



# SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DES PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, LA BAIE KWE ET LA RADE NORD DE PRONY

CAMPAGNE 1<sup>ER</sup> SEMESTRE 2016



« *Analyses des métaux dans  
l'environnement et expertises* »

Rapport semestriel  
Période de  
**Mai à septembre 2016**

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

## CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL-LEA

---

Convention n° 3052-Avenant n°1

**Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de  
la Havannah, la baie Kwé et la Rade Nord de Prony**

**Campagne 1<sup>er</sup> semestre 2016**

**Période de mai à septembre 2016**

Kumar-Roiné S., Haddad L., Laurent A., Hubert M., Pluchino S., Achard R., Fernandez JM.



	<b>Ref AEL</b>	<b>Ref Client</b>	
<b>Identification</b>	121205-VI-18	E87583	
<b>Titre complet</b>	Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1 <sup>er</sup> semestre 2016. <b>Période de mai - septembre 2016.</b>		
<b>Auteurs</b>	Kumar-Roiné S., Haddad L., Laurent A., Hubert M., Pluchino S., Achard R., Fernandez JM.		
<b>Résumé</b>	<p>Dans le but de se conformer à l'accord passé entre Vale-NC et la Province Sud et défini par la convention CCB 2009, Vale-NC a mis en place un programme de suivi pour un certain nombre de paramètres qui caractérisent la qualité des sédiments dont les densités de flux verticaux de particules depuis 2006/2007. Ce rapport présente les résultats des campagnes de prélèvement du <b>1<sup>er</sup> semestre 2016</b> (mai – septembre 2016) effectuées dans la zone d'effluence du complexe minier et industriel de Vale-NC. Le programme de surveillance semestriel du milieu marin est réalisé sur un total de 3 stations dont la répartition a été révisée en 2014. A ce jour, les stations sont réparties en Baie Kwé (St06-KW1), en Rade Nord de la Baie du Prony (St15) et dans le Canal de la Havannah (St60-NE).</p> <p>Cette campagne conforte les observations des campagnes précédentes établissant une relation entre les conditions météorologiques et les densités des flux verticaux, notamment les précipitations pour la St15 <i>via</i> l'érosion et le transport des sols par le Creek de la Rade Nord et les précipitations et/ou vents des régimes S pour la St06-KW1 <i>via</i> l'effet de houle et de re-suspension des particules fines sédimentées dans la baie Kwé qui s'en suit. Pour la St60-NE, aucune corrélation pertinente ne se dégage ; le panache latéritique y serait conditionné par un ensemble de mécanismes qu'il n'est pas encore pertinent d'explicitier (érosion de la côte, contribution des rejets de l'émissaire marin?).</p> <p>Les évolutions des concentrations en métaux latéritiques (Co, Fe, Mn et Ni), les ratios de Ca/Fe et les densités des flux de MES et de Ni en St06-KW1 et dans une moindre mesure en St60-NE pour cette campagne par rapport celle de 2007 mettent en évidence un enrichissement de la baie Kwé et du Canal de la Havannah en matières latéritiques. Pour la St15, bien que les concentrations en métaux latéritiques (Co, Fe, Mn et Ni) et le ratio de Ca/Fe restent invariables, les densités de flux en MES et en Ni sont en augmentation ce qui souligne l'hétérogénéité des apports à cette station. Pour le Cr, les concentrations sont soit dans le même ordre de grandeur qu'en 2007 (St60-KW1 et St60-NE), soit elles sont en baisse (St15). En ce qui concerne les concentrations de Ca et S, aucune trace d'enrichissement anormal n'est discernée à St60-NE permettant de déceler l'influence de l'effluent sur la formation de gypse.</p>		
<b>APPROBATION</b>			
<b>FONCTION</b>	<b>NOMS</b>	<b>VISA</b>	<b>DATE</b>
Rédacteur	Kumar-Roiné S.	SKR	29/11/2016
Vérificateur 1	Fernandez JM.	JMFA	07/12/2016
Vérificateur 2	Pousse Céline	CP	21/10/2016
Approbateur	Fernandez JM.	JMFA	23/12/2016
<b>EVOLUTION</b>			
<b>VERSION</b>	<b>DESCRIPTION DES MISES A JOUR</b>		<b>DATE</b>
V1.0	Rapport final		23/12/2016
<b>COPIE - DIFFUSION</b>			
<b>NOM</b>	<b>ORGANISME</b>		
Céline Casalis	Vale-NC, Département Environnement		

**Ce rapport est cité comme suit :** Kumar-Roiné S., Haddad ., Laurent A., Hubert M., Pluchino S., Achard R., Fernandez JM. 2016. Suivi des densités de flux verticaux des particules dans la Canal de la Havannah, la baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1<sup>er</sup> semestre 2016. Période de mai – septembre 2016. Contrat AEL/Vale-NC n°3052-Avenant n°1, 74p.

# TABLE DES MATIERES

- I. INTRODUCTION ..... 7**
  - A. CONTEXTE ..... 7
  - B. OBJECTIFS..... 7
- II. METHODOLOGIE ..... 9**
  - A. SITE D’ETUDE ..... 9
  - B. ECHANTILLONNAGE ..... 11
  - C. CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES ..... 12
- III. RESULTATS..... 13**
  - A. PARAMETRES METEOROLOGIQUES ..... 13
  - B. CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION..... 19
  - C. COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION ..... 30
- IV. INTERPRETATION ..... 38**
  - A. INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES..... 38
  - B. CALCUL DES FLUX DES MATIERES..... 47
- SYNTHESE..... 50**

# I. INTRODUCTION

## A. CONTEXTE

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 (Fernandez *et al.*, 2007), et d'autre part, elle assure la continuité du suivi depuis 2011 pour le Canal de la Havannah et la baie Kwé et depuis 2014 pour la Rade Nord (Achard *et al.*, 2015).

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 (appelées aussi Matière En Suspension ; MES) 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 en baie Kwé et de l'usine dans la Rade Nord de Prony ; et
- D'autre part, persistantes dans les effluents industriels traités et rejetés dans le Canal de la Havannah *via* le diffuseur.

## B. OBJECTIFS

Selon les zones d'étude, ont été effectués:

- Le suivi temporel des apports terrigènes issus des bassins versants de la baie Kwé impactée par les activités d'excavation déployées sur le front de mine ;
- Le suivi temporel des apports terrigènes et anthropiques, consécutifs à l'implantation de l'usine de valorisation du minerai, dans la Rade Nord de Prony ;
- Le suivi temporel des apports industriels issus du procédé chimique au voisinage immédiat du diffuseur dans le Canal de la Havannah.

Le suivi de la zone du Canal de la Havannah a pour objet de répondre aux questions de la double rémanence supposée :

- D'une part, du gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) formé après l'étape de neutralisation par du calcaire et de la chaux des solutions d'extraction acides du Ni;
- D'autre part, de minéraux qui pourraient être générés lors de la mise en contact de l'effluent avec l'eau de mer. Ce phénomène pourrait entraîner (par précipitation, co-précipitation et adsorption) une fraction non négligeable des métaux à la surface des sédiments.

**Remarque :** *Les expériences de laboratoire et la modélisation associée ont montré que seule une formation quantitativement négligeable de précipités de calcite devrait se produire (Bodeř et Pointeau, 2009). La mesure in-situ permet de discuter de cette hypothèse, dans l'état actuel du niveau des rejets.*

Ce rapport présente les résultats relatifs aux flux verticaux de particules dans la zone d'influence de l'usine VALE-NC, obtenus lors de la campagne du premier semestre de 2016 et les comparer aux campagnes précédentes de mouillage semestrielles entre 2011-2015 et celles de l'état de référence en 2006/2007 (Achard *et al.*, 2015 ; Fernandez *et al.*, 2007).

## II. METHODOLOGIE

La méthodologie détaillée des différentes étapes de prélèvement, traitement et d'analyses est décrite dans l'Annexe 1.

### A. SITE D'ETUDE

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 qui a permis la définition de l'état de référence des flux particulaires en 2007 (Fernandez *et al.*, 2007). Elle permet d'assurer le suivi des apports induits par le diffuseur.
- **Zone d'influence de la mine** : Il s'agit d'une station dans l'embouchure de la rivière Kwé (St06-KW1) qui a permis la définition de l'état de référence des flux particulaires en 2006 et 2007 (Fernandez *et al.*, 2007). Elle permet 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 de la Rade Nord qui jouxte le site de l'usine. Cette station qui a également fait l'objet d'un état de référence en 2006 et 2007 (Fernandez *et al.*, 2007) permet d'assurer un suivi des apports induits par les installations industrielles.

**Tableau 1 : Liste et position des stations de prélèvement du suivi des flux verticaux de particules dans la zone d'influence de l'usine de Vale-NC.**

Localisation	Station	Station au référentiel WGS-84		Profondeur (m)
		Longitude	Latitude	
Baie Kwé	St06-KW1	E166 59.140	S22 20.747	28
Rade Nord de Prony	St15	E166 52.590	S22 20.037	25
Canal de la Havannah	St60-NE	E166 59.677	S22 22.113	39

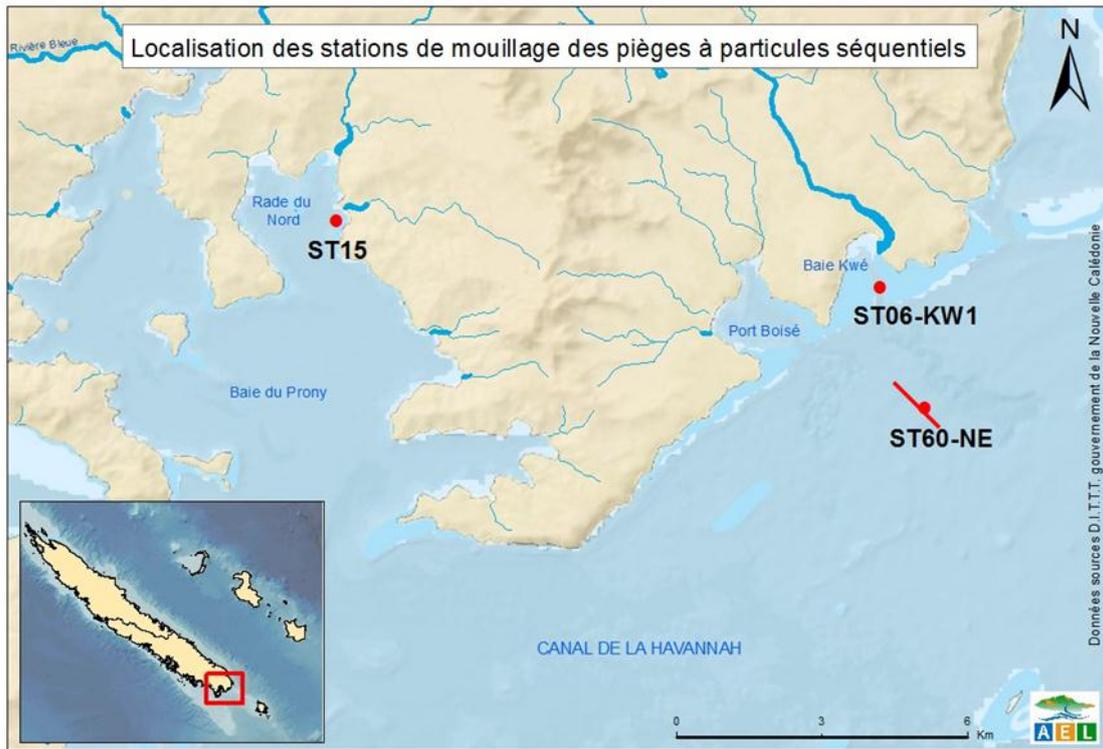


Figure 1 : Localisation géographique des stations de prélèvement du suivi des flux verticaux de particules dans la zone d'influence de l'usine de Vale-NC (le trait rouge représente le diffuseur).

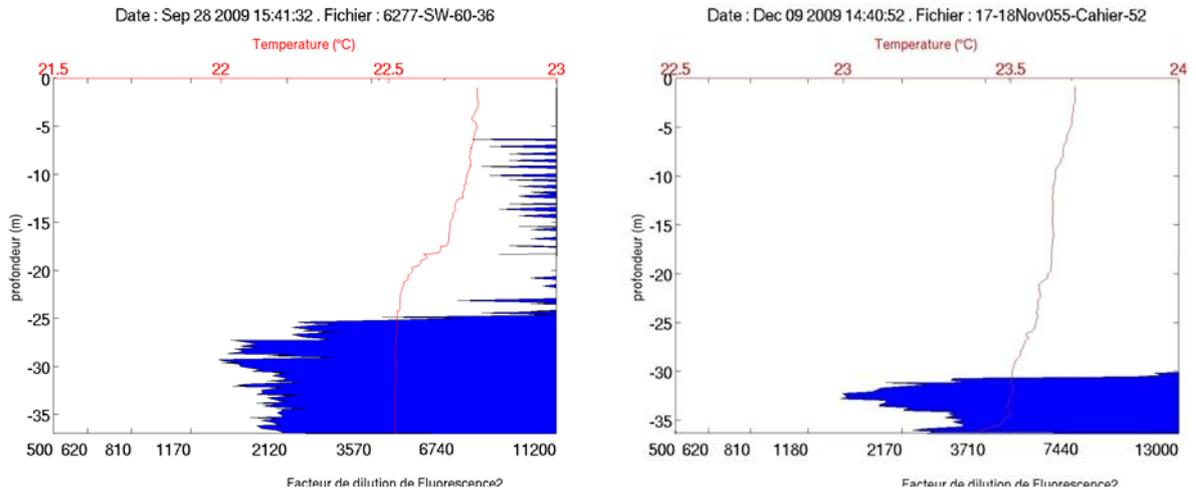


Figure 2 : Empreinte type de l'effluent par marquage à la rhodamine-WT pour des conditions courantologiques de marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

## B. ECHANTILLONNAGE

Les opérations de terrain ont été réalisées à bord du Slavko (Casy Express) au cours de 3 sorties. La pose et récupération des lignes de mouillage équipées chacune d'un piège à particules séquentiel et d'un largeur acoustique ont, respectivement, été effectuées le 26 mai 2016 et 19 juillet 2016 aux stations St15 et St60-NE. Pour la station St60-KW1, elles ont, respectivement, été effectuées le 19 juillet 2016 et 13 septembre 2016.

**Note :** *Initialement, les pièges ont été immergés aux 3 stations le même jour, soit le 26 mai 2016. Suite à une anomalie technique du largeur acoustique, le piège immergé en St06-KW1 et le largeur acoustique ont été retrouvés endommagés le 24 juin 2016 sur le récif de la baie Kwé. Un nouveau piège a par la suite été immergé le 19 juillet 2016 avec une ligne de mouillage simple lestée.*

Les pièges à particules de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) sont dotés d'une section efficace de 0,050 m<sup>2</sup>, équipés de carrousels de 12 godets pour permettre la collecte d'une série temporelle de particules sédimentées.

**Rappel :** *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 (Fernandez et al., 2009) ; 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 2).*

**Remarque :** Les suivis sont réalisés par des fonds supérieurs à 15 m afin de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme le charriage des grosses particules. 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 (Drex et al., 2008).

Pour les stations St15 et St60-NE, la collecte des particules a été programmée pour débuter le 27 mai 2016 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 14 juillet 2016 à 00h00.

Pour la station St06-KW1, la collecte des particules a été programmée pour débuter le 20 juillet 2016 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 06 septembre 2016 à 00h00.

Au total, 12 échantillons de matériel particulaire ont été prélevés pour chacun des trois sites d'immersion soit 36 échantillons (Tableau 2).

Dès le retour au laboratoire, les échantillons de MES collectés dans les godets des pièges séquentiels, ont été conservés au frais (4°C) jusqu'à la phase de traitement.

Tableau 2 : Détail de collecte des échantillons par les pièges séquentiels mouillés à St06-KW1, St15 et St60-NE.

St06-KW1		St15		St60-NE	
Période de collecte	Prélèvement	Période de collecte	Prélèvement	Période de collecte	Prélèvement
20-23 juillet 2016	001	27-30 mai 2016	001	27-30 mai 2016	001
24-27 juillet 2016	002	31 mai-03 juin 2016	002	31 mai-03 juin 2016	002
28-31 juillet 2016	003	04-07 juin 2016	003	04-07 juin 2016	003
01-04 août 2016	004	08-11 juin 2016	004	08-11 juin 2016	004
05-08 août 2016	005	12-15 juin 2016	005	12-15 juin 2016	005
09-12 août 2016	006	16-19 juin 2016	006	16-19 juin 2016	006
13-16 août 2016	007	20-23 juin 2016	007	20-23 juin 2016	007
17-20 août 2016	008	24-27 juin 2016	008	24-27 juin 2016	008
21-24 août 2016	009	28 juin-01 juillet 2016	009	28 juin-01 juillet 2016	009
25-28 août 2016	010	02-05 juillet 2016	010	02-05 juillet 2016	010
29 août-01 septembre 2016	011	06-09 juillet 2016	011	06-09 juillet 2016	011
02-05 septembre 2016	012	10-13 juillet 2016	012	10-13 juillet 2016	012

## C. CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone lors de l’immersion des pièges sont fortement susceptibles d’influer la quantité et la nature de MES collectée.

Ainsi, la pluviométrie journalière « RR » et les données quotidiennes de vent maximal instantané (vitesse « FXI » et direction « DXI ») ont été enregistrées par la station météorologique de l’usine pilote Vale-NC (référence n° 98817104 ; Goro Usine) pour la période de 27 mai au 13 juillet 2016 (St15 et St60-NE) et du 20 juillet au 05 septembre 2016 (St06-KW1) ; l’interprétation des analyses reposera en partie sur ces observations.

Les mesures de vent pouvant présenter des écarts, notamment aux stations St60-NE et St06-KW1 en raison de la différence de situation géographique et l’absence de reliefs, les données météorologiques provenant de la station météorologique IRD/AEL implantée sur la balise du récif loro dans la Canal de la Havannah (référence n° 658 ; loro) sont également exploitées pour l’interprétation des résultats.

## III. RESULTATS

### A. PARAMETRES METEOROLOGIQUES

Les valeurs des paramètres météorologiques données par les deux stations météorologiques (GORO et IORO) sont regroupées dans l'Annexe 2.

#### 1. Précipitations atmosphériques

##### **St06-KW1 :**

La période du 20 juillet au 05 septembre 2016 compte 23 jours de pluies cumulant à 247,4 mm mesurés par la station météorologique GORO. Cette période a été marquée par un épisode pluvieux particulièrement significatif enregistré le 29 juillet (81,7 mm). D'autres épisodes d'intensité moindre ont été enregistrés le 26, 27 et 28 août (16,2, 35,7 et 33,4 mm, respectivement) ce qui correspond à 85,3 mm de précipitations sur 72 h (Figure 3).

Pour la St06-KW1, l'ensemble des précipitations cumulées lors de cette campagne est environ 2 et 4 fois moins important que lors des campagnes de juillet-août 2013 (467,0 mm) et janvier-mars 2014 (920,2 mm). En revanche, il est environ 3 fois plus important qu'en octobre-novembre 2015 (96,0 mm) (Tableau 3).

##### **St15 et St60-NE :**

La période du 27 mai au 13 juillet 2016 compte 26 jours de pluies cumulant à 241,4 mm mesurés par la station météorologique GORO. Cette période a présenté un seul épisode pluvieux hautement significatif : le 05 juin a enregistré 183,0 mm de précipitations (Figure 4).

Pour la St15, les précipitations cumulées pour l'ensemble de la période sont 4 fois moins importantes que lors de la campagne de janvier-mars 2014 (920,2 mm). En revanche, elles sont environ 2 fois plus importantes que celles de juillet-septembre 2015 (148,9 mm) (Tableau 4).

Pour la St60-NE, les précipitations cumulées pour l'ensemble de la période sont 2 fois moins importantes que lors de la campagne de juillet-août 2013 (467,0 mm). En revanche, elles sont environ 2 fois plus importantes que celles de juillet-septembre 2015 (148,9 mm) (Tableau 5).

#### 2. Vitesse et direction du vent

##### **St06-KW1 :**

Durant la période du 20 juillet au 05 septembre 2016, les directions de vents mesurés aux deux stations météorologiques montrent l'instabilité des régimes qui présentent plusieurs rotations des vents. Durant la période du 20 juillet au 05 septembre 2016, l'intensité des vents moyens mesurés à la station météorologique GORO a été de  $10,8 \pm 2,4$  m/s et celle mesurée à la station IORO a été de  $6,2 \pm 2,5$  m/s. Plus en détail, sur la

base des données acquises par la station météorologique IORO, pour la période d'étude, les trois observations suivantes peuvent être relevées (Figure 3) :

- Les vitesses > 6,0 m/s sont généralement associées avec les vents soufflant des secteurs E, S, voire SO.
- Les vitesses > 7,0 m/s ont été enregistrées pendant la deuxième partie de la période de mouillage, à savoir à partir du 15 août. Une exception est constatée pour les dates du 03, 06 et 07 août.

Pour la période de mouillage, la vitesse moyenne des vents enregistrée par les deux stations météorologiques sont proches de celles des précédentes campagnes exception faite pour la campagne de septembre-octobre 2014 dont la valeur mesurée par la station météorologique GORO est presque 1,5 fois inférieure ( $7,3 \pm 2,9$  m/s ; Tableau 3).

#### **St15 et St60-NE :**

Durant la période du 27 mai au 13 juillet 2016, les directions de vents mesurés aux deux stations météorologiques démontrent également l'instabilité des régimes avec plusieurs rotations des vents. Durant de la période du 27 mai au 13 juillet 2016, l'intensité des vents moyens mesurés aux stations météorologiques GORO et IORO ont été de  $10,9 \pm 3,1$  m/s et  $6,2 \pm 2,5$  m/s, respectivement. Plus en détail, sur la base des données acquises par la station météorologique IORO, deux observations peuvent être relevées (Figure 4) :

- Les vitesses > 6,0 m/s sont généralement associées avec les vents soufflant des secteurs E, S, voire SO.
- Les vitesses > 7,0 m/s ont été enregistrées pendant la première partie de la période de mouillage, à savoir avant le 20 juin, exception faite pour les dates du 30 juin et 04, 10 et 11 juillet.

Pour les stations St15 et St60-NE, la vitesse moyenne des vents enregistrée par les deux stations météorologiques, sont proches de celles des précédentes campagnes. Une exception est cependant à souligner pour la campagne de septembre-octobre 2014 dont la valeur mesurée par la station météorologique GORO est 1,5 fois inférieure ( $7,3 \pm 2,9$  m/s ; Tableau 4 et Tableau 5).

Tableau 3 : Compilation des données météorologiques lors des différentes campagnes d'immersion de piège séquentiel à la station St06-KW1.

St06-KW1*								
Année	Campagne	Station GORO		Station IORO	Campagne	Station GORO		Station IORO
		Précipitation total (mm)	Vitesse vents moyens (m/s)			Précipitation total (mm)	Vitesse vents moyens (m/s)	
2006	-	-	-	-	Oct. - Nov. 2006	54,4	ND	ND
2007	Mars - Avr. 2007	272,6	ND	ND	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	Juil. - Août 2011	273,7	11,3 ± 3,2	ND
2012	Janv. - Mars 2012	370,1	12,3 ± 2,7	IC	Sept. - Oct. 2012	278,5	12,0 ± 2,4	P
2013	Janv. - Févr. 2013	181,2	12,0 ± 2,1	P	Juil. - Août 2013	467,0	11,3 ± 3,6	P
2014	Janv. - Mars 2014	920,2	9,3 ± 4,0	6,6 ± 2,9	Sept - Oct. 2014	199,6	7,3 ± 2,9	5,9 ± 1,8
2015	Janv. - Mars 2015	242,6	12,0 ± 3,7	P	Oct. - Nov. 2015	96,0	12,4 ± 3,1	P
<b>2016</b>	<b>Juil. - Sept. 2016</b>	<b>247,4</b>	<b>10,8 ± 2,4</b>	<b>6,2 ± 2,5</b>	-	-	-	-

\* données de précipitation et vents couvrant uniquement les périodes de programmation des pièges (de la date d'ouverture à la date de fermeture des godets).

- : pas de campagne ou piège perdu ou campagne en cours ; ND : données non disponible ; IC base de donnée incomplète suite une panne d'enregistreur ; P : panne d'enregistreur.

Tableau 4 : Compilation des données météorologiques lors des différentes campagnes d'immersion de piège séquentiel à la station St15.

St15*								
Année	Campagne	Station GORO		Station IORO	Campagne	Station GORO		Station IORO
		Précipitation total (mm)	Vitesse vents moyens (m/s)			Précipitation total (mm)	Vitesse vents moyens (m/s)	
2006	-	-	-	-	Oct. - Nov. 2006	54,4	ND	ND
2007	Mars - Avr. 2007	272,6	ND	ND	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	Janv. - Mars 2014	920,2	9,3 ± 4,0	6,6 ± 2,9	Sept. - Oct. 2014	199,6	7,3 ± 2,9	5,9 ± 1,8
2015	Janv. - Mars 2015	242,6	12,0 ± 3,7	P	Juil. - Sept. 2015	148,9	11,6 ± 2,6	P
<b>2016</b>	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>241,4</b>	<b>10,9 ± 3,1</b>	<b>6,2 ± 2,5</b>	-	-	-	-

\* données de précipitation et vents couvrant uniquement les périodes de programmation des pièges (de la date d'ouverture à la date de fermeture des godets).

- : pas de campagne ou piège perdu ou campagne en cours ; ND : données non disponible ; P : panne d'appareil d'enregistreur.

Tableau 5 : Compilation des données météorologiques lors des différentes campagnes d'immersion de piège séquentiel à la station St60-NE.

Année	Campagne	St60-NE*						
		Station GORO		Station IORO	Campagne	Station GORO		Station IORO
		Précipitation total (mm)	Vitesse vents moyens (m/s)			Précipitation total (mm)	Vitesse vents moyens (m/s)	
2006	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	Févr. - Mars 2007	300,6	ND	ND	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	Juil. - Août 2011	-	-	-
2012	Janv. - Mar 2012	370,1	12,3 ± 2,7	IC	Sept. - Oct. 2012	278,5	12,0 ± 2,4	P
2013	Janv. - Mars 2013	181,2	12,0 ± 2,1	P	Juil. - Août 2013	467,0	11,3 ± 3,6	P
2014	Avr. - Juin 2014	260,9	8,3 ± 3,5	6,9 ± 2,5	Sept. - Oct. 2014	199,6	7,3 ± 2,9	5,9 ± 1,8
2015	Janv. - Mars 2015	242,6	12,0 ± 3,7	P	Juil. - Sept. 2015	148,9	11,6 ± 2,6	P
<b>2016</b>	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>241,4</b>	<b>10,9 ± 3,1</b>	<b>6,2 ± 2,5</b>	-	-	-	-

\* données de précipitation et vents couvrant uniquement les périodes de programmation des pièges (de la date d'ouverture à la date de fermeture des godets).

- : pas de campagne ou piège perdu ou campagne en cours ; ND : données non disponible ; IC base de donnée incomplète suite une panne d'enregistreur ; P : panne d'enregistreur.

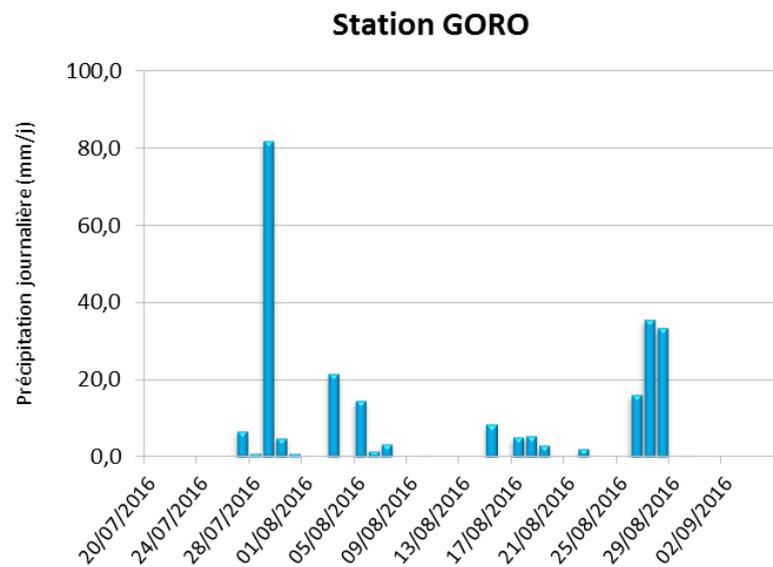
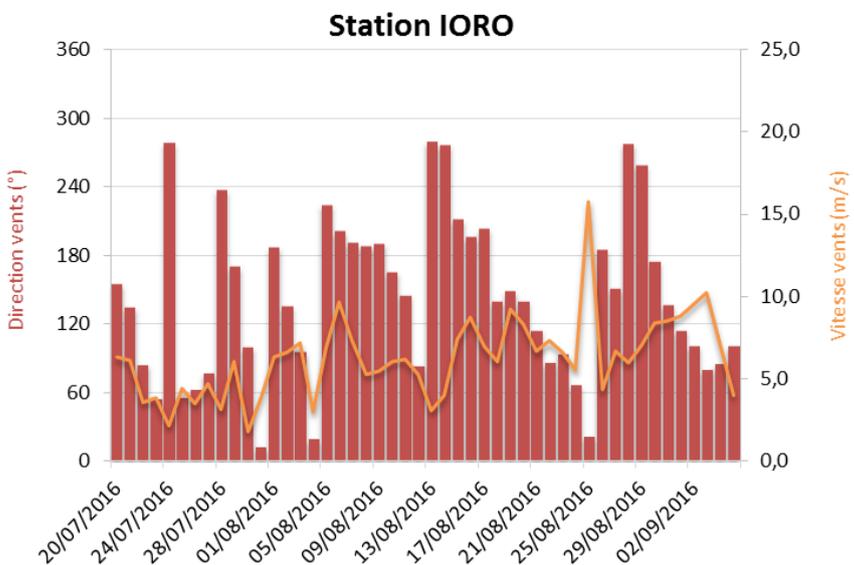
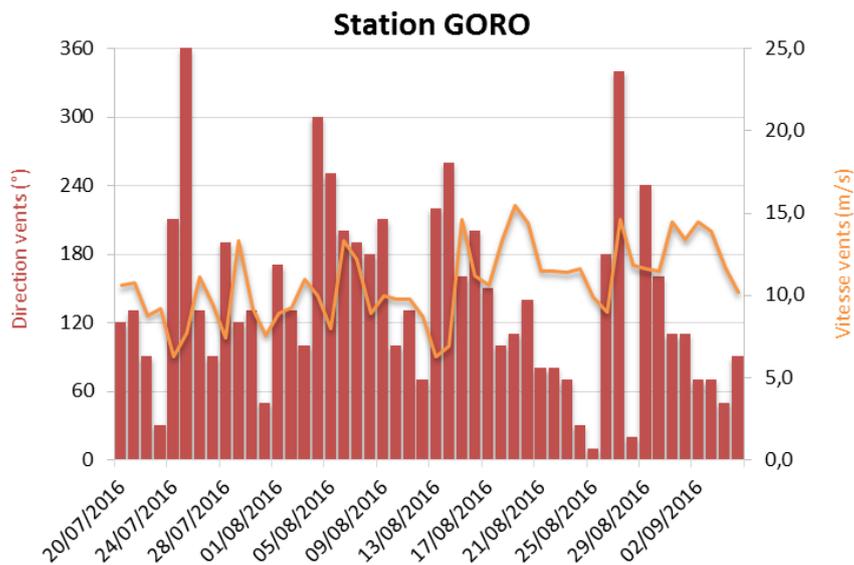


Figure 3 : Cumul journalier de précipitations et évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 20 juillet au 05 septembre 2016.

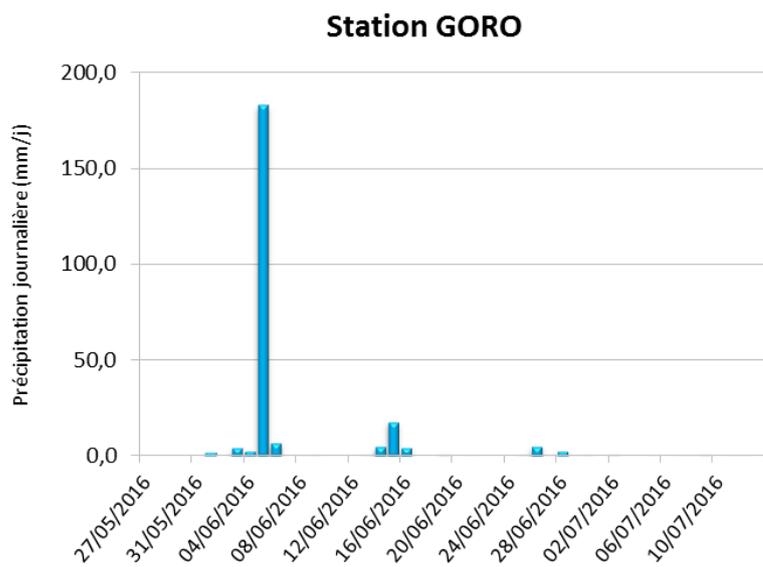
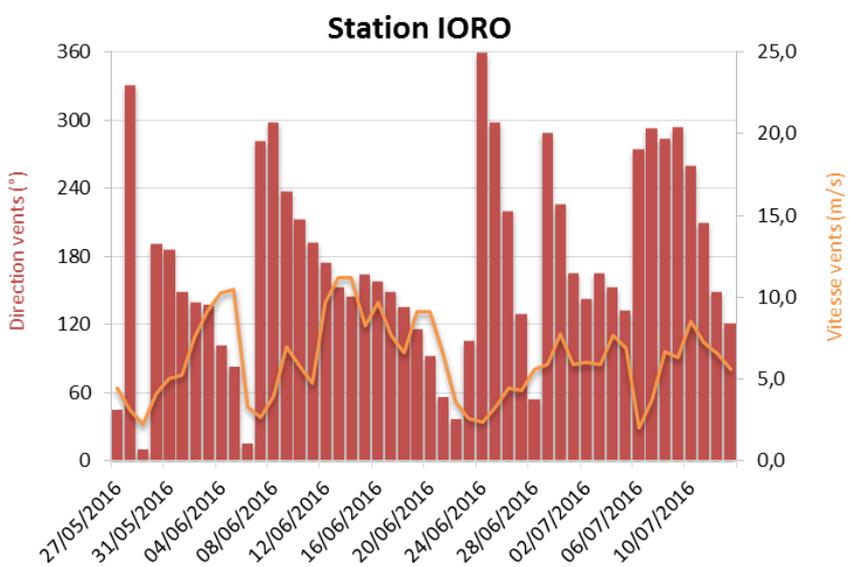
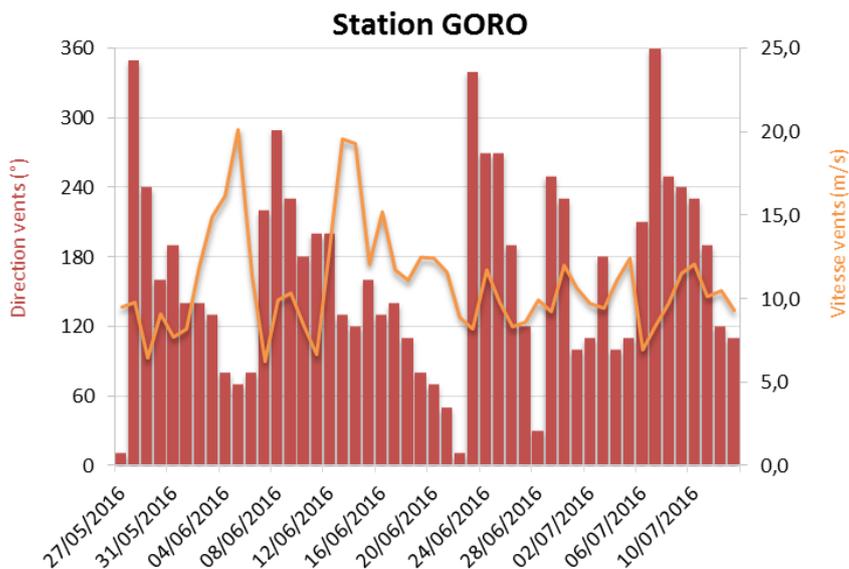


Figure 4 : Cumul journalier de précipitations et évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 27 mai au 13 juillet 2016.

## B. CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

Les résultats concernant les masses de matière en suspension (MES) collectées par les pièges séquentiels à particules, la granulométrie des populations de grains, la composition minéralogique (diffractogrammes) et les teneurs en carbonates des fractions fines de MES ainsi que les observations de MES au microscope optique sont regroupés dans l'Annexe 3.

### 1. Baie Kwé (St06-KW1)

#### Masses collectées

Les masses de MES collectées en St06-KW1 se distribuent entre 0,67 g et 16,1 g avec une moyenne de  $5,7 \pm 4,6$  g. La plus faible quantité a été collectée le 24-27 juillet (002) tandis que la plus forte a été collectée le 13-16 août (007). Les prélèvements montrent des valeurs de masses de MES très évolutives dans le temps, notamment sur les 8 premiers échantillons. Au-delà, elles se stabilisent (Figure 5).

*A contrario*, les pourcentages de fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) qui compose les MES varient peu. Ils se répartissent entre 75 et 82 % avec une moyenne de  $80 \pm 2\%$ . Par conséquent, les MES piégées en St06-KW1 sont très majoritairement composées par la fraction fine (Figure 6).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, les moyennes des pourcentages de fraction fine demeurent très stables, les moyennes des masses de MES collectées sont plus variables (Tableau 6).

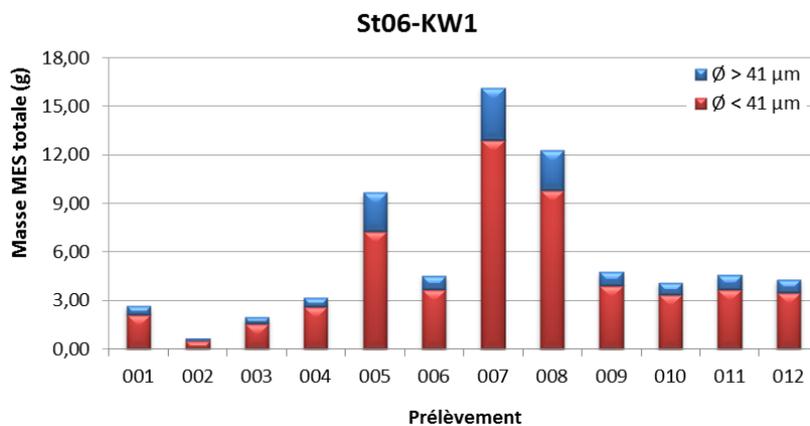


Figure 5 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

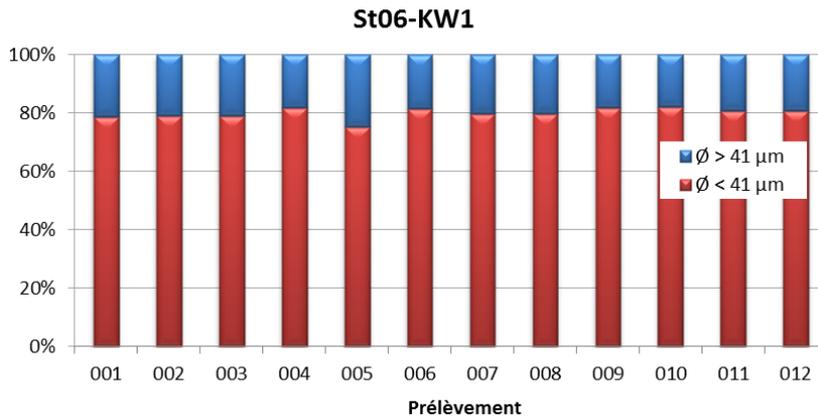


Figure 6 : Pourcentage des fractions fines ( $\phi < 41 \mu\text{m}$ ) et des fractions grossières ( $\phi > 41 \mu\text{m}$ ) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Tableau 6 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de la MES totale, des pourcentages de fraction fine ( $\phi < 41 \mu\text{m}$ ) et de la teneur en carbonates dans la fraction fine lors des différentes campagnes d’immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.

St06-KW1							
Campagne	MES totaux (g)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	Campagne	MES totaux (g)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)
Oct. - Nov. 2006	1,5 $\pm$ 0,7	ND	74 $\pm$ 2	Juil. - Août 2013	11,6 $\pm$ 17,6	74 $\pm$ 4	46 $\pm$ 13
Mars - Avr. 2007	4,6 $\pm$ 4,5	ND	76 $\pm$ 3	Janv. - Mars 2014	12,1 $\pm$ 6,8	82 $\pm$ 4	84 $\pm$ 3
Juil. - Août 2011	5,1 $\pm$ 4,9	ND	69 $\pm$ 4	Sept - Oct. 2014	2,4 $\pm$ 1,7	84 $\pm$ 2	65 $\pm$ 4
Janv. - Mars 2012	7,9 $\pm$ 6,6	75 $\pm$ 3	84 $\pm$ 5	Janv. - Mars 2015	13,3 $\pm$ 7,2	79 $\pm$ 4	73 $\pm$ 3
Sept. - Oct. 2012	5,3 $\pm$ 2,6	70 $\pm$ 4	67 $\pm$ 3	Oct. - Nov. 2015	7,8 $\pm$ 6,1	68 $\pm$ 6	47 $\pm$ 3
Janv. - Févr. 2013	9,3 $\pm$ 5,7	77 $\pm$ 5	67 $\pm$ 8	Jul. - Sept. 2016	5,7 $\pm$ 4,6	80 $\pm$ 2	60 $\pm$ 6

ND : valeur non déterminée.

### Compositions granulométriques

La fraction fine ( $\phi < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées en St06-KW1 est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2,0-20  $\mu\text{m}$  à savoir les silts fins (moyenne de 60  $\pm$  5 % du volume total). Pour cette campagne, les argiles (0,02-2,00  $\mu\text{m}$ ) et silts moyens (20-40  $\mu\text{m}$ ) composent la seconde population granulométrique (15  $\pm$  4 % et 18  $\pm$  4 % du volume total, respectivement).

La distribution des populations granulométriques montre une variation dans le temps relative aux classes de grains. Après une légère augmentation des pourcentages des grains < 20  $\mu\text{m}$  au détriment de la fraction > 20  $\mu\text{m}$  entre le prélèvement 005 et 007, la tendance s’inverse pour les prélèvements 008 et 012. Cette inversion est particulièrement avérée dans le prélèvement 012 pour lequel les populations de grain > 20  $\mu\text{m}$  augmentent de manière conséquente aux dépens des populations < 20  $\mu\text{m}$  (Figure 7).

Pour l’ensemble des campagnes conduites à St06-KW1, parmi les 5 classes granulométriques étudiées, le mode principale demeure la classe 2,0-20  $\mu\text{m}$  (silts fins). L’on constate que, depuis la campagne de juillet-août 2011, bien que cela ne se produise pas de manière constante, le pourcentage en particules < 20  $\mu\text{m}$  augmente, jusqu’à doubler lors de certaines campagnes, au détriment des particules de taille > 20  $\mu\text{m}$  (Tableau 7).

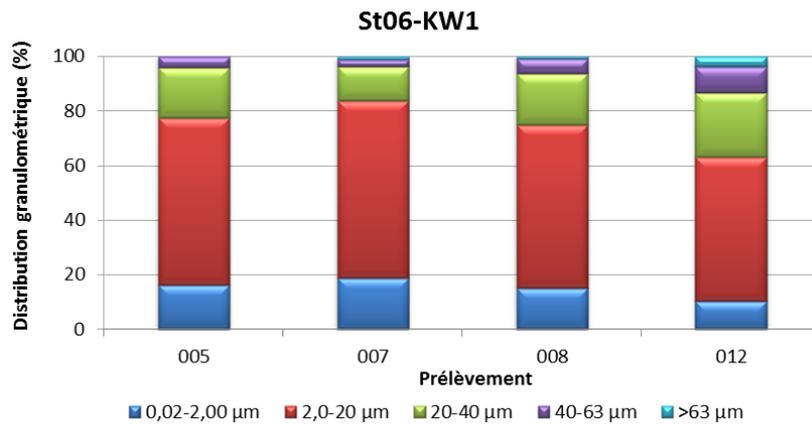


Figure 7 : Distribution granulométrique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu m$ ) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

**Remarque :** la mesure de particules de  $\varnothing > 41 \mu m$  dans les échantillons tamisés à  $41 \mu m$  peut être le résultat d'un artéfact du mode de calcul employé en granulométrie laser par le passage de particules de formes allongées (paillettes) à travers la maille au moment du tamisage.

Tableau 7 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de la distribution granulométrique dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu m$ ) des MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.

St06-KW1					
Campagne	Distribution granulométrique (%)				
	0,02 à 2,00 μm	2,0 à 20 μm	20 à 40 μm	40 à 63 μm	>63 μm
Juil. - Août 2011	8 ± 4	32 ± 3	24 ± 3	15 ± 2	21 ± 3
Janv. - Mars 2012	8 ± 5	50 ± 5	27 ± 6	11 ± 3	4 ± 0
Sept. - Oct. 2012	13 ± 1	51 ± 7	22 ± 3	10 ± 4	4 ± 2
Janv. - Mars 2013	5 ± 0	37 ± 2	33 ± 3	16 ± 1	9 ± 4
Juil. - Août 2013	13 ± 3	53 ± 12	22 ± 2	8 ± 6	3 ± 6
Janv. - Mars 2014	26 ± 3	56 ± 2	15 ± 2	3 ± 1	0 ± 0
Sept. - Oct. 2014	16 ± 4	61 ± 6	16 ± 2	5 ± 1	2 ± 3
Janv. - Mars 2015	14 ± 2	51 ± 3	26 ± 3	9 ± 1	1 ± 1
Oct. - Nov. 2015	11 ± 5	44 ± 7	26 ± 3	12 ± 4	8 ± 6
<b>Juil. - Sept. 2016</b>	<b>15 ± 4</b>	<b>60 ± 5</b>	<b>18 ± 4</b>	<b>5 ± 3</b>	<b>2 ± 2</b>

### Compositions minéralogiques

La fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu m$ ) de MES collectées en St06-KW1 est majoritairement composée de minéraux d'origine marine dont notamment l'aragonite ainsi que la calcite. L'aragonite étant, en particulier, un des constituants des coquilles d'invertébrés, sa présence dénote la forte influence marine à cette station.

Bien qu'en moindre quantité, la goéthite a également été décelée dans tous les prélèvements avec une régularité dans les proportions. En outre, les MES des prélèvements 007 et 008 montrent des proportions importantes d'alunite et antigorite au détriment de la calcite soulignant ainsi l'influence rythmée des apports terrigènes (Tableau 8). Il est à noter que ces prélèvements (007 et 008) correspondent avec les quantités de MES les plus importantes. Ces observations sont corroborées par les teneurs en carbonates les plus faibles.

**Tableau 8 : Composition minéralogique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.**

St06-KW1				
Prélèvement	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autres
005	40	45	15	-
007	25	36	12	28*
008	11	34	18	38**
012	39	48	13	-

\* : alunite ; \*\* alunite et antigorite.

### Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées en St06-KW1 se distribuent entre 48 % et 71 % avec une moyenne de  $60 \pm 6 \%$ . Inversement à ce qui a été observé pour les masses collectées, la plus forte teneur en carbonates a été mesurée le 24-27 juillet (002) tandis que la plus faible a été mesurée pour le 13-16 août (007). Par ailleurs, l'évolution des teneurs en carbonates dans le temps est négativement corrélée à celle des masses de MES collectées ( $R^2 < -0,80$ ), soulignant les influences alternées des apports marins et terrigènes (Figure 8).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, les teneurs moyennes varient rarement sauf lors des campagnes de juillet-août 2013 ( $46 \pm 13 \%$ ) et octobre-novembre 2015 ( $47 \pm 3 \%$ ), dont les valeurs sont comparativement basses (Tableau 6).

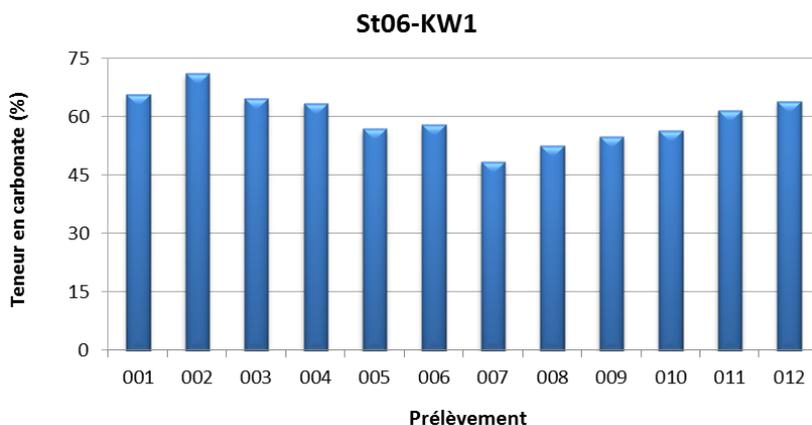


Figure 8: Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

**Remarque :** La différence en fraction carbonatée observée entre les teneurs en calcite, d'une part, mesurée par DRX semi-quantitative, d'autre part, calculée par relation stœchiométrique à partir des concentrations en Ca et Mg (considérées comme étant exclusivement sous forme de  $\text{CaCO}_3$  et  $\text{MgCO}_3$  dans le contexte du sud calédonien), s'expliquerait par le fait que la DRX semi-quantitative caractérise seulement les minéraux cristallisés (Chaurrand, 2007 ; Achard, 2013) dont les proportions somment 100% ; ce mode de calcul ne tient pas compte des phases amorphes de certains de ces minéraux, ni des minéraux du cortège latéritique contenant du Mg, ce qui peut majorer le pourcentage des carbonates.

## 2. Rade Nord de Prony (St15)

### Masses collectées

Les masses de MES collectées en St15 sont relativement faibles et se distribuent entre 0,53 g et 5,7 g avec une moyenne de  $1,7 \pm 1,5$  g. Les plus faibles quantités ont été collectées le 16-19 juin (006) tandis que les plus fortes ont été collectées le 04-07 juin (003). Les masses piégées sont relativement évolutives sur les 4 premiers échantillons, puis demeurent inférieures à 1,0 g jusqu'au prélèvement 008 à partir duquel les masses augmentent progressivement à 2,9 g (Figure 9).

La fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) est largement dominante dans les MES piégées en St15 avec une moyenne de  $76 \pm 23$  %. En effet, à l'exception des prélèvements 001 et 002 dont la fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) domine la composition de MES (71 et 74 %, respectivement), les pourcentages de fraction fine varient très peu dans les autres prélèvements (entre 80 à 91 %) (Figure 10).

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les masses moyennes collectées restent faibles. A l'exception de 2 campagnes (janvier-mars 2014 et mai-juillet 2016), elles ne dépassent pas le seuil de 1,0 g. On notera que les masses de MES collectées lors de cette campagne sont 2,5 fois moins importantes que celles collectées en janvier-mars 2014 ( $4,4 \pm 8,9$  g). En revanche, quelle que soit la campagne, les pourcentages moyens de fraction fine demeurent plus stables entre les campagnes ; les MES piégées sont principalement composées de fraction fine (Tableau 9).

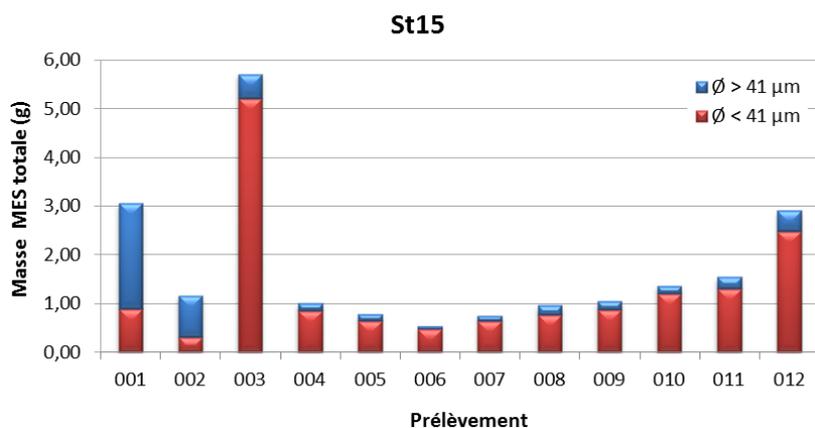


Figure 9 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

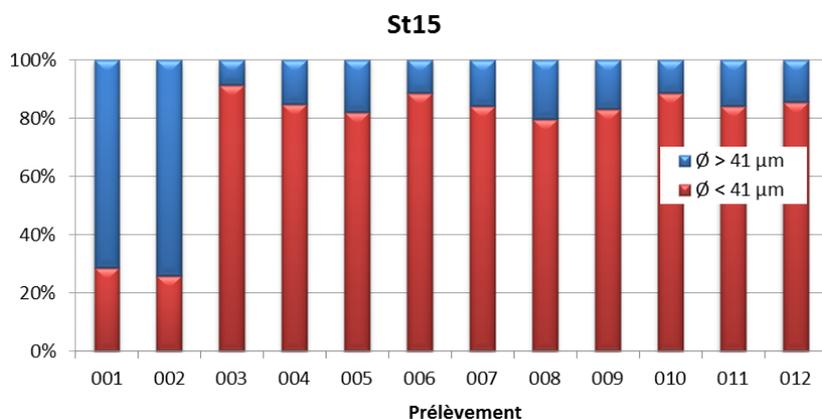


Figure 10 : Pourcentage des fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et des fractions grossières ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 9 : Compilation des données moyennes  $\pm$  écart-type de la MES totale, du pourcentage de fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et de la teneur en carbonates dans la fraction fine lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.

St15							
Campagne	MES totaux (g)	% $\varnothing < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	Campagne	MES totaux (g)	% $\varnothing < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)
Oct. - Nov. 2006	0,10 $\pm$ 0,06	ND	ND	Janv. - Mars 2015	0,56 $\pm$ 0,60	86 $\pm$ 10	25 $\pm$ 7
Mars - Avr. 2007	0,15 $\pm$ 0,14	ND	ND	Juil. - Sept. 2015	0,26 $\pm$ 0,27	86 $\pm$ 10	26 $\pm$ 2
Janv. - Mars 2014	4,4 $\pm$ 8,9	88 $\pm$ 6	9 $\pm$ 4	<b>Mai -Juil. 2016</b>	<b>1,7 <math>\pm</math> 1,5</b>	<b>76 <math>\pm</math> 23</b>	<b>19 <math>\pm</math> 9</b>
Sept. - Oct. 2014	0,18 $\pm$ 0,25	77 $\pm$ 31	25 $\pm$ 2	-	-	-	-

ND : valeur non déterminée.

**Note :** Les diverses observations effectuées lors de précédentes missions montrent que la variabilité des masses collectées à cette station, localisée au droit de l'embouchure du creek, est très dépendante, non seulement de l'intensité des précipitations mais aussi de l'orientation et de la force des vents qui conditionnent la dispersion ou le confinement des panaches turbides le long de la ligne de côte. L'orientation SE favorisant un confinement des panaches turbides le long de la côte nord de l'Anse de la Rade Nord. A l'inverse, l'absence de vents forts et/ou d'orientation autre que SE, permet l'expansion des panaches.

### Compositions granulométriques

La fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées en St15 est composée de particules dont le mode se situe principalement dans la classe 2,0-20  $\mu\text{m}$ , à savoir les silts fins (moyenne de 46  $\pm$  7 % du volume total). Pour cette campagne, les silts moyens (20-40  $\mu\text{m}$ ) composent la seconde population granulométrique (27  $\pm$  2 % du volume total) suivis par les silts grossiers (40-60  $\mu\text{m}$  ; 13  $\pm$  4 %).

La distribution des populations granulométriques montre une variation dans le temps relative aux classes de grains. Des prélèvements 001 à 012, les pourcentages des grains de taille  $< 20 \mu\text{m}$  augmentent progressivement au détriment des populations de grains de taille  $> 40 \mu\text{m}$  (Figure 11).

Il est à noter que l'augmentation des grains de taille  $< 20 \mu\text{m}$  des échantillons 001, 004, 008 et 012 est en accord avec l'accroissement des pourcentages de fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ).

Pour l'ensemble des campagnes conduites à St15, parmi les 5 classes granulométrique étudiées, le mode principale demeure la classe 2,0-20  $\mu\text{m}$  avec des proportions relativement stables depuis la campagne de janvier-mars 2014. En revanche, globalement, une augmentation des grains de classes 20-40 et 40-63  $\mu\text{m}$  est observée au détriment de celle de 0,02-2,00  $\mu\text{m}$  (Tableau 10).

**Remarque :** comme pour la station St06-KW1, la détection de particules de  $\varnothing > 41 \mu\text{m}$  dans les échantillons des fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) peut être le fait du mode de calcul employé en granulométrie laser et/ou le passage de particules de formes allongées (paillettes) à travers la maille au moment du tamisage.

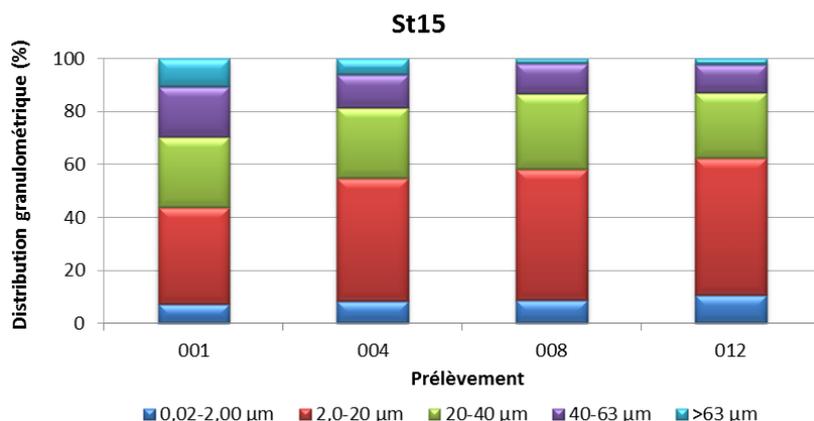


Figure 11 : Distribution granulométrique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 10 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de la distribution granulométrique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d’immersion des pièges séquentiels à St15.

St15					
Campagne	Distribution granulométrique (%)				
	0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
Janv. - Mars 2014	25 $\pm$ 4	57 $\pm$ 1	15 $\pm$ 2	3 $\pm$ 2	1 $\pm$ 1
Sept. – Oct. 2014	14 $\pm$ 3	56 $\pm$ 10	18 $\pm$ 6	8 $\pm$ 4	4 $\pm$ 3
Janv. - Mars 2015	24 $\pm$ 10	55 $\pm$ 6	11 $\pm$ 6	5 $\pm$ 5	4 $\pm$ 5
Juil. - Sept. 2015	19 $\pm$ 4	53 $\pm$ 8	13 $\pm$ 2	6 $\pm$ 3	9 $\pm$ 8
<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>9 <math>\pm</math> 1</b>	<b>46 <math>\pm</math> 7</b>	<b>27 <math>\pm</math> 2</b>	<b>13 <math>\pm</math> 4</b>	<b>5 <math>\pm</math> 4</b>

### Compositions minéralogiques

La fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des MES collectées à St15 est majoritairement composée de minéraux d’origine latéritique dont notamment la goethite et l’antigorite et dans une très faible quantité, l’hématite.

Bien qu’en moindre quantité, de l’aragonite et de la calcite, les minéraux d’origine marine, ont également été décelés. En outre, les MES des prélèvements 004 et 008 montrent que les proportions plus importantes en goethite, au détriment de celles de l’aragonite et de la calcite soulignant une augmentation de l’influence des apports terrigènes (Tableau 11). Ces observations sont corroborées par les teneurs en carbonates.

Tableau 11 : Composition minéralogique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St15.

St15				
Prélèvement	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autres
001	17	19	37	27*
004	5	3	58	34*
008	10	7	46	37*
012	24	12	35	29*

\* : antigorite et hématite.

### Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des MES collectée en St15 se distribuent entre 9 % et 31 % avec une moyenne de  $19 \pm 9$  % soulignant la forte influence des apports terrigènes à cette station. Comme pour la masse de MES collectée, la faible teneur en carbonate a été mesurée le 16-19 juin (006). En revanche, les plus fortes teneurs ont été mesurées au début (27-30 mai ; 001) et à la fin (06-13 juillet ; 011 et 012). Entre ces deux extrêmes, les teneurs évoluent progressivement à la baisse dans un premier temps et puis à la hausse. Hormis le prélèvement 003, les masses de MES collectées (Figure 9) et les teneurs en carbonates (Figure 12) sont superposables.

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les teneurs moyennes montrent une variation plus importante qu'en St06-KW1. Il est à noter que la teneur moyenne mesurée en janvier-mars 2014 ( $9 \pm 4$  %) est la valeur la plus basse enregistrée (Tableau 9).

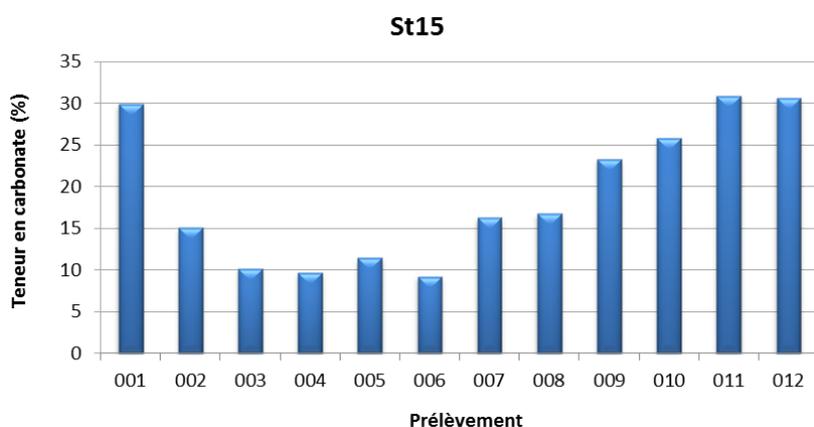


Figure 12 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

## 3. Canal de la Havannah (St60-NE)

### Masses collectées

Les masses de MES collectées en St60-NE se distribuent entre 0,13 g et 6,3 g avec une moyenne de  $3,4 \pm 2,0$  g. Les plus faibles quantités ont été collectées le 27 mai-03 juin (001) tandis que les plus fortes quantités ont été collectées le 06-09 juin (011). Les prélèvements montrent des valeurs de masse de MES relativement évolutives dans le temps. Pour les 2 premiers prélèvements, les masses collectées sont infinitésimales. Au-delà, elles oscillent entre 2,2 g et 6,3 g (Figure 13).

Avec un pourcentage moyen de fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de  $49 \pm 6$  %, les MES piégées en St60-NE sont composées majoritairement, tantôt de la fraction fine, tantôt de la fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ). Exception faite du prélèvement 002 dont la fraction grossière domine nettement (68 %), dans les autres échantillons, les pourcentages de fraction fine varient entre 44 et 56 % (Figure 14).

Pour les différentes campagnes conduites à St60-NE, les masses totales moyennes collectées varient autant que dans les deux autres stations. En revanche, les pourcentages moyens de fraction fine sont plus constants. Le pourcentage moyen obtenu lors de cette campagne est parmi les plus faibles, le plus bas ayant été mesuré en septembre-octobre 2012 ( $39 \pm 9$  %) (Tableau 12).

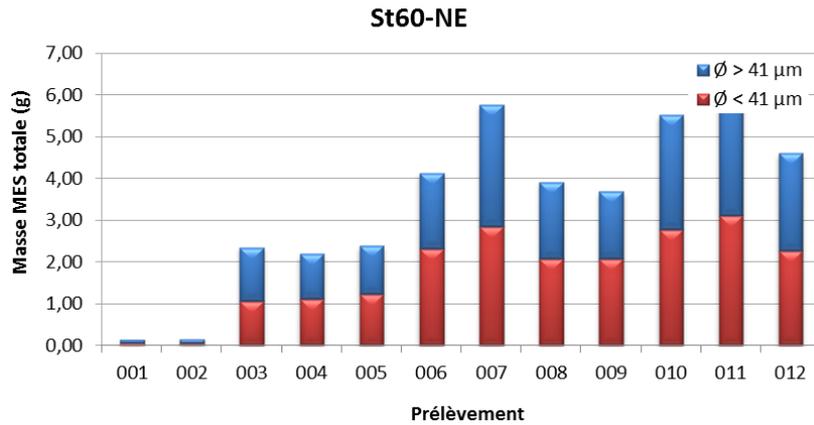


Figure 13 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

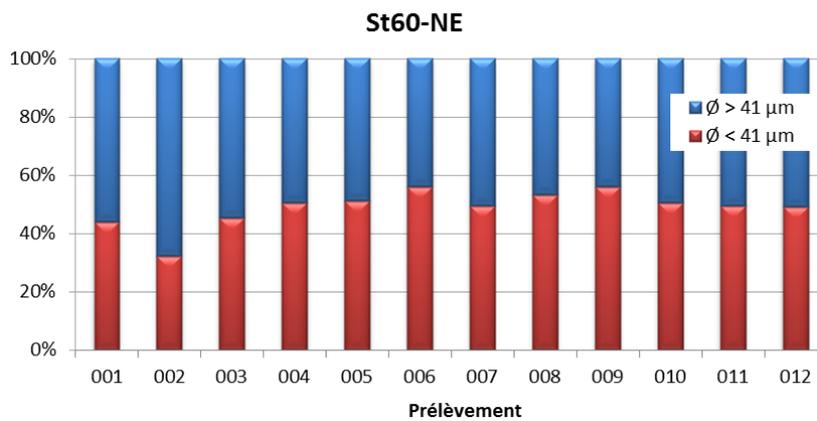


Figure 14 : Pourcentage des fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et des fractions grossières ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

**Tableau 12 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de la MES totale, du pourcentage de fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et de la teneur en carbonates dans la fraction fine lors des différentes campagnes d’immersion des pièges séquentiels à St60-NE.**

St60-NE							
Campagne	MES totaux (g)	% $\varnothing < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	Campagne	MES totaux (g)	% $\varnothing < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)
Févr. - Mars 2007	4,0 $\pm$ 5,0	ND	96 $\pm$ 1	Avr. - Juin 2014	1,5 $\pm$ 1,0	74 $\pm$ 8	83 $\pm$ 2
Juil. - Août 2011	ND	ND	ND	Sept. - Oct. 2014	1,6 $\pm$ 1,8	60 $\pm$ 4	83 $\pm$ 2
Janv. - Mar 2012	1,9 $\pm$ 1,8	60 $\pm$ 18	80 $\pm$ 3	Janv. - Mars 2015	3,2 $\pm$ 3,1	63 $\pm$ 8	88 $\pm$ 3
Sept. - Oct. 2012	0,82 $\pm$ 1,1	39 $\pm$ 9	85 $\pm$ 1	Juil. - Sept. 2015	2,0 $\pm$ 1,8	61 $\pm$ 6	91 $\pm$ 6
Janv. - Mars 2013	2,5 $\pm$ 2,7	49 $\pm$ 14	77 $\pm$ 1	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>3,4 <math>\pm</math> 2,0</b>	<b>49 <math>\pm</math> 6</b>	<b>76 <math>\pm</math> 9</b>
Juil. - Août 2013	1,2 $\pm$ 1,4	41 $\pm$ 7	75 $\pm$ 4	-	-	-	-

ND : valeur non déterminée.

### Compositions granulométriques

La fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées en St60-NE est composée de particules dont le mode se situe principalement dans les classes 2,0-20  $\mu\text{m}$  (silts fins) et 20 à 40  $\mu\text{m}$  (silts moyens) avec une moyenne, respectivement, de 46  $\pm$  7 % et de 36  $\pm$  2 % du volume total. Pour cette campagne, les silts grossiers (20-40  $\mu\text{m}$ ) composent la troisième population granulométrique (16  $\pm$  1 % du volume total).

La distribution des populations granulométriques ne montre pas de variation particulière relative aux classes de grains dans le temps, hormis une très légère augmentation dans la proportion de population de graines de taille > 63  $\mu\text{m}$  au détriment de celle des silts moyens (Figure 15).

Pour l'ensemble des campagnes conduites à St60-NE, il n'est pas possible de dégager, parmi les 5 classes granulométrique étudiées, une évolution temporelle singulière. Depuis la campagne de janvier-mars 2012, le mode principal des particules est partagé entre la classe 2,0-20 µm et 20-40 µm. Il est à noter qu'en septembre-octobre 2014, une soudaine augmentation des grains de classe 2,0-20 µm au détriment de celles de 20-40 µm et 40 à 63 µm a été mesurée (Tableau 13).

**Remarque :** comme pour les stations St06-KW1 et St15, la détection de particules de  $\varnothing > 41 \mu\text{m}$  dans les échantillons des fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) peut être le fait du mode de calcul employé en granulométrie laser et/ou encore le passage de particules de formes allongées (paillettes) à travers la maille au moment du tamisage.

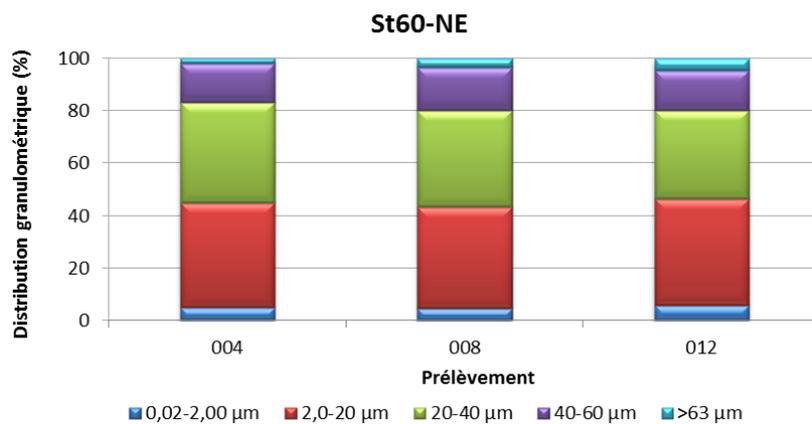


Figure 15 : Distribution granulométrique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 13 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de la distribution granulométrique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.

St60-NE					
Campagne	Distribution granulométrique (%)				
	0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
Janv. - Mars 2012	3 $\pm$ 1	46 $\pm$ 9	32 $\pm$ 6	14 $\pm$ 4	5 $\pm$ 1
Sept. – Oct. 2012	2 (n=1)	40 (n=1)	23 (n=1)	17 (n=1)	18 (n=1)
Janv. - Mars 2013	5 $\pm$ 0	36 $\pm$ 3	33 $\pm$ 2	16 $\pm$ 0	10 $\pm$ 4
Juil. – Août 2013	14 $\pm$ 5	49 $\pm$ 4	28 $\pm$ 3	8 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0
Avr. - Juin 2014	17 $\pm$ 3	47 $\pm$ 4	25 $\pm$ 2	9 $\pm$ 2	2 $\pm$ 2
Sept. – Oct. 2014	5 $\pm$ 1	72 $\pm$ 3	17 $\pm$ 4	4 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1
Janv. - Mars 2015	12 $\pm$ 4	44 $\pm$ 6	26 $\pm$ 2	11 $\pm$ 3	7 $\pm$ 6
Juil. - Sept. 2015	13 $\pm$ 5	44 $\pm$ 8	24 $\pm$ 3	9 $\pm$ 4	9 $\pm$ 7
<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>5 <math>\pm</math> 1</b>	<b>40 <math>\pm</math> 1</b>	<b>36 <math>\pm</math> 2</b>	<b>16 <math>\pm</math> 1</b>	<b>3 <math>\pm</math> 1</b>

### Compositions minéralogiques

La fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées en St60-NE est quasi-exclusivement composée de minéraux d'origine marine dont notamment l'aragonite ainsi que la calcite. L'aragonite étant, en particulier, un des constituants des coquilles d'invertébrés, sa présence dénote la forte influence marine à cette station.

Bien qu'en très faible quantité, de la goethite a également été décelée dans tous les prélèvements et parfois de l'antigonite. De surcroît, les proportions de ces minéraux ne fluctuent que très peu dans le temps soulignant

ainsi les influences marines constantes régnant à cette station, notamment lors du prélèvement 012 (Tableau 14). Ces observations corroborent les relevés de teneurs en carbonates.

**Tableau 14 : Composition minéralogique de la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.**

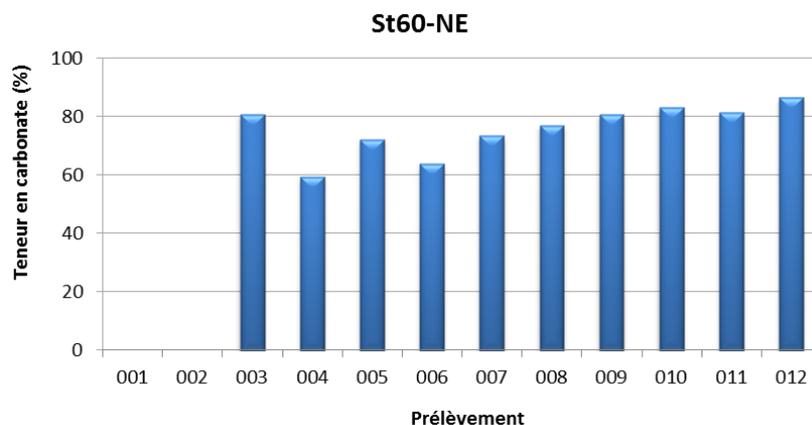
St60-NE				
Prélèvement	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autre
004	53	39	4	4*
008	53	39	4	4*
012	56	39	4	0

\* : antigorite.

### Teneurs en carbonates

Le manque de matière n'a permis les analyses que sur 10 échantillons. Ainsi, les teneurs en carbonates dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées en St60-NE se distribuent entre 59 % et 87 % avec une moyenne de  $76 \pm 9$  %. La plus faible teneur en carbonate a été mesurée le 08-11 juin (004) et la plus forte le 10-13 juillet (012). Les teneurs évoluent peu avec les prélèvements (Figure 16).

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, les teneurs moyennes varient également peu. La moyenne la plus basse obtenue depuis le début du suivi est de  $75 \pm 4$  % (juillet-août 2013) ce qui souligne que, par rapport aux deux autres stations, les apports en carbonates à St60-NE sont à la fois importants et constants (Tableau 12).



**Figure 16 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.**

## C. COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

Les valeurs des concentrations en métaux totaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) et en éléments majeurs (Ca et S) analysées dans les fractions fines de MES collectées par les pièges séquentiels à particules sont regroupées dans l'Annexe 4.

### 1. Baie Kwé (St06-KW1)

#### Concentration en métaux et calcium

Les plus faibles concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées en St06-KW1 dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des MES piégées du 24-27 juillet (007) tandis que les plus fortes quantités ont été enregistrées dans celles piégées du 13-16 août (002). Inversement, pour le Ca, la plus forte teneur a été mesurée le 24-27 juillet (007) tandis que la plus faible quantité a été mesurée le 13-16 août (002).

En dépit de ces évolutions, les concentrations obtenues dans les 12 prélèvements ne montrent pas de grande variation, notamment pour le Ca (Tableau 15).

Bien que les concentrations évoluent peu entre les prélèvements, la matrice de corrélation montre qu'il existe bien une relation inverse entre le Ca et les 5 métaux ( $R^2 < -0,80$ ). Inversement, elle confirme la similarité d'évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn ( $R^2 > 0,80$ ) (Tableau 16).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, les concentrations moyennes des éléments, sauf le Ca, sont très variables. Les comparaisons montrent également que les concentrations en Co, Fe, Mn et Ni obtenues lors de cette campagne sont environ 2 fois supérieures aux moyennes enregistrées en 2007 pour l'état de référence. Quant aux concentrations moyennes en Ca et Cr, elles restent dans le même ordre de grandeur qu'en 2007. En revanche, les concentrations métalliques sont largement inférieures à celles obtenues en juillet-août 2013 ; cette campagne est, à ce jour, celle qui présente les concentrations métalliques les plus élevées à St06-KW1, tandis que celle de janvier-mars 2014 est celle qui regroupe les plus basses (Tableau 17).

**Tableau 15 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.**

St06-KW1						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	172 713	71	2 185	97 678	635	1 449
Max	265 390	154	4 463	181 510	1 401	2 917
Moyenne	219 412	109	3 083	136 205	974	2 148
Ecart-type	25 986	23	692	22 923	208	403
CV (%)	12	21	22	17	21	19

**Tableau 16 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.**

St06-KW1						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1	-0,971	-0,919	-0,950	-0,971	-0,972
Co		1	0,952	0,988	0,998	0,996
Cr			1	0,962	0,951	0,956
Fe				1	0,989	0,995
Mn					1	0,995
Ni						1

**Tableau 17 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.**

Campagne	St06-KW1					
	Eléments (mg/kg ps)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Mars – Avr. 2007	290 310 (n=1)	58 (n=1)	2 667 (n=1)	68 940 (n=1)	577 (n=1)	1 142 (n=1)
Juil. - Août 2011	256 455 $\pm$ 19 652	83 $\pm$ 10	2 945 $\pm$ 287	81 853 $\pm$ 6 980	703 $\pm$ 75	1 460 $\pm$ 132
Janv. - Mars 2012	239 104 $\pm$ 5 873	101 $\pm$ 10	3 414 $\pm$ 302	10 3323 $\pm$ 6 769	822 $\pm$ 77	1 885 $\pm$ 144
Sept. - Oct. 2012	264 386 $\pm$ 8 238	106 $\pm$ 15	3 874 $\pm$ 547	111 616 $\pm$ 11 753	840 $\pm$ 95	1 829 $\pm$ 201
Janv. - Mars 2013	236 752 $\pm$ 14 017	127 $\pm$ 19	4 634 $\pm$ 547	123 394 $\pm$ 15 208	1 123 $\pm$ 162	2 258 $\pm$ 321
Juil. - Août 2013	164 585 $\pm$ 51 369	215 $\pm$ 77	7 111 $\pm$ 2 797	189 733 $\pm$ 55 033	1 688 $\pm$ 656	3 540 $\pm$ 1 392
Janv. - Mars 2014	308 430 $\pm$ 13 137	46 $\pm$ 18	1 259 $\pm$ 257	31 190 $\pm$ 8 848	471 $\pm$ 210	588 $\pm$ 195
Sept. - Oct. 2014	242 858 $\pm$ 15 301	115 $\pm$ 19	3 829 $\pm$ 581	132 978 $\pm$ 17 334	885 $\pm$ 147	1 999 $\pm$ 258
Janv. - Mars 2015	271 510 $\pm$ 10 830	83 $\pm$ 12	3 007 $\pm$ 354	85 407 $\pm$ 11 481	735 $\pm$ 93,7	1 563 $\pm$ 233
Oct. - Nov. 2015	165 560 $\pm$ 11 919	108 $\pm$ 34	4 126 $\pm$ 1 307	101 619 $\pm$ 24 237	940 $\pm$ 267	1 882 $\pm$ 421
Juil. - Sept. 2016	219 412 $\pm$ 25 986	109 $\pm$ 23	3 083 $\pm$ 692	136 205 $\pm$ 22923	974 $\pm$ 208	2 148 $\pm$ 403

### **Normalisation du calcium par le fer**

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St06-KW1 se distribuent entre 0,95 et 2,72 avec une moyenne de  $1,68 \pm 0,48$ . Le plus faible ratio a été obtenu lors du prélèvement du 13-16 août (007) et le fort ratio lors de celui du 24-27 juillet (002). Outre ces valeurs extrêmes, les ratios évoluent de manière progressive entre les prélèvements. Représentant l'influence des pôles marins (Ca) et terrigènes (Fe), ces évolutions des ratios traduisent la mise en place des périodes de forte empreinte terrigène et marine alternées à cette station (Tableau 18).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, à l'exception de la campagne de janvier-mars 2014, l'évolution à la baisse des moyennes du ratio Ca/Fe permet de conclure à une influence terrigène grandissante depuis la campagne de l'état de référence en 2007 ; le ratio minimal ayant été relevé lors de la campagne de juillet-août 2013 (Tableau 19).

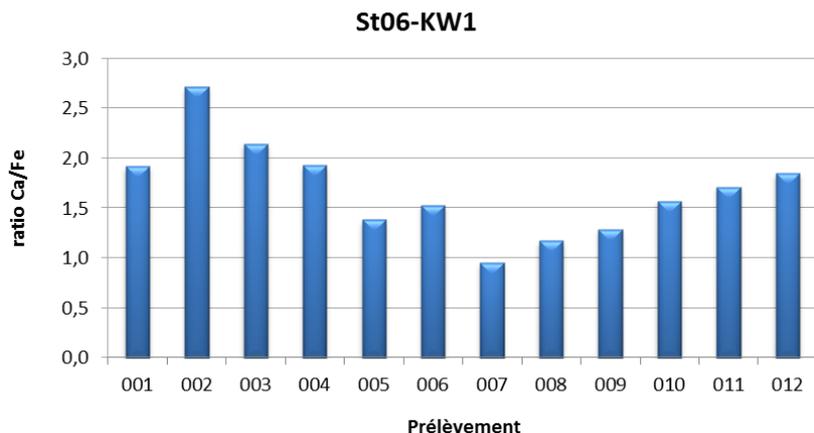


Tableau 18 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Tableau 19 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de normalisation du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges à St06-KW1.

St06-KW1			
Campagne	Ca/Fe	Campagne	Ca/Fe
Mars – Avr. 2007	4,21 (n=1)	Janv. - Mars 2014	10,7 $\pm$ 3,1
Juil. - Août 2011	3,17 $\pm$ 0,50	Sept. - Oct. 2014	1,86 $\pm$ 0,27
Janv. - Mars 2012	2,32 $\pm$ 0,18	Janv. - Mars 2015	3,24 $\pm$ 0,53
Sept. - Oct. 2012	2,40 $\pm$ 0,31	Oct. - Nov. 2015	1,72 $\pm$ 0,44
Janv. - Mars 2013	1,95 $\pm$ 0,33	<b>Jul. - Sept. 2016</b>	<b>1,68 <math>\pm</math> 0,48</b>
Jul. - Août 2013	0,98 $\pm$ 0,46	-	-

## 2. Rade Nord de Prony (St15)

### Concentrations en métaux et calcium

Parmi les 3 stations étudiées, la St15 se distingue par les concentrations moyennes en Co, Cr, Fe, Mn et Ni les plus hautes et la concentration moyenne en Ca la plus basse. En ce qui concerne les évolutions des concentrations dans le temps, celles de Ca et Fe sont très dispersées (Tableau 20).

Les plus fortes concentrations en Co, Cr, et Ni dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des MES piégées en St15 ont été mesurées dans la période du 04-19 juillet (003, 004, 005 et 006), tandis que les plus faibles quantités ont été analysées les 27-30 mai (001). Inversement, pour le Ca, la plus forte teneur a été mesurée dans le prélèvement du 27-30 mai (001) tandis que la plus faible quantité a été mesurée au cours de la période du 04-19 juillet (003, 004, 005 et 006).

La matrice de relation confirme la similarité d'évolution des concentrations massiques pour le Co, Cr, et Ni ( $R^2 > 0,80$ ) et montre une anti-corrélation entre le Ca et ces 3 métaux ( $R^2 < -0,80$ ); aucune corrélation n'est constatée pour le Fe et Mn (Tableau 21).

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les concentrations moyennes des éléments sont peu homogènes notamment celles de Ca. Les comparaisons montrent également que les concentrations obtenues en Ca, Co, Fe, Mn et Ni lors de cette campagne sont du même ordre qu'en 2007 pour l'état de référence, voire même plus faible pour le Cr (1,5 fois). Les concentrations métalliques sont également inférieures à celles

obtenues en janvier-mars 2015, campagne qui est à ce jour celle qui présente les concentrations métalliques les plus hautes à St15 (Tableau 22).

**Tableau 20 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.**

St15						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	20 659	148	4 089	38 863	1 530	2 277
Max	105 872	244	7 251	276 704	2 486	3 936
Moyenne	60 636	195	5 682	170 877	1 981	3 101
Ecart-type	34 192	37	1 080	75 892	303	569
CV (%)	56	19	19	44	15	18

**Tableau 21 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.**

St15						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1	-0,937	-0,926	-0,117	-0,753	-0,908
Co		1	0,989	0,285	0,784	0,989
Cr			1	0,317	0,740	0,996
Fe				1	-0,177	0,304
Mn					1	0,746
Ni						1

**Tableau 22 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.**

St15						
Campagne	Eléments (mg/kg ps)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Mars – Avr. 2007	61 870 (n=1)	208 (n=1)	8 500 (n=1)	205 660 (n=1)	1 949 (n=1)	2 742 (n=1)
Janv. - Mars 2014	11 118 $\pm$ 153	295 $\pm$ 27	13 796 $\pm$ 1 654	245 119 $\pm$ 15 893	2 368 $\pm$ 547	3 927 $\pm$ 665
Sept. – Oct. 2014	87 180 $\pm$ 6 927	265 $\pm$ 23	8 111 $\pm$ 535	217 647 $\pm$ 12 561	1 881 $\pm$ 191	2 798 $\pm$ 177
Janv. - Mars 2015	78 349 $\pm$ 29 017	440 $\pm$ 14	14 204 $\pm$ 757	290 374 $\pm$ 11 196	3 788 $\pm$ 569	5 012 $\pm$ 266
Juil. - Sept. 2015	85 568 $\pm$ 10 844	228 $\pm$ 18	8 016 $\pm$ 728	177 466 $\pm$ 13 141	2 148 $\pm$ 207	2 751 $\pm$ 248
<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>60 636 <math>\pm</math> 34 192</b>	<b>195 <math>\pm</math> 37</b>	<b>5 682 <math>\pm</math> 1 080</b>	<b>170 877 <math>\pm</math> 75 892</b>	<b>1 981 <math>\pm</math> 303</b>	<b>3 101 <math>\pm</math> 569</b>

### Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St15 se distribuent entre 0,08 et 1,12 avec une moyenne de  $0,46 \pm 0,32$ . Le plus faible ratio a été obtenu lors des prélèvements du 08-19 juin (004, 005 et 006) et le fort ratio avec celui du 31 mai-03 juin (002). Outre ces valeurs extrêmes, les ratios évoluent de manière progressive entre les prélèvements. Ces ratios faibles confirment que l'influence terrigène est amplement dominante (Figure 17).

Entre les différentes campagnes conduites à St15, la stabilité des ratios Ca/Fe moyens permet de constater que la forte influence terrigène persiste à cette station ; le ratio minimal ayant été relevé lors de la campagne de janvier-mars 2014 (Tableau 23)

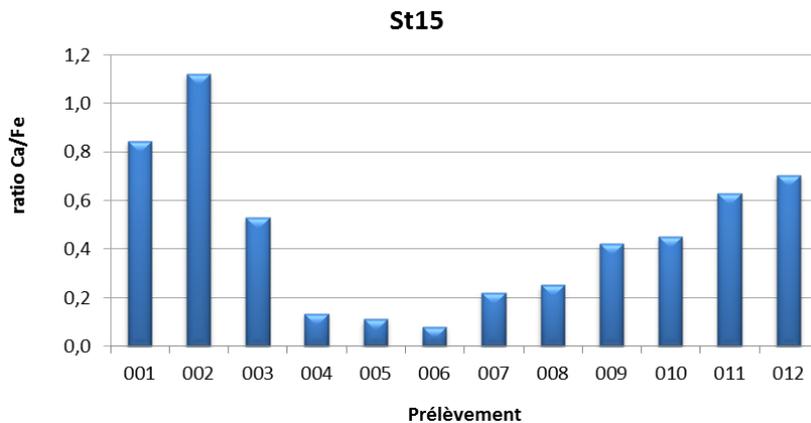


Figure 17 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine (Ø < 41 µm) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 23 : Compilation des données moyenne ± écart-type de normalisation du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines (Ø < 41 µm) de MES piégées lors des différentes campagnes d’immersion des pièges séquentiels à particules à St15.

St15			
Campagne	Ca/Fe	Campagne	Ca/Fe
Mars - Avr. 2007	0,30 (n=1)	Janv. - Mars 2015	0,27 ± 0,11
Janv. - Mars 2014	0,05 ± 0,08	Juil. - Sept. 2015	0,48 ± 0,04
Sept. - Oct. 2014	0,40 ± 0,02	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>0,46 ± 0,32</b>

### 3. Canal de la Havannah (St60-NE)

#### Concentrations en métaux et calcium

Le manque de matière n’a permis les analyses que sur 10 échantillons. Les plus faibles concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées en St60-NE dans la fraction fine (Ø < 41 µm) des MES piégées du 04-07 juin (003) tandis que les plus fortes quantités ont été enregistrées dans celles piégées du 16 juin-01 juillet (006, 007, 008 et 009). Pour le Ca, la plus forte teneur a été mesurée le 04-07 juin (003), tandis que la plus faible quantité a été mesurée le 08-11 juin (004).

En dépit de ces évolutions, les concentrations obtenues dans les 10 prélèvements ne montrent pas de grande variation, notamment pour le Ca (Tableau 24).

La matrice de corrélation confirme la similarité d’évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn ( $R^2 > 0,80$ ). Inversement, aucune corrélation n’est constatée pour les métaux et le Ca (Tableau 25).

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, les concentrations moyennes des éléments varient peu, plus particulièrement pour le Ca. Les comparaisons montrent que les concentrations en Co, Fe et Mn obtenues lors de cette campagne sont environ 2 fois supérieures aux moyennes enregistrées en 2007 pour l’état de référence. Pour le Ni, cette différence est presque de 3 fois. Les concentrations moyennes de Ca et Cr restent dans le même ordre de grandeur qu’en 2007. Les niveaux demeurent tout de même largement inférieures à

celles recueillies en juillet-août 2013, campagne qui est à ce jour celle qui présente les concentrations métalliques les plus hautes à St60-NE (Tableau 26).

**Tableau 24 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.**

St60-NE						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	214 970	16	341	17 842	183	271
Max	322 434	32	503	25 738	302	425
Moyenne	279 965	26	439	22 735	251	365
Ecart-type	34 471	5	51	2 589	35	52
CV (%)	12	20	12	11	14	14

**Tableau 25 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.**

St60-NE						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1	-0,304	-0,222	-0,174	0,039	-0,245
Co		1	0,964	0,946	0,872	0,978
Cr			1	0,992	0,931	0,983
Fe				1	0,958	0,986
Mn					1	0,929
Ni						1

**Tableau 26 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges à St60-NE.**

St60-NE						
Campagne	Eléments (mg/kg ps)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Févr. - Mars 2007	340 410 (n=1)	11 (n=1)	332 (n=1)	9 910 (n=1)	109 (n=1)	136 (n=1)
Juil. - Août 2011	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Janv. - Mar 2012	293 760 $\pm$ 16 723	26 $\pm$ 7	662 $\pm$ 71,6	20 959 $\pm$ 2 895	254 $\pm$ 123	423 $\pm$ 78
Sept. - Oct. 2012	345 918 $\pm$ 19 677	29 $\pm$ 5	566 $\pm$ 23,3	18 347 $\pm$ 1 641	189 $\pm$ 49	345 $\pm$ 68
Janv. - Mars 2013	306 914 $\pm$ 5 219	21 $\pm$ 3	834 $\pm$ 58,3	26 131 $\pm$ 2 022	262 $\pm$ 25	478 $\pm$ 38,7
Juil. - Août 2013	280 315 $\pm$ 16 630	36 $\pm$ 11	921 $\pm$ 179	32 693 $\pm$ 6 925	358 $\pm$ 93	558 $\pm$ 106
Avr. - Juin 2014	302 211 $\pm$ 9 477	20 $\pm$ 2	569 $\pm$ 40,6	17 740 $\pm$ 1 958	195 $\pm$ 32	322 $\pm$ 36
Sept. - Oct. 2014	313 173 $\pm$ 7 856	25 $\pm$ 4	725 $\pm$ 101	25 695 $\pm$ 4 668	204 $\pm$ 30	386 $\pm$ 64
Janv. - Mars 2015	325 637 $\pm$ 9 166	32 $\pm$ 7	848 $\pm$ 174	28 754 $\pm$ 5 415	329 $\pm$ 61	506 $\pm$ 95
Juil. - Sept. 2015	347 224 $\pm$ 3 5214	26 $\pm$ 4	702 $\pm$ 63,1	22 628 $\pm$ 2 287	298 $\pm$ 38	416 $\pm$ 41
<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>279 965 <math>\pm</math> 3 4471</b>	<b>26 <math>\pm</math> 5</b>	<b>439 <math>\pm</math> 50,7</b>	<b>22 735 <math>\pm</math> 2 589</b>	<b>251 <math>\pm</math> 35</b>	<b>365 <math>\pm</math> 52</b>

ND : valeur non déterminée.

### Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St60-NE se distribuent entre 9,5 et 16,9 avec une moyenne de  $12,5 \pm 2,4$ . Le plus faible ratio a été obtenu lors des prélèvements du 16-19 juin (006) et le fort ratio à celui du 04-07 juin (003). Outre ces valeurs extrêmes, les ratios évoluent de manière progressive entre les prélèvements. Ces ratios élevés confirment que l'influence marine est très dominante corroborant ainsi les résultats de teneurs en carbonates (Figure 18).

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, les évolutions du ratio Ca/Fe moyen permettent de constater que l'influence terrigène a augmenté à cette station depuis la campagne de l'état de référence en 2007 pour se stabiliser depuis 2012 (moyenne de  $13,7 \pm 2,0$ ) ; le ratio minimal ayant été relevé lors de la campagne de juillet-août 2013 (Tableau 27).

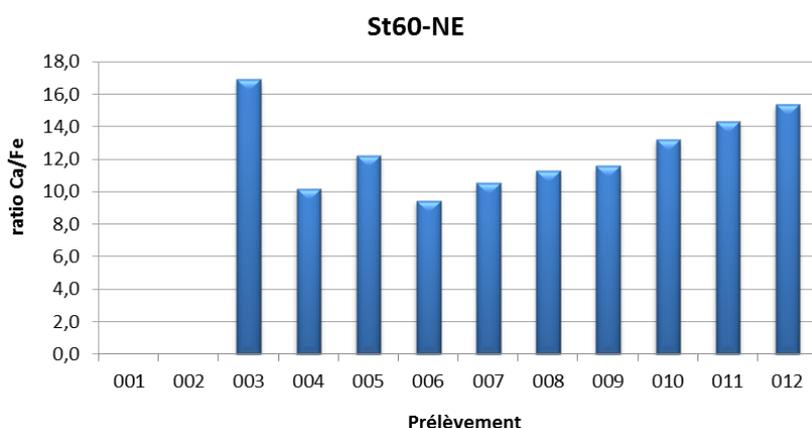


Figure 18 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 27 : Compilation des données moyenne  $\pm$  écart-type de normalisation du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES collectées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à particules à St60-NE.

St60-NE			
Campagne	Ca/Fe	Campagne	Ca/Fe
Févr. - Mars 2007	34,4 (n=1)	Avr. - Juin 2014	$17,2 \pm 1,8$
Juil. - Août 2011	ND	Sept. - Oct. 2014	$12,5 \pm 1,8$
Janv. - Mar 2012	$14,3 \pm 2,4$	Janv. - Mars 2015	$11,7 \pm 2,2$
Sept. - Oct. 2012	$19,0 \pm 2,7$	Juil. - Sept. 2015	$15,4 \pm 1,5$
Janv. - Mars 2013	$11,8 \pm 1,0$	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b><math>12,5 \pm 2,4</math></b>
<b>Juil. - Août 2013</b>	<b><math>9,0 \pm 2,3</math></b>	-	-

ND : valeur non déterminée.

### Concentrations en soufre

Les concentrations en S dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des MES collectées en St60-NE se distribuent entre 2562 mg/kg ps et 2848 mg/kg ps avec une moyenne de  $2746 \pm 83 \text{ mg/kg ps}$ . La plus faible concentration en S a été mesurée le 08-11 juin (004) et la plus forte le 06-09 juillet (011). Les concentrations demeurent néanmoins très homogènes entre les prélèvements (Figure 16).

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, les concentrations moyennes en S montrent également peu de variations. Toutefois, les comparaisons démontrent que depuis les campagnes d'avril-juin 2014, les concentrations obtenues en S diminuent de manière progressive. La campagne de 2014 est à ce jour celle qui présente les concentrations en S les plus hautes à St60-NE. Ainsi, la moyenne calculée pour cette campagne est du même ordre de grandeur que celle de 2007 pour l'état de référence (Tableau 29).

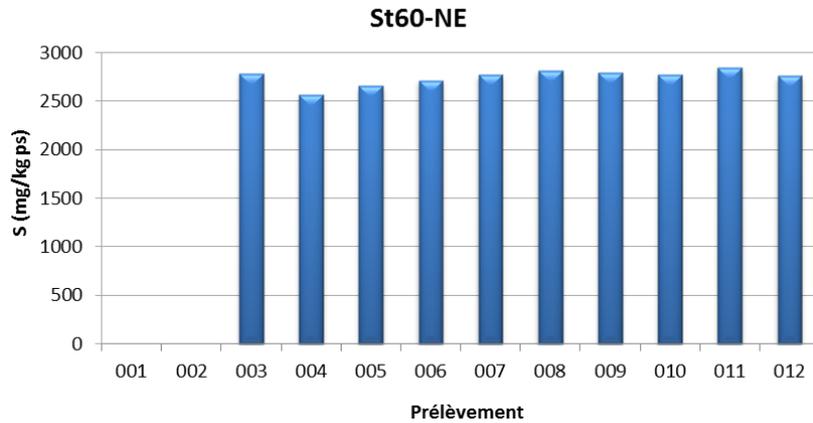


Tableau 28 : Concentrations en soufre mesurées dans la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) des 10 prélèvements de MES collectés par le piège séquentiel à particules à St60-NE.

Tableau 29 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des concentrations en soufre obtenues dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.

St60-NE			
Campagne	S (mg/kg ps)	Campagne	S (mg/kg ps)
Févr. - Mars 2007	ND	Avr. - Juin 2014	3 812 $\pm$ 834
Juil. - Août 2011	ND	Sept. - Oct. 2014	2 805 $\pm$ 161
Janv. - Mars 2012	2 903 $\pm$ 183	Janv. - Mars 2015	2 887 $\pm$ 74
Sept. - Oct. 2012	3 001 $\pm$ 131	Juil. - Sept. 2015	2 776 $\pm$ 168
Janv. - Mars 2013	3 113 $\pm$ 284	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>2 746 <math>\pm</math> 83</b>
Juil. - Août 2013	2 656 $\pm$ 56	-	-

ND : valeur non déterminée.

## IV. INTERPRETATION

### A. INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

Les quantités de MES collectées et les concentrations en éléments sont influencées par les taux de précipitations (phénomène d'érosion des bassins versants) et/ou l'action mécanique induite par les conditions météorologiques telles que la direction et la force des vents (phénomène de remise en suspension). Selon les stations suivies, les Figure 19, Figure 20 et Figure 21 apportent une vue d'ensemble afin de tenter d'expliquer entre les différents épisodes et les observations marquantes en rapport avec les conditions hydro-climatiques.

#### 1. Baie Kwé (St06-KW1)

L'immersion du piège séquentiel à particules à St06-KW1 du 24 juillet au 05 septembre avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes :

- Le 24-27 juillet (002) - la plus faible masse de MES et la plus faible concentration de Ni sont mesurées tandis que le ratio Ca/Fe est à sa valeur la plus forte. D'après ces valeurs, durant cette période, les apports marins semblent prépondérants. Cette période est accompagnée de précipitations faibles (6,6 mm) et de vents de faibles intensités ( $3,6 \pm 2,0$  m/s) d'orientation variable, passant rapidement du secteur O à NE (soit une rotation de  $135^\circ$ ).
- Le 28-31 juillet (003) et 01-04 août (004) – ces périodes correspondent à des précipitations fortes à modérées (de 88,5 à 21,9 mm) et des vents d'intensité faible à modérée (de  $3,7 \pm 2,5$  à  $5,7 \pm 2,5$  m/s). Les régimes de vents très variables, basculent entre secteur OSO à NNE (rotation de  $-225^\circ$ ) suivie par deux rotations très rapides du NNE au S ( $157,5^\circ$ ) et puis du S au NNE ( $-157,5^\circ$ ). Malgré les fortes précipitations, aucun impact particulier sur la quantité de MES et la concentration de Ni n'est décelé. Le ratio Ca/Fe reste relativement élevé soulignant toujours l'avantage d'apport marin sur l'apport terrigène, le panache terrigène restant probablement confiné en fond de baie en dépit de la pluviométrie.
- Le 05-08 août (005) - la quantité de MES piégées augmente subitement et le ratio Ca/Fe diminue. Le régime d'apport terrigène est plus perceptible. A noter que la masse de fraction grossière dans les MES piégées est également plus discernable. Cette période correspond à celle des précipitations modérées de 19,2 mm et des vents d'intensité de  $6,6 \pm 2,5$  m/s modérée. Les vents proviennent d'un secteur très restreint de SO à S. A noter, le 06 août, le vent de  $9,6 \pm 1,4$  m/s souffle du SSO pour ensuite rester dans le secteur S du 07-08 août. L'empreinte terrigène des MES piégées résulte en partie de ces régimes météorologiques favorables à la resuspension des MES déposées en fond de baie.
- Le 09-12 août (006) - la quantité de MES piégées ainsi que la masse de la fraction grossière diminuent subitement. Cela n'impacte que peu la concentration de Ni et le ratio de Ca/Fe. Cette période correspond à celle des précipitations faibles de 0,4 mm, des vents d'intensité modérée de  $5,7 \pm 1,1$  m/s et des régimes de vents passant progressivement du secteur S à E. Durant cette période, seules les particules terrigènes les plus fines subsistent dans la colonne d'eau.

- Le 13-16 août (007) et 17-20 août (008) - la plus forte masse de MES et la plus forte concentration de Ni sont mesurées. Cette période est également caractérisée par la masse la plus importante de fraction grossière mesurée dans les MES piégées. Le ratio Ca/Fe étant à sa valeur la plus faible, l'apport terrigène devient majoritaire. Cette période est accompagnée de faibles précipitations (8,7 mm) et des vents d'intensité modérée ( $5,8 \pm 2,9$  m/s) dont le régime est plus maintenu dans le secteur de O à SSO. A noter, les 15 et 16 août, le vent de  $7,3 \pm 3,0$  et  $8,7 \pm 1,0$  m/s souffle du SSO. En dépit des conditions météorologiques favorables à la resuspension des MES, les quantités piégées ne peuvent s'expliquer par ce seul mécanisme ; les apports du creek devraient être étudiés. Du 17-20 août, les valeurs des 3 paramètres ne varient que peu. Il en est la même pour la masse de fraction grossière mesurée dans les MES piégées. Le régime d'apport terrigène se maintient. A noter, le 17 août, le vent continue de souffler de SSO avec une force de  $6,9 \pm 1,4$  m/s puis les 18-20 août le régime d'alizé (SE-SSE) se met en place. Les précipitations sont modérées (14,2 mm).
- Du 21-24 août (009) au 02-05 septembre (012) – les masses de MES et de fraction grossière piégées chutent subitement et demeurent constantes jusqu'au 05 septembre. En revanche, les concentrations de Ni diminuent graduellement tandis que les ratios Ca/Fe augmentent de manière régulière, soulignant l'instauration progressive du régime marin. La période 21-24 août est accompagnée des vents modérés de  $6,5 \pm 1,7$  m/s du secteur ESE à ENE et des faibles précipitations de 2,2 mm, alors que les 25-28 août, le cumul des précipitations est de 85,3 mm avec des vents s'intensifiant, passant du NNE à O (rotation de  $247,5^\circ$  ;  $8,2 \pm 14,1$  m/s) avec des pointes de  $15,8 \pm 26,5$  m/s le 25 août. Ces régimes ont été sans grande conséquence mécanique sur les phénomènes de resuspension des MES.

La St06-KW1 étant située dans un étroit chanel formé entre des récifs fermant la Baie Kwé et ouvert vers le sud, ces observations démontrent que :

- la contribution du flux de particules **d'origine terrigène** est fortement influencé par les vents de secteur S, particulièrement de régime SSO qui a pour cause de remobiliser des particules terrigènes sédimentées en fond de baie. Pour cette campagne, cet apport ne semble pas être conditionné par le lessivage de matières latéritiques résultant des précipitations (par exemple, les prélèvements 003, 004, 010 et 011). La station St06-KW1 est sans doute trop éloignée de la côte pour pouvoir réceptionner les particules lessivées par les précipitations lorsque les conditions météorologiques confinent les panaches à la côté. Par ailleurs, les vents des secteurs E, N et W ne favorisent pas la formation d'un clapot suffisant pour engendrer des remises en suspension des particules déposées en fond de baie.
- le flux **d'origine marine** est ainsi favorisé par des vents de E, N et W et principalement par des vents modérés à forts de secteur S, notamment de régime SSO. En effet, les vents de ces secteurs contribuent au déplacement des masses d'eau océanique enrichies en particules carbonatées et en tests micro-organismes marins, comme les foraminifères. Par ailleurs, les vents S sont également capables de mettre en suspension les particules grossières, conséquence de l'altération mécanique du platier corallien qui borde la Baie Kwe, comme constaté pour les prélèvements 005, 007 et 008.
- Cependant, au vu des ratios Ca/Fe faibles de ces prélèvements, il semblerait que, l'influence terrigène soit favorisée (par la remobilisation des particules fines sédimentées). Il se peut également que les particules grossières carbonatées du platier, en raison de leur taille et densité, soient transportées moins loin.

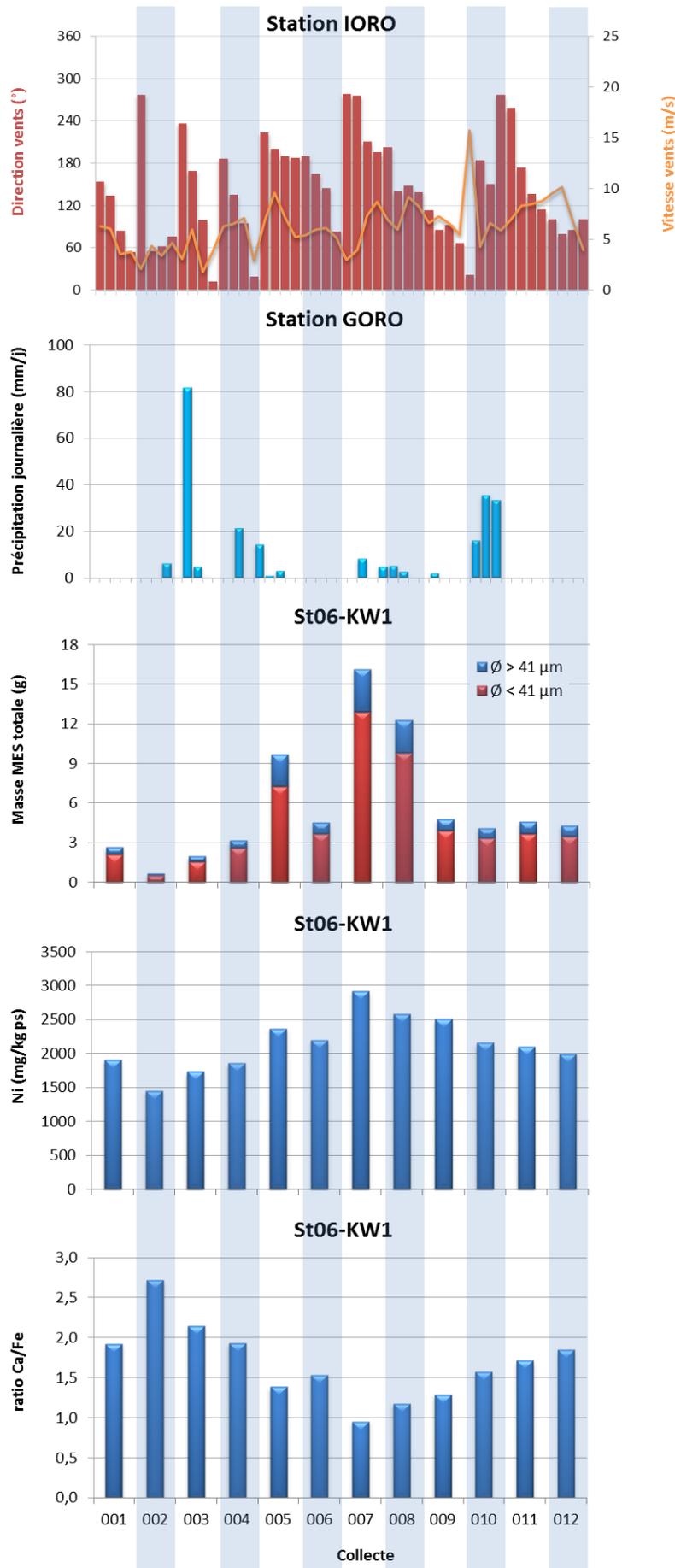


Figure 19 : Diagramme combiné de direction et vitesse moyennes journalières des vents, cumul journalier de précipitation, de masse totale de MES piégées et la composition en fraction fine ( $\phi < 41 \mu\text{m}$ ) et fraction grossière ( $\phi > 41 \mu\text{m}$ ) ainsi que de concentration en nickel et le ratio Ca/Fe mesurés dans les fractions fines piégées à St06-KW1.

## 2. Rade Nord de Prony (St15)

---

**Note :** D'après la matrice de corrélation, contrairement au Fe et Mn, le Co, Cr et Ni présentent une signature géochimique propre de la partie E de la Baie du Prony. Afin de corrélérer les influences des facteurs météorologiques aux apports terrigènes du Creek de la Rade Nord, il a été choisi pour l'étude suivante de normaliser les concentrations de Ca par Cr.

L'immersion du piège séquentiel à particules à St15 du 27 mai au 13 juillet avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes :

- Le 27-30 mai (001) – la plus faible concentration de Ni est mesurée tandis que le ratio Ca/Cr est à sa valeur la plus forte. Il est à noter que la part de la fraction grossière de MES piégées est également à son maximal. D'après ces valeurs, durant cette période, le régime marin semble dominant. En effet, durant cette période aucune précipitation n'est enregistrée, mais elle est accompagnée de vents de faibles intensités ( $3,5 \pm 2,2$  m/s) soufflant du NE au NNO (27-28 mai) et passant rapidement du N au S (29-30 mai ; rotation de 180°).
- Le 31 mai-03 juin (002) – les régimes des vents demeurent dans l'étroit secteur du S-SE et la vitesse s'intensifie ( $6,8 \pm 1,8$  m/s). Les précipitations enregistrées sont faibles (5,6 mm) et la quantité de MES piégées ainsi que le ratio Ca/Cr diminuent subitement. *A contrario*, la concentration de Ni augmente et la proportion de fraction grossière de MES reste à son maximal. Dans ce contexte hydro-climatique, la remise en suspension semble être le mécanisme dominant.
- Le 04-07 juin (003) – La quantité de MES augmente subitement et atteint sa valeur maximale. La proportion de fraction grossière et le ratio Ca/Cr diminuent fortement et sont à leurs valeurs minimales, tandis que la concentration de Ni augmente. Cette période est accompagnée de précipitations exceptionnelles de 192,2 mm. Les vents sont plus variables avec une force modérée ( $6,7 \pm 4,4$  m/s) et de secteurs ESE à O, en passant par le NNE (rotation de -202,5°). Les MES piégées sont le résultat de l'érosion du bassin du Creek de la Rade du Nord, en particulier.
- Les 08-11 juin (004), 12-15 juin (005) et 16-19 juin (006) – les valeurs des 3 paramètres ne varient que peu. En revanche, les proportions de fraction fine sont plus en plus faibles. Ces périodes sont caractérisées par des précipitations faibles à modérées (1,2, 23,4 et 5,4 mm, respectivement) et des vents faibles à modérés ( $5,4 \pm 1,8$ ,  $9,7 \pm 2,3$  et  $8,3 \pm 1,6$  m/s, respectivement). Les régimes de vents, quant à eux, sont du secteur ONO à SSO (08-11 juin) et reviennent aux vents alizés, soufflant principalement du SE/SSE (12-19 juin). Compte tenu de sa superficie, le temps de réponse du bassin versant est très court, les charge en MES diminuent alors tout aussi rapidement.
- Du 20-23 juin (007) au 11-13 juillet (012) – les concentrations de Ni déclinent progressivement, tandis que les ratios de Ca/Cr s'accroissent. Les masses de MES piégées augmentent très sensiblement tout comme la fraction grossière qui les composent. Les précipitations demeurent faibles pendant ces périodes, variant entre 0,2 mm et 6,0 mm, tandis que les vitesses de vents sont faibles à modérées (de  $3,6 \pm 1,8$  à  $7,0 \pm 1,8$  m/s), mais en revanche, les régimes sont variables. L'évolution des concentrations en Ni à la baisse progressive traduit la lente dynamique de renouvellement des masses d'eau dans la Rade Nord (Fernandez *et al.*, 2012).

La St15 étant située juste après l'embouchure du Creek de la Rade Nord au fond de la Baie du Prony et en contrebas d'un talus formé d'une couche de sédiment fluide non consolidée, ces observations démontrent que:

- la contribution du flux de particules **d'origine terrigène** est très fortement influencée par les précipitations, peu importe le régime des vents. En raison de sa dimension réduite, la baie du Creek de

la Rade Nord reçoit les particules latéritiques lessivées par les précipitations *via* le Creek qui y débouche. La concentration en métaux latéritiques (exemple de Ni) demeure aussi élevée après l'épisode pluvieux, probablement dû à la persistance du transport des particules par le Creek et/ou à la latence de sédimentation des particules fines et/ou à la lente dynamique de renouvellement des masses d'eau dans la Rade Nord. Par ailleurs, les particules latéritiques riches en métaux sédimentés en fond de Baie semblent être remises en suspension par les vents des secteurs O, voire du secteur S. En effet, les vents du SSO et SSE peuvent remobiliser les particules légères déposées par faible profondeur sur le talus. Les vents de O, quant à eux, remobiliseraient les particules plus denses et moins riches en Ni déposés dans la petite anse de la Rade Nord.

- le flux **d'origine marine** est principalement favorisé par les vents de secteur N et O modérés qui semblent également contribuer au déplacement des particules grossières. Ces particules seraient la conséquence de l'altération mécanique des formations récifales en amont de St15.

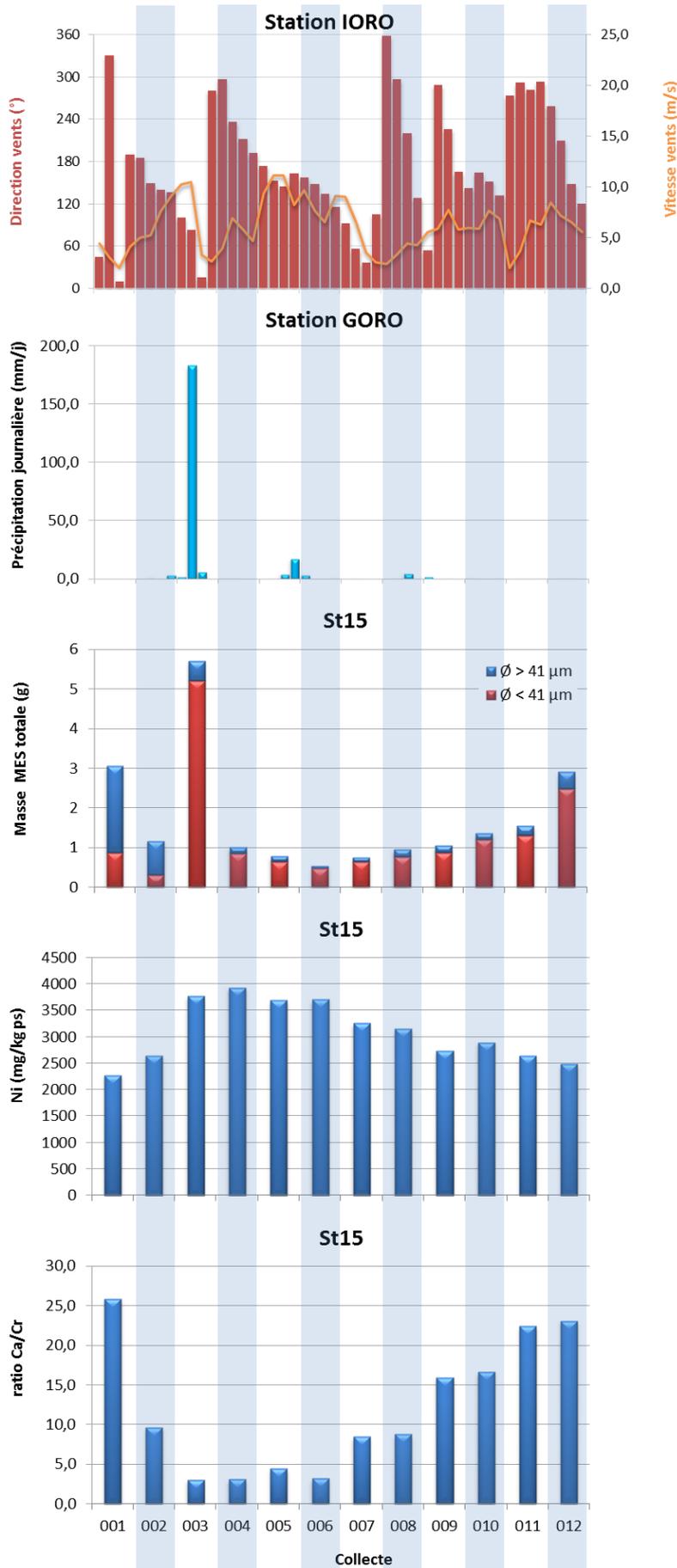


Figure 20 : Diagramme combiné de direction et vitesse moyennes journalières des vents, cumul journalier de précipitation, de masse totale de MES piégées et la composition en fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) ainsi que de concentration en nickel et le ratio Ca/Cr mesurés dans les fractions fines piégées à St15.

### 3. Canal de la Havannah (St60-NE)

L'immersion du piège séquentiel à particules à St60-NE du 27 mai au 13 juillet, avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes :

- Le 27-30 mai (001) et le 31 mai-03 juin (002) – les quantités de MES collectées sont infinitésimales et contiennent peu de fraction fine pour pouvoir effectuer les analyses élémentaires. D'intensités faibles à modérées ( $3,5 \pm 2,2$  et  $6,8 \pm 1,8$  m/s, respectivement), les vents soufflent du NE au NNO du 27-28 mai et passent rapidement du N au S le 29-30 mai (rotation de  $180^\circ$ ) pour demeurer dans l'étroit secteur du S-SE jusqu'au 03 juin. Les précipitations mesurées, seulement pour la période 31 mai-03 juin, sont faibles (5,6 mm). Ce contexte hydro-climatique calme a favorisé la circulation de veines d'eau marines exemptes de MES.
- Le 04-07 juin (003) – La quantité de MES collectée augmente subitement. Le ratio Ca/Fe est à son maximal tandis que la concentration de Ni est à sa minimale et la proportion de fraction grossière piégée est légèrement majoritaire. Cette période est accompagnée des précipitations exceptionnelles de 192,2 mm. Les vents sont plus variables avec une force modérée ( $6,7 \pm 4,4$  m/s) et des régimes de ESE à O en passant par le secteur NNE (rotation de  $-191,25^\circ$ ).
- Les 08-11 juin (004) et 12-15 juin (005) – la masse de MES collectée ne varie pas. Les masses des fractions fines piégées sont légèrement plus hautes comparativement à celles des fractions grossières. Les concentrations de Ni sont en augmentation progressive tandis que les ratios Ca/Fe diminuent fortement. Ces périodes sont caractérisées, respectivement, par des précipitations de 1,2 et 23,4 mm, et par des vents faibles à modérés ( $5,4 \pm 1,8$  et  $9,7 \pm 2,3$  m/s respectivement) du secteur ONO à SSO (08-11 juin) et S à SE (12-15 juin).
- Le 16-19 juin (006) et le 20-23 juin (007) – les masses de MES collectées sont en augmentation et les ratios de Ca/Fe restent bas (valeur minimale) alors que les concentrations de Ni montrent leurs maximales. Ces périodes sont caractérisées par des précipitations faibles de 5,4 et 0,2 mm, respectivement. Quant aux vents, les intensités mesurées sont modérées de  $8,3 \pm 1,6$  et  $5,5 \pm 2,9$  m/s, respectivement, du SSE à ESE (alizés) et d'E puis NE et ensuite ESE.
- Les 24-27 juin (008) et 28 juin-01 juillet (009) – les quantités de MES piégées diminuent notablement, tandis que les ratios de Ca/Fe augmentent légèrement. Les concentrations de Ni restent élevées. Les masses des fractions fines sont plus hautes que celles des fractions grossières. Les précipitations, respectivement de 6,0 et 3,2 mm sont accompagnées de vents de  $3,6 \pm 0,9$  et  $6,3 \pm 1,0$  m/s de régimes très variables.
- Du 02-05 juillet (010) au 10-13 juillet (012) – les concentrations de Ni diminuent graduellement alors que parallèlement, les ratios de Ca/Fe augmentent. Les quantités de MES collectées augmentent puis diminuent légèrement. Les masses des fractions fines commencent à diminuer. Les précipitations demeurent faibles pendant ces périodes (1,8, 1,8 et 0,6 mm, respectivement) tandis que les vitesses de vents sont de  $6,6 \pm 1,5$ ,  $4,7 \pm 2,9$  et  $7,0 \pm 1,8$  m/s, respectivement, de secteurs SE, O, puis ONO, pour revenir au secteur O à SSO et, enfin, aux alizés en toute fin de période.

La St60-NE étant située dans le Canal de la Havannah, à 60 m au nord-est de l'émissaire, ces observations démontrent que:

- la contribution du flux de particules **d'origine terrigène** ne serait pas influencée par les précipitations. En effet, en raison de son éloignement à la côte et de l'hydrodynamisme régnant dans le Canal, il est peu probable que les particules latéritiques lessivées par les précipitations puissent être charriées jusqu'à

la station St60-NE. En ce qui concerne les régimes de vents, aucune corrélation claire n'a pu être établie entre ce dernier et les apports terrigènes. Toutefois, des vents d'un large secteur S génèrent une houle suffisante qui peut mettre/remettre en suspension des MES, tout le long de la ligne de côte. Ces particules peuvent probablement finir par atteindre des aires éloignées de la ligne de côte, au gré des phénomènes de marées.

- le flux **d'origine marine** ne semble pas, non plus, particulièrement influencé par des régimes de vents, sinon du secteur E. En tout cas, aucune corrélation pertinente ne se dégage entre ces deux facteurs.

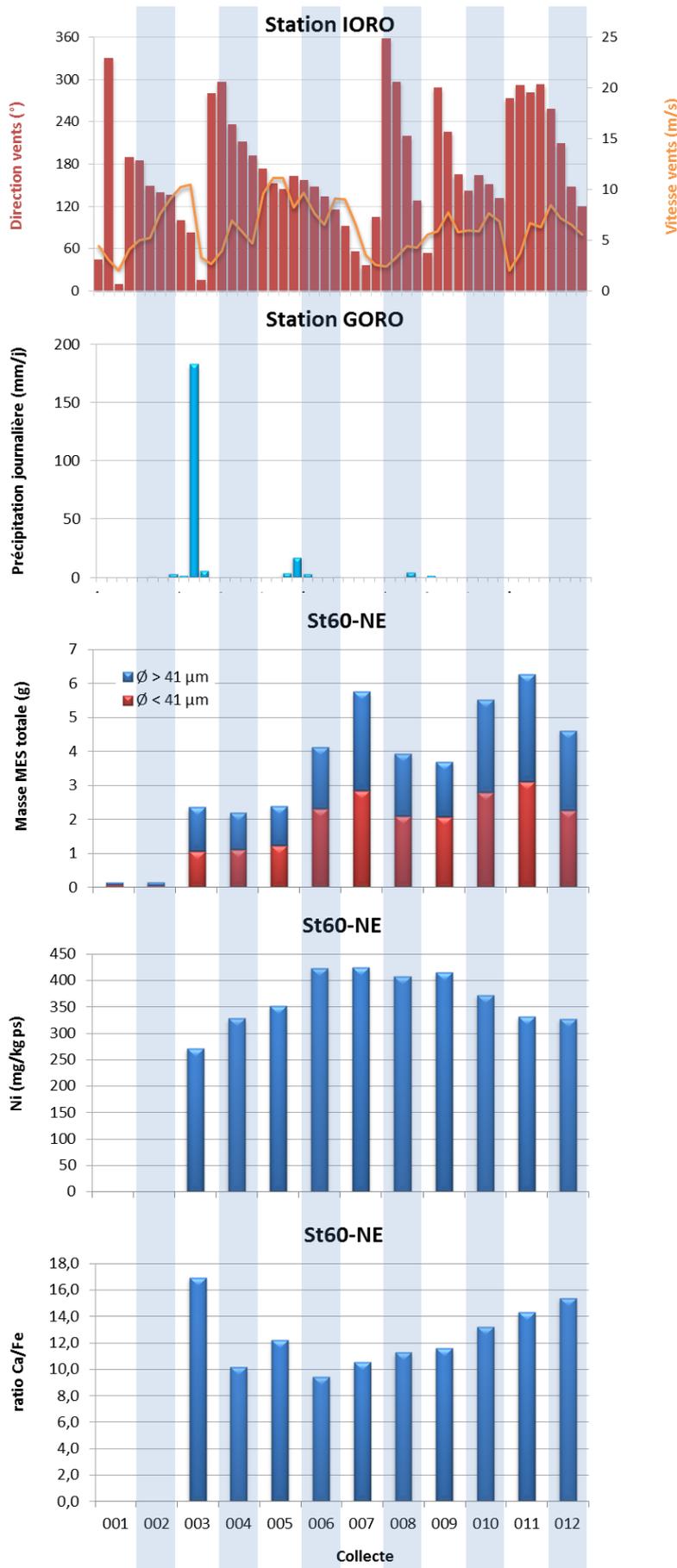


Figure 21 : Diagramme combiné de direction et vitesse moyennes journalières des vents, cumul journalier de précipitation, de masse totale de MES piégées et la composition en fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) et fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) ainsi que de concentration en nickel et le ratio Ca/Fe mesurés dans les fractions fines piégées à St60-NE.

## B. CALCUL DES FLUX DES MATIERES

Les valeurs de densité de flux verticaux des MES et des flux métalliques sont regroupées dans l'Annexe 5.

### 1. Baie Kwé (St06-KW1)

#### Flux de matière en suspension

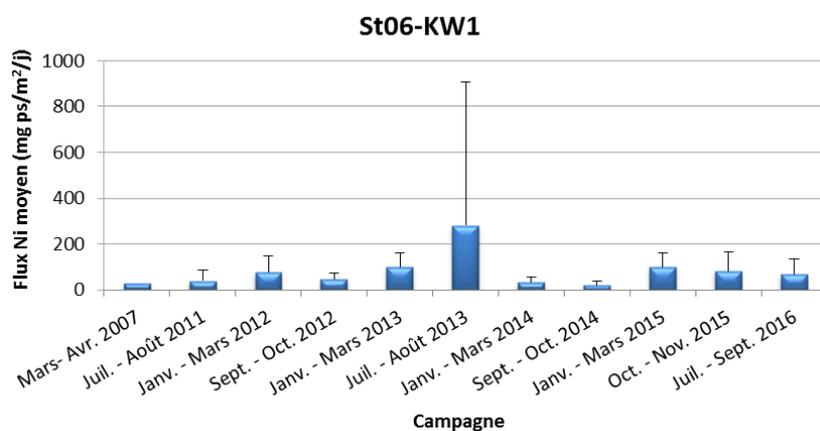
La densité de flux moyen mesurée lors de cette campagne est de  $28,7 \pm 22,9$  g/m<sup>2</sup>/j. Entre les différentes campagnes, les densités moyennes de flux peuvent varier fortement. Pour cette campagne, les moyennes obtenues sont environ 2 fois supérieures à celles enregistrées en 2007 pour l'état de référence. Globalement, depuis 2007, la tendance a été en augmentation et semble s'inverser, à partir de la campagne d'octobre-novembre 2015 (Tableau 30).

**Tableau 30 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des flux en matière particulaire totale et des cumuls de masses de MES total piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-KW1.**

St06-KW1					
Campagne	Densités de flux de MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Cumul de masse de MES piégées (g/m <sup>2</sup> )	Campagne	Densités de flux de MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Cumul de masse de MES piégées (g/m <sup>2</sup> )
Oct. - Nov. 2006	15 $\pm$ 7	350	Juil. - Août 2013	58 $\pm$ 88	2 786
Mars - Avr. 2007	46 $\pm$ 45	1 106	Janv. - Mars 2014	61 $\pm$ 34	2 914
Juil. - Août 2011	27 $\pm$ 30	1 299	Sept - Oct. 2014	12 $\pm$ 8,	569
Janv. - Mars 2012	40 $\pm$ 33	1 894	Janv. - Mars 2015	66 $\pm$ 36	3 181
Sept. - Oct. 2012	26 $\pm$ 13	1 267	Oct. - Nov. 2015	39 $\pm$ 31	1 864
Janv. - Févr. 2013	47 $\pm$ 29	2 231	Juil. - Sept. 2016	29 $\pm$ 23	1 379

#### Éléments métalliques

Illustré par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne sont de  $69,3 \pm 67,6$  mg ps/m<sup>2</sup>/j. D'une campagne à l'autre, les valeurs moyennes varient fortement, le flux maximum a été calculé pour juillet-août 2013 ( $282 \pm 626$  mg ps/m<sup>2</sup>/j). Ensuite, les flux en Ni diminuent fortement et ne dépassent pas le seuil de 102 mg ps/m<sup>2</sup>/j (Figure 22).



**Figure 22 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des flux en nickel dans les fractions fines ( $\varnothing < 41$   $\mu$ m) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-KW1.**

## 2. Rade Nord de Prony (St15)

### Flux de matière en suspension

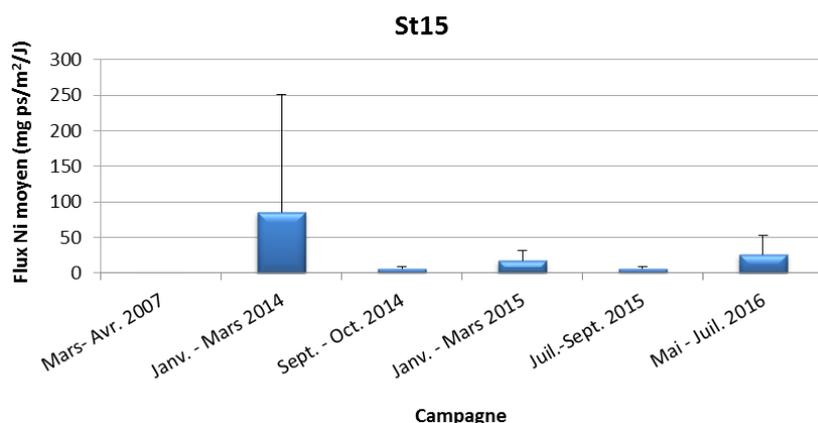
La densité de flux moyen mesurée lors de cette campagne est de  $8,7 \pm 7,4$  g/m<sup>2</sup>/j. Entre les différentes campagnes conduites à St15, les densités moyennes de flux sont variables. Pour cette campagne la moyenne est 9 fois supérieure à celle enregistrée en 2007 pour l'état de référence. Il est à noter que la valeur moyenne exceptionnelle de janvier-mars 2014 est à mettre en lien avec les précipitations, elles aussi exceptionnelles (920,2 mm), de cette campagne (Tableau 4 ; Tableau 31).

**Tableau 31 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des flux en matière particulaire total et des cumuls de masses de MES totales piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.**

St15					
Campagne	Densités de flux de MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m <sup>2</sup> )	Campagne	Densités de flux de MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m <sup>2</sup> )
Oct. – Nov. 2006	1,1 $\pm$ 0,6	25,2	Janv. - Mars 2015	2,8 $\pm$ 3,0	134
Mars - Avr. 2007	1,6 $\pm$ 1,5	37,1	Juil. - Sept. 2015	1,3 $\pm$ 1,3	62,7
Janv. - Mars 2014	22,2 $\pm$ 44,5	1 063	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>8,7 <math>\pm</math> 7,4</b>	<b>416</b>
Sept. – Oct. 2014	0,9 $\pm$ 1,2	43,8	-	-	-

### Eléments métalliques

Illustré par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne sont de  $26 \pm 27$  mg ps/m<sup>2</sup>/j. Entre les campagnes, les valeurs moyennes montrent une très forte variation. Ainsi, en janvier-mars 2014 la valeur moyenne est maximale ( $86 \pm 165$  mg ps/m<sup>2</sup>/j) puis elle diminue et demeure en dessous du seuil de 27 mg ps/m<sup>2</sup>/j. La valeur extrême maximale est à relier avec la pluviométrie exceptionnelle de 920,2 mm mesurée lors de la campagne (Tableau 4 ; Figure 23).



**Figure 23 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des flux en nickel dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.**

### 3. Canal de la Havannah (St60-NE)

#### Flux de matière en suspension

La densité de flux moyen mesurée lors de cette campagne est de  $17 \pm 10 \text{ g/m}^2/\text{j}$ . Entre les différentes campagnes, les densités moyennes de flux sont également variables. Les comparaisons montrent également que les moyennes obtenues depuis 2012 demeurent inférieures à celle enregistrée en 2007 pour l'état de référence (Tableau 32).

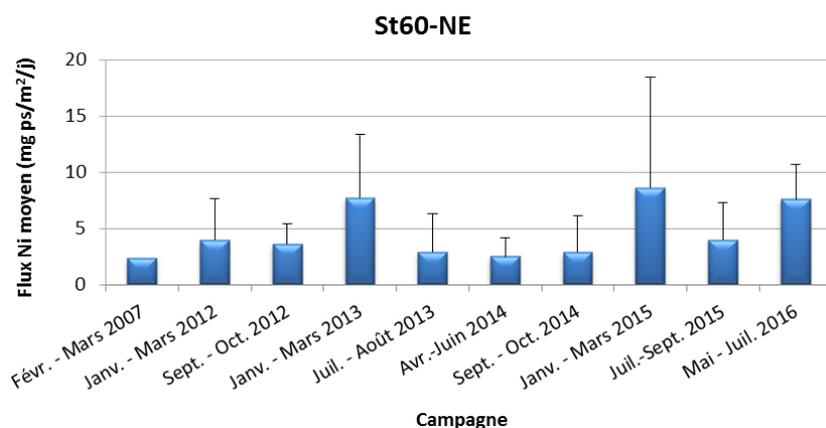
**Tableau 32 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des flux en matière particulaire totale et des cumuls de masses de MES totales piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.**

St60-NE					
Campagne	Densités de flux de MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m <sup>2</sup> )	Campagne	Densités de flux de MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m <sup>2</sup> )
Févr. - Mars 2007	31,6 $\pm$ 40,1	949	Avr. - Juin 2014	7,4 $\pm$ 5,1	356
Juil. - Août 2011	ND	ND	Sept. - Oct. 2014	8,1 $\pm$ 9,1	390
Janv. - Mar 2012	9,6 $\pm$ 8,9	461	Janv. - Mars 2015	16,0 $\pm$ 15,6	766
Sept. - Oct. 2012	4,1 $\pm$ 5,4	197	Juil. - Sept. 2015	9,9 $\pm$ 9,2	474
Janv. - Mars 2013	12,6 $\pm$ 13,6	603	<b>Mai - Juil. 2016</b>	<b>17,1 <math>\pm</math> 10,2</b>	<b>822</b>
Juil. - Août 2013	5,9 $\pm$ 7,1	281	-	-	-

ND : valeur non déterminée.

#### Éléments métalliques

Les flux moyens de Ni lors de cette campagne sont seulement de  $7,6 \pm 3,1 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$ , valeur qui est de l'ordre de grandeur des résultats historiques pour la station. Entre les différentes campagnes, la variation des moyennes est modérée et ne dépasse qu'exceptionnellement le seuil de  $5,0 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$ . C'est le cas pour cette campagne et celles de janvier-mars 2013 ( $7,7 \pm 5,7 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$ ) et janvier-mars 2015 ( $8,6 \pm 9,9 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$ ) (Figure 24)



**Figure 24 : Compilation des moyenne  $\pm$  écart-type des flux en nickel dans les fractions fines ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.**

## SYNTHESE

La campagne du premier semestre de 2016 s'est déroulée en deux étapes de mouillage en raison d'un problème technique de récupération des lignes de mouillage.

Dans le contexte hydro-climatique déjà explicité, parmi les 3 stations suivies, les observations principales relevées lors de cette campagne sont les suivantes :

- Pour la St06-KW1 - les masses moyennes de MES et les pourcentages de fraction fine piégés ainsi que la densité moyenne de flux en MES et en Ni sont parmi les plus élevés des 3 stations. En revanche, les teneurs moyennes en carbonates et des concentrations en métaux et Ca, ainsi que le ratio Ca/Fe, sont à des niveaux intermédiaires. Les matrices de corrélation montrent une forte relation entre les évolutions massiques des 5 métaux latéritiques Co, Cr, Fe, Mn et Ni. Il existe également une forte anti-corrélation entre les évolutions massiques des métaux et le Ca. Ces observations soulignent que les particules piégées à St06-KW1 proviennent d'une même formation et que la station subit des influences terrigènes et marines alternées. Les précipitations du 29 juillet 2016 (81,7 mm) et des 26-28 août 2016 (85,3 mm) n'ont pas généré de couche turbide notable. La turbidité et l'enrichissement en Ni constatée entre 05-20 août 2016 résulte de l'effet combiné de la direction de vents principalement de secteur du SO à SE et de force faible ( $3,0 \pm 1,1$  m/s) à modérée ( $9,6 \pm 1,4$  m/s). Ainsi, pour cette campagne, l'influence terrigène semble fortement favorisée par les vents de secteur S, et non par le lessivage de matières latéritiques résultant des précipitations. Ces vents de S alimentent la zone d'étude à la fois en particules latéritiques fines en favorisant la re-suspension des matières sédimentées en fond de baie et, dans une mesure plus ou moins modeste, en particules grossières carbonatées résultant de l'altération mécanique du platier corallien qui borde la Baie Kwe, sous l'effet de la houle. Quant aux vents des secteurs E, N et W, ils favorisaient également l'influence marine en contribuant au déplacement des masses d'eau océanique enrichies en particules carbonatées et en tests micro-organismes marins comme les foraminifères.
- Pour la St15 – les concentrations moyennes en métaux, ainsi que celles de pourcentage de fraction fine piégée sont parmi les plus élevées. En revanche, les masses moyennes de MES piégées, de teneur en carbonates et de concentrations en Ca, ainsi que les ratios moyens Ca/Fe et de la densité de flux en MES sont parmi les plus faibles. En ce qui concerne la densité moyenne de flux en Ni, elles prennent une valeur intermédiaire. La matrice de corrélation confirme une forte relation entre les évolutions massiques des métaux Co, Cr et Ni, tandis qu'aucune corrélation n'est constatée pour le Fe et Mn. Il existe une anti-corrélation entre les évolutions massiques de Co, Cr et Ni et celles de Ca. Ces observations soulignent que les particules piégées à St15 proviennent probablement de différents termes sources dont les compositions respectives en Fe et Mn diffèrent. *A contrario*, le Co, Cr et Ni proviendraient, soit d'une seule formation latéritique, soit d'une latéritique dominante. La St15 se trouve donc dans une zone de convergence de plusieurs petits bassins versants et les termes sources des apporte terrigène/marins alternent. Les précipitations du 05 juin 2016 (183,0 mm) ont généré de couche turbide notable, enrichies en Ni. Ces concentrations élevées en Ni ont persisté durant la période du 08-19 juin 2016 peuvent être à des facteurs météorologiques, comme les vents de S, qui conduisent à la remise en suspension les particules latéritiques fines sédimentée sur le talus, en amont de la station, mais aussi au temps de renouvellement des eaux dans la rade qui est particulièrement lent. L'apport marin, très modeste à St15, semble être favorisé par les vents modérés de secteur N et

O qui semble contribuer au déplacement des particules grossières carbonatées (formations récifales) et de tests de micro-organismes. .

- Pour la St60-NE - les teneurs moyennes en carbonates et les concentrations en Ca, ainsi que les ratios Ca/Fe sont les plus élevés. En revanche, les pourcentages moyens de fraction fine, des concentrations en métaux et la densité de flux en Ni sont les plus faibles. En ce qui concerne les masses moyennes de MES piégées et de la densité de flux en MES, elles sont à des valeurs intermédiaires. La matrice de corrélation confirme une forte relation entre les évolutions massiques des métaux Co, Cr, Fe, Mn et Ni, tandis qu'aucune corrélation n'est constatée pour les métaux et le Ca. Ces observations soulignent que les particules piégées à St60-NE proviennent d'un terme source dont l'influence n'alternerait pas avec les apports marins et dont l'origine n'est pas directement liée au lessivage des sols. En effet, les précipitations du 05 juin 2016 (183,0 mm) n'ont pas généré de couche turbide notable. Même si, aucune corrélation pertinente n'a pu être établie entre les paramètres météorologiques et les apports terrigènes ou les apports marins, les mécanismes d'érosion de la ligne de côte, accentués sous l'effet de vents soutenus, d'un large secteur S, peuvent notablement contribuer à l'alimentation en MES dans un système dit « ouvert » où interagissent plusieurs facteurs simultanément.

Cette campagne conforte les observations des campagnes précédentes établissant une relation entre l'ensemble des conditions météorologiques et les densités des flux verticaux : les précipitations pour la St15 et les précipitations et/ou les vents des régimes S pour la St06-KW1, respectivement, en Rade Nord *via* l'érosion des sols et en Baie Kwé, *via* l'effet de houle et de re-suspension des particules sédimentées qui s'en suit.

En ce qui concerne les évolutions temporelles, selon les 3 stations suivies, les observations principales relevées lors de cette campagne sont les suivantes :

- Pour St06-KW1 - Les concentrations moyennes en Co, Fe, Mn et Ni ainsi que celles de flux en MES et de flux en Ni obtenues lors de cette campagne sont supérieures aux moyennes enregistrées en 2007 pour l'état de référence. Inversement, celle du ratio Ca/Fe est inférieure. Les évolutions importantes du ratio moyen Ca/Fe depuis 2007 permet également de constater une influence grandissante du terme source terrigène, surtout en juillet-août 2013, la campagne qui à ce jour présente les concentrations métalliques les plus hautes à St06-KW1. Cette observation est étayée par la valeur moyenne élevée du flux en Ni en juillet-août 2013.
- St15 - Les concentrations moyennes en Co, Fe, Mn et Ni et de ratio Ca/Fe obtenues lors de cette campagne sont du même ordre de grandeur qu'en 2007 pour l'état de référence. La stabilité des valeurs moyennes du ratio Ca/Fe permet de constater que la forte influence terrigène continue de s'exercer à St15. Quant aux moyennes de flux en MES et Ni, elles sont supérieures, car la moyenne des masses de MES piégées est plus importante. De même manière, bien que les plus fortes concentrations de métaux aient été enregistrées lors de la campagne de janvier-mars 2015, les valeurs maximales de flux moyen de MES et de flux de Ni, quant à elles, sont mesurées lors de la campagne de janvier-mars 2014. Cette observation est à relier avec la plus forte masse moyenne de MES piégées lors de cette dernière campagne qui serait la conséquence des précipitations exceptionnelles (920,2 mm). Ces observations soulignent également le niveau d'hétérogénéité des apports terrigènes à cette station.
- Pour St60-NE - Les concentrations moyennes en Co, Fe, Mn et Ni et de flux de Ni obtenus lors de cette campagne sont supérieures à celles de 2007 pour l'état de référence, tandis que celles des ratios Ca/Fe et de flux en MES sont inférieures. Les évolutions du ratio Ca/Fe moyen, bien que moins importantes qu'en St06-KW1, permettent de constater que l'influence terrigène a augmenté à cette station depuis la campagne de l'état de référence en 2007 pour se stabiliser depuis 2012. L'exception

est faite pour la campagne de juillet-août 2013, campagne qui, à ce jour, présente les concentrations métalliques les plus hautes à St60-NE. En ce qui concerne la concentration moyenne en S, elle est du même ordre qu'en 2007, mais reste inférieure à celle recueillie en avril- juin 2014. Cette dernière campagne présente à ce jour les concentrations en S les plus hautes à St60-NE.

Globalement, il est donc observé, pour cette campagne, une augmentation des flux de matières métalliques (Ni ainsi que le Co, Fe et Mn) en St06-KW1 et St60-NE par rapport à celle de 2007. Toutefois, en St06-KW1, cette augmentation semble liée à la remise en suspension des particules fines déposées dans la Baie Kwé. A St60-NE, elle semble liée à un ensemble de mécanismes qu'il n'est pas encore pertinent d'explicitier (érosion de la côte, contribution des rejets de l'émissaire marin?). Pour St15, les densités de flux en MES et en Ni sont en augmentation bien que les concentrations en métaux latéritiques et le ratio Ca/Fe restent invariables. Ce constat est à relier avec l'augmentation événementielle (fort taux de précipitations) de matière en suspension en St15 ce qui souligne l'hétérogénéité des apports à cette station.

Pour le Cr, les concentrations sont, soit dans l'ordre de grandeur de 2007 (St60-KW1 et St60-NE), soit en baisse (St15). Il est à noter que le Cr particulaire est présent essentiellement sous la forme de chromite, un minéral très dense, et par conséquent, difficile à mettre et maintenir en suspension. En ce qui concerne les concentrations de Ca et S, aucune trace d'enrichissement anormal n'est discernée permettant de déceler l'influence de l'effluent.

Il est également intéressant de noter qu'en St06-KW1 et St60-NE, la campagne de juillet-août 2013 fût celle qui a présenté les concentrations métalliques maximales tandis que celles de janvier-mars 2014 (St06-KW1) et avril-juin 2014 (St60-NE) furent celles des concentrations minimales. Ces observations sont, probablement, à mettre en relation avec la chronologie des événements de l'usine Vale-NC dont, respectivement, la rupture du tuyau de l'émissaire marin suivi de l'arrêt du rejet de l'effluent marin, à deux reprises.

## REFERENCES

Achard, R. 2013. Dynamique des contaminants inorganiques dans les sédiments de dragage : rôle spécifique de la matière organique.

Achard R., Kumar-Roiné S., Kaplan H., Pluchino S., Haddad L., Laurent A., et Fernandez JM. 2015. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony : mission juillet-septembre et octobre-novembre 2015. Contrat Vale-NC/AEL n° 3052-2013, 74 p.

Bodeï S., Pointeau V. 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.

CCB 2009 : Convention pour la conservation de la biodiversité (CCB, 2009).

Chaurrand, P. 2007. Apport de la cristalochimie et de la spéciation du chrome et du vanadium à la modélisation de l'altération de granulats artificiels (sous products d'aciérie)

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

Fernandez JM., Chevillon C., Dolbecq M., Legendre R., Belhandouz A., Lamoureux J.P. 2007. Etat de référence : Distribution superficielle des sédiments, flux sédimentaires et taux d'accumulation dans la Baie du Prony (Rades Nord et Nord-Est) et dans la Baie Kwé. Contrat AEL/Vale-NC n°1230, 55p.

Fernandez JM., Douillet P., Moreton B., Dolbecq M., Damien P., Le Grand H. 2009. Validation du modèle de transport en phase dissoute par traçage à la rhodamine-WT. Contrat IRD/Vale-NC n° 2131, 152p.

Fernandez JM., Douillet P., Moreton B., Danès C. 2012. Modélisation hydrodynamique raffinée de la Baie du Prony : maille à 60 m. Rapport AEL, Contrat E29926 / 0001, 205p.

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS DE PRELEVEMENT DU SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LA ZONE D'INFLUENCE DE L'USINE DE VALE-NC (LE TRAIT ROUGE REPRESENTA LE DIFFUSEUR), .....	10
FIGURE 2 : EMPREINTE TYPE DE L'EFFLUENT PAR MARQUAGE A LA 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 : CUMUL JOURNALIER DE PRECIPITATIONS ET EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIERE) POUR LA PERIODE DU 20 JUILLET AU 05 SEPTEMBRE 2016.....	17
FIGURE 4 : CUMUL JOURNALIER DE PRECIPITATIONS ET EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIERE) POUR LA PERIODE DU 27 MAI AU 13 JUILLET 2016.....	18
FIGURE 5 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET FRACTION GROSSIERE ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1. ....	19
FIGURE 6 : POURCENTAGE DES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET DES FRACTIONS GROSSIERES ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) DANS LES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1. ....	20
FIGURE 7 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1. ....	21
FIGURE 8 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1. ....	22
FIGURE 9 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET FRACTION GROSSIERE ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15. ....	23
FIGURE 10 : POURCENTAGE DES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET DES FRACTIONS GROSSIERES ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) DANS LES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.....	23
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15. ....	25
FIGURE 12 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.....	26
FIGURE 13 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET FRACTION GROSSIERE ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	27
FIGURE 14 : POURCENTAGE DES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET DES FRACTIONS GROSSIERES ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) DANS LES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	27
FIGURE 15 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE. ....	28
FIGURE 16 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE. ....	29
FIGURE 17 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.....	34
FIGURE 18 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	36
FIGURE 19 : DIAGRAMME COMBINE DE DIRECTION ET VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, CUMUL JOURNALIER DE PRECIPITATION, DE MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET LA COMPOSITION EN FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET FRACTION GROSSIERE ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) AINSI QUE DE CONCENTRATION EN NICKEL ET LE RATIO CA/FE MESURES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST06-KW1. ....	40
FIGURE 20 : DIAGRAMME COMBINE DE DIRECTION ET VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, CUMUL JOURNALIER DE PRECIPITATION, DE MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET LA COMPOSITION EN FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET FRACTION	

GROSSIERE ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) AINSI QUE DE CONCENTRATION EN NICKEL ET LE RATIO CA/CR MESURES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST15. ....	43
FIGURE 21 : DIAGRAMME COMBINE DE DIRECTION ET VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, CUMUL JOURNALIER DE PRECIPITATION, DE MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET LA COMPOSITION EN FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET FRACTION GROSSIERE ( $\varnothing > 41 \mu\text{M}$ ) AINSI QUE DE CONCENTRATION EN NICKEL ET LE RATIO CA/FE MESURES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST60-NE.....	46
FIGURE 22 : COMPILATION DES MOYENNE $\pm$ ECART-TYPE DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-KW1. ....	47
FIGURE 23 : COMPILATION DES MOYENNE $\pm$ ECART-TYPE DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST15.....	48
FIGURE 24 : COMPILATION DES MOYENNE $\pm$ ECART-TYPE DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-NE. ....	49

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LISTE ET POSITION DES STATIONS DE PRELEVEMENT DU SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LA ZONE D'INFLUENCE DE L'USINE DE VALE-NC. ....	9
TABLEAU 2 : DETAIL DE COLLECTE DES ECHANTILLONS PAR LES PIEGES SEQUENTIELS MOUILLES A St06-KW1, St15 ET St60-NE. ...	12
TABLEAU 3 : COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DE PIEGE SEQUENTIEL A LA STATION St06-KW1. ....	15
TABLEAU 4 : COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DE PIEGE SEQUENTIEL A LA STATION St15. ....	15
TABLEAU 5 : COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DE PIEGE SEQUENTIEL A LA STATION St60-NE. ....	16
TABLEAU 6 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE LA MES TOTALE, DES POURCENTAGES DE FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET DE LA TENEUR EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1. ....	20
TABLEAU 7 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DANS LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1. ...	21
TABLEAU 8 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1. ....	22
TABLEAU 9 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPE DE LA MES TOTALE, DU POURCENTAGE DE FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET DE LA TENEUR EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15. ....	24
TABLEAU 10 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15. ....	25
TABLEAU 11 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15. ....	25
TABLEAU 12 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE LA MES TOTALE, DU POURCENTAGE DE FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) ET DE LA TENEUR EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE. ....	27
TABLEAU 13 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE. ....	28
TABLEAU 14 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE. ....	29
TABLEAU 15 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1. ....	30
TABLEAU 16 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1. ....	31
TABLEAU 17 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1. ....	31
TABLEAU 18 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ( $\varnothing < 41 \mu\text{M}$ ) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1. ....	32

TABLEAU 19 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A ST06-KW1. ....	32
TABLEAU 20 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15. ....	33
TABLEAU 21 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15. ....	33
TABLEAU 22 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST15.....	33
TABLEAU 23 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A ST15. ....	34
TABLEAU 24 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	35
TABLEAU 25 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	35
TABLEAU 26 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A ST60-NE. ....	35
TABLEAU 27 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNE ± ECART-TYPE DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DE MES COLLECTEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A ST60-NE. ....	36
TABLEAU 28 : CONCENTRATIONS EN SOUFRE MESUREES DANS LA FRACTION FINE (Ø < 41 µM) DES 10 PRELEVEMENTS DE MES COLLECTES PAR LE PIEGE SEQUENTIEL A PARTICULES A ST60-NE. ....	37
TABLEAU 29 : COMPILATION DES MOYENNE ± ECART-TYPE DES CONCENTRATIONS EN SOUFRE OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES (Ø < 41 µM) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-NE. ....	37
TABLEAU 30 : COMPILATION DES MOYENNE ± ECART-TYPE DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE ET DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTAL PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-KW1. ....	47
TABLEAU 31 : COMPILATION DES MOYENNE ± ECART-TYPE DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTAL ET DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST15.....	48
TABLEAU 32 : COMPILATION DES MOYENNE ± ECART-TYPE DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE ET DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-NE. ....	49

## ANNEXES

ANNEXE 1.....	59
ANNEXE 2.....	61
ANNEXE 3.....	64
ANNEXE 4.....	71
ANNEXE 5.....	73

# ANNEXE 1

## METHODOLOGIE

### IMMERSION DES PIEGES A SEDIMENT SEQUENTIELS

Les flux verticaux de particules apportées par le réseau hydrologique sont estimés par collecte de séries temporelles d'échantillons de matière en suspension (MES). Cette opération est assurée par le déploiement de pièges à particules de type séquentiel de 0,05 m<sup>2</sup> de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui sont grées sur une ligne de mouillage équipée avec un largueur acoustique.

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.

Une fois réceptionnés au laboratoire, les prélèvements de MES sont séchés, conditionnés puis conservés dans des sachets à usage unique.

### TAMISAGE

Les MES piégées sont tamisées afin de séparer la fraction fine ( $\varnothing < 41 \mu\text{m}$ ) de la fraction grossière ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ). Les analyses suivantes sont effectuées uniquement sur les fractions fines.

### 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 fines ( $\varnothing < 41\mu\text{m}$ ) de MES.

### GRANULOMETRIE

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est réalisée sur quatre échantillons de fraction fine ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) par granulométrie laser (Malvern master Sizer 2000). La granulométrie laser est réalisée à l'Université de Nouvelle-Calédonie.

### MINERALOGIE

Les déterminations minéralogiques sont effectuées par diffraction de rayons X (DRX) sur quatre échantillons de fraction fine ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ). Cette analyse a été confiée à l'Université de Nouvelle-Calédonie.

### DOSAGE ELEMENTAIRE

Le dosage élémentaire, nécessaire pour le suivi des flux de polluants, est réalisé par la méthode dite « minéralisation eau régale ». Les échantillons de fraction fine ( $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ ) sont attaqués avec de l'acide à haute température en conditions hyperbares. Le Ca, Mg, S 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 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 séquentiels à particules.

#### **EVALUATION DES FLUX DE MES**

Une fois les MES caractérisées, les influences terrigène et marine (ratio de Ca/Fe) ainsi que les flux sont estimés ( $\text{g/m}^2/\text{j}$ ) et confrontés aux différents régimes météorologiques.

## ANNEXE 2

### VARIABLES METEOROLOGIQUES

Valeurs journalières des paramètres météorologiques (cumul de précipitations et moyenne de vitesse et direction de vents maximales instantanées) collectées par la station météorologique « GORO ».

Prélèvement	GORO									
	Date	RR	FXI	DXI	Régime	Date	RR	FXI	DXI	Régime
1	27/05/2016	0,0	9,50	10	N	20/07/2016	0,0	10,6	120	ESE
	28/05/2016	0,0	9,80	350	N	21/07/2016	0,0	10,8	130	SE
	29/05/2016	0,0	6,40	240	OSO	22/07/2016	0,0	8,8	90	E
	30/05/2016	0,0	9,10	160	SSE	23/07/2016	0,0	9,2	30	NNE
2	31/05/2016	0,0	7,70	190	S	24/07/2016	0,0	6,3	210	SSO
	01/06/2016	1,6	8,20	140	SE	25/07/2016	0,0	7,7	360	N
	02/06/2016	0,0	11,90	140	SE	26/07/2016	0,0	11,1	130	SE
	03/06/2016	4,0	14,90	130	SE	27/07/2016	6,6	9,5	90	E
3	04/06/2016	2,4	16,20	80	E	28/07/2016	1,0	7,4	190	S
	05/06/2016	183,0	20,20	70	ENE	29/07/2016	81,7	13,3	120	ESE
	06/06/2016	6,8	11,40	80	E	30/07/2016	5,0	9,2	130	SE
	07/06/2016	0,0	6,30	220	SO	31/07/2016	0,8	7,6	50	NE
4	08/06/2016	0,4	9,90	290	ONO	01/08/2016	0,2	8,9	170	S
	09/06/2016	0,8	10,30	230	SO	02/08/2016	0,0	9,3	130	SE
	10/06/2016	0,0	8,40	180	S	03/08/2016	21,5	11,0	100	E
	11/06/2016	0,0	6,60	200	SSO	04/08/2016	0,2	10,0	300	ONO
5	12/06/2016	0,0	13,00	200	SSO	05/08/2016	14,6	8,0	250	OSO
	13/06/2016	0,8	19,60	130	SE	06/08/2016	1,4	13,3	200	SSO
	14/06/2016	4,8	19,30	120	ESE	07/08/2016	3,2	12,2	190	S
	15/06/2016	17,8	12,10	160	SSE	08/08/2016	0,0	8,9	180	S
6	16/06/2016	4,0	15,20	130	SE	09/08/2016	0,0	10,0	210	SSO
	17/06/2016	0,0	11,70	140	SE	10/08/2016	0,4	9,8	100	E
	18/06/2016	0,0	11,10	110	ESE	11/08/2016	0,0	9,8	130	SE
	19/06/2016	1,4	12,50	80	E	12/08/2016	0,0	8,7	70	ENE
7	20/06/2016	0,0	12,40	70	ENE	13/08/2016	0,0	6,3	220	SO
	21/06/2016	0,2	11,60	50	NE	14/08/2016	0,0	6,9	260	OSO
	22/06/2016	0,0	8,90	10	N	15/08/2016	8,5	14,6	160	SSE
	23/06/2016	0,0	8,20	340	NNO	16/08/2016	0,2	11,2	200	SSO
8	24/06/2016	0,0	11,70	270	O	17/08/2016	5,2	10,6	150	SSE
	25/06/2016	0,8	9,80	270	O	18/08/2016	5,6	13,3	100	E
	26/06/2016	5,0	8,30	190	S	19/08/2016	3,0	15,5	110	ESE
	27/06/2016	0,2	8,60	120	ESE	20/08/2016	0,4	14,4	140	SE

Prélèvement	GORO									
	Date	RR	FXI	DXI	Régime	Date	RR	FXI	DXI	Régime
9	28/06/2016	2,2	9,90	30	NNE	21/08/2016	0,0	11,5	80	E
	29/06/2016	0,2	9,20	250	OSO	22/08/2016	2,2	11,5	80	E
	30/06/2016	0,8	12,00	230	SO	23/08/2016	0,0	11,4	70	ENE
	01/07/2016	0,0	10,60	100	E	24/08/2016	0,0	11,6	30	NNE
10	02/07/2016	1,2	9,70	110	ESE	25/08/2016	0,0	9,9	10	N
	03/07/2016	0,0	9,40	180	S	26/08/2016	16,2	9,0	180	S
	04/07/2016	0,0	11,10	100	E	27/08/2016	35,7	14,6	340	NNO
	05/07/2016	0,6	12,40	110	ESE	28/08/2016	33,4	11,8	20	NNE
11	06/07/2016	0,0	6,90	210	SSO	29/08/2016	0,0	11,6	240	OSO
	07/07/2016	0,2	8,40	360	N	30/08/2016	0,4	11,5	160	SSE
	08/07/2016	0,4	9,70	250	OSO	31/08/2016	0,0	14,5	110	ESE
	09/07/2016	1,2	11,50	240	OSO	01/09/2016	0,0	13,4	110	ESE
12	10/07/2016	0,0	12,10	230	SO	02/09/2016	0,0	14,5	70	ENE
	11/07/2016	0,4	10,10	190	S	03/09/2016	0,0	13,9	70	ENE
	12/07/2016	0,2	10,50	120	ESE	04/09/2016	0,0	11,7	50	NE
	13/07/2016	0,0	9,30	110	ESE	05/09/2016	0,0	10,2	90	E

Valeurs journalières des paramètres météorologiques (cumul de précipitations et moyenne de vitesse et direction de vents maximales instantanées) collectées par la station météorologique « IORO ».

Prélèvement	IORO							
	Date	FXI	DXI	Régime	Date	FXI	DXI	Régime
1	27/05/2016	4,5	45	NE	20/07/2016	6,3	155	SSE
	28/05/2016	3,1	330	NNO	21/07/2016	6,0	134	SE
	29/05/2016	2,2	10	N	22/07/2016	3,5	85	E
	30/05/2016	4,1	191	S	23/07/2016	3,8	55	NE
2	31/05/2016	5,1	186	S	24/07/2016	2,1	278	O
	01/06/2016	5,3	149	SSE	25/07/2016	4,3	55	NE
	02/06/2016	7,6	140	SE	26/07/2016	3,4	63	ENE
	03/06/2016	9,2	137	SE	27/07/2016	4,7	77	ENE
3	04/06/2016	10,3	102	ESE	28/07/2016	3,0	237	OSO
	05/06/2016	10,5	84	E	29/07/2016	6,0	170	S
	06/06/2016	3,3	16	NNE	30/07/2016	1,8	100	E
	07/06/2016	2,7	281	O	31/07/2016	3,8	12	NNE
4	08/06/2016	4,0	297	ONO	01/08/2016	6,3	187	S
	09/06/2016	6,9	237	OSO	02/08/2016	6,6	136	SE
	10/06/2016	5,8	213	SSO	03/08/2016	7,1	95	E
	11/06/2016	4,7	192	SSO	04/08/2016	3,0	19	NNE
5	12/06/2016	9,7	175	S	05/08/2016	6,9	224	SO
	13/06/2016	11,2	153	SSE	06/08/2016	9,6	201	SSO
	14/06/2016	11,2	145	SE	07/08/2016	7,2	191	S
	15/06/2016	8,2	164	SSE	08/08/2016	5,2	188	S

Prélèvement	IORO							
	Date	FXI	DXI	Régime	Date	FXI	DXI	Régime
6	16/06/2016	9,7	158	SSE	09/08/2016	5,5	190	S
	17/06/2016	7,7	149	SSE	10/08/2016	6,0	165	SSE
	18/06/2016	6,6	135	SE	11/08/2016	6,1	145	SE
	19/06/2016	9,1	116	ESE	12/08/2016	5,2	83	E
7	20/06/2016	9,1	93	E	13/08/2016	3,0	279	O
	21/06/2016	6,6	56	ENE	14/08/2016	3,9	276	O
	22/06/2016	3,6	37	NE	15/08/2016	7,3	211	SSO
	23/06/2016	2,6	106	ESE	16/08/2016	8,7	196	SSO
8	24/06/2016	2,4	359	N	17/08/2016	6,9	203	SSO
	25/06/2016	3,3	297	ONO	18/08/2016	6,0	140	SE
	26/06/2016	4,4	220	SO	19/08/2016	9,2	149	SSE
	27/06/2016	4,3	129	SE	20/08/2016	8,3	140	SE
9	28/06/2016	5,6	55	NE	21/08/2016	6,6	114	ESE
	29/06/2016	5,9	289	ONO	22/08/2016	7,3	86	E
	30/06/2016	7,7	226	SO	23/08/2016	6,6	93	E
	01/07/2016	5,9	166	SSE	24/08/2016	5,5	67	ENE
10	02/07/2016	6,0	143	SE	25/08/2016	15,8	22	NNE
	03/07/2016	5,9	165	SSE	26/08/2016	4,3	185	S
	04/07/2016	7,7	153	SSE	27/08/2016	6,6	151	SSE
	05/07/2016	6,9	132	SE	28/08/2016	5,9	277	O
11	06/07/2016	2,1	274	O	29/08/2016	7,0	259	OSO
	07/07/2016	3,8	292	ONO	30/08/2016	8,3	174	S
	08/07/2016	6,7	283	ONO	31/08/2016	8,5	137	SE
	09/07/2016	6,3	293	ONO	01/09/2016	8,8	115	ESE
12	10/07/2016	8,5	260	O	02/09/2016	9,5	101	E
	11/07/2016	7,2	210	SSO	03/09/2016	10,2	80	E
	12/07/2016	6,5	149	SSE	04/09/2016	6,9	86	E
	13/07/2016	5,6	121	ESE	05/09/2016	4,0	101	E

## ANNEXE 3

### CARACTERISATION DES MES

Masse de MES collectés à St06-KW1, St15 et St60-NE par le piège séquentiel à particules.

St06-KW1			St15			St60-NE		
Période de collecte	Prélèvement	Masse Ech. Total (g)	Période de collecte	Prélèvement	Masse Ech. Total (g)	Période de collecte	Prélèvement	Masse Ech. Total (g)
20-23 juillet 2016	001	2,70	27-30 mai 2016	001	3,05	27-30 mai 2016	001	0,13
24-27 juillet 2016	002	0,67	31 mai-03 juin 2016	002	1,17	31 mai-03 juin 2016	002	0,15
28-31 juillet 2016	003	1,97	04-07 juin 2016	003	5,71	04-07 juin 2016	003	2,35
01-04 août 2016	004	3,20	08-11 juin 2016	004	1,01	08-11 juin 2016	004	2,19
05-08 août 2016	005	9,68	12-15 juin 2016	005	0,78	12-15 juin 2016	005	2,39
09-12 août 2016	006	4,52	16-19 juin 2016	006	0,53	16-19 juin 2016	006	4,13
13-16 août 2016	007	16,1	20-23 juin 2016	007	0,75	20-23 juin 2016	007	5,76
17-20 août 2016	008	12,3	24-27 juin 2016	008	0,96	24-27 juin 2016	008	3,92
21-24 août 2016	009	4,78	28 juin-01 juillet 2016	009	1,04	28 juin-01 juillet 2016	009	3,69
25-28 août 2016	010	4,13	02-05 juillet 2016	010	1,36	02-05 juillet 2016	010	5,52
29 août-01 septembre 2016	011	4,59	06-09 juillet 2016	011	1,54	06-09 juillet 2016	011	6,28
02-05 septembre 2016	012	4,29	10-13 juillet 2016	012	2,91	10-13 juillet 2016	012	4,61

Composition granulométrique des fractions fines de MES collectées à St06-KW1, St15 et St60-NE par le piège séquentiel à particules.

St06-KW1								
Période de collecte	Prélèvement	% Classe de taille (µm)						
		0,02 à 2,00	2,0 à 20	20 à 40	40 à 50	50 à 63	63,0 à 200	200,0 à 2000
05-08 août 2016	005	16	61	19	3	1	0	0
13-16 août 2016	007	19	65	13	2	1	1	1
17-20 août 2016	008	15	60	19	3	2	1	0
02-05 septembre 2016	012	10	53	23	5	4	4	0

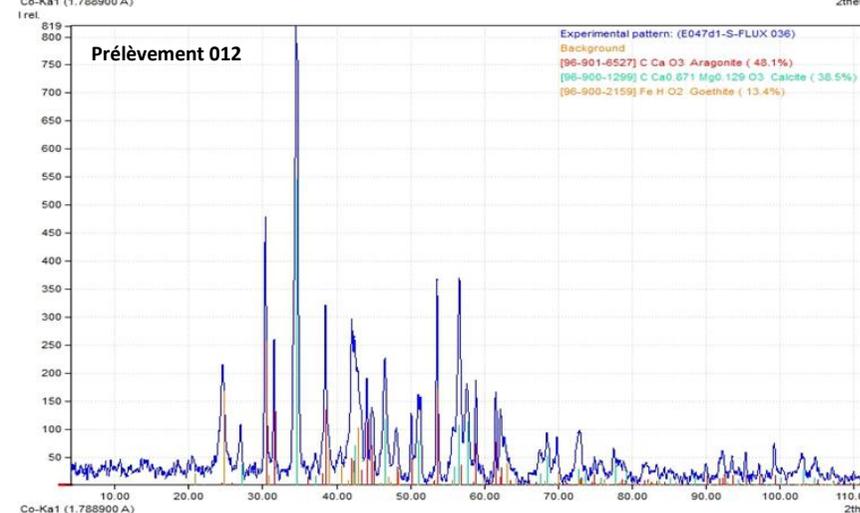
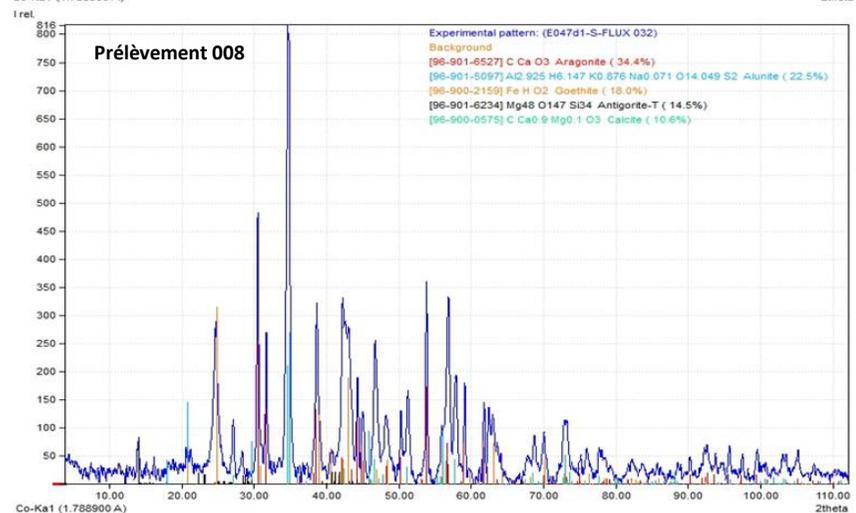
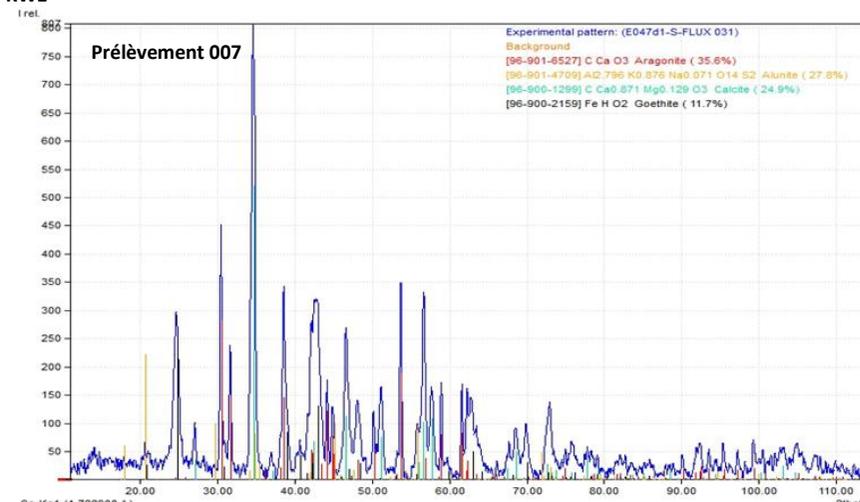
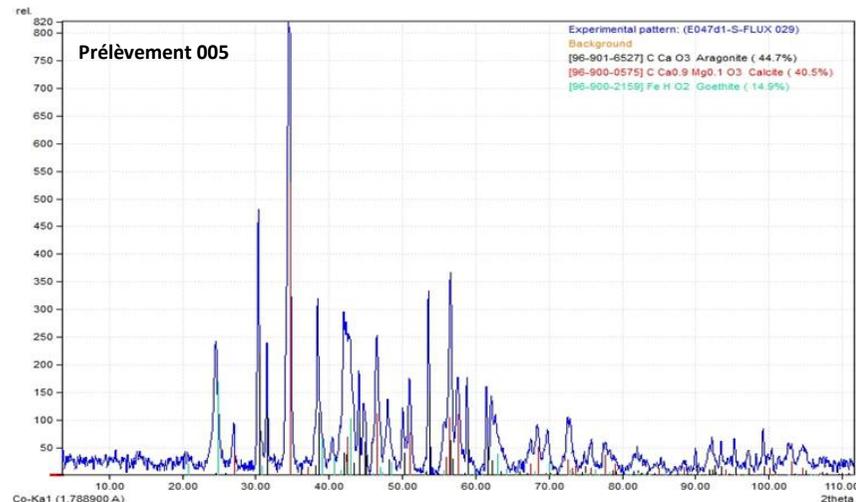
St15								
Période de collecte	Prélèvement	% Classe de taille (µm)						
		0,02 à 2,00	2,0 à 20	20 à 40	40 à 50	50 à 63	63,0 à 200	200,0 à 2000
27-30 mai 2016	001	8	37	26	10	9	11	0
08-11 juin 2016	004	8	47	27	7	6	6	0
24-27 juin 2016	008	9	49	29	7	5	2	0
10-13 juillet 2016	012	11	52	25	6	4	2	0

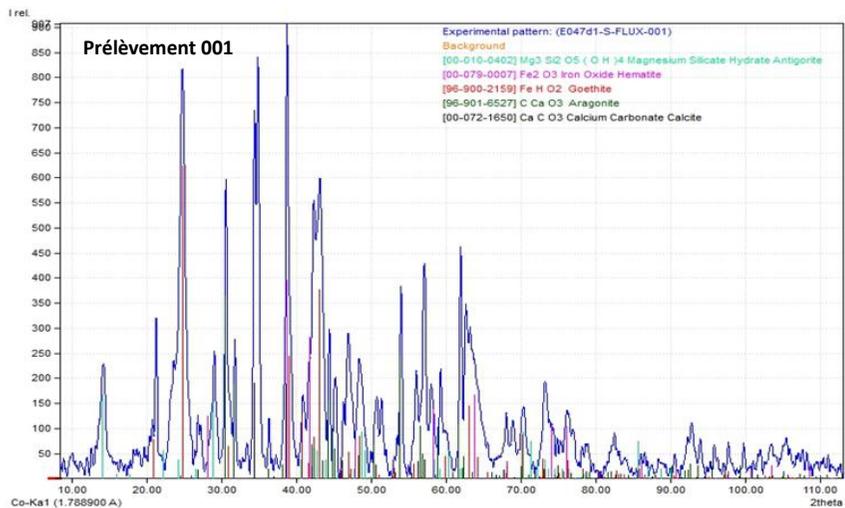
  

St60-NE								
Période de collecte	Prélèvement	% Classe de taille (µm)						
		0,02 à 2,00	2,0 à 20	20 à 40	40 à 50	50 à 63	63,0 à 200	200,0 à 2000
08-11 juin 2016	004	5	40	38	9	6	2	0
24-27 juin 2016	008	5	39	37	10	7	3	0
10-13 juillet 2016	012	6	40	34	9	6	5	0

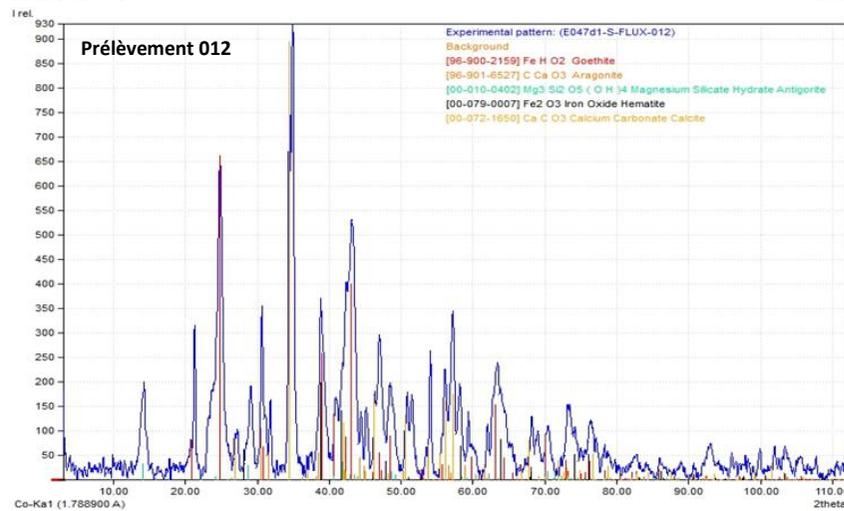
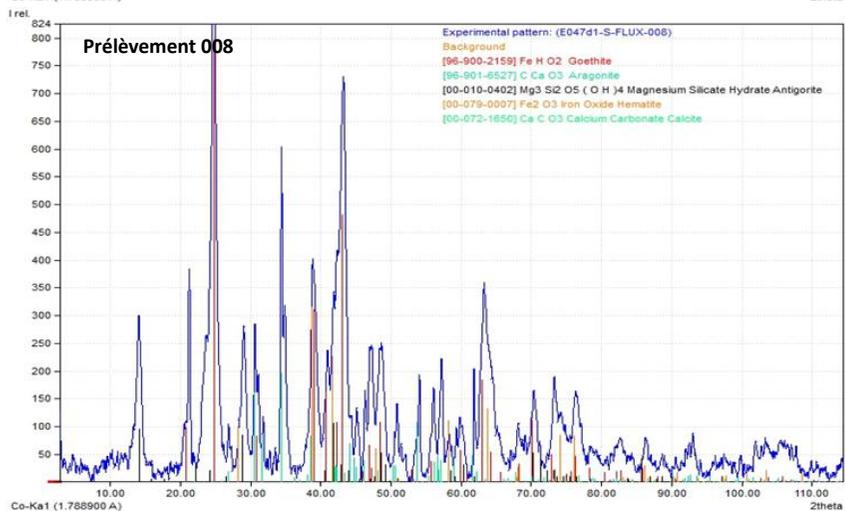
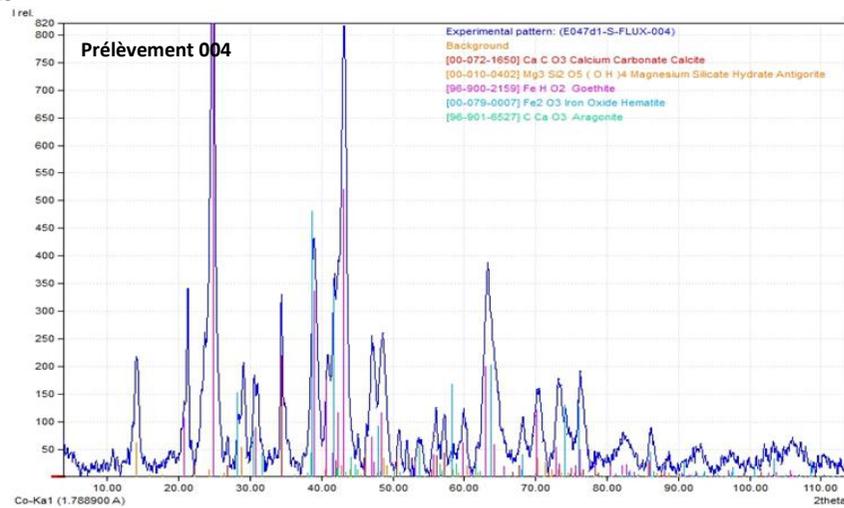
Composition minéralogique des fractions fines de MES collectées à St06-KW1, St15 et St60-NE par le piège séquentiel à particules.

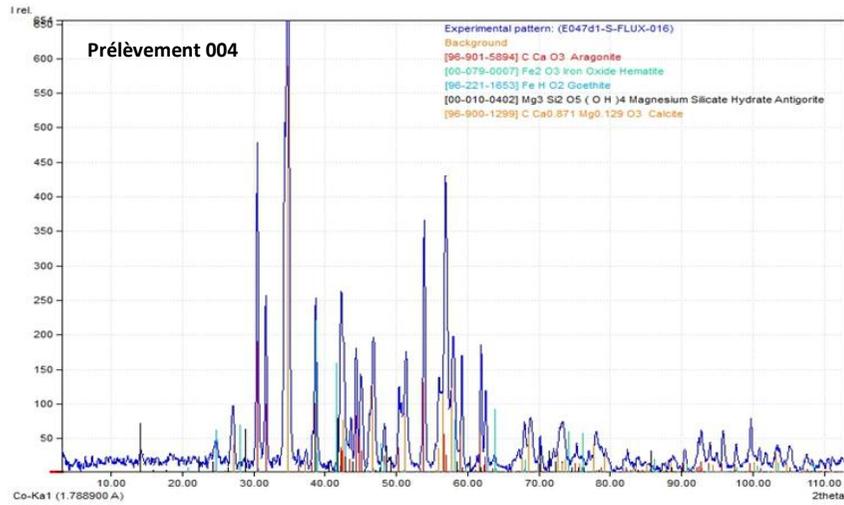
St06-KW1



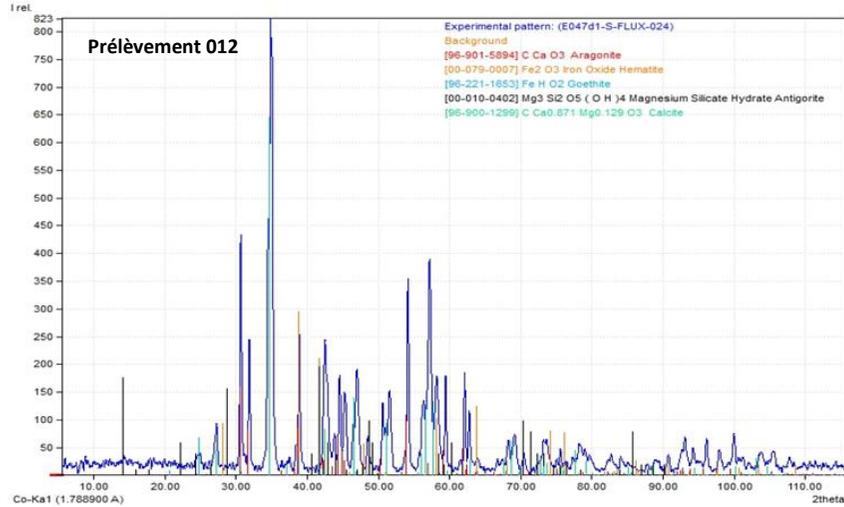
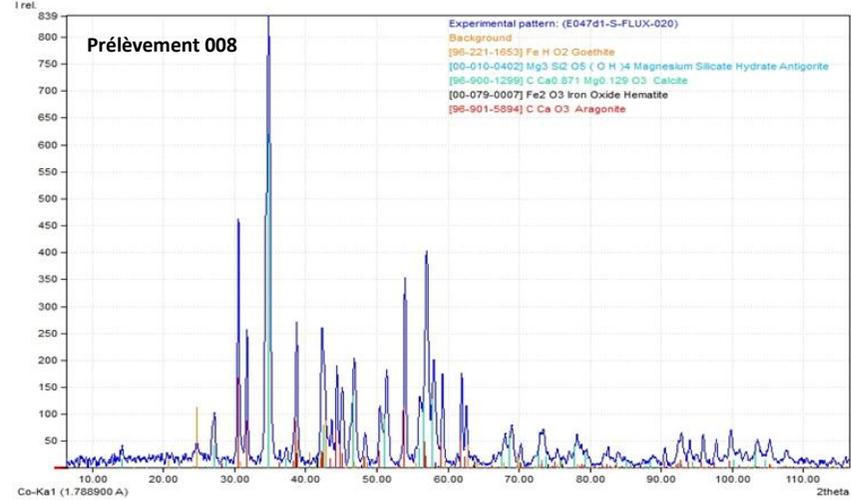


St15





St60-NE



Teneurs en carbonates des fractions fines de MES collectées à St06-KW1, St15 et St60-NE par le piège séquentiel à particules.

St06-KW1			St15			St60-NE		
Période de collecte	Prélèvement	% CO3 total	Période de collecte	Prélèvement	% CO3 total	Période de collecte	Prélèvement	% CO3 total
20-23 juillet 2016	001	66	27-30 mai 2016	001	30	27-30 mai 2016	001	ND
24-27 juillet 2016	002	71	31 mai-03 juin 2016	002	15	31 mai-03 juin 2016	002	ND
28-31 juillet 2016	003	65	04-07 juin 2016	003	10	04-07 juin 2016	003	81
01-04 août 2016	004	64	08-11 juin 2016	004	10	08-11 juin 2016	004	59
05-08 août 2016	005	57	12-15 juin 2016	005	11	12-15 juin 2016	005	72
09-12 août 2016	006	58	16-19 juin 2016	006	9	16-19 juin 2016	006	64
13-16 août 2016	007	48	20-23 juin 2016	007	16	20-23 juin 2016	007	74
17-20 août 2016	008	53	24-27 juin 2016	008	17	24-27 juin 2016	008	77
21-24 août 2016	009	55	28 juin-01 juillet 2016	009	23	28 juin-01 juillet 2016	009	81
25-28 août 2016	010	56	02-05 juillet 2016	010	26	02-05 juillet 2016	010	83
29 août-01 septembre 2016	011	62	06-09 juillet 2016	011	31	06-09 juillet 2016	011	81
02-05 septembre 2016	012	64	10-13 juillet 2016	012	31	10-13 juillet 2016	012	87

ND : valeur non déterminée par manque de matière pour la réalisation des analyses.

Observations au microscope optique de fraction de diamètre supérieur à 41 µm (grossissement x 3,5) de MES piégées à St06-KW1, St15 et St60-NE.



Présence de nombreuses particules carbonatées (tests d'organismes invertébrés marins plus ou moins fortement altérés) et de particules latéritiques de couleur brune.



Présence de nombreuses particules latéritiques de couleur rouge-brun avec la présence de quelques tests d'organismes marins (couleur blanche)



Présence de nombreux débris de tests de microorganismes marins ou de micro-coquillages dans un état d'altération faible.

## ANNEXE 4

### COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MES

Concentrations en métaux totaux et en calcium dans les fractions fines de MES collectées à St06-KW1 et St15 par le piège séquentiel à particules.

St06-KW1							
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
20-23 juillet 2016	001	243 235	91,0	2 675	126 595	815	1 910
24-27 juillet 2016	002	265 390	71,0	2 185	97 678	635	1 449
28-31 juillet 2016	003	239 391	86,0	2 573	111 512	778	1 733
01-04 août 2016	004	234 313	91,0	2 664	121 303	826	1 862
05-08 août 2016	005	207 707	121	3 474	150 120	1098	2 371
09-12 août 2016	006	211 904	109	3 073	138 145	978	2 199
13-16 août 2016	007	172 713	154	4 463	181 510	1401	2 917
17-20 août 2016	008	189 813	134	3 791	161 554	1190	2 583
21-24 août 2016	009	200 148	129	3 997	155 225	1130	2 509
25-28 août 2016	010	205 915	110	2 799	130 997	978	2 155
29 août-01 septembre 2016	011	226 573	107	2 687	132 268	963	2 104
02-05 septembre 2016	012	235 847	102	2 610	127 551	898	1 989

St15							
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
27-30 mai 2016	001	105 872	148	4 089	125 257	1 955	2 277
31 mai-03 juin 2016	002	48 149	172	4 978	42 996	2 071	2 647
04-07 juin 2016	003	20 659	239	6 817	38 863	2 434	3 773
08-11 juin 2016	004	22 253	244	7 251	164 721	2 486	3 936
12-15 juin 2016	005	30 446	236	6 852	274 813	2 166	3 695
16-19 juin 2016	006	22 077	242	6 933	276 704	2 207	3 711
20-23 juin 2016	007	50 141	206	5 916	225 733	1 915	3 259
24-27 juin 2016	008	52 084	193	5 923	207 084	1 736	3 161
28 juin-01 juillet 2016	009	78 142	169	4 922	184 148	1 530	2 734
02-05 juillet 2016	010	87 142	171	5 236	192 850	1 783	2 894
06-09 juillet 2016	011	105 564	160	4 710	168 074	1 870	2 641
10-13 juillet 2016	012	105 101	154	4 553	149 276	1 614	2 484

**Concentrations en métaux totaux, calcium et en soufre dans les fractions fines de MES collectées à St60-NE par le piège séquentiel à particules.**

St60-NE								
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)						
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
27-30 mai 2016	001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
31 mai-03 juin 2016	002	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
04-07 juin 2016	003	301 866	16,0	341	17 842	183	271	2 785
08-11 juin 2016	004	214 970	22,0	411	21 159	216	328	2 562
12-15 juin 2016	005	266 859	27,0	435	21 829	235	352	2 655
16-19 juin 2016	006	232 254	32,0	473	24 586	271	423	2 714
20-23 juin 2016	007	269 388	32,0	503	25 602	276	425	2 768
24-27 juin 2016	008	283 780	30,0	484	25 184	276	408	2 813
28 juin-01 juillet 2016	009	298 027	29,0	494	25 738	302	415	2 789
02-05 juillet 2016	010	308 830	26,0	444	23 393	273	372	2 768
06-09 juillet 2016	011	301 243	23,0	406	21 045	240	331	2 848
10-13 juillet 2016	012	322 434	22,0	403	20 972	233	327	2 757

ND : valeur non déterminée par manque de matière pour la réalisation des analyses.

## ANNEXE 5

### VALEURS DE DENSITE DE FLUX DE MES ET DE FLUX DES ELEMENTS PARTICULAIRES

Flux de MES total et flux de métaux et de calcium particulaires dans les MES à St06-KW1, St15 et St60-NE.

St06-KW1								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Flux élémentaire (mg ps/m <sup>2</sup> /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
20-23 juillet 2016	001	13	3 279	1,23	36,1	1 707	11,0	25,7
24-27 juillet 2016	002	3	885	0,24	7,29	326	2,12	4,83
28-31 juillet 2016	003	10	2 360	0,85	25,4	1 100	7,67	17,1
01-04 août 2016	004	16	3 748	1,46	42,6	1 940	13,2	29,8
05-08 août 2016	005	48	10 048	5,85	168	7 262	53,1	115
09-12 août 2016	006	23	4 791	2,46	69,5	3 123	22,1	49,7
13-16 août 2016	007	81	13 941	12,4	360	14 651	113	235
17-20 août 2016	008	61	11 651	8,22	233	9 916	73,0	159
21-24 août 2016	009	24	4 786	3,08	95,6	3 711	27,0	60,0
25-28 août 2016	010	21	4 247	2,27	57,7	2 702	20,2	44,4
29 août-01 septembre 2016	011	23	5 195	2,45	61,6	3 033	22,1	48,2
02-05 septembre 2016	012	21	5 061	2,19	56,0	2 737	19,3	42,7

St15								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Flux élémentaire (mg ps/m <sup>2</sup> /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
27-30 mai 2016	001	15	1 615	2,26	62,4	1 911	29,8	34,7
31 mai-03 juin 2016	002	6	281	1,00	29,0	251	12,1	15,4
04-07 juin 2016	003	29	590	6,82	195	1 109	69,5	108
08-11 juin 2016	004	5	112	1,23	36,6	831	12,5	19,9
12-15 juin 2016	005	4	119	0,92	26,7	1 070	8,44	14,4
16-19 juin 2016	006	3	58,7	0,64	18,4	736	5,87	9,87
20-23 juin 2016	007	4	188	0,77	22,2	848	7,19	12,2
24-27 juin 2016	008	5	250	0,93	28,5	995	8,34	15,2
28 juin-01 juillet 2016	009	5	408	0,88	25,7	962	7,99	14,3
02-05 juillet 2016	010	7	594	1,17	35,7	1 315	12,2	19,7
06-09 juillet 2016	011	8	814	1,23	36,3	1 295	14,4	20,4
10-13 juillet 2016	012	15	1 527	2,24	66,1	2 169	23,4	36,1

St60-NE								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m <sup>2</sup> /j)	Flux élémentaire (mg ps/m <sup>2</sup> /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
27-30 mai 2016	001	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
31 mai-03 juin 2016	002	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
04-07 juin 2016	003	12	3 549	0,19	4,01	210	2,15	3,19
08-11 juin 2016	004	11	2 351	0,24	4,49	231	2,36	3,59
12-15 juin 2016	005	12	3 182	0,32	5,19	260	2,80	4,20
16-19 juin 2016	006	21	4 791	0,66	9,76	507	5,59	8,73
20-23 juin 2016	007	29	7 752	0,92	14,5	737	7,94	12,2
24-27 juin 2016	008	20	5 557	0,59	9,48	493	5,40	7,99
28 juin-01 juillet 2016	009	18	5 497	0,54	9,11	475	5,57	7,65
02-05 juillet 2016	010	28	8 518	0,72	12,2	645	7,53	10,3
06-09 juillet 2016	011	31	9 453	0,72	12,7	660	7,53	10,4
10-13 juillet 2016	012	23	7 424	0,51	9,28	483	5,36	7,53

ND : valeur non déterminée par manque de matière pour la réalisation des analyses.