faut probablement rechercher la cause dans l'augmentation de la fréquence des épisodes d'apports importants qui prennent naissance dans la Baie Kwé.

En effet, il s'agit probablement de néphéloïdes résultant d'un phénomène de resuspension de particules issues d'un premier dépôt dans la Baie Kwé où le taux de sédimentation a progressé assez nettement. Régulièrement, ces particules sont alors probablement remises en suspension sous l'action mécanique des différents régimes de vents de S, puis transportées vers le Canal où elles suivent les courants dominants.

Les flux moyens en métaux ont été calculés pour chaque campagne de 48 jours de collecte ; leur évolution temporelle peut être illustrée par le cas du nickel (Figure 19). Celui-ci montre clairement que pour la Baie Kwé, et le Canal de la Havannah, l'augmentation des flux est notable, en particulier en janvier-février 2012 ; en saison fraîche, les flux devant moindres. Dans le Canal de la Havannah, si le phénomène est globalement identique avec une forte augmentation constatée en janvier 2013, l'évolution se singularise par une valeur très forte des flux en mars 2007. Cette valeur qui est bien réelle, n'est cependant pas explicitée dans cette étude. A noter cependant que l'évolution du fer dans la Baie Kwé, contrairement au nickel, montre pour cette même période une nette augmentation.

Tableau 16 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah).

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

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

Tableau 17 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$) 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).

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

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

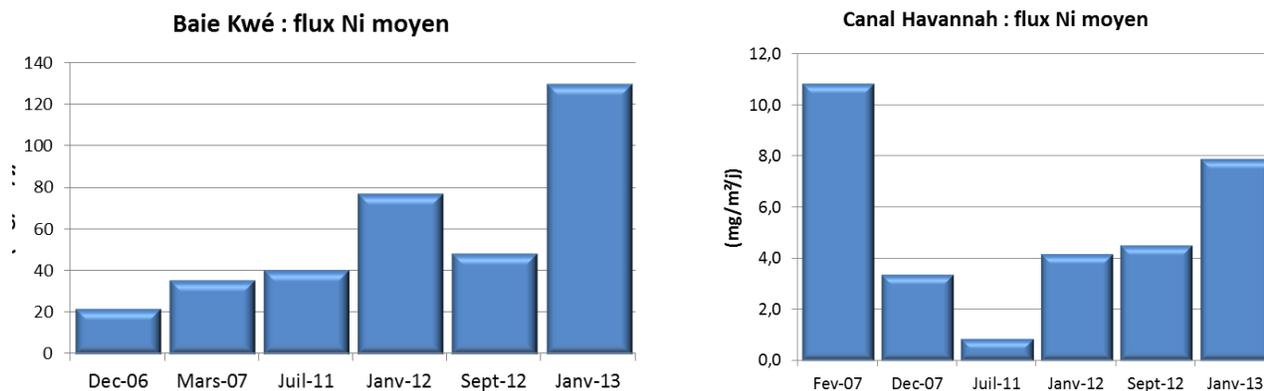


Figure 19 : Evolution temporelle des flux de nickel moyens ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$) mesurés au niveau de la station St06-KW1 pour la Baie Kwé et des stations St60-NE + St60-SW dans le Canal de la Havannah depuis juillet 2011 et comparaison avec les valeurs observées en 2006/2007 (Etat de Référence).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Comme pour les 3 autres campagnes, la distribution des MES dans les eaux, tant en Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah, est grandement régie par l'action mécanique de la houle, elle-même générée par les vents, ces facteurs se combinant aux des effets de la lixiviation des bassins versants par épisode pluvieux.

En effet, en cohérence avec les résultats précédents, seuls les régimes d'un large secteur S sont susceptibles de remettre en suspension les particules sédimentées jusqu'à une profondeur de 10 m, ce mécanisme étant notamment observable dans la Baie Kwé mais également le long des côtes. Par ailleurs, les vitesses des vents supérieures à 14 m/s entraînent aussi la remise en suspension des particules carbonatées de plus fort diamètre, provenant de l'altération du platier récifal. Une fraction de toutes ces particules suit ensuite les courants dominants vers le secteur W du Canal de la Havannah.

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

Les valeurs de flux de matière particulaire (MES) et de métaux entrent toutes dans les gammes observées antérieurement en saison chaude bien qu'une augmentation globale soit perceptible en 2012 et 2013 ; à saison équivalent, **ces flux de métaux sont quasiment tous supérieurs de près de 50%** par rapport aux campagnes précédentes et bien évidemment aussi par rapport aux valeurs obtenues pour la définition de l'Etat de Référence de 2007, en Baie Kwé comme dans le Canal de la Havannah.

6 CONCLUSION

Pour la période d'études comprise en le 09 janvier et le 25 février 2013 (saison chaude), les vents ont montré une variabilité temporelle classique conduisant à une constance des régimes d'alizés de SE forçant nettement à partir du 14 février (18 m/s). Ce régime a été interrompu en milieu de période d'études (01 février) par un « coup d'ouest » de quelques jours mais de faible intensité (10 m/s) ; quelques journées ont été marquées par des vents de secteurs E de 2 à 10 m/s.

En termes de précipitations, seul un épisode notable est à signaler (50,1 mm) le 18 février. Ce contexte hydro-climatique a conduit aux observations suivantes :

1. BAIE KWE

- a. Les précipitations n'ont pas généré de couche turbide notable dans la baie.
- b. Hormis une turbidité moyenne constatée entre le 06 et le 21 février, un seul néphéloïde s'est formé en milieu de période (29 janvier – 01 février) sous l'effet combiné de la direction des vents (SE à S) et de leur force (jusqu'à 16 m/s).
- c. Un régime d'alizés modérés, entre le 09 et 25 janvier, forçant en fin de période a favorisé le transport des particules latéritiques les plus fines, très enrichies en métaux.
- d. Comme déjà mentionné en conclusion des rapports précédents, non seulement la direction des vents de secteur S est déterminante pour la formation des néphéloïdes, mais les vitesse supérieures à 10 m/s semblent nécessaires pour entraîner une remise en suspension des particules latéritiques fines déposées à l'intérieur de la baie. Des vents plus rapides conduisent à la resuspension de particules moyennes à grossières ($\varnothing > 40 \mu\text{m}$) carbonatées provenant du platier récifal (observation du 14 au 17 février).

2. CANAL DE LA HAVANNAH

- a. Cette période d'étude se caractérise par la faible quantité de MES collectée dans chacun des deux pièges jusqu'au 10 février où la masse collectée a atteint un peu plus de 10 g (10-13 février) puis 8 g (14-17 février) avant de décroître rapidement. Cet événement a été marqué par une forte augmentation des particules carbonatées, en liaison probable avec les régimes de secteur E modérés à forts qui poussent les eaux du large vers l'intérieur du lagon via le Canal de la Havannah.
- b. Comme estimé antérieurement, au niveau des stations de mesure, la charge minérale attribuée aux apports terrigènes issus de la Kwé est fortement diluée. Cette diminution s'explique par les effets de dispersion et les faibles apports terrigènes induits par le Kwé durant cette période.
- c. Les apports en calcium sont liés aux nombreux débris coquillers et tests de micro-organismes qui composent les particules.
- d. Dans le Canal de la Havannah, en dehors de ces périodes météorologiques particulières et en l'absence de forts épisodes pluvieux, les flux de particules sont très modestes et leur nature est, logiquement, à très forte dominance marine (%CaCO₃ > 95).

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

Toutefois, il est nettement observé une augmentation des flux de matière depuis 2011. Si les flux de MES sont en progression, les apports en métaux proportionnellement semble bien plus importants dans la Baie Kwé mais également dans le Canal. Bien évidemment, ce phénomène est particulièrement observable pour la Baie Kwé puisque les flux de MES doublent et les apports en nickel triplent ; cette différence s'expliquant probablement par l'évolution du matériel particulaire qui provient de zones du front de mine plus profondes. Les augmentations de flux (MES et métaux) dans le Canal de la Havannah, sont probablement liées à la remise en suspension des particules ayant dans un premier temps sédimenté dans la Baie Kwé avant d'être transportées.

7 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.

Bodeï & 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.

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.

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.

8 LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : AIRE D'ETUDE POUR LE SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES ISSUES DU PROCESS DE PRODUCTION DE L'USINE ET DES ACTIVITES D'EXCAVATION DE MINE DE VALE-NC. LE TRAIT ROUGE REPRESENT LE DIFFUSEUR, DE PART ET D'AUTRE FIGURENT LES DEUX STATIONS St60-SW ET St60-NE LOCALISEES A 60M DU REJET. EN BAIE KWE LE PIEGE A SEDIMENTS A ETE MOUILLE A LA STATION St06-KW1. LA STATION St09 APPARTIENT AU RESEAU SEMESTRIEL DE SURVEILLANCE PHYSICO-CHIMIQUE DE LA COLONNE D'EAU.	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), « DIRECTION DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (DD) » EN (°) ET « VITESSE DES VENTSMOYENS JOURNALIERS (FF) » EN (M/S), A LA STATION METEOROLOGIQUE DE L'« USINE » DE VALE-NC POUR LA PERIODE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	13
FIGURE 4 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013 EN BAIE KWE (St06-KW1). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM).....	14
FIGURE 5 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES EN BAIE KWE PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	15
FIGURE 6 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013 EN BAIE KWE (St06-KW1).....	16
FIGURE 7 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013 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).....	17
FIGURE 8 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	18
FIGURE 9 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE). LES ECHANTILLONS NE60-3 A NE60-5 N'ONT ETE ANALYSES PAR MANQUE DE MATIERE.....	19
FIGURE 10 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013 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).....	19
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.....	20
FIGURE 12 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW).	21
FIGURE 13 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (St06-KW1) ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013.	23
FIGURE 14 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES 6 GODETS CORRESPONDANT AUX EVENEMENTS METEOROLOGIQUES MARQUANTS ENREGISTRES ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE).	25
FIGURE 15 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES 6 GODETS CORRESPONDANT AUX EVENEMENTS METEOROLOGIQUES MARQUANTS ENREGISTRES ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW).	27
FIGURE 16 : 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 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	30

FIGURE 17 : 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 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	31
FIGURE 18 : 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-SW POUR LA PERIODE DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.....	32
FIGURE 19 : EVOLUTION TEMPORELLE DES FLUX DE NICKEL MOYENS ($\text{MG}/\text{M}^2/\text{j}$) MESURES AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET DES STATIONS St60-NE + St60-SW DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH DEPUIS JUILLET 2011 ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS OBSERVEES EN 2006/2007 (ETAT DE REFERENCE).	35

9 LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LOCALISATION EXACTE DES TROIS STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A PARTICULES SEQUENTIELS : CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW ET St60-NE) ET EN BAIE KWE (StKW1). 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 JANVIER ET FEVRIER 2013.	11
TABLEAU 3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (STATION (St06-KW1) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	16
TABLEAU 4 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-NE) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	18
TABLEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-SW) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 9 JANVIER AU 25 FEVRIER 2013.	20
TABLEAU 6 : 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 LE 25 FEVRIER 2013 (STATION St06-KW1 ; n=12).	22
TABLEAU 7 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 (STATION St06-KW1 ; n=12).	23
TABLEAU 8 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013.	23
TABLEAU 9 : 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 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 (STATION St60-NE ; n=10).	24
TABLEAU 10 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 (STATION St60-NE; n= 10).	24
TABLEAU 11 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St60-NE.	25
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 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 (STATION St60-SW ; n=9).	26
TABLEAU 13 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 9 JANVIER ET LE 25 FEVRIER 2013 (STATION St60-SW ; n=9).	26
TABLEAU 14 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St60-SW.	26
TABLEAU 15 : VALEURS MOYENNES ET ECART-TYPES DES DENSITES DE FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH). VALEURS CALCULEES POUR L'ENSEMBLE DES 4 CAMPAGNES DE JUILLET 2011 A JANVIER 2013 ; COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES AVEC CELLES MESUREES EN 2006 ET 2007 POUR LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE AUX STATIONS St06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET T4B, T4C ET TCM) POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH.	33
TABLEAU 16 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH).	34
TABLEAU 17 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), T4B ET T4C (CANAL DE LA HAVANNAH) OBTENUES LORS DE LA PHASE DE DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE (2007-2008).	35

10 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 : RESULTATS DE CALCULS DE 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 de la Baie Kwe 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 est gréé sur une ligne de mouillage équipée avec un largueur acoustique. La durée d'immersion a été de 1,5 mois environ (18 janvier -05 mars 2012).

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 ($\phi < 40 \mu\text{m}$) 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 est titré et la concentration en carbonate de calcium est déterminée par relation stœchiométrique.

Granulométrie

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction $< 2000 \mu\text{m}$ après élimination des organismes « actifs » (Swimmers). La distribution de ces populations est réalisée par granulométrie laser après remise en suspension des sédiments, ajout d'agent dispersant (Pyrophosphates de Na/K) et agitation aux ultrasons. Seulement 4 échantillons par carrousel sont analysés.

Cette analyse a été confiée à l'Université d'Auckland (School of Environment), Nouvelle-Zélande.

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 ($\phi < 40 \mu\text{m}$) 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 pélitiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) 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 pélitiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) des sédiments par attaque acide à haute température en conditions hyperbares. L'analyse de S est effectuée par ICP-OES.

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) :
précipitations, direction et vitesse du vent.

Date	Pluie (mm)	TN (°C)	TX (°C)	FXI (m/s)	DXI (°)
8-janv.	0	21,9	26,6	10,5	150
9-janv.	0	22,7	28,6	11,7	80
10-janv.	0	23,7	26,1	10,1	80
11-janv.	0	22,9	27,1	11	90
12-janv.	0	22,7	26,7	13,3	100
13-janv.	1,2	22,3	26,7	10,7	130
14-janv.	0	22,1	27,1	9	130
15-janv.	0	22,6	27,1	10,4	140
16-janv.	0,4	22,4	27	10,5	120
17-janv.	12,4	21,3	25,7	9,8	180
18-janv.	1,2	21	25,4	10,8	120
19-janv.	0	19,9	26,4	10,5	100
20-janv.	0	21,9	27,2	10,3	130
21-janv.	0	22,3	27	10,1	100
22-janv.	1,2	21,9	29,1	11,7	90
23-janv.	2,8	22,1	27	13,2	80
24-janv.	2,6	23,7	28,8	12,3	70
25-janv.	0	23,4	28,3	13,7	90
26-janv.	0,4	23,4	26,7	9,2	100
27-janv.	6	22,4	25,9	13,6	90
28-janv.	2,6	21,5	26,5	14,4	80
29-janv.	9,2	21,8	26,4	11,4	130
30-janv.	3,2	21,2	26,2	13,5	110
31-janv.	3,6	22,3	26,1	9,9	190
1-févr.	0	22,4	26,4	9,5	220
2-févr.	0	19,7	27,1	11,2	230
3-févr.	0	19,8	27,9	10,6	240
4-févr.	0,2	20,1	26,8	9,5	170
5-févr.	0,2	21,8	28,2	9,5	160
6-févr.	0	22,3	27,9	11,9	140
7-févr.	6,4	22,2	28,1	9,8	140
8-févr.	1,8	20,5	27,8	11,2	110
9-févr.	17,1	22,3	27,2	16,1	110
10-févr.	1,2	21,9	26,5	13,7	130
11-févr.	0	23	26,9	10,8	150
12-févr.	0	22,2	27,3	11,8	100
13-févr.	6,9	21,9	24,1	10,9	50

Date	Pluie (mm)	TN (°C)	TX (°C)	FXI (m/s)	DXI (°)
14-févr.	0,4	22,6	26,9	11,5	100
15-févr.	16,5	22,5	26,8	15,7	130
16-févr.	2	21,4	26	14,8	150
17-févr.	50,1	21,7	23,8	16,1	90
18-févr.	10,4	22	25	18,1	110
19-févr.	0,8	22,4	24,5	14,2	130
20-févr.	7,4	23	25,3	12,1	90
21-févr.	3,4	23,3	27,6	11,2	80
22-févr.	0	23,1	27,4	11,3	80
23-févr.	0	22,3	27,3	12,2	130
24-févr.	0,2	22,9	26,2	13,1	100
25-févr.	9,4	22,1	25,7	15,9	120
26-févr.	0	22	25,5	16,4	120

Valeurs horaires des paramètres météorologiques (données Station « Usine » de Vale) : 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)	STATION	MASSE COLLECTEE (g)
09-12 janvier	KW1-1	3,457	NE60-1	1,977	SW60-1	1,871
13-16 janvier	KW1-2	5,506	NE60-2	1,364	SW60-2	1,538
17-20 janvier	KW1-3	2,996	NE60-3	0,055	SW60-3	0,110
21-24 janvier	KW1-4	3,213	NE60-4	0,040	SW60-4	0,115
25-28 janvier	KW1-5	10,845	NE60-5	0,071	SW60-5	0,111
29 janvier - 01 février	KW1-6	21,659	NE60-6	1,437	SW60-6	0,261
02-05 février	KW1-7	6,403	NE60-7	1,788	SW60-7	1,443
06-09 février	KW1-8	13,270	NE60-8	1,724	SW60-8	2,080
10-13 février	KW1-9	14,037	NE60-9	8,765	SW60-9	10,714
14-17 février	KW1-10	10,238	NE60-10	6,850	SW60-10	8,560
18-21 février	KW1-11	13,793	NE60-11	3,577	SW60-11	3,028
22-25 février	KW1-12	6,117	NE60-12	2,512	SW60-12	1,156

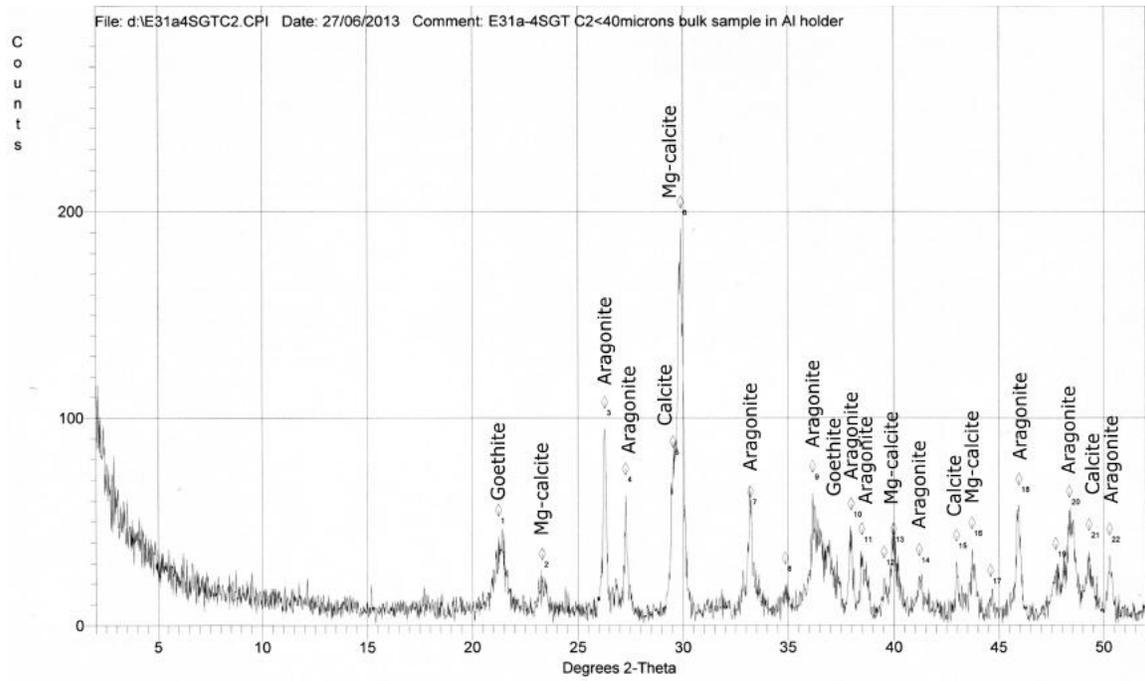
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

	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
KW1-2	4,73	34,54	33,74	9,76	7,68	9,29	0,26
KW1-6	5,34	37,16	32,59	8,78	6,51	7,22	2,41
KW1-9	5,48	39,70	36,39	9,22	6,25	2,95	0,00
KW1-11	5,23	36,56	30,12	8,72	7,01	10,32	2,04
NE60-(1+2)	5,44	36,04	32,93	9,21	7,07	8,66	0,65
NE60-(7+8)	5,44	36,04	32,93	9,21	7,07	8,66	0,65
NE60-9	5,46	38,36	34,87	9,08	6,43	5,53	0,28
NE60-11	4,81	32,06	30,83	9,06	7,32	13,27	2,65
SW60-(1+2)	5,15	34,34	31,48	9,17	7,30	10,61	1,95
SW60-(7+8)	5,41	35,25	31,94	9,12	7,15	10,17	0,97
SW60-9	4,86	36,69	32,81	8,79	6,63	9,03	1,18
SW60-11	4,25	32,79	35,94	10,07	7,55	8,52	0,89

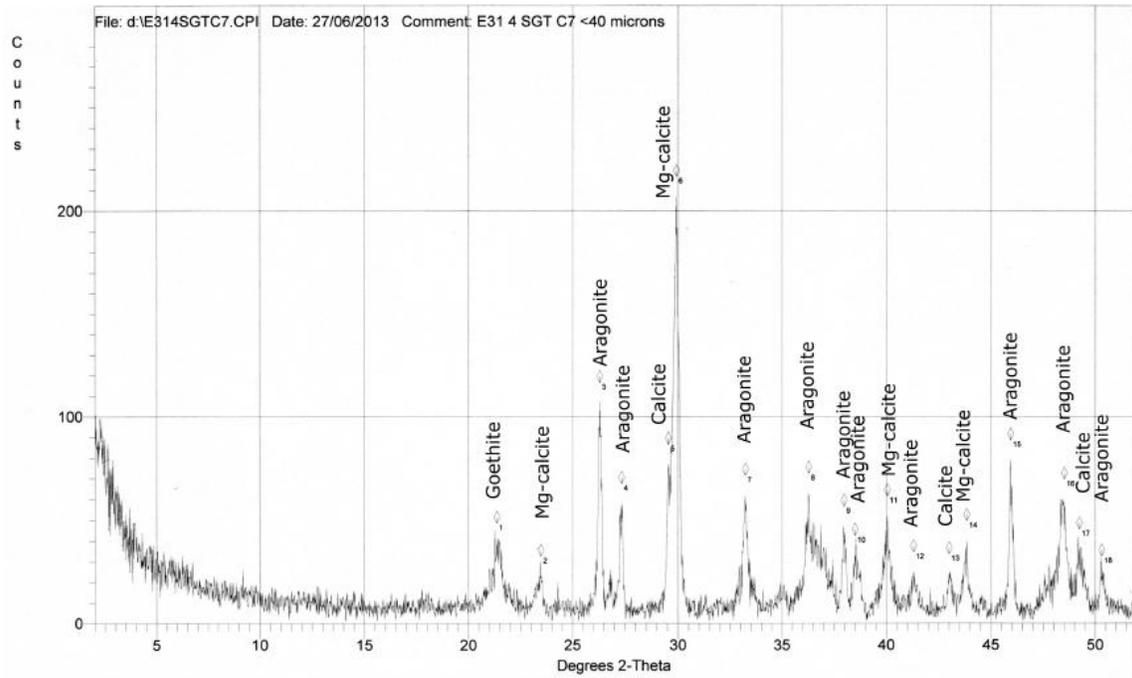
Nd = non déterminée par manque de matière

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES MES DE LA BAIE KWE

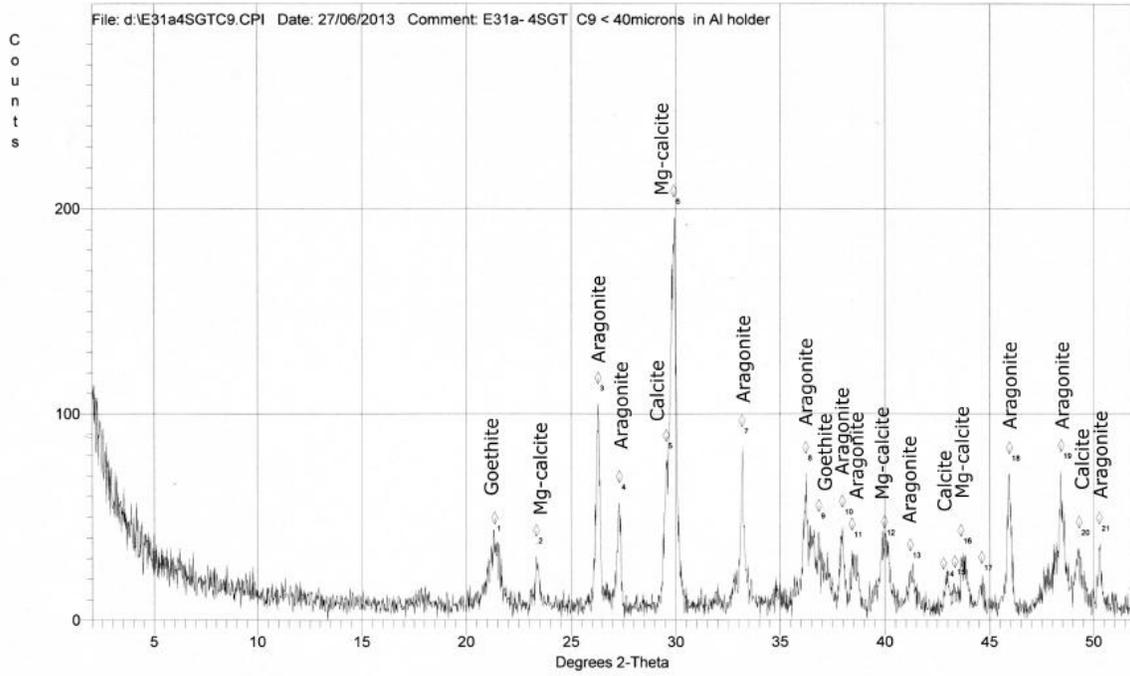
Station St06-KW1 ; godet 2



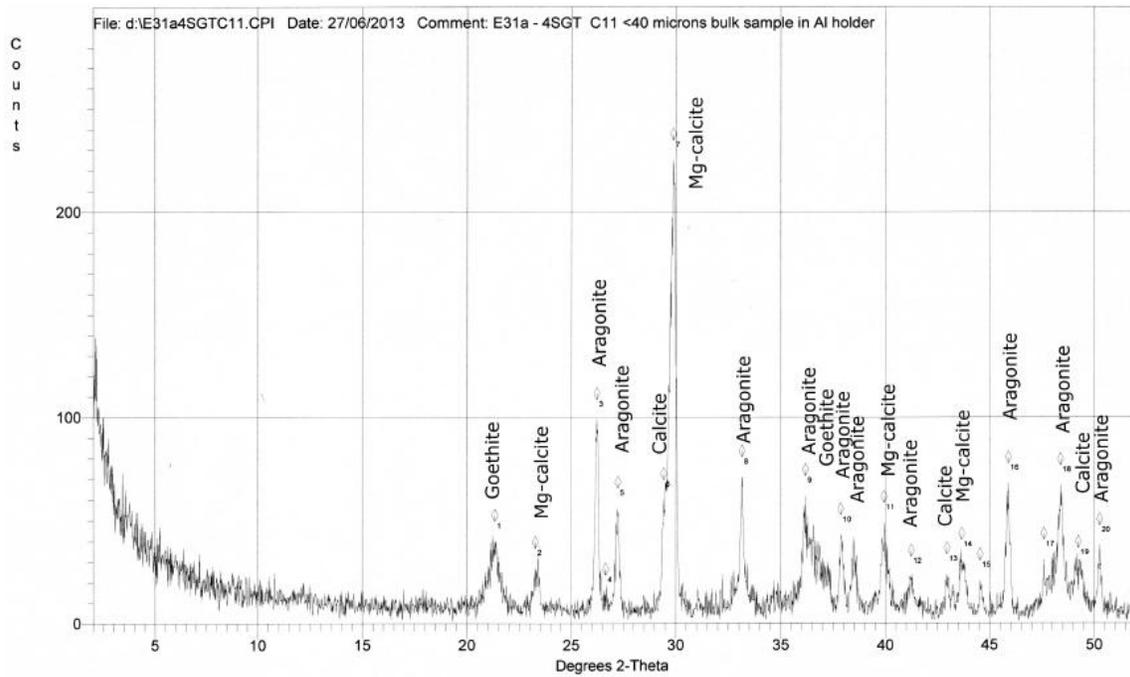
Station St06-KW1 ; godet 7



Station St06-KW1 ; godet 9

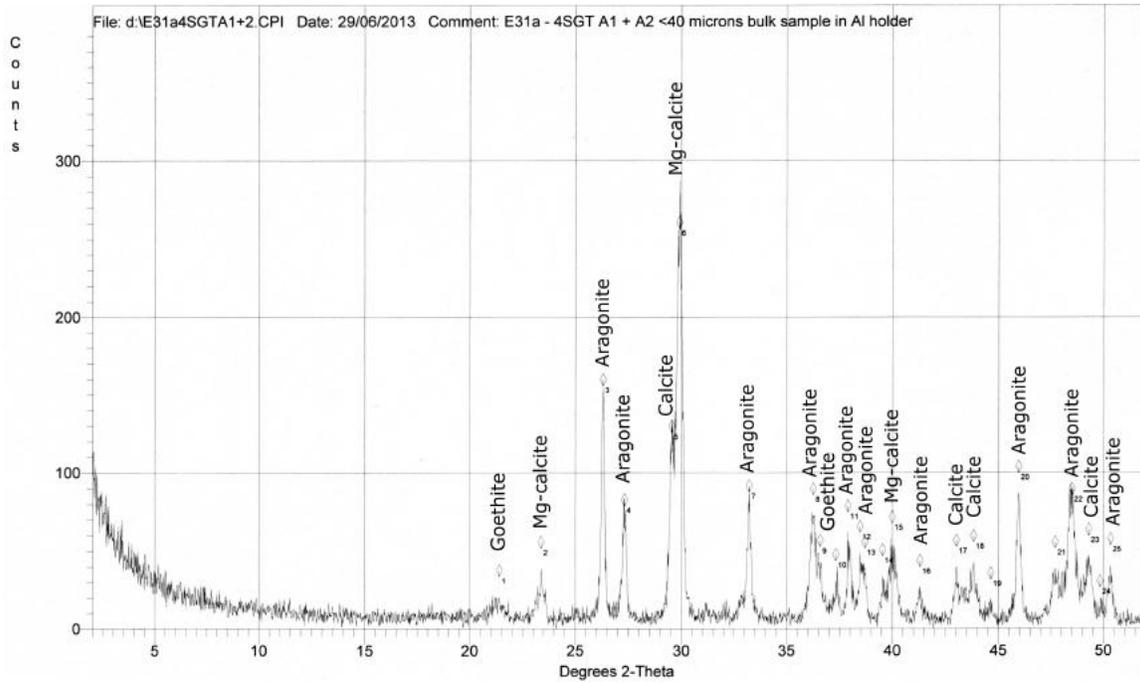


Station St06-KW1 ; godet 11

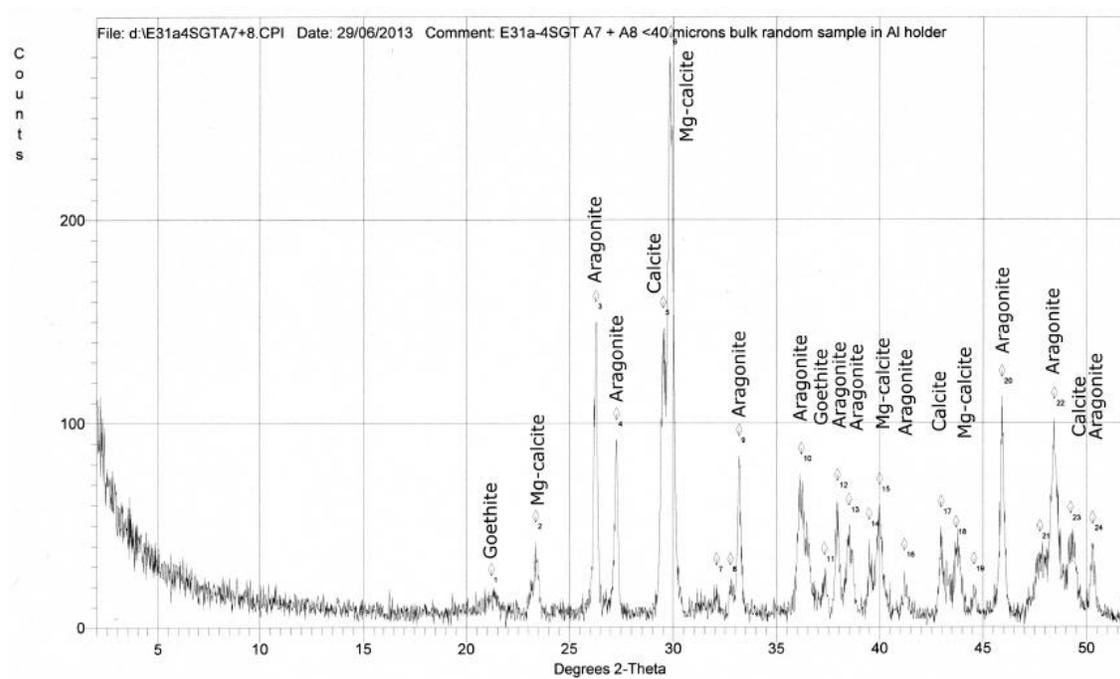


COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH

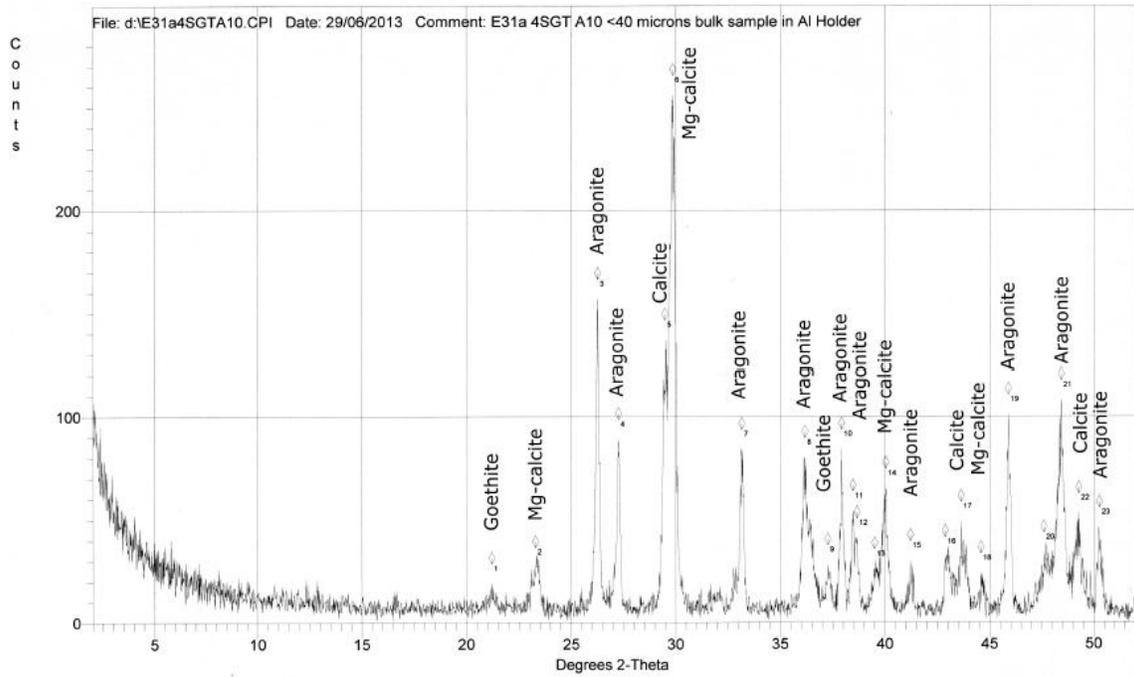
Station St60-NE ; godet 1+2



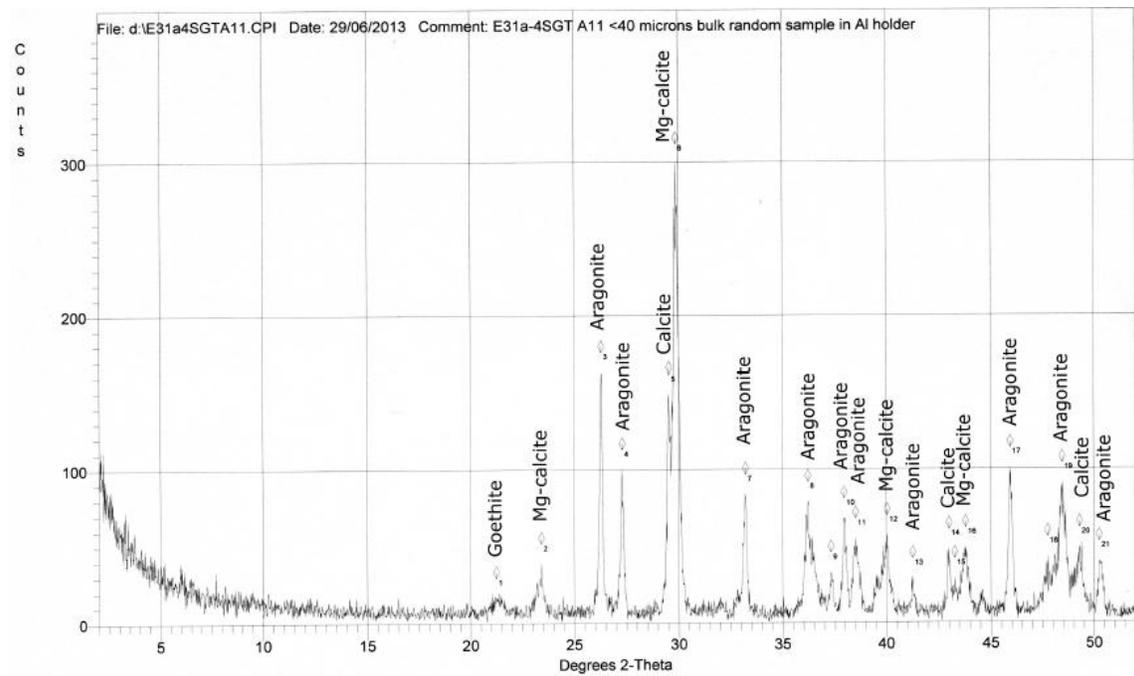
Station St60-NE ; godet 7+8



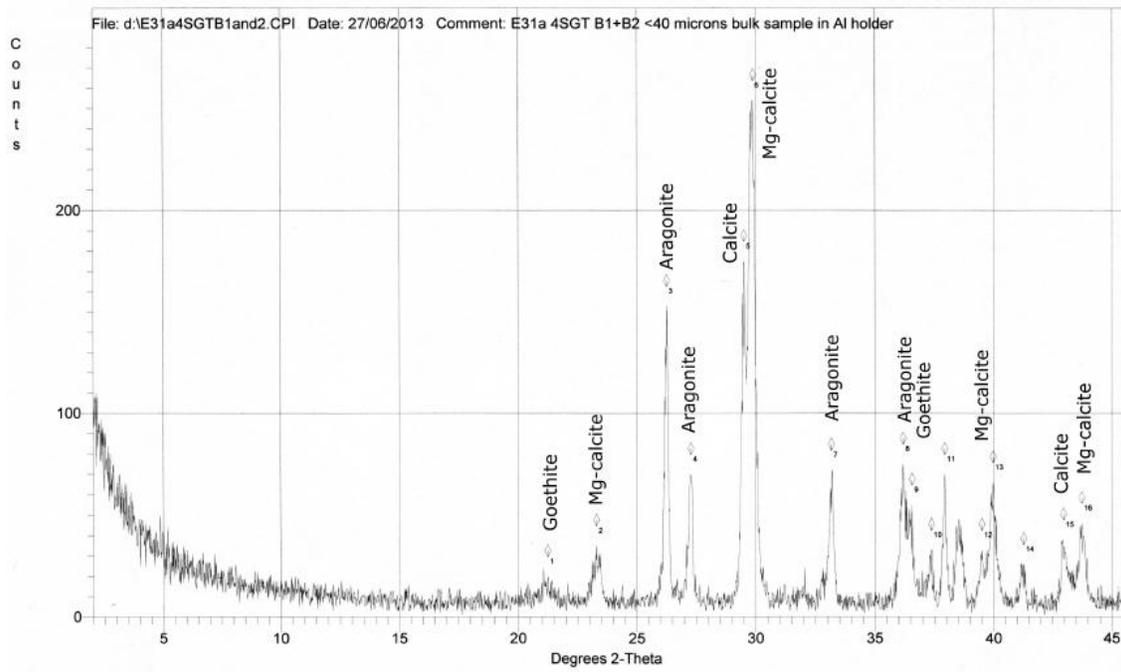
Station St60-NE ; godet 10



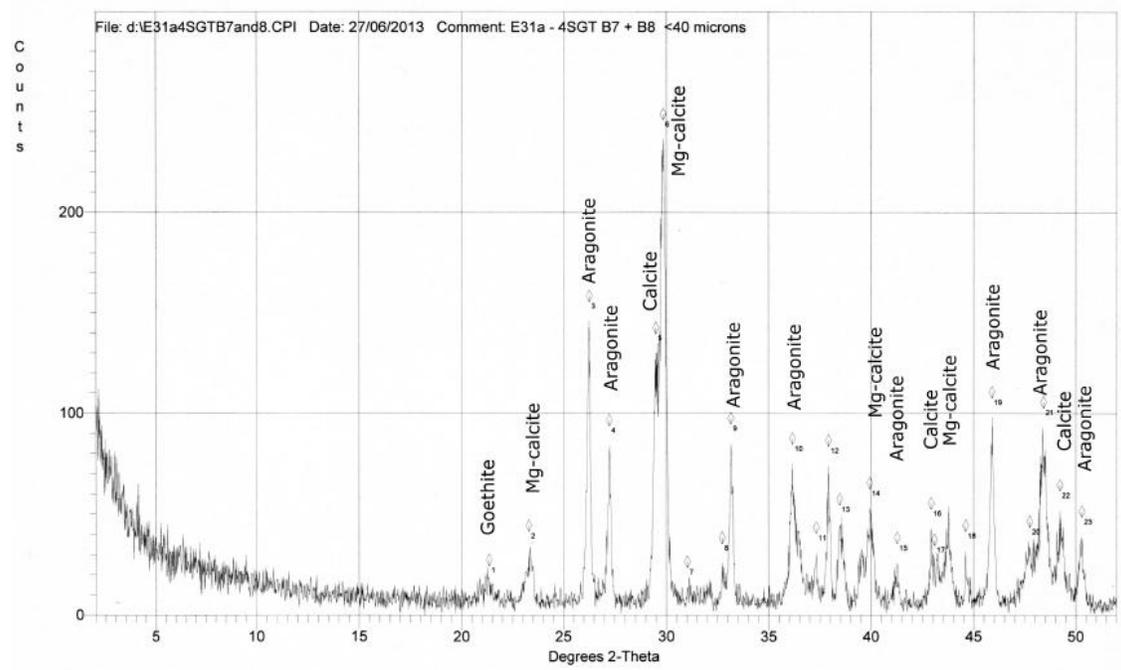
Station St60-NE ; godet 11



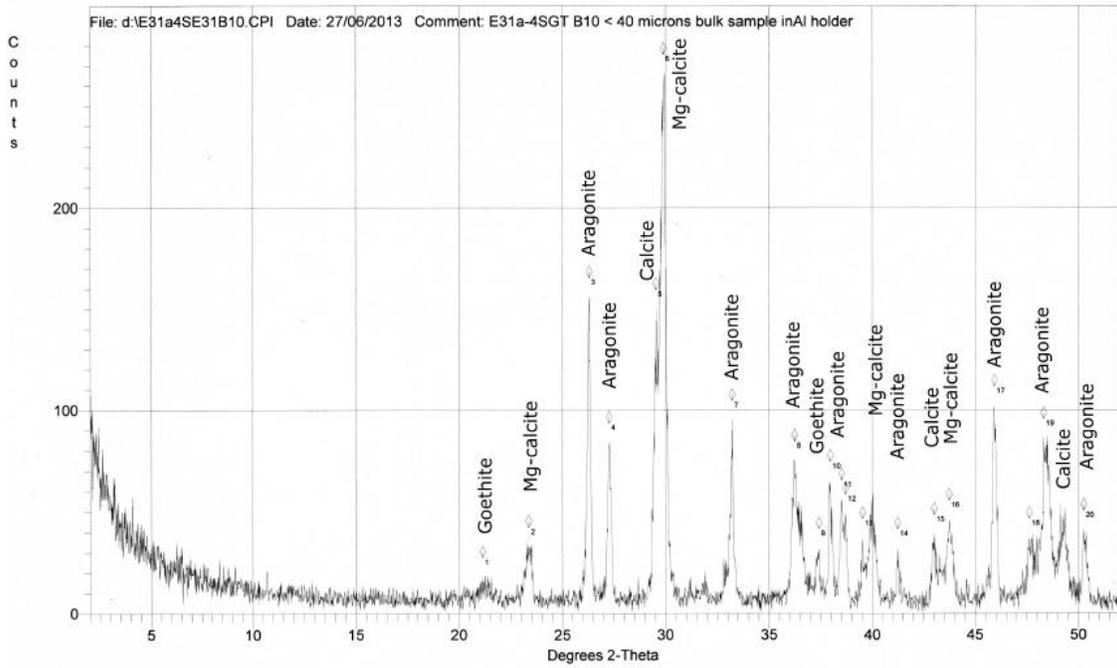
Station St60-SW ; godet 1+2



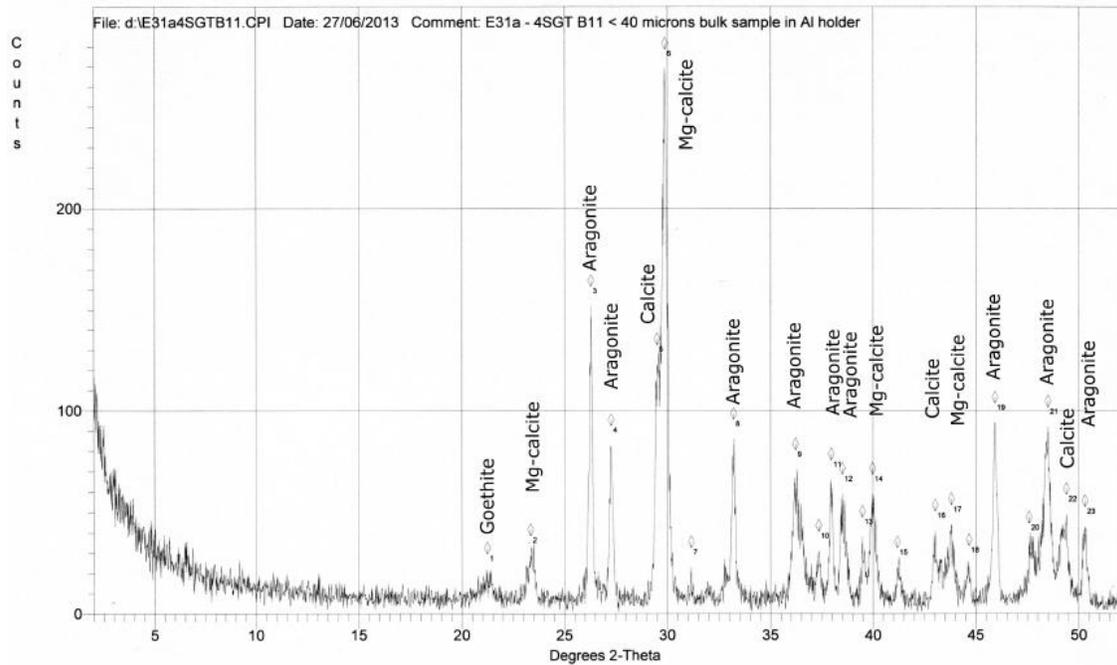
Station St60-SW ; godet 7+8



Station St60-SW ; godet 10



Station St60-SW ; godet 11



Remarque : Les trop faibles quantités de matière collectée en début de période (godet SW60-2) n'a pas permis de réaliser les analyses minéralogiques.

TENEURS EN CARBONATES

PERIODE DE COLLECTE	STATION	CaCO ₃ (%)	STATION	CaCO ₃ (%)	STATION	CaCO ₃ (%)
09-12 janvier	KW1-1	62,7	NE60-1	77,1	SW60-1	77,0
13-16 janvier	KW1-2	58,4	NE60-2	77,0	SW60-2	76,9
17-20 janvier	KW1-3	58,3	NE60-3	nd	SW60-3	nd
21-24 janvier	KW1-4	58,2	NE60-4	nd	SW60-4	nd
25-28 janvier	KW1-5	62,8	NE60-5	nd	SW60-5	nd
29 janvier - 01 février	KW1-6	66,7	NE60-6	77,2	SW60-6	nd
02-05 février	KW1-7	60,4	NE60-7	77,2	SW60-7	77,2
06-09 février	KW1-8	66,7	NE60-8	75,1	SW60-8	77,0
10-13 février	KW1-9	70,8	NE60-9	77,1	SW60-9	77,0
14-17 février	KW1-10	81,2	NE60-10	79,2	SW60-10	77,2
18-21 février	KW1-11	76,9	NE60-11	77,1	SW60-11	76,9
22-25 février	KW1-12	79,2	NE60-12	77,2	SW60-12	62,6

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE (GROSSISSEMENT X 11,5)



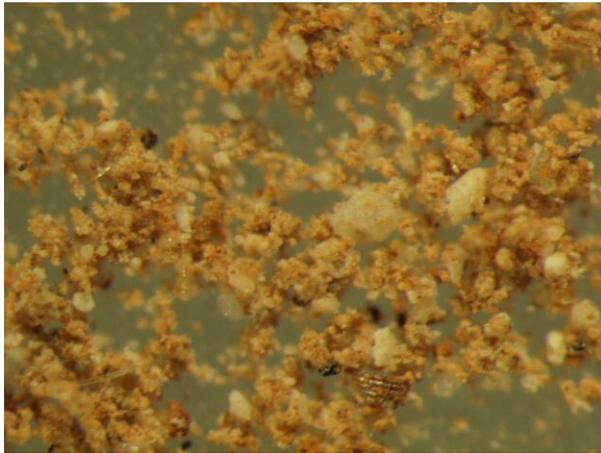
KW1-2



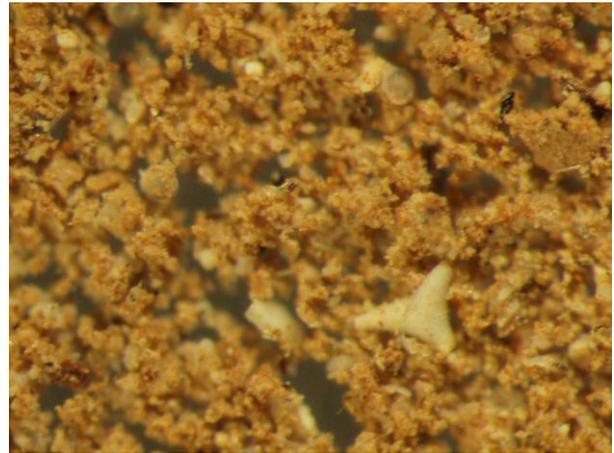
KW1-6

Matières en suspension collectée dans les godets KW1-2 et KW1-6 : Présence de nombreuses particules latéritiques de couleur brune, de débris végétaux terrestres arrachés aux bassins versants ainsi que de coraux et de tests de microorganismes marins plus ou moins fortement altérés.

La quantité de particules carbonatées est relativement importante malgré la proximité de l'embouchure de la Kwé.



NE-10



SW-10

Matières en suspension collectée dans les godets NE-10 et SW-10 : Présence de particules latéritiques en faible quantité et de très petite taille. Sédimentation de nombreux débris de tests de microorganismes marins imbriqués dans des substances organiques voire de micro-coquillages dans un état d'altération faible.

ANNEXE – 4

Résultats de calculs de concentrations en métaux totaux, calcium et soufre dans les MES de la Baie Kwé (KW1) et du Canal de la Havannah station (SW60).

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
09-12 janvier	KW1-1	251364	109	3987	104412	878	1916
13-16 janvier	KW1-2	242403	124	4639	117702	1051	2081
17-20 janvier	KW1-3	209946	158	5493	146845	1303	2781
21-24 janvier	KW1-4	220054	162	5716	151085	1371	2845
25-28 janvier	KW1-5	219220	149	5081	142311	1424	2595
29 janvier - 01 février	KW1-6	232212	118	4419	116628	1075	2111
02-05 février	KW1-7	241343	117	4320	119647	1059	2197
06-09 février	KW1-8	243709	119	4692	117779	1073	2062
10-13 février	KW1-9	245103	110	4118	111570	1024	1962
14-17 février	KW1-10	257691	106	4207	108535	983	1993
18-21 février	KW1-11	240182	119	4225	118824	1100	2156
22-25 février	KW1-12	237795	127	4709	125393	1133	2402

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
09-12 janvier	NE60-1	304691	26	923	30345	296	566
13-16 janvier	NE60-2	297003	22	928	27509	295	500
17-20 janvier	NE60-3	nd	nd	nd	nd	nd	nd
21-24 janvier	NE60-4	nd	nd	nd	nd	nd	nd
25-28 janvier	NE60-5	nd	nd	nd	nd	nd	nd
29 janvier - 01 février	NE60-6	305454	19	791	24746	232	457
02-05 février	NE60-7	310470	21	849	26385	232	476
06-09 février	NE60-8	306979	19	813	25944	244	467
10-13 février	NE60-9	311021	22	763	23325	269	429
14-17 février	NE60-10	302521	21	790	25163	280	463
18-21 février	NE60-11	314410	18	804	24857	261	456
22-25 février	NE60-12	309677	24	843	26906	253	486

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
09-12 janvier	SW60-1	302438	24	907	29318	241	541
13-16 janvier	SW60-2	312501	20	907	27372	232	487
17-20 janvier	SW60-3	276308	10	1009	29939	222	546
21-24 janvier	SW60-4	nd	nd	nd	nd	nd	nd
25-28 janvier	SW60-5	nd	nd	nd	nd	nd	nd
29 janvier - 01 février	SW60-6	302513	18	813	24545	203	435
02-05 février	SW60-7	307833	20	810	25685	235	466
06-09 février	SW60-8	301309	20	812	26598	247	482
10-13 février	SW60-9	307615	20	818	25459	268	458
14-17 février	SW60-10	312663	20	777	23819	280	438
18-21 février	SW60-11	298860	25	771	24621	307	470
22-25 février	SW60-12	304393	27	762	23910	301	475

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

STATION	Soufre (mg/kg)	STATION	Soufre (mg/kg)
SW60-(1+2)	3250	NE60-(1+2)	3380
SW60-(7+8)	2787	NE60-(7+8)	2795
SW60-9	3610	NE60-9	3526
SW60-10	3049	NE60-10	3094
SW60-11	3046	NE60-11	2933
SW60-12	3050	NE60-12	2947

ANNEXE – 5

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

MES

PERIODE DE COLLECTE	STATION	Flux MES (g/m ² /j)	STATION	Flux MES (g/m ² /j)	STATION	Flux MES (g/m ² /j)
09-12 janvier	KW1-1	17,3	NE60-1	9,9	SW60-1	9,4
13-16 janvier	KW1-2	27,5	NE60-2	6,8	SW60-2	7,7
17-20 janvier	KW1-3	15,0	NE60-3	0,3	SW60-3	0,6
21-24 janvier	KW1-4	16,1	NE60-4	0,2	SW60-4	0,6
25-28 janvier	KW1-5	54,2	NE60-5	0,4	SW60-5	0,6
29 janvier - 01 février	KW1-6	108,3	NE60-6	7,2	SW60-6	1,3
02-05 février	KW1-7	32,0	NE60-7	8,9	SW60-7	7,2
06-09 février	KW1-8	66,4	NE60-8	8,6	SW60-8	10,4
10-13 février	KW1-9	70,2	NE60-9	43,8	SW60-9	53,6
14-17 février	KW1-10	51,2	NE60-10	34,3	SW60-10	42,8
18-21 février	KW1-11	69,0	NE60-11	17,9	SW60-11	15,1
22-25 février	KW1-12	30,6	NE60-12	12,6	SW60-12	5,8

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						
09-12 janvier	4345	1,89	69	1805	15,2	33,1
13-16 janvier	6673	3,41	128	3240	28,9	57,3
17-20 janvier	3145	2,37	82	2200	19,5	41,7
21-24 janvier	3535	2,60	92	2427	22,0	45,7
25-28 janvier	11887	8,10	276	7717	77,2	140,7
29 janvier - 01 février	25147	12,76	479	12630	116,4	228,6
02-05 février	7727	3,75	138	3831	33,9	70,3
06-09 février	16170	7,87	311	7815	71,2	136,8
10-13 février	17203	7,74	289	7831	71,9	137,7
14-17 février	13191	5,41	215	5556	50,3	102,0
18-21 février	16564	8,21	291	8195	75,9	148,7
22-25 février	7273	3,87	144	3835	34,7	73,5

PERIODE DE COLLECTE ST60-NE	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)
09-12 janvier	3012	0,26	9,12	300	2,9	5,6
13-16 janvier	2026	0,15	6,33	188	2,0	3,4
17-20 janvier	nd	nd	nd	nd	nd	nd
21-24 janvier	nd	nd	nd	nd	nd	nd
25-28 janvier	nd	nd	nd	nd	nd	nd
29 janvier - 01 février	2195	0,14	5,69	178	1,7	3,3
02-05 février	2776	0,19	7,59	236	2,1	4,3
06-09 février	2646	0,17	7,01	224	2,1	4,0
10-13 février	13631	0,97	33,43	1022	11,8	18,8
14-17 février	10361	0,71	27,05	862	9,6	15,9
18-21 février	5623	0,32	14,39	445	4,7	8,2
22-25 février	3890	0,30	10,58	338	3,2	6,1

PERIODE DE COLLECTE ST60-SW	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)
09-12 janvier	2829	0,22	8,49	274	2,3	5,1
13-16 janvier	2403	0,15	6,97	210	1,8	3,7
17-20 janvier	152	0,01	0,55	16	0,1	0,3
21-24 janvier	nd	nd	nd	nd	nd	nd
25-28 janvier	nd	nd	nd	nd	nd	nd
29 janvier - 01 février	395	0,02	1,06	32	0,3	0,6
02-05 février	2221	0,15	5,85	185	1,7	3,4
06-09 février	3134	0,21	8,45	277	2,6	5,0
10-13 février	16479	1,05	43,82	1364	14,3	24,6
14-17 février	13382	0,83	33,25	1019	12,0	18,8
18-21 février	4525	0,38	11,67	373	4,6	7,1
22-25 février	1759	0,15	4,40	138	1,7	2,7

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée