

SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (DIFFUSEUR) ET LA BAIE KWE



Photos de couverture AEL : traçage des effluents liquides à la rhodamine et pièges à évaluation écotoxicologique

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

Convention n° 110308-VI-11

Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah (diffuseur) et la baie Kwé

Janvier 2012

Fernandez Jean Michel

Moreton Benjamin

Le Grand Hélène

Dolbecq Mathieu

Creuzil Jérémie

	N/Ref	V/Ref
Identification	110308-VI-11	Contrat 2684
Titre complet	Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah (diffuseur) et la baie Kwé	
Auteurs	Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H, Dolbecq M	
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). 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 10 juillet et le 26 août 2011. 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. Pour la période étudiée (saison fraîche, 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 l'action mécanique de la houle, elle-même générée par les vents. Toutefois, seuls les régimes d'un large secteur sud sont susceptibles de remettre en suspension les particules sédimentées, notamment dans la baie mais également le long des côtes. Ces particules suivent ensuite les courants dominant, les plus lourdes sédimentant à nouveau rapidement dès que l'action du vent cesse. 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. Aucune trace d'enrichissement anormal en calcium ou en soufre (signatures potentielles du rejet) n'a été décelé dans les MES collectées à la station St60-SW.	
APPROBATION		
FONCTION	NOMS	VISA
Rédacteur	Fernandez JM	28/01/12
Vérificateur 1	Moreton B	30/01/12
Vérificateur 2	Creuzil J	30/01/12
Approbateur(s)	Fernandez JM	30/01/12
EVOLUTION		
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE
V1.0	Rapport définitif	30/01/2012
COPIE - DIFFUSION		
NOM	ORGANISME	
Casalis C	Département environnement Vale-NC	

Ce rapport est cité comme suit :

Fernandez JM, Le Grand Hélène, Dolbecq M, Creuzil J, 2012. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah (diffuseur) et la baie Kwé. Rapport AEL 110308-VI-11, 41p.

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	13
4.2.1	Baie Kwé (station StKW1).....	13
4.2.2	Canal de la Havannah (station St60SW)	14
4.3	COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION	18
4.3.1	Baie Kwé (station StKW1).....	18
4.3.2	Canal de la Havannah (station St60SW)	19
5	INTERPRETATION	22
5.1	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES.....	22
5.1.1	Baie Kwé,.....	22
5.1.2	Canal de la Havannah.....	23
5.2	CALCUL DES FLUX DE MATIERE.....	24
6	CONCLUSION	25
7	REFERENCES	26
8	LISTE DES FIGURES	27
9	LISTE DES TABLEAUX	28
10	LISTE DES ANNEXES.....	29

1 INTRODUCTION

Le programme de travail ici présenté a été défini en accord avec la convention 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 (échelle 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 consommés par l'homme.

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 :

- d'une part, en particules fines générées consécutivement aux différents travaux d'excavation et de mise en exploitation de la mine.

En effet, l'ensemble des particules est véhiculé par les eaux de ruissellement jusque dans l'estuaire où en fonction de leur diamètre (masse), les populations de grains sédimentent plus ou moins précocement ; les fractions les plus fines étant capables de transiter sur de longues distances dans le Canal de la Havannah ;

- D'autre part, en particules fines persistantes dans les effluents industriels traités et rejetés dans le Canal de la Havannah via le diffuseur.

Ces apports en matière particulaire sont potentiellement chargés de métaux (convention IRD/Goro-Ni N°1124, Volet « Réactivité géochimique de l'effluent ») à l'issue des différentes étapes du process industriel. Leur diamètre moyen supposé, 7 μ m, leur confère des propriétés de transport potentiel particulièrement importantes.

2 OBJECTIFS

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

- effectuer le suivi temporel des apports terrigènes générés par l'activité minière en sortie de la Baie Kwé, dans un secteur de relative profondeur. En effet, il est nécessaire de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage des grosses particules sur le fond ; il n'est 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 a été conduit au voisinage immédiat du diffuseur. Ce suivi avait pour objet de répondre aux questions de la double rémanence supposée :
 - o d'une part, du gypse formé après l'étape de neutralisation des solutions acides d'extraction du Ni par le calcaire ;
 - o d'autre part, des précipités de 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° 12124 ; Volet « Réactivité chimique de l'effluent ») montrent que seule une formation négligeable de précipités de calcite se produit. La mesure in-situ a permis de discuter de cette hypothèse, dans l'état actuel du niveau des rejets (phase de démarrage de l'usine).

3 METHODOLOGIE

3.1 SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES

Les opérations de terrain ont été conduites le 8 juillet 2011 à bord de l'embarcation « Slavko ». Ces opérations ont consisté à réaliser trois mouillages de lignes équipées de pièges à sédiments séquentiels sur les sites suivants :

- au niveau des deux stations (St60-SW et St60-NE) localisées à 60 m de part et d'autre du diffuseur. Ces stations, 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 (Contrat AEL/Vale-NC n°E22584), (Figure 1 et Tableau 1);
- à proximité de la l'embouchure de rivière Kwe (StKW1, Figure 1 et Tableau 1). Cette station a permis la définition de l'état de référence des flux particuliers en 2006 (Convention IRD/Goro-Ni n°1230)

Remarque : *En fin de campagne, des deux pièges immergés au voisinage du diffuseur, seulement celui correspondant au mouillage à la station St60-SW a pu être récupéré. Pour le deuxième piège (St60-NE), seule une portion de la ligne de mouillage a été retrouvée, à la dérive ; le programme de collecte sur le site n'a donc pu être mené à son terme. Un problème technique au niveau de la liaison avec le dispositif de largage automatique est sans doute à l'origine de cette défaillance.*

Seuls les échantillons provenant de la Baie Kwé (StKW1) et de la station localisée au sud-ouest du diffuseur (St60-SW) ont donc pu être traités dans cette étude.

Tableau 1 : Localisation 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	StKW1
Longitude Est	166° 59,621	166°59.677	166°59,144
Latitude Sud	22° 22,154	22° 22,113	22°22,750
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 au niveau du diffuseur pour que les pièges demeurent en contact avec l'effluent même lorsque les conditions de marées de vive-eau s'exercent, conformément aux résultats obtenus à l'issue du traçage à la

rhodamine (Contrat AEL/Vale-NC n° 20233 ; Figure 2) ; la couche affectée par l'effluent n'est que d'environ 5 m alors qu'elle dépasse amplement les 10 m par courants faibles (marées de morte-eau).

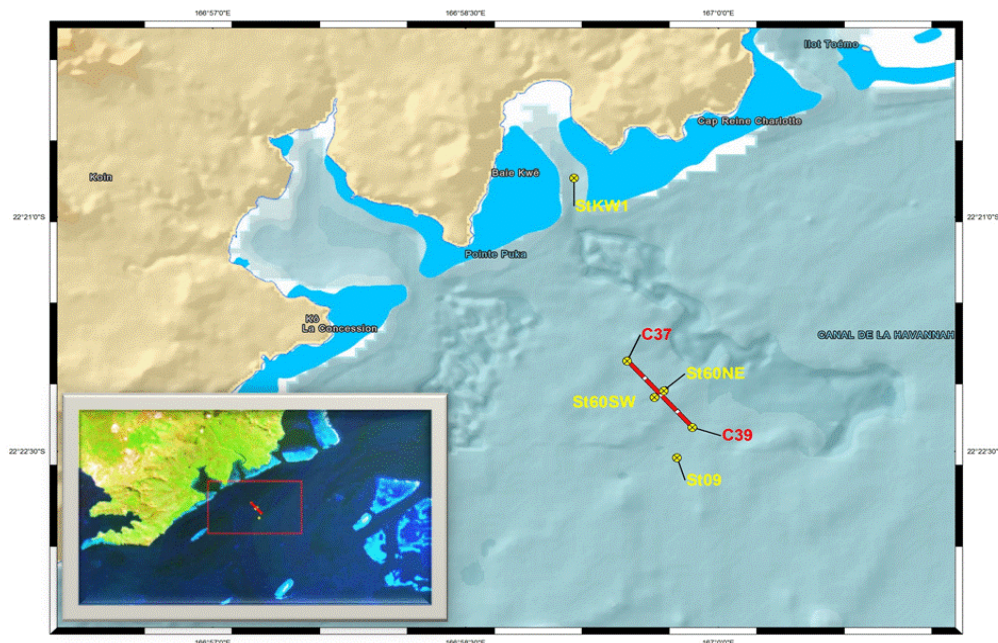


Figure 1: Aire d'étude pour le suivi des flux verticaux de particules issues du process de production de l'usine et des activités d'excavation de mine de Vale-NC. Le trait rouge représente le diffuseur, de part et d'autre figurent les deux stations St60-SW et St60-NE localisées à 60m du rejet. En baie Kwé le piège à sédiments a été mouillé à la station StKW1.

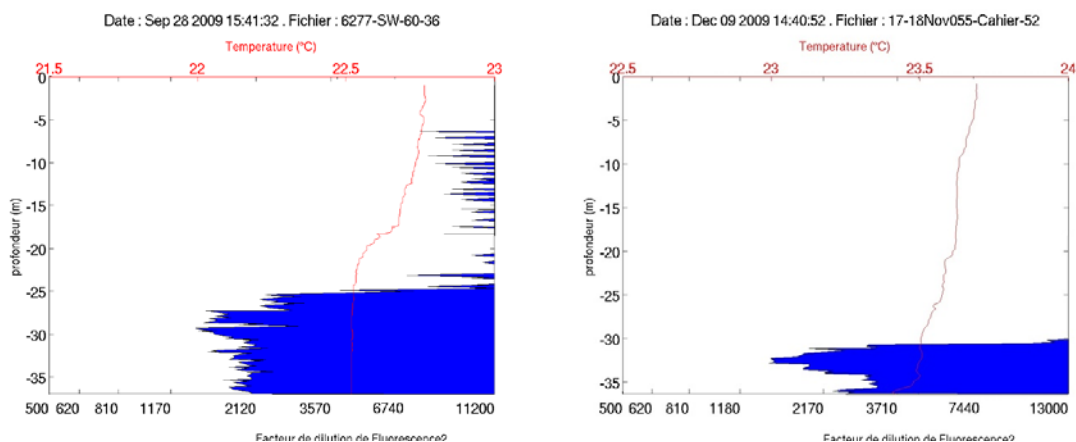


Figure 2 : Puissance type de l'épaisseur de marquage par l'effluent (rhodamine) pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

3.2 ECHANTILLONNAGE

Les lignes de mouillage étaient dotées de pièges à sédiments de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) équipés de carrousels de 12 godets pour permettre une collecte temporelle des particules sédimentées. Les lignes ont été immergées le 8 juillet 2011 puis récupérées le 31 août 2011.

La collecte des particules a été programmée pour débiter le 10 juillet 2011 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 48 heures ; elle s'est terminée le 26 août à 00h00. Au total 12 échantillons de matériel particulaire ont été prélevés pour les deux sites d'immersion (Tableau 2).

Tableau 2 : Liste des échantillons collectés aux stations de mouillage des pièges à sédiments (Sr60-SW et StKW1) et périodes de collecte.

STATION	PERIODE DE COLLECTE	STATION	PERIODE DE COLLECTE
KW1-1	10-13 juillet-	SW60-1	10-13 juillet-
KW1-2	14-17 juillet	SW60-2	14-17 juillet
KW1-3	18-21 juillet	SW60-3	18-21 juillet
KW1-4	22-25 juillet	SW60-4	22-25 juillet
KW1-5	26-29 juillet	SW60-5	26-29 juillet
KW1-6	30 juillet-02 août	SW60-6	30 juillet-02 août
KW1-7	03-06 août	SW60-7	03-06 août
KW1-8	07-10 août	SW60-8	07-10 août
KW1-9	11-14 août	SW60-9	11-14 août
KW1-10	15-18 août	SW60-10	15-18 août
KW1-11	19-22 août	SW60-11	19-22 août
KW1-12	23-26 août	SW60-12	23-26 août

Dès le retour des pièges à bord, les échantillons de MES (matière en suspension) ont directement été conservés dans les godets du carrousel et maintenus au frais (4°C) jusqu'à la phase de traitement.

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 10 juillet au 26 août 2011 a été marquée par un seul épisode pluvieux réellement significatif qui s'est produit entre du 21 au 23 août (Figure 5). Durant ces 3 jours, le cumul des précipitations a totalisé 128,6 mm. En dehors de cet événement, 24,8 mm sont tombés le 28 juillet et durant 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, plusieurs rotations de vents se sont succédées régulièrement dans le temps (Figure 5), en effet :

- le début de la période d'études est caractérisé par des vents de secteur E à temporairement SE tournant rapidement au N, les 18 et 19 juillet ;
- à partir du 20 juillet, il s'en suit l'installation de vent de secteur S virant progressivement au N, le 29 juillet ;
- du 30 au 10 août, l'instabilité atmosphérique fait basculer les vents du secteur SE à E, puis à dominante S pendant plusieurs jours. Progressivement, les vents ont tourné au secteur NE ;
- à partir du 11 août, les vents basculent au S-SW et hormis une journée de secteur N, le vent tourne progressivement au secteur E-NE.

4.1.3 Vitesse du vent

La vitesse moyenne des vents pour le secteur a été de $11,3 \pm 3,2$ m/s, pour l'ensemble de la campagne ; il s'agit là d'une valeur relativement élevée pour un début de « saison fraîche » (Figure 5). La force des vents a cependant été variable dans le temps, ainsi :

- La vitesse des vents fraichit progressivement entre le 10 (6 m/s) et le 18 juillet (13 m/s) ;
- les périodes de vents supérieurs à 10 m/s (20 nœuds) ont été enregistrées à une fréquence irrégulière pour les régimes de secteur de SW à E-SE (20 au 29 juillet) et de manière soutenue (15 m/s, soit 30 nœuds) pour les régimes de S à S-SE installés entre le 02 et 05 août ;
- entre le 22 et le 24 août, un vent de secteur E de plus de 18 m/s (36 nœuds) a été enregistré.

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 des observations de MES au microscope optique.

4.2.1 Baie Kwé (station StKW1)

4.2.1.1 Masses collectées

Les masses collectées montrent des valeurs très variables dans le temps (Figure 5). En effet, elles se distribuent entre 1,00 g pour les 4 premiers jours de la collecte (10-13 juillet ; godet KW1-1) et 23,71 g en milieu de période (03-06 juillet ; godet KW1-7). Hormis ces deux valeurs extrêmes, la moyenne se situe à $4,02 \pm 1,54$ g, deux valeurs seulement dépassant les 5 g (godets KW1-2 et KW1-6 ; respectivement 5,7 g et 7,2 g).

4.2.1.2 Compositions granulométriques

La distribution des populations granulométriques montre, au cours du temps, une variation relativement importante. Ainsi, les populations de très petites tailles ($0,02-2 \mu\text{m}$) et intermédiaires ($2-20 \mu\text{m}$) augmentent au détriment des plus grosses ($\phi > 20 \mu\text{m}$, Figure 3).

Cette évolution est particulièrement visible entre les MES du godet KW1-5 (26-29 juillet) correspondant à une période de vents de secteurs N à W, voire W-SW et les MES des godets KW1-2 (14-17 juillet) et KW1-9 (11-14 août) coïncidant avec des vents de secteurs E-SE à S. Ces deux régimes météorologiques diffèrent fortement par l'action mécanique qu'ils peuvent avoir sur la formation de clapot et donc, la remise en suspension des particules.

A ce stade de l'étude de la « saison fraîche », aucune évolution particulière des populations n'a été observée en fonction de la pluie.

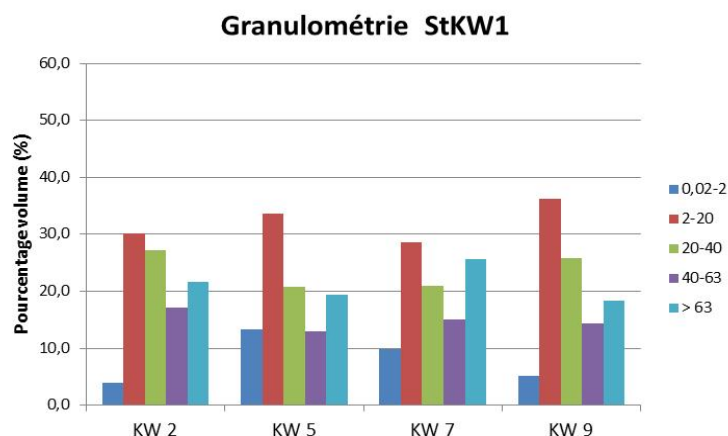


Figure 3 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés en Baie Kwe par le piège à sédiments séquentiel.

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 et l'hématite qui sont autant de signatures minéralogiques des formations latéritiques. La calcite magnésienne et l'aragonite sont également présentes et mettent en évidence l'importante influence marine ; l'aragonite étant, en particulier, un des constituants des coquilles d'invertébrés.

Tableau 3 : Composition minéralogique des MES collectées en Baie Kwé.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goéthite	Autres
KW1- 2	▲		▲	▲	Hématite?
KW1- 5	▲		▲	▲	
KW1- 7	▲		▲	▲	
KW1-9	▲		▲	▲	

▲ = présence ; Δ = traces

4.2.1.4 Teneurs en carbonates

En Baie Kwé, les MES collectées sont constituées d'une importante fraction de carbonates (Figure 5). La composition d'un godet à l'autre est relativement constantes (%CaCO₃ = 69,3 ±3,6), si l'on fait exception des particules piégées dans le godet 7 (03-06 juillet) qui ne sont constituées que d'environ 60,0 %.

4.2.2 Canal de la Havannah (station St60SW)

4.2.2.1 Masses collectées

Les masses de MES collectées dans cette zone du Canal de la Havannah (Figure 5) sont, pour la même période, en moyenne 10 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 ($m = 0,70 \pm 0,63$ g), les valeurs variant de 0,03 g (godet 4 ; 22-25 juillet) à 2,29 g (godet 2 ; 14-17 juillet).

4.2.2.2 Compositions granulométriques

Pour l'analyse granulométrique, les faibles quantités en matière sédimentaire disponible ont conduit à regrouper une fraction des MES collectées dans chaque godet pour constituer 4 échantillons composites. Ces échantillons ont été constitués sur la base du regroupement de 3 prélèvements (Tableau 4).

Tableau 4 : Composition des échantillons composites pour les analyses granulométriques des MES collectées dans le Canal de la Havannah.

ECHANTILLON COMPOSITE	N° DES GODETS REGROUPES	DATES DE PRELEVEMENT
SW60-A	SW60-1, SW60-2, SW60-3	10-21 juillet
SW60-B	SW60-4, SW60-5, SW60-6	22 juillet – 02 août
SW60-C	SW60-7, SW60-8, SW60-9	03-14 août
SW60-D	SW60-10, SW60-11, SW60-12	15-26 août

Comme pour la Baie Kwé, la distribution des populations granulométriques montre une variation relativement importante qui affecte toutes classes de grains. Cette observation est particulièrement avérée pour les populations de très petites tailles ($0,02-2\ \mu\text{m}$) et intermédiaires ($2-20\ \mu\text{m}$) ainsi que les plus grosses ($\varnothing > 20\ \mu\text{m}$, Figure 4). Cette dernière classe est la plus importante et devient prépondérante dans l'échantillon composite SW60-B (57,5 %) alors que dans le même échantillon les fractions fines ($0,02 < \varnothing < 2\ \mu\text{m}$ et $2 < \varnothing < 20\ \mu\text{m}$) montrent respectivement leurs valeurs minimales. Cette évolution correspond à une situation météorologique entièrement dominée par des vents de W et E qui ne favorisent pas l'apport de masses d'eau côtières enrichies en particules remises en suspension et transportées vers le large ; les eaux océaniques pauvres en MES terrigènes occupent alors tout le domaine, seuls les tests carbonatés de micro-organismes qui sont transportés avec les eaux sédimentent.

Dans le Canal de la Havannah non plus, aucune évolution particulière des populations n'a été observée en fonction de la pluie.

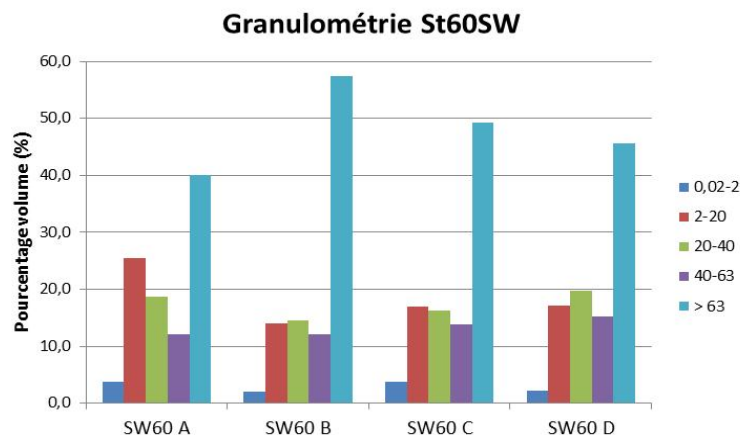


Figure 4 : Distribution granulométriques des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel.

4.2.2.3 Compositions minéralogiques

Les analyses réalisées (Tableau 5) montrent que les MES sont composés de minéraux comme la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite qui mettent en évidence la dominance quasi-totale de l'influence marine ; l'aragonite étant, en particulier, un des constituants des coquilles d'invertébrés. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques est juste décelée.

Tableau 5 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah.

ECHANTILLON	Calcite (Mg)	Calcite	Aragonite	Goethite	Autres
SW60 9	▲	▲	▲		
SW60 B	▲	▲	▲		
SW60 C	▲	▲	▲		
SW60 D	▲	▲	▲	Δ	

▲ = présence ; Δ = traces

4.2.2.4 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans les MES du Canal de la Havannah (Figure 5) sont très élevées. La valeur moyenne est de $91,0 \pm 3,0 \%$; cette teneur moyenne est similaire à celles déjà observées pour cette zone est qui est de $93,5 \%$ (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230, 2007).

Remarque : *La quantité de matière particulaire collectée dans le godet 4 (22-25 juillet) étant trop faible, les analyses des carbonates n'ont pu être conduites.*

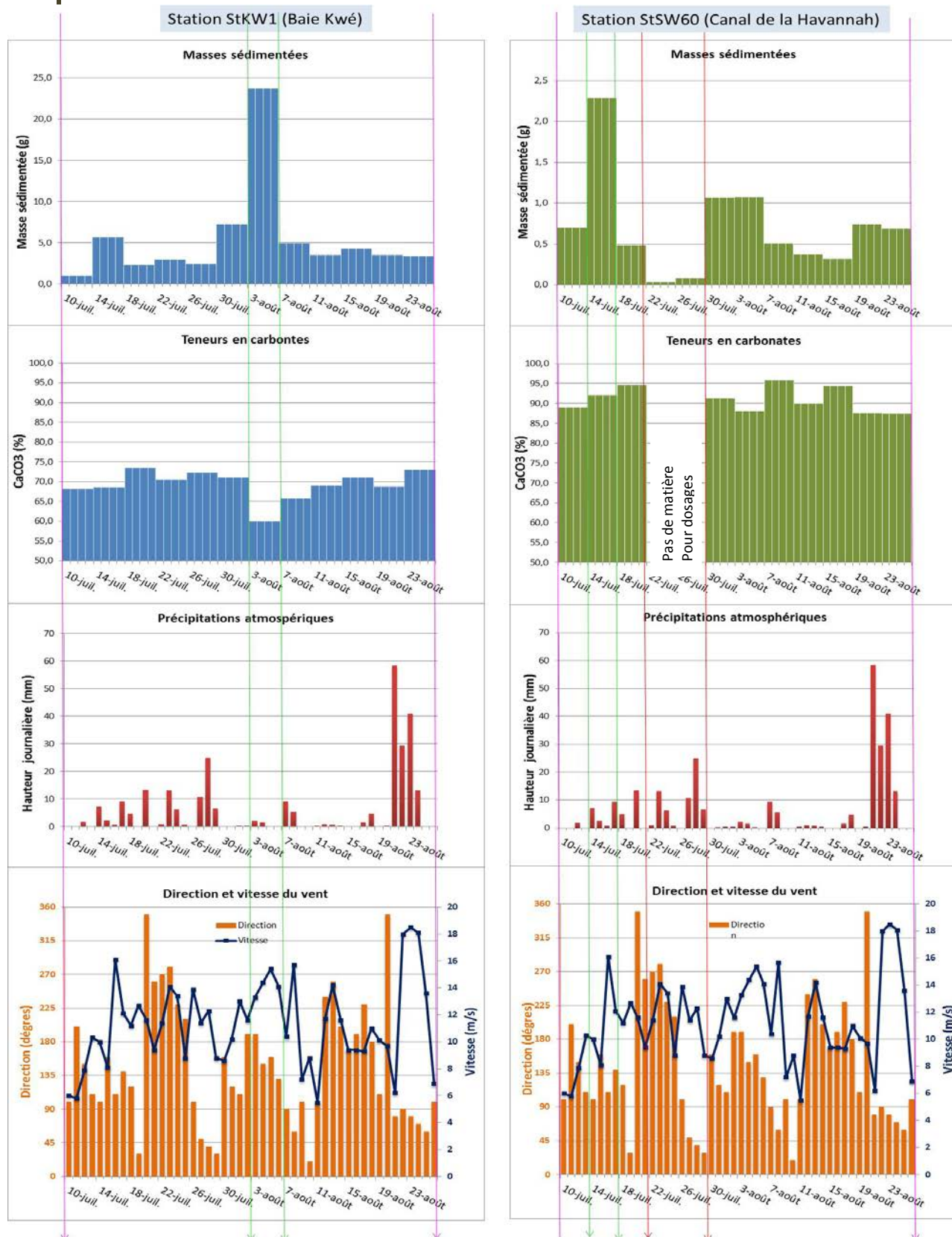


Figure 5 : Période du 10 juillet au 26 août 2011 ; évolution temporelle des masses sédimentées dans les godets et des teneurs en carbonates des MES collectées au regard des paramètres météorologiques (précipitation, direction et vitesse des vents) pour les stations de la Baie Kwé (StKW1) et du Canal de la Havannah (StSW60).

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 sédiments séquentiels sont regroupées en Annexe 4.

4.3.1 Baie Kwé (station StKW1)

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

Exception faite de Ca, 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).

Tableau 6 : Concentrations moyennes, écart-type et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 10 juillet et le 26 août 2011.

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	206 841	65	2 410	67 860	567	1 198
MAX	284 302	100	3 387	92 369	805	1 646
MOYENNE	256 455	83	2 945	81 853	703	1 460
ECART-TYPE	19 652	10	257	6 980	75	132
% RSD	8	12	10	9	11	9

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 latéritiques ; pendant l'échantillonnage aucune variation notable dans la nature des apports terrigènes n'est observable.

A l'inverse, les concentrations en calcium montrent une anti-corrélation avec les métaux d'origine terrigène dont linéarité n'est cependant pas très clairement définie (Tableau 7) ; les coefficients de corrélations sont plus faibles. Traceur de l'influence marine, le calcium devrait figurer en concentrations équivalentes au cours du temps, toutefois, les fluctuations observées (Figure 6) traduisent la mise en place de mécanismes non explicités à ce jour.

Tableau 7 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 10 juillet et le 26 août 2011.

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	-0,808	1				
Cr	-0,832	0,977	1			
Fe	-0,771	0,970	0,981	1		
Mn	-0,828	0,985	0,971	0,981	1	
Ni	-0,761	0,955	0,962	0,993	0,980	1

La normalisation des concentrations du calcium par le fer (Ca/Fe) souligne de manière nette les évolutions relatives distinctes des deux éléments (Figure 6). Ainsi, deux périodes sont mises en évidence, la première concernant le godet 4 (22-25 juillet) pendant laquelle la proportion de calcium augmente très sensiblement ($\approx +30\%$) ; la deuxième, au niveau du godet 7 (3-6 août) où cette fois-ci la proportion de décroît ($\approx -30\%$).

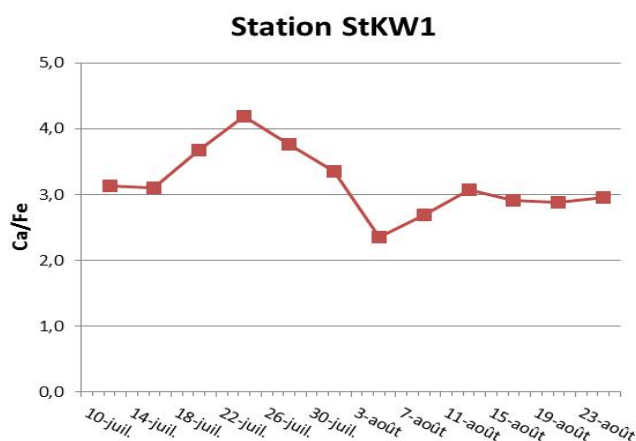


Figure 6 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé entre le 10 juillet et le 26 août 2011.

4.3.2 Canal de la Havannah (station St60SW)

4.3.2.1 Concentration en métaux et calcium

Les éléments analysés dans les MES du Canal ont permis de mettre évidence principalement l'influence marine (Ca) mais également les apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) bien que moins marquée que pour les particules de la Baie Kwé. Par ailleurs, les concentrations obtenues montrent des variations en concentrations plus importantes (Tableau 8) d'un godet à l'autre que dans le cas précédent : 8-12% en Baie Kwé selon les éléments, contre 7 à 24% dans le Canal. Toutefois, pour chaque élément, les concentrations suivent une évolution temporelle.

Les concentrations mesurées sont tout à fait similaires aux résultats de 2007 (Contrat ŒIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012).

Tableau 8 : Concentrations moyennes, écart-type et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 10 juillet et le 26 août 2011 ; (n= 12).

	ELEMENT ANALYSE (mg/kg)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
MIN	273 082	8	327	9 515	109	165
MAX	330 781	16	535	17 204	193	359
MOYENNE	301 618	12	390	12 222	139	238
ECART-TYPE	19 134	3	61	2 103	27	58
% RSD	3	22	16	17	20	24

La matrice de corrélation met en évidence une seule similarité de comportement entre Fe et Cr (seuil de 0,95) (Tableau 9). Pour les autres éléments métalliques (Co, Mn et Ni), si les coefficients de corrélations sont souvent

acceptables, ils montrent une relative dispersion tendant à traduire des évolutions relativement comparables en termes de concentration.

Les concentrations en calcium évoluent de manière très différentes de celles des métaux traces (Co, Cr, Fe, Mn et Ni).

La normalisation des concentrations du fer par le calcium souligne les évolutions relatives distinctes des deux éléments (Figure 7) malgré un fond géochimique plus homogène que dans le cas des MES de la Baie Kwé. En effet, les MES du godet 3 (18-21 juillet) notamment, diffèrent très notablement (environ 25 %) des autres prélèvements.

Remarque : La quantité de matière particulaire collectée dans le godet 4 (22-25 juillet) étant trop faible, les analyses des éléments métalliques n'ont pu être conduites.

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 10 juillet et le 26 août 2011 ; (n= 11 ; la masse du godet 5 trop faible).

	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1					
Co	0,298	1				
Cr	0,510	0,874	1			
Fe	0,409	0,916	0,984	1		
Mn	0,272	0,869	0,804	0,836	1	
Ni	0,312	0,931	0,813	0,841	0,921	1

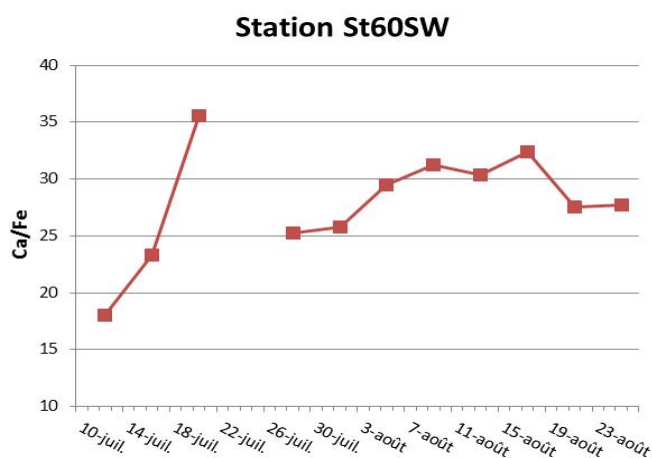


Figure 7 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 10 juillet et le 26 août 2011.

4.3.2.2 Teneurs en soufre

Les teneurs en soufre ne montrent pas d'évolution particulière au cours du temps au niveau des MES collectées près du diffuseur ; le niveau de concentration en soufre des particules est de $2\,229 \pm 221$ mg/kg. Cette valeur est en accord avec le bruit de fond géochimique obtenu dans le cadre de la surveillance des sédiments du port de commerce.

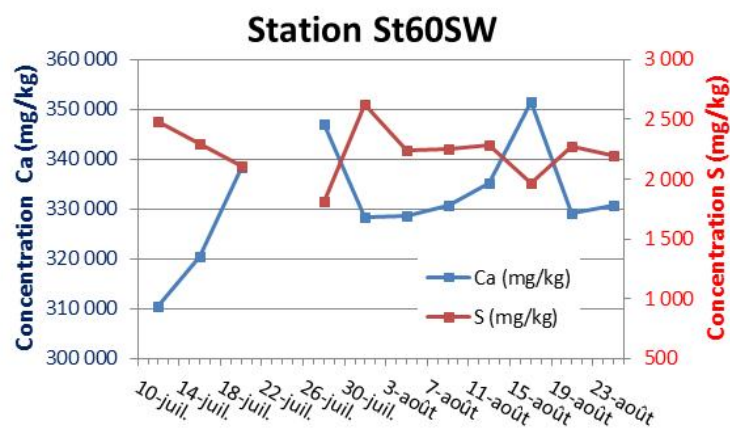


Figure 8 : Concentrations en calcium et soufre dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 10 juillet et le 26 août 2011.

CE QU'IL FAUT RETENIR

Durant la période de mouillage des pièges, les conditions météorologiques ont été celles rencontrées en « saisons fraîches » : atmosphères instables générant des vents de secteurs W, N et E. Les pluies ont été négligeables exception faite de 3 jours en fin de mouillage (128, 6 mm du 21-23 août).

Les précipitations atmosphériques ne semblent être le facteur prépondérant de l'augmentation des MES mesurée dans les eaux, notamment de la Baie Kwé. En revanche, l'action combinée de la direction et de la vitesse du vent montrent une relation avec la quantité de MES collectée par les pièges à sédiments.

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 changements de conditions météorologiques observés.

L'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques et géochimiques suivis dans les MES diffère notablement entre la Baie Kwé et le Canal de la Havannah. Pour la période d'études, les eaux du Canal (au niveau du diffuseur) ne semblent pas être notablement influencées par la charge particulaire terrigène issue de la Kwé, les teneurs en carbonates sont environ de 92% près du diffuseur et 70 % dans la baie.

5 INTERPRETATION

5.1 INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

5.1.1 Baie Kwé,

Dans les conditions climatiques de la collecte de MES (10 juillet-26 août), le lessivage des sols dus aux précipitations atmosphériques ne semble pas avoir été le phénomène principal de l'apport de MES. En effet, durant les fortes pluies de fin de période (128,6 mm du 21 au 23 août), il n'a été collecté qu'environ 3,5 g de MES (Figure 5) ; cette masse étant très inférieure à celle mesurée entre le 03 et le 06 août (23,7 g) où ne sont tombées que des quantités négligeables de pluie (4 mm).

La masse collectée par piège provient donc d'un autre mécanisme 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 (10-16 juillet), N puis W (17-29 juillet) et W tournant à E (12-26 août) 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 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. Ce mécanisme est probablement à l'origine du piégeage de l'importante masse de MES constaté entre le 03 et le 06 août sous l'action de vents soutenus (11,6 m/s, soit 23 nœuds) de secteurs S à S-SE forçant jusqu'à 15,4 m/s (31 nœuds).

Les hypothèses sont confortées par :

- la diminution conjointe et substantielle des teneurs en carbonates des MES qui passent de plus de 70 % à environ 60 % ;
- la diminution du rapport Ca/Fe qui traduit une augmentation en particules terrigènes (Figure 5) ;
- Le pic de concentration de Fe (Figure 9) et des autres métaux, traceurs des apports latéritiques.

Remarque : L'augmentation du rapport Ca/Fe (22-25 juillet) est en parfait accord avec les hypothèses émises puisque la prépondérance des fractions carbonatées (probablement d'origine biogène) correspond à une période particulièrement longue de vents de secteurs N à W (19-25 juillet).

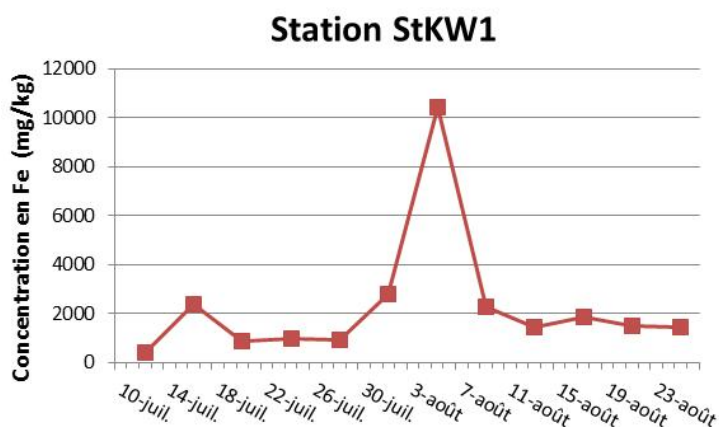


Figure 9 : Distribution des concentrations en Fe dans MES collectée du Canal de la Havannah entre le 10 juillet et le 26 août.

5.1.2 Canal de la Havannah

Au niveau du diffuseur, l'effet des précipitations atmosphériques ne semble pas non plus avoir été notable, dans les conditions météorologiques de la période d'études ; en effet, ni les quantités collectées restent dans la moyenne des valeurs enregistrées, ni les compositions en métaux n'ont montré de variations durant les pluies d 21 au 23 août.

En revanche, le vent semble aussi être à l'origine des deux modulations observées, la première du 14 au 17 juillet et la deuxième du 22 au 29 juillet. Ces deux périodes correspondent aux masses de MES collectées respectivement, la plus élevée (2,3 g, coïncidant avec des vents de secteur SE) et la plus basse (< 0,01 g, régimes de secteurs N à W). Par ailleurs, les concentrations en calcium qui reflètent les teneurs en carbonates indiquent les vents de secteur SW et SE, et plus généralement provenant du large, favorisent le déplacement des masses d'eau enrichies en débris carbonatés (tests de micro-organismes marins). Parallèlement, la distribution temporelle de Fe montre un appauvrissement drastique (Figure 10) et des autres métaux, signatures des apports terrigènes ; les valeurs maximales rencontrées en Fe correspondent aux régimes de secteurs E-SE dépassant les 10 m/s (20 nœuds) comme entre le 14 et 17 juillet.

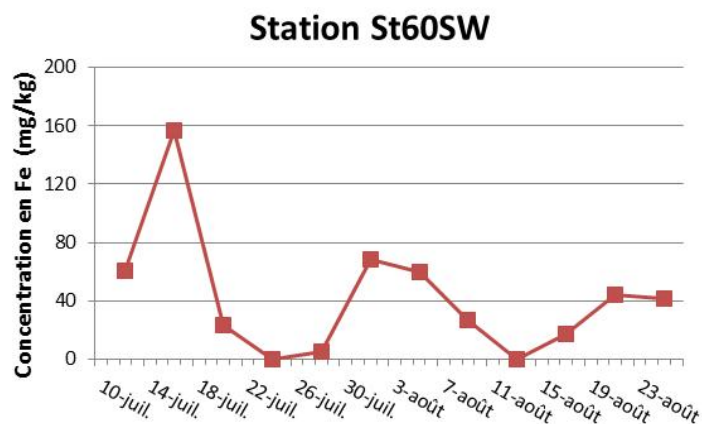


Figure 10 : Distribution des concentrations en Fe dans MES collectée du Canal de la Havannah entre le 10 juillet et le 26 août.

5.2 CALCUL DES FLUX DE MATIERE

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

Les densités de flux en matière en suspension et en métaux sont conformes aux estimations réalisées lors de la définition de « l'Etat de référence » de 2007 (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230, 2007 ; contrat OEIL/AEL, n°110328-OE-03, 2012). Les valeurs mesurées en 2011 sont données dans les Tableau 10 et Tableau 11.

MATIERE EN SUSPENSION

Tableau 10 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en matière particulaire au niveau des stations KW1 (Baie Kwé) et 60SW (Canal de la Havannah) ; comparaison des valeurs obtenues en 2011 avec celles mesurées en 2007 (Etat de référence, station T4M)).

	VALEUR DU FLUX (mg/m ² /j)	BAIE KWE (KW1)	CANAL DE LA HAVANNAH (60SW)
Etat de référence (T4M)	Minimum	8,0	0,7
	Maximum	168,4	14,8
Suivi 2011	Minimum	5,0	0,2
	Maximum	118,5	11,4

ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM

Tableau 11 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium au niveau des stations StKW1 (Baie Kwé) et St60SW (Canal de la Havannah).

		DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Baie Kwé	Minimum	1036	0,4	14,6	409	3,5	7,4
	Maximum	1424	11,4	392,8	10460	94,5	185,8
C Havannah	Minimum	1090	0,01	0,2	0,2	0,08	0,05
	Maximum	1233	0,16	5,0	156,9	1,59	2,74

CE QU'IL FAUT RETENIR

Pour la période étudiée (saison fraîche, 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 l'action mécanique de la houle, elle-même générée par les vents. Toutefois, 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 mais également le long des côtes. Une fraction de ces particules suit ensuite les courants dominant vers le secteur E du Canal.

Dans le Canal, l'alimentation en particules quasi exclusivement carbonatées (22-29 juillet) coïncident avec les vents de secteurs SW à W qui balayent l'important système récifal du lagon sud-est.

Les valeurs de flux de matière (MES et métaux) entrent toutes dans les gammes observées antérieurement.

6 CONCLUSION

Pour la période d'études comprise en le 10 juillet et le 26 août 2011 (saison fraiche), les principales conclusions sont les suivantes :

1. Peu de pluies ont été enregistrées durant cette période d'études. Les précipitations les plus importantes (128,3 mm cumulés en 3 jours) ne semblent pas avoir généré de couches turbides notables dans la Baie Kwé. Les vents ont montré une variabilité temporelle conduisant à une alternance des régimes de secteurs E à W majoritairement avec des rotations au S et au N. Les vitesses se sont maintenues relativement constantes sauf en début et fin de période.
2. La Baie Kwé étant tout particulièrement abritée des vents de secteurs E, N et W, les MES présentes dans l'eau sont générées sous certaines conditions précises de direction et de vitesse de vents (secteurs S, vitesse > 10 m/s) ; au niveau de la station de mouillage des pièges, les particules fines restent plus longtemps en suspension et deviennent alors majoritaires dans les eaux qui sortent de la baie pour se déverser dans le Canal de la Havannah ; les particules sont alors transportées principalement vers le SW (Douillet et Fernandez, 2009).
3. A l'inverse, les vents de secteurs S dominants permettent aux populations de particules les plus grosses de rester en suspension. Ces particules sont reprises sur les fonds silto-vaseux peu profonds de la baie (<10 m). Toutefois, leur masse plus importante, les oblige à sédimenter rapidement dès lors que l'action mécanique de la houle induite par le vent vient à cesser.
4. Dans le Canal de la Havannah, les particules qui ont sédimenter entre le 14 et le 17 juillet sont en quantité relativement importantes, les flux moyens pour cette période représentant (11,4 mg/m²/j). Toutefois, si 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 réduite 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.
5. 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 (%CaCO₃ > 95). Cette prédominance s'explique par la présence dans l'eau de débris générés par les systèmes récifaux du large.
6. 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.

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.

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.

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'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 StKW1.	10
FIGURE 2 : PUISSANCE TYPE DE L'ÉPAISSEUR DE MARQUAGE PAR L'EFFLUENT (RHODAMINE) POUR DES CONDITIONS COURANTOLOGIQUES DE MAREES DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET DE VIVE-EAU (DROITE) AU NIVEAU DE LA STATION St60-SW.	10
FIGURE 3 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS EN BAIE KWE PAR LE PIÈGE À SEDIMENTS SÉQUENTIEL.	13
FIGURE 4 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUES DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIÈGE À SEDIMENTS SÉQUENTIEL.	15
FIGURE 5 : PÉRIODE DU 10 JUILLET AU 26 AOÛT 2011 ; ÉVOLUTION TEMPORELLE DES MASSES SEDIMENTÉES DANS LES GODETS ET DES TENEURS EN CARBONATES DES MES COLLECTÉES AU REGARD DES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES (PRÉCIPITATION, DIRECTION ET VITESSE DES VENTS) POUR LES STATIONS DE LA BAIE KWE (StKW1) ET DU CANAL DE LA HAVANNAH (St60SW).	17
FIGURE 6 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTÉES EN BAIE KWE ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOÛT 2011.	19
FIGURE 7 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTÉES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOÛT 2011.	20
FIGURE 8 : CONCENTRATIONS EN CALCIUM ET SOUFRE DANS LES MES COLLECTÉES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOÛT 2011.	21
FIGURE 9 : DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS EN Fe DANS MES COLLECTÉE DU CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOÛT.	23
FIGURE 10 : DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS EN Fe DANS MES COLLECTÉE DU CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOÛT.	23

9 LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LOCALISATION 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 (Sr60-SW ET StKW1) ET PERIODES DE COLLECTE.	11
TABLEAU 3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES EN BAIE KWE.	14
TABLEAU 4 : COMPOSITION DES ECHANTILLONS COMPOSITES POUR LES ANALYSES GRANULOMETRIQUES DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH.	14
TABLEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH.....	15
TABLEAU 6 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPE ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOUT 2011.	18
TABLEAU 7 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOUT 2011.	18
TABLEAU 8 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPE ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 10 JUILLET ET LE 26 AOUT 2011 ; (N= 12).	19
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 10 JUILLET ET LE 26 AOUT 2011 ; (N= 11 ; LA MASSE DU GODET 5 TROP FAIBLE).	20
TABLEAU 10 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE AU NIVEAU DES STATIONS KW1 (BAIE KWE) ET 60SW (CANAL DE LA HAVANNAH) ; COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES EN 2011 AVEC CELLES MESUREES EN 2007 (ETAT DE REFERENCE, STATION T4M)).	24
TABLEAU 11 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM AU NIVEAU DES STATIONS STKW1 (BAIE KWE) ET ST60SW (CANAL DE LA HAVANNAH).....	24

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 COLLECTEES : MASSES COLLECTEES,
GRANULOMETRIE DES POPULATIONS DE GRAINS, COMPOSITION MINERALOGIQUE,
TENEURS EN CARBONATES ET DES OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES DES MES DE LA BAIE
KWE ET DU CANAL DE LA HAVANNAH.**

**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 (Technicap, type PPS4/3) qui est gréé sur une ligne de mouillage équipée avec un largeur acoustique. La durée d'immersion a été de 1,5 mois environ (10 juillet -26 août 2011).

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 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$) 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_2 . 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 $< 40 \mu\text{m}$ après élimination des organismes « actifs » (Swimmers). La distribution de ces populations est réalisée par granulométrie laser après remise en suspension des sédiments, ajout d'agent dispersant (Pyrophosphates de Na/K) et agitation aux ultrasons. Seulement 4 échantillons par carrousel sont analysés.

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.

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 des sédiments par fusion alcaline. Seuls, Ca et 5 métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont analysés par ICP-OES.

Dosage du soufre

Le dosage du soufre est conduit par attaque totale des fractions pélitiques des sédiments par fusion alcaline. L'analyse 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.

Pluie (mm)	T min	T max	Vit max (m/s)	Direction (°)	Date
0	15,4	22	6	100	10-juil.-11
0	17,4	22,9	5,8	200	11-juil.-11
1,8	16,1	22,4	7,9	150	12-juil.-11
0	18,5	21,3	10,3	110	13-juil.-11
7,2	16,8	22,9	10	100	14-juil.-11
2,4	18,1	21	8,1	160	15-juil.-11
0,8	17,7	19,7	16,1	110	16-juil.-11
9,2	17,8	20,5	12,1	140	17-juil.-11
4,8	18,5	21,8	11,2	120	18-juil.-11
0	19,4	25,5	12,7	30	19-juil.-11
13,4	19,8	24,5	11,6	350	20-juil.-11
0	18,5	23,7	9,4	260	21-juil.-11
1	16,3	22,8	11,4	270	22-juil.-11
13,1	15	22,1	14,1	280	23-juil.-11
6,2	15,7	20,8	13,4	230	24-juil.-11
0,8	14,7	20,5	8,8	210	25-juil.-11
0	14,8	20,4	13,9	100	26-juil.-11
10,7	17,7	20,1	11,4	50	27-juil.-11
24,8	18,4	20,5	12,3	40	28-juil.-11
6,6	16,5	19,3	8,8	30	29-juil.-11
0	17	21,5	8,6	160	30-juil.-11
0,2	18,4	21,7	10,2	120	31-juil.-11
0,4	16	21,5	13	110	1-août-11
0,4	18,1	20,9	11,6	190	2-août-11
2,2	14,5	20,6	13,3	190	3-août-11
1,6	15	20	14,4	150	4-août-11
0,2	16,7	20,3	15,4	160	5-août-11
0	17,3	20,9	14,1	130	6-août-11
9,2	16,1	20,2	10,4	90	7-août-11
5,6	16,8	21,4	15,7	60	8-août-11
0	15,6	24	7,2	100	9-août-11
0	16,8	25,6	8,8	20	10-août-11
0,4	16,8	22,7	5,5	100	11-août-11
1	15,4	24,4	11,7	240	12-août-11
0,8	17,6	21,5	14,2	260	13-août-11
0,4	16,9	20,5	11,6	200	14-août-11
0	15	20,4	9,4	170	15-août-11
0	13,1	19,9	9,4	190	16-août-11
1,6	12,7	20,8	9,3	230	17-août-11
4,7	14,8	18,4	11	180	18-août-11
0	12,3	21,7	10,1	110	19-août-11

Pluie (mm)	T min	T max	Vit max (m/s)	Direction (°)	Date
58,3	17,3	19,6	6,2	80	21-août-11
29,4	16,3	19,8	18	90	22-août-11
40,9	18	22,4	18,5	80	23-août-11
13,2	19,1	22,1	18,1	70	24-août-11
0	20,8	25,2	13,6	60	25-août-11
0	19,5	25,1	6,9	100	26-août-11

ANNEXE – 3

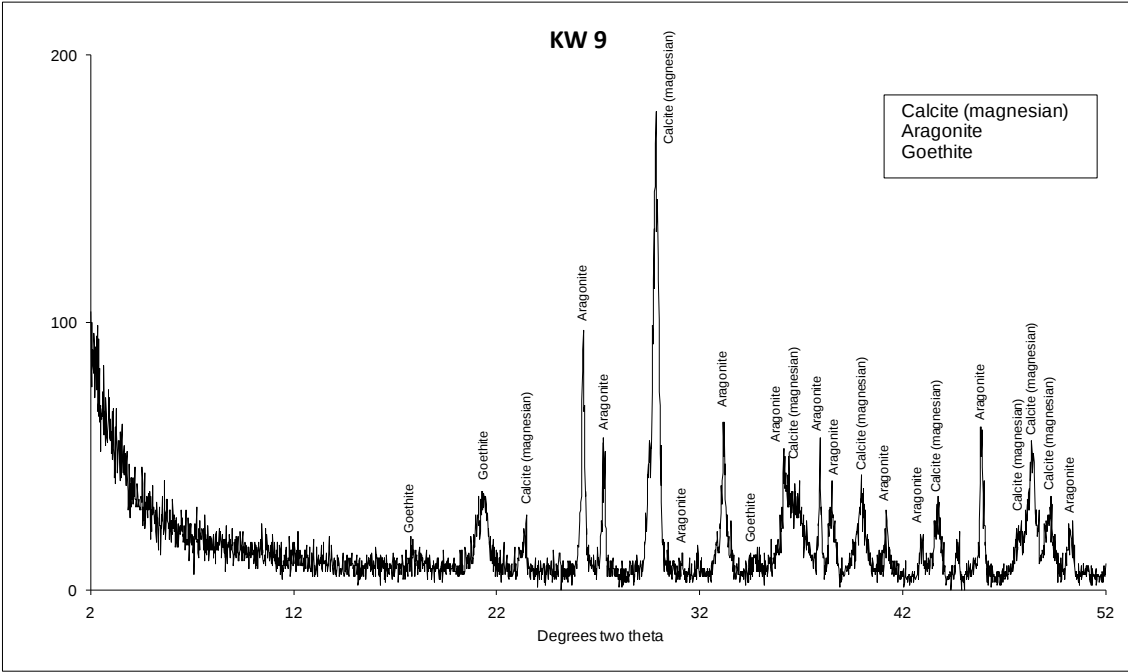
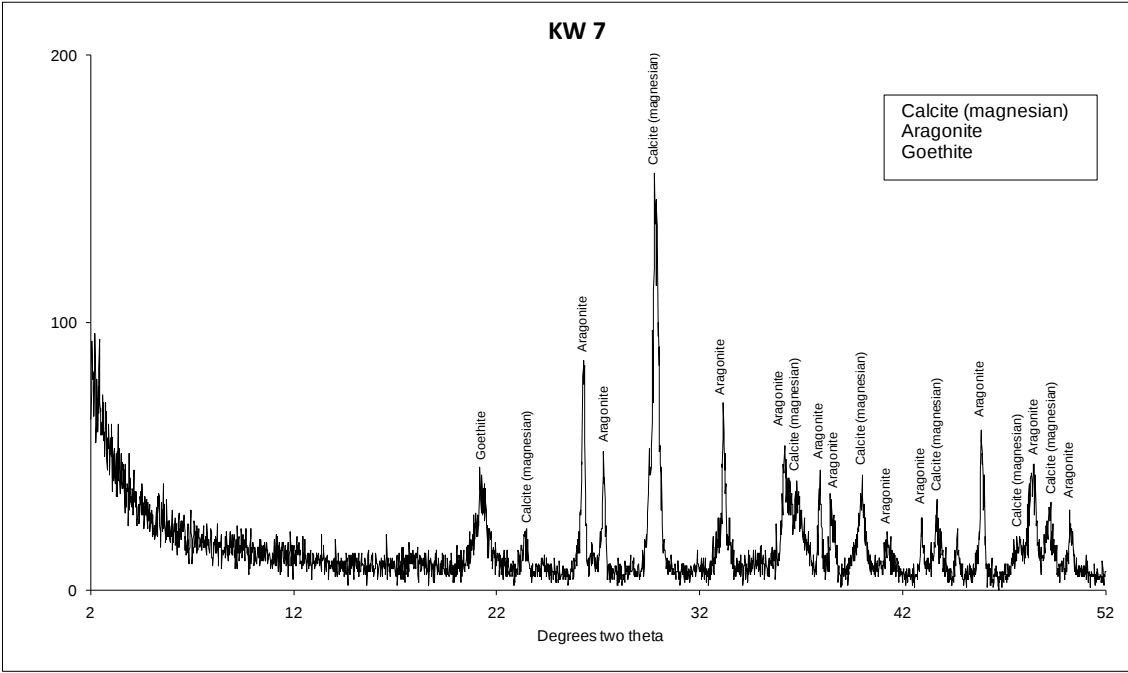
Résultats d'analyses et mesures des MES collectées : masses collectées, granulométrie des populations de grains, composition minéralogique, teneurs en carbonates et des observations microscopiques des MES de la Baie Kwé et du Canal de la Havannah.

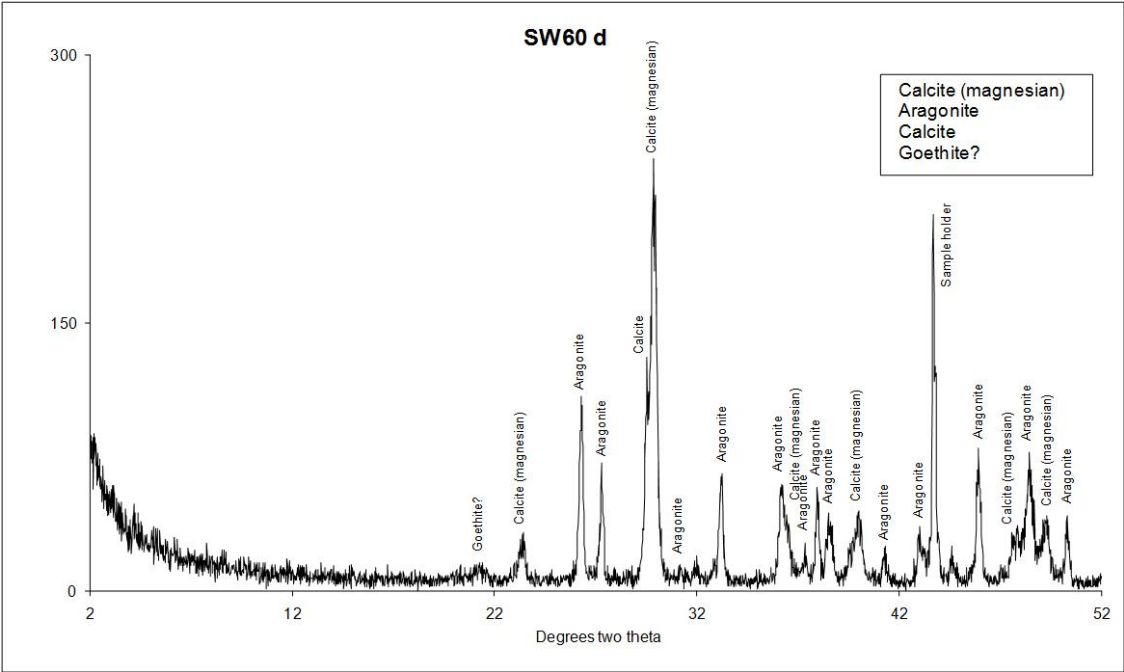
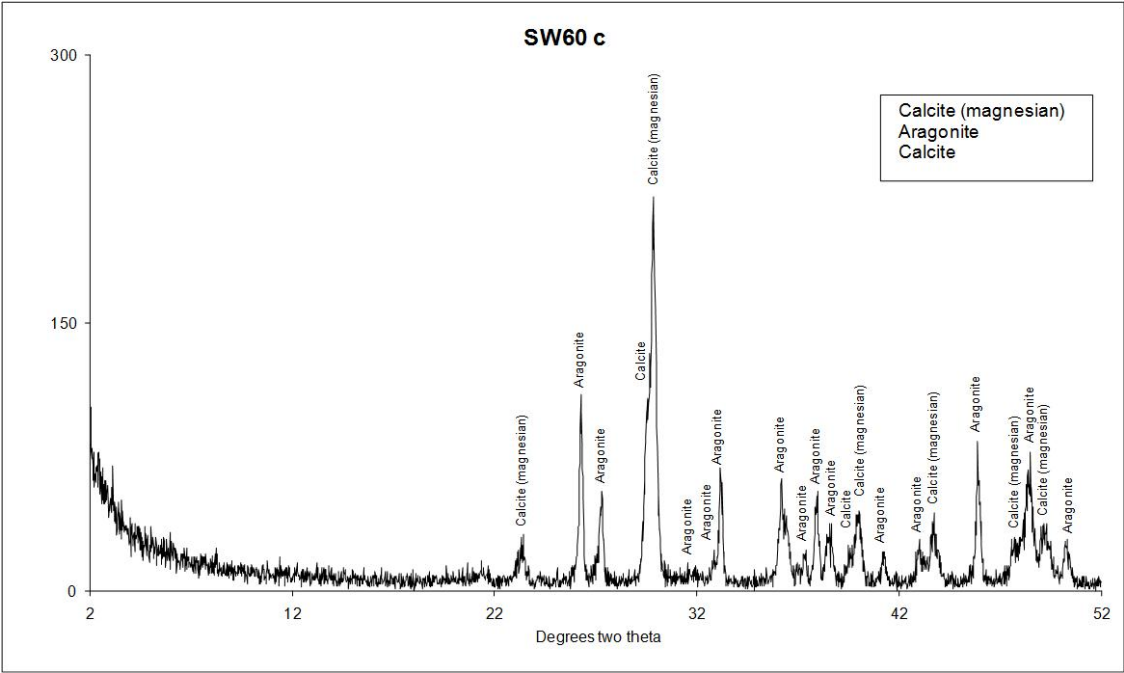
MES SEDIMENTEE

STATION	PERIODE DE COLLECTE	MASSE COLLECTEE (g)	STATION	PERIODE DE COLLECTE	MASSE COLLECTEE (g)
KW1-1	10-13 juillet-	1,0014	SW60-1	10-13 juillet-	0,702
KW1-2	14-17 juillet	5,6888	SW60-2	14-17 juillet	2,2857
KW1-3	18-21 juillet	2,3056	SW60-3	18-21 juillet	0,4809
KW1-4	22-25 juillet	2,9658	SW60-4	22-25 juillet	0,0347
KW1-5	26-29 juillet	2,4572	SW60-5	26-29 juillet	0,0784
KW1-6	30 juillet-02 août	7,2208	SW60-6	30 juillet-02 août	1,0676
KW1-7	03-06 août	23,7083	SW60-7	03-06 août	1,0742
KW1-8	07-10 août	4,9263	SW60-8	07-10 août	0,5126
KW1-9	11-14 août	3,4805	SW60-9	11-14 août	0,3696
KW1-10	15-18 août	4,3005	SW60-10	15-18 août	0,3154
KW1-11	19-22 août	3,5328	SW60-11	19-22 août	0,7421
KW1-12	23-26 août	3,3761	SW60-12	23-26 août	0,6884

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	3,9	30,2	27,2	8,9	8,2	18,0	3,6
KW1-5	13,4	33,6	20,8	6,7	6,2	13,3	6,1
KW1-7	9,8	28,5	21,0	7,5	7,5	21,1	4,5
KW1-9	5,2	36,3	25,9	7,6	6,7	14,4	4,0
SW60 A	3,7	25,4	18,6	6,1	6,0	21,5	18,6
SW60 B	1,9	14,0	14,5	5,9	6,3	26,0	31,5
SW60 C	3,8	16,9	16,2	6,7	7,1	28,2	21,1
SW60 D	2,2	17,2	19,8	7,5	7,7	28,7	17,0



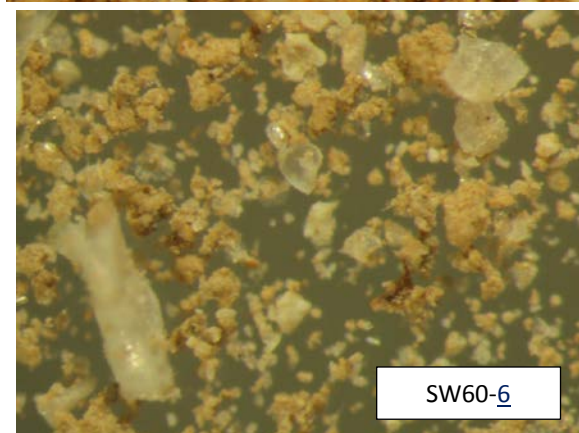
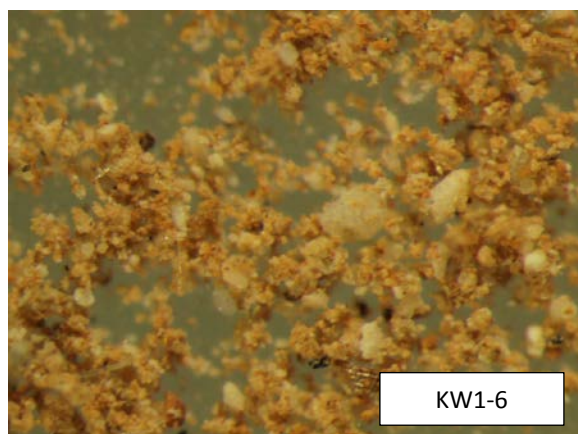


TENEURS EN CARBONATES

STATION	CaCO ₃ (%)	STATION	CaCO ₃ (%)
KW1-1	68,1	SW60-1	89,1
KW1-2	68,6	SW60-2	92,1
KW1-3	73,5	SW60-3	94,5
KW1-4	70,5	SW60-4	Nd
KW1-5	72,3	SW60-5	Nd
KW1-6	71,0	SW60-6	91,1
KW1-7	60,0	SW60-7	88,0
KW1-8	65,7	SW60-8	95,8
KW1-9	69,0	SW60-9	90,0
KW1-10	71,0	SW60-10	94,4
KW1-11	68,7	SW60-11	87,5
KW1-12	73,0	SW60-12	87,4

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE (GROSSISSEMENT X 11,5)



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).

ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
KW1-1	256186	78	2912	81728	696	1480
KW1-2	259870	84	2983	83938	711	1481
KW1-3	273654	72	2632	74633	615	1307
KW1-4	284302	65	2410	67860	567	1198
KW1-5	277635	72	2598	73754	618	1318
KW1-6	262205	77	2881	78273	658	1378
KW1-7	206841	96	3314	88242	797	1567
KW1-8	248664	100	3387	92369	805	1646
KW1-9	258458	89	3031	84265	750	1512
KW1-10	253588	88	3131	87107	744	1554
KW1-11	246169	87	3098	85340	730	1539
KW1-12	249884	86	2965	84726	749	1542

ECHANTILLON	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
SW60-1	310 530	16	535	17204	191	324
SW60-2	320 388	14	440	13728	139	239
SW60-3	338 333	8	327	9515	109	165
SW60-4	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SW60-5	347 088	16	432	13733	193	359
SW60-6	328 247	13	407	12734	121	263
SW60-7	328 716	11	352	11139	131	208
SW60-8	330 627	11	346	10571	125	191
SW60-9	335 192	11	333	11055	127	208
SW60-10	351 416	10	364	10861	121	202
SW60-11	329 089	11	378	11962	139	230
SW60-12	330 695	12	376	11944	136	232

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée

STATION	Soufre (mg/kg)
SW60-1	2 478
SW60-2	2 290
SW60-3	2 110
SW60-4	nd
SW60-5	1 809
SW60-6	2 624
SW60-7	2 236
SW60-8	2 251
SW60-9	2 284
SW60-10	1 966
SW60-11	2 277
SW60-12	2 196

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée