



**SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DES
PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, LA
BAIE KWE ET LA RADE NORD DE PRONY: MISSION
SEPTEMBRE-OCTOBRE 2014**



29 Janvier 2015

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

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

Convention n° 3052-2013

Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony: mission septembre-octobre 2014

Achard Romain

Fernandez Jean Michel

Kaplan Hélène

Pluchino Stéphanie

Moreton Benjamin

Haddad Laurent

| | N/Ref | V/Ref | |
|-----------------------|---|--------------------------------|------------|
| Identification | 121205-VI-18 | Contrat C3052 / PO E55912/0001 | |
| Titre complet | Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony: mission septembre-octobre 2014 | | |
| Auteurs | Achard R, Fernandez JM, Moreton B, et L.Haddad | | |
| Résumé | <p>Le programme de travail présenté fait suite à la définition de « l'Etat de référence » des densités de flux verticaux de particules déterminées pour le Canal de la Havannah, la Rade Nord et la Baie Kwé en 2007 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1230) et aux suivis de ces flux pour la période 2011-2013. Ce programme constitue la troisième campagne de suivi semestriel de 2013-2015. L'étude consiste au suivi temporel des densités de flux verticaux afin d'estimer les apports métalliques véhiculés par les particules fines au niveau de la Kwé, du diffuseur marin et de la Rade Nord. A cet effet, trois mouillages de lignes équipées de pièges à sédiments séquentiels ont été réalisés.</p> <p>Les différentes campagnes réalisées permettent d'établir une relation entre les conditions météorologiques et la distribution des MES dans les eaux, en Baie Kwé, en Rade Nord et dans le Canal de la Havannah, notamment les régimes de vents qui peuvent conditionner les panaches d'apport terrigène en Rade Nord et l'action mécanique de la houle en Baie Kwé ainsi que dans le Canal Havannah.</p> <p>Les paramètres physico-chimiques et géochimiques analysés montrent des évolutions temporelles pour les trois stations étudiées. Pour la Baie Kwé, les valeurs de flux de MES et de flux métalliques sont retombées au niveau des valeurs définies lors des états de référence, cette baisse s'expliquerait par des précipitations et des vitesses de vents faibles ainsi que par des modifications des infrastructures du bassin versant.</p> <p>De même pour la Rade Nord, les densités de flux sont proches des valeurs de références sauf pour le Cr qui présente toujours des valeurs fortes qui seraient induites par une lixiviation des horizons latéritiques superficiels enrichis en Cr.</p> <p>Pour le Canal de la Havannah, une augmentation de 28 % de la densité moyenne des flux de MES a été constatée sans hausse des flux métalliques, en effet ces derniers sont légèrement plus faibles que les flux métalliques moyens de juillet-août 2013 mais ils restent cependant deux fois plus élevés que les états de référence (février-mars 2007 et novembre-décembre2007).</p> | | |
| APPROBATION | | | |
| FONCTION | NOMS | VISA | DATE |
| Rédacteur | Achard R. | | 25/08/2014 |
| Vérificateur 1 | Fernandez J-M. | | 28/08/2014 |
| Vérificateur 2 | Pousse C. | | 26/01/2015 |
| Approbateur(s) | Fernandez J-M. | | |
| EVOLUTION | | | |
| VERSION | DESCRIPTION DES MISES A JOUR | | DATE |
| V1.0 | Rapport initial | | 01/09/2014 |
| COPIE - DIFFUSION | | | |
| NOM | ORGANISME | | |
| Casalis C. | Département environnement Vale-NC | | |

Ce rapport est cité comme suit :

Achard R, Fernandez JM, Kaplan H., Pluchino S., Moreton B. et Haddad L., 2014. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah, la Rade Nord et la Baie Kwé : mission de septembre-octobre 2014. Contrat Vale-NC/AEL n° 3052-2013, Rapport AEL 121205-VI-18, p66.

TABLE DES MATIERES

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCTION | 7 |
| 2 | OBJECTIFS..... | 8 |
| 3 | METHODOLOGIE | 9 |
| 3.1 | SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES | 9 |
| 3.2 | ECHANTILLONNAGE | 11 |
| 3.3 | PARAMETRES PHYSIQUES, GEOCHIMIQUES ET ANALYSES | 11 |
| 4 | RESULTATS | 12 |
| 4.1 | PARAMETRES METEOROLOGIQUES | 12 |
| 4.1.1 | Précipitations atmosphériques (station « Usine-pilote Vale-NC ») | 12 |
| 4.1.2 | Direction du vent (station récif « loro»)..... | 12 |
| 4.1.3 | Vitesse du vent (station du récif « loro»)..... | 13 |
| 4.2 | CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION | 14 |
| 4.2.1 | Baie Kwé (station St06-KW1)..... | 14 |
| 4.2.2 | Canal de la Havannah (station St60-NE)..... | 17 |
| 4.2.3 | Rade Nord de Prony (station St15)..... | 19 |
| 4.3 | COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION | 23 |
| 4.3.1 | Baie Kwé (station St06-KW1)..... | 23 |
| 4.3.2 | Canal de la Havannah (station St60-NE)..... | 25 |
| 4.3.3 | Rade Nord (station St15)..... | 28 |
| 5 | INTERPRETATION | 31 |
| 5.1 | INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES..... | 31 |
| 5.1.1 | Baie Kwé (Figure 21)..... | 31 |
| 5.1.2 | Canal de la Havannah (Figure 22)..... | 32 |
| 5.1.3 | Rade Nord (Figure 23) | 33 |
| 5.2 | CALCUL DES FLUX DE MATIERES | 37 |
| 6 | CONCLUSION | 42 |
| | REFERENCES | 44 |
| | LISTE DES FIGURES | 45 |
| | LISTE DES TABLEAUX | 47 |
| | LISTE DES ANNEXES | 49 |

1 INTRODUCTION

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

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

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

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

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

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

2 OBJECTIFS

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

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

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

3 METHODOLOGIE

3.1 SITE D'ETUDE ET CONDITIONS DE MOUILLAGES

Cette campagne d'étude des flux a été conduite du 3 septembre au 20 octobre 2014 (soit 48 jours de suivi). Les missions de mouillage et de récupération des lignes instrumentées ont été réalisées à bord de l'embarcation « Slavko ».

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

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

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

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

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

L'orifice du dispositif de collecte (piège) a été placé à 3 mètres au-dessus du fond. Cette cote est particulièrement importante à respecter, notamment à proximité du diffuseur pour échantillonner les particules véhiculées par l'effluent, même lorsque les conditions hydrodynamiques des marées de vive-eau s'exercent. Ce prérequis s'appuie sur les résultats du traçage réalisé à la rhodamine-WT (Contrat AEL/Vale-NC n° 20233 ;

Figure 2) ; la couche affectée par l'effluent n'étant que d'environ 5 m d'épaisseur lors des marées de vive-eau alors qu'elle dépasse amplement les 10 m par courants faibles (marées de morte-eau).

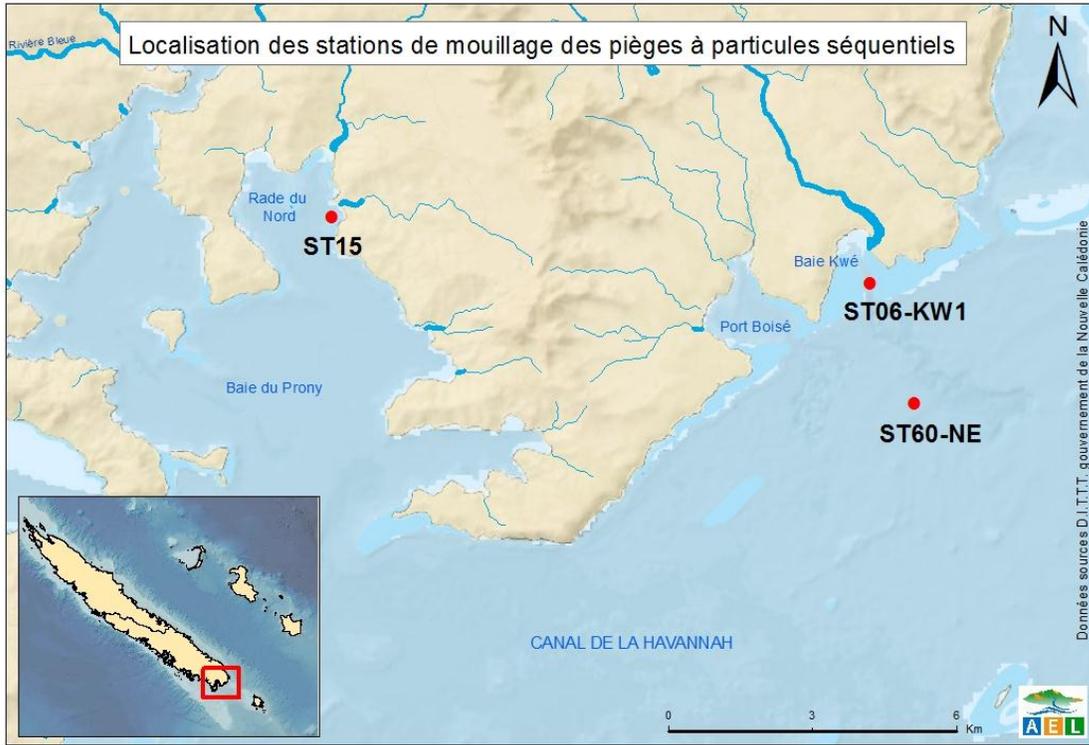


Figure 1: Aire d'étude pour le suivi des flux verticaux de particules issues du process de transformation du minerai de l'usine de production et des activités d'excavation de mine de Vale-NC. La station St60-NE est localisée à 60 m du rejet de l'effluent minier de Vale-NC. En Baie Kwé, le piège à sédiments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

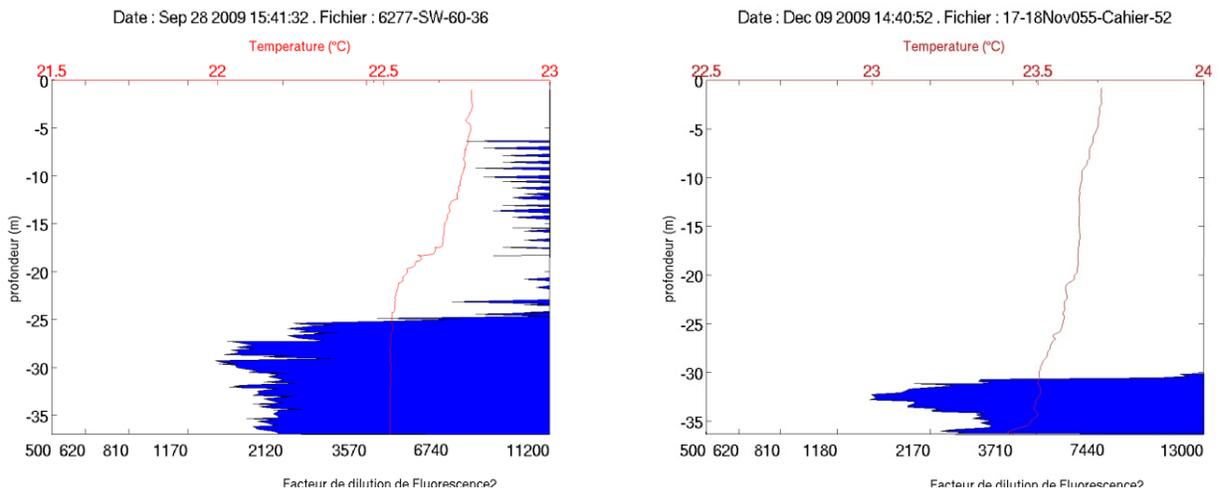


Figure 2 : Puissance type de l'épaisseur de marquage par l'effluent (rhodamine-WT) pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

3.2 ECHANTILLONNAGE

Les lignes de mouillage sont dotées de pièges à sédiments de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) d'une section efficace de 0,050 m², qui sont équipés de carrousels de 12 godets pour permettre la collecte d'une série temporelle des particules sédimentées. Les lignes ont été immergées le 02 septembre 2014 et elles ont été récupérées le 23 octobre 2014.

La collecte des particules a été programmée pour débuter le 03 septembre 2014 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 21 octobre 2014 à 00h00. Au total 12 échantillons de matériel particulière 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 (St06-SW, StSt60-NE et St06-KW1) et périodes de collecte entre septembre et octobre 2014.

| STATION | PERIODE DE COLLECTE | STATION | PERIODE DE COLLECTE | STATION | PERIODE DE COLLECTE |
|-------------|---------------------|---------|---------------------|-------------|---------------------|
| St06-KW1-1 | 03-06 septembre | St15-1 | 03-06 septembre | St60-NE-1 | 03-06 septembre |
| St06-KW1-2 | 07-10 septembre | St15-2 | 07-10 septembre | St60-NE -2 | 07-10 septembre |
| St06-KW1-3 | 11-14 septembre | St15-3 | 11-14 septembre | St60-NE -3 | 11-14 septembre |
| St06-KW1-4 | 15-18 septembre | St15-4 | 15-18 septembre | St60-NE -4 | 15-18 septembre |
| St06-KW1-5 | 19-22 septembre | St15-5 | 19-22 septembre | St60-NE -5 | 19-22 septembre |
| St06-KW1-6 | 23-26 septembre | St15-6 | 23-26 septembre | St60-NE -6 | 23-26 septembre |
| St06-KW1-7 | 27-30 septembre | St15-7 | 27-30 septembre | St60-NE -7 | 27-30 septembre |
| St06-KW1-8 | 01-04 octobre | St15-8 | 01-04 octobre | St60-NE -8 | 01-04 octobre |
| St06-KW1-9 | 05-08 octobre | St15-9 | 05-08 octobre | St60-NE -9 | 05-08 octobre |
| St06-KW1-10 | 09-12 octobre | St15-10 | 09-12 octobre | St60-NE -10 | 09-12 octobre |
| St06-KW1-11 | 13-16 octobre | St15-11 | 13-16 octobre | St60-NE -11 | 13-16 octobre |
| St06-KW1-12 | 17-20 octobre | St15-12 | 17-20 octobre | St60-NE -12 | 17-20 octobre |

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

3.3 PARAMETRES PHYSIQUES, GEOCHIMIQUES ET ANALYSES

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

4 RESULTATS

4.1 PARAMETRES METEOROLOGIQUES

Les valeurs des paramètres météorologiques sont regroupées en Annexe 2.

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

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

La période du 03/09 au 20/10/2014 a été marquée par deux épisodes pluvieux de relative importance (précipitations > 40 mm) qui se sont déroulés du 14 au 17/09 et du 06 au 10/10, accompagnés respectivement de 78,4 et 72,9 mm de précipitations cumulées. Un troisième épisode pluvieux, enregistré juste avant la période d'étude du 25/08 au 03/09, est également à signaler car il a cumulé 110,8 mm de précipitations, mais en 10 jours. Au total, en prenant en compte ces trois épisodes et les pluies plus sporadiques, 297 mm de précipitations cumulées ont été enregistrés pour cette campagne, toutefois c'est 3 fois moins de précipitations par rapport à juillet-août 2013 où 941 mm de précipitations étaient tombées.

4.1.2 Direction du vent (station récif « Ioro »)

La période de mouillage des pièges à particules a été marquée par de nombreux changements de direction des vents (Figure 3). En effet, les « directions des vents moyens journaliers » enregistrées (DD) ont montré que des régimes majoritairement de secteur S à E-SE ont soufflé avec des rotations dans les secteurs W-NW et E-NE. Plus en détail, la période d'étude peut être découpée selon les suivants:

- Du 25/08 au 03/09/2014, les vents ont soufflé de secteur E-NE (25 au 27/08) pour passer d'un large secteur E à S-SE (27/08 au 29/08), ils ont ensuite basculé secteur W-SW (le 30/08) pour se stabiliser quelques jours en secteur S (du 31/08 au 03/09);
- Du 04/09 au 17/09, d'abord de secteur W-NW (du 04 au 06/09), les vents passent progressivement au secteur S-SW puis ils restent dans un large secteur S à E (08 au 16/09) pour se terminer secteur S-SW (17/09);
- Du 18/09 au 04/10, la direction des vents est majoritairement orientée secteur SW (du 18/09 au 21/09) puis le régime de vents s'est déplacé à un large secteur S à E (22/09 au 27/09) pour revenir secteur SW (28 au 29/09). Ensuite les vents ont soufflé secteur S-SE (du 30/09 au 04/10, avec une incursion de secteur S-SW (le 02/10);
- Du 05/10 au 21/10 ; d'abord de secteur E (du 05 au 09/10) puis d'un large secteur SW à SE (du 10 au 13/10), les vents se sont ensuite stabilisés secteur E (15-18/10), avant de revenir secteur S à S-SE (du 19 au 20/10).

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

Durant la période d'étude (du 03/09 au 21/10), l'intensité des vents moyens journaliers (FF) a été très variable (Figure 3) ; les valeurs extrêmes ont été enregistrées, le 27 octobre pour la minimale (2,3 m/s de secteur S) et le 07 novembre pour la maximale (9,2 m/s de secteur E).

Pour toute la durée de la campagne, la « *vitesse des vents moyens journaliers* » (FF) a été de $5,9 \pm 1,8$ m/s, valeur presque deux fois plus faible que celles mesurées lors des campagnes de juillet-août 2011 ($11,3 \pm 3,2$ m/s), de septembre-octobre 2012 ($11,9 \pm 2,4$ m/s) et de juillet-août 2013 ($11,3 \pm 3,6$ m/s). Ces résultats montrent que les vents de cette campagne de saison fraîche sont bien en dessous des normales saisonnières.

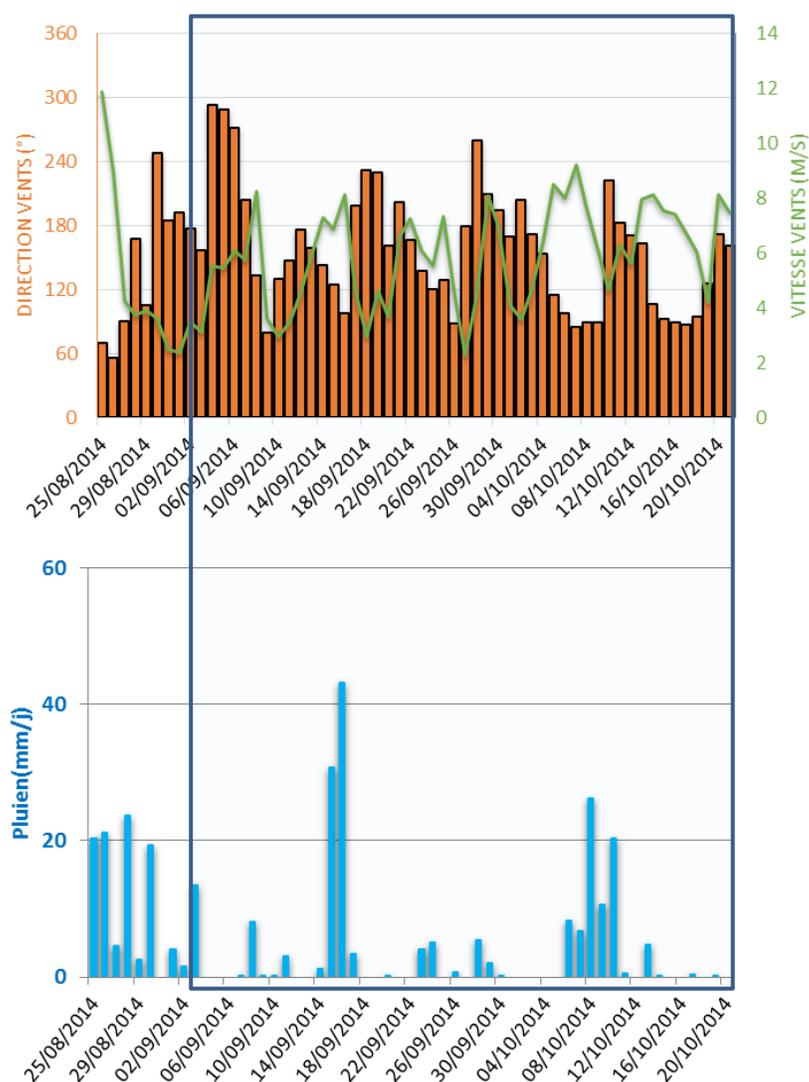


Figure 3 : Enregistrement des « *taux de précipitations journaliers (RR)* » en (mm/j) à la station météorologique de l'« *usine-pilote* » de Vale-NC, « *direction des vents moyens journaliers (DD)* » en (°) et « *vitesse des vents moyens journaliers (FF)* » en (m/s) à la station du récif loro, pour la période du 25 août au 20 octobre 2014. Le cadre bleu correspond à la période de mouillage du 3 septembre au 20 octobre.

CE QU'IL FAUT RETENIR

La période de mouillage (du 03 septembre au 20 octobre) a été marquée par 2 épisodes pluvieux de relative importance, un troisième épisode, précédant la période d'étude, a été enregistré du 25/08 au 03/09.

Pour cette campagne, il a été enregistré 297 mm de précipitations cumulées, ce qui reste 3 fois moins élevé que les précipitations enregistrées pour la campagne précédente de juillet-août 2013.

Le régime des vents a été irrégulier, bien que majoritairement d'un large secteur S à E-SE (alizés), de nombreuses rotations ont été observées dans le secteur W-NW et E-NE.

La période de mouillage est caractérisée par une vitesse des vents moyens journaliers ($5,9 \pm 1,8$ m/s) bien inférieure aux normales enregistrées pour la saison fraîche en 2011, 2012 et 2013.

4.2 CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

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

Les résultats concernent les masses de MES 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 varient dans le temps (Figure 4), elles se distribuent entre 0,16 g (03-06 septembre ; KW1-1) et 5,57 g (09-12 octobre; KW1-10).

Les plus faibles quantités de MES ont été collectées entre le 03 et le 23 septembre, période associée à de nombreux changements de directions du vent qui avait été précédé par un épisode pluvieux qui s'est déroulé entre le 25/08 et le 03/09 (110,8 mm de précipitations cumulées. A partir du 23 septembre jusqu'à la fin de la période d'étude, les masses de MES collectées augmentent pour atteindre un maximum entre le 09 et 12 octobre (KW1-10). La période du 06 au 11/10 est caractérisée par un évènement pluvieux conséquent, un régime de vents de secteur E modéré ($7,2 \pm 1,6$ m/s ; du 06 au 09/10) qui bascule au secteur S (du 10 au 12/10 ; $5,5 \pm 0,8$ m/s) coïncidant avec une augmentation des quantités collectées de MES (godet KW1-10).

La masse maximale collectée de 5,57 g est bien inférieure à celles collectées les années précédentes (juillet-août 2011, septembre-octobre 2012 et juillet-août 2013 qui ont enregistré respectivement 23,71 ; 11,82 et 64,71 g).

La masse moyenne collectée est de $2,37 \pm 1,70$ g, ce chiffre est en baisse sensible par comparaison à la valeur moyenne de $11,6 \pm 17,6$ g calculée pour les campagnes de juillet-août 2013.

Le pourcentage de fraction fine ($\phi < 40 \mu\text{m}$) est constant et quantitativement majoritaire dans l'ensemble des 12 godets, il représente $83,8 \pm 1,9$ % (Figure 5), des observations similaires avaient été effectuées les campagnes précédentes.

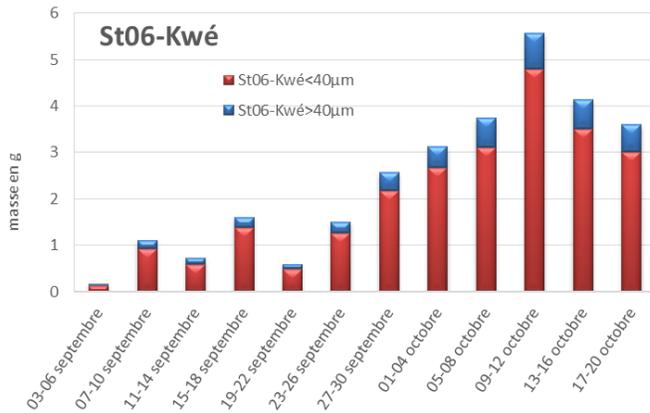


Figure 4 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 03 septembre au 20 octobre en Baie Kwé (St06-KWé). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

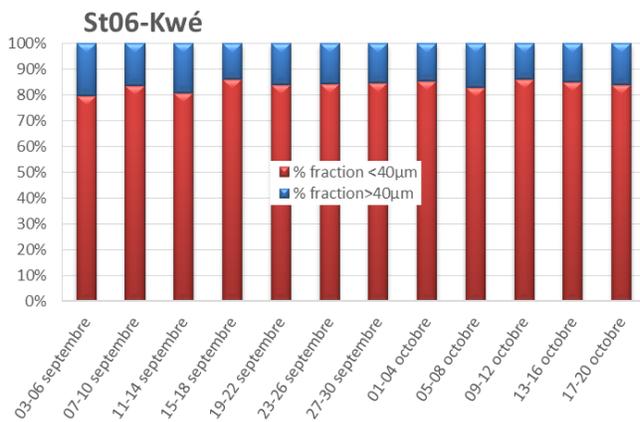


Figure 5 : Pourcentage de fraction fine et grossière collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 03 septembre au 20 octobre en Baie Kwé (St06-KWé).

4.2.1.2 Compositions granulométriques

La fraction pélique (<40µm) des matières en suspension, collectées en Baie Kwé, est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 µm (silts fins) avec des proportions autour de 55,4 à 71,3 % du volume total (Figure 6). Des observations similaires ont été faites lors des campagnes de septembre-octobre 2012 et de juillet-août 2013. Ensuite pour cette campagne, selon le godet observé, les argiles ou les silts grossiers composent la seconde population granulométrique.

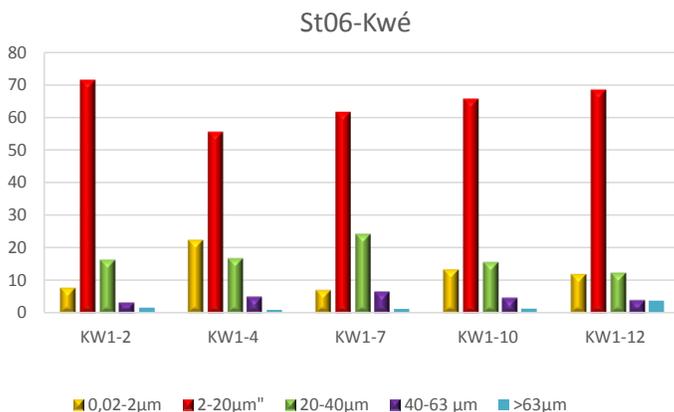


Figure 6 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés en Baie Kwé par le piège à sédiments séquentiel, entre le 03 septembre et le 20 octobre 2014.

4.2.1.3 Compositions minéralogiques

La composition minéralogique a été analysée par diffractométrie des rayons X (Tableau 3) sur les MES des godets Kw1-2, Kw1-4, Kw1-7, Kw1-10 et Kw1-12.

Les résultats montrent que les MES sont majoritairement composés de calcite et d'aragonite, qui sont des signatures de l'influence marine. Les MES sont aussi composées, en moindre proportion, de goéthite qui souligne l'influence des apports terrigènes. Les résultats de l'analyse DRX semi-quantitative suggèrent que les proportions de chacune des phases minérales sont proches d'un prélèvement à l'autre (indiquant une régularité dans la nature des apports pour cette campagne).

Tableau 3 : Composition minéralogique des MES collectées en Baie Kwé (station St06-KW1) par le piège à particules, du 3 septembre au 20 octobre 2014.

| ECHANTILLON | % Calcite | % Aragonite | % Goéthite |
|-------------|-----------|-------------|------------|
| KW1-2 | 46,6 | 33,4 | 20,0 |
| KW1-4 | 48,5 | 32,9 | 18,6 |
| KW1-7 | 48,0 | 33,0 | 19,0 |
| KW1-10 | 48,7 | 32,6 | 18,8 |
| KW1-12 | 49,6 | 35,3 | 15,0 |

4.2.1.4 Teneurs en carbonates

En Baie Kwé, les MES collectées sont constituées d'une fraction carbonatée majoritaire pour l'ensemble des godets qui représente entre 52,7 % (KW1-1 ; du 03/09 au 06/09) et 67,7% (KW1-10 ; 10-13/09 - Figure 7). Globalement, la teneur moyenne en carbonates des MES est de $65,2 \pm 4,0\%$, ce qui confirme les résultats d'analyses minéralogiques.

La plus faible teneur en carbonates observée (KW1-1 ; du 03/09 au 06/09) fait suite aux fortes précipitations (qui se sont déroulées du 25/08 au 03/09 en cumulant sur ces dix jours, 110,8 mm de précipitations) qui étaient accompagnées d'un régime de vents soutenus de secteur NE qui a progressivement faiblit et tourné secteur E puis S. La plus forte teneur en carbonates a été enregistrée godet Kw1-11 (du 09 au 12/10) pour des vents d'environ $6,1 \pm 1,4\text{m/s}$ d'un large secteur E à S, accompagnés de faibles précipitations cumulées (25,8 mm).

Il est intéressant de souligner que les périodes du 14 au 17/09 et du 06 au 11/10, accompagnées respectivement de 78,4 et 72,9 mm de précipitations cumulées, n'ont pas occasionné de diminution significative de la teneur en carbonates dans les MES (du 14 au 17/09. Durant cette période les vents étaient modérés ($6,7 \pm 1,5\text{m/s}$) d'un large secteur E à S-SW, du 06 au 11/10, les vents étaient aussi modérés ($6,9 \pm 1,6\text{ m/s}$) de secteur E et S).

La teneur moyenne en carbonates pour cette campagne ($65,2 \pm 4,0\%$) est supérieure à celles observées en juillet-août 2013 ($46,0 \pm 12,3\%$) et elle est du même ordre que celle observée en septembre-octobre 2012 ($67,7 \pm 3,2\%$). Cette période est donc caractérisée par une influence marine plus soutenue qu'en juillet-août 2013 (qui était marquée par des précipitations exceptionnelles).

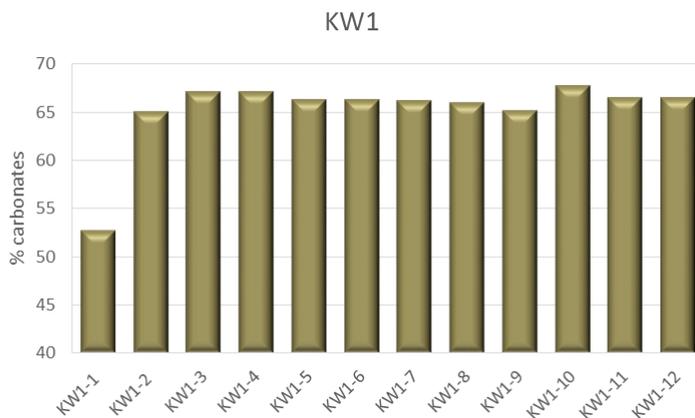


Figure 7 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 03 septembre au 20 octobre 2014 en Baie Kwé (St06-KWé).

4.2.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

4.2.2.1 Masses collectées

A la station St60-NE (Figure 8), les masses collectées sont comprises entre 0,17 g (godet NE60-1 ; 03-06/09) et 5,85 g (godet NE60-2 ; 07-10/09). La plus forte quantité de MES, collectée entre le 07 et 10 septembre, coïncide avec un régime de vents de secteur S-SW à E faibles ($4,8 \pm 2,2$ m/s) associé à de faibles précipitations cumulées (11,7 mm). La seconde plus forte quantité de MES échantillonnée (4,22 g, NE60-11, 14-17 octobre) correspond à des vents d'un secteur E et des précipitations non significatives (0,6 mm).

Lors de la précédente campagne de saison fraîche (juillet-août 2013), la quantité maximale collectée (4,58 g ; 20-23 juillet) correspondait avec un régime de vents de secteur SE à E faiblissant de 20 à 5 m/s avec une brève incursion de secteur W-NW et de faibles précipitations (18,8 mm cumulés). En janvier-février 2013, la quantité maximale de MES (8,77 g, godet NE60-9) avait été collectée pour des vents de secteurs SW soufflant autour de 14 m/s et de faibles précipitations (8,1 mm cumulés).

Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, la masse moyenne de MES collectées ($1,6 \pm 1,8$ g) est légèrement supérieure à celle observée pour juillet-août 2013 ($1,17 \pm 1,8$ g).

La fraction fine ($\phi < 40 \mu\text{m}$) des MES est quantitativement supérieure à la fraction grossière (Figure 8 et Figure 9). Elle représente entre 51,5 % (NE60-6, 23-26 septembre) et 65,3 % (NE60-10, 10-13 octobre) mais demeure globalement très inférieure à celle mesurée pour la Baie Kwé. Lors de la mission de juillet-août 2013, les fractions grossières ($\phi > 40 \mu\text{m}$) étaient quantitativement plus importantes que les fractions fines dans l'ensemble des échantillons à l'exception du godet NE60-12 où les particules fines représentaient 53% de la masse (observation effectuée pour un régime de vents de secteur S-E modéré à $9,8 \pm 0,6$ m/s du 25-28 août 2013). Cette différence de granulométrie, dans certains cas, significative entre les deux missions pourrait avoir été engendrée par des phénomènes de remise en suspension de particules grossières provoqués par des vents forts. La vitesse des vents moyens était de $11,3 \pm 3,6$ m/s en juillet-août 2013 tandis qu'en 2014, la vitesse n'était que de $5,8 \pm 1,8$ m/s pour la période de collecte de septembre à octobre.

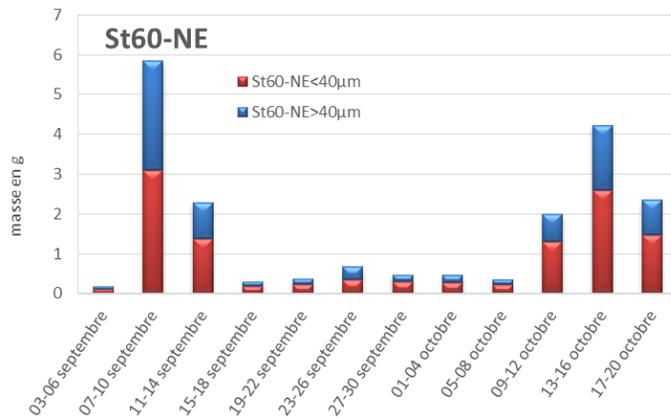


Figure 8 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 3 septembre au 20 octobre 2014 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE). Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (< 40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

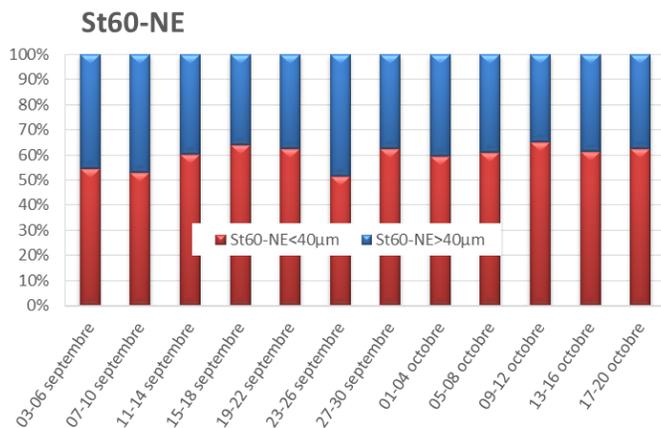


Figure 9 : Pourcentage de fraction fine et grossière collecté dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 3 septembre au 20 octobre 2014 dans le Canal de la Havannah, au nord-est du diffuseur (St60-NE).

4.2.2.1 Compositions granulométriques

La distribution des populations granulométriques est similaire d'un godet à l'autre. La fraction fine (<40µm) des matières en suspension, collectées au niveau de la station St-60-NE, est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 µm (silts fins ; avec des proportions autour de 68,4 à 75,7 % du volume ; Figure 9), des observations similaires ont été effectuées lors des campagnes de juillet-août 2013.

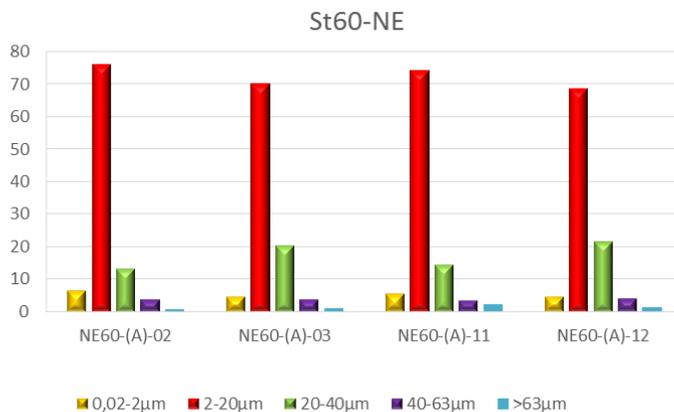


Figure 10 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés dans le Canal de la Havannah par le piège à sédiments séquentiel, du 03 septembre au 20 octobre 2014.

4.2.2.2 Compositions minéralogiques

Les analyses de diffractométrie ont été réalisées sur des MES provenant des godets N60-1, NE60-8, NE60-9 et NE60-12.

Comme pour les campagnes précédentes, les principaux minéraux qui composent les MES dans le Canal de la Havannah sont la calcite et l'aragonite (Tableau 4). Ces minéraux mettent en évidence la dominance quasi -totale de l'influence marine. La goethite, marqueur des apports terrigènes issus des formations latéritiques n'est pas caractérisée dans les prélèvements de cette campagne alors qu'elle était présente à l'état de trace dans la campagne de juillet-août 2013.

Tableau 4 : Composition minéralogique des MES collectées dans le Canal de la Havannah (station St60-NE) par le piège à sédiments séquentiel, du 3 septembre au 20 octobre 2014.

| ECHANTILLON | % Calcite | % Aragonite |
|-------------|-----------|-------------|
| St60-NE-2 | 60,7 | 39,3 |
| St60-NE-3 | 57,0 | 43,0 |
| St60-NE-11 | 52,2 | 47,8 |
| St60-NE-12 | 60,1 | 39,9 |

4.2.2.3 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates des échantillons de MES (Figure 11) sont comprises entre 76,9 (godet NE60-1 ; 03-06 septembre) et 84,7% (NE60-8 ; 01-04 octobre). Le plus faible pourcentage de carbonates retrouvé dans le godet NE60-1 fait suite aux fortes précipitations enregistrées du 25/08 au 03/09 (110,8 mm de précipitations cumulées) accompagnées d'un régime de vents soutenus de secteur NE qui a progressivement faibli et tourné secteur E puis S. La légère baisse de la teneur en carbonates dans le godet 9 (du 05 au 08/10) est à mettre en correspondance avec les précipitations qui se sont abattues entre le 06 et le 11/10. La plus forte teneur de carbonates dans les MES est enregistrée pour le godet NE60-8, elle correspond à une période marquée par l'absence de précipitations et un régime de vents faibles à modérés ($5,8 \pm 2,1$ m/s) d'un large secteur S-SW à E-SE.

La teneur moyenne de carbonates est de $82,7 \pm 2,1$ %, elle est du même ordre que celles observées pour les campagnes précédentes de septembre-octobre 2012 ($84,3 \pm 4,9$ %) et de juillet-août 2013 ($74,3 \pm 4,1$ %).

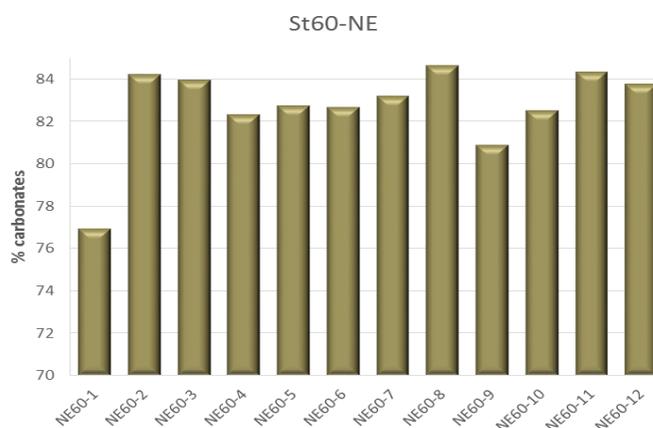


Figure 11 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 03 septembre au 20 octobre 2014 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

4.2.3 Rade Nord de Prony (station St15)

4.2.3.1 Masses collectées

A la station St15, les masses de MES collectées sont très faibles, comprises entre 0,003 (godet St15-01) et 0,66 g (godet St15-10). La plus faible masse de MES a été échantillonnée entre le 03 et 06 septembre pour un régime de vents faibles de secteur S-SE forçant en secteur W-NW, période qui a été pourtant précédée de fortes précipitations (110,8 mm) du 25/08 au 03/09. La plus forte masse de MES piégées entre le 09 et 12 octobre correspond à une période accompagnée de vents de secteur E puis S, qui a fait suite aux fortes précipitations survenues entre le 06 et 11/10 qui ont cumulées 72,9 mm. En janvier-mars 2014, la plus forte quantité de MES collectées (32,30 g ; godet St15-2, 22-25 janvier) coïncidait avec les violentes précipitations du 23 et 24 janvier (291,7 et 119,3 mm, respectivement) qui étaient accompagnées d'un régime de vents modérés (<6m/s) de secteurs SE tournant au NE.

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

Dans l'ensemble des godets (à l'exception des deux premiers godets), la fraction fine (<40 µm) des MES est majoritaire et représente 75,0 à 95,1 % (Figure 12 et Figure 13). Des observations similaires avaient été faites lors de la campagne précédente de janvier-mars 2014.

Remarque : Les masses collectées entre le 03 et le 30 septembre ont été trop faibles pour la réalisation des analyses prévues.

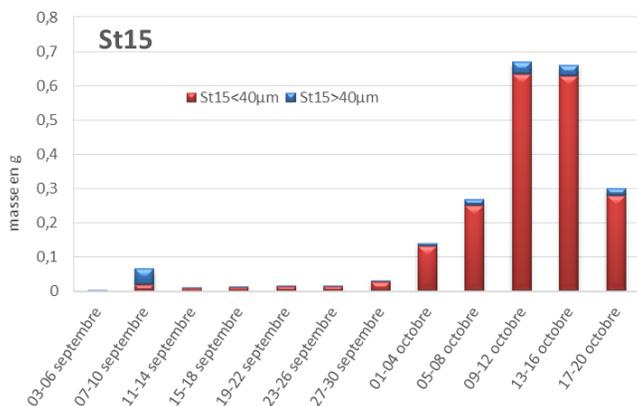


Figure 12 : Masses collectées dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 3 septembre au 20 octobre 2014 dans la Rade Nord de la baie de Prony. Composition des matières en suspension (MES) : importance des fractions fines (<40 µm) et fractions grossières (> 40 µm).

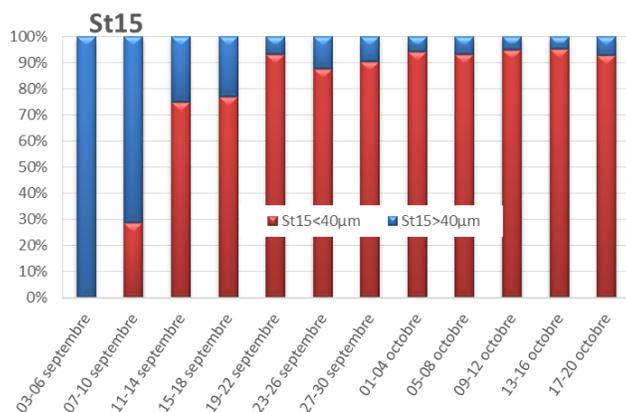


Figure 13 : Pourcentage des fractions fines et grossières collecté dans les 12 godets du piège séquentiel mouillé du 3 septembre au 20 octobre 2014 dans la Rade Nord de la baie de Prony (St15).

4.2.3.2 Compositions granulométriques

Les fractions fines (<40µm) des matières en suspension collectées au niveau de la station St15 sont composées majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 µm (silt fins) avec des proportions comprises entre 49,5 et 63,5 % du volume (Figure 14).

Remarque : Seuls deux godets ont pu être analysés en granulométrie laser car les trop faibles quantités de MES collectées à cette station St15 ne permettaient pas d'effectuer les mesures.

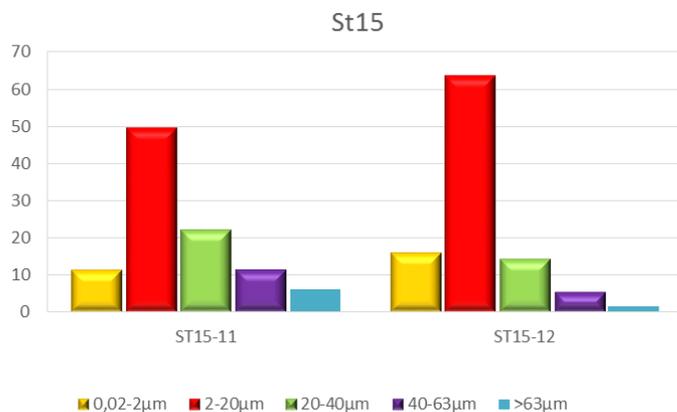


Figure 14 : Distribution granulométrique des populations de grains collectés dans la Rade Nord (St15) par le piège à sédiments séquentiel, du 03 septembre au 20 octobre 2014.

4.2.3.3 Compositions minéralogiques

Les analyses DRX ont été réalisées sur la fraction fine des MES provenant des godets St15-10 et St15-11. Les diffractogrammes montrent que les MES sont composées majoritairement de minéraux d'origine terrigène, comme la goethite et la kaolinite. L'influence marine est plus soutenue que lors de la campagne précédente de janvier-mars 2014, elle se caractérise par la présence de calcite et d'aragonite.

Remarque : Seuls deux godets ont pu être analysés en DRX car les trop faibles quantités de MES collectées à cette station St15 ne permettent pas d'effectuer les mesures.

Tableau 5 : Composition minéralogique des MES collectées dans la Rade Nord de Prony (station St15) par le piège à sédiments séquentiel, du 03 septembre au 20 octobre 2014.

| ECHANTILLON | % Calcite | % Aragonite | % Goethite | % kaolinite | % gibbsite |
|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|------------|
| St15-10 | 20,8 | 12,3 | 36,2 | 29,1 | 1,7 |
| St15-11 | 19,3 | 8,9 | 32,4 | 38,7 | 0,7 |

4.2.3.4 Teneurs en carbonates

Globalement, la teneur en carbonates à la station St15, est relativement constante autour de $25,9 \pm 0,9$ %, les fortes précipitations cumulées (72,9mm) qui se sont abattues entre le 06 et 11/10/2014 et n'ont pas influencé cette teneur en carbonates (notamment le godet St15-10 ; du 09 au 12/10), en raison peut être des régimes de vents orientés S-SE qui auraient confiné le panache le long de la côte soustrayant ainsi une partie de la charge en particules à la collecte au niveau du piège.

Les faibles concentrations de carbonates rencontrées à cette station s'expliquent par l'influence terrigène forte, directement liée à l'écoulement du Creek de la Rade Nord. Ces résultats corroborent ceux obtenus lors de l'analyse

minéralogique en DRX qui suggéraient la dominance de l'influence terrigène dans cette zone.



Figure 15 : Teneurs en carbonates dans les particules collectées par les godets du piège séquentiel mouillé du 03 septembre au 20 octobre 2014 dans la rade Nord (St15).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Station St06-KW1

La masse moyenne des MES collectées (2,37 g) est en baisse par rapport à la campagne précédente de juillet-août 2013 (11,6 g). Cette différence s'explique par des précipitations plus faibles et plus étalées dans le temps pour cette dernière campagne ainsi que des régimes de vents moins intenses.

Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, la masse maximale de MES a été collectée pour la période du 09 au 12/10, caractérisée par un évènement pluvieux conséquent et un régime de vents de secteur E modéré ($7,2 \pm 1,6$ m/s) qui auraient favorisé les apports de particules à l'intérieur de la baie Kwé.

Le pourcentage de fraction fine ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) est constant ($83,8 \pm 1,9\%$) et quantitativement majoritaire dans l'ensemble des 12 godets. Les fractions fines collectées au niveau de la Baie Kwé sont majoritairement composées de particules dont le mode se situe dans la classe 2-20 μm (silt fins ; autour de 55,4 à 71,3 % du volume total).

Globalement, les MES sont essentiellement composées de carbonates avec une moyenne de $65,2 \pm 4,0 \%$ qui souligne la dominance de l'influence marine pour cette période d'étude, ces résultats étant corroborés par l'analyse de la composition minéralogique en DRX. Certains évènements pluvieux conjugués à certains régimes de vents sont susceptibles de faire chuter la teneur en carbonates dans les MES par des apports d'origine terrigène (observation faite pour le godet KW1-1).

Station St60-NE

A la station St60-NE, les masses collectées sont variables, comprises entre 0,17 g (godet St60-NE-1) et 5,85 g (godet St60-NE-2). L'écart de masse de MES collectées entre ces deux godets serait causé par des régimes de vents différents, pour le premier godet, les vents sont de secteur S-SE puis W-NW tandis que pour le second godet, les vents sont compris entre le secteur SW et SE (avec une incursion de secteur E).

La fraction fine ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) est quantitativement supérieure à la fraction grossière. A l'inverse, lors de la mission de juillet-août 2013, les fractions grossières étaient quantitativement plus importantes que les fractions fines dans l'ensemble des échantillons à l'exception du godet NE-12. Cette différence pourrait s'expliquer par des phénomènes de remise en suspension de particules grossières provoqués par des vents forts. En effet, la vitesse des vents moyens était de $11,3 \pm 3,6$ m/s en juillet-août 2013 contre seulement $5,8 \pm 1,8$ m/s en septembre à octobre 2014.

L'analyse minéralogique semi-quantitative révèle que la fraction fine des MES est composée exclusivement de calcite et d'aragonite, ce qui souligne la dominance quasi-totale de l'influence marine. Les teneurs en carbonates ($83,2 \pm 2,4$ %) établies pour cette campagne corroborent les résultats de la minéralogie établie par DRX.

Station St15

A la station St15, les masses de MES collectées sont très faibles, comprises entre 0,003 (godet St15-01) et 0,66 g (godet St15-10). Les différents épisodes pluvieux n'ont pas la même conséquence sur les masses de MES collectées. En effet, les régimes de vents qui accompagnent ces événements, influencent aussi la collecte, par exemple l'orientation SE favorisant un confinement des panaches turbides le long de la côte nord de la petite anse, à l'inverse, l'absence de vents forts et/ou d'orientation autre que SE, permettent l'expansion des panaches.

Globalement, dans l'ensemble des godets, la fraction fine ($<40 \mu\text{m}$) est majoritaire (entre 75,0 à 95,1 %).

Les analyses DRX réalisées sur les MES soulignent l'influence majoritaire des apports terrigènes à la station St15 ce que confirment les résultats de la teneur en carbonates.

4.3 COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

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

4.3.1 Baie Kwé (station St06-KW1)

Les éléments métalliques analysés dans les MES de la Baie Kwé ont permis de mettre en évidence les influences respectives des apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) et marins (Ca). Pour tous les métaux, les concentrations obtenues peuvent montrer un écart-type maximum (RSD) de l'ordre de 12,9 % (Ni) à 16,6 % (Ni ; Tableau 6).

Du point de vue de l'évolution temporelle, les concentrations en métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) ont toutes présenté des valeurs maximales pour la période du 03 au 06 septembre (godet KW1-1, voir Annexes 4) correspondant à la collecte qui a suivi les fortes précipitations du 25 août au 03 septembre (110,8 mm de précipitations cumulées). Ensuite, les concentrations métalliques décroissent malgré les précipitations abondantes qui ont pris cours du 14 au 17 septembre (78,4 mm de précipitations cumulées) et du 6 au 11 octobre (72, 9 mm de précipitations cumulées).

Pour cette campagne, les concentrations moyennes, minimales et maximales de Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont toutes supérieures aux valeurs moyennes enregistrées pour l'état de référence 2007 (Tableau 6 et Tableau 7). Par contre, les concentrations métalliques moyennes pour cette campagne sont plus faibles que celles observées en juillet-août 2013, ce qui indique que les apports terrigènes ont eu moins d'impact en baie Kwé en septembre-octobre 2014.

La matrice de corrélation confirme, une nouvelle fois, la grande similarité ($0,971 \geq R \geq 0,998$) d'évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn (Tableau 8) qui sont les éléments métalliques appartenant au cortège des formations latéritiques ultramafiques exploitées. La matrice de corrélation confirme également l'anti-corrélation entre le calcium (signature de l'influence marine) et les 5 métaux latéritiques (Tableau 8).

Tableau 6 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 3 septembre et le 20 octobre 2014 (Station St06-KW1 ; n=12).

| | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|------------|-------------------------|------|-------|---------|-------|-------|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| MIN | 195 251 | 103 | 3 472 | 121 896 | 805 | 1 817 |
| MAX | 252 426 | 173 | 5 612 | 185 800 | 1 324 | 2 770 |
| MOYENNE | 242 857 | 115 | 3 829 | 132 978 | 885 | 1 999 |
| ECART-TYPE | 15 301 | 19 | 580 | 17 334 | 147 | 258 |
| % RSD | 6,3 | 16,5 | 15,2 | 13,0 | 16,6 | 12,9 |

Tableau 7 : Concentrations moyennes en métaux et calcium dans les MES collectées en Baie Kwé lors de la définition de l'état de référence, pour les campagnes de juillet-août 2013 et de septembre-octobre 2014

| VALEURS MOYENNES | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|-----|-------|---------|-------|-------|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| ETAT DE REFERENCE 2007 | 290 310 | 58 | 2 667 | 68 940 | 577 | 1 142 |
| CAMPAGNE JUILLET-AOUT 2013 | 164 584 | 214 | 7 111 | 189 732 | 1 687 | 3 539 |
| CAMPAGNE DE SEPTEMBRE-OCTOBRE 2014 | 242 857 | 115 | 3 829 | 132 978 | 885 | 1 999 |

Tableau 8 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées en Baie Kwé entre le 3 septembre et le 20 octobre 2014 (Station St06-KW1 ; n=12).

| Variables | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|----|
| Ca | 1 | | | | | |
| Co | -0,961 | 1 | | | | |
| Cr | -0,968 | 0,995 | 1 | | | |
| Fe | -0,969 | 0,997 | 0,993 | 1 | | |
| Mn | -0,955 | 0,979 | 0,975 | 0,974 | 1 | |
| Ni | -0,954 | 0,995 | 0,988 | 0,998 | 0,971 | 1 |

La normalisation des concentrations du calcium par le fer (Ca/Fe) souligne de manière notable les évolutions relatives de ces deux éléments qui représentent l'influence des pôles marins (Ca) et terrigènes (Fe), respectivement (Figure 16) ; les valeurs minimale et maximale du rapport Ca/Fe sont respectivement de 1,1 (KW1-1; 03-06 septembre) et 2,1 (KW1-10 ; 09-12 octobre). Le ratio Ca/Fe le plus faible (1,1 ; godet Kwé-1) souligne l'influence des apports latéritiques qui ont suivi les fortes précipitations entre le 25/08 et le 03/09. Généralement, lors d'épisodes pluvieux significatifs, le ratio Ca/Fe chute dû à l'augmentation des proportions en apports terrigènes consécutifs à la lixiviation des sols latéritiques, cependant pour certains épisodes pluvieux, aucune modification du ratio n'est observable (par exemple les pluies du 14-17/09 et 06-11/10 qui ont cumulé respectivement 78,4 et 72,9 mm de précipitations, n'ont pas occasionné de baisse du ratio Ca/Fe).

Ces ratio Ca/Fe sont supérieurs à ceux enregistrés pour la campagne de juillet-août 2013, ce qui souligne une influence marine plus marquée pour cette campagne de septembre-octobre 2014.

Compte tenu de la relative constance de la concentration en calcium dans le milieu marin, les ratios Ca/Fe permettent de constater que l'influence terrigène à la station St06-KW1 est plus marquée que précédemment (Tableau 9), à l'exception de la campagne de juillet-août 2013.

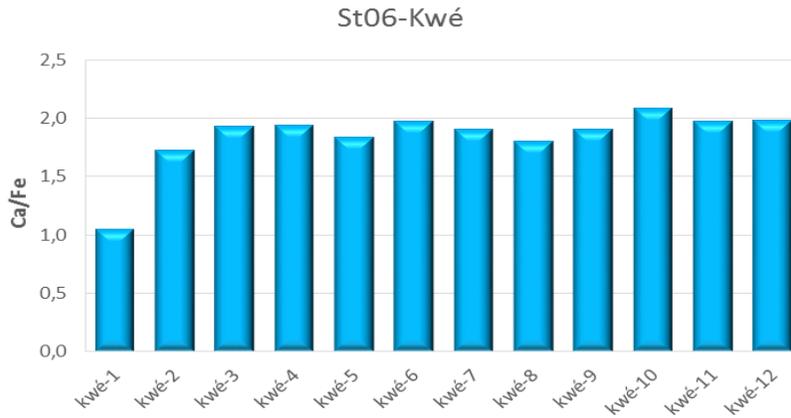


Figure 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées en Baie Kwé (St06-KW1) entre le 3 septembre et le 21 octobre 2014.

Tableau 9 : Evolution temporelle entre 2011 et 2014 du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St06-KW1 aux cours de différentes campagnes. Comparaison avec les valeurs de 2007/2008.

| Ca/Fe | Sept-oct 2014 | Juil-août 2013 | Sept-oct 2012 | Juil-août 2011 | 2007-2008* |
|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|------------|
| Moyenne | 1,85 | 0,98 | 2,40 | 3,17 | 3,85 |
| Ecart-type | 0,27 | 0,46 | 0,31 | 0,50 | 0,51 |

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

4.3.2 Canal de la Havannah (station St60-NE)

4.3.2.1 Concentrations en métaux et calcium

Les éléments analysés dans les MES collectées à l'est du diffuseur (St60-NE) mettent en évidence une influence marine très marquée. Toutefois et comme à l'accoutumé, les apports terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn, et Ni) sont décelables, mais à des niveaux de concentrations respectifs bien moindres que dans les MES de la Baie Kwé. Pour tous les métaux, les concentrations obtenues peuvent montrer un écart-type maximum (RSD) de l'ordre de 14 % (Cr) à 18 % (Fe ; Tableau 10).

Pour cette campagne, les plus fortes concentrations métalliques (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) ont été observées dans le premier godet NE60-1 (du 3 au 6 septembre ; annexe 4), elles seraient la conséquence d'apports terrigènes qui ont été transportés suite à l'épisode pluvieux intense qui s'est déroulé du 25/08 au 03/09.

Pour tous les éléments métalliques, les concentrations moyennes observées en septembre-octobre 2014 (Tableau 10 et Tableau 11) sont légèrement plus faibles que celles enregistrées pour la campagne juillet-août 2013 (Tableau 11), à l'inverse, la concentration moyenne de Ca a légèrement augmenté.

Les résultats relatifs aux concentrations moyennes de la campagne de septembre-octobre 2014 et celles de l'état de référence (Tableau 12), montrent que les niveaux de concentration de calcium sont proches, ceux des métaux (Co, Fe et Ni) étant deux fois plus élevés en 2014.

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 du 3 septembre au 20 octobre 2014 (Station St60-NE ; n=12).

| | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|------------|-------------------------|----|-------|--------|-----|-----|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| MIN | 291 482 | 22 | 646 | 22 130 | 176 | 336 |
| MAX | 321 011 | 36 | 1 028 | 39 693 | 292 | 579 |
| MOYENNE | 313 173 | 25 | 725 | 25 695 | 204 | 386 |
| ECART-TYPE | 7 856 | 4 | 101 | 4 668 | 30 | 64 |
| % RSD | 3 | 16 | 14 | 18 | 15 | 17 |

Tableau 11 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 12 juillet et 28 août 2013 (Station St60-NE ; n=12).

| | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|------------|-------------------------|------|-------|--------|-----|-----|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| MIN | 249 423 | 20 | 682 | 22 509 | 545 | 769 |
| MAX | 295 879 | 54 | 1 279 | 45 301 | 233 | 396 |
| MOYENNE | 278 794 | 37,5 | 960 | 34 045 | 379 | 565 |
| ECART-TYPE | 15 543 | 10,9 | 193 | 7 272 | 101 | 99 |
| % RSD | 6 | 29 | 20 | 21 | 27 | 8 |

Tableau 12 : Concentrations moyennes en métaux et calcium dans les MES collectées dans le Canal Havannah pour les campagnes de juillet-août 2013, septembre-octobre 2014 et de 2007 (Etat de référence).

| VALEURS MOYENNES | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|--|-------------------------|----|-----|--------|-----|-----|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| ETAT DE REFERENCE 2007 | 337 350 | 12 | 393 | 11 760 | 125 | 162 |
| ECARTYPE | 4 327 | 2 | 86 | 2 616 | 26 | 36 |
| Campagne juillet-août 2013 | 278794 | 37 | 960 | 34 045 | 379 | 565 |
| Ecart-type | 15 543 | 11 | 193 | 7 272 | 101 | 99 |
| Campagne septembre-octobre 2014 | 313 173 | 25 | 725 | 25 695 | 204 | 386 |
| Ecart-type | 7 856 | 4 | 101 | 4 668 | 30 | 64 |

La matrice de corrélation (Tableau 13) permet de dégager plusieurs similarités de distribution significatives entre l'ensemble des métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) avec des coefficients de Pearson compris entre $0,891 > R > 0,999$. Ces observations suggèrent que des apports d'origine terrigène influencent toujours le secteur du Canal de la Havannah en septembre-octobre 2014. Il est à noter que pour cette campagne, les coefficients de corrélation entre le Ni et les autres métaux ont augmenté par rapport à juillet-août 2013, ce qui souligne une probable influence terrigène plus marquée.

Tableau 13 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium dans les MES collectées dans le Canal de la Havannah entre le 03 septembre et le 20 octobre 2014 ; Station St60-NE ; n=12.

| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|----|
| Ca | 1 | | | | | |
| Co | -0,786 | 1 | | | | |
| Cr | -0,842 | 0,980 | 1 | | | |
| Fe | -0,839 | 0,986 | 0,996 | 1 | | |
| Mn | -0,701 | 0,900 | 0,904 | 0,891 | 1 | |
| Ni | -0,831 | 0,985 | 0,996 | 0,999 | 0,898 | 1 |

Dans le Canal de la Havannah, les valeurs de normalisation des concentrations du calcium par le fer oscillent entre 7,3 (godet NE60-1 ; du 03 au 06 septembre) et 14,5 (godet NE60-11 ; du 14 au 17 octobre ; Figure 17). Ces ratio

sont élevés et soulignent l'influence marine quasi-totale, confirmant ainsi les analyses minéralogiques et les résultats de teneur en carbonates.

La valeur la plus faible (7,3) est observée suite aux fortes précipitations qui se sont déroulées entre le 25/08 et le 03/09, de même, une légère baisse du ratio a été constatée au cours de l'épisode pluvieux intense du 14/09 au 17/09 (godet NE60-4 ; 15-18/09) où 78,4 mm de précipitations cumulées étaient tombés. Ces observations suggèrent, d'une part, que les apports terrigènes dans le Canal de la Havannah sont irréguliers et qu'ils dépendent des précipitations. D'autre part, les apports terrigènes peuvent impacter le Canal de la Havannah, en cas de précipitations intenses (formation de panaches par lixiviation des bassins versants) ou de régimes de vents forts (provoquant la formation de néphéloïdes côtiers), cette empreinte pouvant perdurer plusieurs jours (c'était le cas en juillet-août 2013).

D'un point de vue temporel et d'une manière générale, le ratio Ca/Fe a tendance à décroître par rapport à l'état de référence et aux campagnes précédentes, traduisant un impact terrigène croissant (

Tableau 14), bien que le ratio obtenu lors de la précédente mission de juillet-août 2013 soit plus faible encore et de nature exceptionnelle (durant cette campagne de juillet-août 2013, des précipitations inhabituelles étaient tombées cumulant 941 mm).

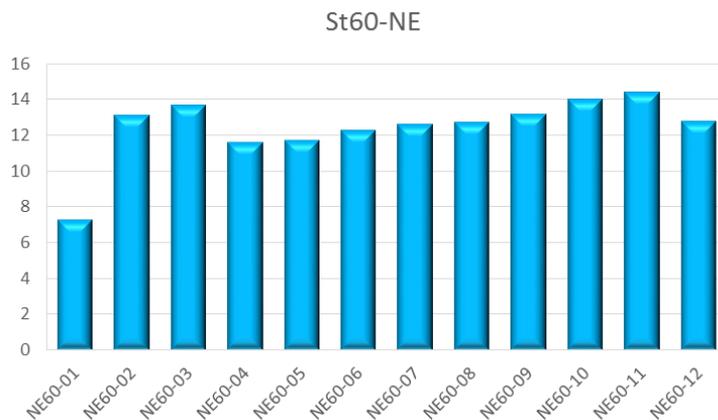


Figure 17 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal Havannah (St60-NE) entre le 3 septembre et le 20 octobre 2014.

Tableau 14 : Evolution temporelle entre 2011 et 2014 du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St60-NE. Comparaison avec les valeurs de l'état de référence 2007/2008.

| Ca/Fe | Sept-oct 2014 | Avril-juin 2014 | Juil-août 2013 | Sept-oct 2012 | Juil-août 2011 | 2007-2008* |
|------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------|
| Moyenne | 12,5 | 17,2 | 8,6 | 19,0 | Perte | 26,8 |
| Ecart-type | 1,7 | 1,8 | 2,3 | 2,7 | piège | 6,7 |

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

4.3.2.2 Teneurs en soufre

La valeur de soufre la plus élevée (3170 mg/kg) coïncide avec un régime de vents de secteur SW à S-SE et des précipitations faibles (8,7 mm cumulés). La concentration moyenne en soufre est de 2805 ± 161 mg/kg, elle est du même ordre que celle enregistrée pour juillet-août 2013 (2656 ± 56 mg/kg).

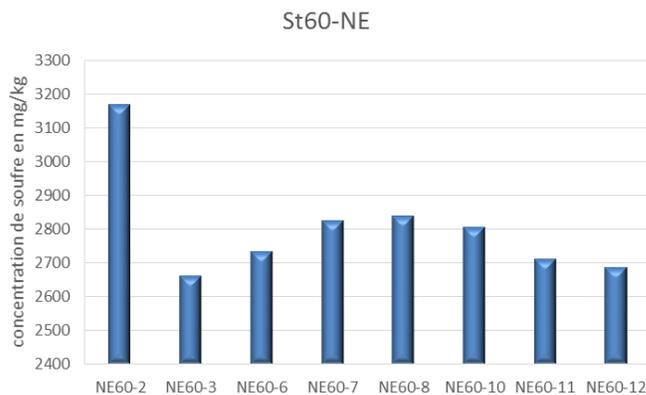


Figure 18 : Concentration du soufre dans les godets entre le 3 septembre et le 20 octobre 2014 dans le Canal de la Havannah (St60-NE).

4.3.3 Rade Nord (station St15)

4.3.3.1 Concentration en métaux et calcium

Les éléments analysés (Tableau 15) dans les MES collectées à la station St15, mettent en évidence une influence terrigène dominante, confirmant ainsi les résultats de minéralogie (Tableau 5) qui montraient que les minéraux d'origine terrigène étaient proportionnellement plus forts que ceux d'origine marine. Les concentrations métalliques obtenues pour cette campagne sont du même ordre que les valeurs enregistrées lors de l'état de référence de 2007 (Tableau 16).

Tableau 15 : Concentrations moyennes, écart-types et valeurs extrêmes des concentrations en métaux et calcium dans les MES collectées dans la Rade Nord entre le 18 janvier et le 6 mars 2014 (Station St15 ; n=4).

| | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|------------|-------------------------|-----|-------|---------|-------|-------|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| MIN | 76 942 | 229 | 7 208 | 196 211 | 1 665 | 2 496 |
| MAX | 94 396 | 290 | 8 506 | 226 888 | 2 095 | 2 945 |
| MOYENNE | 87 180 | 265 | 8 110 | 217 647 | 1 881 | 2 798 |
| ECART-TYPE | 6 927 | 26 | 563 | 13 903 | 192 | 197 |
| % RSD | 8 | 10 | 7 | 6 | 10 | 7 |

Tableau 16 : Concentrations moyennes en métaux et calcium dans les MES collectées dans la Rade Nord lors de la campagne d'avril-juin 2014 et lors de l'état de référence de mars 2007

| VALEURS MOYENNES | ELEMENT ANALYSE (mg/kg) | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-----|-------|---------|-------|-------|
| | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| ETAT DE REFERENCE MARS 2007 | 61 870 | 208 | 8 500 | 205 660 | 1 949 | 2 742 |
| CAMPAGNE JUILLET-AOUT 2014 | 80 710 | 265 | 8 110 | 217 647 | 1 881 | 2 798 |

L'analyse en composante principale (ACP) n'a pas été réalisée puisque le nombre d'échantillon (n=4) est trop faible pour mener ce type de test.

Les valeurs du ratio Ca/Fe enregistrées sont très faibles (Figure 19), indiquant que l'influence terrigène est quasi-totale. La plus forte valeur du ratio Ca/Fe observée (godet St15-9 ; 05-08/10) correspond à un régime de vents de secteur E qui était pourtant accompagné de 41,3 mm de précipitations.

Au niveau de l'évolution du ratio Ca/Fe (Tableau 17), on observe qu'il est proche de la valeur établie lors de l'état de référence.

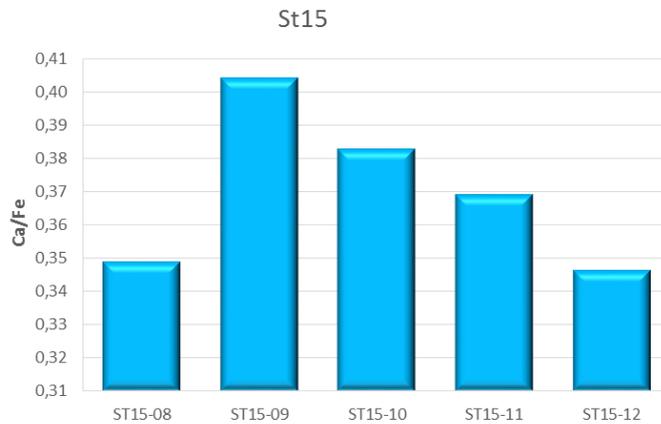


Figure 19 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer pour les MES collectées dans le Canal Havannah (St60-NE) entre le 03 septembre et le 20 octobre 2014.

Tableau 17 : Comparaison temporelle du ratio moyen Ca/Fe dans les MES collectées par le piège à sédiment séquentiel au niveau de la station St15 entre les campagnes de mars 2007 et septembre 2014.

| Ca/Fe | Sept-oct 2014 | Mars 2007* |
|------------|---------------|------------|
| Moyenne | 0,37 | 0,3 |
| Ecart-type | 0,02 | - |

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

CE QU'IL FAUT RETENIR

Station St06-Kw1

Les concentrations métalliques maximales sont observées godet KW1-1 (du 03 au 07 septembre) consécutivement à l'épisode pluvieux conséquent du 25/08 au 03/09 (110,8 mm).

Les niveaux d'enrichissement en métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni), pour cette campagne, sont tous supérieurs aux valeurs moyennes enregistrées pour l'état de référence 2007 (Tableau 7). Par contre, les enrichissements métalliques sont plus faibles pour cette campagne par rapport à juillet-août 2013.

La matrice de corrélation confirme la grande similarité ($0,971 \geq R \geq 0,998$) d'évolution des concentrations pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn (éléments appartenant au cortège des formations latéritiques).

Le ratio Ca/Fe souligne l'impact des forts événements pluvieux, en effet le plus faible ratio a été enregistré suite aux fortes pluies du 25/08 au 03/09. Cependant certains événements pluvieux intenses n'ont pas modifié le ratio Ca/Fe, laissant entrevoir l'existence d'un autre facteur d'influence. Par rapport à l'état de référence, le ratio Ca/Fe moyen présente une tendance à la baisse (indiquant une influence terrigène croissante), bien que le ratio observé à cette campagne soit supérieur à celui de juillet-août 2013.

Station St60-NE

Les plus fortes concentrations métalliques (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) analysées godet NE60-1 (du 03 au 06/09) font suite à l'évènement pluvieux du 25/08 au 03/09, elles seraient la conséquence d'apports terrigènes qui ont été transportés jusqu'au Canal de la Havannah.

L'enrichissement métallique moyen pour l'ensemble des métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) en septembre-octobre 2014 est plus faible que celui observé en juillet-août 2013, cependant il reste deux fois supérieur à celui enregistré lors de l'état de référence.

La matrice de corrélation montre une similarité dans l'évolution des concentrations des métaux Co, Cr, Fe, Mn et Ni (coefficients de Pearson compris entre 0,891 > R > 0,999), suggérant que des apports terrigènes influencent le secteur du Canal de la Havannah. Pour cette campagne, les coefficients de corrélation entre le Ni et les autres métaux ont augmenté par rapport à juillet-août 2013, ce qui souligne une origine terrigène encore plus marquée pour cet élément.

Les ratios Ca/Fe élevés montrent que l'influence marine est largement majoritaire, bien que des apports terrigènes puissent impacter le Canal de la Havannah, en cas de précipitations intenses et des régimes de vents favorables.

D'un point de vue temporel et d'une manière générale, le ratio Ca/Fe a tendance à décroître, traduisant un impact terrigène progressif.

La concentration moyenne en soufre est de 2805 ± 161 mg/kg et elle est du même ordre que la valeur moyenne enregistrée pour juillet-août 2013 (2656 ± 56 mg/kg).

Station St15

Les éléments métalliques analysés dans les MES et les déterminations minéralogiques mettent en évidence une influence terrigène amplement dominante par rapport à St06-KW1 et St60-NE.

L'enrichissement métallique moyen est du même ordre que celui observé lors de l'état de référence.

L'analyse en composante principale n'a pas été réalisée car le nombre d'échantillon (n=4) était trop faible pour entreprendre ce test.

La valeur moyenne du ratio Ca/Fe est similaire à celle de l'état de référence de mars 2007. Cette valeur très faible indique une influence terrigène largement majoritaire, bien plus soutenue qu'en baie Kwé.

5 INTERPRÉTATION

5.1 INFLUENCE DES FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES

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

Comparées à la campagne de juillet-août 2013, les précipitations cumulées, pour la période de piégeage du 3 septembre au 20 octobre 2014, ont été 3,2 fois moins abondantes. De même la vitesse moyenne des vents pour cette campagne de septembre-octobre 2014 est 2 fois plus faible que les normales saisonnières

Les Figure 20, Figure 21 et Figure 22 apportent une vue globale qui permet d'établir les principaux épisodes marquants selon les stations suivies.

5.1.1 Baie Kwé (Figure 20)

Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, la masse moyenne de particules collectée ($2,37 \pm 1,68$) a été réduite d'un facteur 5 fois par rapport à juillet-août 2014 (qui enregistrait une masse moyenne de MES de $11,6 \pm 17,6$ g). Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, les évènements les plus marquants sont décrits plus en détails :

- Les fortes précipitations qui se sont déroulées entre le 25/08 et le 03/09 (110,8 mm de précipitations cumulées) accompagnées de vents de secteur W-NW, ont occasionné une collecte de seulement 0,16g (godet Kw1-1 ; du 03 au 06/09). C'est la plus faible masse collectée pour la période d'étude à cette station, par contre, elle est associée aux plus fortes concentrations métalliques analysées (exemple du Ni ; Figure 20) et au plus faible ratio Ca/Fe, marquant ainsi l'influence des apports terrigènes. Cependant, les épisodes pluvieux du 14 au 17/09 et du 06 au 10/10 n'ont pas eu les mêmes conséquences sur les concentrations métalliques ni sur le ratio Ca/Fe ;
- La plus forte masse collectée entre le 09 et le 12 octobre, correspond à une période caractérisée par des pluies conséquentes (72,9 mm de précipitation) où les vents étaient de secteur E puis S et de vitesse faible. Ce contexte météorologique favoriserait, dans un premier temps la circulation du panache vers la sortie de la baie (et donc le piégeage des MES par le dispositif), puis, la rétention des MES ou la dispersion du panache en baie kwé ;
- Les plus fortes proportions de MES collectées à partir du 24 septembre, pourraient s'expliquer par l'installation de vents d'un large secteur S à E qui ont majoritairement soufflés jusqu'à la fin de la période d'étude. A la faveur de régimes de vents de secteur S et SE (suffisamment forts), il est généralement observé une remise en suspension des particules latéritiques déposées dans la baie (formations de néphéloïdes);

- La fraction fine ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) est quantitativement la plus importante dans l'ensemble des godets (elle est majoritairement composée de silts fins);
- Pour cette campagne, les concentrations métalliques moyennes sont plus fortes que celles enregistrées pour l'état de référence mais elles restent inférieures à celles observées lors de la campagne de juillet-août 2013 (campagne qui revêtait un caractère exceptionnel).

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

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

5.1.2 Canal de la Havannah (Figure 21)

Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, la masse moyenne de MES collectée ($1,6 \pm 1,8 \text{ g}$) est légèrement supérieure à celle observée pour juillet-août 2013 ($1,17 \pm 1,8 \text{ g}$). Les principaux évènements sont décrits ci-dessous plus en détails :

- Le dépôt maximal enregistré dans le godet NE60-2 (période du 07 au 10/10) correspond avec un régime de vents de secteurs S-SW à E (compris entre 0,3 à 11,2 m/s) accompagné de faibles précipitations (11,7 mm); la quantité la plus faible a été collectée du 03 au 06 septembre pour un régime de vent de secteur S-SE passant rapidement à un large secteur W à W-NW (compris entre 0,6 et 9,3 m/s), alors que plus de 110,8 mm de précipitations étaient tombés entre le 25/08 et le 03/09, ce qui indique l'importance des régimes de vents dans le transport des apports terrigènes ;
- La fraction pélitique est majoritaire, elle est comprise entre 51,5 et 65,3 % des MES collectées. A l'inverse de ce qui avait été observé en juillet-août 2013 où les proportions de fractions grossières ($\varnothing > 40 \mu\text{m}$) étaient plus importantes. Outre la sédimentation de tests carbonatés, cette différence significative de granulométrie entre les deux missions pourrait être attribuable à des phénomènes de remise en suspension de particules carbonatées récifales sous l'action mécanique des houles engendrées par des vents forts (la vitesse des vents moyens était de $11,3 \pm 3,6 \text{ m/s}$ en juillet-août 2013 tandis que pour la période de collecte de septembre-octobre 2014, la vitesse moyenne n'était que de $5,9 \pm 1,8 \text{ m/s}$) ;
- La concentration maximale de métaux (représenté Figure 21 par l'exemple du nickel) a été analysée dans le premier godet NE60-1 ([Ni]=579 mg/kg), pour l'ensemble des godets suivants, la concentration reste constante autour de $368,7 \pm 21,6 \text{ mg/kg}$. De plus le ratio Ca/Fe calculé est significativement plus faible pour le godet NE60-1 par rapport aux autres godets. Ces résultats marquent une influence terrigène un peu plus soutenue dans le godet 1 par rapport aux suivants et cela malgré la faible masse de MES collectée dans le godet NE60-1 ;
- Les ratios Ca/Fe sont élevés (même celui du godet NE60-1) soulignant la dominance de l'influence marine.
- Au niveau de l'évolution temporelle du ratio Ca/Fe, une tendance à la décroissance se dessine depuis la définition de l'état de référence, suggérant une influence terrigène qui s'accroît progressivement dans le canal de la Havannah (cette influence se traduit par l'évolution des coefficients de corrélations en progression pour les métaux d'origine terrigène). Cette influence reste tout de même très faible au regard de la valeur des ratios Ca/Fe et comparativement à la station St06 de la baie Kwé ou à la station St15 en Rade Nord ;

- Les résultats de l'analyse minéralogique confirment la dominance de l'influence marine quasi-exclusive (seuls des minéraux caractéristiques de l'influence marine ont été observés).

5.1.3 Rade Nord (Figure 23)

Pour cette campagne, les masses de MES collectées sont extrêmement faibles, la masse maximale récupérée étant seulement de 0,67 g. Plus en détails :

- Cette station se trouve directement exposée à l'influence du Creek de la Rade Nord pour autant les fortes précipitations du 25/08 au 03/09 et 14 au 17/09 n'ont occasionné qu'une très faible collecte en MES sûrement en raison de l'action du vent qui conditionne les mécanismes de la dispersion du panache. Par contre les précipitations du 06 au 11/10 (72,9 mm) accompagnées de vents majoritairement de secteur E et SE ont permis d'échantillonner suffisamment de MES (au maximum 0,67g, ce qui reste très faible; godet St15-10 ; 09-12/10).
- Cette station est sous une influence terrigène extrêmement marquée qui se caractérise par :
 - La fraction fine ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) majoritaire;
 - Une composition minéralogique largement dominée par les minéraux d'origine latéritique (goethite et kaolinite) ;
 - Des concentrations fortes en Co, Cr, Fe, Mn et Ni (métaux provenant des formations latéritiques) qui sont proches de celles établies lors de l'état de référence ;
 - Des ratios Ca/Fe très faibles comparés à la baie Kwé et au canal de la Havannah.

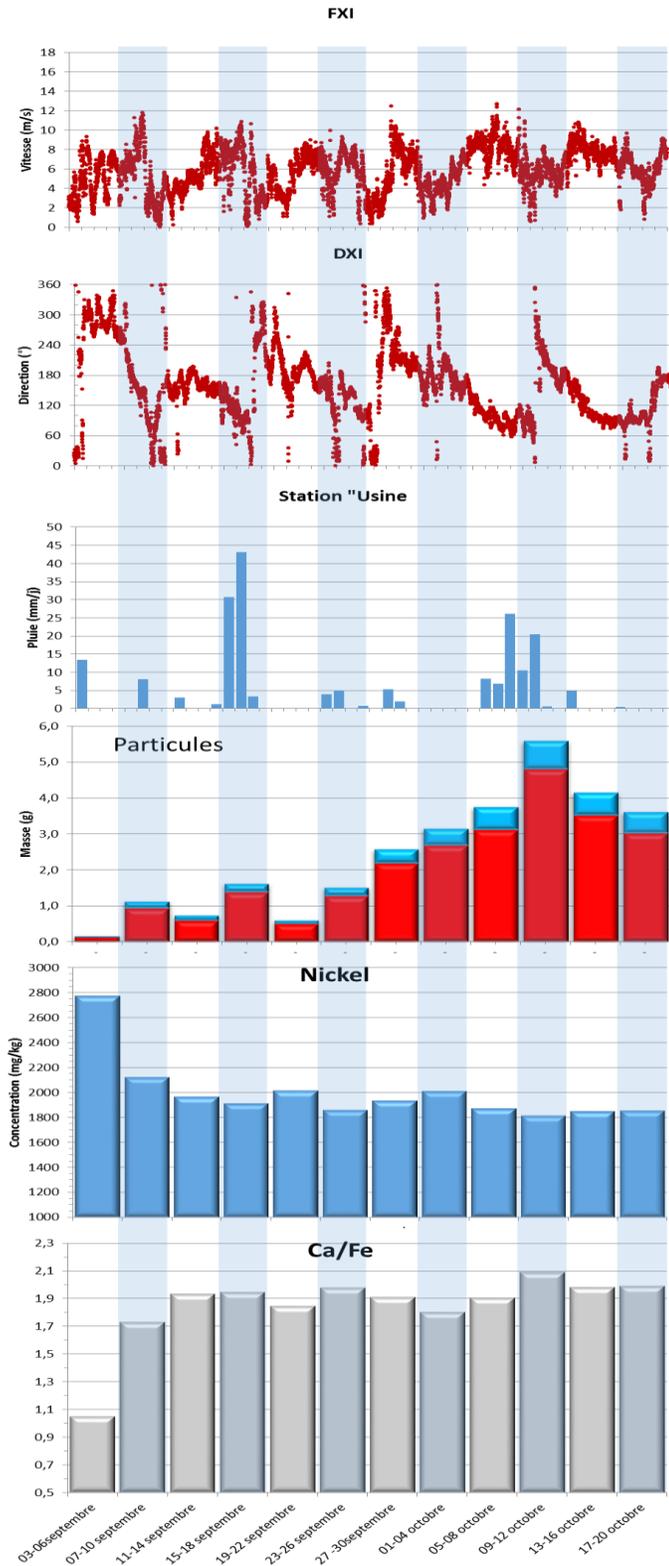


Figure 20 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St06-KW1 pour la période du 3 septembre au 20 octobre 2014.

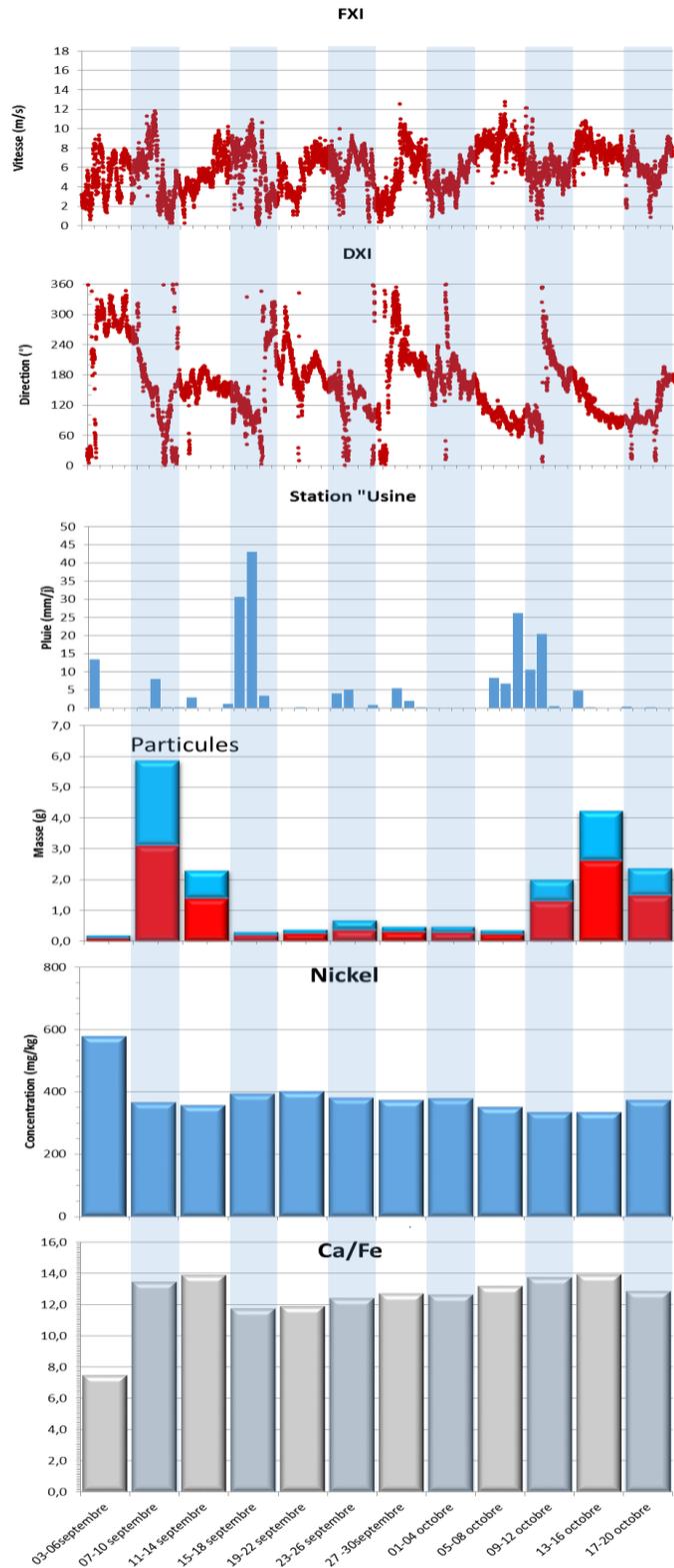


Figure 21 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St60-NE pour la période du 3 septembre au 20 octobre 2014.

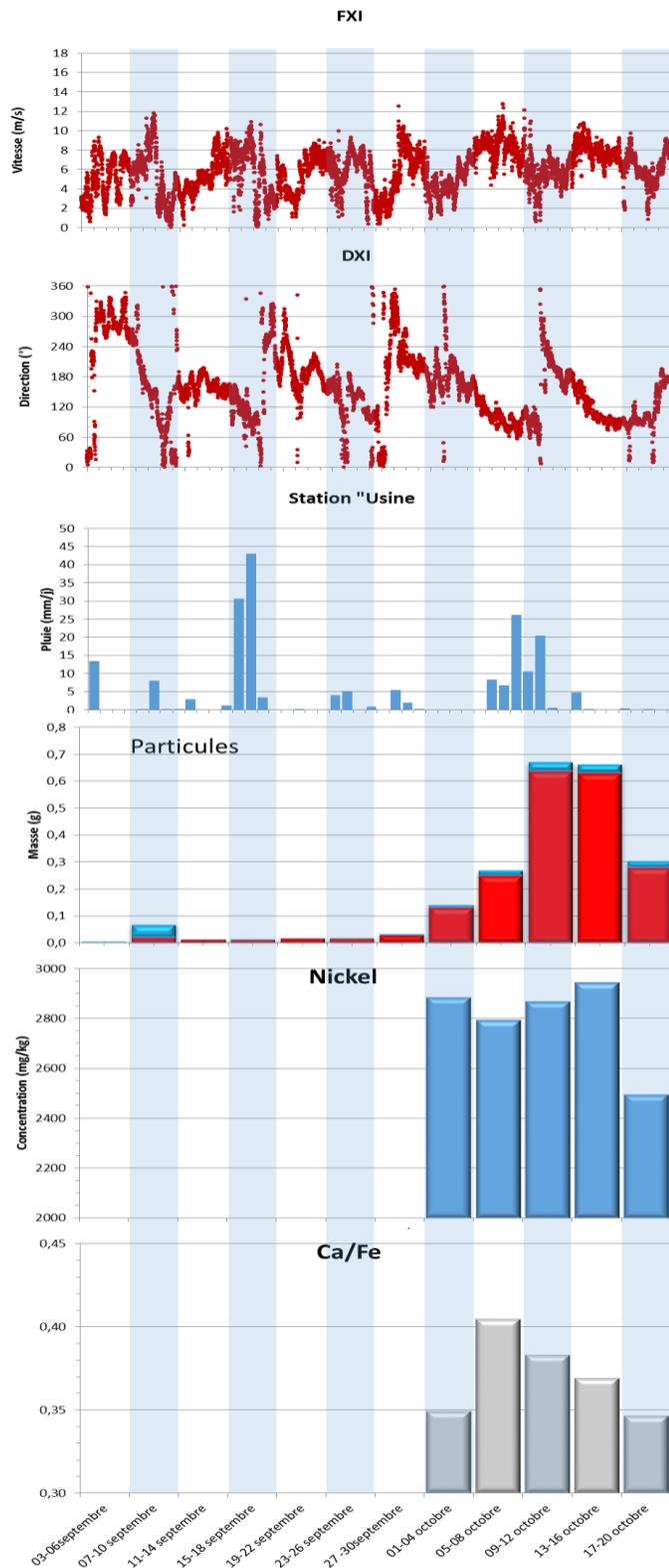


Figure 22 : Diagramme combiné : direction maximum des vents (DXI), vitesse maximum des vents instantanée (FXI), taux de précipitation, fractions inférieures et supérieures à 40 µm, concentration en nickel dans les MES et ratio Ca/Fe à la station St15 pour la période du 3 septembre au 20 octobre 2014.

5.2 CALCUL DES FLUX DE MATIERES

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

MATIERE EN SUSPENSION

Les valeurs moyennes et écart-types des flux de particules ont été calculés sur l'ensemble des campagnes réalisées entre juillet 2011 et septembre 2014 pour la Baie Kwé, la rade Nord et le Canal de la Havannah (Tableau 18).

Baie Kwé

Entre juillet 2011 et septembre 2014, les flux moyens de MES sont compris entre $11,8 \pm 8,4$ et $60,7 \pm 4,1$ g/m²/j (Tableau 18). Les flux étant généralement plus élevés en saison chaude qu'en saison fraîche, toutes saisons confondues, une tendance à l'augmentation des flux massiques apparaissait entre novembre 2006 et janvier 2014, cependant pour cette campagne de septembre-octobre 2014, les flux moyens sont du même ordre (bien que légèrement inférieurs) que la valeur enregistrée lors de l'état de référence de 2006 (c'est la première fois depuis 2006 qu'une valeur est si basse). Pour expliquer cette diminution drastique des flux particulaires moyens, il serait intéressant de pouvoir disposer d'informations relatives à la charge en MES dans la Kwé. Cette diminution pourrait être partiellement expliquée par les conditions météorologiques plus calmes, en effet, non seulement durant cette période peu de précipitations ont été enregistrées mais surtout les vitesses de vents étaient bien en dessous des normales saisonnières limitant les phénomènes de remise en suspension.

Canal de la Havannah

Entre juillet 2011 et septembre 2014, les flux étaient compris entre $3,5 \pm 3,0$ et $12,7 \pm 15,4$ g/m²/j (Tableau 18). Comme pour la Baie Kwé, une périodicité apparaît montrant que les apports sont plus importants en saison chaude par rapport à la saison fraîche. Pour cette campagne de saison fraîche, la tendance à l'augmentation des flux moyens est confirmée ; les valeurs de flux moyens ayant progressé de 28% par rapport à la campagne de juillet 2013.

Rade du Nord

Le flux moyen mesuré en septembre-octobre 2014 est de $0,9 \pm 1,2$ g/m²/j (Tableau 18), cette valeur est bien inférieure à celle observée en janvier-février 2014 mais elle reste du même ordre que celle enregistrée lors de l'état de référence.

Remarque : *Le flux calculé pour janvier 2014 est de 25 à 40 fois plus fort que les valeurs mesurées en mars 2007 et novembre 2006 pour la définition des états de référence, respectivement des saisons fraîche et chaude. Toutefois, il convient de préciser que les flux mesurés en 2007 ont coïncidé avec un cumul de précipitation important (250 mm) mais réparties très régulièrement pendant toute la période de collecte (10 mm en moyenne par jour) ayant peu de conséquences sur l'érosion des sols .*

Tableau 18 : Valeurs moyennes et écart-types des densités de flux en matière particulaire au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE et St60-SW (Canal de la Havannah) et masse totale sédimentée au cours de la période. Valeurs calculées pour l'ensemble des campagnes de juillet 2011 à avril 2014 ; comparaison avec les valeurs mesurées en 2006 et 2007 (Etat de Référence) aux stations St06-KW1 pour la Baie Kwé et T4B, T4C et TCM) pour le Canal de la Havannah.

Baie Kwé (St06-KW1)

| | nov-06 | mars-07 | juil-11 | janv-12 | sept-12 | janv-13 | juil-13 | janv-14 | Sept-14 |
|--------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Moyenne (g/m ² /j) | 14,6 | 28,3 | 27,1 | 39,5 | 26,4 | 46,5 | 58,1 | 60,7 | 11,8 |
| Ecart-type | 7,4 | 9,2 | 30,0 | 33,2 | 13,1 | 29,5 | 87,8 | 34,1 | 8,4 |
| Masse sédimentée (g/m ²) | 700 | 1132 | 1299 | 1894 | 1267 | 2231 | 2786 | 2914 | 569 |

Canal de la Havannah (St60-NE)

| | mars-07 | nov-07 | juil-11 | janv-12 | sept-12 | janv-13 | juil-13 | avril-14 | Sept-14 |
|--------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| Moyenne (g/m ² /j) | 26,4 | 7,8 | 3,5 | 10,1 | 4,9 | 12,7 | 6,3 | 7,4 | 8,1 |
| Ecart-type | 33,2 | 7,7 | 3,0 | 9,6 | 6,5 | 15,4 | 7,3 | 5,1 | 9,1 |
| Masse sédimentée (g/m ²) | 527 | 366 | 167 | 483 | 233 | 611 | 300 | 356 | 390 |

Rade Nord (St15)

| | nov-06 | mars-07 | janv-14 | Sept-14 |
|--------------------------------------|--------|---------|---------|---------|
| Moyenne (g/m ² /j) | 1,1 | 1,7 | 22,2 | 0,9 |
| Ecart-type | 0,7 | 1,5 | 44,5 | 1,2 |
| Masse sédimentée (g/m ²) | 26 | 41 | 1063 | 44 |

ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM

Les flux métalliques moyens ont été calculés pour chaque campagne et leur évolution temporelle peut être illustrée par le cas du nickel (Figure 23).

Baie Kwé

Les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux, dont le Ni (Figure 23), ont augmenté entre 2011 et 2013. Par contre, depuis l'année 2014, les flux métalliques moyens ont clairement diminué, si bien que pour cette campagne de septembre-octobre 2014, le flux de Ni moyen se retrouve compris entre les valeurs définies lors des états de référence de décembre 2006 et mars 2007. Il est à noter que les valeurs maximales des flux de métaux pour cette campagne de septembre-octobre 2014 sont légèrement supérieures à celles définies lors des états de référence de 2006 et 2007 (Tableau 19 et Tableau 23).

La baisse des flux métalliques en baie Kwé depuis l'année 2014 doit probablement s'expliquer par des modifications des opérations minières situées sur l'ensemble du bassin versant (préparation de pulpe, niveau de remplissage des bassins de rétention, ouverture des horizons ultramafiques...) mais aussi par des précipitations atmosphériques et des régimes de vents faibles, respectivement entraînant peu de MES arrachées des bassins versant et limitant les mécanismes de remise en suspension dans la baie.

Canal de la Havannah

Les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux, dont le Ni (Figure 23), ont eu tendance à augmenter entre 2011 et 2013. Cependant il est observé, pour les campagnes de juillet-août 2013, avril-juin 2014 et septembre-octobre 2014, une constance des flux de Ni moyens (Figure 23) soulignant que les apports terrigènes se seraient stabilisés au niveau du Canal.

Rade Nord

Les densités de flux métalliques sont présentées dans la Figure 23 (pour le Ni), les Tableau 19 et Tableau 20 (pour l'ensemble des métaux). Le flux métallique moyen de Ni pour cette campagne est bien inférieur à celui de la campagne de janvier-mars 2014 ; il est proche de la valeur établie lors de l'état de référence de mars-avril 2007. Pour les autres métaux Co, Fe et Mn, les flux métalliques moyens sont aussi proches des valeurs de l'état de

référence, seul le Cr a présenté un flux moyen en septembre-octobre 2014 qui reste près de 42 fois plus fort que le flux de Cr défini pour l'état de référence (résultats non présentés). Ce flux de Cr élevé serait à mettre en relation avec l'altération des horizons superficiels des latérites enrichis en chromite à l'occasion, des deux rejets accidentels de solutions acides dans le creek.

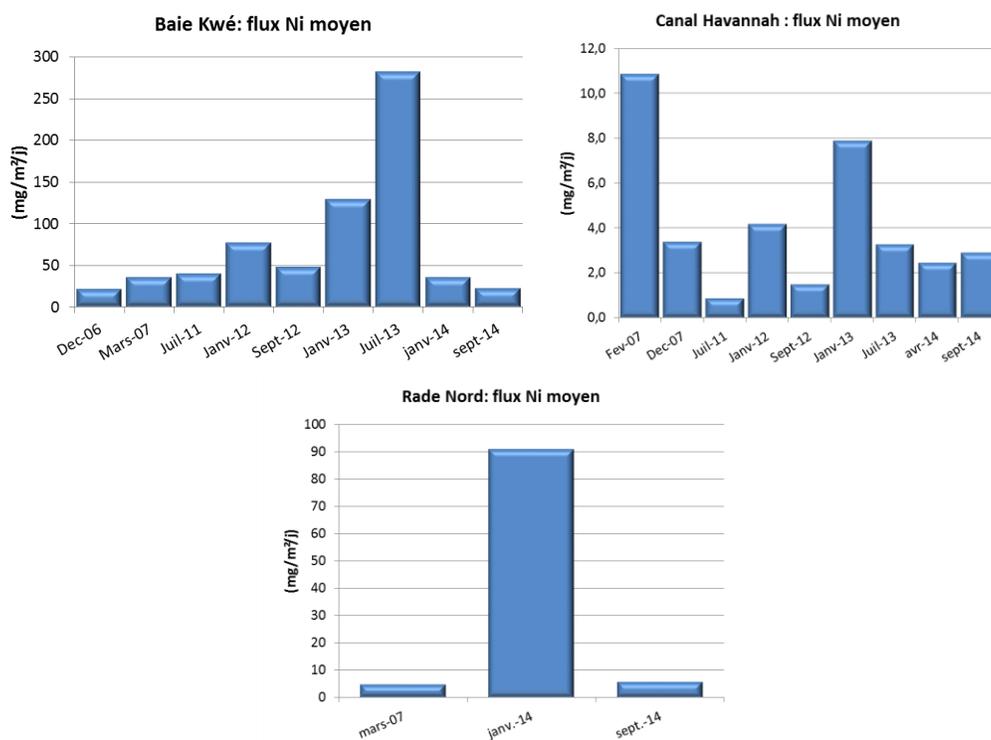


Figure 23 : Evolution temporelle des flux de nickel moyens (mg/m²/j) mesurés au niveau des stations St60-NE, St06-KW1 et St15 depuis 2007 (définition Etat de Référence).

Tableau 19 : Valeurs minimales et maximales des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), St60-NE (Canal de la Havannah) et St15 (rade nord).

| ST06-KW1 | | DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j) | | | | | |
|--|-----|--|-------|-------|---------|-------|-------|
| | | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| Saison fraîche juillet-août 2011 | Min | 1 283 | 0,4 | 14,6 | 409 | 3,5 | 7,4 |
| | Max | 24 519 | 11,4 | 392,8 | 10 460 | 94,5 | 185,8 |
| Saison chaude janvier-février 2012 | Min | 2 501 | 1,0 | 31,8 | 999 | 7,5 | 18,0 |
| | Max | 29 794 | 14,6 | 492,5 | 14 378 | 118,8 | 267,1 |
| Saison fraîche sept-octobre 2012 | Min | 4 125 | 1,6 | 57,1 | 1 648 | 12,4 | 25,9 |
| | Max | 15 490 | 6,1 | 219,0 | 6 531 | 50,9 | 110,6 |
| Saison chaude janvier-février 2013 | Min | 3 145 | 1,9 | 68,9 | 1 805 | 15,2 | 33,1 |
| | Max | 25 147 | 12,8 | 478,5 | 12 630 | 116,4 | 228,6 |
| Saison fraîche Juillet-août 2013 | Min | 810 | 0,8 | 25,2 | 746 | 5,7 | 13,8 |
| | Max | 12 577 | 124,4 | 4 541 | 105 584 | 1 098 | 2 255 |
| Saison chaude janvier- mars 2014 | Min | 9 269 | 0,9 | 37 | 735 | 11 | 13 |
| | Max | 44 440 | 6,2 | 192 | 4 090 | 68 | 73 |
| Saison Fraîche septembre-octobre 2014 | Min | 158 | 0,1 | 4,5 | 150 | 1,1 | 2,2 |
| | Max | 7 108 | 2,9 | 101 | 3 397 | 22,93 | 50,6 |

| ST60-NE | | DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j) | | | | | |
|--|-----|--|------|------|-------|------|-------|
| | | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| Saison fraîche juillet-août 2011 | Min | 122 | 0,01 | 0,17 | 5,4 | 0,08 | 0,14 |
| | Max | 3 732 | 0,16 | 5,03 | 156,9 | 1,59 | 2,74 |
| Saison chaude janvier-février 2012 | Min | 314 | 0,03 | 0,7 | 22 | 0,20 | 0,46 |
| | Max | 9 543 | 0,93 | 21,4 | 736 | 9,16 | 13,38 |
| Saison fraîche sept-octobre 2012 | Min | | nd | nd | Nd | nd | nd |
| | Max | 6110 | 0,60 | 9,8 | 333 | 3,22 | 6,49 |
| Saison chaude janvier-février 2013 | Min | 152 | 0,14 | 0,6 | 16 | 0,1 | 0,3 |
| | Max | 16 479 | 1,05 | 43,8 | 1 364 | 14,3 | 24,6 |
| Saison fraîche Juillet-août 2013 | Min | 219 | 0,1 | 1,0 | 34 | 0,5 | 0,5 |
| | Max | 7093 | 0,7 | 19,1 | 664 | 6,5 | 11,9 |
| Saison Chaude avril-juin 2014 | Min | 272 | 0,01 | 0,5 | 14 | 0,2 | 0,2 |
| | Max | 5 007 | 0,3 | 9,3 | 304 | 3,1 | 5,3 |
| Saison Fraîche septembre-octobre 2014 | Min | 258 | 0,0 | 0,9 | 34,5 | 0,3 | 0,5 |
| | Max | 9513 | 0,7 | 20,9 | 707 | 6,4 | 10,7 |

| ST15 | | DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m ² /j) | | | | | |
|--|-----|--|-----|-------|--------|-----|-----|
| | | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| Saison Chaude Janvier-mars 2014 | Min | 4 | 1 | 30 | 616 | 7 | 9 |
| | Max | 1 335 | 48 | 2 430 | 41 519 | 429 | 598 |
| Saison Fraîche septembre-octobre 2014 | Min | 54 | 0,2 | 5,9 | 156 | 1,2 | 2,0 |
| | Max | 287 | 1,0 | 28,0 | 750 | 6,9 | 9,7 |

Tableau 20 : Valeurs minimales, maximales et moyenne des densités de flux en éléments métalliques et calcium (mg/m²/j) au niveau des stations St06-KW1 (Baie Kwé), T4B et T4C (Canal de la Havannah) obtenues lors de la phase de définition de l'Etat de Référence (2007-2008).

| ST06-KW1 | | DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m²/j) | | | | | |
|--|-----|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| Saison fraiche nov-déc 2006 | Min | 1 781 | 0,3 | 11,8 | 515 | 0,9 | 8,6 |
| | Max | 8 957 | 1,5 | 63,4 | 2 739 | 6,3 | 45,8 |
| Saison chaude mars-avril 2007 | Min | 4 953 | 0,6 | 25,2 | 1 105 | 1,1 | 18,7 |
| | Max | 1 1267 | 1,5 | 67,1 | 2 927 | 7,1 | 49,5 |

| T4C ET T4B | | DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m²/j) | | | | | |
|--|-----|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| Saison chaude février/mars 2007 | Min | 2 057 | 1,30 | 0,17 | 106 | 13,1 | 1,6 |
| | Max | 42 564 | 1,39 | 0,97 | 1700 | 13,8 | 26,7 |
| Saison fraiche nov-déc 2007 | Min | 611 | 0,25 | 0,05 | 26 | - | 0,4 |
| | Max | 8 418 | 0,51 | 9,14 | 540 | - | 11,0 |

| ST15 | | DENSITE DE FLUX EN ELEMENTS (mg/m²/j) | | | | | |
|--|---------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Ca | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
| Saison chaude mars-avril 2007 | Moyenne | 494 | 0,4 | 0,4 | 350 | 3 | 5 |

CE QU'IL FAUT RETENIR

Dans la baie Kwé, comme dans le canal Havannah et la rade Nord, la distribution et la composition des flux de MES dans les eaux, sont régies par l'action combinée de la houle générée par les vents et de la lixiviation des bassins versants lors d'épisodes pluvieux significatifs.

Lors de la campagne de septembre-octobre 2014, en baie Kwé, les densités de flux de MES et des métaux associés (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont en forte diminution par rapport aux précédentes campagnes, si bien que la densité moyenne de flux de MES est inférieure à celles établies pour les états de référence, et la densité moyenne de flux métallique (exemple donné du Ni) se situe entre les valeurs définies pour l'état de référence. Si on compare cette campagne par rapport à la précédente campagne de saison fraîche (juillet-août 2013), cette décroissance notable peut s'expliquer, d'une part, par les précipitations faibles, qui de surcroît, se sont étalées dans le temps, d'autre part, par la faiblesse des vents qui ont limité les phénomènes de remise en suspension, ou encore à l'évolution des infrastructures minières dans les bassins versants.

Dans le Canal de la Havannah, une augmentation de 28% de la densité moyenne des flux de MES a été observée par rapport à juillet-août 2013 sans pour autant entraîner une augmentation des densités moyennes des flux métalliques. Les densités de moyennes des flux métalliques se seraient stabilisées depuis juillet 2013.

Dans la Rade Nord, les densités moyennes des flux de MES et des flux métalliques sont en forte baisse par rapport à la campagne de janvier-mars 2014. Ces densités sont proches des valeurs définies lors des états de référence à l'exception de la densité de flux du Cr qui reste plus forte (probablement due à la lixiviation des horizons superficiels des latérites enrichies en Chromite).

6 CONCLUSION

Pour la campagne de septembre-octobre 2014, le régime des vents a été irrégulier, bien que majoritairement d'un large secteur S à E-SE (alizées), de nombreuses rotations ont été observées dans le secteur W-NW et E-NE. La vitesse moyenne des vents était de $5,9 \pm 1,8$ m/s, soit presque deux fois moins intense que les normales saisonnières. La période de mouillage a été marquée par 297 mm de précipitations cumulées, ce qui reste 3 fois moins élevé que les précipitations enregistrées pour la campagne précédente de juillet-août 2013.

1. BAIE KWE (ST06)

Généralement, en baie Kwé, la quantité de MES en suspension est tributaire des apports terrigènes liés à la pluviométrie, mais également, des phénomènes de remobilisation des particules qui sont favorisés par des régimes de vents principalement de secteurs S à SE.

Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, le contexte hydro-climatique ci-dessus décrit a conduit aux observations suivantes :

- Les MES collectées sont majoritairement composées de fraction fines ($\phi < 40 \mu\text{m}$) ; cette fraction est principalement composée de silts fins.
- La masse moyenne des MES collectées est de 2,37 g, elle est bien plus faible qu'en juillet-août 2013 (11,6 g) ; la masse de MES la plus élevée a été collectée entre le 9 et le 12 octobre après un événement pluvieux conséquent (>70 mm de précipitations cumulées en 2 jours) pour un régime de vents modérés de secteur E ;
- Les MES sont majoritairement composées de carbonates, résultat corroboré par la composition minéralogique établie par DRX, ce qui caractérise la dominance de l'influence marine.
- Les concentrations métalliques (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) analysées dans chaque godet ont, une fois de plus, montré de fortes corrélations entre $0,971 > R > 0,998$;
- Par rapport aux précédentes campagnes, les densités de flux de MES et des métaux associés (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) ont significativement diminué. En effet la densité moyenne de flux de MES se retrouve plus basse que celles établies pour les états de référence, et la densité moyenne de flux métallique se situe entre les valeurs définies pour les états de référence. Ces diminution notables seraient à lier aux précipitations faibles qui se sont étalées dans le temps ainsi qu'à la faiblesse des vents ou encore à l'évolution des infrastructures minières dans les bassins versants.

Pour cette campagne de septembre-octobre 2014, il serait intéressant de bénéficier de données de charge solide (et de débit) relatives au bassin versant de la Kwé, ce qui permettrait une interprétation plus fine des fluctuations enregistrées.

2. CANAL DE LA HAVANNAH (NE-60)

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

- La masse moyenne de MES collectée ($1,6 \pm 1,8\text{g}$) est en légère hausse par rapport à celle enregistrée pour juillet-août 2013 ($1,1 \pm 1,8\text{g}$); le dépôt maximal de MES a été collecté pour des vents faibles de secteur S-SW puis E accompagnés de faibles précipitations;

- La fraction fine est majoritaire à l'inverse de ce qui était observé en juillet-août 2013. Cette différence de granulométrie serait induite par l'action des vents moyens (qui étaient presque deux fois plus forts en 2013), capable de remettre en suspension des particules plus grossières notamment des débris coquillés ;
- L'influence marine est quasi-totale à cette station, elle se caractérise par de fortes teneurs en carbonates, des minéraux d'origine marine (calcite et aragonite) et des valeurs élevées du ratio Ca/Fe ;
- L'enrichissement métallique est un peu plus faible qu'en juillet-août 2013, il reste cependant deux fois plus élevé que ceux définis pour les états de référence ;
- La concentration en soufre dans les MES est du même ordre que celle obtenue pour la campagne de juillet-août 2013 ;
- Une augmentation de 28% de la densité flux de MES a été observée par rapport à juillet-août 2013 sans entraîner d'augmentation des densités des flux métalliques. Les densités moyennes des flux métalliques se seraient stabilisées depuis juillet 2013.

3. RADE NORD (St15)

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

- Les masses de MES collectées sont très faibles et les différents épisodes pluvieux n'ont pas eu des incidences identiques sur les charges en MES dans la colonne d'eau ;
- La fraction fine est majoritaire, elle se compose principalement de silts fins ;
- Cette station est principalement sous l'influence terrigène qui se caractérise par une composition minérale dominée par la goéthite et la kaolinite, des faibles teneurs en carbonates et des ratios Ca/Fe extrêmement faibles ;
- Dans la Rade Nord, les densités moyennes des flux de MES et des flux métalliques sont en forte baisse par rapport à la campagne de janvier-mars 2014. Ces densités de flux de MES et de flux métalliques sont proches des valeurs définies lors des états de référence de 2007 à l'exception de la densité de flux du Cr qui reste plus forte (probablement due à la lixiviation des horizons superficiels des latérites enrichies en Chromite).

REFERENCES

- Ankley, G. T., D. M. Di Toro, et al. (1996). Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals. *Environmental Toxicology and Chemistry* 15(12): 2056-2066.
- ASTM, 1997. E1850 – 97 : Standard Guide for Selection of Resident Species as Test Organisms for Aquatic and Sediment Toxicity Tests. American Society for Testing and Material – International, West Conshohocken, PA, United States, 13 p.
- Bodeï & Pointeau, 2009 – Bilan de la réactivité géochimique de l'effluent. Modélisation chimie-transport en champs proche du diffuseur. DEN/DTN/SMTM/LMTE/NT/2009/05 (Convention IRD/Goro-Ni n° 1124), 58p.
- Chaurand, P.: Apport de la cristallographie et de la spéciation du chrome et du vanadium à la modélisation de l'altération de granulats artificiels (sous-produits d'aciérie) thèse. (2006)
- Douillet P. et Fernandez JM, 2009. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Simulation annuelle de la sédimentation des particules naturelles en contact avec l'effluent. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 55p.
- Derex P, Douillet P, Le Gendre R, 2008b. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle de transport. Simulation annuelle du rejet. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 196p.
- McBride M.B., *Environmental chemistry of soils*, Oxford University Press, Oxford, 1994.
- Hiemstra T., De Wit J.C.M., Van Riemsdijk W.H., Multisite proton adsorption modeling at the solid/solution interface of (hydr)oxides: A new approach. II. Application to various important (hydr)oxides, *J. Colloid Interface Sci.* 133 (1989) 105-117.
- INERIS, 2003. Analyse critique de l'acceptabilité du niveau de rejet de manganèse dans le milieu marin – Rapport Final, Goro Nickel. H. Baroudi, J. Bureau, C. Rollin, Institut de l'Environnement Industriel et des Risques – Direction des Risques Chroniques, INERIS-DRC-03-53097/DESP-R02, 17 décembre 2003, 37 p. + Annexes.
- ISO, 2006a. ISO 10253: Qualité de l'eau – Essai d'inhibition de la croissance des algues marines avec *Skeletonema costatum* et *Phaeodactylum tricornutum*. Organisation Internationale de Standardisation (ISO), Genève, Suisse, 12 p.

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| FIGURE 1 : AIRE D'ÉTUDE POUR LE SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES ISSUES DU PROCESS DE TRANSFORMATION DU MINÉRAI DE L'USINE DE PRODUCTION ET DES ACTIVITÉS D'EXCAVATION DE MINE DE VALE-NC. LA STATION St60-NE EST LOCALISÉE À 60 M DU REJET DE L'EFFLUENT MINIER DE VALE-NC. EN BAIE KWE, LE PIÈGE À SÉDIMENTS A ÉTÉ MOUILLÉ À LA STATION St06-KW1. LA STATION St15 SE SITUE À L'EMBOUCHURE DU CREEK DE LA RADE NORD. | 10 |
| FIGURE 2 : PUISSANCE TYPE DE L'ÉPAISSEUR DE MARQUAGE PAR L'EFFLUENT (RHODAMINE-WT) POUR DES CONDITIONS COURANTOLOGIQUES DE MI-MAREES DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET DE VIVE-EAU (DROITE) AU NIVEAU DE LA STATION St60-SW. | 10 |
| FIGURE 3 : ENREGISTREMENT DES « TAUX DE PRÉCIPITATIONS JOURNALIERS (RR) » EN (MM/J) À LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE DE L'« USINE-PILOTE » DE VALE-NC, « DIRECTION DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (DD) » EN (°) ET « VITESSE DES VENTS MOYENS JOURNALIERS (FF) » EN (M/S) À LA STATION DU RECIF IORO, POUR LA PÉRIODE DU 25 AOÛT AU 20 OCTOBRE 2014. LE CADRE BLEU CORRESPOND À LA PÉRIODE DE MOUILLAGE DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE | 13 |
| FIGURE 4 : MASSES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE EN BAIE KWE (St06-KWE). COMPOSITION DES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIÈRES (> 40 µM)..... | 15 |
| FIGURE 5 : POURCENTAGE DE FRACTION FINE ET GROSSIÈRE COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE EN BAIE KWE (St06-KWE)..... | 15 |
| FIGURE 6 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS EN BAIE KWE PAR LE PIÈGE À SÉDIMENTS SÉQUENTIEL, ENTRE LE 03 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014. | 15 |
| FIGURE 7 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES PAR LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 EN BAIE KWE (St06-KWE). | 17 |
| FIGURE 8 : MASSES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, AU NORD-EST DU DIFFUSEUR (St60-NE). COMPOSITION DES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (< 40 µM) ET FRACTIONS GROSSIÈRES (> 40 µM)..... | 18 |
| FIGURE 9 : POURCENTAGE DE FRACTION FINE ET GROSSIÈRE COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, AU NORD-EST DU DIFFUSEUR (St60-NE)..... | 18 |
| FIGURE 10 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH PAR LE PIÈGE À SÉDIMENTS SÉQUENTIEL, DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014. | 18 |
| FIGURE 11 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES PAR LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE)..... | 19 |
| FIGURE 12 : MASSES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 DANS LA RADE NORD DE LA BAIE DE PRONY. COMPOSITION DES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES) : IMPORTANCE DES FRACTIONS FINES (<40 µM) ET FRACTIONS GROSSIÈRES (> 40 µM)..... | 20 |
| FIGURE 13 : POURCENTAGE DES FRACTIONS FINES ET GROSSIÈRES COLLECTÉES DANS LES 12 GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 DANS LA RADE NORD DE LA BAIE DE PRONY (St15). | 20 |
| FIGURE 14 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES POPULATIONS DE GRAINS COLLECTÉS DANS LA RADE NORD (St15) PAR LE PIÈGE À SÉDIMENTS SÉQUENTIEL, DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014. | 21 |
| FIGURE 15 : TENEURS EN CARBONATES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES PAR LES GODETS DU PIÈGE SÉQUENTIEL MOUILLÉ DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 DANS LA RADE NORD (St15). | 22 |
| FIGURE 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTÉES EN BAIE KWE (St06-KW1) ENTRE LE 3 SEPTEMBRE ET LE 21 OCTOBRE 2014..... | 25 |

FIGURE 18 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL HAVANNAH (St60-NE) ENTRE LE 3 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014.27

FIGURE 19 : CONCENTRATION DU SOUFRE DANS LES GODETS ENTRE LE 3 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014 DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE).28

FIGURE 20 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER POUR LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL HAVANNAH (St60-NE) ENTRE LE 03 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014.29

FIGURE 21 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI), TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO Ca/Fe A LA STATION St06-KW1 POUR LA PERIODE DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014.34

FIGURE 22 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI), TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO Ca/Fe A LA STATION St60-NE POUR LA PERIODE DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014.35

FIGURE 23 : DIAGRAMME COMBINE : DIRECTION MAXIMUM DES VENTS (DXI), VITESSE MAXIMUM DES VENTS INSTANTANEE (FXI), TAUX DE PRECIPITATION, FRACTIONS INFERIEURES ET SUPERIEURES A 40 µM, CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES MES ET RATIO Ca/Fe A LA STATION St15 POUR LA PERIODE DU 3SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014.....36

FIGURE 24 : EVOLUTION TEMPORELLE DES FLUX DE NICKEL MOYENS (MG/M²/j) MESURES AU NIVEAU DES STATIONS St60-NE, St06-KW1 ET St15 DEPUIS 2007 (DEFINITION ETAT DE REFERENCE).39

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| TABLEAU 1 : LOCALISATION DES TROIS STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A PARTICULES SEQUENTIELS : CANAL DE LA HAVANNAH (St60-NE), EN RADE NORD (St15) ET EN BAIE KWE (St06-KW1). CES COORDONNEES SONT CONFORMES AU REFERENTIEL WGS-84. | 9 |
| TABLEAU 2 : LISTE DES ECHANTILLONS COLLECTES AUX STATIONS DE MOUILLAGE DES PIEGES A SEDIMENTS (St60-SW, StSt60-NE ET St06-KW1) ET PERIODES DE COLLECTE ENTRE SEPTEMBRE ET OCTOBRE 2014. | 11 |
| TABLEAU 3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES EN BAIE KWE (STATION St06-KW1) PAR LE PIEGE A PARTICULES, DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014. | 16 |
| TABLEAU 4 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH (STATION St60-NE) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014. | 19 |
| TABLEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES COLLECTEES DANS LA RADE NORD DE PRONY (STATION St15) PAR LE PIEGE A SEDIMENTS SEQUENTIEL, DU 03 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014. | 21 |
| TABLEAU 6 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 3 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014 (STATION St06-KW1 ; n=12)..... | 24 |
| TABLEAU 7 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE LORS DE LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE, POUR LES CAMPAGNES DE JUILLET-AOUT 2013 ET DE SEPTEMBRE-OCTOBRE 2014..... | 24 |
| TABLEAU 8 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES EN BAIE KWE ENTRE LE 3 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014 (STATION St06-KW1 ; n=12)..... | 24 |
| TABLEAU 10 : EVOLUTION TEMPORELLE ENTRE 2011 ET 2014 DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St06-KW1 AUX COURS DE DIFFERENTES CAMPAGNES. COMPARAISON AVEC LES VALEURS DE 2007/2008. | 25 |
| TABLEAU 11 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH DU 3 SEPTEMBRE AU 20 OCTOBRE 2014 (STATION St60-NE ; n=12). | 26 |
| TABLEAU 12 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 12 JUILLET ET 28 AOUT 2013 (STATION St60-NE ; n=12). | 26 |
| TABLEAU 13 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL HAVANNAH POUR LES CAMPAGNES DE JUILLET-AOUT 2013, SEPTEMBRE-OCTOBRE 2014 ET DE 2007 (ETAT DE REFERENCE). | 26 |
| TABLEAU 14 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH ENTRE LE 03 SEPTEMBRE ET LE 20 OCTOBRE 2014 ; STATION St60-NE ; n=12. | 26 |
| TABLEAU 16 : EVOLUTION TEMPORELLE ENTRE 2011 ET 2014 DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St60-NE. COMPARAISON AVEC LES VALEURS DE L'ETAT DE REFERENCE 2007/2008..... | 27 |
| TABLEAU 17 : CONCENTRATIONS MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LA RADE NORD ENTRE LE 18 JANVIER ET LE 6 MARS 2014 (STATION St15 ; n=4). | 28 |
| TABLEAU 18 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX ET CALCIUM DANS LES MES COLLECTEES DANS LA RADE NORD LORS DE LA CAMPAGNE D'AVRIL-JUIN 2014 ET LORS DE L'ETAT DE REFERENCE DE MARS 2007..... | 28 |
| TABLEAU 20 : COMPARAISON TEMPORELLE DU RATIO MOYEN Ca/Fe DANS LES MES COLLECTEES PAR LE PIEGE A SEDIMENT SEQUENTIEL AU NIVEAU DE LA STATION St15 ENTRE LES CAMPAGNES DE MARS 2007 ET SEPTEMBRE 2014. | 29 |
| TABLEAU 21 : VALEURS MOYENNES ET ECART-TYPES DES DENSITES DE FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE ET St60-SW (CANAL DE LA HAVANNAH) ET MASSE TOTALE SEDIMENTEE AU COURS DE LA PERIODE. VALEURS CALCULEES POUR L'ENSEMBLE DES CAMPAGNES DE JUILLET 2011 A AVRIL 2014 ; COMPARAISON AVEC LES VALEURS MESUREES EN 2006 ET 2007 (ETAT DE REFERENCE) AUX STATIONS St06-KW1 POUR LA BAIE KWE ET T4B, T4C ET TCM) POUR LE CANAL DE LA HAVANNAH. | 38 |

| | |
|---|----|
| TABLEAU 22 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), St60-NE (CANAL DE LA HAVANNAH) ET St15 (RADE NORD)..... | 40 |
| TABLEAU 23 : VALEURS MINIMALES, MAXIMALES ET MOYENNE DES DENSITES DE FLUX EN ELEMENTS METALLIQUES ET CALCIUM (MG/M ² /J) AU NIVEAU DES STATIONS St06-KW1 (BAIE KWE), T4B ET T4C (CANAL DE LA HAVANNAH) OBTENUES LORS DE LA PHASE DE DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE (2007-2008)..... | 41 |

LISTE DES ANNEXES

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

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

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

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

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

ANNEXE – 1

Description des méthodes de traitement et d'analyses des échantillons

Evaluation des flux de MES

Les flux verticaux de particules apportées par le réseau hydrologique sont estimés par collecte de séries temporelles d'échantillons de MES. Cette opération est assurée par le déploiement de pièges à sédiment de type séquentiel de 0,05 m² de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui sont grésés sur une ligne de mouillage équipée avec un largueur acoustique. La durée d'immersion a été de 1,5 mois (du 03 septembre au 20 octobre 2014 pour les stations ST15, NE60 et ST06-KW1).

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

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

Techniques et analyses

Teneur en carbonate

La teneur en carbonates est calculée par relation stœchiométrique à partir des concentrations de Ca et Mg établies en mg/kg après attaque totale (fusion alcaline) des fractions pélitiques des MES.

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 détermination de la distribution de ces populations est réalisée sur quatre échantillons par granulométrie laser (Malvern master Sizer 2000) sur la fraction inférieure à 40 µm. La granulométrie laser est réalisée à l'Université de Nouvelle-Calédonie.

Minéralogie

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

Dosage des métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni), du Ca et Mg dans les MES

Le dosage des métaux, du Ca et Mg, nécessaire pour le suivi des flux de polluants, est conduit par attaque totale des fractions pélitiques ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) des sédiments par fusion alcaline. Seuls, Ca, Mg et 5 métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont analysés par ICP-OES. Des échantillons de référence (MESS-3 et PACS-2) ont été attaqués selon le même protocole pour la validation des résultats de mesures.

Dosage du soufre

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

Dosage des HCT

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

ANNEXE – 2

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

| Date | Pluie (mm) | FXI (m/s) | DXI (°) |
|------------|------------|-----------|---------|
| 25/08/2014 | 20,4 | 11,9 | 69,7 |
| 26/08/2014 | 21,2 | 8,9 | 55,6 |
| 27/08/2014 | 4,6 | 4,3 | 90,1 |
| 28/08/2014 | 23,7 | 3,7 | 167,1 |
| 29/08/2014 | 2,6 | 3,9 | 105,1 |
| 30/08/2014 | 19,3 | 3,6 | 247,6 |
| 31/08/2014 | 0 | 2,5 | 184,5 |
| 01/09/2014 | 4 | 2,4 | 191,5 |
| 02/09/2014 | 1,6 | 3,5 | 177,2 |
| 03/09/2014 | 13,4 | 3,1 | 156,9 |
| 04/09/2014 | 0 | 5,5 | 292,7 |
| 05/09/2014 | 0 | 5,5 | 287,9 |
| 06/09/2014 | 0 | 6,1 | 271,1 |
| 07/09/2014 | 0,2 | 5,7 | 203,8 |
| 08/09/2014 | 8,1 | 8,3 | 133,1 |
| 09/09/2014 | 0,2 | 3,6 | 79,4 |
| 10/09/2014 | 0,2 | 2,9 | 129,9 |
| 11/09/2014 | 3 | 3,5 | 146,7 |
| 12/09/2014 | 0 | 4,5 | 176,1 |
| 13/09/2014 | 0 | 5,9 | 158,2 |
| 14/09/2014 | 1,2 | 7,3 | 143,1 |
| 15/09/2014 | 30,7 | 6,9 | 124,7 |
| 16/09/2014 | 43,1 | 8,1 | 97,7 |
| 17/09/2014 | 3,4 | 4,7 | 198,5 |
| 18/09/2014 | 0 | 2,9 | 232,1 |
| 19/09/2014 | 0 | 4,6 | 228,9 |
| 20/09/2014 | 0,2 | 3,6 | 160,6 |
| 21/09/2014 | 0 | 6,6 | 201,7 |
| 22/09/2014 | 0 | 7,2 | 166,4 |
| 23/09/2014 | 4 | 6,1 | 137,5 |
| 24/09/2014 | 5 | 5,5 | 119,8 |
| 25/09/2014 | 0 | 7,3 | 128,8 |
| 26/09/2014 | 0,8 | 4,4 | 88,1 |
| 27/09/2014 | 0 | 2,3 | 178,7 |
| 28/09/2014 | 5,4 | 4,5 | 259,0 |
| 29/09/2014 | 2 | 8,1 | 208,8 |
| 30/09/2014 | 0,2 | 7,0 | 193,7 |

| Date | Pluie (mm) | FXI (m/s) | DXI (°) |
|------------|------------|-----------|---------|
| 01/10/2014 | 0 | 4,1 | 169,4 |
| 02/10/2014 | 0 | 3,6 | 203,7 |
| 03/10/2014 | 0 | 4,7 | 171,7 |
| 04/10/2014 | 0 | 6,4 | 152,8 |
| 05/10/2014 | 0 | 8,5 | 115,3 |
| 06/10/2014 | 8,3 | 8,0 | 97,6 |
| 07/10/2014 | 6,8 | 9,2 | 85,0 |
| 08/10/2014 | 26,2 | 7,6 | 89,5 |
| 09/10/2014 | 10,6 | 6,1 | 89,4 |
| 10/10/2014 | 20,4 | 4,7 | 222,4 |
| 11/10/2014 | 0,6 | 6,3 | 182,4 |
| 12/10/2014 | 0 | 5,6 | 170,5 |
| 13/10/2014 | 4,8 | 8,0 | 163,3 |
| 14/10/2014 | 0,2 | 8,1 | 106,6 |
| 15/10/2014 | 0 | 7,5 | 91,9 |
| 16/10/2014 | 0 | 7,4 | 88,5 |
| 17/10/2014 | 0,4 | 6,7 | 86,5 |
| 18/10/2014 | 0 | 6,0 | 94,5 |
| 19/10/2014 | 0,2 | 4,2 | 125,3 |
| 20/10/2014 | 0 | 8,1 | 171,6 |
| 21/10/2014 | 0 | 7,4 | 161,4 |

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

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

ANNEXE – 3

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

MES SEDIMENTEE

| PERIODE DE COLLECTE | STATION | MASSE COLLECTEE (g) | STATION | MASSE COLLECTEE (g) | STATION | MASSE COLLECTEE (g) |
|---------------------|-------------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
| 03-06 septembre | St06-KW1-1 | 0,16 | ST15-1 | 0,00 | NE60-1 | 0,17 |
| 07-10 septembre | St06-KW1-2 | 1,11 | ST15-2 | 0,07 | NE60-2 | 5,85 |
| 11-14 septembre | St06-KW1-3 | 0,72 | ST15-3 | 0,01 | NE60-3 | 2,29 |
| 15-18 septembre | St06-KW1-4 | 1,60 | ST15-4 | 0,01 | NE60-4 | 0,29 |
| 19-22 septembre | St06-KW1-5 | 0,59 | ST15-5 | 0,01 | NE60-5 | 0,38 |
| 23-26 septembre | St06-KW1-6 | 1,50 | ST15-6 | 0,02 | NE60-6 | 0,68 |
| 27-30 septembre | St06-KW1-7 | 2,57 | ST15-7 | 0,03 | NE60-7 | 0,47 |
| 01-04 octobre | St06-KW1-8 | 3,13 | ST15-8 | 0,14 | NE60-8 | 0,47 |
| 05-08 octobre | St06-KW1-9 | 3,74 | ST15-9 | 0,27 | NE60-9 | 0,35 |
| 09-12 octobre | St06-KW1-10 | 5,57 | ST15-10 | 0,67 | NE60-10 | 1,99 |
| 13-16 octobre | St06-KW1-11 | 4,14 | ST15-11 | 0,66 | NE60-11 | 4,22 |
| 17-20 octobre | St06-KW1-12 | 3,60 | ST15-12 | 0,30 | NE60-12 | 2,36 |

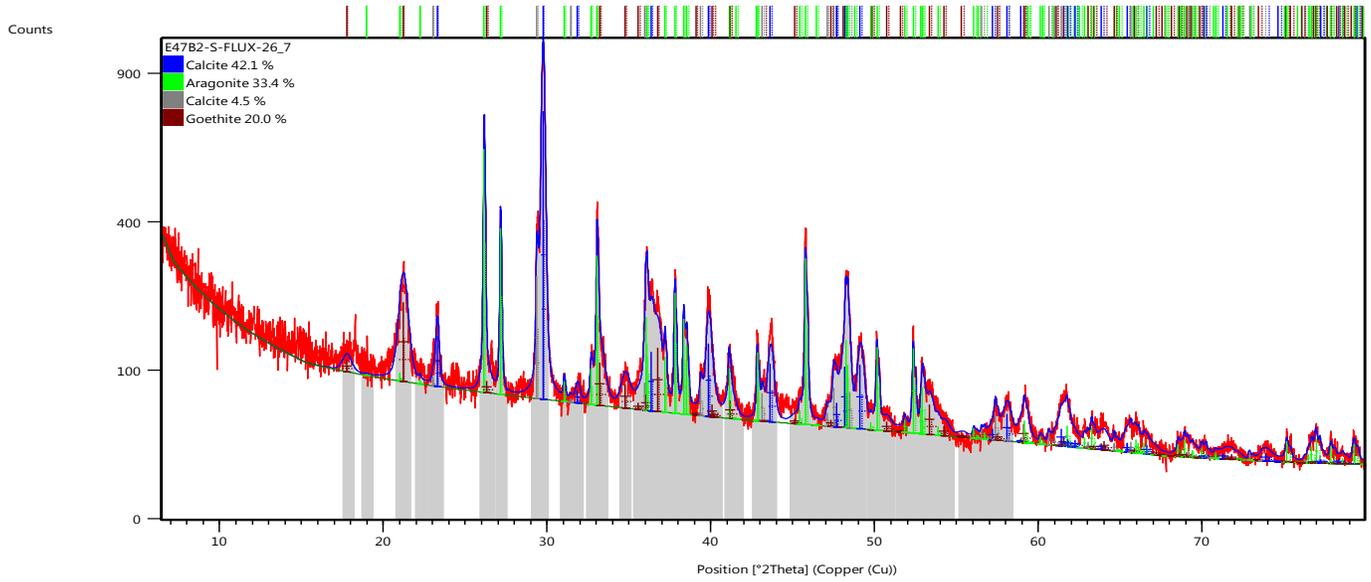
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

| | 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 |
| NE60-(A)-02 | 6,7 | 75,7 | 13,3 | 2,3 | 1,4 | 0,6 | 0,0 |
| NE60-(A)-03 | 4,7 | 69,9 | 20,5 | 2,5 | 1,3 | 1,1 | 0,0 |
| NE60-(A)-11 | 5,7 | 74,2 | 14,5 | 2,2 | 1,4 | 1,5 | 0,6 |
| NE60-(A)-12 | 4,7 | 68,4 | 21,5 | 2,6 | 1,4 | 1,0 | 0,4 |
| ST15-(B)-11 | 11,3 | 49,5 | 22,1 | 6,2 | 5,0 | 6,1 | 0,0 |
| ST15-(B)-12 | 15,7 | 63,5 | 14,2 | 3,1 | 2,1 | 1,4 | 0,0 |
| KW1-2 (C) | 7,8 | 71,3 | 16,3 | 2,0 | 1,1 | 1,2 | 0,3 |
| KW1-4 (C) | 22,3 | 55,4 | 16,7 | 3,0 | 1,7 | 0,9 | 0,0 |
| KW1-7 (C) | 7,1 | 61,5 | 24,1 | 4,0 | 2,3 | 1,1 | 0,0 |
| KW1-10 (C) | 13,3 | 65,5 | 15,5 | 2,8 | 1,7 | 1,1 | 0,1 |
| KW1-12 (C) | 11,9 | 68,3 | 12,3 | 2,2 | 1,6 | 2,2 | 1,4 |

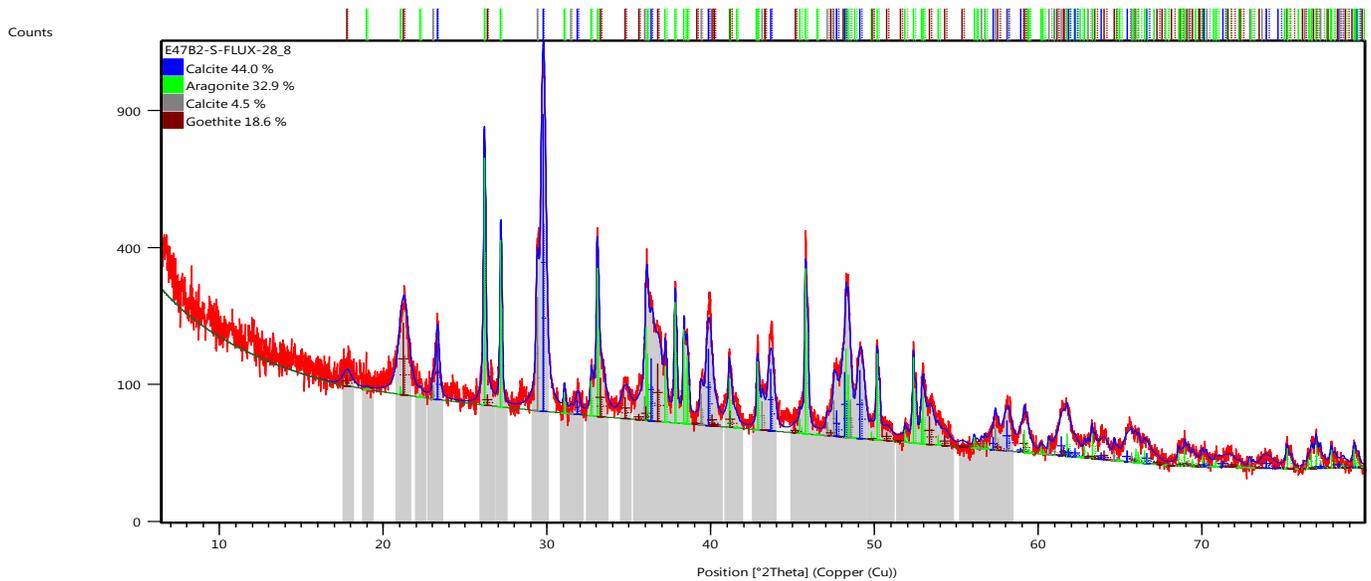
Nd = non déterminée par manque de matière

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES MES DE LA BAIE KWE

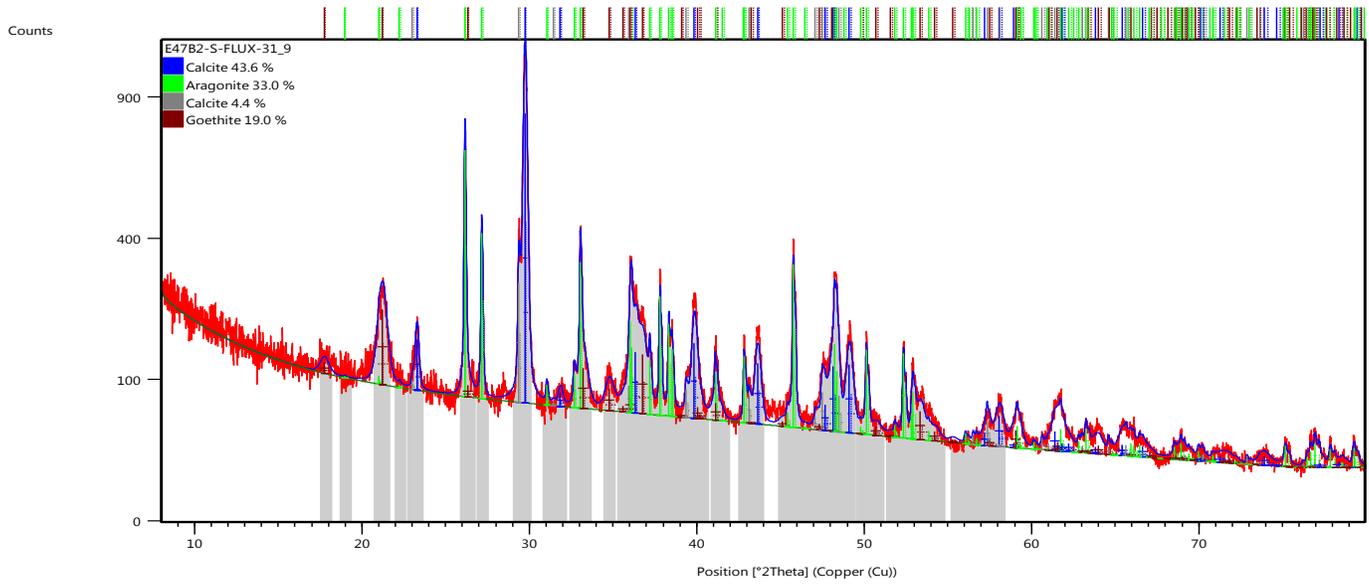
Station St06-KW1 ; godet 2



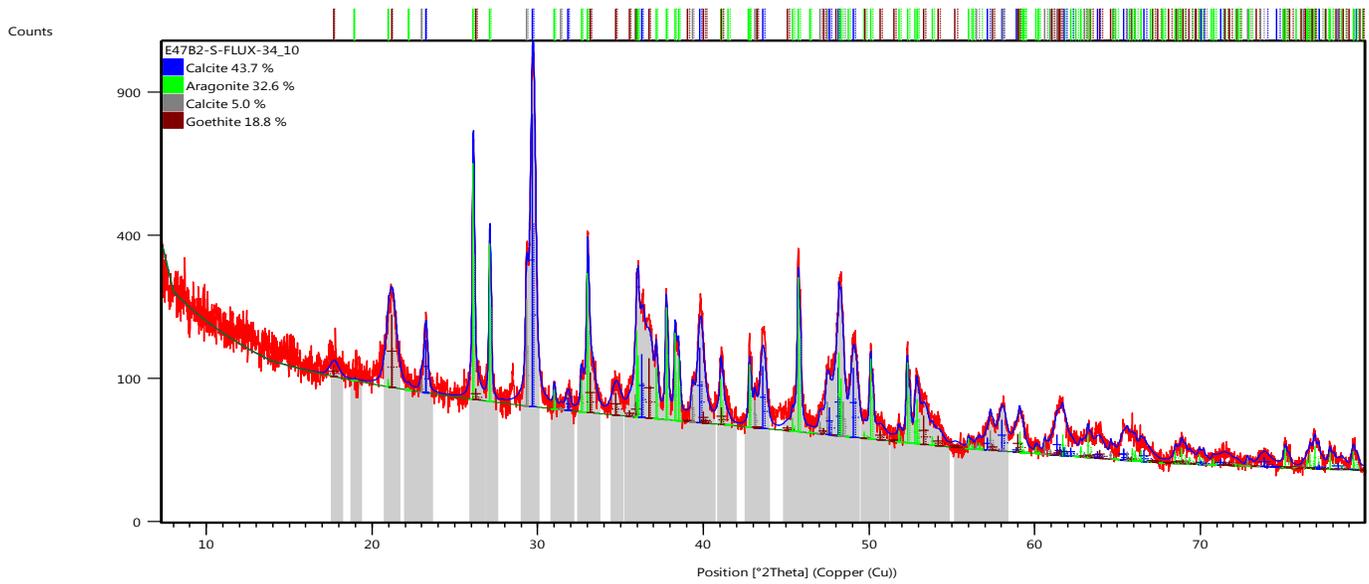
Station St06-KW1 ; godet 4



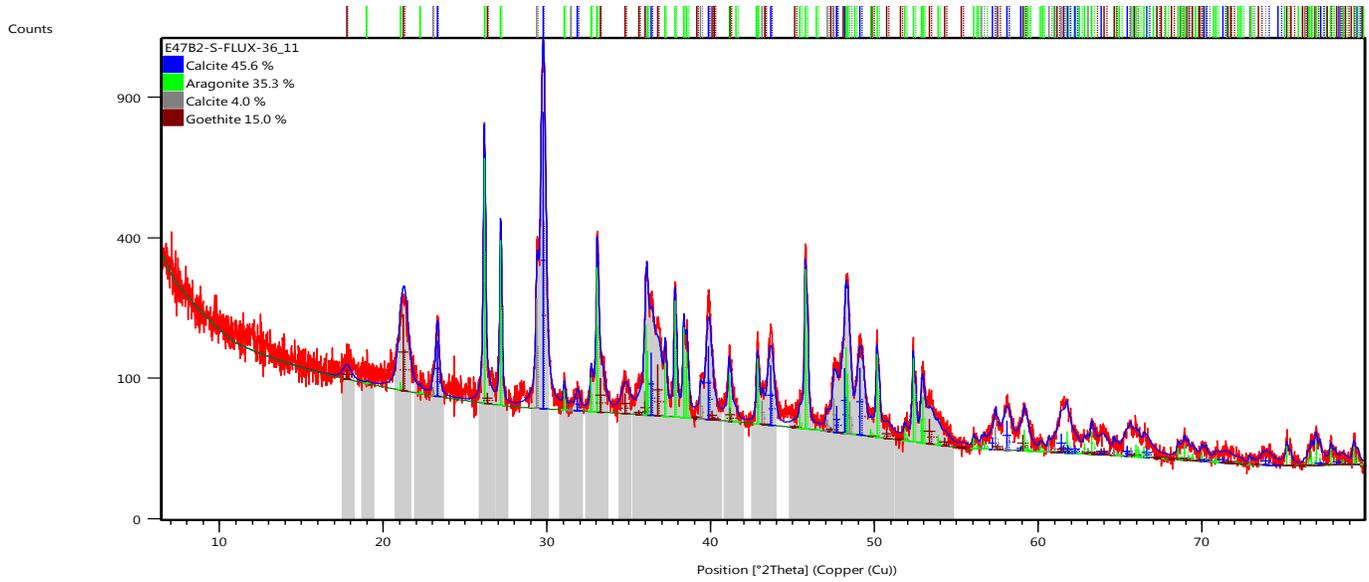
Station St06-KW1 ; godet 7



Station St06-KW1 ; godet 10

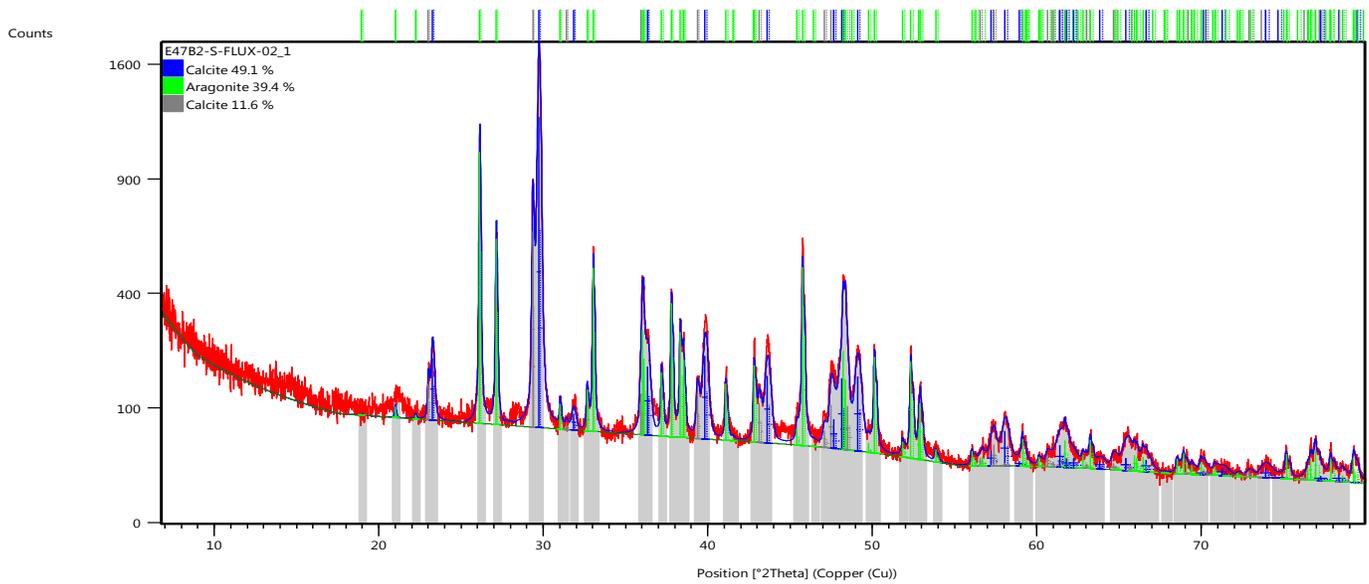


Station St06-KW1 ; godet 12

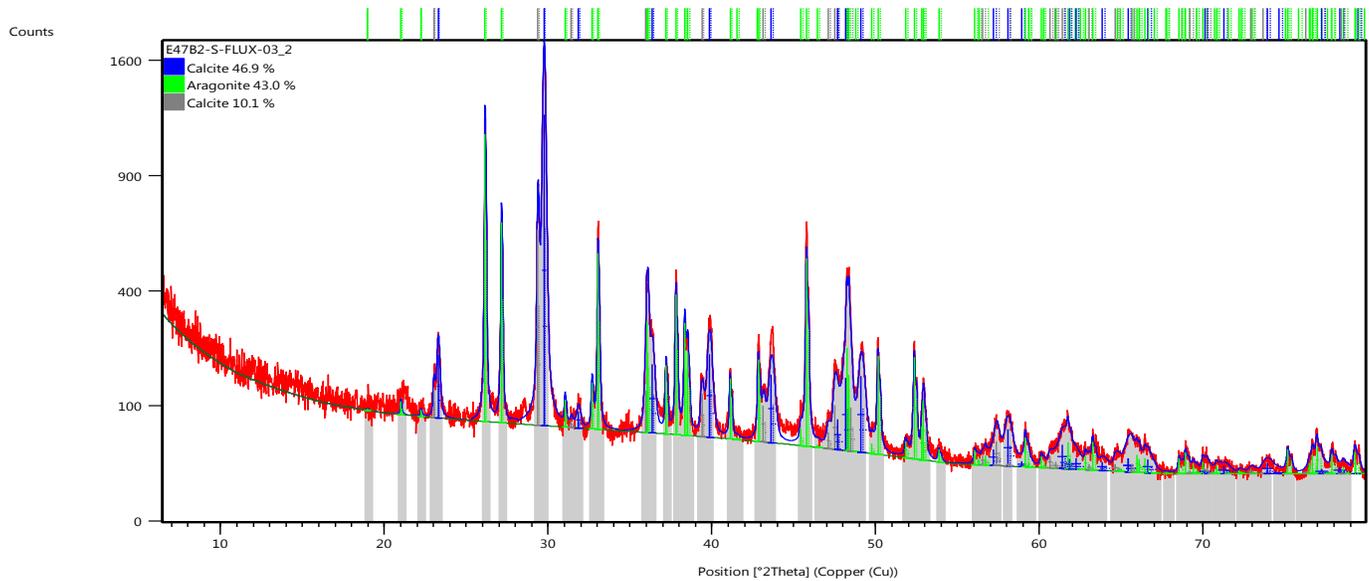


COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DU CANAL DE LA HAVANNAH

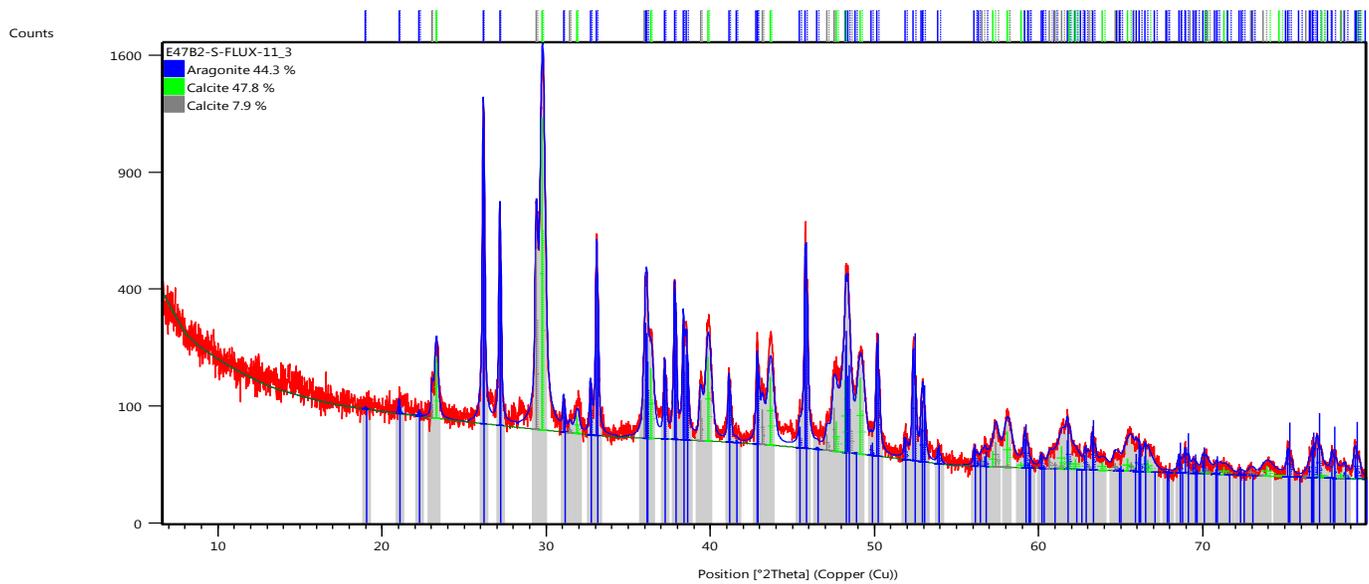
Station St60-NE ; godet 2



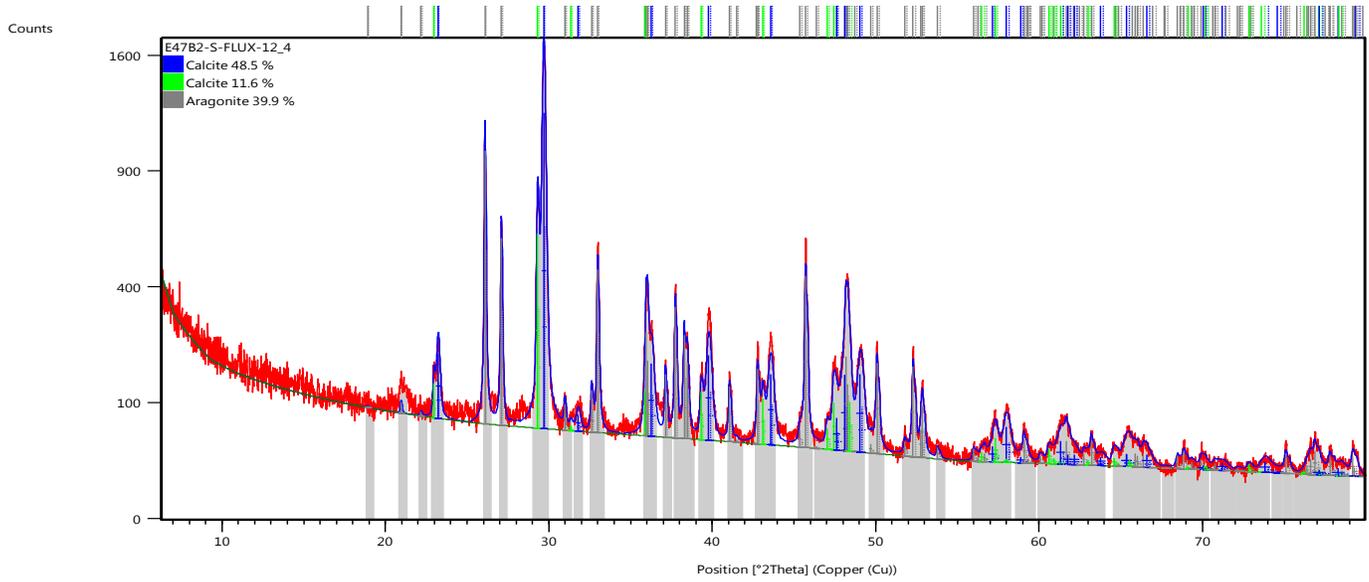
Station St60-NE ; godet 3



Station St60-NE ; godet 11

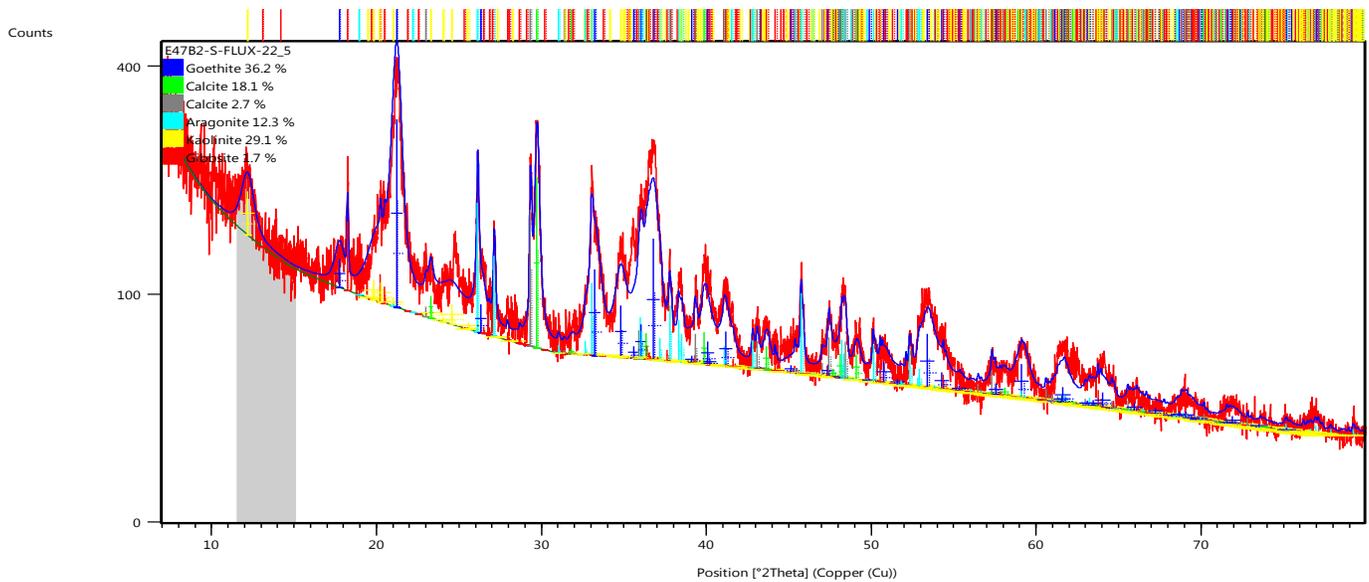


Station St60-NE ; godet 12

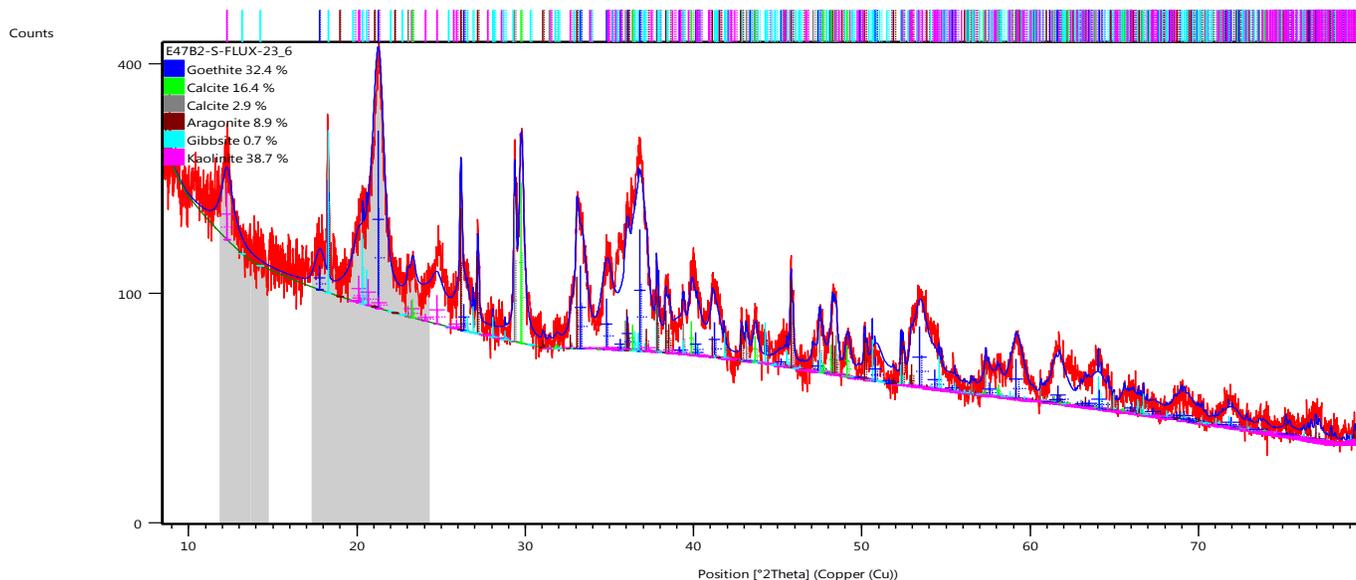


COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MES DE LA STATION St15

Station St15 ; godet 10



Station St15 ; godet 11



TENEURS EN CARBONATES

| PERIODE DE COLLECTE | STATION | CaCO ₃ (%) | STATION | CaCO ₃ (%) | STATION | CaCO ₃ (%) |
|---------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|
| 03-06 septembre | KW1-1 | 23,1 | St15-1 | Nd | NE60-1 | 76,9 |
| 07-10 septembre | KW1-2 | 53,3 | St15-2 | Nd | NE60-2 | 84,2 |
| 11-14 septembre | KW1-3 | 65,0 | St15-3 | Nd | NE60-3 | 84,0 |
| 15-18 septembre | KW1-4 | 67,1 | St15-4 | Nd | NE60-4 | 82,3 |
| 19-22 septembre | KW1-5 | 66,9 | St15-5 | Nd | NE60-5 | 82,7 |
| 23-26 septembre | KW1-6 | 66,2 | St15-6 | Nd | NE60-6 | 82,7 |
| 27-30 septembre | KW1-7 | 66,3 | St15-7 | Nd | NE60-7 | 83,2 |
| 01-04 octobre | KW1-8 | 66,2 | St15-8 | 25,4 | NE60-8 | 84,6 |
| 05-08 octobre | KW1-9 | 66,0 | St15-9 | Nd | NE60-9 | 80,9 |
| 09-12 octobre | KW1-10 | 65,0 | St15-10 | 27,0 | NE60-10 | 82,5 |
| 13-16 octobre | KW1-11 | 67,6 | St15-11 | 26,3 | NE60-11 | 84,4 |
| 17-20 octobre | KW1-12 | 66,5 | St15-12 | 25,0 | NE60-12 | 83,8 |

Nd = non déterminée car pas assez de matière pour la réalisation des analyses

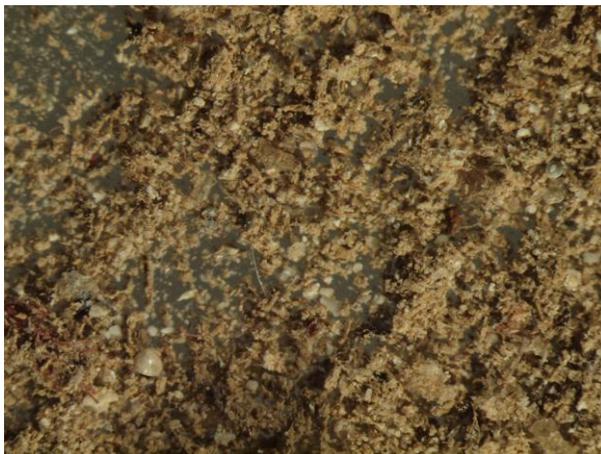
OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE (GROSSISSEMENT X 11,5)

KW1-6



KW1-10

Matières en suspension collectée dans les godets St06-KW1-6 et St06-KW1-11 : Présence de nombreuses particules carbonatées (tests d'organismes invertébrés marins plus ou moins fortement altérés) et dans une moindre mesure de particules latéritiques de couleur brune. La quantité de particules carbonatées est importante malgré la proximité de l'embouchure de la Kwé.

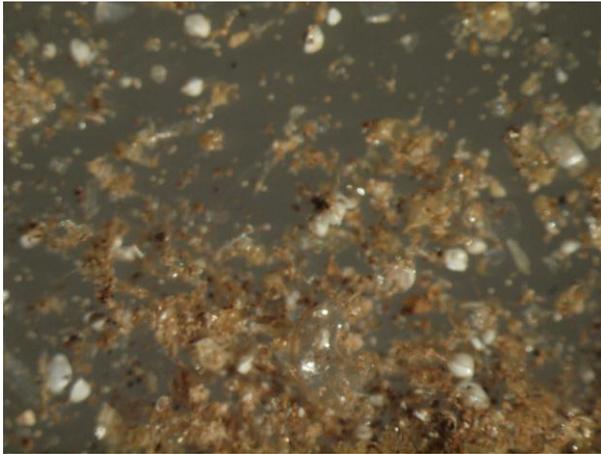


ST60-NE-1



ST60-NE-12

Matières en suspension collectée dans les godets St60-NE-1 et St60-NE-12 : Présence de nombreux débris de tests de microorganismes marins imbriqués dans des substances organiques ou de micro-coquillages dans un état d'altération faible.



St15-11

Matières en suspension collectées au niveau de l'embouchure du creek de la rade nord du godet St15-11 (une seule photo a été réalisée faute de matière pour les autres godets). Présence de nombreuses particules latéritiques de couleur rouge-brun avec la présence de quelques tests d'organismes marins (couleur blanche)

ANNEXE – 4

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

| PERIODE DE COLLECTE | ECHANTILLON | Ca (mg/kg) | Co (mg/kg) | Cr (mg/kg) | Fe (mg/kg) | Mn (mg/kg) | Ni (mg/kg) |
|---------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 03-06 septembre | KW1-1 | 195 251 | 173 | 5 612 | 185 800 | 1 324 | 2 770 |
| 07-10 septembre | KW1-2 | 242 273 | 123 | 3 992 | 138 688 | 993 | 2 121 |
| 11-14 septembre | KW1-3 | 250 304 | 114 | 3 720 | 130 012 | 836 | 1 967 |
| 15-18 septembre | KW1-4 | 250 006 | 109 | 3 555 | 127 235 | 850 | 1 913 |
| 19-22 septembre | KW1-5 | 247 190 | 113 | 3 759 | 132 669 | 806 | 2 015 |
| 23-26 septembre | KW1-6 | 247 207 | 106 | 3 512 | 124 366 | 805 | 1 862 |
| 27-30 septembre | KW1-7 | 246 514 | 111 | 3 691 | 128 487 | 845 | 1 934 |
| 01-04 octobre | KW1-8 | 245 525 | 114 | 3 842 | 133 379 | 867 | 2 013 |
| 05-08 octobre | KW1-9 | 241 771 | 107 | 3 587 | 125 684 | 826 | 1 872 |
| 09-12 octobre | KW1-10 | 252 426 | 106 | 3 647 | 121 896 | 821 | 1 817 |
| 13-16 octobre | KW1-11 | 248 009 | 103 | 3 472 | 123 776 | 823 | 1 852 |
| 17-20 octobre | KW1-12 | 247 814 | 105 | 3 561 | 123 740 | 824 | 1 856 |

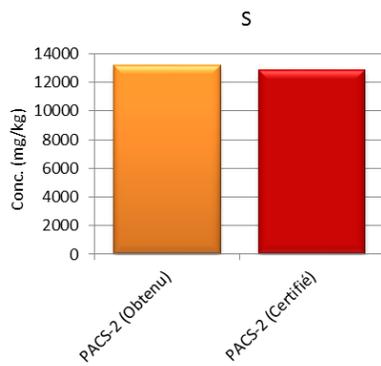
| PERIODE DE COLLECTE | ECHANTILLON | Ca (mg/kg) | Co (mg/kg) | Cr (mg/kg) | Fe (mg/kg) | Mn (mg/kg) | Ni (mg/kg) |
|---------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 03-06 septembre | NE60-1 | 291 482 | 36 | 1 028 | 39 693 | 292 | 579 |
| 07-10 septembre | NE60-2 | 318 233 | 24 | 715 | 24 194 | 220 | 367 |
| 11-14 septembre | NE60-3 | 317 560 | 22 | 679 | 23 140 | 196 | 358 |
| 15-18 septembre | NE60-4 | 312 171 | 25 | 751 | 26 767 | 194 | 395 |
| 19-22 septembre | NE60-5 | 313 426 | 26 | 745 | 26 696 | 197 | 402 |
| 23-26 septembre | NE60-6 | 313 158 | 24 | 716 | 25 475 | 197 | 381 |
| 27-30 septembre | NE60-7 | 315 287 | 25 | 702 | 24 974 | 189 | 375 |
| 01-04 octobre | NE60-8 | 321 011 | 24 | 703 | 25 164 | 192 | 380 |
| 05-08 octobre | NE60-9 | 306 744 | 22 | 675 | 23 206 | 176 | 352 |
| 09-12 octobre | NE60-10 | 312 690 | 22 | 648 | 22 237 | 189 | 336 |
| 13-16 octobre | NE60-11 | 319 781 | 23 | 646 | 22 130 | 199 | 336 |
| 17-20 octobre | NE60-12 | 291 482 | 24 | 692 | 24 667 | 211 | 374 |

| PERIODE DE COLLECTE | ECHANTILLON | Ca (mg/kg) | Co (mg/kg) | Cr (mg/kg) | Fe (mg/kg) | Mn (mg/kg) | Ni (mg/kg) |
|---------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 03-06 septembre | St15-1 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 07-10 septembre | St15-2 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 11-14 septembre | St15-3 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 15-18 septembre | St15-4 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 19-22 septembre | St15-5 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 23-26 septembre | St15-6 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 27-30 septembre | St15-7 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| 01-04 octobre | St15-8 | 83 930 | 267 | 8 506 | 224 045 | 1 712 | 2 885 |
| 05-08 octobre | St15-9 | 94 396 | 260 | 8 037 | 216 774 | 1 895 | 2 795 |
| 09-12 octobre | St15-10 | 91 869 | 277 | 8 378 | 224 316 | 2 039 | 2 868 |
| 13-16 octobre | St15-11 | 88 765 | 290 | 8 424 | 226 888 | 2 095 | 2 945 |
| 17-20 octobre | St15-12 | 76 942 | 229 | 7 208 | 196 211 | 1 665 | 2 496 |

n.a. : non analysé par manque de matière dans les godets

| STATION | Soufre (mg/kg) |
|-------------|----------------|
| St60-NE -2 | 3 170 |
| St60-NE -3 | 2 663 |
| St60-NE -6 | 2 734 |
| St60-NE -7 | 2 827 |
| St60-NE -8 | 2 840 |
| St60-NE -10 | 2 807 |
| St60-NE -11 | 2 712 |
| St60-NE -12 | 2 689 |

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



Concentration du soufre dans un matériel certifié et analysé en même temps que les godets du Canal de la Havannah (St60-NE).

ANNEXE – 5

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

MES

| PERIODE DE COLLECTE | STATION | Flux MES (g/m ² /j) | STATION | Flux MES (g/m ² /j) | STATION | Flux MES (g/m ² /j) |
|---------------------|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|
| 03-06 septembre | KW1-1 | 0,8 | St15-1 | 0,0 | ST60-NE-1 | 0,9 |
| 07-10 septembre | KW1-2 | 5,5 | ST15-2 | 0,3 | ST60-NE-2 | 29,2 |
| 11-14 septembre | KW1-3 | 3,6 | ST15-3 | 0,1 | ST60-NE-3 | 11,5 |
| 15-18 septembre | KW1-4 | 8,0 | ST15-4 | 0,1 | ST60-NE-4 | 1,5 |
| 19-22 septembre | KW1-5 | 2,9 | ST15-5 | 0,1 | ST60-NE-5 | 1,9 |
| 23-26 septembre | KW1-6 | 7,5 | ST15-6 | 0,1 | ST60-NE-6 | 3,4 |
| 27-30 septembre | KW1-7 | 12,9 | ST15-7 | 0,2 | ST60-NE-7 | 2,3 |
| 01-04 octobre | KW1-8 | 15,7 | ST15-8 | 0,7 | ST60-NE-8 | 2,3 |
| 05-08 octobre | KW1-9 | 18,7 | ST15-9 | 1,3 | ST60-NE-9 | 1,8 |
| 09-12 octobre | KW1-10 | 27,9 | ST15-10 | 3,3 | ST60-NE-10 | 9,9 |
| 13-16 octobre | KW1-11 | 20,7 | ST15-11 | 3,3 | ST60-NE-11 | 21,1 |
| 17-20 octobre | KW1-12 | 18,0 | ST15-12 | 1,5 | ST60-NE-12 | 11,8 |

Métaux particuliers

| PERIODE DE COLLECTE St06-KW1 | Ca (mg/m ² /j) | Co (mg/m ² /j) | Cr (mg/m ² /j) | Fe (mg/m ² /j) | Mn (mg/m ² /j) | Ni (mg/m ² /j) |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 03-06 septembre | 158 | 0 | 5 | 150 | 1 | 2 |
| 07-10 septembre | 1343 | 1 | 22 | 769 | 6 | 12 |
| 11-14 septembre | 904 | 0 | 13 | 469 | 3 | 7 |
| 15-18 septembre | 2000 | 1 | 28 | 1 018 | 7 | 15 |
| 19-22 septembre | 724 | 0 | 11 | 389 | 2 | 6 |
| 23-26 septembre | 1855 | 1 | 26 | 933 | 6 | 14 |
| 27-30 septembre | 3169 | 1 | 47 | 1 652 | 11 | 25 |
| 01-04 octobre | 3842 | 2 | 60 | 2 087 | 14 | 32 |
| 05-08 octobre | 4524 | 2 | 67 | 2 352 | 15 | 35 |
| 09-12 octobre | 7035 | 3 | 102 | 3 397 | 23 | 51 |
| 13-16 octobre | 5131 | 2 | 72 | 2 561 | 17 | 38 |
| 17-20 octobre | 4462 | 2 | 64 | 2 228 | 15 | 33 |

| PERIODE DE COLLECTE St60-NE | Ca (mg/m ² /j) | Co (mg/m ² /j) | Cr (mg/m ² /j) | Fe (mg/m ² /j) | Mn (mg/m ² /j) | Ni (mg/m ² /j) |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 03-06 septembre | 254 | 0 | 1 | 35 | 0 | 1 |
| 07-10 septembre | 9304 | 1 | 21 | 707 | 6 | 11 |
| 11-14 septembre | 3636 | 0 | 8 | 265 | 2 | 4 |
| 15-18 septembre | 459 | 0 | 1 | 39 | 0 | 1 |
| 19-22 septembre | 591 | 0 | 1 | 50 | 0 | 1 |
| 23-26 septembre | 1058 | 0 | 2 | 86 | 1 | 1 |
| 27-30 septembre | 735 | 0 | 2 | 58 | 0 | 1 |
| 01-04 octobre | 751 | 0 | 2 | 59 | 0 | 1 |
| 05-08 octobre | 543 | 0 | 1 | 41 | 0 | 1 |
| 09-12 octobre | 3108 | 0 | 6 | 221 | 2 | 3 |
| 13-16 octobre | 6751 | 0 | 14 | 467 | 4 | 7 |
| 17-20 octobre | 3734 | 0 | 8 | 291 | 2 | 4 |

| PERIODE DE COLLECTE St15 | Ca (mg/m ² /j) | Co (mg/m ² /j) | Cr (mg/m ² /j) | Fe (mg/m ² /j) | Mn (mg/m ² /j) | Ni (mg/m ² /j) |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 03-06 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 07-10 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 11-14 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 15-18 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 19-22 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 23-26 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 27-30 septembre | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| 01-04 octobre | 58 | 0 | 6 | 156 | 1 | 2 |
| 05-08 octobre | 126 | 0 | 11 | 289 | 3 | 4 |
| 09-12 octobre | 307 | 1 | 28 | 750 | 7 | 10 |
| 13-16 octobre | 292 | 1 | 28 | 748 | 7 | 10 |
| 17-20 octobre | 116 | 0 | 11 | 295 | 3 | 4 |

nd = non déterminée en raison du manque de masse collectée