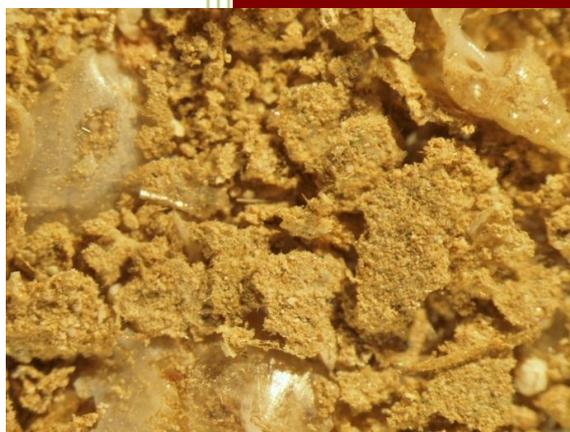




**SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX  
DE PARTICULES DANS LE CANAL DE LA  
HAVANNAH ET LA BAIE KWE : MISSION  
JANVIER-MARS 2012**



**4 janvier 2013**

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

## CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

---

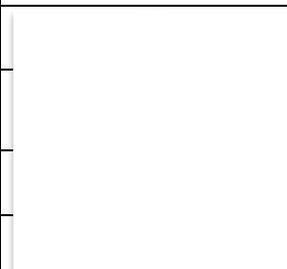
Convention n° 110308-VI-11

***Suivi des densités de flux verticaux de particules dans  
le Canal de la Havannah et la Baie Kwé : mission  
janvier-mars 2012***

**Fernandez Jean Michel**

**Moreton Benjamin**

**Le Grand Hélène**

	<b>N/Ref</b>	<b>V/Ref</b>	
<b>Identification</b>	110308-VI-11	Contrat 2684	
<b>Titre complet</b>	Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la Baie Kwé : mission janvier-mars 2012		
<b>Auteurs</b>	Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H		
<b>Résumé</b>	<p>Le programme de travail ici présenté fait suite à la définition de « l'Etat de référence » des densités de flux verticaux de particules déterminés pour le Canal de la Havannah et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230) et constitue la deuxième campagne de suivi semestriel.</p> <p>Dans le contexte de la mise en exploitation de l'usine de Vale-NC, l'étude a consisté en un suivi temporel des densités de flux verticaux afin d'estimer les apports en particules fines issues de la rivière Kwé et rejetées par le diffuseur. Il convient ensuite d'en étudier leur devenir : les mesures ont été effectuées entre le 18 janvier et le 5 mars 2012. Ces opérations ont consisté à réaliser trois mouillages de lignes équipées de pièges à sédiments séquentiels en sortie de la baie et au niveau du diffuseur.</p> <p>Pour la période étudiées (saison chaude, avec des pluies modérées), 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 su. Toutefois, en Baie Kwé les précipitation du 2 février 2012 ont généré un panache de turbidité qui a permis la collecte d'une masse importante de MES. Ces particules suivent ensuite les courants dominant, les plus lourdes sédimentant à nouveau rapidement dès que l'action du vent cesse.</p> <p>Les paramètres physico-chimiques et géochimiques analysés montrent des évolutions temporelles tant au niveau de la Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah. Les valeurs de flux de matière (MES et métaux) entrent toutes dans les gammes observées antérieurement.</p> <p>Un enrichissement en métaux par rapport aux concentrations mesurées pour la saison fraîche a été constaté pour les stations du Canal de la Havannah uniquement.</p>		
<b>APPROBATION</b>			
<b>FONCTION</b>	<b>NOMS</b>	<b>VISA</b>	<b>DATE</b>
<b>Rédacteur</b>	Fernandez JM		27/12/12
<b>Vérificateur 1</b>	Moreton B		27/12/12
<b>Vérificateur 2</b>	Kumar-Roiné S		28/12/12
<b>Approbateur(s)</b>	Fernandez JM		29/12/12
<b>EVOLUTION</b>			
<b>VERSION</b>	<b>DESCRIPTION DES MISES A JOUR</b>		<b>DATE</b>
<b>V1.0</b>	Rapport définitif		31/12/2012
<b>COPIE - DIFFUSION</b>			
<b>NOM</b>	<b>ORGANISME</b>		
Casalis C	Département environnement Vale-NC		

**Ce rapport est cité comme suit :**

Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H, 2012. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah (diffuseur) et la baie Kwé. Contrat Vale-NC/AEL n° 2684, Rapport AEL 110308-VI-11, 51p.

# 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 .....	12
4.1.2	Direction du vent.....	12
4.1.3	Vitesse du vent .....	12
4.2	CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION .....	14
4.2.1	Baie Kwé (station St06-KW1).....	14
4.2.2	Canal de la Havannah (station St60-NE).....	16
4.2.3	Canal de la Havannah (station St60-SW) .....	18
4.3	COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION .....	20
4.3.1	Baie Kwé (station St06-KW1).....	20
4.3.2	Canal de la Havannah (station St60-NE) .....	22
4.3.3	Canal de la Havannah (station St60-SW) .....	23
5	INTERPRETATION .....	26
5.1	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES.....	26
5.1.1	Baie Kwé,.....	26
5.1.2	Canal de la Havannah .....	26
5.2	CALCUL DES FLUX DE MATIERES .....	31
6	CONCLUSION.....	33
7	REFERENCES .....	34
8	LISTE DES FIGURES .....	35
9	LISTE DES TABLEAUX .....	37
10	LISTE DES ANNEXES .....	38



# 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 déterminés pour le Canal de la Havannah et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230).

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

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

Dans le contexte de la mise en exploitation de l'usine de Vale-NC, l'étude consiste en un suivi temporel des densités de flux verticaux afin d'estimer les apports en particules fines :

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

## 2 OBJECTIFS

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

- le suivi temporel des apports terrigènes générés par l'activité minière en sortie de la Baie Kwé, dans un secteur de relative profondeur ( $h > 15\text{m}$ ). En effet, il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage des grosses particules sur le fond, il n'est donc pris en compte que les fractions fines en suspension potentiellement transportables par les courants sur de longues distances, comme le suggère la modélisation (Convention IRD.Goro-Ni n° n°1124, Volet « Simulation hydrodynamique »);
- le suivi temporel des apports industriels issus du procédé chimique au voisinage immédiat du diffuseur. Ce suivi avait pour objet de répondre aux questions de la double rémanence supposée :
  - d'une part, du gypse formé après l'étape de neutralisation des solutions acides d'extraction du Ni par le calcaire ;
  - d'autre part, des précipités de  $\text{CaCO}_3$  et d'hydroxydes de Mn supposés être générés lors du contact de l'effluent avec l'eau de mer, phénomène qui pourrait entraîner une fraction non négligeable des métaux (dont Mn). Les expériences de laboratoire et la modélisation associée (Convention IRD/Goro-Ni, n° 1124 ; Volet « Réactivité chimique de l'effluent ») montrent que seule une formation négligeable de précipités de calcite se produit. 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 **deuxième campagne de mouillage semestrielle** des 4 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° 2684).

## 3 METHODOLOGIE

### 3.1 SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES

Cette deuxième campagne d'études des flux a été conduite de mi-janvier à mi-mars 2012. Les missions de mouillage et de récupération des lignes instrumentées ont été réalisées à bord de l'embarcation « Slavko ».

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

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

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

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

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

Le dispositif de collecte a été placé à 3 mètres au-dessus du fond. Cette cote est particulièrement importante à respecter pour les pièges mouillés à proximité du diffuseur pour que les orifices de collecte demeurent en contact avec l'effluent même lorsque les conditions hydrodynamiques des marées de vive-eau s'exercent. Ce prérequis est conforme aux résultats du traçage réalisé à la rhodamine-WT (Contrat AEL/Vale-NC n° 20233 ; Figure 2) ; la couche affectée par l'effluent n'étant que d'environ 5 m d'épaisseur alors qu'elle dépasse amplement les 10 m par courants faibles (marées de morte-eau).

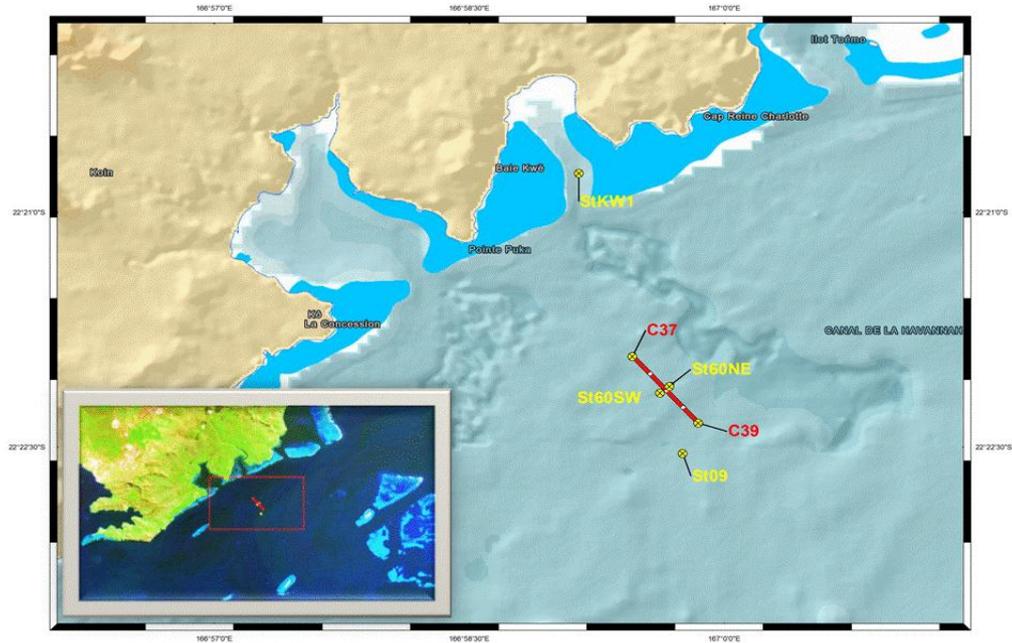


Figure 1: Aire d'étude pour le suivi des flux verticaux de particules issues du process de production de l'usine et des activités d'excavation de mine de Vale-NC. Le trait rouge représente le diffuseur, de part et d'autre figurent les deux stations St60-SW et St60-NE localisées à 60m du rejet. En baie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

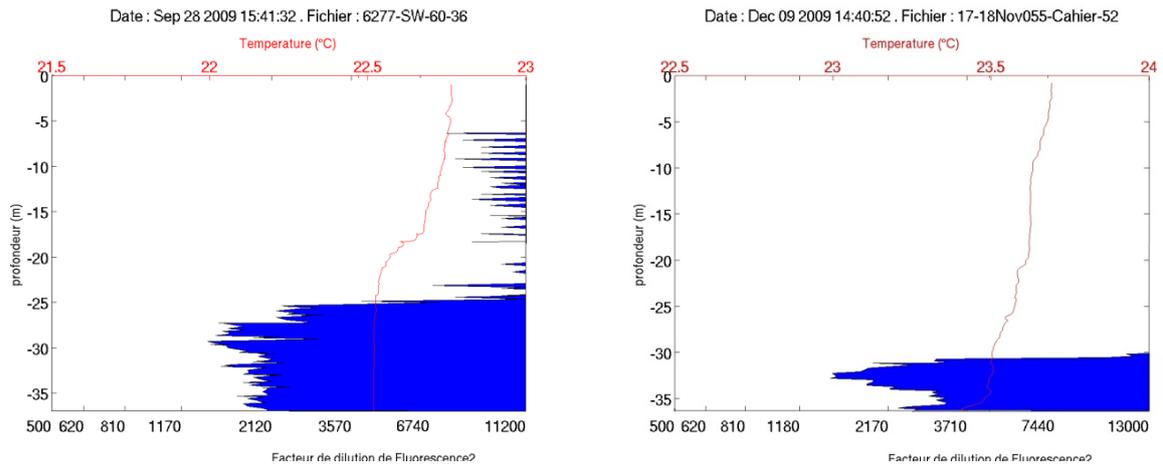


Figure 2 : Puissance type de l'épaisseur de marquage par l'effluent (rhodamine-WT) pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

### 3.2 ECHANTILLONNAGE

Les lignes de mouillage étaient dotées de pièges à sédiments de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) d'une section efficace de 0,025 m<sup>2</sup> et équipés de carrousels de 12 godets pour permettre la collecte d'une série temporelle des particules sédimentées. Les lignes ont été immergées le 17 janvier 2012, puis récupérées le 13 mars 2012.

La collecte des particules a été programmée pour débiter le 18 janvier 2012 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 05 mars 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 janvier et mars 2012.**

STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE
KW1-1	18-21 janvier	SW-1	18-21 janvier	NE-1	18-21 janvier
KW1-2	22-25 janvier	SW-2	22-25 janvier	NE-2	22-25 janvier
KW1-3	26-29 janvier	SW-3	26-29 janvier	NE-3	26-29 janvier
KW1-4	30 janvier-2 février	SW-4	30 janvier-2 février	NE-4	30 janvier-2 février
KW1-5	3-6 février	SW-5	3-6 février	NE-5	3-6 février
KW1-6	7-10 février	SW-6	7-10 février	NE-6	7-10 février
KW1-7	11-14 février	SW-7	11-14 février	NE-7	11-14 février
KW1-8	15-18 février	SW-8	15-18 février	NE-8	15-18 février
KW1-9	19-22 février	SW-9	19-22 février	NE-9	19-22 février
KW1-10	23-26 février	SW-10	23-26 février	NE-10	23-26 février
KW1-11	27 février-1 mars	SW-11	27 février-1 mars	NE-11	27 février-1 mars
KW1-12	2 mars-5 mars	SW-12	2 mars-5 mars	NE-12	2 mars-5 mars

Dès le retour des pièges à bord, les échantillons de MES (matière en suspension) ont directement été conservés dans les godets des carrousels et maintenus 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.

#### 4.1.1 Précipitations atmosphériques

La période du 18 janvier au 5 mars 2012 a été marquée par deux épisodes pluvieux réellement significatifs (>40 mm/j) qui ont été enregistrés le 21 janvier (51,5 mm) et surtout le 2 février 2012 (111,2 mm ; Figure 3).

En dehors de ces deux épisodes, le temps est resté relativement sec puisque seulement 23,5 mm sont tombés le 25 janvier 2012 et uniquement 4 journées ont dépassé les 15 mm. Pour le reste de la période, juste quelques millimètres de pluies sporadiques ont été enregistrés de manière éparse.

#### 4.1.2 Direction du vent

Durant toute la période de mouillage des pièges à sédiments, une seule rotation bien marquée des vents s'est produite suivie d'un deuxième cycle moins rapide (Figure 3). Hormis ces deux cas, les « *directions des vents maximums* » enregistrés (DXI) ont soufflé du secteur E-SE, en effet :

- le début de la période d'études (18 janvier) est caractérisé par des vents de secteur E à temporairement SE, tournant rapidement au N, le 03 février ;
- le vent se maintient au N jusqu'au 04 février puis, du fait d'une forte instabilité atmosphérique, bascule rapidement au SO le 05 février et au SE le 06 février ;
- le 10 février, le vent tourne à nouveau au secteur SO puis s'oriente lentement au secteur SE, E puis N, le 15 février ;
- de nouveau à l'E-SE, le 16 février, il se maintient jusqu'au 03 mars dans le secteur E-SE où il s'oriente brièvement au SO puis revient au SE le 04 mars.

#### 4.1.3 Vitesse du vent

Pour la campagne, la « *vitesse du vent instantané maximum* » (FXI) au niveau de la station météorologique de l'usine a été de  $12,3 \pm 2,7$  m/s (Figure 3). Cette valeur qui est normale pour une « saison chaude », est cependant comparable à celle mesurée pendant la première campagne de juillet 2011 ( $11,3 \pm 3,2$  m/s).

La force des vents maxi a cependant été quelque peu variable dans le temps, ainsi on note que :

- les vents fraîchissent progressivement entre le 18 janvier (14,2 m/s) et le 31 janvier 2012 (18,2 m/s) ;
- la vitesse maxi décroît ensuite assez rapidement pour n'atteindre plus le 05 février que les 7,2 m/s ;
- une augmentation de la force du vent maxi est à nouveau enregistrée jusqu'au 26 février (16,7 m/s) avant de faiblir en fin de période d'étude (03 mars 2012).

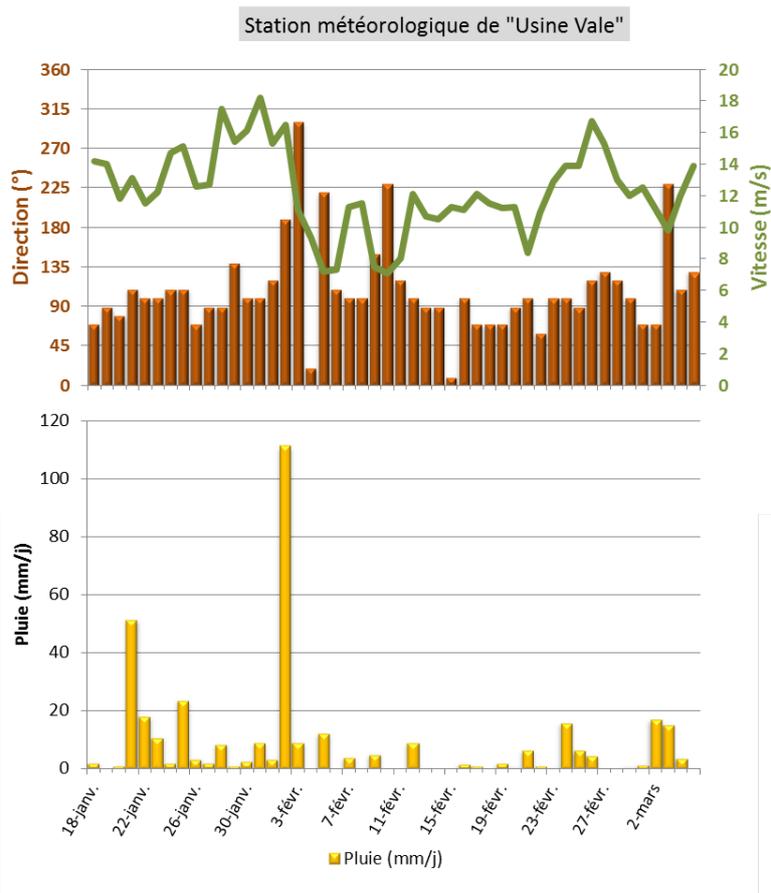


Figure 3 : Enregistrement des « taux de précipitations journaliers (RR) » en (mm/j), « direction du vent maxi instantané horaire (DXI) » en (°) et « vitesse du vent instantané maxi horaire (FXI) » en (m/s), à la station météorologique de l'« usine » de Vale-NC pour la période du 18 janvier au 05 mars 2012.

#### CE QU'IL FAUT RETENIR (Erreur ! Source du renvoi introuvable. a, b et c)

La période a été marquée par un épisode pluvieux important (111,2 mm) le 02 février coïncidant avec la rotation des vents du secteur S au secteur N faiblissant. Un épisode moindre a été enregistré le 21 janvier (51,5 mm).

En dehors de cet événement pluvieux, deux rotations des vents au secteur SO ont été accompagnées des régimes plus faibles (05 et 10 février ainsi que le 03 mars).

Le reste de la période d'études est caractérisé par des vents de dominante E-SE et l'installation d'alizés rapides temporairement.

## 4.2 CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

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

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

### 4.2.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

#### 4.2.1.1 Masses collectées

Les masses collectées montrent des valeurs très variables dans le temps (Figure 4). En effet, elles se distribuent entre 2,10 g pour les 4 premiers jours de la collecte (18-21 janvier ; godet KW1-1) et 25,61 g pour le quatrième godet (30 janvier au 02 février ; godet KW1-4). Hormis ces deux valeurs extrêmes, la moyenne se situe à  $6,70 \pm 3,70$  g, six valeurs dépassant les 5 g.

Les fractions grossières ( $\phi > 40 \mu\text{m}$ ) sont quantitativement plus importantes dans les godets KW1-4 (30 janvier-02 février) et KW1-11.

Comparativement à la campagne de juillet 2011, si les valeurs extrêmes restent du même ordre qu'en saison fraîche (1,00 g et 23,71 g), la moyenne et l'écart-type diffèrent. En effet, les masses collectées pendant la campagne de la saison chaude de 2012 (janvier-mars) sont plus élevées d'un facteur 1,5 en moyenne.

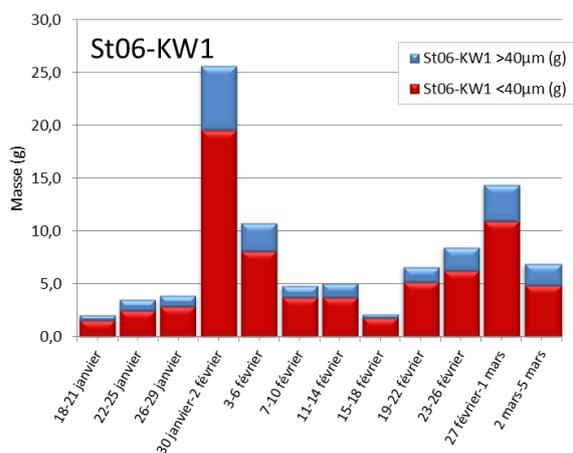


Figure 4 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 05 mars 2012 en Baie Kwé (St06-KW1). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 μm) et fractions grossières (> 40 μm).

#### 4.2.1.2 Compositions granulométriques

Les matières en suspension collectées au niveau de la Baie Kwé sont très majoritairement composées de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 μm (argiles et silts fins) puisqu'elles représentent entre 42,5 et 58,4% du volume (Figure 5). Les silts moyens (20-40 μm) composent la deuxième population granulométrique, avec des valeurs comprises entre 21,1 et 35,3%. Les autres populations (silts moyens et silts grossiers) ne représentent chacune que 10 % environ des masses collectées.

La distribution des populations granulométriques (Figure 5) permet de mettre en évidence une variation temporelle relativement importante des particules de très petites tailles comme les argiles (0,02 à 2  $\mu\text{m}$ ). Cette variation affecte, dans une moindre mesure, les particules de tailles intermédiaires comme les silts fins (2-20  $\mu\text{m}$ ), ces augmentations s'effectuant au détriment des plus grosses classes ( $\phi > 20 \mu\text{m}$ ).

Cette évolution est particulièrement visible entre les MES des godets KW1-2 (22-25 janvier) pauvre en particules fines et KW1-4 (30 janvier-02 février), au contraire riche dans cette population. Respectivement, ces distributions correspondent à une période de vents de secteurs NE à E, sans quasiment aucune pluie, et à une période coïncidant avec des vents de secteurs NW à NE assez forts accompagnés d'un épisode pluvieux intense. Un deuxième exemple, illustré par les godets KW1-8 (11-14 février) et KW1-11 (27 février-01 mars) coïncide avec un schéma météorologique identique. Ces deux cas mettent en évidence le rôle des précipitations atmosphériques dans l'apparition de couches turbides composées de matière particulaire fine à l'embouchure de la Kwé.

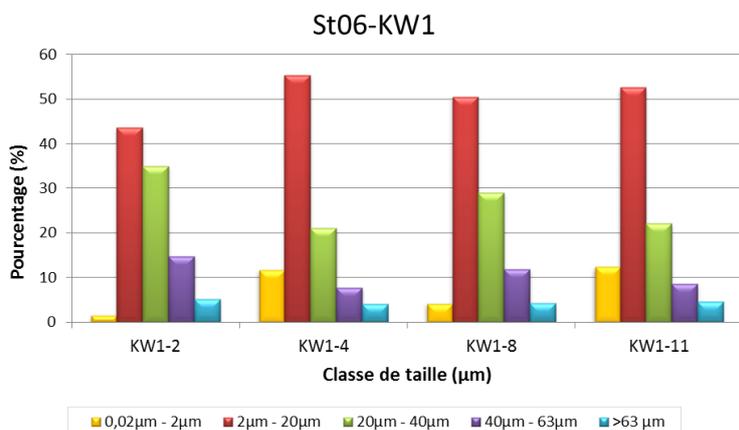


Figure 5 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés en Baie Kwe par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 05 mars 2012.

#### 4.2.1.3 Compositions minéralogiques

Les analyses réalisées par diffractométrie de rayons X (Tableau 3) montrent que les MES sont composées de minéraux comme la goéthite qui est une signature minéralogique des formations latéritiques. La calcite, la calcite magnésienne, qui est la phase majoritaire, et l'aragonite sont également présentes et mettent en évidence l'importante influence marine ; l'aragonite étant un des constituants des coquilles d'invertébrés.

La composition des particules en « saison chaude » reste identique à celle de la « saison fraîche » (juillet 2011).

Tableau 3 : Composition minéralogique des MES collectées en Baie Kwé (station St06-KW1) par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 05 mars 2012.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goéthite	Autres
KW1- 2	M	M	M	M	Hématite
KW1- 4	M	M	M	M	-
KW1- 8	M	M	M	M	-
KW1-11	M	M	M	M	-

M = composant majoritaire

#### 4.2.1.4 Teneurs en carbonates

En Baie Kwé, les MES collectées sont constituées d'une importante fraction carbonatée puisque celle-ci oscille entre 74,9 et 83,4 % (Figure 6). La composition d'un godet à l'autre est très constantes (%CO<sub>3</sub> = 79,7 ±2,6). Cette teneur moyenne est en légère hausse par rapport aux valeurs mesurées en « saison fraiche » (69,3 ±3,6 %).

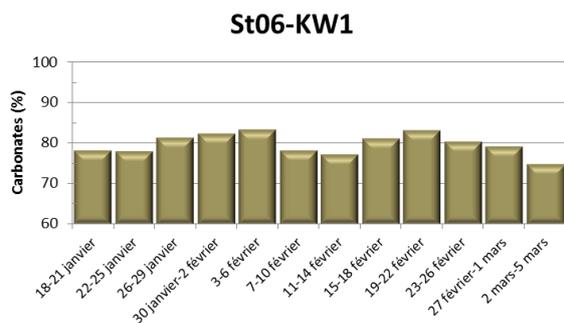


Figure 6 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 05 mars 2012 en Baie Kwé (St06-KW1).

### 4.2.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

#### 4.2.2.1 Masses collectées

Les masses de MES collectées à la station St60-NE (Canal de la Havannah ; Figure 7) sont remarquablement similaires à celles mesurées à la station St60-SW. Les valeurs minimales (0,26 g) et maximales (5,39 g) correspondent, respectivement aux godets NE60-5 (03-06 février) et NE60-8 (15-18 février).

La masse moyenne collectée, hormis les masses extrêmes, est de 1,74 ±1,47 g. Cette valeur est exactement du même ordre de grandeur qu'en St60-SW.

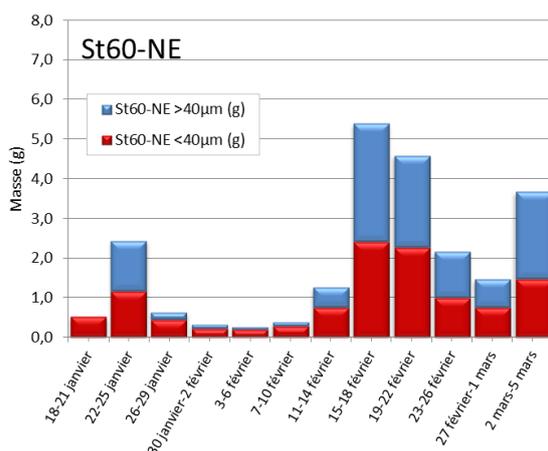


Figure 7 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 05 mars 2012 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm)

#### 4.2.2.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations granulométriques montre une variation notable qui affecte plus ou moins fortement toutes les classes de grains (Figure 8). Cette observation est particulièrement avérée pour les

populations de très petites tailles (0,02-2  $\mu\text{m}$ ) et surtout intermédiaires (2-20  $\mu\text{m}$ ), pour des conditions météorologiques particulières. En effet, si ces deux populations augmentent dans le godet NE60-8, en concordance avec des régimes de secteur E et des vents moyens, les fractions supérieures à 20  $\mu\text{m}$  diminuent.

Contrairement aux observations réalisées lors du mouillage en « saison fraîche », il n'est pas noté la présence d'importantes populations de particules d'un diamètre supérieur à 63  $\mu\text{m}$  qui étaient alors amplement prépondérantes ; les conditions de ce mouillage diffèrent par les régimes d'E à SE qui sont largement dominant contrairement aux conditions de la « saison fraîche ».

Aucune évolution particulière des populations n'a été observée en fonction de la pluie (Figure 8).

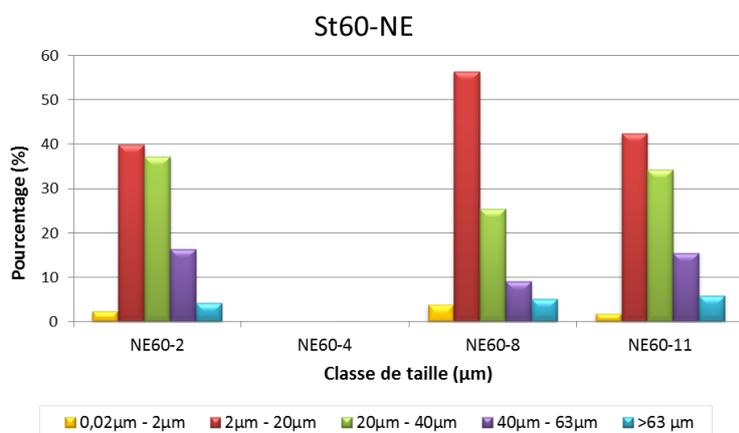


Figure 8 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel ; la quantité de matière particulière collectée dans le godet NE-4 étant trop faible (0,32 g), l'étude granulométrique n'a pu être conduite.

#### 4.2.2.3 Compositions minéralogiques

Comme pour la station St60-SW, les analyses réalisées (Tableau 4) montrent que les MES sont composés de minéraux comme la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite. Ici, aussi, ces minéraux mettent en évidence la dominance quasi-totale de l'influence marine, l'aragonite en particulier, étant un des constituants des coquilles des invertébrés. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques est présente notablement dans les deux godets NE-4 et NE-11 correspondant aux événements pluvieux. Ce minéral est également présent dans les godets NE-2 et NE-8, mais en plus petite quantité.

Tableau 4 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-NE) par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 05 mars 2012.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
NE60-2	M	M	M	m	-
NE60-4	M	M	M	M	-
NE60-8	M	M	M	m	-
NE60-11	M	M	M	M	-

**M** = composant majoritaire ; **m** = composant minoritaire

#### 4.2.2.4 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans les MES du Canal de la Havannah (Figure 9) sont relativement élevées. La valeur

moyenne est de 84,3 ±4,9 %. Toutefois, cette teneur moyenne est de l'ordre de grandeur de celles déjà observées pour cette zone qui est de 91,0 % en « saison fraîche », mais pour la station St60-SW (juillet 2011) ; la teneur minimale étant observée pour le godet NE-4 (30 janvier-02 février).

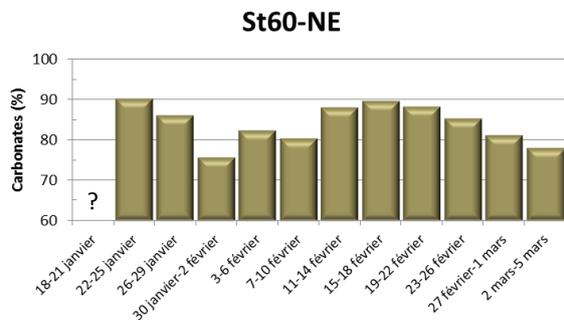


Figure 9 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 05 mars 2012 dans le Canal de la Havannah (St60-NE). La quantité de matière particulaire collectée dans le godet NE-1 étant trop faible (0,51 g), l'étude de la teneur en carbonates n'a pu être conduite.

#### 4.2.3 Canal de la Havannah (station St60-SW)

##### 4.2.3.1 Masses collectées

Comme à la station St60-NE, les masses de MES collectées en St60-SW (Canal de la Havannah ; Figure 10) sont, pour la même période, en moyenne 3 fois plus faibles qu'en Baie Kwé. Par ailleurs, la distribution d'un godet à l'autre est très inégale puisque la masse moyenne collectée montre un grand écart-type ( $1,84 \pm 1,56$  g) : 0,17 g pour le godet SW60-4 (30 janvier-02 février) à 6,67 g pour le godet SW60-9 (19-22 février).

Comparativement à la campagne de juillet 2011, les valeurs extrêmes (0,03 g et 2,29 g) ainsi que la moyenne (0,70 ±0,63 g) montrent une différence avec la « saison fraîche », respectivement plus faibles d'un facteur 6 pour la valeur minimale et 2 à 3 pour la maximale et la moyenne.

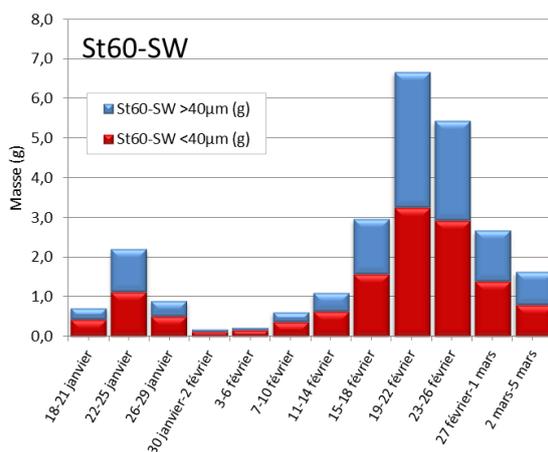


Figure 10 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 05 mars 2012 dans le Canal de la Havannah, au sud-ouest du diffuseur (St60-SW). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

##### 4.2.3.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations de grains est quasiment identique à celle observée à la station St60-NE (Figure 8 et Figure 11). Les fluctuations sont totalement similaires et les seuls changements entre les deux stations jumelles

montrent d'infimes différences dans les pourcentages massiques des fractions granulométriques.

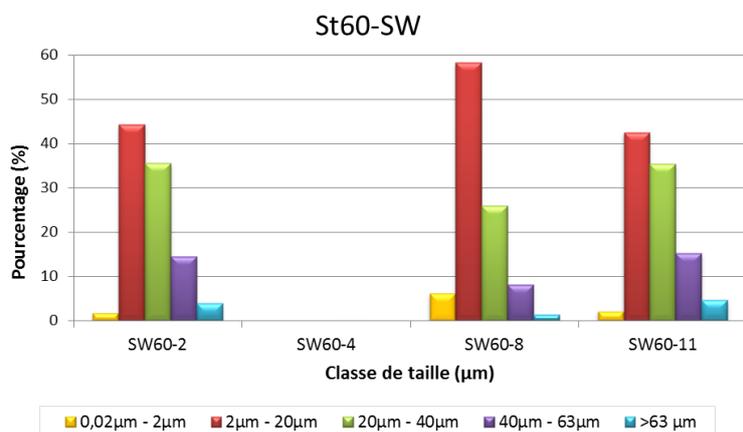


Figure 11 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel du 18 janvier au 05 mars 2012 ; la quantité de matière particulaire collectée dans le godet SW-4 étant trop faible (0,17 g), l'étude granulométrique n'a pu être conduite.

#### 4.2.3.3 Compositions minéralogiques

Les analyses réalisées (Tableau 5) montrent que les MES sont composés de minéraux comme la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite. Ces minéraux mettent en évidence la dominance quasi-totale de l'influence marine, l'aragonite en particulier, étant un des constituants des coquilles des invertébrés. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques est présente notablement dans les deux godets SW-2 et SW-4, puis diminue et n'est plus décelable qu'état de traces, respectivement dans les godets SW-8 et SW11.

On notera que les minéraux terrigènes, comme la goethite, sont en plus grande quantité dans les particules collectées en « saison chaude » qu'en « saison fraîche » (juillet 2011). Les minéraux terrigènes, comme la goethite, sont en quantité équivalentes au niveau des deux stations de Canal.

Tableau 5 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-SW) par le piège à sédiments séquentiel, du 18 janvier au 05 mars 2012.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
SW60-29	M	M	M	M	-
SW60-4	M	M	M	M	-
SW60-8	M	M	M	m	-
SW60-11	M	M	M	t	-

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

#### 4.2.3.4 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans les MES du Canal de la Havannah (Figure 12) sont très élevées. La valeur moyenne est de  $89,7 \pm 7,5$  % ; cette teneur moyenne est plus élevée qu'à la station St60-NE mais similaire à celle déjà observée pour cette zone (91,0 % en « saison fraîche » ; juillet 2011). Cette valeur est également proche de celle observée en 2007 qui était de 93,5 % (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230).

La teneur dépasse 90%, exceptions faites des godets SW-4 (30 janvier-02 février) et SW-5 (03-06 février) où l'influence terrigène semble plus importante. Comparativement à la station jumelle St60-NE, la valeur en carbonates est légèrement plus élevée.

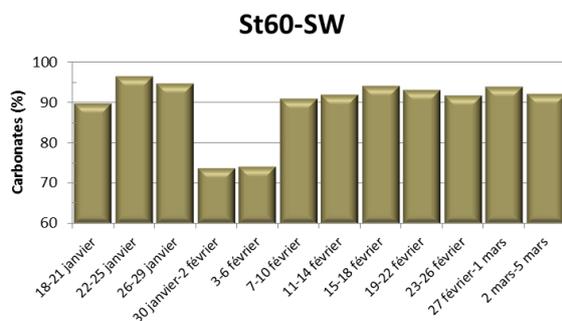


Figure 12 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 18 janvier au 05 mars 2012 dans le Canal de la Havannah (St60-SW).

#### CE QU'IL FAUT RETENIR (Erreur ! Source du renvoi introuvable. a, b et c)

Les fortes précipitations atmosphériques du 02 février (111,2 mm) semblent être le facteur prépondérant de l'augmentation des MES mesurée dans les eaux de la Baie Kwé. Cependant, les régimes de vents de secteur S dont la vitesse est supérieure à 10 m/s sont aussi, à eux seuls, capables de générer des structures néphéloïdes dans la baie.

Dans le Canal, la formation de couches néphéloïdes semble plutôt être favorisée par les régimes météorologiques du secteur E-SE.

D'une manière générale, les MES collectées dans la Baie Kwé ont une granulométrie plus fine que dans le Canal ; 20% des particules mesurent plus de 40  $\mu\text{m}$ , contre 50 %, respectivement. Cette différence est particulièrement sensible pour les particules des classes argiles (0,02-2  $\mu\text{m}$ ) et silts fins (2-20  $\mu\text{m}$ ).

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

### 4.3 COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

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

#### 4.3.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

Les éléments analysés dans les MES de la Baie Kwé ont permis de mettre évidence l'interaction des apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) ainsi que marins (Ca). Les concentrations obtenues ne montrent pas de grandes variations (Tableau 6) d'un godet à l'autre mais suivent, toutefois, une évolution temporelle.

Bien que comprises dans le même ordre de grandeur, les concentrations mesurées sont toutes en légèrement augmentation par rapport aux résultats de 2007 (Contrat CEIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012) et de 2011 (Contrat Vale-NC/AEL, n°2684, rapport).

Tableau 6 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 (Station St06-KW1 ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	232 112	87	2 889	90 815	683	1 635
MAX	248 665	119	3 846	113 569	929	2 119
MOYENNE	239 104	101	3 414	103 323	822	1 885
ECART-TYPE	5 873	10	302	6 769	77	144
% RSD	2	10	9	7	9	8

La matrice de corrélation met en évidence une similarité (seuil de 0,95) des évolutions des concentrations massiques en Co, Cr, Fe, Mn et Ni (Tableau 7). Cette similarité souligne que ces éléments métalliques sont tous des composés appartenant à la même formation latéritique.

Les concentrations en calcium sont remarquablement constantes et montrent une anti-corrélation avec les métaux d'origine terrigène dont la linéarité n'est cependant pas très clairement définie (Tableau 7), comme le montre les coefficients de corrélations plus faibles en raison des fluctuations des apports terrigènes.

Tableau 7 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 18 janvier et le 05 mars 2012.

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,567	1				
Cr	-0,460	<b>0,970</b>	1			
Fe	-0,471	<b>0,985</b>	<b>0,974</b>	1		
Mn	-0,376	0,911	<b>0,966</b>	0,923	1	
Ni	-0,495	<b>0,987</b>	<b>0,964</b>	<b>0,996</b>	0,902	1

En effet, la normalisation des concentrations du calcium par le fer (Ca/Fe) souligne de manière notable les évolutions relatives distinctes des deux éléments (Figure 13). Ainsi, dans les godets KW-4 (30 janvier-02 février), KW-5 (03-06 février) et KW-11 (27 février-01 mars), KW-12 (02-05 mars) le ratio est proche de 2, les particules collectées durant ces 4 périodes correspondant à des conditions météorologiques pluvieuses (02/02/2012) et/ou de vents de S à SW d'environ 10 à 12 m/s. Dans les 8 autres godets, la valeur du rapport Ca/Fe est de l'ordre de 2,5 et les régimes sont du secteur E à NE ne générant pas une remise en suspension des sédiments latéritiques dans la baie, malgré des vitesses fortes de 12 à 18 m/s.

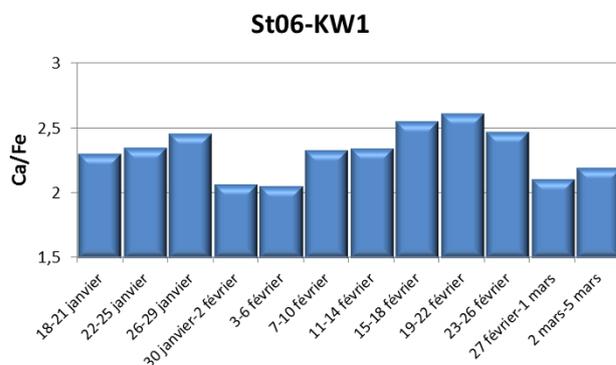


Figure 13 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé (St06-KW1) entre le 18 janvier et le 05 mars 2012.

### 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 principalement l'influence marine (Ca). Toutefois, les apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) sont décelables, bien que beaucoup moins marqués que dans la Baie Kwé. Par ailleurs, exception faite de Mn (RSD=48%), les concentrations obtenues en mer montrent des variations moins importantes (Tableau 6 et Tableau 8) d'un godet à l'autre que pour la station St06-KW1 sous l'influence directe du creek : 2 à 26 % dans le Canal contre 6 à 48 % en Baie Kwé. Toutefois, pour les deux milieux et chacun des éléments analysés, les concentrations suivent une évolution dans le temps.

Du même ordre de grandeur que les résultats de 2007 (Contrat CÉIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012), les valeurs de concentrations en métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) obtenues en « saison chaude » (janvier-mars 2012) sont cependant jusqu'à 2 fois plus élevées que pour la « saison fraîche » (juillet-aout 2011), les niveaux de calcium demeurant, quant à eux, identiques.

Tableau 8 : 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 18 janvier et le 05 mars 2012 (Station St60-NE ; n=12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
<b>MIN</b>	253 561	20	548	16 492	123	340
<b>MAX</b>	326 912	44	839	27 402	618	601
<b>MOYENNE</b>	293 760	25	661	20 959	254	423
<b>ECART-TYPE</b>	16 723	7	72	2 895	123	77
<b>% RSD</b>	6	26	11	14	48	18

La matrice de corrélation ne met en évidence qu'une seule similarité de comportement et correspond avec le couple Cr et Fe (seuil de 0,95 ; Tableau 9). Toutefois, tous les autres éléments, à l'exception du calcium (Ca) montrent des inter-corrélations qui peuvent être considérées comme des tendances significatives. Ces tendances montrent que la proximité des sources terrigènes influe encore puisque la signature de ces particules latéritiques est bien décelable dans le Canal.

Tableau 9 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 (Station St60-NE; n= 11 : masse du godet 4 trop faible).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	<b>1</b>					
Co	0,066	<b>1</b>				
Cr	0,043	0,874	<b>1</b>			
Fe	-0,101	0,832	<b>0,972</b>	<b>1</b>		
Mn	-0,032	0,949	0,861	0,831	<b>1</b>	
Ni	0,037	0,919	0,875	0,855	0,831	<b>1</b>

La normalisation des concentrations du calcium par le fer montre que ces éléments ont des origines différentes (Figure 14). En effet, si la composition de l'eau de mer océanique peut être considérée comme invariante, tant pour le calcium que pour le fer, l'évolution du ratio Ca/Fe, prouve que ce métal (tous comme les autres métaux analysés) provient d'une source terrigène ; le ratio double, variant de 11 à près de 20.

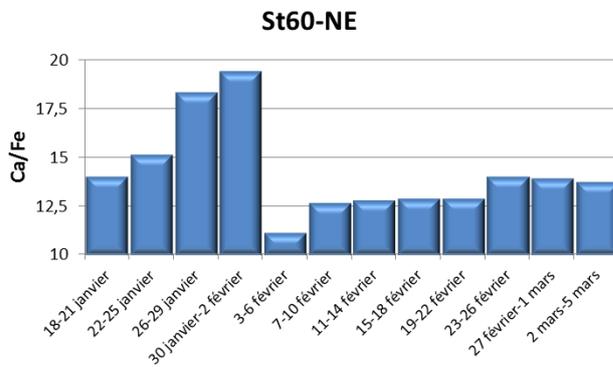


Figure 14 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal de la Havannah (St60-NE) entre le 18 janvier et le 05 mars 2012.

#### 4.3.2.2 Teneurs en soufre

La concentration moyenne en soufre est de  $2888 \pm 150$  mg/kg. Cette valeur montre que l'élément ne varie pas en fonction des conditions hydro-climatiques régnantes dans le Canal de la Havannah (Figure 15).

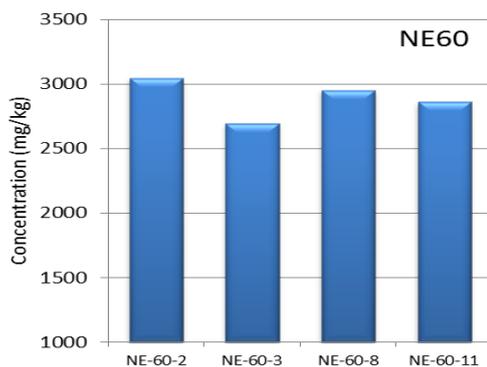


Figure 15 : Concentration du soufre dans les 4 godets correspondant aux événements météorologiques marquants enregistrés entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

### 4.3.3 Canal de la Havannah (station St60-SW)

#### 4.3.3.1 Concentration en métaux et calcium

Les éléments analysés dans les MES collectées à l'ouest du diffuseur (St60-SW) ont logiquement permis de mettre évidence principalement l'influence marine (Ca).

Les apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) sont encore décelables bien que beaucoup moins clairement que, logiquement, dans la Baie Kwé et exception faite de Mn (RSD=26%), les concentrations obtenues montrent des variations moins importantes d'un godet à l'autre (Tableau 8 et Tableau 10): 2 à 26 % dans le Canal contre 6 à 48 % sous l'influence du creek en Baie Kwé. Toutefois, pour les deux milieux et pour chacun des éléments, les concentrations suivent une évolution temporelle.

Bien qu'incomplète, la série de résultats de la station St60-SW est comparable à celle de sa station jumelle St60-NE.

Par ailleurs, les concentrations mesurées se situent dans l'ordre de grandeur des résultats de 2007 (Contrat CEIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012). Toutefois, les valeurs obtenues, pour cette même station en « saison chaude » (janvier-mars 2012) sont jusqu'à 2 fois plus élevées qu'en « saison fraîche ».

**Tableau 10 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 (Station St60-SW ; n=12).**

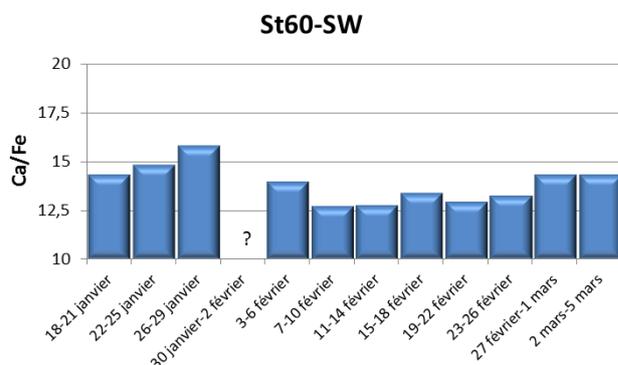
	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
<b>MIN</b>	281629	21	596	18781	176	337
<b>MAX</b>	303034	29	702	22522	396	477
<b>MOYENNE</b>	291124	27	645	21019	244	399
<b>ECART-TYPE</b>	5906	3	35	1205	64	38
<b>% RSD</b>	2	9	5	6	26	10

Si les teneurs sont comparables à celles de la station jumelle St60-NE, en revanche, la matrice de corrélation ne met en évidence aucune similarité de comportement (seuil de 0,95 ; Tableau 11). Seuls, le cobalt, le manganèse et le nickel montrent une faible tendance commune (Tableau 11).

**Tableau 11 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 (Station St60-SW).**

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	<b>1</b>					
Co	-0,119	<b>1</b>				
Cr	0,275	0,149	<b>1</b>			
Fe	-0,366	0,605	0,619	<b>1</b>		
Mn	0,485	0,523	0,384	0,299	<b>1</b>	
Ni	0,297	0,714	0,458	0,467	0,706	<b>1</b>

La normalisation des concentrations du calcium par le fer souligne les évolutions relatives distinctes pour ces deux éléments (Figure 16), mais cette divergence tendrait à s'estomper par rapport à la station St60-NE, cette dernière étant plus proche des apports terrigènes sortant de la Baie Kwé.



**Figure 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 ; la quantité de matière particulaire collectée dans le godet SW-4 étant trop faible (0,17 g), l'étude des carbonates n'a pu être conduite.**

### 4.3.3.2 Teneurs en soufre

La concentration moyenne en soufre est de  $3039 \pm 194$  mg/kg. Cette valeur montre que l'élément ne varie pas en fonction des conditions hydro-climatiques régnautes dans le Canal de la Havannah (Figure 17).

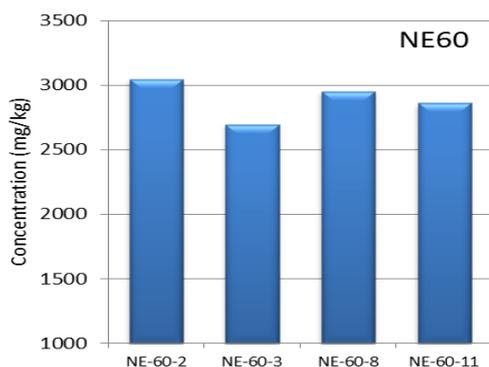


Figure 17 : Concentration du soufre dans les 4 godets correspondant aux événements météorologiques marquants enregistrés entre le 18 janvier et le 05 mars 2012 dans le Canal de la Havannah (St60-SW).

#### CE QU'IL FAUT RETENIR (Figures 19a, b et c)

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 : ces variations, qui sont d'ordre qualitatif et quantitatif, sont à mettre en parallèle avec les conditions météorologiques observées et leurs influences respectives sur l'un ou l'autre des deux domaines, Baie Kwé ou Canal de la Havannah.

La composition carbonatée ne semble pas être notablement influencées par la charge particulaire terrigène issue de la Kwé. En effet, les teneurs sont, respectivement d'environ 85 à 90 % près du diffuseur en milieu ouvert (Canal de la Havannah) et 80 % en milieu fermé (Baie Kwé).

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

Dans tous les cas de figures, à l'exception du calcium (Ca) dont les concentrations demeurent constantes d'une saison à l'autre (campagnes de juillet-août 2011 et de janvier-mars 2012), celles des métaux analysés montrent des augmentations notables pouvant atteindre 14 à 26 % pour les MES de la Baie Kwé, 40 à 55 % pour celles du Canal de la Havannah.

## 5 INTERPRETATION

### 5.1 INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

#### 5.1.1 Baie Kwé,

En « saison fraîche » (juillet-septembre 2011), le mouillage des pièges à sédiments avait conduit à établir un parallèle entre la quantité collectée, la distribution des populations granulométrique et l'action mécanique induite par certaines directions de vents, en l'absence quasi-totale de précipitations (4 mm). Des conditions météorologiques semblables ont été observées durant cette deuxième campagne donnant lieu à une quantité importante de MES collectée (période du 27 février-01 mars). Toutefois, la masse de particules la plus importante collectée en « saison chaude » a été obtenue quelques jours plus tôt (période du 30 janvier-02 février) à la faveur d'un épisode pluvieux important.

Il apparaît donc que durant cette « saison chaude », la formation de couches turbides est clairement imputable aussi à l'action des précipitations atmosphériques sur les bassins versants de la Kwé. Dans les deux cas de figures, les concentrations en carbonates diminuent alors que celles des métaux terrigènes augmentent sensiblement (Figures 19a,b et c). Cette augmentation est, soit la conséquence des mécanismes de lixiviations des sols latéritiques, soit le résultat des phénomènes de remise en suspension des particules terrigènes qui sédimentent dans la baie.

**Rappel :** La masse collectée par piège provient donc d'un mécanisme tiers qui ne peut être autre que de la remise en suspension des particules déposées dans la baie, le moteur étant alors l'action du vent. En effet, les régimes à dominantes E, N et W n'ont pas pour conséquence la formation de clapot suffisant pour engendrer des remises en suspension des particules, 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) font entrer dans la baie une houle capable de brasser les fonds et générer des remaniements des vases latéritiques sédimentées et mettre aussi en suspension des débris carbonatés issus du récif frangeant.

**Remarque :** L'augmentation du rapport Ca/Fe (Figure 13) est en parfait accord avec les hypothèses émises puisque la prépondérance des fractions carbonatées (d'origine biogène) correspond à une période particulièrement longue de vents de secteurs S à SO (26-29 janvier) et N à E (19-22 février)

#### 5.1.2 Canal de la Havannah

A l'inverse de la « saison fraîche », au niveau du diffuseur, les précipitations atmosphériques semblent avoir un léger impact. En effet, si les quantités collectées restent dans la moyenne des valeurs habituelles, les compositions en métaux montrent une faible augmentation après la période du 30 janvier au 02 février. En revanche, l'enrichissement en métaux est observé dans les jours qui ont suivi cet épisode pluvieux (03-06 février) alors que le

flux de particules avait diminué notablement ; un temps de latence imputable aux phénomènes de transport de la matière peut fournir une part d'explication à ce décalage. Malheureusement, cette hypothèse n'a pu être confirmée au niveau de St60-SW pour des raisons de masse de MES collectée insuffisante.

Par ailleurs, là encore à l'instar de la « saison fraîche » (juillet-août 2011), le vent semble aussi être à l'origine de certaines modulations observées. Ainsi, au niveau des deux stations du Canal, les masses de MES collectées ont été maximales ( $m > 5$  g) en coïncidence avec des vents de secteur SE alors que les plus basses (0,2-0,3 g) ont été observées par des régimes de secteurs N à W faibles.

Par ailleurs, les concentrations en calcium qui reflètent les teneurs en carbonates coïncident avec des vents de secteur SW et SE, et plus généralement provenant du large, favorisant le déplacement des masses d'eau enrichies en débris carbonatés (tests de micro-organismes marins). Parallèlement, la distribution temporelle des métaux latéritiques, dont Mn, par exemple, se traduit par un appauvrissement (Figure 18) ; les valeurs maximales rencontrées en Mn correspondent aux régimes de secteurs N et E-accompagnés ou non de pluies.

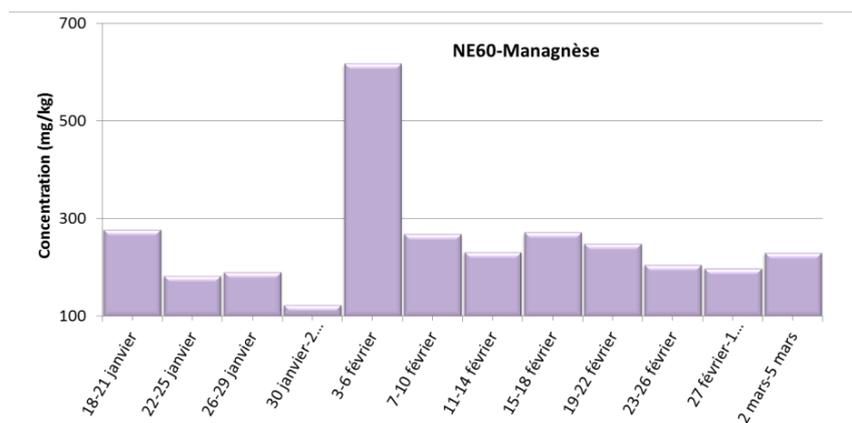


Figure 18 : Distribution des concentrations en Mn dans MES collectées du Canal de la Havannah entre le 18 janvier et le 05 mars 2012.

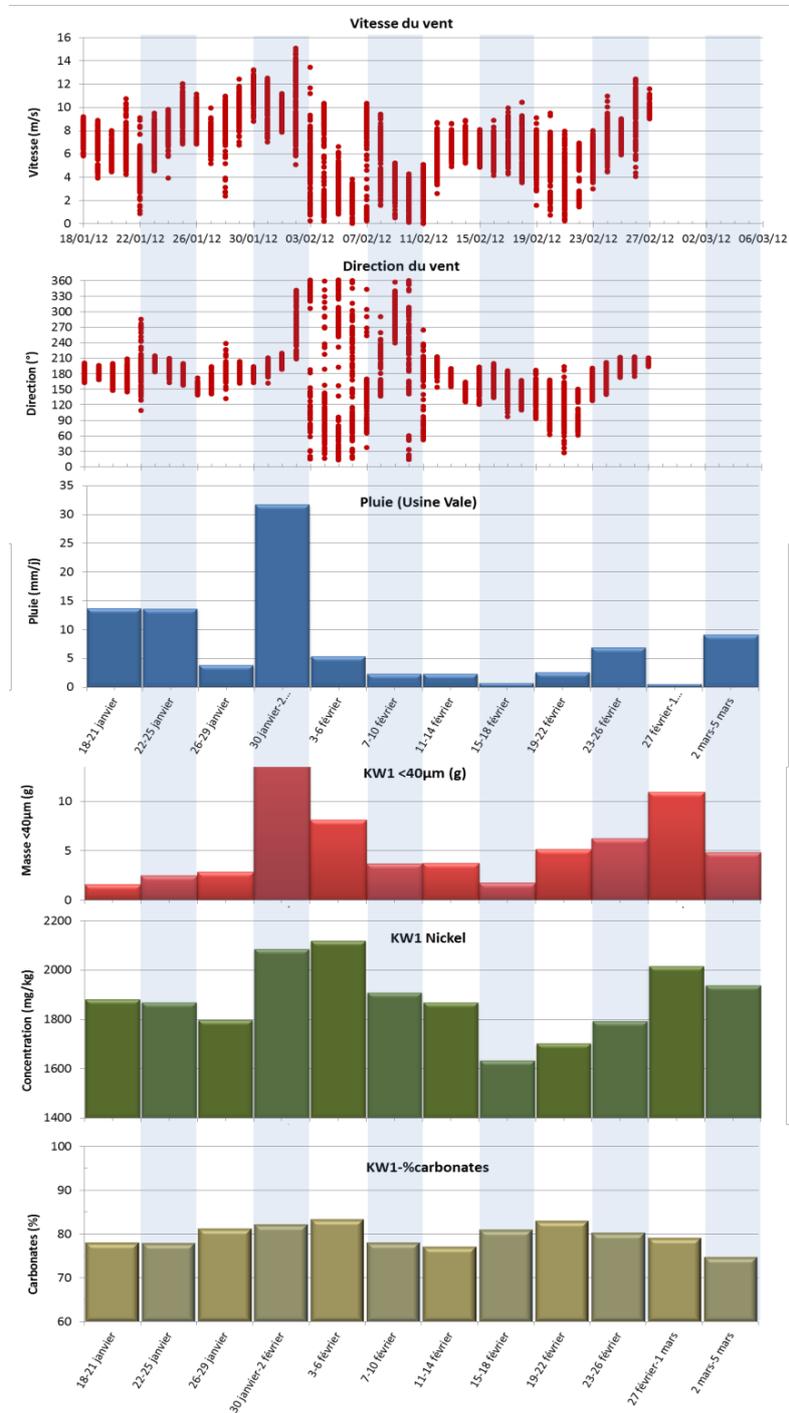


Figure 19a : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fraction inférieure à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et pourcentage en carbonates à la station St06-KW1 pour la période du 18 janvier au 05 mars 2012.

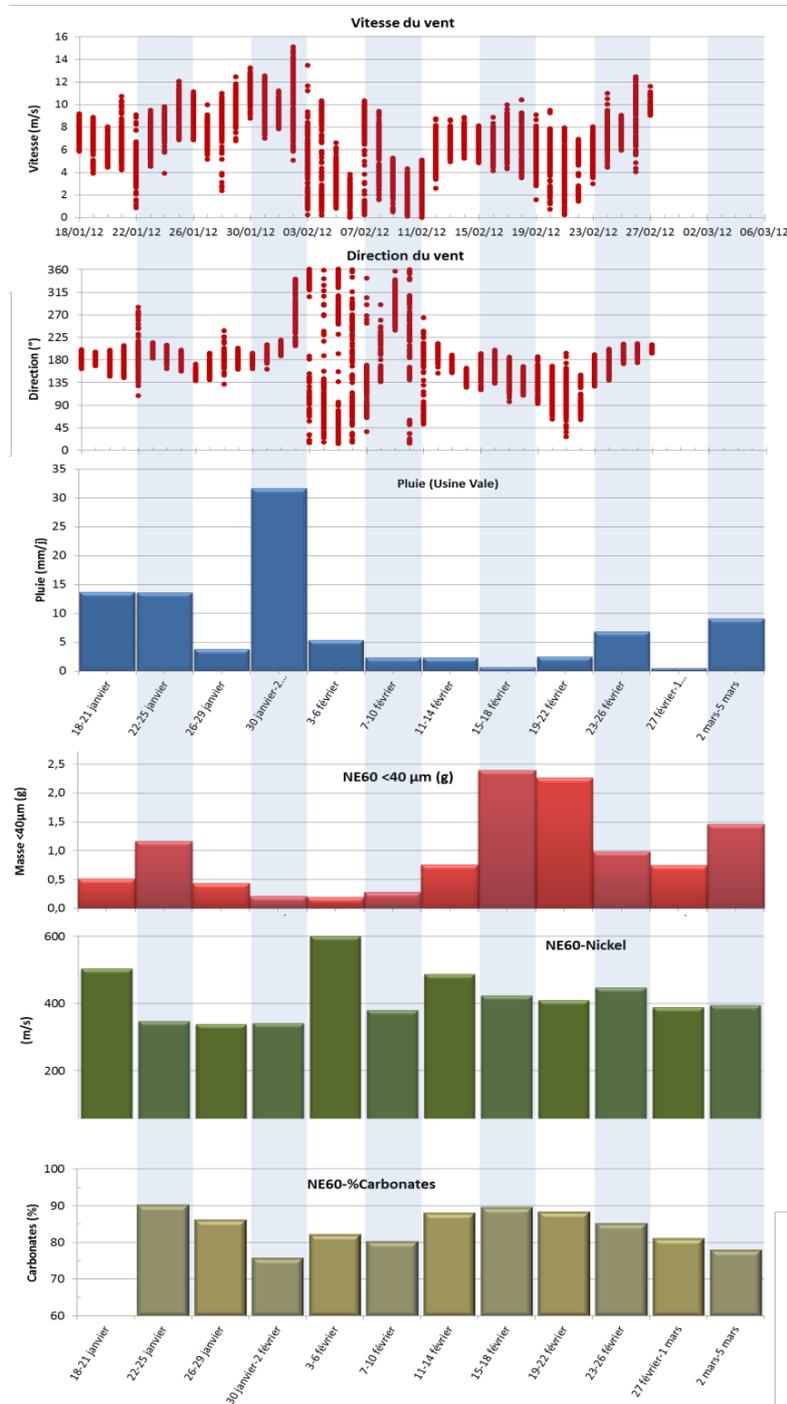


Figure 19b : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fraction inférieure à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et pourcentage en carbonates à la station St60-NE pour la période du 18 janvier au 05 mars 2012.

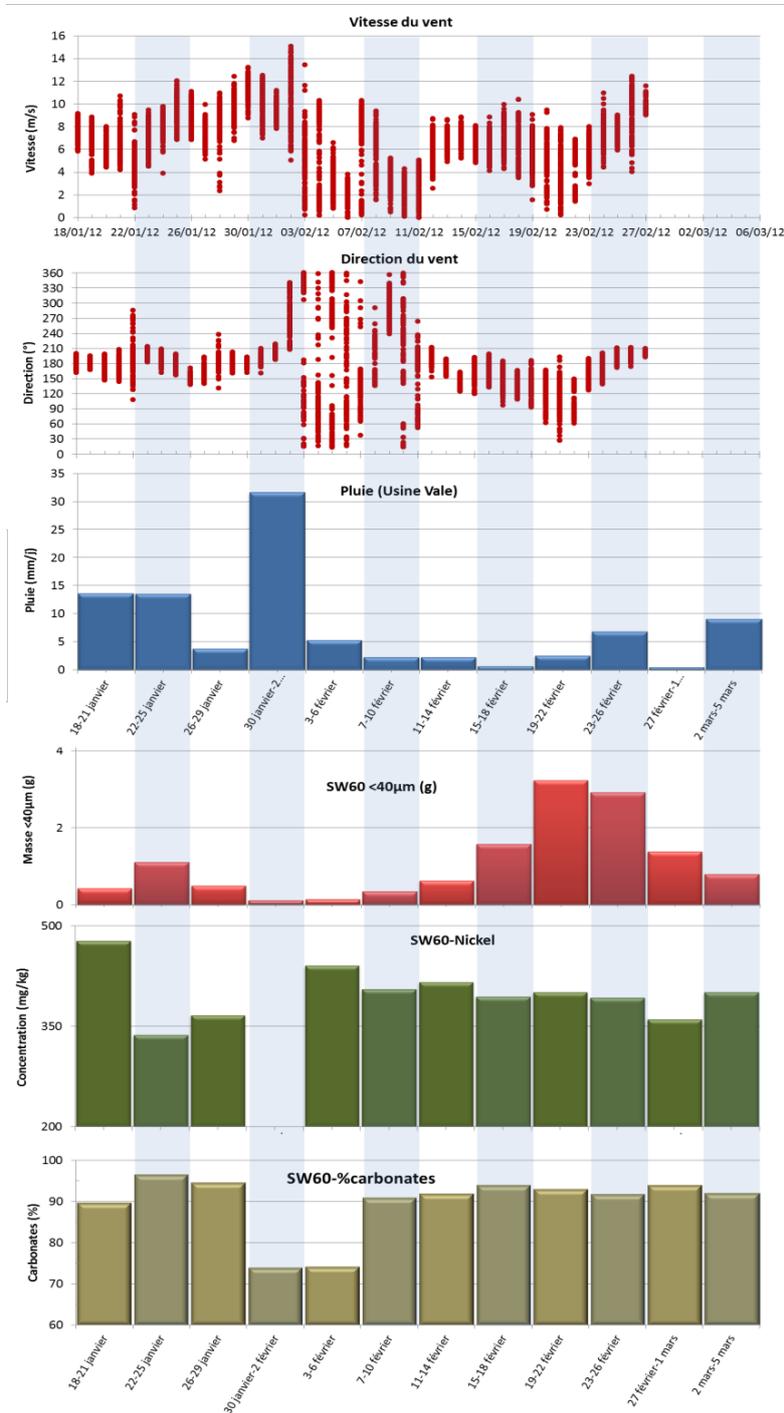


Figure 19c : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fraction inférieure à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et pourcentage en carbonates à la station St60-SW pour la période du 18 janvier au 05 mars 2012.

## 5.2 CALCUL DES FLUX DE MATIERES

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

### MATIERE EN SUSPENSION

Pour la Baie Kwé, les densités de flux en matière en suspension sont du même ordre de grandeur qu'en 2007, lors de la définition de « l'Etat de référence » (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230, 2007 ; contrat OEIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012).

En ce qui concerne le Canal de la Havannah, les flux sont 2 à 3 fois plus forts en « saison chaude » qu'en « saison fraîche ».

Les valeurs mesurées en 2011 et 2012 sont données dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en matière particulaire au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah) ; comparaison des valeurs obtenues en 2011 et 2012 avec celles mesurées en 2007 (Etat de référence, station T4M).

	VALEUR DU FLUX MES (mg/m <sup>2</sup> /j)	BAIE KWE (KW1)	CANAL DE LA HAVANNAH (60NE)	CANAL DE LA HAVANNAH (60SW)
Etat de référence 2007(T4M)	Minimum	8,0	-	0,7
	Maximum	168,4	-	14,8
Suivi « saison fraîche » 2011	Minimum	5,0	-	0,2
	Maximum	118,5	-	11,4
Suivi «saison chaude » 2012	Minimum	10,5	1,3	0,9
	Maximum	128,1	26,9	33,4

### ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM

Pour la Baie KW2, les densités de flux en métaux totaux sont du même ordre de grandeur qu'en 2007, lors de la définition de « l'Etat de référence » (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230, 2007 ; contrat OEIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012). Cependant, il est à remarquer une sensible augmentation des niveaux de concentration en « saison chaude » d'un facteur 1,5 à 2, exception faite de Ca dont le flux reste bien constant.

En ce qui concerne le Canal de la Havannah, selon l'élément, les flux sont 2 à 10 fois plus forts en « saison chaude » qu'en « saison fraîche ». Les flux sont équivalents pour les deux stations St60-NE et St60-SW.

Les valeurs mesurées en 2011 et 2012 sont données dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60SW (Canal de la Havannah).

ST06-KW1		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (µg/m <sup>2</sup> /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Baie Kwé « saison fraîche »2011	Minimum	1283	0,4	14,6	409	3,5	7,4
	Maximum	24 519	11,4	392,8	10 460	94,5	185,8
Baie Kwé « saison chaude »2012	Minimum	2501	1,0	31,8	999	7,5	18,0
	Maximum	29 794	14,6	492,5	14 378	118,8	267,1

ST60-NE		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$ )					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
<b>C Havannah</b> « saison fraiche » 2011	Minimum	60	0,01	0,2	0,2	0,08	0,05
	Maximum	3732	0,16	167,8	156,9	21,27	2,74
<b>C Havannah</b> « saison chaude » 2012	Minimum	392	0,01	1,0	27	0,2	0,6
	Maximum	7973	0,70	19,1	616	7,3	11,4

ST60-SW		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$ )					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
<b>C Havannah</b> « saison fraiche » 2011	Minimum	60	0,01	0,17	0,22	0,08	0,05
	Maximum	3732	0,16	167,83	156,89	21,27	2,74
<b>C Havannah</b> « saison chaude » 2012	Minimum	314	0,03	0,73	22	0,41	0,46
	Maximum	9543	0,93	21,39	736	9,16	13,38

**CE QU'IL FAUT RETENIR**

Pour la période étudiée (« saison chaude », pluies modérées à faibles), la distribution des MES dans les eaux, tant en Baie Kwé que dans le Canal de la Havannah, est grandement régie par les actions combinées des effets mécaniques de lixiviation des bassins versants que de la houle, elle-même générée par les vents.

En cohérence avec les résultats précédents (« saison fraiche »), seuls les régimes d'un large secteur S sont susceptibles de remettre en suspension les particules sédimentées jusqu'à une profondeur de 10 m, ce mécanisme étant notamment observable dans la Baie Kwé mais également le long des côtes. Une fraction de ces particules suit ensuite les courants dominant vers le secteur W du Canal de la Havannah.

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

Les valeurs de flux de matière particulaire (MES) entrent toutes dans les gammes observées antérieurement. Cependant, les flux de métaux ont tous augmenté, parfois de manière importante. Cette évolution est probablement à mettre en parallèle avec la saisonnalité des apports terrigènes qu'un fort rythme de précipitations caractérise habituellement.

## 6 CONCLUSION

Pour la période d'études comprise en le 18 janvier et le 05 mars 2012 2011 (saison chaude), les principales conclusions sont les suivantes :

1. Peu de pluies ont été enregistrées durant cette période d'études. Les précipitations les plus importantes (111,2 mm cumulés en 1 jour) semblent avoir généré une couche turbide notable dans la Baie Kwé. Les vents ont montré une variabilité temporelle classique conduisant à une alternance des régimes de secteurs E à W majoritairement avec des rotations au S et au N en milieu de période pendant plus d'une semaine. Les vitesses se sont maintenues relativement constantes sauf, également, en milieu période où leur vitesse a bien diminué.
2. Pour la Baie Kwé, un premier néphéloïde a été généré à l'occasion de l'épisode pluvieux du 2 février. Par ailleurs, sous certaines conditions précises de direction et de vitesse des vents (secteurs S, vitesse > 10 m/s) un deuxième néphéloïde a été mis en place en fin de période; Dans les deux cas, les particules fines ( $\varnothing < 20 \mu\text{m}$ ) ont été alors transportées vers le SW (Douillet et Fernandez, 2009).
3. Dans le Canal de la Havannah, les particules collectées autour du 15 au 22 février sont en quantité relativement importantes (flux moyens :  $20,9 \pm 8,5 \text{ mg/m}^2/\text{j}$ ). Leur analyse montre clairement une signature terrigène (latéritique), les apports dans le Canal n'en demeurent pas moins modestes. Au niveau de la station de mesure (St60-SW), on peut estimer que la charge minérale due aux apports terrigènes issus de la Kwé est diluée d'un facteur 70 ; les apports en calcium demeurant quasi constants dans les deux systèmes, voire légèrement supérieurs en Baie Kwé en raison de la présence du récif frangeant qui borde la baie.
4. Dans le Canal de la Havannah, en dehors de ces périodes météorologiques particulières et en l'absence de forts épisodes pluvieux, les flux de particules sont très modestes et leur nature est à très forte dominance marine (%CaCO<sub>3</sub> > 95). Cette prédominance s'explique par la présence dans l'eau de débris générés par les systèmes récifaux du large.
5. A ce stade de l'activité industrielle, aucune trace d'enrichissement anormal en calcium ou en soufre (signatures potentielles du rejet) dans les MES collectées à la station St60-SW ne permet de déceler l'influence de l'effluent (présence de gypse).

## 7 REFERENCES

Ankley, G. T., D. M. Di Toro, et al. (1996). Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals. *Environmental Toxicology and Chemistry* 15(12): 2056-2066.

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

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

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

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

INERIS, 2003. Analyse critique de l'acceptabilité du niveau de rejet de manganèse dans le milieu marin – Rapport Final, Goro Nickel. H. Baroudi, J. Bureau, C. Rollin, Institut de l'Environnement Industriel et des Risques – Direction des Risques Chroniques, INERIS-DRC-03-53097/DESP-R02, 17 décembre 2003, 37 p. + Annexes.

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

## 8 LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : AIRE D'ETUDE POUR LE SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES ISSUES DU PROCESS DE PRODUCTION DE L'USINE ET DES ACTIVITES D'EXCAVATION DE MINE DE VALE-NC. LE TRAIT ROUGE REPRESENT LE DIFFUSEUR, DE PART ET D'AUTRE FIGURENT LES DEUX STATIONS St60-SW ET St60-NE LOCALISEES A 60M DU REJET. EN BAIE KWE LE PIEGE A SEDIMENTS A ETE MOUILLE A LA STATION St06-KW1. LA STATION St09 APPARTIENT AU RESEAU SEMESTRIEL DE SURVEILLANCE PHYSICO-CHIMIQUE DE LA COLONNE D'EAU. ....	10
FIGURE 2 : PUISSANCE TYPE DE L'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 PRECIPITATIONS JOURNALIERS (RR) » EN (MM/S), « DIRECTION DU VENT MAXI INSTANTANE HORAIRE (DXI) » EN (°) ET « VITESSE DU VENT INSTANTANE MAXI HORAIRE (FXI) » EN (M/S), A LA STATION METEOROLOGIQUE DE L'« USINE » DE VALE-NC POUR LA PERIODE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012. ....	13
FIGURE 4 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 EN BAIE KWE (St06-KW1). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM). ....	14
FIGURE 5 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES EN BAIE KWE PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012. ....	15
FIGURE 6 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 EN BAIE KWE (St06-KW1). ....	16
FIGURE 7 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, AU NORD-EST DU DIFFUSEUR (St60-NE). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM). ....	16
FIGURE 8 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL ; LA QUANTITE DE MATIERE PARTICULAIRE COLLECTEE DANS LE GODET NE-4 ETANT TROP FAIBLE (0,32 g), L'ETUDE GRANULOMETRIQUE N'A PU ETRE CONDUITE. ....	17
FIGURE 9 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE). LA QUANTITE DE MATIERE PARTICULAIRE COLLECTEE DANS LE GODET NE-1 ETANT TROP FAIBLE (0,51 g), L'ETUDE DE LA TENEUR EN CARBONATES N'A PU ETRE CONDUITE. ....	18
FIGURE 10 : MASSES COLLECTEES DANS LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, AU SUD-OUEST DU DIFFUSEUR (St60-SW). COMPOSITION DES MATIERES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIERES (> 40 µM). ....	18
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 ; LA QUANTITE DE MATIERE PARTICULAIRE COLLECTEE DANS LE GODET SW-4 ETANT TROP FAIBLE (0,17 g), L'ETUDE GRANULOMETRIQUE N'A PU ETRE CONDUITE. ....	19
FIGURE 12 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTEES PAR LES 12 GODETS DU PIEGE SEQUENTIEL MOUILLE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW). ....	20
FIGURE 13 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (St06-KW1) ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012. ....	21
FIGURE 14 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE) ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012. ....	23
FIGURE 15 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES 4 GODETS CORRESPONDANT AUX EVENEMENTS METEOROLOGIQUES MARQUANTS ENREGISTRES ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE). ....	23

FIGURE 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 ; LA QUANTITE DE MATIERE PARTICULAIRE COLLECTEE DANS LE GODET SW-4 ETANT TROP FAIBLE (0,17 g), L'ETUDE DES CARBONATES N'A PU ETRE CONDUITE.....	24
FIGURE 17 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES 4 GODETS CORRESPONDANT AUX EVENEMENTS METEOROLOGIQUES MARQUANTS ENREGISTRES ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW). ....	25
FIGURE 18 : DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS EN MN DANS MES COLLECTEES DU CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012. ....	27
FIGURE 19A : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI, TAUX DE PRECIPITATION, FRACTION INFERIEURE A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET POURCENTAGE EN CARBONATES A LA STATION St06-KW1 POUR LA PERIODE DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012. ....	28

## 9 LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LOCALISATION EXACTE DES TROIS STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A PARTICULES SEQUENTIELS : CANAL DE LA HAVANNAH (St60-SW et St60-NE) ET EN BAIE KWE (StKW1). CES COORDONNEES SONT CONFORMES AU REFERENTIEL WGS-84. ....	9
TABLEAU 2 : LISTE DES ECHANTILLONS COLLECTES AUX STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A SEDIMENTS (St60-SW, StSt60-NE ET St06-KW1) ET PERIODES DE COLLECTE ENTRE JANVIER ET MARS 2012. ....	11
TABLEAU 3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (STATION (St06-KW1) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012. ....	15
TABLEAU 4 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-NE) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012. ....	17
TABLEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-SW) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 18 JANVIER AU 05 MARS 2012. ....	19
TABLEAU 6 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 (STATION St06-KW1 ; n=12). ....	21
TABLEAU 7 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012. ....	21
TABLEAU 8 : 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 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 (STATION St60-NE ; n=12). ....	22
TABLEAU 9 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 (STATION St60-NE; n= 11 : MASSE DU GODET 4 TROP FAIBLE). ....	22
TABLEAU 10 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 (STATION St60-SW ; n=12). ....	24
TABLEAU 11 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 05 MARS 2012 (STATION St60-SW). ....	24
TABLEAU 12 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH) ; COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES EN 2011 ET 2012 AVEC CELLES MESUREES EN 2007 (ETAT DE REFERENCE, STATION T4M). ....	31
TABLEAU 13 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60SW (CANAL DE LA HAVANNAH). ....	31

## 10 LISTE DES ANNEXES

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

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

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

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

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

## ANNEXE – 1

### Description des méthodes de traitement et d'analyses des échantillons

#### Evaluation des flux de MES

Les flux verticaux de particules apportées par le réseau hydrologique de la Baie Kwe sont estimés par collecte de séries temporelles d'échantillons de MES. Cette opération est assurée par le déploiement de pièges à sédiment de type séquentiel de 0,05 m<sup>2</sup> de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui est gréé sur une ligne de mouillage équipée avec un largueur acoustique. La durée d'immersion a été de 1,5 mois environ (18 janvier -05 mars 2012).

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

Les matières en suspension collectées sont traitées au laboratoire, conditionnées puis conservées par congélation dans des sachets à usage unique. Les MES sont ensuite caractérisées de manière à évaluer les fractions terrigènes et marines (carbonates). Les flux sont estimés (mg/m<sup>2</sup>/j) et confrontés aux différents régimes météorologiques et/ou hydrodynamiques.

#### Techniques et analyses

##### ***Dosage des carbonates***

Les teneurs en carbonate sont déterminées 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 CO<sub>2</sub>. Le volume de gaz est titré et la concentration en carbonate de calcium est déterminée par relation stœchiométrique.

##### ***Granulométrie***

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction < 40 µm après élimination des organismes « actifs » (Swimmers). La distribution de ces populations est réalisée par granulométrie laser après remise en suspension des sédiments, ajout d'agent dispersant (Pyrophosphates de Na/K) et agitation aux ultrasons. Seulement 4 échantillons par carrousel sont analysés.

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

##### ***Minéralogie***

Les sources et l'évolution temporelle des matériaux sont estimées en fonction des espèces minérales décelées. Les déterminations de ces espèces sont effectuées par diffraction de rayons X (DRX) sur les 4 échantillons 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 péloïtiques 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 péloïtiques des sédiments par attaque acide à haute température en conditions hyperbares. L'analyse de S est effectuée par ICP-OES.

#### ***Dosage des HCT***

L'analyse des hydrocarbures totaux est effectuée 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/j)	FXI (m/s)	DXI (°)
18-janv.-12	2,2	14,2	70
19-janv.-12	0	14	90
20-janv.-12	1,2	11,8	80
21-janv.-12	51,5	13,1	110
22-janv.-12	18,1	11,5	100
23-janv.-12	10,9	12,2	100
24-janv.-12	2	14,7	110
25-janv.-12	23,5	15,1	110
26-janv.-12	3,4	12,6	70
27-janv.-12	2,2	12,7	90
28-janv.-12	8,6	17,5	90
29-janv.-12	1	15,4	140
30-janv.-12	2,8	16,1	100
31-janv.-12	9,2	18,2	100
1-févr.-12	3,4	15,3	120
2-févr.-12	111,2	16,5	190
3-févr.-12	9,2	11,1	300
4-févr.-12	0	9,3	20
5-févr.-12	12,2	7,2	220
6-févr.-12	0	7,3	110
7-févr.-12	4	11,3	100
8-févr.-12	0,2	11,5	100
9-févr.-12	5	7,5	150
10-févr.-12	0	7,1	230
11-févr.-12	0	8	120
12-févr.-12	9	12,1	100
13-févr.-12	0,2	10,7	90
14-févr.-12	0	10,5	90
15-févr.-12	0	11,3	10
16-févr.-12	1,8	11,1	100
17-févr.-12	1	12,1	70
18-févr.-12	0	11,5	70
19-févr.-12	2	11,2	70
20-févr.-12	0,8	11,3	90
21-févr.-12	6,4	8,4	100
22-févr.-12	1	10,9	60
23-févr.-12	0,4	12,9	100
24-févr.-12	15,9	13,9	100

Date	Pluie (mm/j)	FXI (m/s)	DXI (°)
25-févr.-12	6,5	13,9	90
26-févr.-12	4,6	16,7	120
27-févr.-12	0	15,3	130
28-févr.-12	0	13	120
29-févr.-12	0,8	12	100
1-mars-12	1,4	12,5	70
2-mars-12	17,1	11,2	70
3-mars-12	15,4	9,8	230
4-mars-12	3,8	12	110
5-mars-12	0,2	13,9	130

Valeurs horaires des paramètres météorologiques (données Station AEL sur la balise Ioro, Canal de la Havannah) : direction et vitesse du vent, température de l'air et température de l'eau.

Etant donné la grande quantité d'information enregistrée, 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)
10-13 juillet-	KW1-1	2,098	NE60-1	0,511	SW60-1	0,699
14-17 juillet	KW1-2	3,528	NE60-2	2,435	SW60-2	2,196
18-21 juillet	KW1-3	3,912	NE60-3	0,626	SW60-3	0,894
22-25 juillet	KW1-4	25,614	NE60-4	0,322	SW60-4	0,170
26-29 juillet	KW1-5	10,808	NE60-5	0,256	SW60-5	0,207
30 juillet-02 août	KW1-6	4,905	NE60-6	0,374	SW60-6	0,606
03-06 août	KW1-7	5,125	NE60-7	1,256	SW60-7	1,092
07-10 août	KW1-8	2,200	NE60-8	5,389	SW60-8	2,961
11-14 août	KW1-9	6,643	NE60-9	4,585	SW60-9	6,672
15-18 août	KW1-10	8,502	NE60-10	2,164	SW60-10	5,441
19-22 août	KW1-11	14,406	NE60-11	1,463	SW60-11	2,663
23-26 août	KW1-12	6,957	NE60-12	3,671	SW60-12	1,625

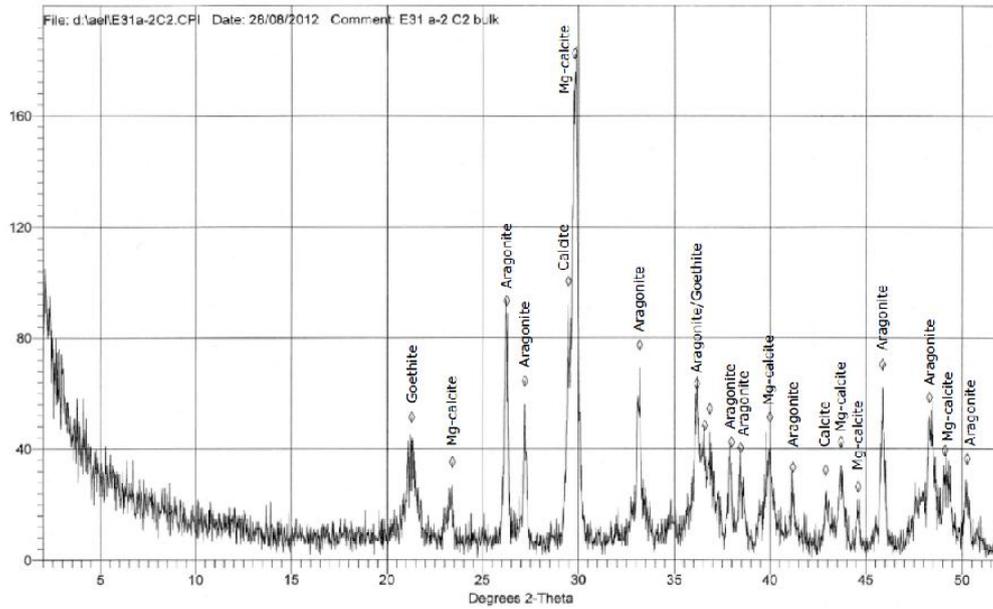
### COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

	POURCENTAGE VOLUMETRIQUE ENTRE LES CLASSES GRANULOMETRIQUES						
	0,02-2 µm	2-20 µm	20-40 µm	40-50 µm	50-63 µm	63-200 µm	> 200 µm
KW1-2	1,66	43,60	34,95	8,58	6,14	5,08	0,00
KW1-4	11,74	55,38	21,12	4,57	3,18	3,93	0,09
KW1-8	4,30	50,48	29,00	6,94	4,94	4,34	0,00
KW1-11	12,30	52,51	22,11	4,97	3,55	4,21	0,34
NE60-2	2,32	39,91	37,24	9,63	6,66	4,25	0,00
NE60-4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
NE60-8	3,87	56,45	25,41	5,41	3,68	5,16	0,02
NE60-11	1,82	42,55	34,28	8,91	6,56	5,88	0,00
SW60-2	1,80	44,28	35,53	8,56	5,86	3,97	0,00
SW60-4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SW60-8	6,14	58,36	26,01	5,13	3,03	1,34	0,00
SW60-11	2,18	42,53	35,33	8,97	6,31	4,68	0,00

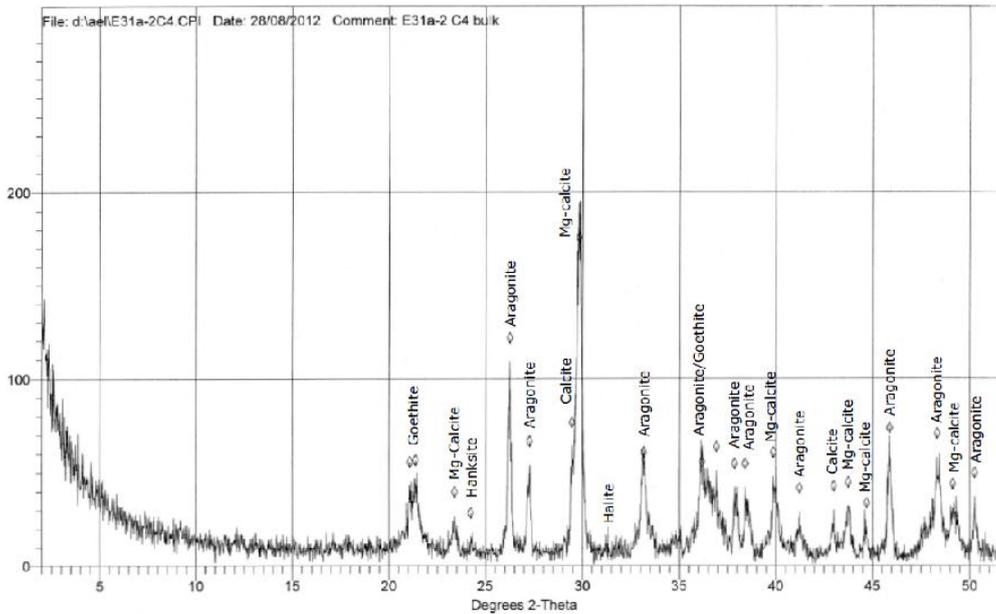
Nd = non déterminée par manque de matière

### COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DE LA BAIE KWE

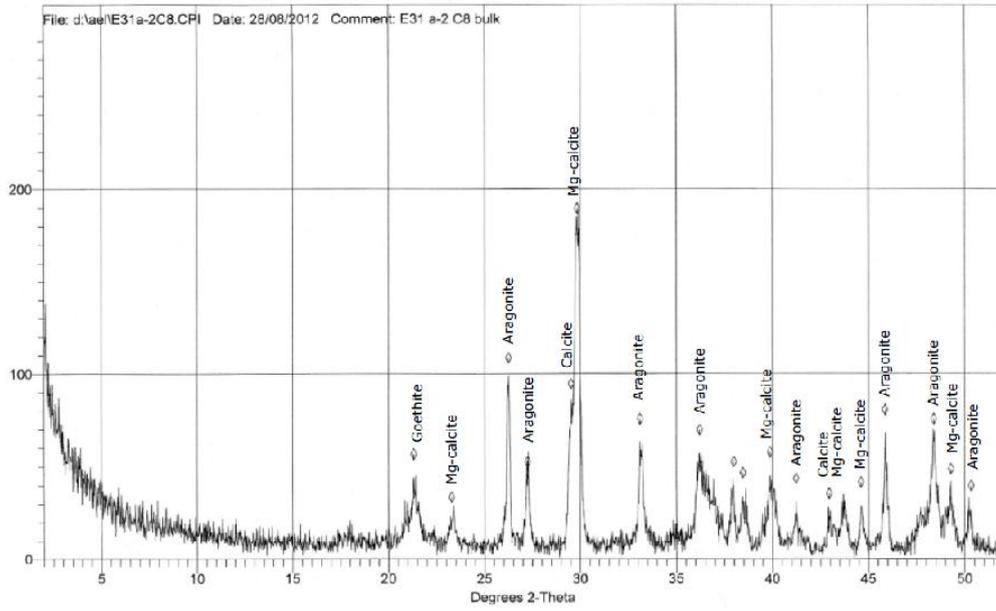
Station St06-KW1 ; godet 2



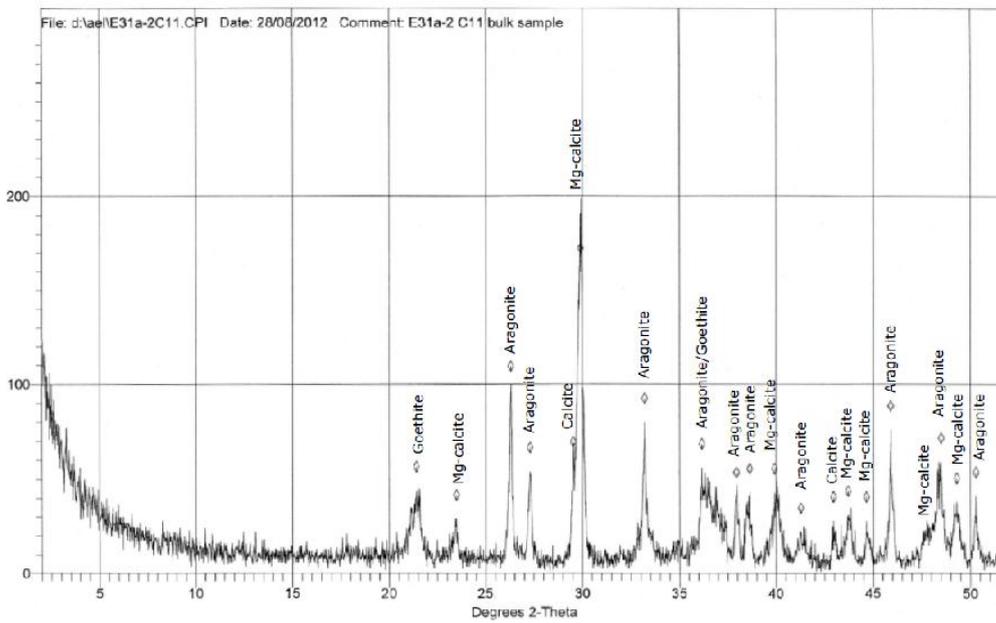
Station St06-KW1 ; godet 4



Station St06-KW1 ; godet 8

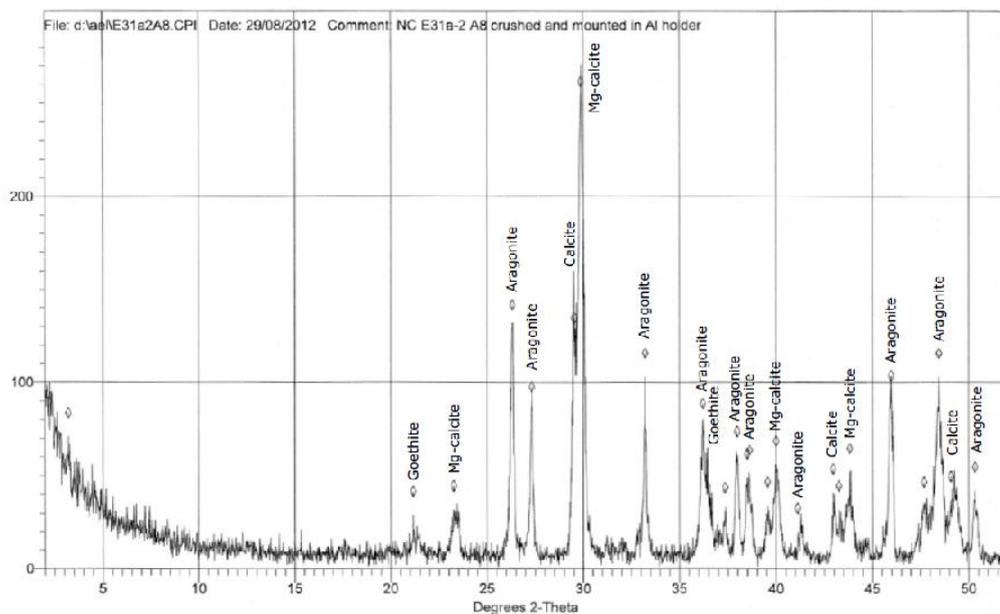


Station St06-KW1 ; godet 11

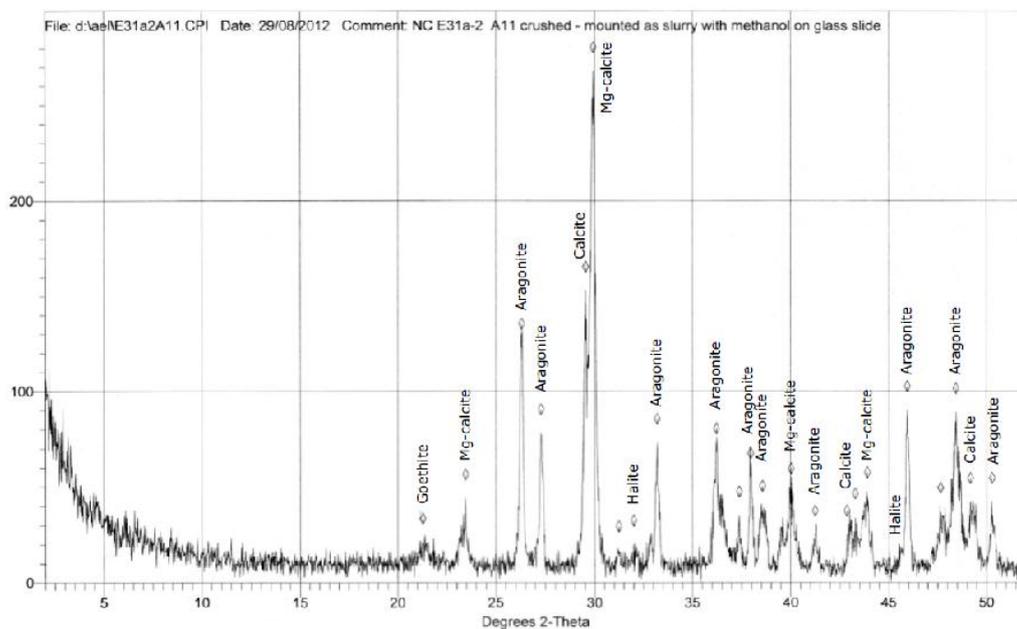


## COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH

Station St60-NE ; godet 2

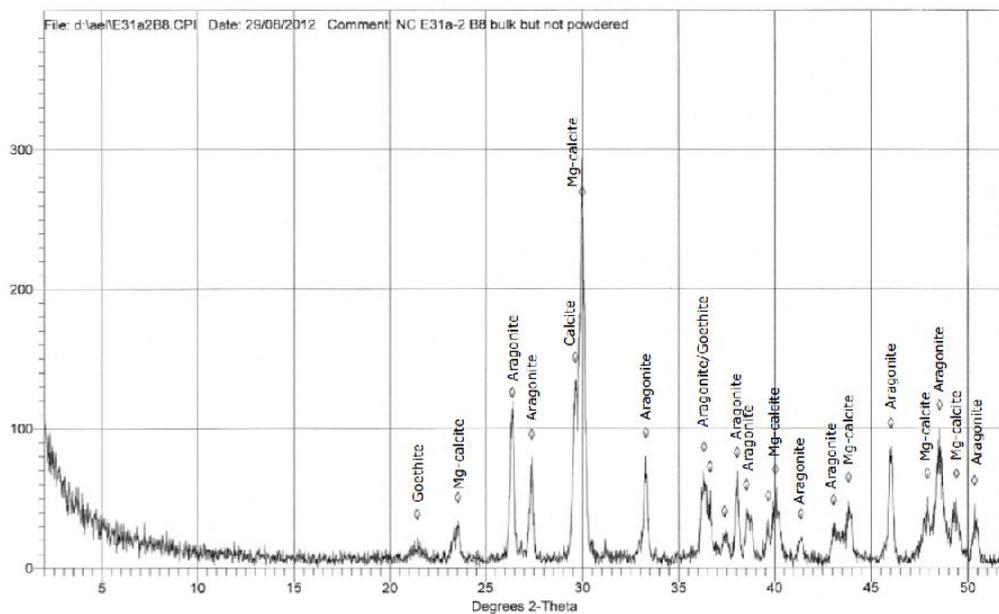


Station St60-NE ; godet 11

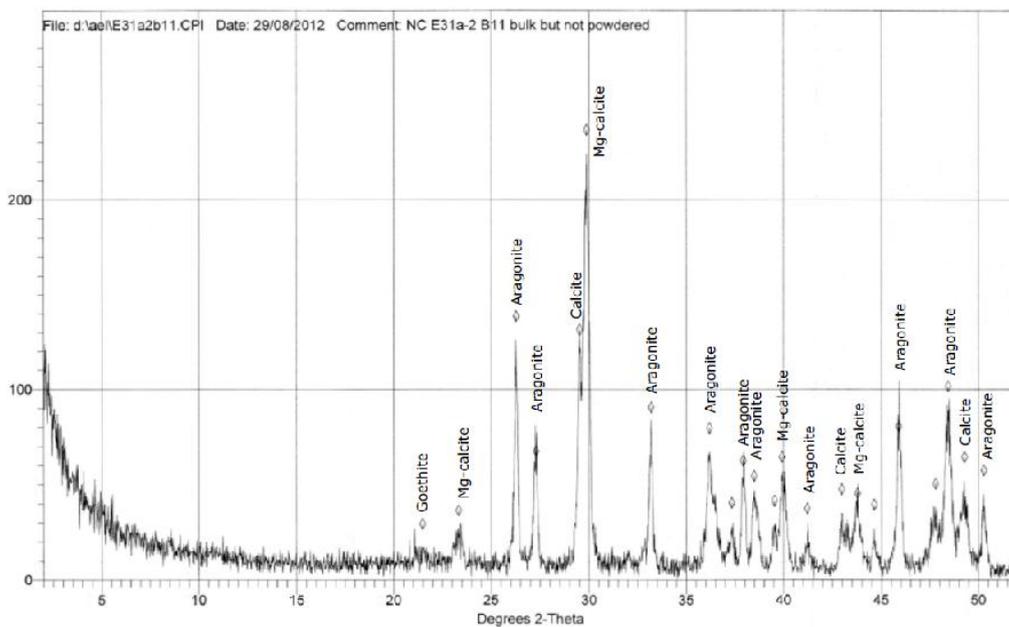


**Remarque :** Les trop faibles quantités de matière collectée dans les godets St60-NE2 et St60-NE4 n'ont pas permis de réaliser les analyses minéralogiques.

Station St60-SW ; godet 8



Station St60-SW ; godet 11



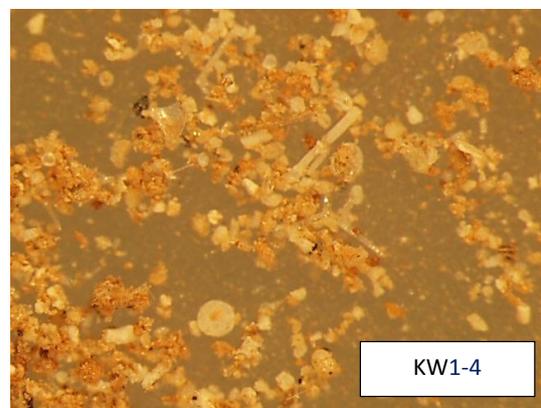
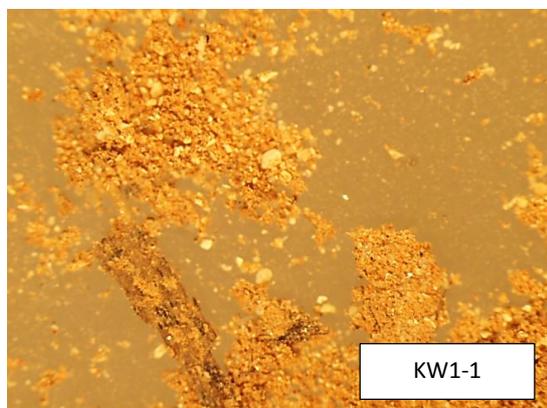
**Remarque :** Les trop faibles quantités de matière collectée dans les godets St60-SW2 et St60-SW4 n'ont pas permis de réaliser les analyses minéralogiques.

## TENEURS EN CARBONATES

PERIODE DE COLLECTE	STATION	CaCO <sub>3</sub> (%)	STATION	CaCO <sub>3</sub> (%)	STATION	CaCO <sub>3</sub> (%)
10-13 juillet-	KW1-1	78,1	NE60-1	nd	SW60-1	89,8
14-17 juillet	KW1-2	78,0	NE60-2	90,5	SW60-2	96,5
18-21 juillet	KW1-3	81,3	NE60-3	86,3	SW60-3	94,6
22-25 juillet	KW1-4	82,2	NE60-4	76,0	SW60-4	74,0
26-29 juillet	KW1-5	83,4	NE60-5	82,5	SW60-5	74,2
30 juillet-02 août	KW1-6	78,1	NE60-6	80,5	SW60-6	90,9
03-06 août	KW1-7	77,2	NE60-7	88,2	SW60-7	91,9
07-10 août	KW1-8	81,1	NE60-8	89,8	SW60-8	94,1
11-14 août	KW1-9	83,1	NE60-9	88,5	SW60-9	93,1
15-18 août	KW1-10	80,4	NE60-10	85,4	SW60-10	91,8
19-22 août	KW1-11	79,2	NE60-11	81,3	SW60-11	94,0
23-26 août	KW1-12	74,9	NE60-12	78,2	SW60-12	92,1

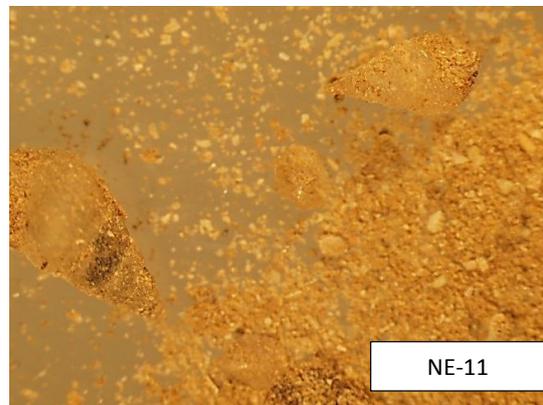
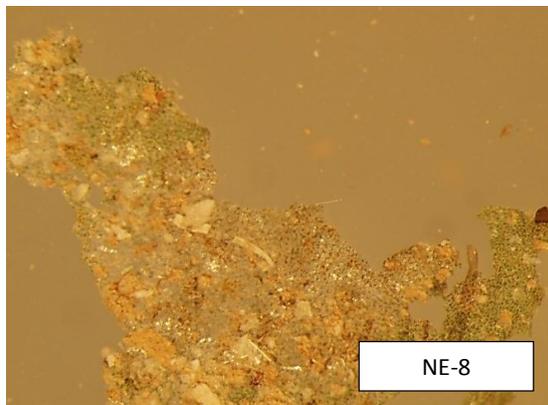
nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

## OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE (GROSSISSEMENT X 11,5)

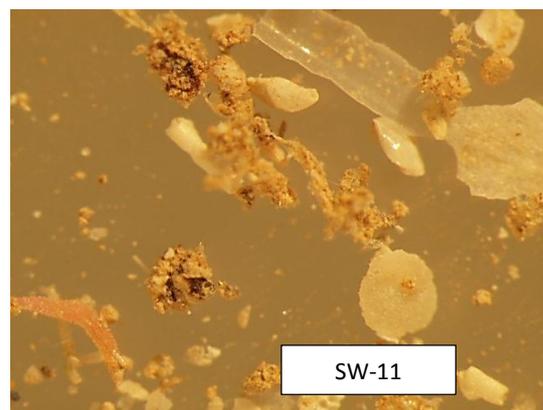
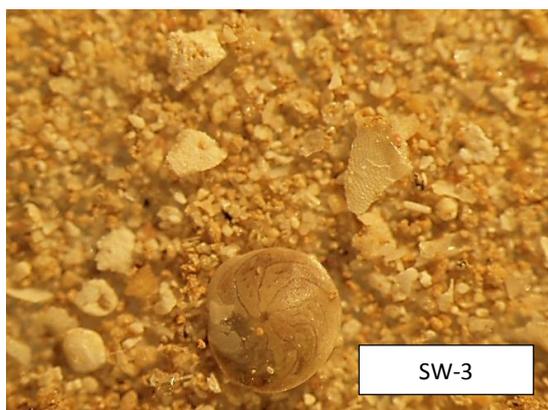


Matières en suspension collectée dans les godets KW1-1 et KW1-4 : Présence de nombreuses particules latéritiques de couleur brune, de débris végétaux terrestres arrachés aux bassins versants ainsi que de coraux et de tests de microorganismes marins plus ou moins fortement altérés.

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



Matières en suspension collectée dans les godets NE-8 et NE-11 : 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.



Matières en suspension collectée dans les godets SW-3 et SW-11 : Présence de particules latéritiques en faible quantité et de très petite taille. Sédimentation de nombreux débris de tests de microorganismes marins ou des micro-coquillages entiers 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)
10-13 juillet-	KW1-1	238364	101	3307	103327	756	1883
14-17 juillet	KW1-2	239853	98	3268	101700	775	1870
18-21 juillet	KW1-3	244150	94	3250	99196	779	1800
22-25 juillet	KW1-4	232638	114	3846	112264	927	2086
26-29 juillet	KW1-5	233982	119	3837	113569	923	2119
30 juillet-02 août	KW1-6	243598	102	3476	104387	815	1909
03-06 août	KW1-7	241471	98	3266	102854	816	1869
07-10 août	KW1-8	232112	87	2889	90815	683	1635
11-14 août	KW1-9	248665	90	3111	95076	771	1704
15-18 août	KW1-10	246901	95	3321	99696	818	1795
19-22 août	KW1-11	233180	113	3784	110362	929	2015
23-26 août	KW1-12	234333	106	3608	106631	875	1939

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
10-13 juillet-	NE60-1	289703	31	660	20610	277	504
14-17 juillet	NE60-2	296354	21	637	19518	183	347
18-21 juillet	NE60-3	302602	20	548	16492	191	340
22-25 juillet	NE60-4	326912	20	597	16816	123	342
26-29 juillet	NE60-5	306189	44	839	27402	618	601
30 juillet-02 août	NE60-6	253561	23	634	19972	268	381
03-06 août	NE60-7	296470	26	714	23132	231	488
07-10 août	NE60-8	295884	25	707	22864	272	423
11-14 août	NE60-9	288892	26	680	22337	249	411
15-18 août	NE60-10	292754	23	648	20830	206	448
19-22 août	NE60-11	287850	23	639	20636	198	389
23-26 août	NE60-12	287947	25	635	20894	230	396

PERIODE DE COLLECTE	ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
10-13 juillet-	SW60-1	295469	29	651	20589	306	477
14-17 juillet	SW60-2	291535	21	649	19650	176	337
18-21 juillet	SW60-3	297152	23	618	18781	185	366
22-25 juillet	SW60-4	nd	nd	nd	nd	nd	nd
26-29 juillet	SW60-5	303034	28	702	21670	396	441
30 juillet-02 août	SW60-6	287513	29	698	22522	194	406
03-06 août	SW60-7	287602	27	666	22496	204	416
07-10 août	SW60-8	290013	26	648	21645	250	394
11-14 août	SW60-9	286060	28	641	22056	275	401
15-18 août	SW60-10	281629	28	618	21210	249	393
19-22 août	SW60-11	289041	27	596	20152	218	361
23-26 août	SW60-12	293319	29	605	20438	229	401

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

STATION	Soufre (mg/kg)	STATION	Soufre (mg/kg)
SW60-2	3262	NE60-2	3046
SW60-3	2819	NE60-3	2695
SW60-8	2952	NE60-8	2951
SW60-11	3125	NE60-11	2861