

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



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

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

Convention n° 3052-2013

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

Achard Romain

Fernandez Jean Michel

Moreton Benjamin

Le Grand Hélène

Pluchino Stéphanie

Senia Jocelyn

Hadda Laurent

	N/Ref	V/Ref	
Identification	121205-VI-18	Contrat C3052 / PO E55911	
Titre complet	Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la Baie Kwé : mission juillet-août 2013		
Auteurs	Achard R, Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H et Pluchino Stéphanie		
Résumé	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 aux campagnes de suivi des densités de flux verticaux effectuées entre 2011 et 2013. Ce programme constitue la première campagne de suivi semestriel de 2013-2015. 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 rejetés par le diffuseur entre le 12 juillet et le 28 août. A cet effet, trois mouillages de lignes équipées de pièges à sédiments séquentiels ont été réalisés. En 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. Le terme source principal de MES est le bassin versant de la Baie Kwé que les pluies exceptionnelles de la saison fraîche 2013 ont drainé fortement créant un afflux de particules terrigènes sur l'ensemble du domaine d'études. 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 soit perceptible depuis plus de 2 ans.		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Achard R		30/01/2014
Vérificateur 1	Fernandez JM		05/02/2014
Vérificateur 2			
Approbateur(s)	Fernandez JM		06/02/2014
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V1.0	Rapport initial		06/02/2014
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Casalis C	Département environnement Vale-NC		

Ce rapport est cité comme suit :

Achard R, Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H et Pluchino Stéphanie, 2014. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la Baie Kwé : mission de juillet et août 2014. Contrat Vale-NC/AEL n° 3052, Rapport AEL 121205-VI-18, 61p.

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-pilote 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)	17
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)	26
5	INTERPRETATION	29
5.1	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES	29
5.1.1	Baie Kwé,	29
5.1.2	Canal de la Havannah	30
5.2	CALCUL DES FLUX DE MATIERES	34
6	CONCLUSION	38
	REFERENCES	40
	LISTE DES FIGURES	41
	LISTE DES TABLEAUX	43
	LISTE DES ANNEXES	44

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) et aux suivis de ces flux effectués sur la période 2011-2013.

Si les effets de l'hyper-sédimentation sont mesurables à moyen et long termes par le calcul des taux d'accumulation (géochronologie à l'échelle pluriannuelle), pour des laps de temps plus courts les apports sédimentaires sont quantifiables grâce à la mesure de la densité de flux vertical des particules à des échelles qui peuvent être journalière 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 l'augmentation de la pollution par les éléments métalliques associés aux particules. En effet, les particules sont reconnues comme étant le principal vecteur des polluants dans la contamination des organismes pélagiques, dont les poissons qui sont, en bout de chaîne, consommés par l'homme.

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

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

2 OBJECTIFS

Dans chacune des deux zones d'études, c'est-à-dire la Baie Kwé et le Canal de la Havannah, ont été effectués, 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 dans les pièges que les fractions fines en suspension potentiellement transportables sur de longues distances par les courants, comme le suggère la modélisation (Convention IRD/Goro-Ni n° 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 (CaSO_4) 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 (par précipitation, co-précipitation et adsorption) une fraction non négligeable des métaux dont Mn (McBride *et al.*, 1994 ; Hiemstra *et al.*, 1989). 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 **première campagne de mouillage semestrielle** des 5 que compte le programme de suivi environnemental relatif aux flux particuliers dans le Canal de la Havannah passé entre Vale-NC et AEL (Contrat Vale/AEL n° 3052) pour la période 2013-2015.

3 METHODOLOGIE

3.1 SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES

Cette première campagne d'étude des flux a été conduite de début juillet à fin août 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, définis 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 2007 (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

L'orifice du 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 lors des marées de vive-eau alors qu'elle dépasse amplement les 10 m par courants faibles (marées de morte-eau).

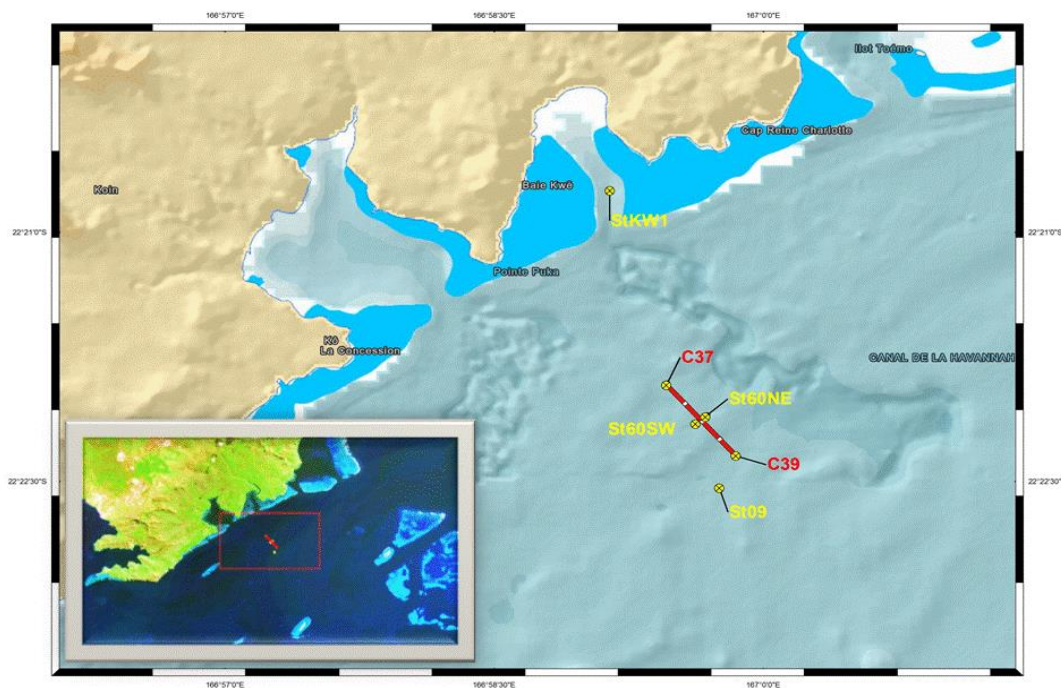


Figure 1: Aire d'étude pour le suivi des flux verticaux de particules issues du process de production de l'usine et des activités d'excavation de mine de Vale-NC. Le trait rouge représente le diffuseur, de part et d'autre figurent les deux stations St60-SW et St60-NE localisées à 60m du rejet. En Baie 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.

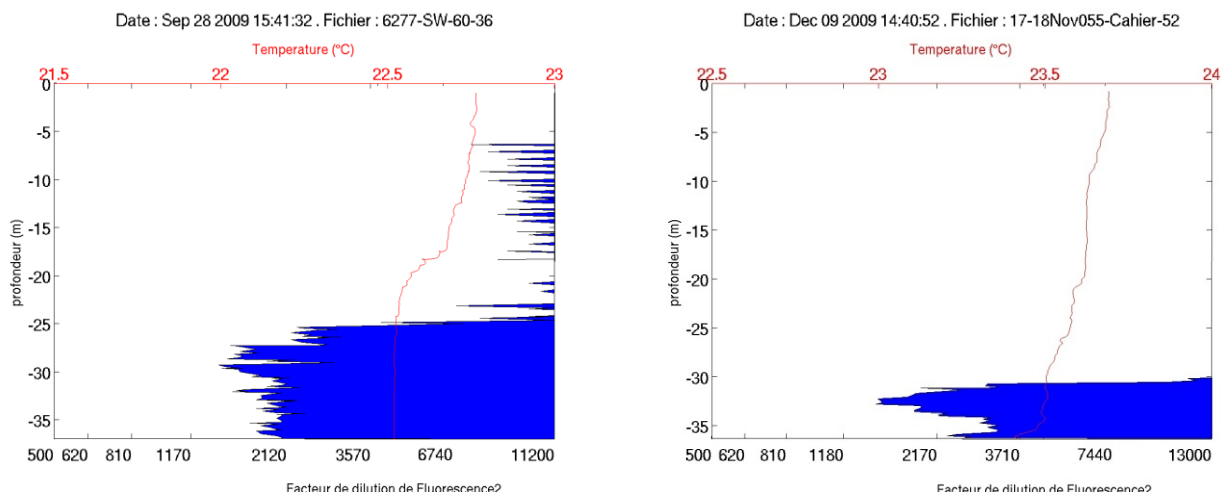


Figure 2 : Puissance type de l'épaisseur de marquage par l'effluent (rhodamine-WT) pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

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 11 juillet 2013 puis récupérées le 28 août 2013.

La collecte des particules a été programmée pour débuter le 12 juillet 2013 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 28 août à 00h00. Au total 12 échantillons de matériel particulaire ont été prélevés pour chacun des trois sites d'immersion (Tableau 2).

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

STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE
KW1-1	12-15 juillet	SW60-1	12-15 juillet	NE60-1	12-15 juillet
KW1-2	16-19 juillet	SW60-2	16-19 juillet	NE60-2	16-19 juillet
KW1-3	20-23 juillet	SW60-3	20-23 juillet	NE60-3	20-23 juillet
KW1-4	24-27 juillet	SW60-4	24-27 juillet	NE60-4	24-27 juillet
KW1-5	28-31 juillet	SW60-5	28-31 juillet	NE60-5	28-31 juillet
KW1-6	01-04 août	SW60-6	01-04 août	NE60-6	01-04 août
KW1-7	05-08 août	SW60-7	05-08 août	NE60-7	05-08 août
KW1-8	09-12 août	SW60-8	09-12 août	NE60-8	09-12 août
KW1-9	13-16 août	SW60-9	13-16 août	NE60-9	13-16 août
KW1-10	17-20 août	SW60-10	17-20 août	NE60-10	17-20 août
KW1-11	21-24 août	SW60-11	21-24 août	NE60-11	21-24 août
KW1-12	25-28 août	SW60-12	25-28 août	NE60-12	25-28 août

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

3.3 PARAMETRES PHYSIQUES, GEOCHIMIQUES ET ANALYSES

Les méthodes de 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, vitesse et direction du vent maximum moyen) sont donnés par la station météorologique dite de l' « Usine-pilote Vale » qui fournit approximativement les conditions de pluie sur l'ensemble des bassins versants de la Kwé. 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 enregistrés 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-pilote» de Vale-NC.

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

La période du 2 juillet au 28 août a été marquée par quatre épisodes pluvieux significatifs (pluies >40 mm/j) qui ont été enregistrés le 2, 3 et 28 juillet ainsi que le 8 août (260 ; 209,7 ; 207,3 et 80 mm respectivement; Figure 3). Les pluies du 2 et 3 juillet ont été considérées car ces précipitations importantes sont susceptibles d'impacter les flux de MES en début de période de collecte (12 juillet au 28 août).

En dehors de ces quatre épisodes notables, des précipitations d'intensités variables ont été enregistrées (1,6 < pluies < 36 mm). Il a été constaté une absence de précipitation significative pour la période du 9 au 26 août. Au cours de la période d'étude, on compte 29 jours de pluies cumulant 467 mm ; en prenant en compte les épisodes pluvieux depuis le 2 juillet, on compte 33 jours de pluies cumulant 941 mm de précipitation, ce qui relève d'un caractère exceptionnel pour la saison fraîche.

4.1.2 Direction du vent (station « Usine Vale »)

Durant la période de mouillage des pièges à sédiments, la direction des vents n'est pas restée constantes et de nombreuses rotations ont été constatées (Figure 3). En effet, les « *directions des vents moyens journaliers* » enregistrées (DD) ont soufflé avec irrégularité du secteur S-SE avec des rotations dans le secteur W-SW parfois durables au secteur SW (240°) ainsi que quelques incursion de vents de secteur NE. Dans le détail, il a été enregistré les quatre principaux épisodes suivants :

- 12-23 juillet : les vents ont soufflé du secteur S-SE et sont progressivement passés au secteur SE ;
- 24-30 juillet : d'abord de secteurs W, les vents ont basculé au S (25-26 juillet) puis ils sont passés au secteur SE (27-30 juillet) ;

- 31 juillet-8 août : la direction du vent est restée au secteur W-NW avec une dominante W puis elle a brusquement basculé en secteur E-NE (4-8 août) avec une brève incursion de secteur E-SE (7 août) ;
- 9-28 août : de secteur W (09-11 août), les vents ont ensuite basculé à E-SE (12-15 août) pour ensuite osciller entre SW, S et SE avec une dominante de secteur S.

4.1.3 Vitesse du vent (station « Usine Vale »)

Pour la campagne, la « *vitesse des vents moyens journaliers* » (FF) a été de $11,3 \pm 3,6$ m/s (Figure 3). Cette valeur qui est normale pour une « saison fraîche », est exactement du même ordre que celles mesurées pendant la campagne de juillet-août 2011 ($11,3 \pm 3,2$ m/s) ou encore de septembre-octobre 2012 ($11,9 \pm 2,4$ m/s). Les valeurs extrêmes ont été enregistrées le 24 juillet pour la minimale (6,0 m/s) et le 29 juillet pour la maximale (21,3 m/s).

Durant la période d'étude, l'intensité des vents a été très variable. Dans un premier temps, la courbe de vitesse des vents moyens journaliers (FF) présente une allure dite "en dent de scie" entre le 12 juillet et le 11 août puis les vents se sont maintenus entre le 12 et le 28 août à $8,9 \pm 1,2$ m/s.

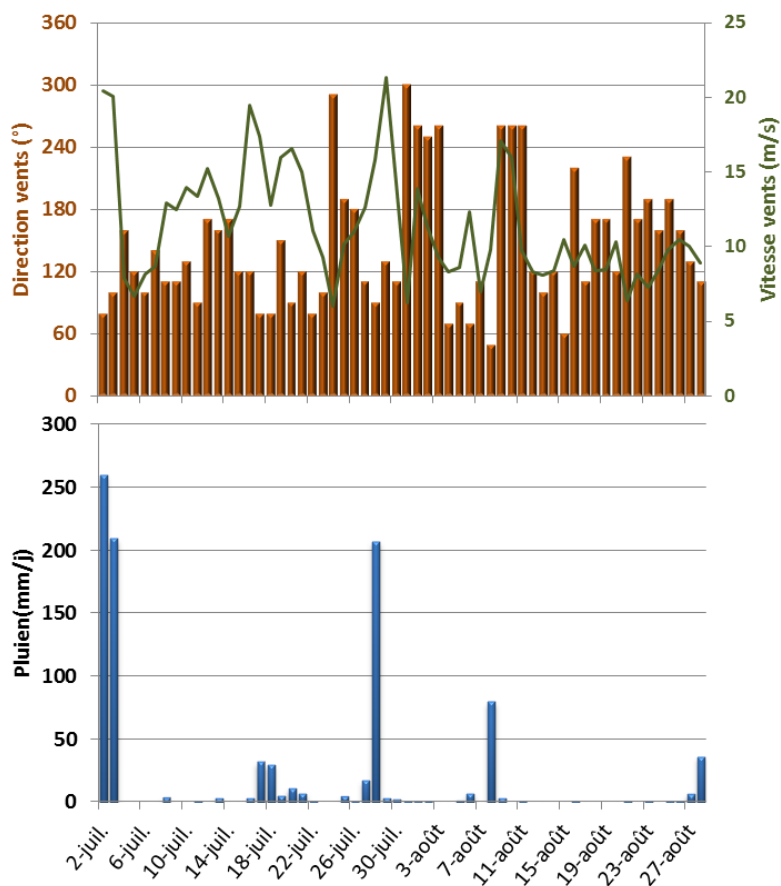


Figure 3 : Enregistrement des « *taux de précipitations journaliers (RR)* » en (mm/j), « *direction des vents moyens journaliers (DD)* » en (°) et « *vitesse des vents moyens journaliers (FF)* » en (m/s), à la station météorologique de l'« usine-pilote » de Vale-NC pour la période du 2 juillet au 28 août 2013.

CE QU'IL FAUT RETENIR

La période de mouillage (12 juillet-28 août) a été marquée par des épisodes pluvieux d'importance (207,3 et 80 mm le 28 juillet et le 8 août respectivement). Il a été enregistré 29 jours de pluies cumulant 467 mm de précipitation, ce qui revêt un caractère exceptionnel pour la saison fraîche. Il est important de considérer les fortes précipitations qui ont lieu quelques jours avant la période de collecte des échantillons et qui ont cumulé 473,7 mm.

Le régime des vents a été irrégulier passant du secteur S-SE avec des rotations dans le secteur W-NW parfois durables dans le secteur W et quelques incursions de NE ont été enregistrées.

La vitesse des vents moyens journaliers est conforme aux normales saisonnières avec $11,3 \pm 3,6$ m/s. Toutefois entre le 12 juillet et 11 août, les vitesses des vents ont été très variables et elles se sont ensuite stabilisées entre le 12 août et la fin de l'étude.

4.2 CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

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

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

4.2.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

4.2.1.1 Masses collectées

Les masses collectées montrent des valeurs variables dans le temps (Figure 4). Elles se distribuent entre 0,88 g (17-20 août ; KW1-10) et 64,71 g (28-31 juillet ; KW1-5). Sur les 12 prélèvements, 6 dépassent les 10 g de matière, dans les 6 autres on mesure entre 0,88 et 4,26 g.

Les quantités les plus faibles ont été obtenues dans les 4 derniers godets (13-28 août) et la valeur moyenne des 12 échantillons est de 11,6 g.

Les fractions fines ($\phi < 40 \mu\text{m}$) sont quantitativement plus importantes dans l'ensemble des 12 godets. La masse maximale de particules fines est observée dans le godet KW1-5 (50,91g ; 28-31 juillet) et la masse minimale est constatée dans le godet KW1-10 (0,67g ; 17-20 août). Proportionnellement, la masse de fraction fine oscille entre 66,7% (KW1-3 ; 20-23 juillet) et 79,1% (KW1-6 ; 1-4 août).

Pour cette campagne, la masse minimale de MES collectée est 0,88 g. Cette valeur est plus faible que celle mesurée en septembre-octobre 2012 mais elle reste du même ordre que la valeur minimale de 1,00 g observable lors de la campagne de juillet-août 2011. En ce qui concerne les maximales, la valeur de juillet-août 2013 (64,71 g ; KW1-5) est bien supérieure à celle obtenue dernièrement en janvier-février 2013 (21,66 g), en septembre-octobre 2012 (11,82g) ou encore juillet-août 2011 (23,71 g). Ce résultat peut s'expliquer par les fortes précipitations du 28 juillet et un régime soutenu de vents de secteur E-SE (14,3 à 21,3 m/s) pendant la collecte du godet KW1-5 (28-31 juillet).

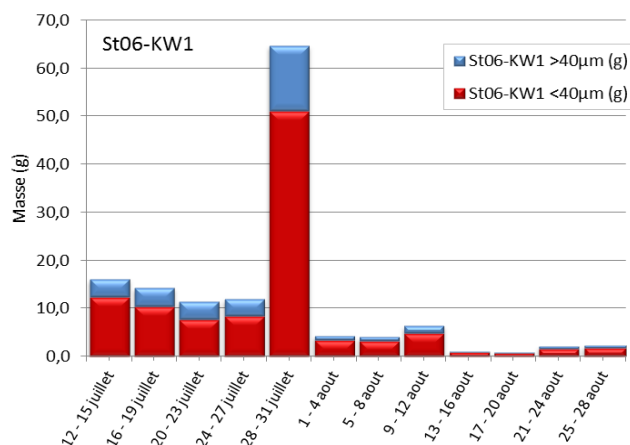


Figure 4 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 12 juillet au 28 août 2013 en Baie Kwé (St06-KW1). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

4.2.1.2 Compositions granulométriques

Les matières en suspension collectées au niveau de la Baie Kwé sont composées majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 µm (argiles et silts fins) avec des proportions autour 36,2 à 61,6% du volume (Figure 5), les mêmes observations ont été faites lors de la campagne de septembre-octobre 2012. Les silts moyens (20-40 µm) composent la seconde population granulométrique, avec des valeurs comprises entre 19,9% et 24,8% (les silts fins ont composé aussi la seconde population pour les campagnes de janvier-février 2013 et septembre-octobre 2012). Les autres populations (silts grossiers et sables fins ; $\phi > 63 \mu\text{m}$) ne représentent chacune qu'au maximum 8,6% des masses collectées bien que le godet KW1-5 (28-31 juillet) présente des valeurs plus importantes de l'ordre de 16,2 et 12,2% respectivement pour les silts grossiers et les sables fins. Ces valeurs plus élevées peuvent s'expliquer par les fortes précipitations au cours de cette période de collecte (28 juillet ; 203,7 mm) qui ont fortement lessivé les sols. Les particules les plus fines (argiles ; $\phi < 2 \mu\text{m}$) sont en plus faibles proportions (9,4%) par rapport à la moyenne générale ($14,1 \pm 1,7\%$), cette différence pouvant s'expliquer par les phénomènes d'érosion intense qui favorise l'entraînement des particules de plus fort diamètre (Figure 5).

La distribution des populations granulométriques des particules (Figure 5) permet de mettre en évidence une variation temporelle des classes granulométriques des particules, en particulier sous l'influence des variations des conditions hydro-climatiques.

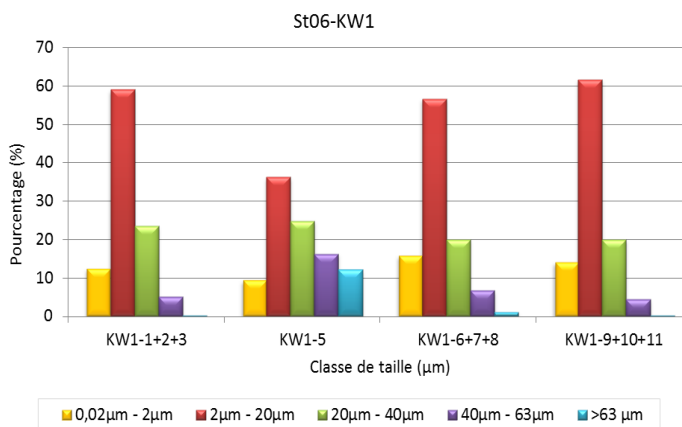


Figure 5 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés en Baie Kwé par le piège à sédiments séquentiel, du 12 juillet au 28 août 2013.

4.2.1.3 Compositions minéralogiques

La composition minéralogique a été établie par diffractométrie de rayons X (Tableau 3) sur les MES du godet KW1-5 ainsi que sur des échantillons composites de MES des godets (KW1-1+2+3+4 ; KW1-6+7+8) en raison des trop faibles quantités collectées au cours de la campagne (seuls trois analyses au lieu de quatre ont pu être produites). 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 sont 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, excepté pour le godet KW1-5 correspondant à l'épisode pluvieux.

La composition minéralogique des particules demeure généralement identique aux campagnes réalisées antérieurement (juillet-août 2011, janvier-février 2012, septembre-octobre 2012 et janvier-février 2013), bien que la composition minéralogique du godet KW1-5 soit majoritairement constituée de Goethite (FeO(OH)) qui souligne l'influence des apports terrigènes lors d'épisodes pluvieux intenses (28 juillet ; 203,7 mm de précipitation).

Comparativement aux campagnes précédentes (juillet-août 2011, janvier-février 2012, septembre-octobre 2012, janvier-février 2013), la présence de goethite est significative, par contre l'hématite n'a été détectable 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 12 juillet au 28 août 2013.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
KW1- 1+2+3+4	M	m	m	m	t
KW1- 5	m	m	m	M	t
KW1- 6+7+8	M	m	m	m	t

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 abondante puisque celle-ci oscille entre 15,1 % (KW1-5 ; 28-31 juillet) et 57,8 % (Figure 6), la valeur moyenne observée étant de $46,02 \pm 12,3$ %.

Les teneurs observées pour cette campagne de juillet-août 2013 sont en moyenne bien inférieures à celles obtenues pour les campagnes précédentes en saison fraîche (septembre-octobre 2012 ; $67,7 \pm 3,2\%$) et saison chaude (janvier-février 2013 ; $66,9 \pm 8,4\%$). L'influence marine est donc moins marquée qu'auparavant, en partie causée par des apports terrigènes conséquents lors de fortes précipitations, comme mesuré pour KW1-5 (28-31 juillet). Ces apports terrigènes, pouvant perdurer plusieurs jours, seraient à l'origine des concentrations plus faibles observées entre le 28 juillet et le 8 août, de même pour le début de collecte (12-15 juillet) qui a pu rester sous l'influence d'apports terrigène provoqués par les précipitations abondantes du 2 et 3 juillet (469,7 mm) antérieure à la campagne de mouillage des pièges.

En général, les teneurs maximales en carbonates coïncident avec les vents de secteurs SE installés en début et en fin de période de collecte (20-27 juillet et 11-28 février) comme pour la campagne précédente de janvier-février 2013. Par contre, les teneurs minimales (28-31 juillet) font suite aux fortes précipitations qui se sont déroulées le 28 juillet.

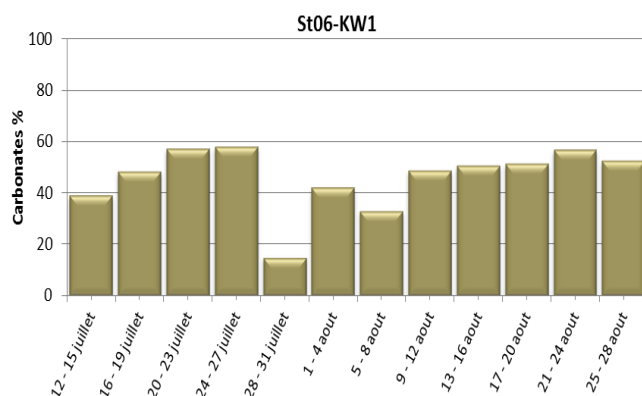


Figure 6 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 12 juillet au 28 août 2013 en Baie Kwé (St06-KW1).

4.2.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

4.2.2.1 Masses collectées

A la station St60-NE (Figure 7), les masses collectées sont faibles et comprises entre 0,16 et 0,98 g pour la plupart des godets, seuls les godets NE60-3, NE60-4 et NE60-11 ont présenté des masses supérieures avec 4,58 ; 2,70 et 2,84 g respectivement. Les quantités les plus élevées de MES collectées coïncident avec un régime de vents de secteur SE à E faiblissant d'environ 20 m/s à 5 m/s et passant temporairement au secteur W-NW. Lors de la précédente campagne (janvier-février 2013), la quantité maximale de MES avaient été collectée pour des vents de secteurs SW soufflant autour de 14 m/s.

Proportionnellement, la fraction grossière représente entre 47,1 % (NE60-12 ; 10-13 février) et 74 % (NE60-3 ; 20-23 juillet). Les fractions grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) sont quantitativement plus importantes que les fractions fines, dans l'ensemble des échantillons à l'exception du godet NE-12 où les particules fines représentent 53% de la masse (observation effectuée pour un régime de vents de secteur S-E modéré à $9,8 \pm 0,6$ m/s du 25-28 août).

La série temporelle de piégeage de la station St60-NE est très proche de celle obtenue à la station St60-SW dont les valeurs minimale et maximale sont : 0,13 g (SW60-6) et 4,9 g (SW60-12).

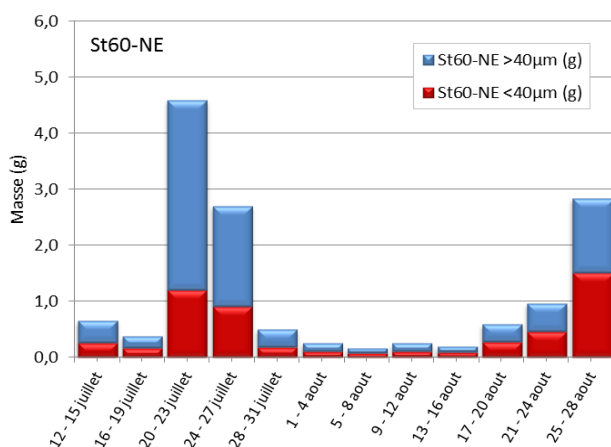


Figure 7 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 12 juillet au 28 août 2013 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines ($< 40 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($> 40 \mu\text{m}$)

En termes de variabilité interannuelle, la comparaison de la campagne de juillet-août 2013 avec celle de

septembre-octobre 2012 montre que les valeurs maximales de MES collectées sont exactement du même ordre (4,09 et 3,55 g respectivement) tandis que les valeurs minimales collectées sont cinq fois plus élevées en 2013 par rapport à 2012 (0,13 et 0,02g respectivement).

4.2.2.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations granulométriques montre de légères variations dans le temps qui affectent de manière relative les classes de grains les plus fines ($\phi < 2\mu\text{m}$) et intermédiaires (ϕ compris entre $2-40\mu\text{m}$), les fractions grossières étant moins influencées (Figure 8).

Les proportions de particules de grande taille sont minimales pour des conditions météorologiques d'alizés moyens de secteur SE (9,3-15 m/s ; 21-24 août), alors qu'elles sont maximales pour un régime de vents de secteur W passant au secteur E (1-8 août ; NE60-6+7). Ces mêmes conditions météorologiques entraînent également une diminution générale des populations de particules les plus fines ($\phi < 2\mu\text{m}$).

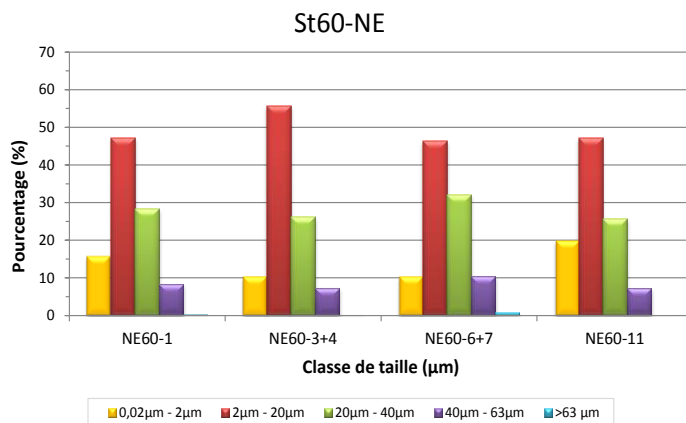


Figure 8 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel, du 12 juillet au 28 août 2013.

4.2.2.3 Compositions minéralogiques

Les analyses diffractométriques ont été réalisées sur des MES provenant, d'une part, des godets NE60-1 et NE60-12 et d'autre part, d'échantillons composites en raison des faibles quantités récoltées pendant certaines périodes : les MES des godets NE60-3 et NE-4 ont été regroupées, ainsi que celles de NE60-6, NE60-7 et NE60-8.

Comme pour la station St60-SW, les analyses réalisées montrent que les MES sont composés principalement de minéraux comme la calcite, l'aragonite et la calcite magnésienne (Tableau 4), cette dernière étant amplement majoritaire. Ces minéraux mettent en évidence la dominance quasi-totale de l'influence marine, l'aragonite en particulier, étant un des constituants des coquilles des invertébrés. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques n'est présente qu'à l'état de traces dans les 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 12 juillet au 28 août 2013.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
NE-1	M	m	m	t	-
NE-3+4	M	m	m	t	-
NE-6+8+9	M	m	m	t	-
NE-12	M	m	m	t	-

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

Il est important de noter qu'un minéral détecté en DRX représente au minimum 5% massique de l'échantillon (Chaurand, 2006).

4.2.2.4 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 9) sont relativement élevées et montrent une certaine homogénéité : la valeur moyenne est de $74,3 \pm 4,1$ % et les extrêmes sont 66,7 et 79,8%. Ces teneurs sont du même ordre que celles observées pour la campagne de janvier-août 2013 ($77,1 \pm 1,0$ %). Par contre, ces teneurs en carbonates sont plus faibles comparativement à la campagne de la précédente saison fraîche (juillet-août 2012 ; $84,3 \pm 4,9$ %) mais également par rapport aux campagnes de la saison fraîche de juillet-août 2011 ($91,0 \pm 3,0$ %) et septembre-octobre 2012 ($85,1 \pm 1,4$ %).

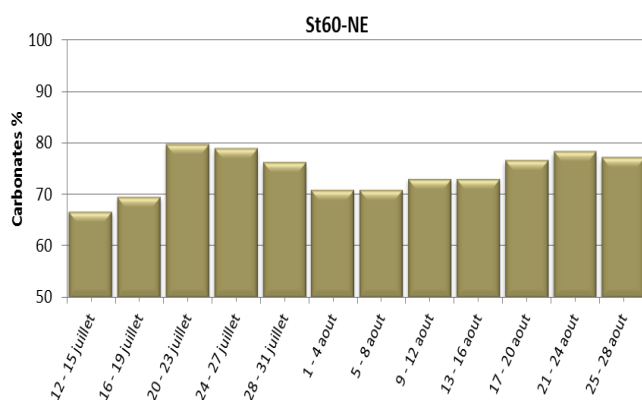


Figure 9 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 12 juillet au 28 août 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

4.2.3 Canal de la Havannah (station St60-SW)

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 0,13 g (SW60-05 ; 1-4 août) à 4,90 g (SW60-9 ; 25-28 août). Toutefois, il est à noter que d'une manière globale les quantités moyennes collectées à cette station sont légèrement supérieures à celles mesurées en St60-NE, et que des observations similaires avaient pu être réalisées lors des campagnes de septembre-octobre 2012 et janvier-février 2013.

En ce qui concerne les fractions grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$), celles-ci sont quantitativement plus importantes dans le godet SW60-3 (2,99 g ; 20-23 juillet) et minimale dans le godet SW-6 (0,10 g ; 1-4 août). En termes de proportions, les fractions grossières les plus importantes ($> 72\%$) semblent correspondre aux périodes du plus fort et du plus faible piégeage (20-23 juillet et 1-4 août respectivement). Toutefois, la faible quantité pesée (0,10 g ; 1-4 août) augmente les incertitudes et ne permet pas d'être affirmatif.

En termes de variabilité interannuelle, les quantités collectées sont relativement proches de celles prélevées lors de la campagne antérieure de septembre-octobre 2012 (0,07 à 3,84 g). Par contre les quantités maximales collectées sont bien inférieures (facteur 2) aux quantités collectées en saison chaude pour janvier-février 2013 (10,71 g ; janvier-février 2013).

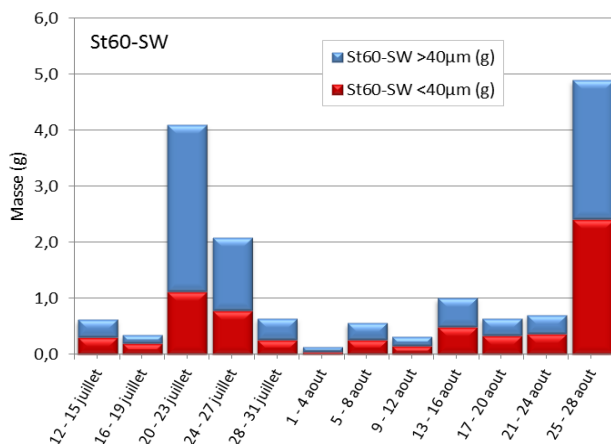


Figure 10 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 12 juillet au 28 août 2013 dans le Canal de la Havannah, au sud-ouest du diffuseur (St60-SW). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

4.2.3.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations de grains est proche de celle observée à la station St60-NE (Figure 8 et Figure 11). Les fluctuations sont relativement faibles dans le temps, les populations de silts fins et moyens sont modifiées, celles-ci augmentant dans le dernier godet (SW60-12) au détriment des argiles ($\phi < 2 \mu\text{m}$).

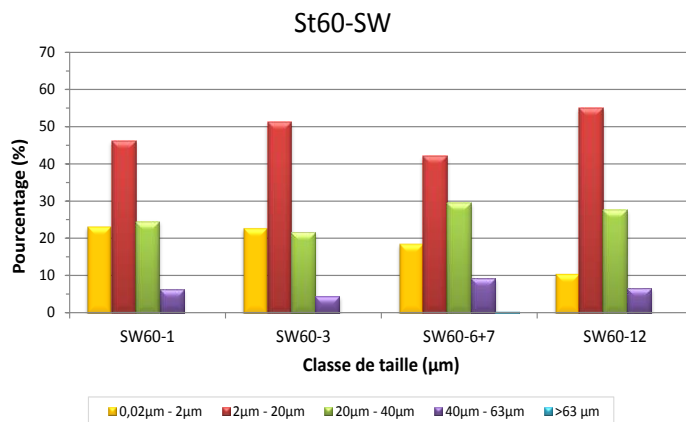


Figure 11 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel, du 12 juillet au 28 août 2013.

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 NE60-1, NE60-11 et NE60-12 et d'autre part, d'échantillons composites en raison des faibles quantités récoltées à certaines périodes : les MES des godets NE60-6, NE60-7 et NE60-8 ont donc été regroupées.

Les analyses réalisées (Tableau 5) montrent que les MES sont composés des mêmes minéraux qu'en St60-NE, à savoir la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite, principalement. De la même manière, ces minéraux mettent en évidence une influence marine prépondérante, 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 échantillons analysés.

Par ailleurs, l'analyse semi-quantitative semble globalement montrer que les minéraux terrigènes, comme la goethite, se retrouvent en plus grande quantité dans les particules collectées en « saison chaude » qu'en « saison

fraîche ». Les minéraux terrigènes, comme la goethite, sont présents en quantité équivalente au niveau des deux stations du Canal de la Havannah pour cette campagne de juillet-août 2013.

Tableau 5 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-SW) par le piège à sédiments séquentiel, du 12 juillet au 28 août 2013.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
SW-1	M	m	m	t	-
SW60-6+7+8	M	m	m	t	-
SW60-11	M	m	m	t	-
SW60-12	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 (St60-NE), les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 12) sont relativement homogènes : la valeur moyenne est de $76,0 \pm 1,5$ % et les extrêmes oscillent de 73,6 à 79,4 %. Ces valeurs sont très proches de celles observées en janvier-février 2013 ($75,2 \pm 5,1$ %). En raison de la faible quantité de MES collectées du 1 au 4 août, l'analyse en carbonates n'a pas pu être réalisée.

De même, les teneurs en carbonates observées sont plus faibles que lors des campagnes précédentes : $89,7 \pm 7,5$ % pour la campagne de la saison chaude de 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 de septembre-octobre 2012, respectivement.

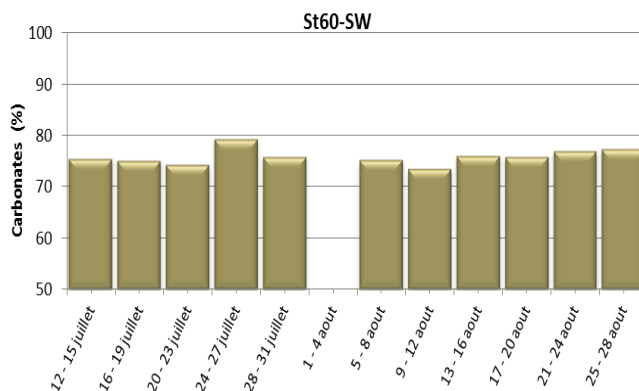


Figure 12 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 12 juillet au 28 août 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-SW).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Les précipitations atmosphériques abondantes du 28 juillet (203,7 mm) ont favorisé la remise en suspension de particules plus grossières modifiant la granulométrie des flux verticaux des particules au niveau de la Baie Kwé entre le 28 et le 31 juillet (KW1-5). Dans le Canal de la Havannah, aucune augmentation du flux n'est perceptible suite à cet événement.

A la station St06-KW1, la masse minimale de MES collectée est de 0,88 g. Cette valeur est inférieure à celle mesurée en septembre-octobre 2012 et janvier-février 2013 (toutes deux autour de 3,00 g). En ce qui concerne les maximales, la masse collectée de 64,71 g (KW-5) est liée aux fortes pluies du 28 juillet 2013 qui ont déstabilisé les sols latéritiques, cette valeur est bien supérieure à celles de janvier-février 2012 et de janvier-février 2013 (25,61 et 21,66 g respectivement) ou encore à septembre-octobre 2012 (11,82 g).

Dans le Canal de la Havannah, la comparaison entre la station St60-NE et St60-SW montre des caractéristiques similaires pour ces stations jumelles. Les masses minimales et maximales collectées sont du même ordre, la distribution granulométrique des particules et leurs compositions minéralogiques sont similaires. D'une manière générale, les MES collectées dans la Baie Kwé ont une granulométrie plus fine que dans le Canal ; 20,9 à 33,2 % des particules mesurent plus de 40 μm de diamètre en Baie Kwé, contre 44,1 à 73,9 % pour le Canal de la Havannah.

Pour la Baie Kwé, la concentration moyenne en carbonates ($46,0 \pm 12,3 \%$) est notablement inférieure à celle de la campagne précédente de janvier-février 2013 ($66,9 \pm 8,4 \%$), probablement liée aux fortes intempéries et qui suggère une influence terrigène plus marquée. Dans le Canal de la Havannah les teneurs en carbonates (74,3 et 76,0 % pour NE60 et SW60 respectivement) sont du même ordre que pour la campagne de janvier-février 2013.

Les principaux minéraux sont : la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite pour le domaine marin ; la goethite qui souligne l'influence terrigène a été clairement identifiée seulement en Baie Kwé, notamment dans le godet KW1-5 (28-31 juillet ; 203,7 mm) où la goethite devient la phase minérale majoritaire. La goethite a aussi été retrouvée en moindre proportion dans les godets des stations St60-NE et St60-SW soulignant une influence terrigène dans le canal de la Havannah.

4.3 COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

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

4.3.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

Les éléments métalliques analysés dans les MES de la Baie Kwé ont permis de mettre en évidence les influences respectives des apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) et marins (Ca). Pour tous les métaux, les concentrations obtenues peuvent montrer un écart-type maximum de l'ordre de 29,0 à 39,3 % (RSD, Tableau 6).

Du point de vu de l'évolution temporelle, les concentrations en métaux ont toutes présenté des valeurs maximales pour la période du 28-31 juillet (godet KW1-5) correspondant à la collecte qui a suivi les fortes précipitations du 28 juillet (203,7 mm). Les concentrations sont restées élevées jusqu'au 8 août (godet KW1-7); de part et d'autre de ce pic de concentrations (28 juillet au 8 août), les valeurs sont demeurées stables et du même ordre. Pour le calcium un schéma inverse s'est produit traduisant la diminution temporaire des influences marines pour la période du 28 juillet au 8 août.

Les niveaux de concentrations de Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont tous supérieurs à ceux des campagnes précédentes (juillet-août 2011 ; janvier-mars 2012 ; septembre-octobre 2012 et janvier-février 2013). L'augmentation constatée, par comparaison aux concentrations moyennes de la campagne de janvier-février 2013, est de 69,8 ; 53,4 ; 53,8 ; 50,2 et 56,7 % pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni respectivement. Comparée à la fin de saison fraîche de septembre-octobre 2012, l'augmentation est de 101,9 ; 83,6 ; 69,8 ; 100,8 et 93,5 % pour respectivement Co, Cr, Fe, Mn et Ni en juillet-août 2013.

Les résultats montrent aussi une augmentation significative 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 CÉIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012). En effet, depuis l'état de référence, les concentrations en métaux ont sensiblement augmenté de 318 ; 166 ; 175, 192 et 210 %, respectivement pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni en juillet-août 2013.

Tableau 6 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 12 juillet et 28 août 2013 (Station St06-KW1 ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	37369	138	4560	136614	1164	2197
MAX	209651	384	14035	326336	3395	6971
MOYENNE	164584	214	7111	189732	1687	3539
ECART-TYPE	51368	76	2796	55033	656	1391
% RSD	31,2%	35,6%	39,3%	29,0%	38,9%	39,3%

La matrice de corrélation met en évidence, une nouvelle fois, une grande similarité ($R \geq 0,950$) d'évolution des concentrations massiques inter-éléments pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn (Tableau 7). Toutefois, cette similarité globalement satisfaisante souligne que ces éléments métalliques appartiennent au cortège des formations latéritiques exploitées (les mêmes observations avaient été effectuées lors de campagnes précédentes comme en janvier-février 2013 par exemple).

Les concentrations en calcium dans l'eau de mer évoluent peu dans le temps (excepté lors de périodes de fortes précipitations) et la matrice de corrélation 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 de ces deux éléments qui représentent l'influence des pôles marins (Ca) et terrigènes (Fe) (Figure 13) ; les valeurs minimale et maximale du rapport Ca/Fe sont respectivement de 0,1 (KW1-5 ; 28-31 juillet) et 1,5 (KW1-3 et KW1-4 ; 20-27 juillet). La valeur maximale du ratio Ca/Fe est en baisse comparée à la campagne de janvier-février 2013 (2,4 pour le 9-12 janvier 2013), de même pour le minima (1,4 pour 17-20 janvier 2013). Cette diminution significative des rapports Ca/Fe confirme une plus forte influence des apports terrigènes par rapport à janvier-février 2013. Il est important de souligner que, d'une part, les fortes précipitations du 2 et 3 juillet (antérieurs à la mission) et d'autre part, les vents de secteur S assez soutenus (jusqu'à 15 m/s) générateurs de phénomènes de remise en suspension des vases, pourraient être à l'origine du faible ratio enregistré pour la période du 12-15 juillet (KW1-1), de même la pluie du 28 juillet a entraîné le plus bas rapport Ca/Fe entre le 28 et le 31 juillet (KW1-5).

Les ratios Ca/Fe des godets KW1-3 ; KW1-4 ; KW1-11 et KW1-12 autour de 1,4 traduisent la mise en place de périodes de plus fortes empreintes marines. A contrario, les plus faibles ratios Ca/Fe soulignent l'augmentation des apports terrigènes qui sont associés aux plus fortes concentrations en métaux.

Les deux valeurs maximales du ratio Ca/Fe correspondent à des régimes de vents globalement de secteur SE forts à modérés (9,3-16,6 m/s) entraînant des resuspensions de débris coralliens sur le platier de la Baie. La valeur minimale coïncide avec un régime de vents de secteur E soutenu (14,3-21,3 m/s) avec une rotation vers le secteur W faible (en janvier-février 2012, les ratios les plus faibles ont été enregistrés pour des vents de secteur E modérés).

Tableau 7 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 12 juillet et le 28 août 2013. (Station St06-KW1 ; n=12).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,989	1				
Cr	-0,992	0,988	1			
Fe	-0,996	0,990	0,995	1		
Mn	-0,989	0,971	0,984	0,985	1	
Ni	-0,962	0,965	0,980	0,971	0,949	1

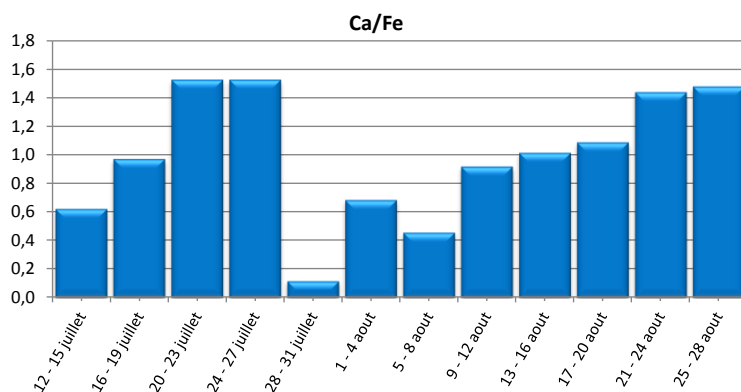


Figure 13 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé (St06-KW1) entre le 12 juillet et le 28 août 2013.

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

- d'une part, semble plus importante en raison des conditions hydro-climatiques exceptionnelles ;
- d'autre part, paraît s'accroître notablement dans 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 $0,98 \pm 0,46$ (juillet-août 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 aux cours de différentes campagnes.

Ca/Fe	Juil-août 2013	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	2007-2008*
Moyenne	0,98	1,95	2,40	2,32	3,17	3,85
Ecart-type	0,46	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. 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, les concentrations observées en juillet-août 2013 sont plus élevées qu'en janvier-février 2013. Cette augmentation est comprise entre 15 % (Cr) et 78 % (Co). Par rapport à la campagne de septembre-octobre 2012 de fin de saison fraîche, les écarts sont encore plus prononcés puisqu'ils passent de 29,3 % (Co) à 100 % (Mn) d'augmentation en juillet-août 2013. De surcroît, comparativement à l'Etat de Référence 2007/2008 (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230) l'augmentation est encore plus notable avec 253 ; 189 ; 243 ; 247 et 315 % de plus en juillet-août 2013 pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni respectivement.

La matrice de corrélation (Tableau 10) permet de dégager plusieurs similarités significatives entre Co, Cr, Fe et Mn avec des coefficients de Pearson $R > 0,970$. A noter que Ni montre également une tendance de comportement

proche du Co et du Fe bien que les coefficients de corrélation soient moins prononcés $R > 0,870$ et $R > 0,860$ respectivement. Ces observations suggèrent que les apports terrigènes ont eu une influence sur le secteur du Canal de la Havannah en juillet 2013.

Il doit être rappelé qu'une seule corrélation significative au seuil de similarité de 0,950 à la station St60-NE avait été mise en évidence pour la campagne de janvier-février 2012 entre Cr et Fe ; et en janvier-février 2013, une corrélation entre Fe et Ni ($R > 0,988$) avait été observée. Cette statistique montrait que l'influence des apports terrigènes n'était 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 12 juillet et 28 août (Station St60-NE ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	249423	54	682	22509	545	769
MAX	295879	20	1279	45301	233	396
MOYENNE	278794	37,5	960	34045	379	565
ECART-TYPE	15543	10,9	193	7272	101	99
% RSD	5,6	29,1	20,1	21,4	26,6	7,8

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 12 juillet et 28 août (Station St60-NE ; n=12).

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

Dans le Canal de la Havannah, la normalisation des concentrations du calcium par le fer oscille entre 5,9 et 13,1. Les valeurs minimales du ratio Ca/Fe ont toutes été enregistrées suite à des fortes précipitations. Par exemple, le ratio Ca/Fe de 5,9 correspond à la période de collecte du 1 au 8 août, qui a suivi les pluies du 28 juillet (203,7 mm), accompagné d'un régime de vents soutenus à modérés de secteur E (21,3 m/s) avec une rotation de secteur W-SW. Ces observations suggèrent, d'une part, que les apports terrigènes sont irréguliers et d'autre part, qu'ils peuvent impacter fortement le Canal de la Havannah, en cas de précipitations intenses, cette empreinte pouvant perdurer plusieurs jours.

D'un point de vue temporel et d'une manière générale, le ratio Ca/Fe a tendance à décroître, traduisant un impact terrigène croissant (Tableau 11). Il apparaît assez clairement que les apports en particules latéritiques fines et riches en métaux tendent à augmenter depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007/2008. On notera cependant que l'évolution de l'empreinte terrigène pour juillet 2013 est fortement conditionnée par l'épisode météorologique exceptionnel pour la saison fraîche.

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

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

4.3.2.2 Teneurs en soufre

La concentration moyenne en soufre est de 2656 ± 56 mg/kg. Cette valeur montre que la concentration de l'élément ne varie presque pas dans le Canal de la Havannah (Figure 14) et n'est pas dépendante des conditions hydro-climatiques régnautes.

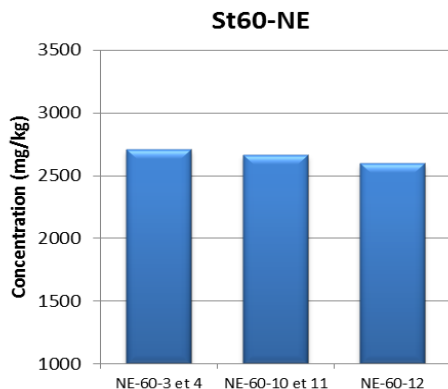


Figure 14 : Concentration du soufre dans les godets correspondant aux événements météorologiques marquants enregistrés entre le 12 juillet et 28 août 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

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) par rapport à St06-KW1. 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 qu'en 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 2013. En effet, pour tous les éléments métalliques (excepté Cr qui reste constant), l'augmentation est de 55 ; 14,8 ; 13,8 et 11,9 % pour respectivement Co, Fe, Mn et Ni. Par rapport à la campagne de septembre-octobre 2012 de fin de saison fraîche, les écarts sont encore plus prononcés puisqu'ils passent à 42 ; 58,2 ; 60,6 et 48,3 % respectivement pour Cr, Fe, Mn et Ni, seul le Co présente une légère augmentation autour de 6,9 %.

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, par exemple autour de 128 ; 86 ; 120 ; 104 et 186 % pour respectivement Co, Cr, Fe, Mn et Ni.

La matrice de corrélation (Tableau 13) permet de dégager des tendances de similarité de comportement pour Co, Cr, Fe et Ni (Coefficient de Pearson $R > 0,950$; Tableau 13) qui suggèrent une influence des apports terrigènes dans le Canal de la Havannah pour cette période de collecte

Il doit être rappelé qu'aucune corrélation significative au seuil de similarité de 0,950 n'avait été mise en évidence pour les campagnes de septembre-octobre 2012 et janvier-février 2013. Ces statistiques démontrent que l'empreinte des termes sources terrigènes n'est pas, habituellement, 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 12 juillet et le 28 août 2013 (Station St60-SW ; n=11).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	275901	22	708	23894	211	426
MAX	297217	40	1021	38253	430	741
MOYENNE	284441	31	845	29990	289	537
ECART-TYPE	6010	6	102	4373	70	99
% RSD	2%	18%	12%	15%	24%	19%

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 12 juillet et le 28 août 2013 (Station St60-SW ; n=11).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,562	1				
Cr	-0,465	0,967	1			
Fe	-0,546	0,970	0,964	1		
Mn	-0,585	0,844	0,831	0,854	1	
Ni	-0,458	0,944	0,926	0,981	0,797	1

Pour cette station, la normalisation des concentrations du calcium par le fer montre la même fourchette de valeurs que la station jumelle St60-NE. En effet, le ratio Ca/Fe oscille entre 7,3 et 12,4 suggérant que les apports terrigènes sont faibles. La distribution de la normalisation temporelle Ca/Fe à la station St60-NE est proche de celle décrite à la station ST60-SW avec des valeurs minimales coïncidant avec les pluies conséquentes (par exemple celle du 28 juillet 2013, 203,7 mm) et quelques jours suivant cet événement.

Toutefois, il est à noter que des évolutions très modérément distinctes sont observables entre les stations St60-NE et St60-SW, comme observé lors des 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, le ratio Ca/Fe présente une tendance à la décroissance, traduisant 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	Juil-août 2013	Janv-fév 2013	Sept-oct 2012	Janv-fév 2012	Juil-août 2011	2007-2008*
Moyenne	9,7	11,7	17,3	13,9	31,3	26,8
Ecart-type	1,5	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 2786 ± 50 mg/kg. Cette valeur montre que l'élément ne varie pas en dans le Canal de la Havannah (Figure 15) et n'est pas dépendante des conditions hydro-climatiques régnantes.

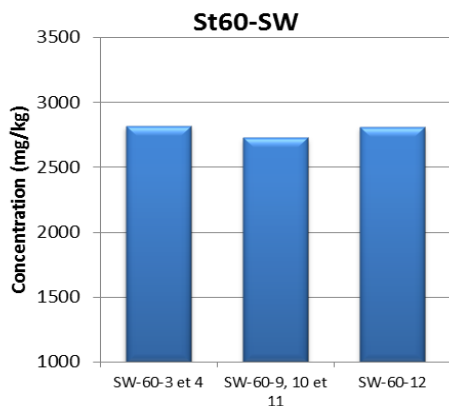


Figure 15 : Concentration du soufre dans les godets correspondant aux événements météorologiques marquants enregistrés entre le 12 juillet au 28 août 2013 dans le Canal de la Havannah (St60-SW).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Les conditions hydro-climatiques exceptionnelles de juillet 2013 ont eu une influence 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 (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont en hausse sensible ($56,8 \pm 7,6$ %) par rapport à celles de la campagne de la saison chaude (janvier-février 2013). De même, en comparant les valeurs à la campagne de fin de saison fraîche (septembre-octobre 2012), une augmentation a été observée de 101,9 ; 83,6 ; 69,8 ; 100,8 et 93,5% pour respectivement Co, Cr, Fe, Mn et Ni en juillet-août 2013.

Plus généralement, en Baie Kwé, il a été observé une augmentation notable pour tous les métaux entre 166 (Cr) et 318 % (Co) 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), les concentrations en métaux ont sensiblement augmenté, par exemple pour la station St60-SW, on enregistre une augmentation de 42 ; 58,2 ; 60,6 et 48,3 % respectivement pour Cr, Fe, Mn et Ni par rapport à septembre-octobre 2012. Toutefois, d'une manière générale, par rapport à l'Etat de référence de 2007, tous métaux confondus, l'accroissement est en moyenne de 187 ± 76 %.

Les compositions en métaux signent clairement l'origine latéritique des particules dans la Baie Kwé, alors que cette influence est amoindrie dans le Canal, notamment en progressant vers l'ouest c'est-à-dire de St60-NE vers St60-SW. La station St60-SW semble moins influencée par les apports terrigènes que sa jumelle St60-NE.

5 INTERPRÉTATION

5.1 INFLUENCE DES FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES

5.1.1 Baie Kwé,

Les premières campagnes réalisées entre 2011 et 2013 avaient conduit à établir un parallèle entre la quantité collectée de MES, la distribution des populations granulométriques et l'action mécanique induite par certaines directions de vents. Des conditions météorologiques exceptionnelles ont été observées au cours de cette campagne de juillet-août 2013 et dans l'ensemble, elles ont donné lieu au cours de la collecte à de moindres quantités de MES qu'en saison chaude (janvier-février 2013), comme attendu.

Il ressort également qu'une forte proportion de particules latéritiques est remise en suspension à la faveur de régimes de vents de secteur S et de débris coralliens pour le secteur SE (avec de courtes incursions de secteur W) lorsqu'ils sont de forte intensité (10 à 16 m/s ; Figure 16). Une telle conjonction de conditions climatiques s'est présentée entre le 28-31 juillet 2013, période qui a permis de collecter la quantité maximale de MES terrigène de l'étude (64,71 g) ; avec des précipitations significatives de 203,7 mm (28 juillet 2013). Durant la période suivante (1 au 4 août), la masse collectée est tombée à 4,26 g en raison de l'installation de vents modérés ($2 < V < 11$ m/s) de secteur NW-W ne générant pas de clapot à l'intérieur de la Baie Kwé.

Un autre épisode pluvieux intense (8 août ; 80 mm), accompagné de vents de secteur E de force moyenne (6-16 m/s) qui se sont ensuite renforcés au secteur W (10 à 17 m/s), a permis de collecter environ 6,3 g de MES.

L'influence des apports terrigènes est maximale entre le 28 juillet et 5 août, se traduisant par une forte diminution du rapport Ca/Fe, parallèlement à une augmentation importante des concentrations en métaux, comme le montre l'évolution de Ni (Figure 16). Cette accroissement des concentrations correspond à la masse maximale de MES collectée, et par ailleurs à des conditions hydro-climatiques qui coïncidaient avec un épisode de vents de E-SE de forte intensité forte (14-21 m/s) basculant progressivement au secteur W-NW (6-14 m/s). Dans ce contexte, seules les particules fines d'origine latéritique, riches en métaux, ont demeuré en suspension, ce mécanisme expliquant alors les fortes concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni analysées.

A l'inverse, l'influence marine a été maximale (Ca/Fe en hausse) pour deux épisodes météorologiques différents. Le premier (20-27 juillet) s'explique par la persistance de vents de secteur E-SE d'intensité variable (9-16 m/s) qui ont basculé rapidement W-NW (6 m/s) pour revenir de secteur S (10-12 m/s ; Figure 16). Le deuxième (21-28 août) est généré par l'installation d'alizés de S-SE assez constants et d'intensité moyenne (7-10 m/s) avec une incursion de vents de secteur W faible (8 m/s). Ces régimes sont alors capables de remettre en suspension des particules, de plus 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 forts ($FIX > 10$ m/s) permettent l'entrée dans la baie d'une houle capable de brasser les fonds et générer le remaniement des vases latéritiques.

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

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 (4,6 et 4,1 g respectivement) coïncide avec une période d'influence terrigène minimale (Figure 17 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, le ratio Ca/Fe devient maximum (13,1) quand la concentration en Ni est minimale (Figure 17). D'un point de vue des conditions météorologiques, cette période correspond à des régimes de secteurs W-NW à S-SE modérés ($6 < FIX < 13$ m/s), sans précipitations significatives (< 20 mm). L'ensemble de ces conditions hydro-climatiques favorisent la circulation des eaux enrichies en tests de micro-organismes provenant du récif barrière.

L'appauvrissement drastique en MES constaté entre le 5 et 16 août est en concordance avec des régimes météorologiques modérés (7 à 12 m/s) de secteurs NE à SE principalement avec une incursion durable de secteur W forte (10 à 17 m/s ; Figure 17 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En l'absence de précipitations atmosphériques, les eaux ne transportent que peu de matière en suspension.

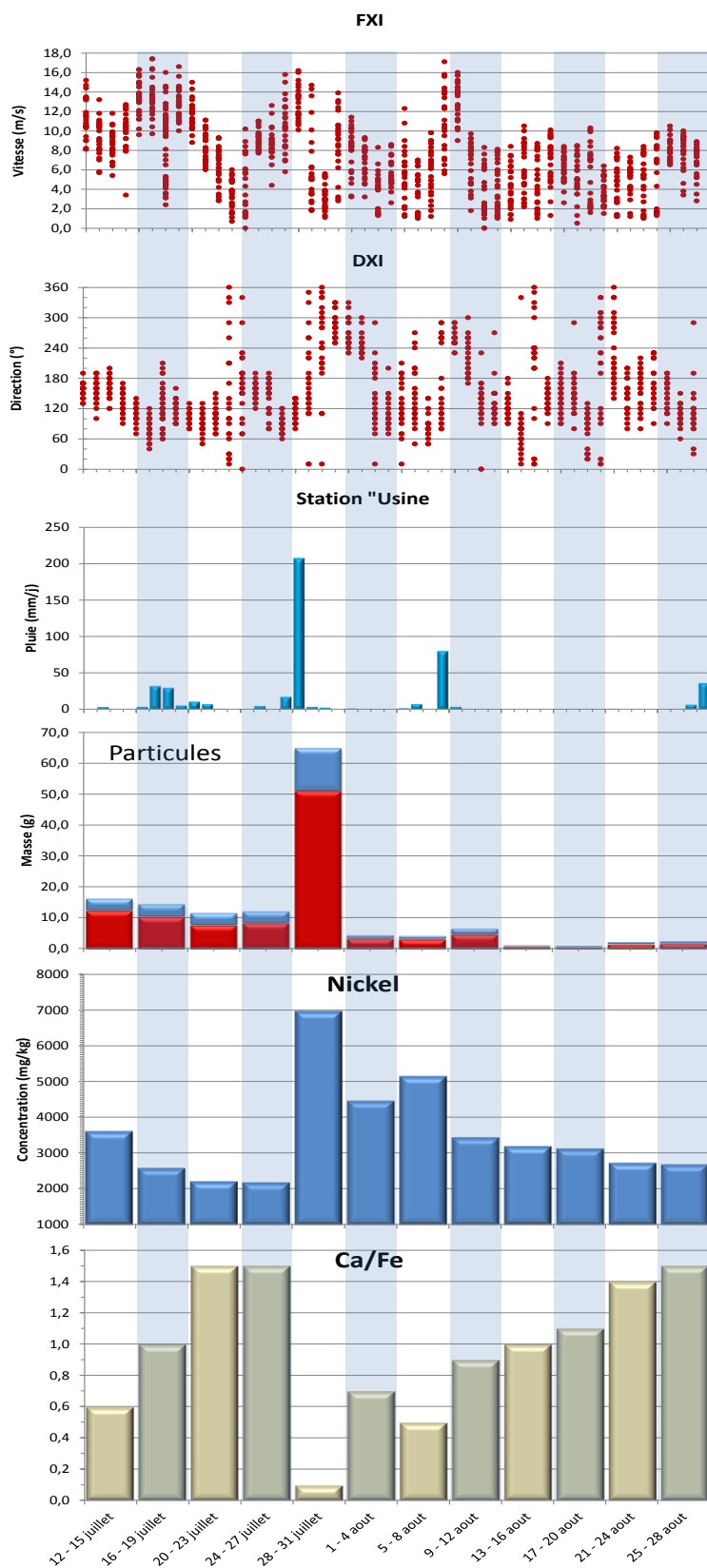


Figure 16 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St06-KW1 pour la période du 12 juillet au 28 août 2013.

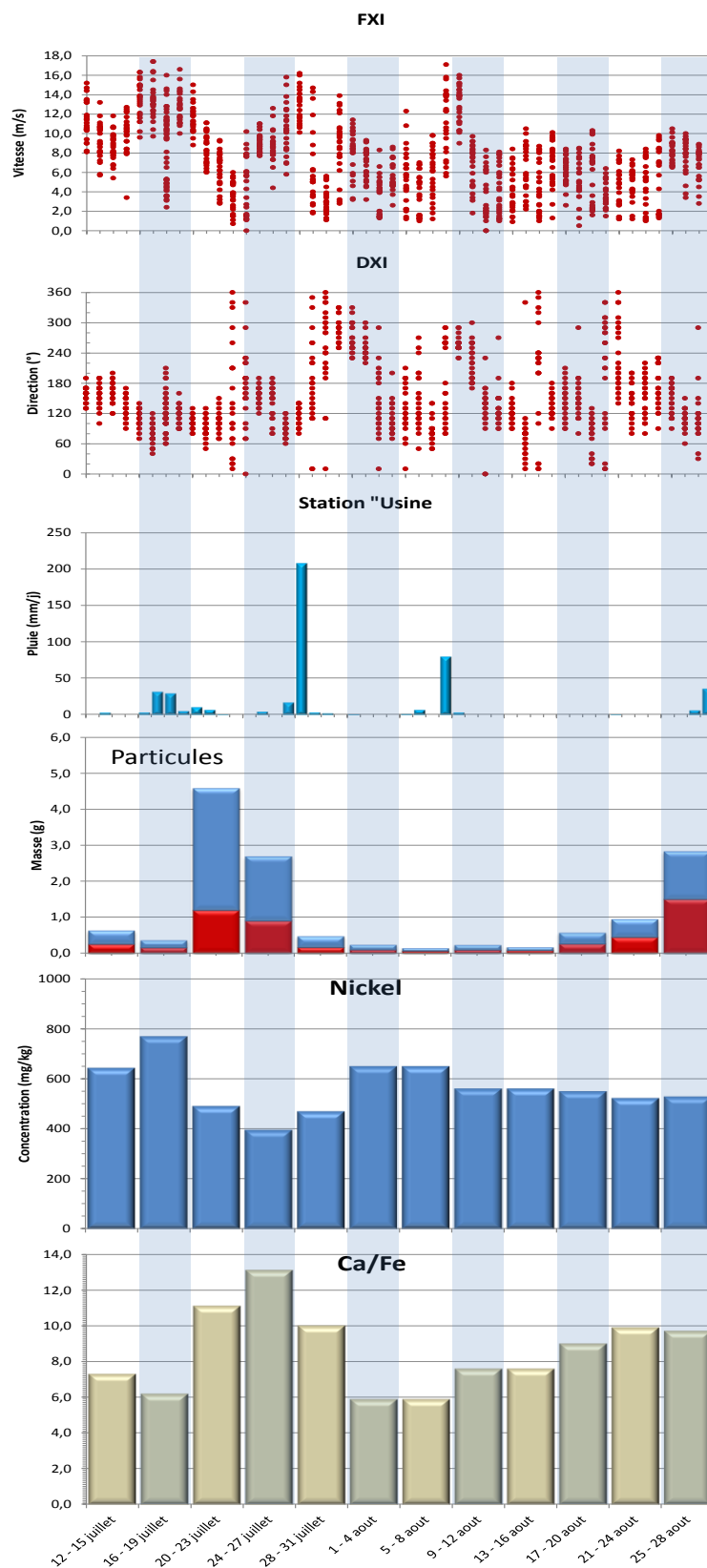


Figure 17 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St60-NE pour la période du 12 juillet au 28 août 2013.

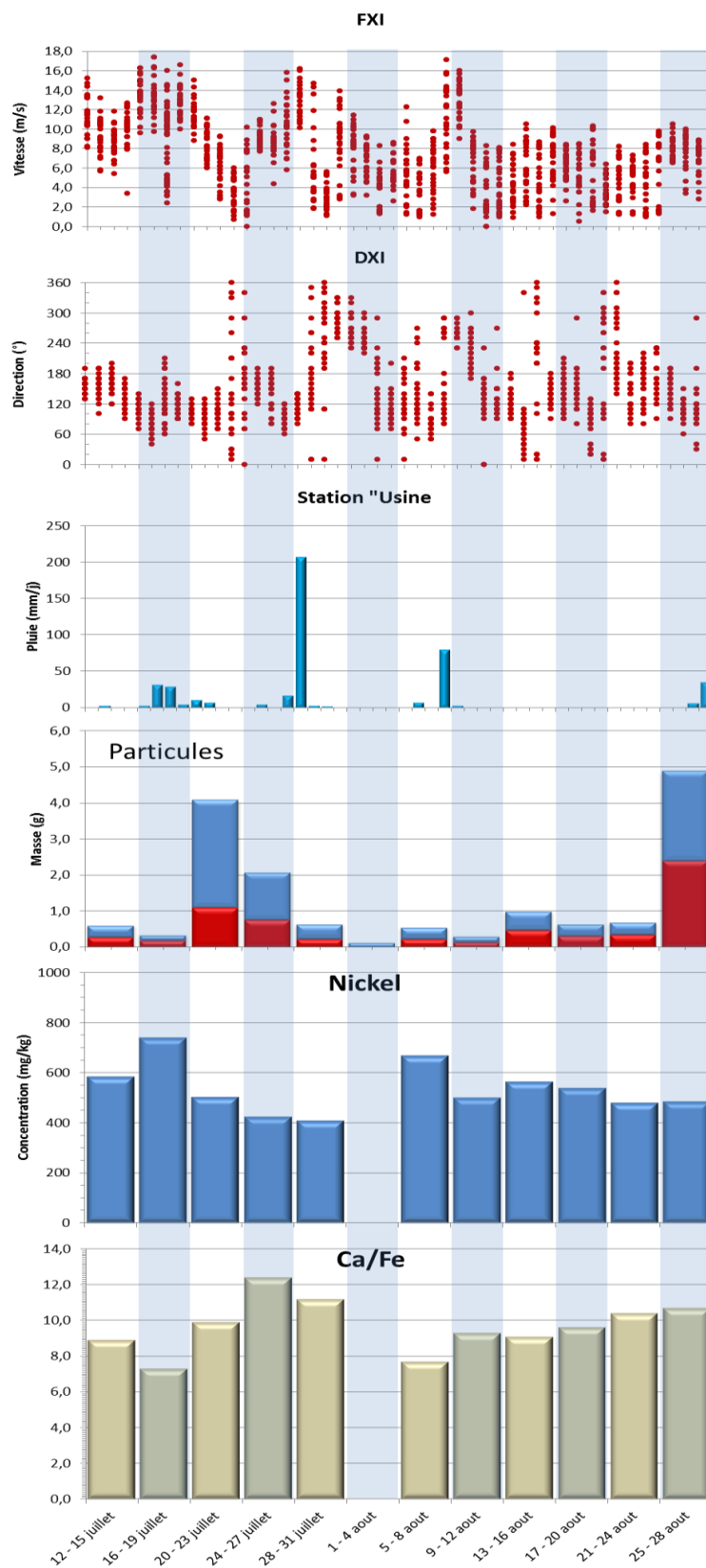


Figure 18 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St60-SW pour la période du 12 juillet au 28 août 2013.

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 l'ensemble des campagnes réalisées entre juillet 2011 et juillet 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 juillet 2013, les flux moyens de MES sont compris entre $27,1 \pm 30,0$ et $58,1 \pm 87,8$ g/m²/j (Tableau 15). Ces valeurs mettent en évidence une grande variabilité temporelle des flux mais aussi une périodicité entre les saisons ; les flux étant bien plus élevées en saison chaude qu'en saison fraîche, bien que la valeur maximale ait été calculée pour juillet 2013 (Tableau 15) montrant ainsi le caractère exceptionnel de cette campagne.

Par ailleurs, une tendance à l'augmentation des flux paraît tout de même se dessiner, bien exprimée en janvier-février 2013 et juillet-août 2013. En revanche, les états de références de 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).

Pour le Canal de la Havannah, entre juillet 2011 et juillet 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) et masse totale sédimentée au cours de la période. Valeurs calculées pour l'ensemble des campagnes de juillet 2011 à juillet 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	juil-13
Moyenne (g/m ² /j)	14,6	28,3	27,1	39,5	26,4	46,5	58,1
Ecart-type	7,4	9,2	30,0	33,2	13,1	29,5	87,8
Masse sédimentée (g/m ²)	700	1132	1299	1894	1267	2231	2786

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

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

ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM

Pour la Baie Kwé, les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux ont augmenté entre 2011 et 2013, par exemple pour Ni (Figure 19). En effet, les valeurs maximales ont fortement progressé entre juillet-août 2011 et juillet-août 2013, de même que les valeurs minimales, si bien que le bruit de fond géochimique moyen a été multiplié par 1,9 pour le Ni et Fe (

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'accroissement des valeurs minimales, qui constituent le bruit de fond géochimique, ne semble pas être la raison principale, les masses d'eau étant cycliquement renouvelées par les courants provenant du Canal de la Havannah. Il faut probablement rechercher la cause dans l'augmentation de la fréquence des épisodes d'apports terrigènes importants qui prennent naissance dans la Baie Kwé par le biais de néphéloïdes.

En effet, il s'agit probablement de la mise en place de phénomènes de resuspension des particules issues d'un premier dépôt dans la Baie Kwé où, d'ailleurs, le taux de sédimentation a progressé assez nettement. Régulièrement, ces particules remises en suspension sont alors 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). A saison équivalente, celui-ci montre clairement pour la Baie Kwé et le Canal de la Havannah, une augmentation notable des flux depuis juillet 2011, en particulier en janvier-février 2012 et juillet-août 2013 ; pour la Baie Kwé, les flux de Ni ont doublé toute quelle que soit la saison.

Dans le Canal de la Havannah, si le phénomène est globalement identique qu'en Baie Kwé, l'augmentation constatée en juillet 2013 reste moins élevée que celle de janvier 2013, mais montre une progression nette des flux en saison fraîche.

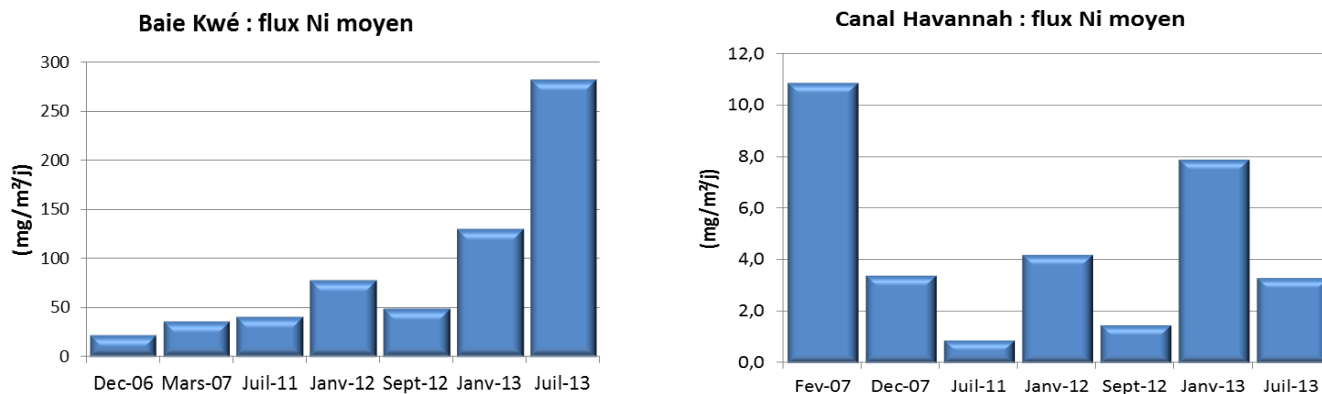


Figure 19 : Evolution temporelle des flux de nickel moyens (mg/m²/j) mesurés au niveau de la station St06-KW1 pour la Baie Kwé et des stations St60-NE + St60-SW dans le Canal de la Havannah depuis juillet 2011 et comparaison avec les valeurs observées en 2006/2007 (Etat de Référence).

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
Saison fraîche Juillet-août 2013	Minimum	810	0,8	25,2	746	5,7	13,8
	Maximum	12 577	124,4	4 541	105 584	1 098	2 255
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	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Maximum	6110	0,60	9,8	333	3,22	6,49
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
Saison fraîche Juillet-août 2013	Minimum	219	0,1	1,0	34	0,5	0,5
	Maximum	7093	0,7	19,1	664	6,5	11,9

Tableau 17 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), T4B et T4C (Canal de la Havannah) obtenues lors de la phase de définition de l'Etat de Référence (2007-2008).

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

CE QU'IL FAUT RETENIR

Comme pour les campagnes précédentes, la quantité, la distribution et la composition 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 effets de lixiviation des bassins versants lors d'épisode pluvieux.

En effet, en cohérence avec les résultats précédents, 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 des récifs frangeants et des platiers récifaux de la baie. Une fraction des particules est ensuite entraînée vers le Canal de la Havannah par un régime de vent de secteur W dominant.

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

Les valeurs de flux de matière particulaire (MES) mettent en évidence une grande variabilité temporelle des flux et une périodicité entre les saisons fraîches/chaudes ; les flux étant bien plus élevées en saison chaude qu'en saison fraîche (bien que la valeur maximale est enregistrée pour juillet 2013, soulignant le caractère exceptionnel des conditions hydro-climatiques au cours de cette campagne).

Les flux moyens en métaux observés depuis juillet 2011, décrivent également une augmentation globale perceptible en 2012 et 2013. En Baie de Kwé pour juillet-août 2013, **les flux de métaux ont fortement augmenté comparativement** aux campagnes précédentes de septembre-octobre 2012 et juillet-août 2011. De même, on constate aussi une forte augmentation des flux moyens par rapport aux valeurs obtenues pour l'Etat de Référence de 2007. Pour le Canal de la Havannah, l'augmentation des flux est régulière entre juillet 2011 et juillet-août 2013.

6 CONCLUSION

Pour la période d'études comprise entre le 12 juillet et le 28 août 2013 (saison fraîche), les vents ont montré une variabilité temporelle passant du secteur S-SE du 12-24 juillet, puis à un large secteur SE avec des rotations dans le secteur W-NW parfois durables (31 juillet-4 août et 9-11 août) et intenses (16m/s) dans le secteur W. Quelques incursions de NE jusqu'à la fin de la collecte au 28 août sont à noter.

En termes de précipitations, la période a été marquée par des épisodes pluvieux d'importance (207,3 et 80 mm le 28 juillet et le 8 août respectivement). Il a été enregistré 29 jours de pluies cumulant 467 mm de précipitation, ce qui revêt un caractère exceptionnel pour la saison fraîche 2013.

Ce contexte hydro-climatique a conduit aux observations suivantes :

1. BAIE KWE

- a. La direction des vents de secteur S est déterminante pour la mise en place de phénomènes de remise en suspension des particules latéritiques fines déposées à l'intérieur de la baie. Toutefois, des vitesse supérieures à 10 m/s semblent nécessaires pour fournir l'énergie suffisante à ces mécanismes. Des vents plus rapides (>15 m/s) et d'orientation SE conduisent à la resuspension de particules moyennes et grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) carbonatées provenant du platier récifal (observation du 14 au 17 février) ;
- b. Les matières en suspension (MES) collectées au cours de cette campagne sont majoritairement composées de particules fines ($\phi < 40 \mu\text{m}$) et la masse de MES la plus élevée a été collectée entre le 28 et le 31 juillet, période soumise à de fortes précipitations (203,7 mm) et des vents de secteur SE forts (14 à 21 m/s) ;
- c. Hormis l'épisode pluvieux exceptionnel de fin juillet, les valeurs de flux de matière particulaire (MES) mettent en évidence une grande variabilité temporelle et une périodicité saisonnière ; les flux étant généralement bien plus élevées en saison chaude qu'en saison fraîche ;
- d. Les flux moyens en métaux observés en saison fraîche depuis juillet 2011, décrivent une augmentation perceptible en 2012 et 2013. Les flux de métaux ont été multipliés par 6 comparativement à juillet-août 2011. De même, on constate une forte augmentation des flux moyens par rapport à l'Etat de Référence de 2007.

2. CANAL DE LA HAVANNAH

- a. Les quantités de MES collectées demeurent faibles et les masses maximales correspondent à des régimes de vents de secteur E-SE intenses (9,3-16,6 m/s le 20-27 juillet) et de S modérés (10-12 m/s, le 25-28 août) ;
- b. Les MES sont majoritairement composées de particules grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) à plus de 56 et 59 % pour respectivement SW60 et NE60 ;
- c. Les particules carbonatées représentent autour de 75% massique pour les deux stations, cette forte proportion étant en liaison probable avec l'instauration des régimes de secteur E-SE ou S

modérés à forts qui remobilisent et transportent les tests des microorganismes et des débris coquillers (photo de la fraction $\varnothing > 40 \mu\text{m}$; annexe 3) ;

- d. La charge minérale attribuée aux apports terrigènes (goethite) issus de la Kwé est fortement amoindrie et s'explique par les mécanismes de dispersion, comme l'a montré la modélisation hydrodynamique (Douillet et Fernandez, 2009).

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

Toutefois, une augmentation des flux de matière a été constatée depuis 2011. Si les flux de MES sont en progression, les apports en métaux, proportionnellement, semblent bien plus importants dans la Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah.

Bien évidemment, ce phénomène est particulièrement observable pour la Baie Kwé puisque les flux de MES doublent et la densité de flux maximal en nickel a progressé d'un facteur 12 depuis juillet 2011. Cette différence s'explique probablement par l'évolution du matériel particulaire qui provient de zones plus profondes du front de mine.

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 sédimentées dans la Baie Kwé avant d'être transportées.

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.
- Chaurand, P.: Apport de la cristallographie et de la spéciation du chrome et du vanadium à la modélisation de l'altération de granulats artificiels (sous-produits d'aciérie) thèse. (2006)
- Douillet P. et Fernandez JM, 2009. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Simulation annuelle de la sédimentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 55p.
- Dereux P, Douillet P, Le Gendre R, 2008b. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle de transport. Simulation annuelle du rejet. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 196p.
- McBride M.B., *Environmental chemistry of soils*, Oxford University Press, Oxford, 1994.
- Hiemstra T., De Wit J.C.M., Van Riemsdijk W.H., Multisite proton adsorption modeling at the solid/solution interface of (hydr)oxides: A new approach. II. Application to various important (hydr)oxides, *J. Colloid Interface Sci.* 133 (1989) 105-117.
- INERIS, 2003. Analyse critique de l'acceptabilité du niveau de rejet de manganèse dans le milieu marin – Rapport Final, Goro Nickel. H. Baroudi, J. Bureau, C. Rollin, Institut de l'Environnement Industriel et des Risques – Direction des Risques Chroniques, INERIS-DRC-03-53097/DESP-R02, 17 décembre 2003, 37 p. + Annexes.
- ISO, 2006a. ISO 10253: Qualité de l'eau – Essai d'inhibition de la croissance des algues marines avec *Skeletonema costatum* et *Phaeodactylum tricornutum*. Organisation Internationale de Standardisation (ISO), Genève, Suisse, 12 p.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : AIRE D'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 KWE LE PIÈGE À SEDIMENTS A ÉTÉ MOUILLÉ À LA STATION St06-KW1. LA STATION St09 APPARTIENT AU RÉSEAU SEMESTRIEL DE SURVEILLANCE PHYSICO-CHIMIQUE DE LA COLONNE D'EAU.	10
FIGURE 2 : PUISSANCE TYPE DE L'ÉPAISSEUR 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 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-PILOTE » DE VALE-NC POUR LA PÉRIODE DU 2 JUILLET AU 28 AOÛT 2013.	13
FIGURE 4 : MASSES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013 EN BAIE KWE (St06-KW1). COMPOSITION DES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIÈRES (> 40 µM).	15
FIGURE 5 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS EN BAIE KWE PAR LE PIÈGE À SEDIMENTS SÉQUENTIEL, DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013.	15
FIGURE 6 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES PAR LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013 EN BAIE KWE (St06-KW1).	17
FIGURE 7 : MASSES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 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).	17
FIGURE 8 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIÈGE À SEDIMENTS SÉQUENTIEL, DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013.	18
FIGURE 9 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES PAR LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE).	19
FIGURE 10 : MASSES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 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 µM) ET FRACTIONS GROSSIÈRES (> 40 µM).	20
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIÈGE À SEDIMENTS SÉQUENTIEL, DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013.	20
FIGURE 12 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES PAR LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW).	21
FIGURE 13 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTÉES EN BAIE KWE (St06-KW1) ENTRE LE 12 JUILLET ET LE 28 AOÛT 2013.	24
FIGURE 14 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES GODETS CORRESPONDANT AUX ÉVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES MARQUANTS ENREGISTRÉS ENTRE LE 12 JUILLET ET 28 AOÛT 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE).	26
FIGURE 15 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES GODETS CORRESPONDANT AUX ÉVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES MARQUANTS ENREGISTRÉS ENTRE LE 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW).	28
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 12 JUILLET AU 28 AOÛT 2013.	31

FIGURE 17 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI, TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 μ M, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO CA/Fe A LA STATION ST60-NE POUR LA PERIODE DU 12 JUILLET AU 28 AOUT 2013.	32
FIGURE 18 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI, TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 μ M, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO CA/Fe A LA STATION ST60-SW POUR LA PERIODE DU 12 JUILLET AU 28 AOUT 2013.	33
FIGURE 19 : EVOLUTION TEMPORELLE DES FLUX DE NICKEL MOYENS (MG/M ² /J) MESURES AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET DES STATIONS St60-NE + St60-SW DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH DEPUIS JUILLET 2011 ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS OBSERVEES EN 2006/2007 (ETAT DE REFERENCE).	35

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 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
TABEAU 2 : LISTE DES ECHANTILLONS COLLECTES AUX STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A SEDIMENTS (St60-SW, StSt60-NE ET St06-KW1) ET PERIODES DE COLLECTE ENTRE JUILLET ET AOUT 2013.	11
TABEAU 3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (STATION (St06-KW1) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 12 JUILLET AU 28 AOUT 2013.	16
TABEAU 4 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-NE) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 12 JUILLET AU 28 AOUT 2013.	18
TABEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-SW) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 12 JUILLET AU 28 AOUT 2013.	21
TABEAU 6 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 12 JUILLET ET 28 AOUT 2013 (STATION St06-KW1 ; N=12).	23
TABEAU 7 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 12 JUILLET ET LE 28 AOUT 2013. (STATION St06-KW1 ; N=12).	23
TABEAU 8 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 AUX COURS DE DIFFERENTES CAMPAGNES.	24
TABEAU 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 12 JUILLET ET 28 AOUT (STATION St60-NE ; N=12).	25
TABEAU 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 12 JUILLET ET 28 AOUT (STATION St60-NE ; N=12).	25
TABEAU 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
TABEAU 12 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 12 JUILLET ET LE 28 AOUT 2013 (STATION St60-SW ; N=11).	27
TABEAU 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 12 JUILLET ET LE 28 AOUT 2013 (STATION St60-SW ; N=11).	27
TABEAU 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.	27
TABEAU 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) ET MASSE TOTALE SEDIMENTEE AU COURS DE LA PERIODE. VALEURS CALCULEES POUR L'ENSEMBLE DES CAMPAGNES DE JUILLET 2011 A JUILLET 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.	34
TABEAU 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).	36
TABEAU 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).	36

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 sont grées sur une ligne de mouillage équipée avec un largueur acoustique. La durée d'immersion a été de 1,5 mois environ (11 juillet -28 août 2013).

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 (CO₂) est titré et la concentration en carbonate de calcium est déterminée par relation stœchiométrique.

Granulométrie

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction $< 2000 \mu\text{m}$ après élimination des organismes « actifs » (Swimmers). La détermination de 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, il s'agit d'une 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 (°)
12-juil.	0	17,2	19,6	15,2	170
13-juil.	3,4	15,2	19,4	13,2	160
14-juil.	0	14,2	19,6	10,7	170
15-juil.	0	16,7	20,3	12,7	120
16-juil.	3,6	16,2	19,3	19,5	120
17-juil.	32	16,1	19,9	17,4	80
18-juil.	29,7	17	19,2	12,8	80
19-juil.	5,4	17,9	21	16	150
20-juil.	10,8	18,8	21,5	16,6	90
21-juil.	7,2	18,7	21,6	15	120
22-juil.	0,8	18	22,3	11,1	80
23-juil.	0	18,3	20,6	9,3	100
24-juil.	0	17,4	23,2	6	290
25-juil.	4,6	14,9	23	10,2	190
26-juil.	0,2	16,8	20	11	180
27-juil.	17,2	17,4	21,2	12,6	110
28-juil.	207,3	18,3	20,9	15,8	90
29-juil.	3,6	17,4	20,4	21,3	130
30-juil.	2,6	19,1	21,9	14,3	110
31-juil.	0,2	16,9	24,6	6,2	300
1-août	1,2	18,5	22,6	13,9	260
2-août	0,2	16,6	21,1	11,4	250
3-août	0	18	21	9,3	260
4-août	0	17	20,7	8,3	70
5-août	1,6	17,5	19,8	8,6	90
6-août	7,2	17,5	19,6	12,3	70
7-août	0	16	22,1	7	110
8-août	80	17,8	23,8	9,8	50
9-août	3,6	17,4	22,4	17,1	260
10-août	0	17,5	21,2	16	260
11-août	0,2	17,3	21,4	9,7	260
12-août	0	14,1	20,1	8,3	120
13-août	0	13,6	21,8	8,1	100
14-août	0	14,4	21,7	8,4	120
15-août	0	17	23,1	10,5	60
16-août	0,4	15,8	22,8	8,7	220
17-août	0	16,5	21,2	10,1	110

Date	Pluie (mm)	TN (°C)	TX (°C)	FXI (m/s)	DXI (°)
18-août	0	17,3	21	8,4	170
19-août	0	15,4	20,5	8,5	170
20-août	0	14,1	22,2	10,3	120
21-août	0,8	15,8	24,2	6,4	230
22-août	0	17	21,7	8,2	170
23-août	0,2	17,2	19,9	7,3	190
24-août	0	15,5	21,2	8,4	160
25-août	0,2	12,7	21,6	9,8	190
26-août	0,4	17,5	21,1	10,5	160
27-août	6,4	16	20,3	10	130
28-août	36	16,4	21,1	8,9	110

Valeurs horaires des paramètres météorologiques (données Station « Usine-pilote » 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)
12-15 juillet	KW1-1	16,095	NE60-1	0,650	SW60-1	0,616
16-19 juillet	KW1-2	14,308	NE60-2	0,380	SW60-2	0,347
20-23 juillet	KW1-3	11,454	NE60-3	4,581	SW60-3	4,092
24-27 juillet	KW1-4	11,959	NE60-4	2,699	SW60-4	2,078
28-31 juillet	KW1-5	64,709	NE60-5	0,493	SW60-5	0,643
01-04 août	KW1-6	4,260	NE60-6	0,252	SW60-6	0,132
05-08 août	KW1-7	3,991	NE60-7	0,164	SW60-7	0,556
09-12 août	KW1-8	6,329	NE60-8	0,250	SW60-8	0,306
13-16 août	KW1-9	1,004	NE60-9	0,189	SW60-9	1,000
17-20 août	KW1-10	0,877	NE60-10	0,589	SW60-10	0,643
21-24 août	KW1-11	2,049	NE60-11	0,963	SW60-11	0,703
25-28 août	KW1-12	2,288	NE60-12	2,836	SW60-12	4,895

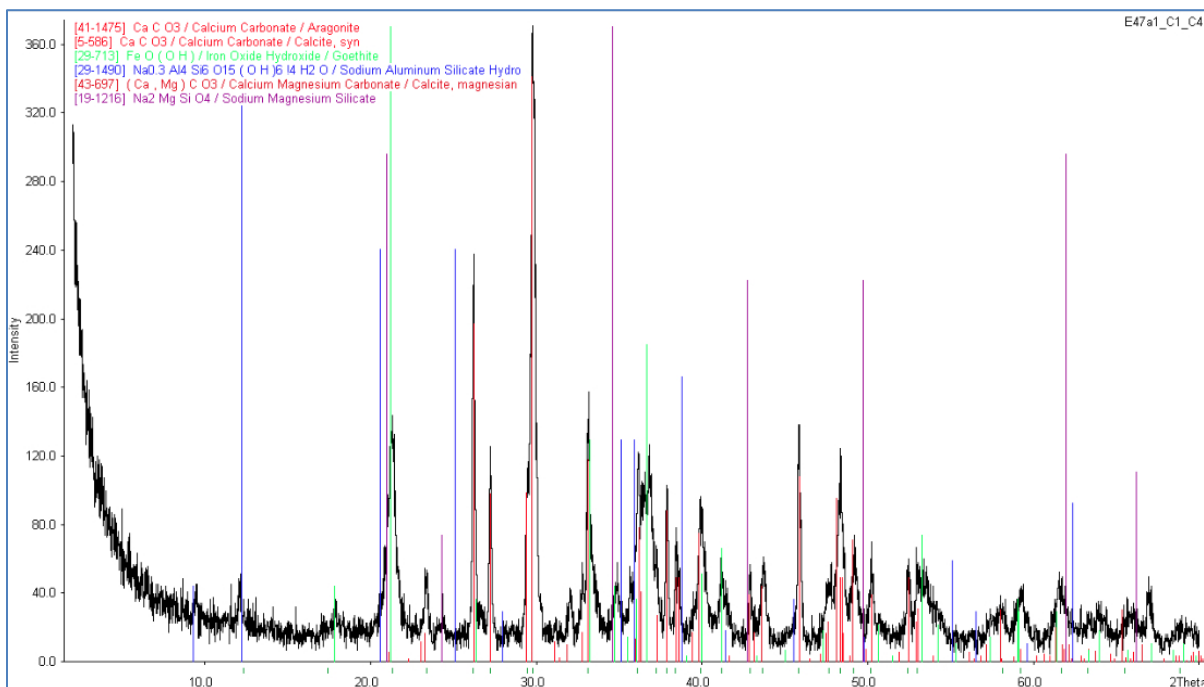
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

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-(1+2+3)	12,46	59,00	23,39	3,64	1,42	0,09	0
KW1-5	9,40	36,17	24,78	8,56	7,64	12,16	0
KW1-(6+7+8)	15,84	56,59	19,93	4,02	2,60	1,02	0
KW1-(9+10+11)	14,10	61,63	19,93	3,04	1,29	0,01	0
NE60-1	15,67	47,17	28,40	5,56	2,87	0,34	0
NE60-(3+4)	10,33	55,76	26,20	4,89	2,52	0,30	0
NE60-(6+7)	10,30	46,36	32,02	6,72	3,73	0,86	0
NE60-11	19,74	47,15	25,61	4,95	2,39	0,15	0
SW60-1	5,15	34,34	31,48	9,17	7,30	10,61	0
SW60-3	5,41	35,25	31,94	9,12	7,15	10,17	0
SW60-(6+7)	4,86	36,69	32,81	8,79	6,63	9,03	0
SW60-12	4,25	32,79	35,94	10,07	7,55	8,52	0

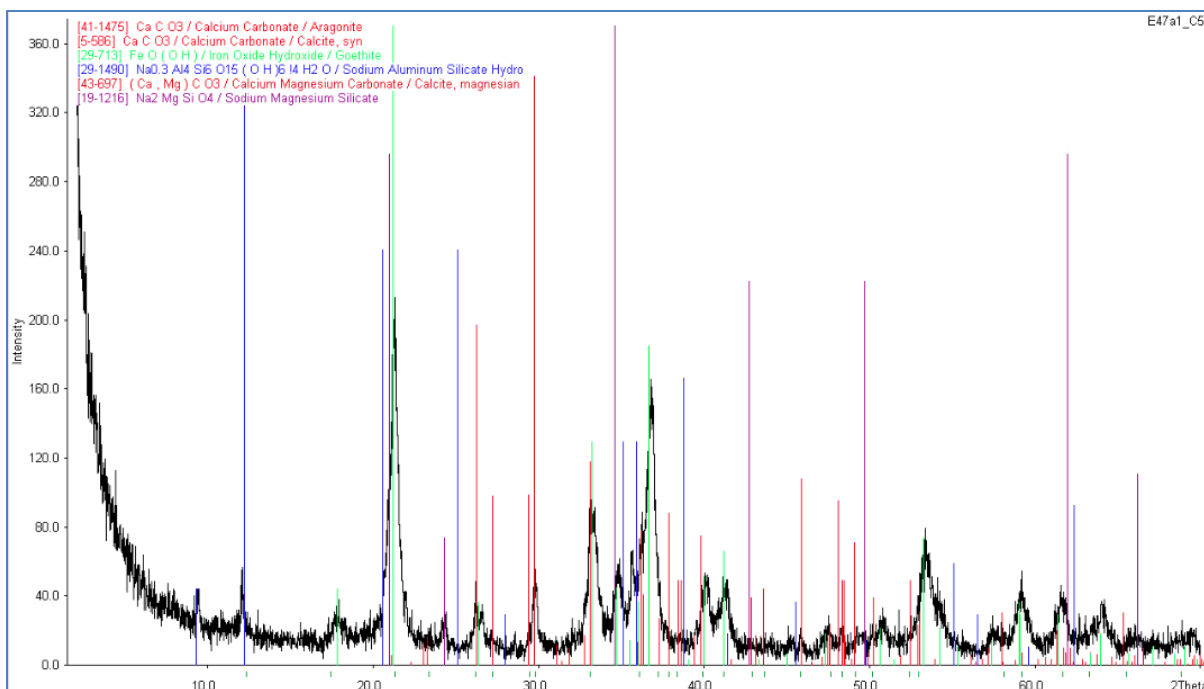
Nd = non déterminée par manque de matière

COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DE LA BAIE KWE

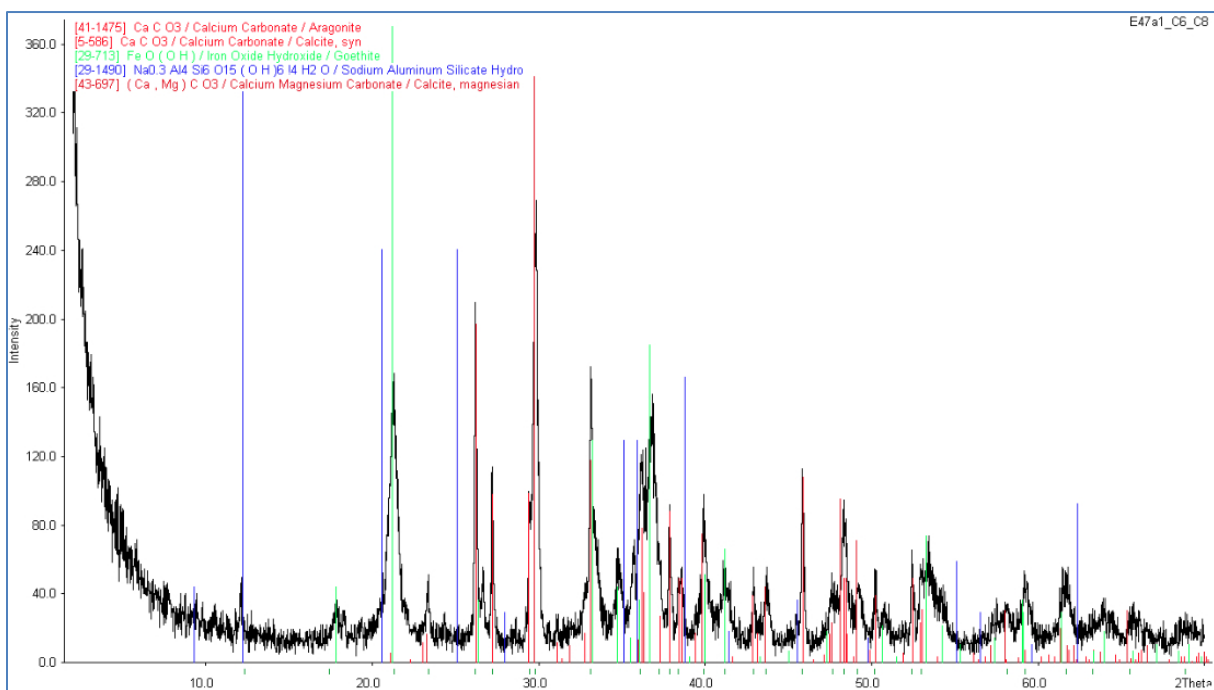
Station St06-KW1 ; godet 1+2+3+4



Station St06-KW1 ; godet 5

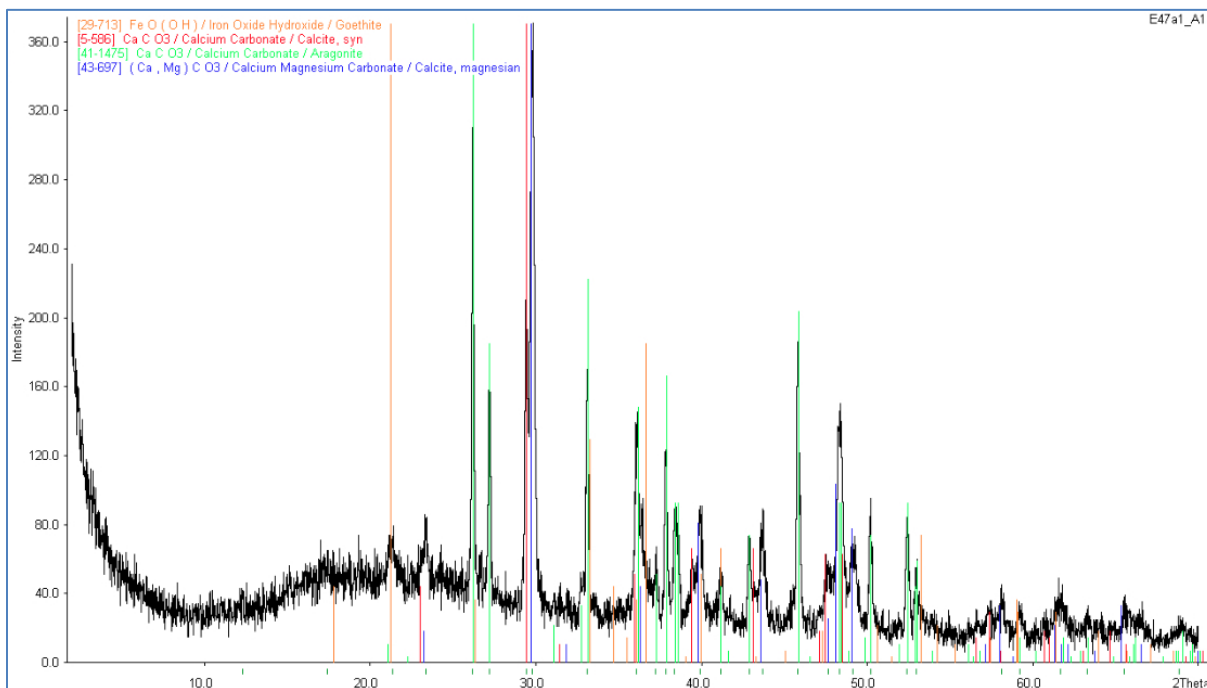


Station St06-KW1 ; godet 6+7+8

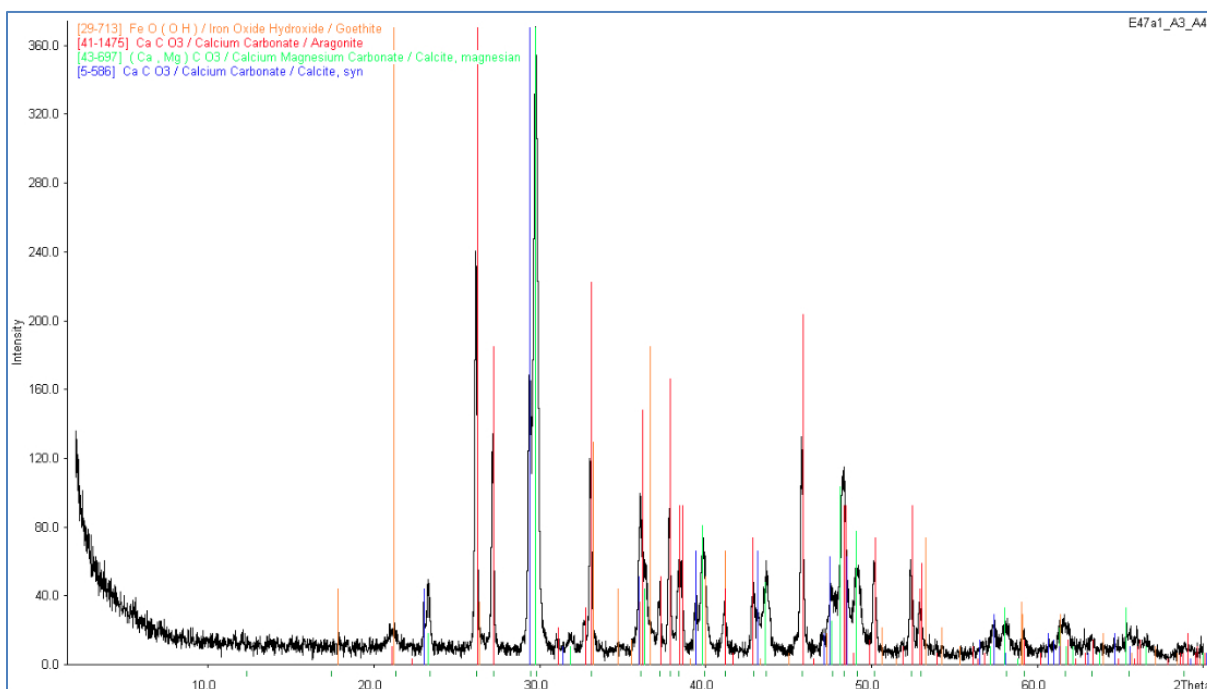


COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH

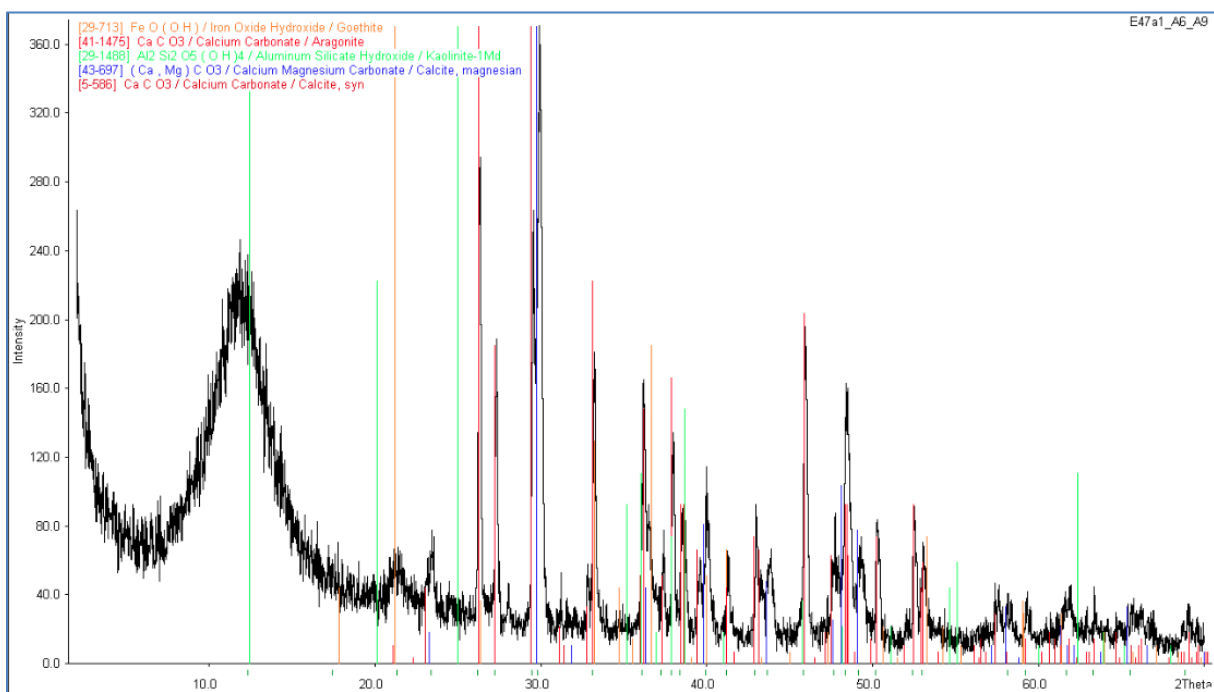
Station St60-NE ; godet 1



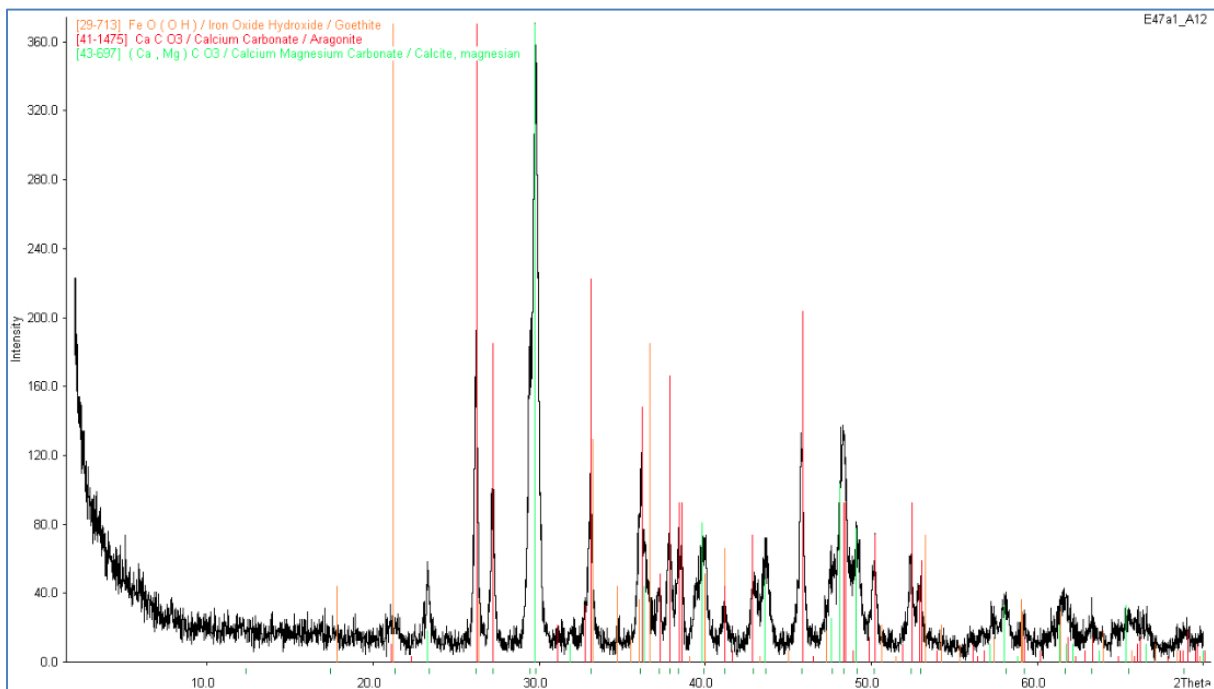
Station St60-NE ; godet 3+4



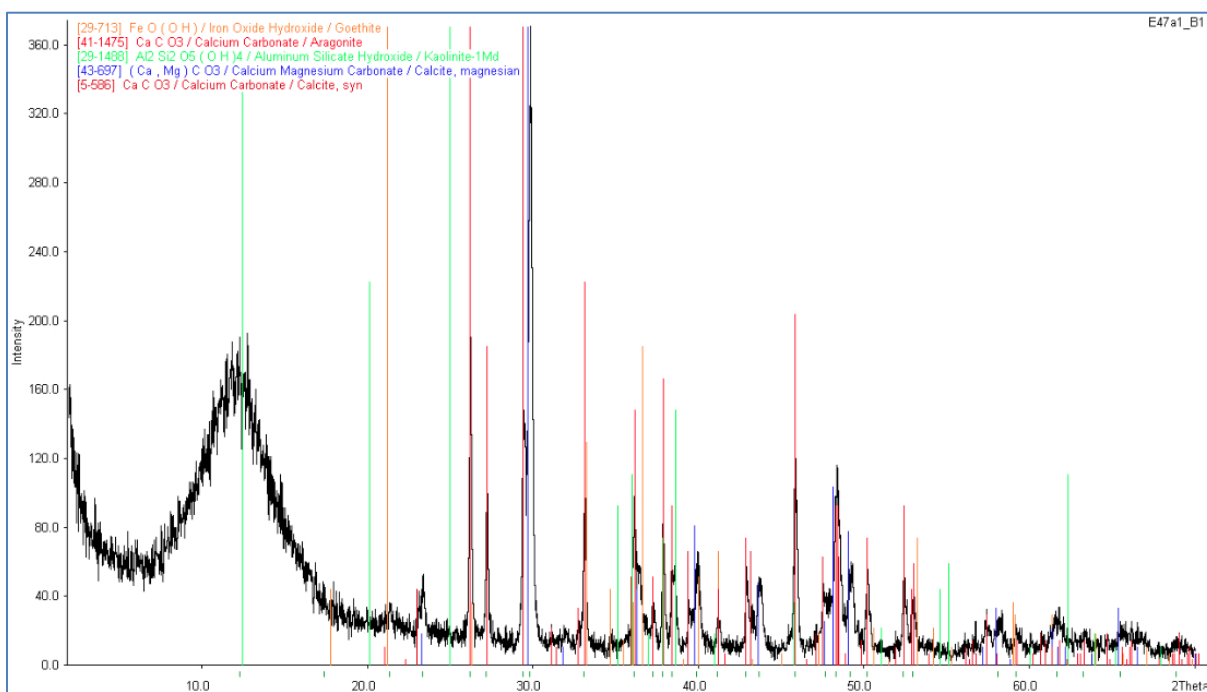
Station St60-NE ; godet 10



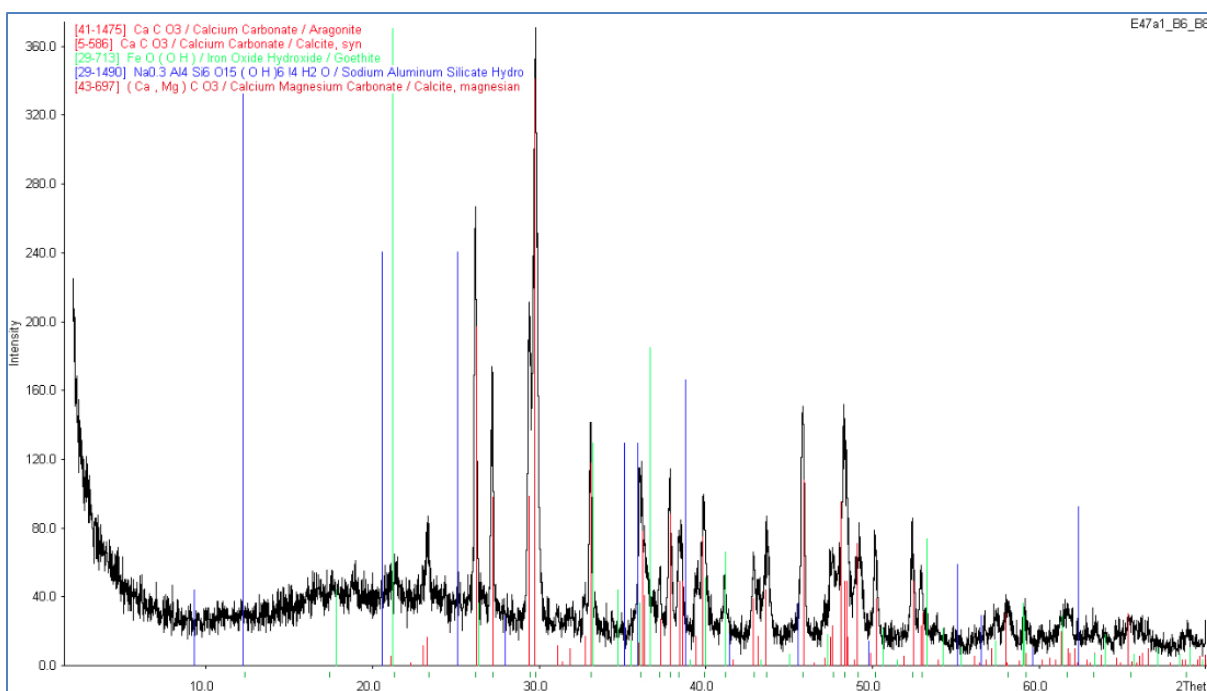
Station St60-NE ; godet 12



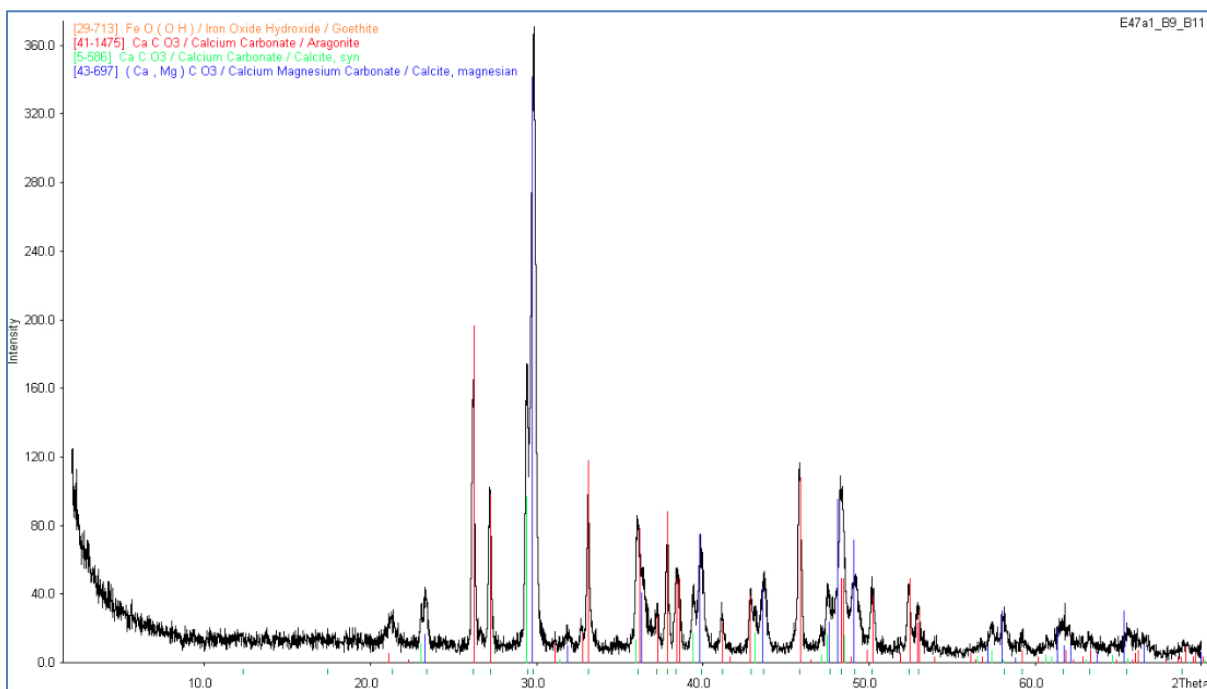
Station St60-SW ; godet 1



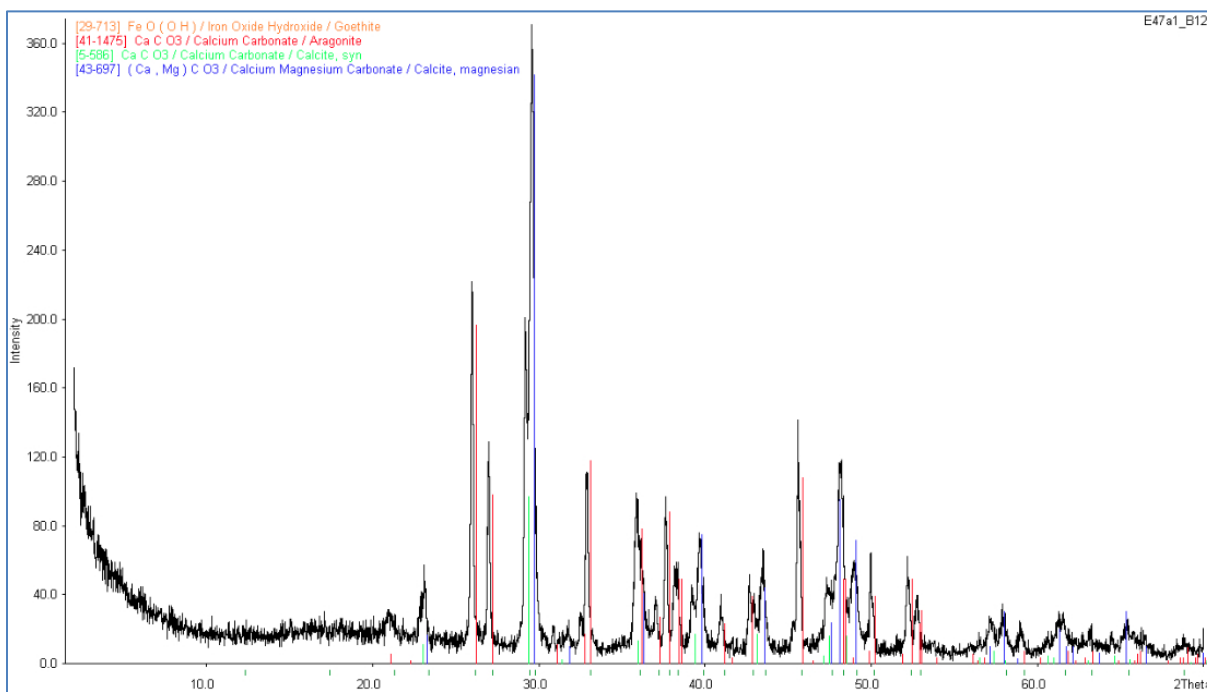
Station St60-SW ; godet 6+7+8



Station St60-SW ; godet 9+10+11



Station St60-SW ; godet 12



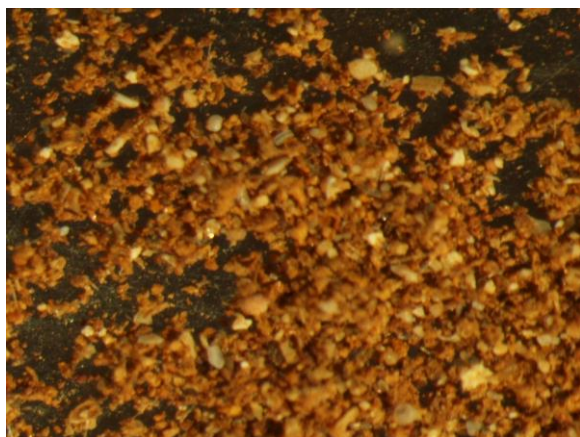
Remarque : Les trop faibles quantités de matière collectée au cours de la période d'études pour St06-Kw1 ont permis de réaliser seulement trois analyses minéralogiques.

TENEURS EN CARBONATES

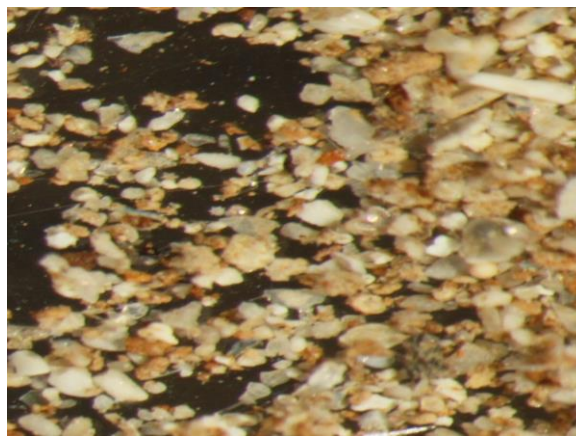
PERIODE DE COLLECTE	STATION	CaCO ₃ (%)	STATION	CaCO ₃ (%)	STATION	CaCO ₃ (%)
12-15 juillet	KW1-1	39,0	NE-1	66,7	SW-1	75,6
16-19 juillet	KW1-2	48,3	NE-2	69,6	SW-2	75,2
20-23 juillet	KW1-3	57,2	NE-3	79,8	SW-3	74,4
24-27 juillet	KW1-4	57,8	NE-4	78,9	SW-4	79,4
28-31 juillet	KW1-5	15,1	NE-5	76,2	SW-5	76,0
01-04 août	KW1-6	42,1	NE-6	71,0	SW-6	nd
05-08 août	KW1-7	32,9	NE-7	71,0	SW-7	75,3
09-12 août	KW1-8	48,6	NE-8	73,1	SW-8	73,6
13-16 août	KW1-9	50,5	NE-9	73,1	SW-9	76,1
17-20 août	KW1-10	51,3	NE-10	76,7	SW-10	76,0
21-24 août	KW1-11	56,9	NE-11	78,4	SW-11	77,0
25-28 août	KW1-12	52,3	NE-12	77,2	SW-12	77,5

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE (GROSSISSEMENT X 11,5)



KW1-5



KW1-3

Matières en suspension collectée dans les godets KW1-5 et KW3 : 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-12



SW-12

Matières en suspension collectée dans les godets NE-12 et SW-12 : 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)
12-15 juillet	KW1-1	134642	265,9	7986	217061	2097	3623
16-19 juillet	KW1-2	172414	192,0	6343	177805	1549	2597
20-23 juillet	KW1-3	208285	141,6	4560	136614	1179	2227
24-27 juillet	KW1-4	210340	138,8	4823	138043	1235	2197
28-31 juillet	KW1-5	37369	384,6	14035	326336	3395	6971
01-04 août	KW1-6	146559	260,2	8545	214838	1963	4470
05-08 août	KW1-7	110016	309,3	10232	242437	2212	5157
09-12 août	KW1-8	172785	212,7	7133	188435	1661	3452
13-16 août	KW1-9	181318	196,7	6352	179021	1342	3203
17-20 août	KW1-10	184648	182,5	5742	170133	1289	3138
21-24 août	KW1-11	206989	149,7	4852	144113	1164	2741
25-28 août	KW1-12	209651	145,5	4734	141954	1168	2699

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
12-15 juillet	NE60-1	249424	39	879	34043	357	643
16-19 juillet	NE60-2	259887	49	1131	41920	444	769
20-23 juillet	NE60-3	298322	25	770	26992	254	491
24-27 juillet	NE60-4	295879	20	682	22509	233	396
28-31 juillet	NE60-5	287016	28	851	28566	294	470
01-04 août	NE60-6	267318	54	1279	45301	545	650
05-08 août	NE60-7	267319	54	1279	45301	545	650
09-12 août	NE60-8	275069	41	1033	36308	421	561
13-16 août	NE60-9	275070	41	1033	36308	421	561
17-20 août	NE60-10	288065	35	918	32068	363	550
21-24 août	NE60-11	294056	32	859	29646	340	523
25-28 août	NE60-12	288110	31	809	29581	332	529

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
12-15 juillet	SW60-1	282230	32	829	31753	290	585
16-19 juillet	SW60-2	280656	40	1021	38253	430	741
20-23 juillet	SW60-3	277404	27	758	28043	246	505
24-27 juillet	SW60-4	297217	22	708	23894	211	426
28-31 juillet	SW60-5	285247	24	746	25550	245	409
01-04 août	SW60-6	nd	nd	nd	nd	nd	nd
05-08 août	SW60-7	281739	38	1017	36675	381	668
09-12 août	SW60-8	275901	33	858	29799	364	501
13-16 août	SW60-9	284958	34	894	31274	252	566
17-20 août	SW60-10	284891	31	864	29634	236	539
21-24 août	SW60-11	288809	27	818	27899	256	482
25-28 août	SW60-12	289810	29	782	27113	265	485

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

STATION	Soufre (mg/kg)	STATION	Soufre (mg/kg)
SW60-(3+4)	2819	NE60-(3+4)	2709
SW60-(9+10+11)	2727	NE60-(10+11)	2662
SW60-12	2811	NE60-12	2811

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)
12-15 juillet	KW1-1	80,48	NE60-1	3,25	SW60-1	3,08
16-19 juillet	KW1-2	71,54	NE60-2	1,90	SW60-2	1,74
20-23 juillet	KW1-3	57,27	NE60-3	22,91	SW60-3	20,46
24-27 juillet	KW1-4	59,80	NE60-4	13,50	SW60-4	10,39
28-31 juillet	KW1-5	323,54	NE60-5	2,46	SW60-5	3,22
01-04 août	KW1-6	21,30	NE60-6	1,26	SW60-6	0,66
05-08 août	KW1-7	19,96	NE60-7	0,82	SW60-7	2,78
09-12 août	KW1-8	31,64	NE60-8	1,25	SW60-8	1,53
13-16 août	KW1-9	5,02	NE60-9	0,95	SW60-9	5,00
17-20 août	KW1-10	4,39	NE60-10	2,95	SW60-10	3,22
21-24 août	KW1-11	10,25	NE60-11	4,82	SW60-11	3,52
25-28 août	KW1-12	11,44	NE60-12	14,18	SW60-12	24,48

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						
12-15 juillet	10835	21,4	642,7	17468	168,8	291,5
16-19 juillet	12335	13,7	453,8	12720	110,8	185,8
20-23 juillet	11928	8,1	261,2	7824	67,5	127,6
24-27 juillet	12577	8,3	288,4	8254	73,8	131,4
28-31 juillet	12090	124,4	4541,0	105584	1098,3	2255,3
01-04 août	3122	5,5	182,0	4576	41,8	95,2
05-08 août	2195	6,2	204,2	4838	44,1	102,9
09-12 août	5468	6,7	225,7	5963	52,6	109,2
13-16 août	910	1,0	31,9	899	6,7	16,1
17-20 août	810	0,8	25,2	746	5,7	13,8
21-24 août	2121	1,5	49,7	1476	11,9	28,1
25-28 août	2398	1,7	54,2	1624	13,4	30,9

PERIODE DE COLLECTE	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
St60-NE	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)
12-15 juillet	811	0,1	2,9	111	1,2	2,1
16-19 juillet	494	0,1	2,1	80	0,8	1,5
20-23 juillet	6833	0,6	17,6	618	5,8	11,3
24-27 juillet	3993	0,3	9,2	304	3,1	5,3
28-31 juillet	707	0,1	2,1	70	0,7	1,2
01-04 août	337	0,1	1,6	57	0,7	0,8
05-08 août	219	0,0	1,0	37	0,4	0,5
09-12 août	344	0,1	1,3	45	0,5	0,7
13-16 août	260	0,0	1,0	34	0,4	0,5
17-20 août	848	0,1	2,7	94	1,1	1,6
21-24 août	1416	0,2	4,1	143	1,6	2,5
25-28 août	4085	0,4	11,5	419	4,7	7,5

PERIODE DE COLLECTE	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
St60-SW	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)	(mg/m ² /j)
12-15 juillet	869	0,1	2,6	98	0,9	1,8
16-19 juillet	487	0,1	1,8	66	0,7	1,3
20-23 juillet	5676	0,6	15,5	574	5,0	10,3
24-27 juillet	3088	0,2	7,4	248	2,2	4,4
28-31 juillet	917	0,1	2,4	82	0,8	1,3
01-04 août	nd	nd	nd	nd	nd	nd
05-08 août	783	0,1	2,8	102	1,1	1,9
09-12 août	422	0,0	1,3	46	0,6	0,8
13-16 août	1425	0,2	4,5	156	1,3	2,8
17-20 août	916	0,1	2,8	95	0,8	1,7
21-24 août	1015	0,1	2,9	98	0,9	1,7
25-28 août	7093	0,7	19,1	664	6,5	11,9

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée