



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

CAMPAGNE 1^{ERE} SEMESTRE 2019



« Chimie de l'environnement et
Modélisation hydrodynamique »

Rapport semestriel
Mars à Juillet 2019

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

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL-LEA

Proposition technique et commerciale AEL 138-VI-17-P

**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^{ere} semestre 2019

Période de mars à juillet 2019

Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM.

	Ref AEL	Ref Client	
Identification	138-VI-17-P	L15599/0002	
Titre complet	Suivi des densités de flux verticaux des particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1 ^{er} semestre 2019. Période de mars à juillet 2019.		
Auteurs	Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM.		
Résumé	<p>Dans le but de se conformer au plan de suivi règlementaire du milieu marin, il a été 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 1^{er} semestre 2019 (mars-juillet) effectuées dans la zone d'influence 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, caractérisée par une pluviométrie modérée et quelques épisodes venteux, conforte partiellement les observations consignées dans les rapports précédents établissant une relation entre les conditions météorologiques et les densités des flux verticaux. En effet, les paramètres influant les apports sont : (1) les précipitations pour la St15 <i>via</i> l'érosion et le transport des sols par le Creek de la Rade Nord et la dispersion du panache dans la Baie du Prony conditionnée par les vents ; et (2) 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. Pour la St60-NE, comme à l'accoutumé aucune corrélation pertinente ne se dégage ; les panaches latéritiques, beaucoup plus dilués à cette station, seraient conditionnés par un ensemble de mécanismes qu'il n'est pas encore possible d'explicitier.</p> <p>Depuis 2007, les ratios Ca/Fe en St60-NE et St06-KW1 enregistrés mettent en évidence un enrichissement du Canal de la Havannah et de la Baie Kwé en matières latéritiques, ce qui continue à s'exercer lors de cette campagne. Pour la St15, ceux-ci restent relativement invariables. Pour cette campagne, les concentrations en métaux latéritiques sont globalement supérieures à celles recueillies lors de l'état de référence. En ce qui concerne les concentrations de Ca et S, seul l'enrichissement du S est observé à St60-NE. Toutefois, l'hypothèse d'une potentielle influence de l'effluent sur la formation de gypse reste non avérée ; selon les analyses minéralogiques les MES piégées à cette station ne contiendraient que < 1% du gypse.</p>		
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Kumar-Roiné S.	SKR	22/08/2019
Vérificateur 1	Fernandez JM.	JMFA	23/08/2019
Vérificateur 2	Pousse C.	CP	27/08/2019
Approbateur	Fernandez JM.	JMFA	28/08/2019
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V1.0	Rapport final		28/08/2019
COPIE – DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Céline Casalis	Vale-NC, Département Environnement		

Ce rapport est cité comme suit : Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM. 2019. 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^{er} semestre 2019. Période de mars à juillet 2019. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L15599/0002, 65p.

TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION	7
A.	CONTEXTE	7
B.	OBJECTIFS.....	7
II.	METHODOLOGIE	9
A.	SITE D'ÉTUDE	9
B.	ECHANTILLONNAGE	10
C.	CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES	12
III.	RESULTATS.....	13
A.	PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES	13
B.	CARACTÉRISATION DES MATIÈRES EN SUSPENSION.....	16
C.	COMPOSITION GÉOCHIMIQUE DES MATIÈRES EN SUSPENSION.....	26
IV.	INTERPRETATION	36
A.	INFLUENCE DES FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES.....	36
B.	CALCUL DES FLUX DES MATIÈRES.....	43
V.	SYNTHESE	47

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

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 (Fernandez *et al.*, 2012a) 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 (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 géochimique associée ont montré que seule une formation quantitativement négligeable de précipités carbonatés devrait se produire directement au contact de l'effluent avec l'eau de mer (Bodeï 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 2019** et comparés aux campagnes précédentes des mouillages semestriels réalisées entre 2011-2018 et celles de l'état de référence en 2006/2007 (Kumar-Roiné *et al.*, 2018a ; 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'ÉTUDE

Les sites instrumentés sont les suivants (Tableau 1 et Figure 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 depuis 2012 (Fernandez *et al.*, 2012b).
- 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 depuis 2011 (Fernandez *et al.*, 2012a).
- 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 depuis 2014.

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

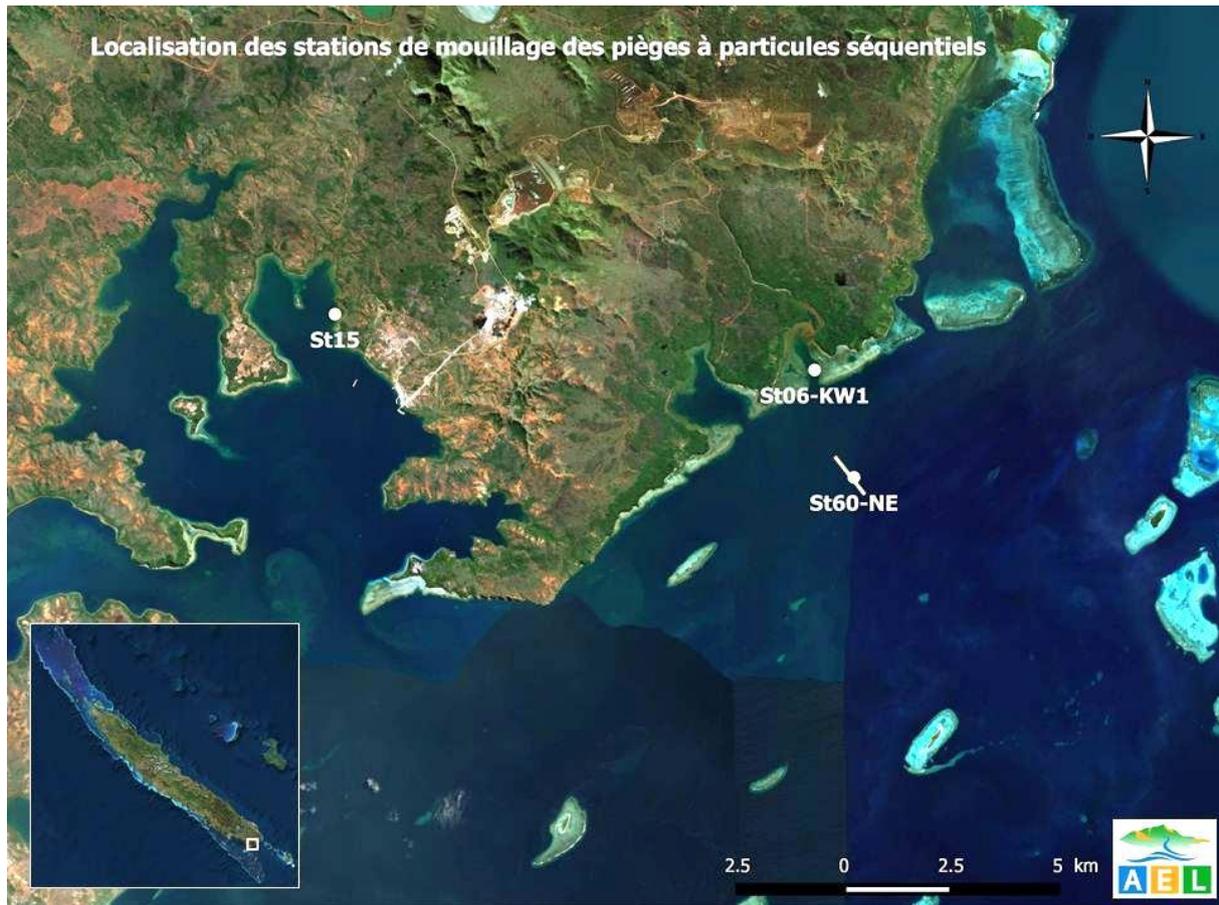


Figure 1 : Localisation géographique des stations de prélèvement du suivi des flux verticaux de particules dans la zone d'influence de l'usine de Vale-NC (le trait blanc représente le diffuseur).

B. ECHANTILLONNAGE

Les opérations de terrain ont été réalisées à bord du Slavko (Casy Express) au cours de 3 sorties. La pose et la récupération des lignes de mouillage équipées chacune d'un piège à particules séquentiel ont été effectuées, respectivement, le 14 mars 2019 et 07 mai 2019 aux stations St06-KW1 et St60-NE. Pour la station St15, elles ont, respectivement, été effectuées le 16 mai 2019 et 09 juillet 2019. Les 3 pièges ont été immergés avec une simple ligne de mouillage lestée.

Note : Initialement, les pièges ont été immergés aux 3 stations en même période, soit le 05 (St15) et 14 mars 2019 (St06-KW1 et St60-NE). Suite à une anomalie technique liée au logiciel de programmation, le piège immergé en St15 n'a pas fonctionné. Par conséquent, un piège a été immergé le 16 mai 2019.

Rappel : Les pièges à particules de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) sont dotés d'une section efficace de 0,050 m², équipés de carrousels de 12 godets pour permettre la collecte d'une série temporelle de particules sédimentées. L'orifice du dispositif de collecte (piège) a été placé à 3 mètres au-dessus du fond afin de minimiser la collecte des particules potentiellement remises en suspension de la couverture sédimentaire. Par ailleurs, 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 des marées de morte-eau (Figure 2). Les suivis sont réalisés par des fonds supérieurs à 15 m afin de s'affranchir des phénomènes mécaniques comme la resuspension 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 (Derech et al., 2008).

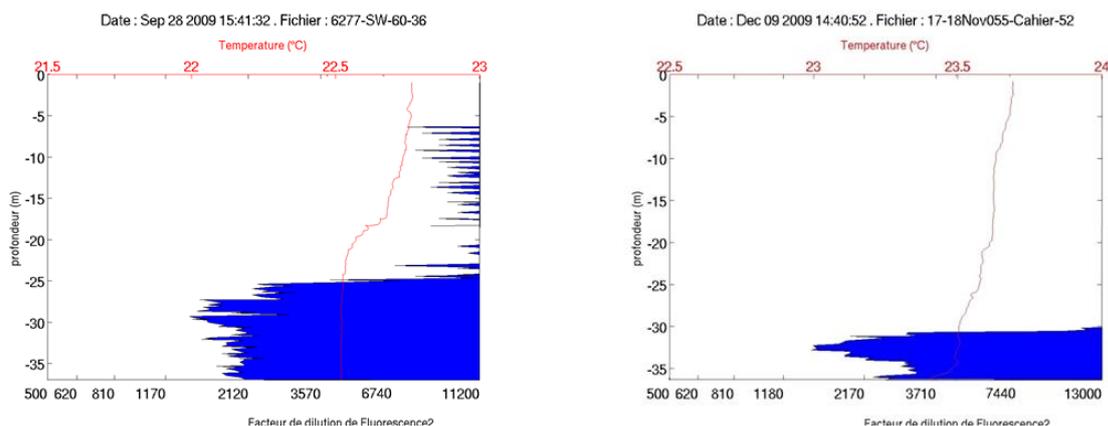


Figure 2 : Empreinte type de l'effluent par marquage à la rhodamine-WT pour des conditions courantologiques de marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

Pour les stations St06-KW1 et St60-NE, la collecte des particules a été programmée pour débuter le 15 mars 2019 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 01 mai à 24h00 ; soit 48 jours après. Pour la station St15, la collecte des particules a été programmée pour débuter le 17 mai 2019 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 03 juillet à 24h00.

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

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

Période de collecte	St06-KW1	St60-NE	Période de collecte	St15
	Prélèvement	Prélèvement		Prélèvement
15 Mars - 19 Mars	001	001	17 Mai - 21 Mai	001
19 Mars - 23 Mars	002	002	21 Mai - 25 Mai	002
23 Mars - 27 Mars	003	003	25 Mai - 29 Mai	003
27 Mars - 31 Mars	004	004	29 Mai - 02 Juin	004
31 Mars - 04 Avril	005	005	02 Juin - 06 Juin	005
04 Avril - 08 Avril	006	006	06 Juin - 10 Juin	006
08 Avril - 12 Avril	007	007	10 Juin - 14 Juin	007
12 Avril - 16 Avril	008	008	14 Juin - 18 Juin	008
16 Avril - 20 Avril	009	009	18 Juin - 22 Juin	009
20 Avril - 24 Avril	010	010	22 Juin - 26 Juin	010
24 Avril - 28 Avril	011	011	26 Juin - 30 Juin	011
28 Avril - 01 Mai	012	012	30 Juin - 03 Jul.	012

De 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.

C. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant la période d'immersion des pièges (15 mars au 01 mai 2019 et 17 mai au 03 juillet) 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 »), enregistrées par la station météorologique de l'usine pilote Vale-NC (référence n° 98817104 ; Goro Usine), ont été exploitées pour l'interprétation des analyses.

Note : 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 IORO de IRD/AEL implantée sur la balise du récif loro dans le Canal de la Havannah (référence n° 658 ; loro) sont normalement exploitées pour l'interprétation des résultats. Toutefois, pour cette campagne, un dysfonctionnement, inhérent à la mesure de la force et de la direction des vents a rendu inopérante la station pendant la période d'immersion des pièges. Les données recueillies étant visiblement erronées, elles ne nous permettent pas leur utilisation pour les relations de cause à effet.

III. RESULTATS

A. PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

Les valeurs des paramètres météorologiques données par la station météorologique (GORO) sont regroupées dans l'Annexe 2.

Note : de 24 avril à 01 mai 2019 suite à une panne à la station GORO, les relevés de vent et de pluviométrie n'ont pas pu être effectués sur la dernière dizaine de jours.

1. Précipitations atmosphériques

St06-KW1 et St60-NE

La période du 15 mars au 01 mai 2019 compte 33 jours de pluies cumulant à 389,3 mm. La pluviométrie journalière maximale de 150 mm a été relevée le 21 avril 2019. Cette période a donc été marquée par une pluviométrie relativement forte (Figure 3).

Note : les données de la pluviométrie relevée pour la présente campagne à la station météorologique GORO sont partielles ; aucun relevé n'est fourni du 24 au 27 avril et le 01 mai.

Du point de vue historique, les précipitations cumulées lors de cette campagne à la station St06-KW1 sont environ 7 fois plus importantes par rapport à celles relevées lors de la campagne d'état de référence (54,5 mm ; 2006), tandis qu'à la station St60-NE elles demeurent comparables (300,6 mm ; 2007) (Tableau 3).

St15

La période du 17 mai au 03 juillet 2019 compte 25 jours de pluie cumulant à 149,1 mm. La pluviométrie journalière maximale ne dépasse pas 15 mm sauf le 27 juin 2019 où 45,4 mm a été relevée. Cette période a donc été marquée par une pluviométrie faible (Figure 3).

D'un point de vue historique, les précipitations cumulées lors de cette campagne à la station St15 sont environ 3 fois plus importantes par rapport à celles relevées lors de la campagne d'état de référence (54,4 mm ; 2006) (Tableau 3).

2. Vitesse et direction du vent

St06-KW1 et St60-NE

Durant la période du 15 mars au 01 mai 2019, les directions du vent mesurées à la station météorologique de GORO (usine) sont principalement de secteur E à S. Toutefois, quelques rotations dans le secteur NE et dans le

secteur SO sont observées, respectivement, au début (du 15 mars au 25 mars ; prélèvements 001, 002 et 003) et à mi-parcours (04 avril au 04 avril ; prélèvement 006) de la période de collecte (Figure 3).

Quant à l'intensité des vents mesurée, la moyenne a été de $12,4 \pm 3,2$ m/s. Il est à noter que les vents soutenus avoisinant 15 m/s et plus sont mesurés sur plusieurs jours consécutifs (13-21 avril ; prélèvements 008 à 010) (Figure 3).

Note : les données des régimes de vents relevés pour la présente campagne à la station météorologique GORO sont partielles ; aucun relevé n'est fourni à partir du 24 avril

Pour l'ensemble de la période de mouillage, la vitesse moyenne des vents enregistrée par la station GORO est proche de celles des précédentes campagnes, exception faite pour les campagnes en 2014, dont les valeurs mesurées ne dépassent pas les 10 m/s (Tableau 3).

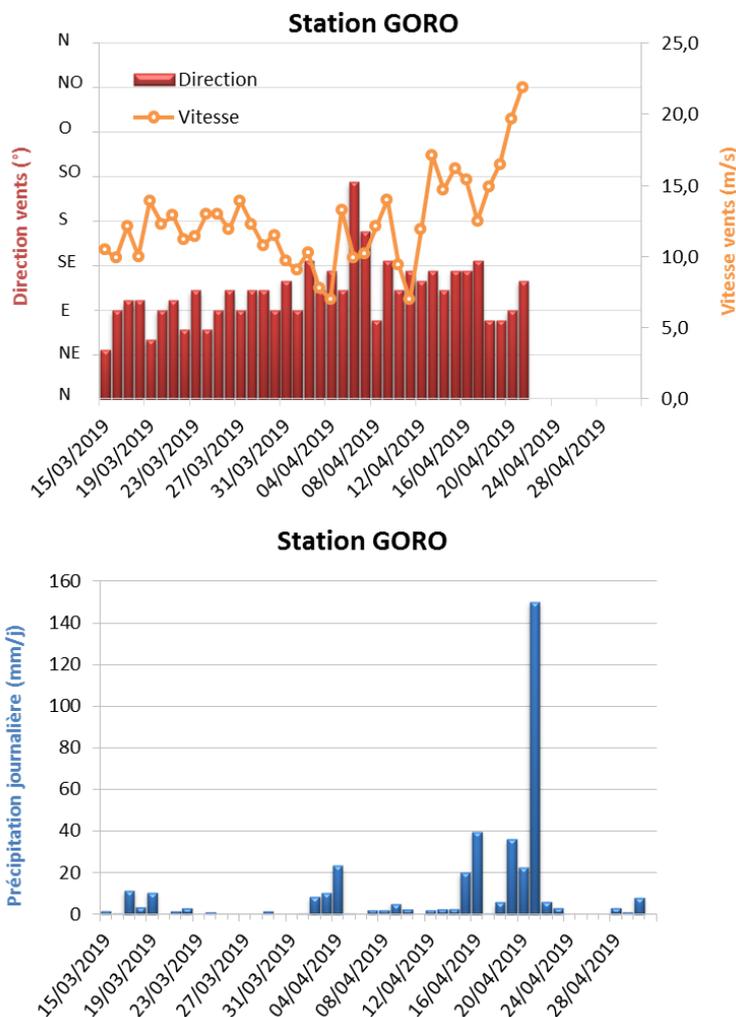


Figure 3 : Cumul journalier de précipitations et évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 15 mars au 01 mai 2019.

St15

Durant la période du 17 mai au 03 juillet 2019, les directions de vents mesurées à la station météorologique de GORO (usine) sont assez variables. Ils restent principalement de secteur E à S au début (du 17 mai au 27 mai ;

prélèvements 001, 002 et 003), puis plusieurs séries de rotations s'installent où les vents passent du secteur S-E au N-O (Figure 3).

Quant à l'intensité des vents mesurée, la moyenne a été de $10,2 \pm 3,2$ m/s. Il est à noter que les vents soutenus avoisinant 15 m/s et plus sont mesurés au début (17-24 mai ; prélèvements 001 au 002) et vers la fin (26-30 juin-; prélèvement 011) de la période de collecte (Figure 3).

Pour l'ensemble de la période de mouillage, la vitesse moyenne des vents enregistrée par la station GORO est proche de celles des précédentes campagnes, exception faite pour les campagnes en 2014 dont les valeurs mesurées ne dépassent pas les 10 m/s (Tableau 3).

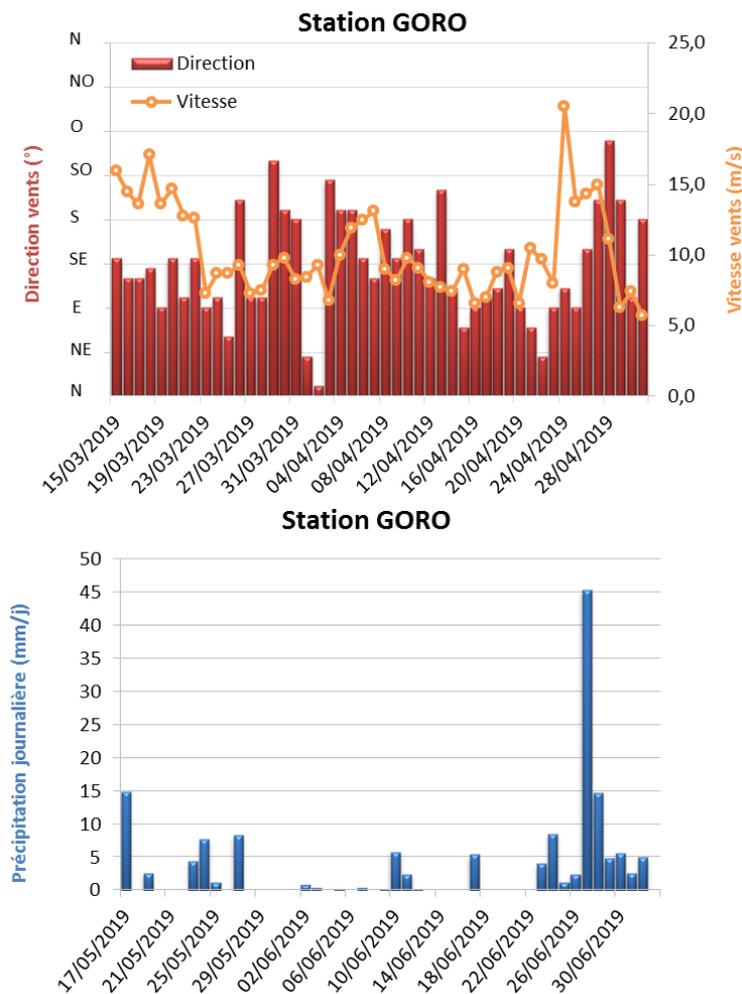


Figure 4 : Cumul journalier de précipitations et évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 17 mai au 03 juillet 2019.

Tableau 3 : Compilation des données météorologiques lors des différentes campagnes d'immersion de pièges séquentiels aux stations St06-KW1, St15 et St60-NE.

Campagne	Semestre	Campagne	St06-KW1	St15	St60-NE	Station GORO		Station IORO
						Précipitation total (mm)*	Vitesse vents moyens (m/s)*	
2006	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	Oct. - Nov. 2006	x	x	-	54,4	ND	ND
2007	1	Févr. - Mars 2007	-	-	x	300,6	ND	ND
	2	Mars - Avr. 2007	x	x	-	272,6	ND	ND
2011	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	Juil. - Août 2011	x	-	-	273,7	11,3 ± 3,2	ND
2012	1	Janv. - Mars 2012	x	-	x	370,1	12,3 ± 2,7	IC
	2	Sept. - Oct. 2012	x	-	x	278,5	12,0 ± 2,4	ND
2013	1	Janv. - Févr. 2013	x	-	x	181,2	12,0 ± 2,1	ND
	2	Juil. - Août 2013	x	-	x	467,0	11,3 ± 3,6	ND
2014	1	Janv. - Mars 2014	x	x	PP	920,2	9,3 ± 4,0	6,6 ± 2,9
	2	Avr. - Juin 2014	-	-	x	260,9	8,3 ± 3,5	6,9 ± 2,5
2015	1	Sept. - Oct. 2014	x	x	x	199,6	7,3 ± 2,9	5,9 ± 1,8
	2	Janv. - Mars 2015	x	x	x	242,6	12,0 ± 3,7	ND
2016	1	Juil. - Sept. 2015	PP	x	x	148,9	11,6 ± 2,6	ND
	2	Oct. - Nov. 2015	x	-	-	96,0	12,4 ± 3,1	ND
2017	1	Mai - Juil. 2016	PP	x	x	241,4	10,9 ± 3,1	6,2 ± 2,5
	2	Juil. - Sept. 2016	x	-	-	247,4	10,8 ± 2,4	6,2 ± 2,5
2018	1	Oct. - Nov. 2016	x	x	x	266,8	11,3 ± 2,5	5,9 ± 2,1
	2	Avr. - Mai 2017	x	x	x	443,2	12,5 ± 4,2	7,0 ± 3,6
2019	1	Sept. - Nov. 2017	x	x	x	58,4	11,0 ± 2,1	9,7 ± 13,1 (?)
	2	Mars - Avr. 2018	x	x	x	631,3	13,6 ± 3,3	ND
2019	1	Mai - Juil. 2018	x	x	x	105,2	11,1 ± 3,4 (IC)	ND
	1	Mars - Mai 2019	x	PP	x	389,3	12,4 ± 3,2 (IC)	ND
	1	Mai - Juil. 2019	-	x	-	149,1	10,2 ± 3,2	ND

* données de précipitations et vents couvrant uniquement les périodes de programmation des pièges (de la date d'ouverture à la date de fermeture des godets) ; x : station prélevée ; - : pas de campagne ou campagne en cours ; PP : piège perdu ou défaillant ; ND : données météorologiques non disponibles suite à un dysfonctionnement technique ; IC : collecte des données incomplète suite à un dysfonctionnement technique.

B. CARACTÉRISATION DES MATIÈRES EN SUSPENSION

Les résultats concernant les masses de matière en suspension (MES) collectées par les pièges séquentiels, la granulométrie des populations de grains, la composition minéralogique et les teneurs en carbonates sont regroupés dans l'Annexe 3.

Note : la séparation physique des populations de particules est réalisée avec un tamis dont la maille est de 41 µm. La Granulométrie Laser fournit des classes granulométriques dont les limites sont arrondies, l'une d'entre-elles est égale à 40 µm.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

Masses collectées

Avec une moyenne de $10,3 \pm 5,1$ g, les masses de MES collectées se distribuent entre 3,84 g (prélèvement 004) et 19,2 g (prélèvement 010). Entre ces extrêmes, les quantités de MES piégées s'accroissent de manière quasi-constante. Pour les autres prélèvements, les masses de MES collectées n'évoluent que peu (Figure 5).

Les pourcentages de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) quant à eux ne varient que peu. Ainsi, avec une moyenne de 81 ± 3 %, les MES piégées en St06-KW1 sont très majoritairement composées par de la fraction fine (Figure 6).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, celle de mars-mai 2019 se singularise avec le pourcentage moyen de fraction fine parmi les plus forts (Tableau 4).

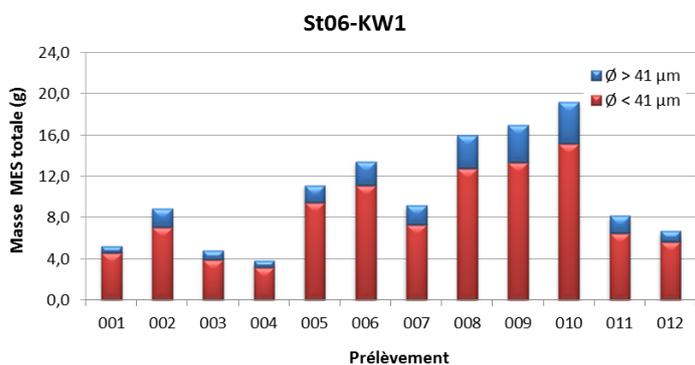


Figure 5 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

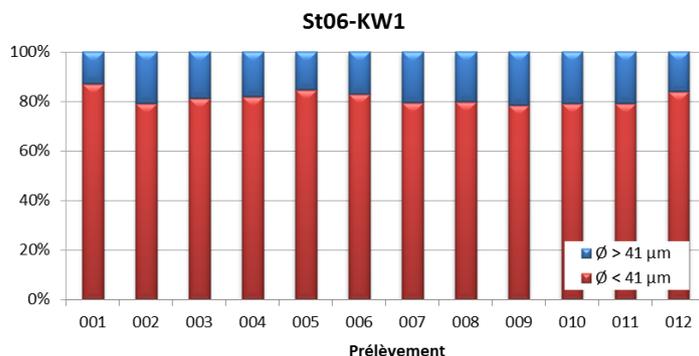


Figure 6 : Pourcentage massique en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Tableau 4 : Compilation des données moyennes \pm écart-types de la MES totale, des pourcentages massiques en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et des teneurs en carbonates dans la fraction fine lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.

St06-KW1							
Campagne	MES totale (g)	% $\varnothing < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	Campagne	MES totale (g)	% $\varnothing < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)
Oct. - Nov. 2006	1,46 \pm 0,74	ND	74 \pm 2	Janv. - Mars 2015	13,6 \pm 7,2	79 \pm 4	73 \pm 3
Mars - Avr. 2007	4,61 \pm 4,47	ND	76 \pm 3	Oct. - Nov. 2015	7,77 \pm 6,10	68 \pm 6	47 \pm 3
Juil. - Août 2011	5,07 \pm 4,86	ND	69 \pm 4	Juil. - Sept. 2016	5,74 \pm 4,58	80 \pm 2	60 \pm 6
Janv. - Mars 2012	7,89 \pm 6,64	75 \pm 3	84 \pm 5	Oct. - Nov. 2016	3,69 \pm 2,78	79 \pm 4	70 \pm 5
Sept. - Oct. 2012	5,28 \pm 2,62	70 \pm 4	67 \pm 3	Avr. - Mai 2017	9,06 \pm 8,06	75 \pm 3	71 \pm 4
Janv. - Févr. 2013	9,29 \pm 5,71	77 \pm 5	67 \pm 8	Sept. - Nov. 2017	4,08 \pm 4,61	83 \pm 2	71 \pm 6
Juil. - Août 2013	11,6 \pm 17,6	74 \pm 4	46 \pm 13	Mars - Avr. 2018	19,5 \pm 27,3	68 \pm 6	62 \pm 5
Janv. - Mars 2014	12,1 \pm 6,8	82 \pm 4	84 \pm 3	Mai - Juil. 2018	6,01 \pm 4,57	84 \pm 2	68 \pm 3
Sept - Oct. 2014	2,37 \pm 1,68	84 \pm 2	65 \pm 4	Mars - Mai 2019	10,3 \pm 5,1	81 \pm 3	58 \pm 2

ND : valeur non déterminée.

Compositions granulométriques

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St06-KW1 est composée à la fois de particules dont le mode se situe dans la classe 2,0-20 μm , à savoir, les silts fins (moyenne de $46 \pm 6 \%$ du volume total), et les silts moyens (20-40 μm) ($35 \pm 1 \%$ du volume total). La distribution des populations granulométriques montre une évolution dans le temps ; les particules grossières ($\varnothing > 40 \mu\text{m}$) augmentent dans le prélèvement 008 au détriment des particules fines ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$; Figure 7).

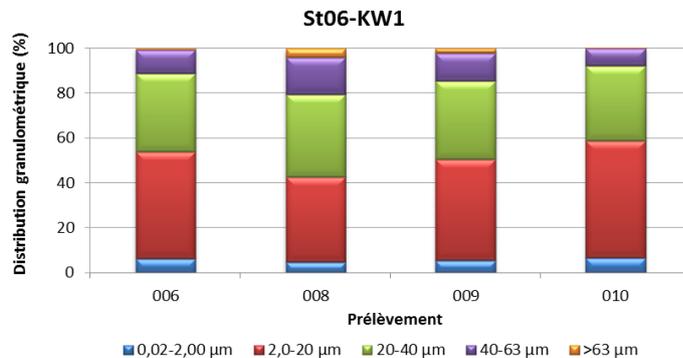


Figure 7 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Remarque : la détection de particules de $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ dans les échantillons tamisés à 41 μm peut être le résultat d'un artefact lié au mode de mesure/calcul de la Granulométrie Laser qui assimile à une sphère équivalente des particules de formes allongées (paillettes) qui peuvent passer à travers la maille au moment du tamisage.

Pour l'ensemble des campagnes conduites à St06-KW1, parmi les 5 classes granulométriques étudiées, le mode principal demeure la classe 2,0-20 μm (silts fins). Toutefois, depuis octobre-novembre 2016, on note un accroissement de la classe 20-40 μm (silts moyens), les proportions devenant quasi-équivalentes pour ces deux classes. Globalement, l'on constate qu'entre les campagnes de juillet-août 2011 et octobre-novembre 2016, le pourcentage en particules $\varnothing < 20 \mu\text{m}$ a été en augmentation, jusqu'à doubler lors de certaines campagnes (par exemple, en 2014), au détriment des particules de taille $\varnothing > 40 \mu\text{m}$ (Tableau 5). Depuis, le pourcentage moyen est revenu proche des valeurs de l'Etat de Référence. En revanche, la proportion des silts moyens (20-40 μm) a progressé au détriment de la fraction $\varnothing > 63 \mu\text{m}$.

Compositions minéralogiques

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES collectées en St06-KW1 est majoritairement composée de minéraux d'origine marine, avec notamment la présence prépondérante des carbonates (Calcite et Aragonite). La Calcite et l'Aragonite ont été décelées dans tous les prélèvements, notamment dans les MES du godet 008. Pour le godet 009, les proportions de minéraux d'origine terrigène (Serpentine, Talc, Amphibole, Quartz, Basanite, Sidérite, Halite et Gibbsite) augmentent sensiblement.

L'aragonite est un des constituants des coquilles d'invertébrés ; sa présence dénote de l'influence marine à cette station. Les proportions des minéraux d'origine latéritique varient donc inversement à la calcite et l'aragonite, ce qui souligne l'alternance des influences terrigène et marine à cette station (Tableau 6).

Tableau 5 : Compilation des données moyennes \pm écart-types de la distribution granulométrique dans la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.

Campagne	St06-KW1				
	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 \pm 4	32 \pm 3	24 \pm 3	15 \pm 2	21 \pm 3
Janv. - Mars 2012	8 \pm 5	50 \pm 5	27 \pm 6	11 \pm 3	4 \pm 0
Sept. - Oct. 2012	13 \pm 1	51 \pm 7	22 \pm 3	10 \pm 4	4 \pm 2
Janv. - Mars 2013	5 \pm 0	37 \pm 2	33 \pm 3	16 \pm 1	9 \pm 4
Juil. - Août 2013	13 \pm 3	53 \pm 12	22 \pm 2	8 \pm 6	3 \pm 6
Janv. - Mars 2014	26 \pm 3	56 \pm 2	15 \pm 2	3 \pm 1	0 \pm 0
Sept. - Oct. 2014	16 \pm 4	61 \pm 6	16 \pm 2	5 \pm 1	2 \pm 3
Janv. - Mars 2015	14 \pm 2	51 \pm 3	26 \pm 3	9 \pm 1	1 \pm 1
Oct. - Nov. 2015	11 \pm 5	44 \pm 7	26 \pm 3	12 \pm 4	8 \pm 6
Juil. - Sept. 2016	15 \pm 4	60 \pm 5	18 \pm 4	5 \pm 3	2 \pm 2
Oct. - Nov. 2016	8 \pm 1	51 \pm 3	30 \pm 3	9 \pm 2	2 \pm 2
Avr. - Mai 2017	4 \pm 1	37 \pm 2	29 \pm 2	14 \pm 1	16 \pm 1
Sept. - Nov. 2017	7 \pm 1	49 \pm 5	31 \pm 2	10 \pm 3	3 \pm 3
Mars - Avr. 2018	5 \pm 1	39 \pm 1	35 \pm 2	16 \pm 1	6 \pm 3
Mai - Juil. 2018	5 \pm 1	39 \pm 5	36 \pm 2	16 \pm 3	4 \pm 2
Mars - Mai 2019	6 \pm 1	46 \pm 6	35 \pm 1	12 \pm 4	2 \pm 2

Tableau 6 : Composition minéralogique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Prélèvement	St06-KW1			
	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autres*
006	55	13	23	9
008	57	15	21	7
009	53	14	22	13
010	54	14	23	9

* : Serpentine, Talc, Amphibole, Quartz, Basanite, Sidérite, Halite et Gibbsite.

Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St06-KW1 se distribuent entre 56 % et 61 % avec une moyenne de 58 ± 2 %. Ainsi, les teneurs demeurent très homogènes au fil du temps de collecte (Figure 8).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, celle de mars-mai 2019 présente une teneur moyenne en carbonates bien inférieure à celles obtenues lors des premières campagnes d'octobre-novembre 2006 (74 ± 2) et mars-avril 2007 (76 ± 3). Elle reste toutefois légèrement plus élevée que celles des campagnes de juillet-août 2013 (46 ± 13 %) et octobre-novembre 2015 (47 ± 3 %) (Tableau 4).

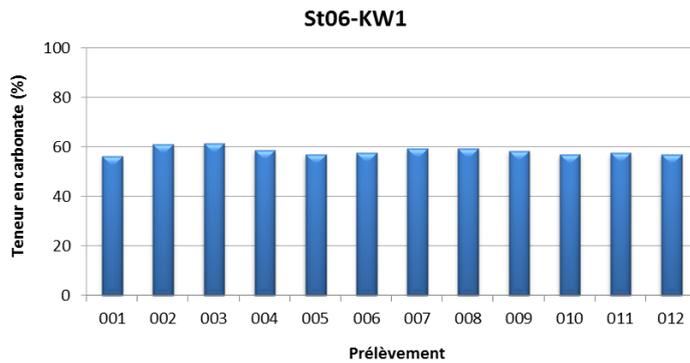


Figure 8 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Remarque : Une différence en fraction carbonatée est observable entre les teneurs en calcite, d'une part, mesurée par DRX semi-quantitative, et d'autre part, calculée par relation stœchiométrique à partir des concentrations en Ca et Mg (considérées comme étant exclusivement sous forme de CaCO_3 et MgCO_3 dans le contexte du sud calédonien). Cet écart est explicable par le fait que la DRX semi-quantitative caractérise seulement les minéraux cristallisés (Chaurrand, 2007 ; Achard, 2013), ce mode d'estimation ne tenant pas compte des phases amorphes de certains de ces minéraux, ni des minéraux du cortège latéritique contenant du Mg, ce qui peut alors majorer le pourcentage en carbonates calculé.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Masses collectées

Suite à la perte de certains échantillons lors de la mission de récupération du piège à St15, l'analyse porte sur 8 échantillons (non-conformité n°66).

Les masses de MES collectées se distribuent entre 0,475 g et 5,91 g avec une moyenne de $3,07 \pm 2,11$ g. Les quantités de MES piégées ne dépassent pas les 2,50 g sauf dans les godets 007, 011 et 012 où les masses maximales de MES ont été piégées (012 ; Figure 9).

La fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$), avec une moyenne de $90 \pm 3 \%$, est, d'une part, très largement dominante en St15 et, d'autre part, elle demeure très constante au fils du temps de collecte (Figure 10).

Entre les différentes campagnes conduites à St15, la masse moyenne collectée lors de cette campagne 2019 est considérable puisqu'elle est à minima 20 fois plus importante que celles collectées lors des premières campagnes d'octobre-novembre 2006 ($0,105 \pm 0,065$ g) et mars-avril 2007 ($0,154 \pm 0,145$ g). Cette quantité piégée reste comparable à celle de janvier-mars 2014 ($4,43 \pm 8,90$ g).

Quelle que soit la campagne, les MES piégées sont majoritairement composées de fraction fine avec des moyennes variant de seulement $\pm 10 \%$ entre elles. La moyenne mesurée pour cette campagne 2019 reste donc dans la gamme habituelle (Tableau 7).

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 et/ou le confinement des panaches turbides ; l'orientation SE favorisant un confinement 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 dans la rade.

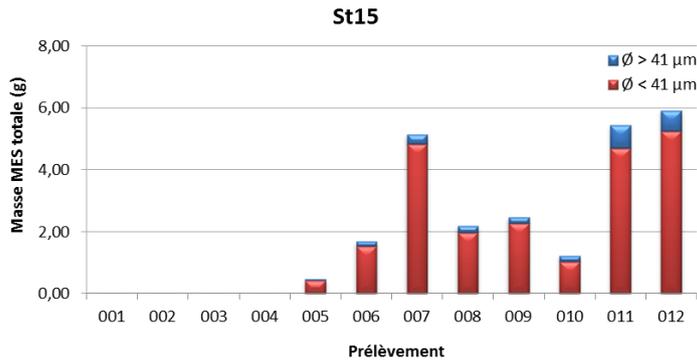


Figure 9 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 8 prélèvements du piège séquentiel à St15.

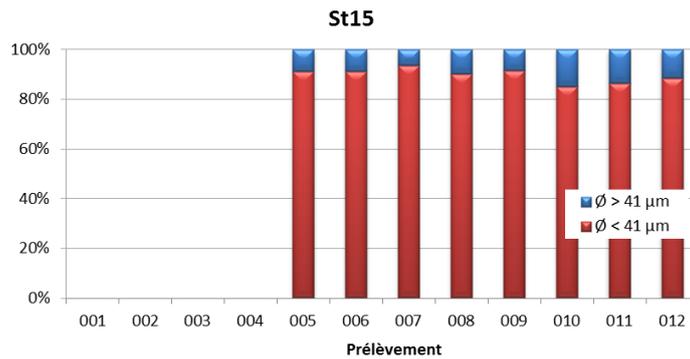


Figure 10 : Pourcentage massique en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 8 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 7 : Compilation des données moyennes \pm écart-types de la MES totale, des pourcentages massiques en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et des teneurs 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	0,105 \pm 0,065	ND	ND	Oct. – Nov. 2016	0,438 \pm 0,497	87 \pm 7	27 \pm 4
Mars - Avr. 2007	0,154 \pm 0,145	ND	ND	Avr. – Mai 2017	1,61 \pm 1,16	92 \pm 5	28 \pm 4
Janv. - Mars 2014	4,43 \pm 8,90	88 \pm 6	9 \pm 4	Sept. – Nov. 2017	0,298 \pm 0,304	79 \pm 16	23 \pm 2
Sept. - Oct. 2014	0,183 \pm 0,247	77 \pm 31	25 \pm 2	Mars – Avr. 2018	1,67 \pm 1,93	86 \pm 6	19 \pm 3
Janv. - Mars 2015	0,556 \pm 0,596	86 \pm 10	25 \pm 7	Mai – Juil. 2018	0,871 \pm 0,561	97 \pm 1	37 \pm 2
Juil. – Sept. 2015	0,261 \pm 0,268	86 \pm 10	26 \pm 2	Mars - Mai 2019	3,07 \pm 2,11	90 \pm 3	37 \pm 4
Mai -Juil. 2016	1,73 \pm 1,49	76 \pm 23	19 \pm 9				

ND : valeur non déterminée.

Compositions granulométriques

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St15 est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2,0-20 μm à savoir, les silts fins (moyenne de 61 \pm 5 % du volume total), tandis que les silts moyens (classe 20-40 μm) composent la seconde population granulométrique (20 \pm 1 % du volume total). La distribution des populations granulométriques montre une augmentation des particules de $\varnothing < 40 \mu\text{m}$ au dépend des grains de $\varnothing > 40 \mu\text{m}$ pour le prélèvement de 011 (Figure 7).

Rappel : la détection de particules de $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ dans les échantillons tamisés à 41 μm peut être le résultat d’un artéfact lié au mode de mesure/calcul de la Granulométrie Laser qui assimile à une sphère équivalente des particules de formes allongées (paillettes) qui peuvent passer à travers la maille au moment du tamisage.

Pour l'ensemble des campagnes conduites à St15, parmi les 5 classes granulométriques étudiées, le mode principal demeure la classe 2,0-20 µm avec des proportions relativement stables depuis la campagne de janvier-mars 2014. Toutefois, globalement une augmentation des grains des classes 20-40 µm est observée au détriment de celle de 0,02-2,00 µm (Tableau 8).

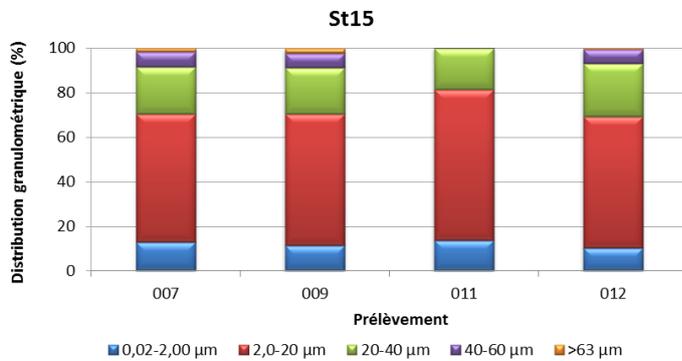


Figure 11 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 8 : Compilation des données moyennes \pm écart-types 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.

Campagne	St15				
	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
Mai - Juil. 2016	9 \pm 1	46 \pm 7	27 \pm 2	13 \pm 4	5 \pm 4
Oct. – Nov. 2016	13 \pm 2	60 \pm 5	21 \pm 3	5 \pm 3	0 \pm 1
Avr. – Mai 2017	10 \pm 2	51 \pm 5	18 \pm 2	9 \pm 2	12 \pm 3
Sept. – Nov. 2017	ND	ND	ND	ND	ND
Mars – Avr. 2018	9 \pm 1	52 \pm 2	28 \pm 1	9 \pm 1	1 \pm 1
Mai – Juil. 2018	11 \pm 0	54 \pm 4	22 \pm 1	10 \pm 2	4 \pm 1
Mai – Juil. 2019	13 \pm 1	61 \pm 5	20 \pm 1	5 \pm 4	1 \pm 1

ND : valeur non déterminée

Tableau 9 : 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*
007	39	4	37	22
009	42	5	32	21
011	37	9	29	25
012	32	7	38	22

* : minéraux argileux, groupe des Kandites, Serpentine, Chlorite, Quartz, Halite et Gibbsite.

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 ainsi que la Gibbsite et la Serpentine. Bien qu'en bien moindre quantité, de l'Aragonite et de la Calcite, minéraux d'origine marine, ont également été décelés. Comme pour les pourcentages de fraction fine, les proportions demeurent très stables ; aucune alternance entre deux influences avec les pas de collecte n'est constatée (Tableau 9).

Teneurs en carbonates

Le manque de matière dans les pas de collecte 001 à 004 n'a permis les analyses que sur les 8 autres échantillons.

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) se distribuent entre 30 % et 44 % avec une moyenne de $37 \pm 4 \%$ soulignant, de ce fait, une influence prépondérante claire et constante des apports terrigènes à cette station. Hors du prélèvement 009 où la valeur minimale est mesurée, les teneurs en carbonates ne montrent aucune tendance marquée en fonction du pas de prélèvement à cette station (Figure 12).

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les teneurs moyennes montrent une variation plus importante qu'en St06-KW1. Comme pour la campagne précédente (mai-juillet 2018 ; $37 \pm 2 \%$), la présente campagne se singularise avec la teneur moyenne en carbonates la plus forte. Ces valeurs exceptionnellement élevées contrastent avec celle mesurée en janvier-mars 2014 ($9 \pm 4 \%$) qui demeure la valeur la plus basse enregistrée (Tableau 7).

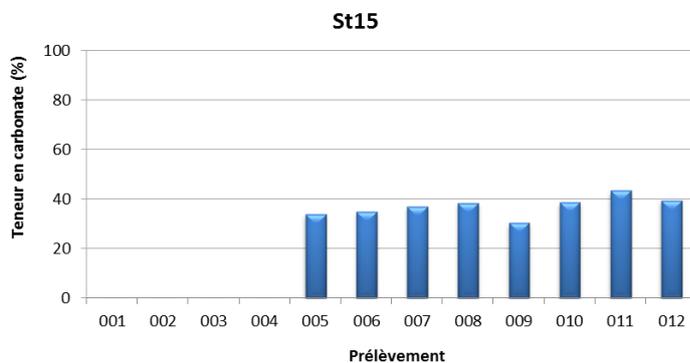


Figure 12 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 8 prélèvements du piège séquentiel à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Masses collectées

Les masses de MES collectées se distribuent, avec une grande variabilité, entre 0,684 g et 8,23 g avec une moyenne de $3,83 \pm 2,63$ g. Les quantités collectées durant les trois-quarts de la période d'immersion (001-008) restent essentiellement faibles. Elles augmentent brutalement par la suite pour atteindre les maximales dans les godets 009, 010 et 011 et puis diminuent de moitié à la fin de la période de collecte (012) (Figure 13).

Les MES sont composées majoritairement ($63 \pm 6 \%$) de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$). En effet, tous les prélèvements présentent une part de fraction fine élevée comprise entre 55 et 77 % (Figure 14), mais la proportion de particules de diamètre supérieur est plus importante, notamment par rapport aux deux stations.

Pour les différentes campagnes conduites à St60-NE, les moyennes de la masse totale collectée et le pourcentage de fraction fine obtenu pour cette campagne restent dans les fourchettes usuelles (Tableau 10).

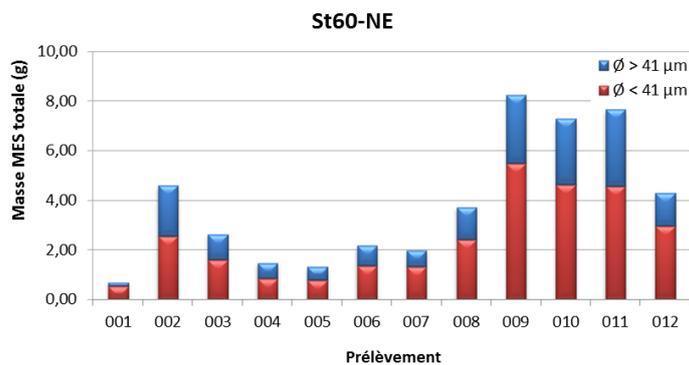


Figure 13 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

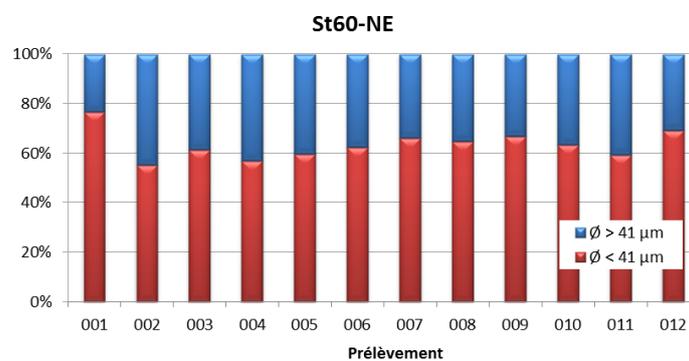


Figure 14 : Pourcentages massiques en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et en fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 10 : Compilation des données moyennes \pm écart-types de la MES totale, des pourcentages massiques en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et des teneurs 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	3,95 \pm 5,02	ND	96 \pm 1	Juil. - Sept. 2015	1,98 \pm 1,84	61 \pm 6	91 \pm 6
Juil. - Août 2011	ND	ND	ND	Mai - Juil. 2016	3,42 \pm 2,03	49 \pm 6	76 \pm 9
Janv. - Mar 2012	1,92 \pm 1,77	60 \pm 18	80 \pm 3	Oct. - Nov. 2016	2,23 \pm 3,52	28 \pm 13	91 \pm 7
Sept. - Oct. 2012	0,82 \pm 1,08	39 \pm 9	85 \pm 1	Avr. - Mai 2017	3,11 \pm 2,84	61 \pm 5	91 \pm 2
Janv. - Mars 2013	2,51 \pm 2,71	49 \pm 14	77 \pm 1	Sept. - Nov. 2017	1,46 \pm 1,27	59 \pm 4	86 \pm 2
Juil. - Août 2013	1,17 \pm 1,42	41 \pm 7	75 \pm 4	Mars - Avr. 2018	3,66 \pm 3,62	62 \pm 6	77 \pm 1
Avr. - Juin 2014	1,49 \pm 1,01	74 \pm 8	83 \pm 2	Mai - Juil. 2018	1,67 \pm 1,27	58 \pm 4	81 \pm 1
Sept. - Oct. 2014	1,63 \pm 1,82	60 \pm 4	83 \pm 2	Mars - Mai 2019	3,83 \pm 2,63	63 \pm 6	74 \pm 3
Janv. - Mars 2015	3,19 \pm 3,11	63 \pm 8	88 \pm 3				

ND : valeur non déterminée.

Compositions granulométriques

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES collectée en St60-NE est composée de particules dont le mode est situé dans le classes 2,0-20 μm (silts fins) avec cependant une forte représentation de la classe 20-40 μm (silts moyens), avec une moyenne de 49 \pm 4 % et 34 \pm 1 % du volume total, respectivement. La distribution des populations granulométriques montre une évolution dans le temps, pour les particules de la classe 2,0-20 μm qui ont augmenté dans les prélèvements 010, 011 et 012 au dépend de particules des classes $\varnothing > 40 \mu\text{m}$, tandis que les pourcentages de silts moyens (20-40 μm) restent stables (Figure 15).

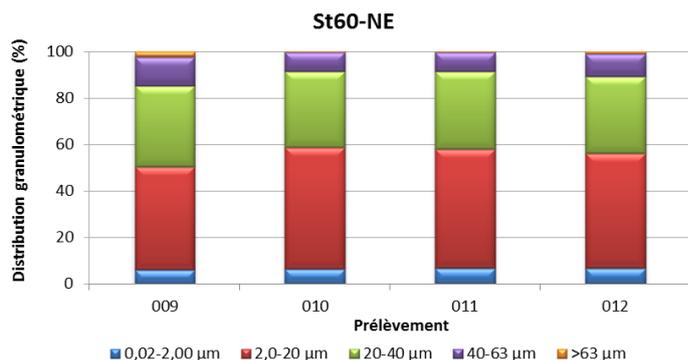


Figure 15 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 11 : Compilation des données moyennes \pm écart-types 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.

Campagne	St60-NE				
	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
Mai - Juil. 2016	5 \pm 1	40 \pm 1	36 \pm 2	16 \pm 1	3 \pm 1
Oct. – Nov. 2016	6 \pm 2	42 \pm 12	32 \pm 4	12 \pm 3	8 \pm 15
Avr. – Mai 2017	4 \pm 1	36 \pm 8	30 \pm 3	11 \pm 7	12 \pm 12
Sept. – Nov. 2017	8 \pm 1	52 \pm 2	31 \pm 1	9 \pm 1	0 \pm 0
Mars – Avr. 2018	5 \pm 1	40 \pm 3	36 \pm 2	16 \pm 1	4 \pm 0
Mai – Juil. 2018	3 \pm 0	30 \pm 4	35 \pm 1	20 \pm 2	12 \pm 3
Mars – Mai 2019	7 \pm 0	49 \pm 4	34 \pm 1	10 \pm 2	1 \pm 1

Rappel: 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.

Pour l’ensemble des campagnes conduites à St60-NE, il n’est pas possible de dégager, parmi les 5 classes granulométriques étudiées, une évolution temporelle particulière ; depuis la campagne de janvier-mars 2012, le mode principal des populations des particules alterne entre les classes 2,0-20 µm et 20-40 µm. Pour cette campagne, la distribution granulométrique montre des pourcentages moyens comparables à ceux relevés pour l’Etat de Référence. A noter toutefois, que pour la campagne de septembre-octobre 2014, une très notable augmentation des grains de la classe 2,0-20 µm au détriment de celles de 20-40 µm et 40-63 µm a été mesurée (Tableau 11).

Compositions minéralogiques

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St60-NE est quasi-exclusivement composée de minéraux carbonatés (Calcite et Aragonite), dont les proportions restent très stables avec le pas de collecte ($95 \pm 1 \%$). La présence de traces de Goethite traduit une influence lointaine des termes sources terrigènes, mais globalement ces observations soulignent les influences marines constantes et quasi exclusives régnautes, à cette station. (Tableau 12).

Tableau 12 : 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
009	77	17	1	5
010	78	18	1	2
011	75	20	4	2
012	78	17	3	2

* : Sidérite, Halite, Gibbsite et Quartz.

Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées se distribuent entre 67 % et 76 %. Avec une moyenne de $74 \pm 3 \%$, les teneurs n'évoluent guère avec les pas de prélèvements, sauf dans le godet 006 où une légère fluctuation fournit la valeur minimale mesurée (Figure 16).

Entre les différentes campagnes à St60-NE, les teneurs moyennes varient peu également. Pour cette campagne, elle est néanmoins plus basse que celle obtenue lors de la campagne d'état de référence en 2007 ($96 \pm 1 \%$) et elle est comparable à la valeur plus faible obtenue en juillet-août 2013 ($75 \pm 4 \%$).

Ces observations soulignent que, par rapport aux deux autres stations, les apports en carbonates à St60-NE sont constants et quasi exclusivement d'origine marine (Tableau 10).

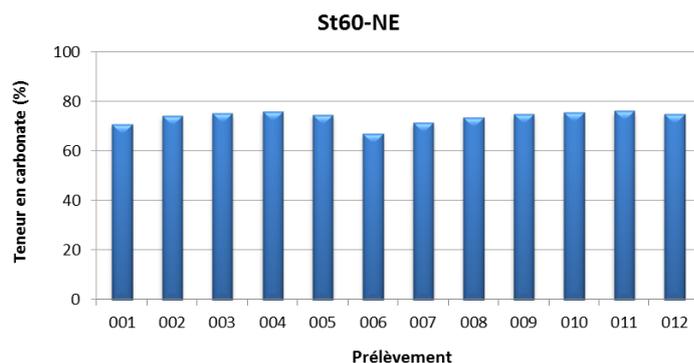


Figure 16 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

C. COMPOSITION GÉOCHIMIQUE DES MATIÈRES 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 ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) 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 fortes concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées au début et à la fin de la période d'immersion, à savoir dans les godets 001 et 012, respectivement, tandis que les prélèvements 003 et 009 montrent les valeurs les plus faibles. Inversement, pour le Ca, les teneurs minimales et maximales sont, respectivement, mesurées dans le godet 001 et 003.

Ces évolutions dans le temps sont toutefois peu marquées pour cette campagne, notamment pour le Ca dont les concentrations demeurent très homogènes (Tableau 13).

Comme cela avait été observé lors des précédentes campagnes, la matrice de corrélation montre la similarité d'évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn avec un coefficient de corrélation de Pearson $R^2 > 0,8200$. Elle montre logiquement aussi une corrélation, mais négative, entre le Ca et les 5 métaux bien que celle-ci soit faible pour cette campagne (Tableau 14).

Tableau 13 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

St06-KW1						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	206 197	63,2	2 801	99 693	563	1 347
Max	226 801	79,2	3 660	155 121	712	1 751
Moyenne	213 950	70,2	3 133	123 721	637	1 516
Ecart-type	7 001	5,2	237	15 584	47	120
CV (%)	3	7	8	13	7	8

Tableau 14 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

St06-KW1						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,0000	-0,7489	-0,5905	-0,5427	-0,8157	-0,7276
Co		1,0000	0,8897	0,9002	0,9779	0,9772
Cr			1,0000	0,8207	0,8840	0,9467
Fe				1,0000	0,8646	0,8708
Mn					1,0000	0,9571
Ni						1,0000

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, les concentrations moyennes sont variables. Les comparaisons montrent que les concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni obtenues lors de cette campagne 2019 sont légèrement supérieures aux valeurs enregistrées en 2007 pour l'état de référence. Quant à la concentration moyenne en Ca, elle est légèrement plus faible que celle mesurée en 2007. Comparées à la campagne précédente (mai-juillet 2018), les concentrations obtenues pour cette campagne sont en hausse. Il est à noter que la campagne de juillet-août 2013 est, à ce jour, celle qui présente les concentrations métalliques les plus élevées à St06-KW1, tandis que celle de janvier-mars 2014 regroupe les plus basses. (Tableau 15).

Tableau 15 : Compilation des données moyennes \pm écart-types 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.

St06-KW1						
Campagne	Eléments (mg/kg ps)					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Mars – Avr. 2007	290 310 (n=1)	58,0 (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	82,9 \pm 10,2	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	103 323 \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	46,1 \pm 18,4	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	82,8 \pm 12,1	3 007 \pm 354	85 407 \pm 11 481	735 \pm 94	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
Oct. – Nov. 2016	260 620 \pm 20 111	86,3 \pm 18,3	3 085 \pm 557	116 993 \pm 22 213	723 \pm 149	1 770 \pm 370
Avr. – Mai 2017	270 681 \pm 14 894	80,8 \pm 12,9	2 928 \pm 429	110 875 \pm 19 017	690 \pm 102	1 716 \pm 296
Sept. – Nov. 2017	264 210 \pm 24 159	95,0 \pm 13,6	3 422 \pm 417	120 591 \pm 12 247	742 \pm 101	1 791 \pm 224
Mars – Avr. 2018	228 717 \pm 18 985	86,7 \pm 81,8	3 279 \pm 743	113 470 \pm 23 892	783 \pm 206	1 766 \pm 450
Mai – Juil. 2018	249 671 \pm 13 443	51,6 \pm 8,8	2 001 \pm 335	81 583 \pm 12 926	448 \pm 74	1056 \pm 178
Mars – Mai 2019	213 950 \pm 7 001	70,2 \pm 5,2	3 133 \pm 237	123 721 \pm 15 584	637 \pm 47	1 516 \pm 120

Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St06-KW1 se distribuent entre 1,34 et 2,15 avec une moyenne de $1,79 \pm 0,25$; le plus fort ratio a été obtenu dans les godets 003 et 009 et les plus faibles dans 001 et 012. Ainsi, l'évolution temporelle des ratios souligne l'alternance de l'influence relative des pôles marin (Ca) et terrigène (Fe) (Tableau 16).

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 rapport minimal ayant été cependant relevé lors de la campagne de juillet-août 2013. Depuis la campagne d'octobre-novembre 2016, les ratios semblaient s'être stabilisés, suggérant même lors de la précédente campagne (mai-juillet 2018) une hausse qui la rapprochait du taux initial établi lors de l'état de référence. Pour la campagne de mars-mai 2019, ce ratio indique une augmentation de l'empreinte terrigène (Tableau 17).

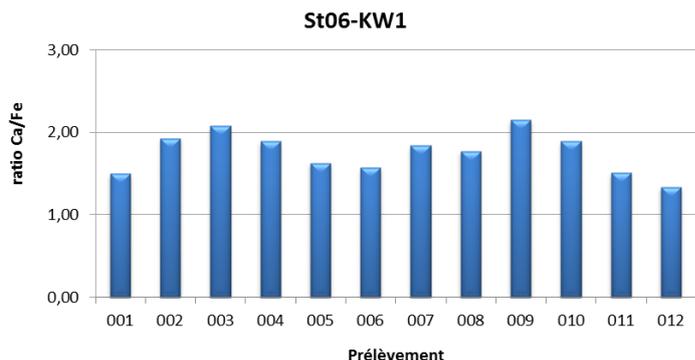


Tableau 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Tableau 17 : Compilation des données moyennes \pm écart-types 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)	Oct. - Nov. 2015	1,72 \pm 0,44
Juil. - Août 2011	3,17 \pm 0,50	Juil. - Sept. 2016	1,68 \pm 0,48
Janv. - Mars 2012	2,32 \pm 0,18	Oct. – Nov. 2016	2,32 \pm 0,53
Sept. - Oct. 2012	2,40 \pm 0,31	Avr. – Mai 2017	2,52 \pm 0,53
Janv. - Mars 2013	1,95 \pm 0,33	Sept. – Nov. 2017	2,21 \pm 0,31
Juil. - Août 2013	0,98 \pm 0,46	Mars – Avr. 2018	2,11 \pm 0,49
Janv. - Mars 2014	10,7 \pm 3,13	Mai – Juil. 2018	3,16 \pm 0,69
Sept. - Oct. 2014	1,86 \pm 0,27	Mars – Mai 2019	1,76 \pm 0,25
Janv. - Mars 2015	3,24 \pm 0,53		

2. Rade Nord de Prony (St15)

Concentrations en métaux et calcium

Le manque de matière n’a permis les analyses que sur 8 échantillons.

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 l’évolution des concentrations dans le temps, elles sont peu dispersées ; les plus faibles concentrations sont relevées dans le godet 009 pour tous les éléments sans exception (Tableau 18).

Bien qu’un peu moins robuste en raison du nombre d’échantillons réduit, la matrice de corrélation confirme une similarité d’évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe et Ni ($R^2 > 0,9200$). En revanche, pour le Mn, le coefficient de corrélation est moins marqué, ce qui pourrait indiquer un terme source composite pour cet élément (Tableau 19), hypothèse déjà évoquée lors de campagnes précédentes.

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les concentrations moyennes sont peu homogènes, notamment celles de Ca. Les comparaisons montrent, d’une part, que les concentrations obtenues en Co, Cr, Fe, Mn et Ni, lors de cette campagne, sont en baisse importante par rapport à celles obtenues en 2007 (Etat de référence) et, d’autre part, qu’avec la campagne précédente de mai-juillet 2018, elles sont parmi les plus basses qui aient été mesurées ; deux à quatre fois plus faibles comparativement aux campagnes de janvier-

mars 2014 et 2015, qui sont à ce jour celles qui présentent les concentrations métalliques les plus hautes. Quant à la concentration moyenne en Ca, elle représente la maximale enregistrée jusqu'à présent (Tableau 20).

Tableau 18 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St15.

St15						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	109 283	105	4 083	119 801	1 232	1 411
Max	158 199	159	6 322	176 758	1 756	2 101
Moyenne	132 698	142	5 595	159 479	1 581	1 825
Ecart-type	14 962	18	699	19 653	177	241
CV (%)	11	12	12	12	11	13

Tableau 19 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 8 prélèvements du piège séquentiel à St15.

St15						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,000	0,1497	0,1950	0,1024	0,4024	-0,0715
Co		1,000	0,9922	0,9454	0,7634	0,9219
Cr			1,000	0,9586	0,7531	0,9306
Fe				1,000	0,7914	0,9685
Mn					1,000	0,7147
Ni						1,000

Tableau 20 : Compilation des données moyennes \pm écart-types des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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
Mai - Juil. 2016	60 636 \pm 34 192	195 \pm 37	5 682 \pm 1 080	170 877 \pm 75 892	1 981 \pm 303	3 101 \pm 569
Oct. – Nov. 2016	91 451 \pm 16 898	178 \pm 33	6 057 \pm 1 016	198 270 \pm 35 176	1 861 \pm 511	2 339 \pm 383
Avr.- Mai 2017	101 352 \pm 17 811	184 \pm 21	8 150 \pm 859	231 480 \pm 23 743	1 246 \pm 174	2 501 \pm 281
Sept. – Nov. 2017	76 373 \pm 7 445	221 \pm 4	7 797 \pm 163	192 953 \pm 51 953	1 687 \pm 85	2 614 \pm 61
Mars – Avr. 2018	62 558 \pm 11 186	206 \pm 14	8 004 \pm 556	225 530 \pm 12 942	1 999 \pm 186	2 599 \pm 130
Mai – Juil. 2018	131 705 \pm 7 255	122 \pm 4	4 357 \pm 167	154 270 \pm 5 575	1 126 \pm 72	2 096 \pm 52
Mai – Juil. 2019	132 698 \pm 14 962	142 \pm 18	5 595 \pm 699	159 479 \pm 19 653	1 581 \pm 177	1 825 \pm 241

Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St15, relativement variables, se distribuent entre 0,680 et 0,110 avec une moyenne de $0,843 \pm 0,136$; les minimales correspondant aux prélèvements 005 et 006 et les maximales aux pas de collecte qui ont suivi (Figure 17).

Parmi les différentes campagnes conduites à St15, les ratios faibles traduisent l'influence terrigène amplement dominante et relativement constante; le ratio minimal, c'est-à-dire l'influence terrigène maximale, ayant été relevé lors de la campagne de janvier-mars 2014. On notera que la présente et précédente (mi-juillet 2018) campagnes se singularisent par le ratio maximal (Tableau 21), donc l'influence terrigène minimale depuis 2007.

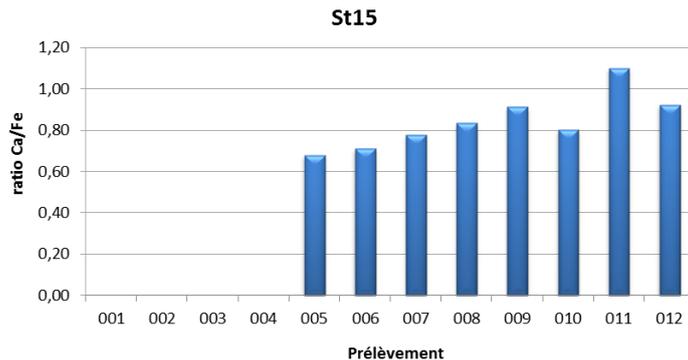


Figure 17 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 21 : Compilation des données moyennes \pm écart-types 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 séquentiels à particules à St15.

St15			
Campagne	Ca/Fe	Campagne	Ca/Fe
Mars - Avr. 2007	0,301 (n=1)	Oct. – Nov. 2016	0,464 \pm 0,052
Janv. - Mars 2014	0,050 \pm 0,081	Avr. – Mai 2017	0,448 \pm 0,115
Sept. – Oct. 2014	0,401 \pm 0,023	Sept. – Nov. 2017	0,418 \pm 0,107
Janv. - Mars 2015	0,273 \pm 0,106	Mars – Avr. 2018	0,280 \pm 0,064
Juil. - Sept. 2015	0,481 \pm 0,041	Mai – Juil. 2018	0,855 \pm 0,061
Mai - Juil. 2016	0,459 \pm 0,323	Mai – Juil. 2019	0,843 \pm 0,136

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Concentrations en métaux et calcium

Parmi les 3 stations étudiées, la St60-NE présente les concentrations en métaux les plus faibles et inversement la plus forte en Ca (Tableau 22). Ces concentrations varient peu, notamment celle du Ca. Les plus fortes quantités en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées dans les particules piégées dans le godet 001, tandis que les faibles quantités s'observent sur le reste des pas de prélèvement.

Tableau 22 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

St60-NE						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	250 769	14,4	366	15 683	149	251
Max	284 860	23,1	698	24 197	298	414
Moyenne	275 221	16,4	438	17 679	192	289
Ecart-type	10 174	2,4	90	2 349	38	45
CV (%)	4	15	21	13	20	15

Tableau 23 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

St60-NE						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,000	-0,1760	-0,2470	-0,1768	-0,1612	-0,1799
Co		1,000	0,9859	0,9963	0,8905	0,9945
Cr			1,000	0,9913	0,8778	0,9938
Fe				1,000	0,8892	0,9991
Mn					1,000	0,8900
Ni						1,000

Tableau 24 : Compilation des données moyennes \pm écart-types des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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)	11,0 (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	25,6 \pm 6,6	662 \pm 72	20 959 \pm 2 895	254 \pm 123	423 \pm 78
Sept. - Oct. 2012	345 918 \pm 19 677	29,0 \pm 5,0	566 \pm 23	18 347 \pm 1 641	189 \pm 49	345 \pm 68
Janv. - Mars 2013	306 914 \pm 5 219	21,3 \pm 2,6	834 \pm 58	26 131 \pm 2 022	262 \pm 25	478 \pm 39
Juil. - Août 2013	280 315 \pm 16 630	35,5 \pm 10,5	921 \pm 179	32 693 \pm 6 925	358 \pm 93	558 \pm 106
Avr. - Juin 2014	302 211 \pm 9 477	19,6 \pm 2,3	569 \pm 41	17 740 \pm 1 958	195 \pm 32	322 \pm 36
Sept. - Oct. 2014	313 173 \pm 7 856	24,8 \pm 3,8	725 \pm 101	25 695 \pm 4 668	204 \pm 30	386 \pm 64
Janv. - Mars 2015	325 637 \pm 9 166	31,6 \pm 6,5	848 \pm 174	28 754 \pm 5 415	329 \pm 61	506 \pm 95
Juil. - Sept. 2015	347 224 \pm 3 5214	25,6 \pm 3,8	702 \pm 63	22 628 \pm 2 287	298 \pm 38	416 \pm 41
Mai - Juil. 2016	279 965 \pm 3 4471	25,9 \pm 5,2	439 \pm 51	22 735 \pm 2 589	251 \pm 35	365 \pm 52
Oct. - Nov. 2016	342 228 \pm 27 452	17,1 \pm 1,5	461 \pm 33	17 288 \pm 1 125	143 \pm 16,3	252 \pm 17,2
Avr. - Mai 2017	349 128 \pm 7 429	33,2 \pm 5,87	643 \pm 58,9	19 309 \pm 2 487	302 \pm 76,9	397 \pm 32,1
Sept. - Nov. 2017	322 239 \pm 9 420	23,8 \pm 3,4	589 \pm 44	22 557 \pm 1 566	361 \pm 269	335 \pm 29
Mars - Avr. 2018	287 342 \pm 4 920	23,3 \pm 0,9	621 \pm 29	24 993 \pm 1 291	219 \pm 42	365 \pm 25
Mai - Juil. 2018	302 748 \pm 5 187	15,7 \pm 0,8	497 \pm 30	19 765 \pm 1 210	149 \pm 11	264 \pm 16
Mars - Mai 2019	275 221 \pm 10 174	16,4 \pm 2,4	438 \pm 90	17 679 \pm 2 349	192 \pm 38	289 \pm 45

ND : valeur non déterminée.

Bien que les concentrations évoluent peu entre les prélèvements, la matrice de corrélation montre une similarité certaine dans l'évolution des concentrations massiques des cinq métaux latéritiques suivis ($R^2 > 0,8700$). Cette tendance est très marquée entre Co, Cr, Fe et Ni ($R^2 > 0,9800$) ; pour le Mn, elle est plus faible mais significative ($0,8700 < R^2 < 0,9000$). Inversement, aucun type de corrélation n'est constaté pour le Ca (Tableau 23).

Remarque : En St60-NE, les R^2 de la matrice de corrélation multiéléments sont très hauts ($0,8700 < R^2 < 0,9995$) et reflètent la composition des particules latéritiques naturelles qui ont été piégées par les dispositifs durant la période de collecte. Lorsque les coefficients de corrélation montrent une significativité moindre ($0,5000 < R^2 < 0,8500$), ils expliquent l'apport de particules de compositions et d'origines différentes. En d'autres termes, dans le cas de la campagne 2019, les coefficients traduisent le fait que le diffuseur n'était plus fonctionnel dans sa partie distale.

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, les concentrations moyennes des éléments varient peu, plus particulièrement pour le Ca. Les comparaisons montrent tout de même que la concentration moyenne en Ca obtenue lors de cette campagne 2019 est inférieure à celle enregistrée en 2007 pour l'état de référence tandis que celles en Fe et Ni voire Mn sont supérieures. Il est à noter que les concentrations métalliques pour la présente et la précédente (mai-juillet 2018) campagnes sont en baisse par rapport à celles de juillet-août 2013, campagne qui à ce jour montre les concentrations métalliques les plus hautes à St60-NE. Inversement, elles se rapprochent de celles de janvier-mars 2014 et octobre-novembre 2016, campagnes qui regroupent les concentrations moyennes parmi les plus basses relevées (Tableau 24).

Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St60-NE se distribuent entre 10,9 et 18,0 avec une moyenne de $15,8 \pm 1,9$; la plus basse valeur ayant été obtenue lors du premier pas de collecte (001) après laquelle le ratio augmente et reste aux maximales enregistrées jusqu'au dernier pas de collecte (002-012). Ces ratios élevés confirment que l'influence marine demeure largement dominante, corroborant ainsi les résultats des teneurs en carbonates (Figure 18).

Cependant, entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, l'évolution du ratio Ca/Fe moyen permet de constater que l'influence de la signature terrigène a augmenté à cette station depuis la campagne de l'état de référence en 2007, mais semble s'être stabilisée ; le ratio minimal ($8,99 \pm 2,26$) a été relevé lors de la campagne de juillet-août 2013, depuis, les ratios moyens oscillent entre 10,0 et 20,0 (Tableau 26).

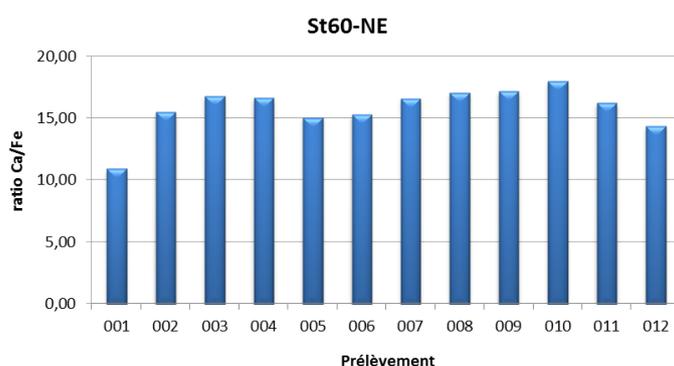


Figure 18 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 25 : Compilation des données moyennes ± écart-types 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)	Juil. – Sept. 2015	15,4 ± 1,5
Juil. - Août 2011	ND	Mai - Juil. 2016	12,5 ± 2,4
Janv. - Mar 2012	14,3 ± 2,4	Oct. – Nov. 2016	19,8 ± 1,2
Sept. - Oct. 2012	19,0 ± 2,7	Avr. – Mai 2017	18,4 ± 2,4
Janv. - Mars 2013	11,8 ± 1,0	Sept. – Nov. 2017	14,4 ± 1,1
Juil. - Août 2013	8,99 ± 2,26	Mars – Avr. 2018	11,5 ± 0,6
Avr. - Juin 2014	17,2 ± 1,8	Mai – Juil. 2018	15,4 ± 0,9
Sept. - Oct. 2014	12,5 ± 1,8	Mars – Mai 2019	15,8 ± 1,9
Janv. - Mars 2015	11,7 ± 2,2		

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 2761 mg/kg ps et 5577 mg/kg ps avec une moyenne de 4062 ± 799 mg/kg ps. La plus faible et la plus forte concentration ont été mesurées, respectivement, dans les godets 002 et 004 (Figure 19).

Il est à noter qu’aucune relation significative n’est constatée entre le S et le Ca ($R^2 = 0,0607$) ; les apports en carbonates naturels du milieu semblent largement gouverner ce rapport et ne permet pas de suivre l’évolution du Ca en relation à celle des concentrations du gypse (CaSO_4) évacué par le diffuseur dans le milieu.

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, la concentration moyenne en S obtenue pour cette période de collecte montre toutefois une légère augmentation. Depuis la campagne d’état de référence en 2012, les concentrations moyennes ont demeurées du même ordre de grandeur voire inférieures, comme cela est le cas pour la campagne précédente (mai-juillet 2018). Cette campagne et celle d’avril-juin 2014 font exception et, à ce jour, présentent les concentrations en S les plus variables à St60-NE (Tableau 26).

Toutefois, il conviendrait de noter que les analyses minéralogiques sur les échantillons 009, 010, 011 et 012 de cette station ont montré que le gypse ne semble représenter que moins de 1% de la composition minéralogique des MES piégées (Annexe 3).

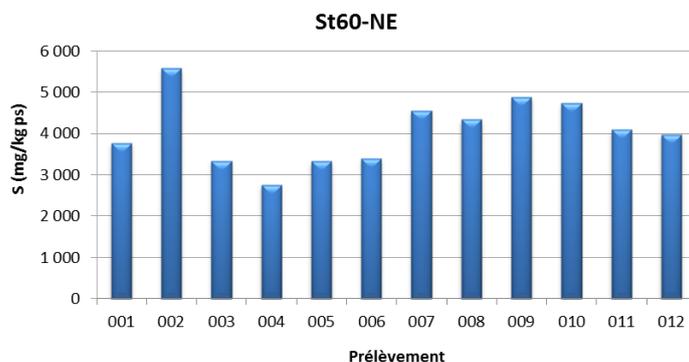


Figure 19 : Concentrations en soufre mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements de MES collectés par le piège séquentiel à particules à St60-NE.

Tableau 26 : Compilation des moyennes \pm écart-types 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	Juil. – Sept. 2015	2 776 \pm 168
Juil. - Août 2011	ND	Mai - Juil. 2016	2 746 \pm 83
Janv. - Mars 2012	2 903 \pm 183	Oct. – Nov. 2016	2639 \pm 503
Sept. - Oct. 2012	3 001 \pm 131	Avr. – Mai 2017	2808 \pm 118
Janv. - Mars 2013	3 113 \pm 284	Sept. – Nov. 2017	2 816 \pm 238
Juil. - Août 2013	2 656 \pm 556	Mars – Avr. 2018	3 325 \pm 357
Avr. - Juin 2014	3 812 \pm 834	Mai – Juil. 2018	2 236 \pm 113
Sept. - Oct. 2014	2 805 \pm 161	Mars – Juil. 2019	4 062 \pm 799
Janv. - Mars 2015	2 887 \pm 74		

ND : valeur non déterminée.

IV. INTERPRETATION

A. INFLUENCE DES FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES

Les quantités de MES collectées et les concentrations en éléments sont indirectement 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 et dispersion ou confinement du panache). Selon les stations suivies, les Figure 20, Figure 21 et Figure 22 apportent une vue d'ensemble afin de tenter d'expliquer les différents épisodes et les observations marquantes en rapport avec les conditions hydro-climatiques.

Rappel : En temps normal, les données de mesure de force et direction de vents provenant de la station météorologique IORO, située au milieu du Canal de la Havannah, sont exploitées pour l'interprétation des résultats. Toutefois, pour cette campagne, les données collectées à cette station étant visiblement erronées, elles ont été écartées et substituées par celles enregistrées par la station météorologique de GORO (usine). Cette dernière située à l'intérieur des terres de la Baie du Prony n'est toutefois pas la mieux placée pour indiquer avec précision les conditions hydro-climatiques agissant aux stations St06-KW1 et St60-NE ; les précédentes campagnes ont montré des écarts notables, mais constants, entre ces deux stations météorologiques dues aux effets de relief. Il est également à noter que pour les campagnes conduites aux stations St06-KW1 et St60-NE, les données de mesure de force et direction de vents du 24 avril au 01 mai sont incomplètes. Les relevés de pluviométrie restent également incomplets sur la dernière dizaine de jour.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

L'immersion du piège à particules séquentiel à St06-KW1 du 15 mars au 01 mai, avec un pas de temps de 96 h, a permis de révéler les observations suivantes (Figure 20) :

- Du 15-18 mars (001) au 27-30 mars (004) – les quantités de MES piégées sont faibles et les concentrations de Ni diminuent de sa valeur maximale (001) à des niveaux minimaux (003). Quant aux ratios Ca/Fe, ils évoluent de manière opposée ; la valeur la plus forte est mesurée dans le godet 003. Ces prélèvements correspondent à une période de régime de vents stables de secteur E-NE ($10,6 \pm 1,0$ à $12,6 \pm 1,1$ m/s) avec un cumul de précipitations nul à faible (0,0 à 11,2 mm journalier) ce qui ne semble pas avoir favorisé les flux des particules terrigènes dans les godets 002, 003 et 004 contrairement à celui de 001. Il est à noter que préalablement à la collecte de l'échantillon 001, les vents ont soufflé de secteur S-SO permettant probablement une faible remise en suspension des MES de fond de baie.
- Du 31 mars-03 avril (005) au 20-23 avril (010) – dans un premier temps (005 et 006), les quantités de MES piégées et les concentrations de Ni augmentent. Cette augmentation est plus ou moins soutenue pour les quantités de MES ; elles atteignent leurs maximales dans le prélèvement 010. Pour les teneurs en Ni, la tendance s'inverse ; les concentrations diminuent progressivement du godet 005 au 009, puis n'augmentent que légèrement dans le godet 010. Les ratios Ca/Fe suivent les évolutions miroir, c'est-à-dire de façon inversée. A partir du pas de collecte 005, les Alizés reprennent tandis que le temps sec perdure. Les régimes restent essentiellement dans le secteur E à S, sauf une seule brève incursion dans le secteur SO correspondant au prélèvement 006. Par la suite (008 à 010), les Alizés s'intensifient ; ils ne soufflent pas en dessous de 10,0 m/s. Les précipitations quant à elles deviennent de plus en plus

abondantes, notamment pour les collectes 009 et 010 où le pluviomètre a cumulé, respectivement 81,7 et 181,6 mm de pluies. La mise en place d'Alizés inverse la tendance en faveur des apports terrigènes dans les prélèvements 005 et 006. Toutefois, ni leur vitesse, ni les précipitations copieuses ne semblent avoir perturbé les flux de particules terrigènes puisque les concentrations de Ni et les ratios Ca/Fe demeurent peu variables entre les prélèvements 007, 008 et 010. Il conviendrait de noter que lors du prélèvement 009, où le plus fort ratio Ca/Fe a été mesuré, la force des vents a atteint sa valeur maximale en soufflant de secteur E.

- Du 24-03 avril (011) au 28 avril-01 mai (012) – les quantités de MES se divisent de moitié. Cet impact sur la quantité de MES piégées est aussitôt ressenti avec une hausse et une baisse notable des concentrations en Ni et des ratios Ca/Fe, respectivement, ce qui dénote une mise en place d'influence terrigène. Malheureusement, les données météorologiques incomplètes ne permettent pas de situer l'interprétation pour ces deux pas de collecte avec précision. Toutefois, on peut raisonnablement conclure que sous les vents favorables, les panaches terrigènes, suite aux 181,6 mm de précipitations, auraient pu alimenter la station en flux terrigènes.

Pour cette campagne, marquée par une pluviométrie modérée et quelques épisodes venteux, peu de liens ont pu être mis en évidence entre le flux des particules et les facteurs météorologiques. Cependant, à la lumière des observations recueillies lors des études antérieures effectuées avec les données météorologiques de la station IORO, et en raison de la localisation de la station St06-KW1 (fond de chenal formé entre des récifs enserrant la Baie Kwé et ouvert vers le sud), les différents flux de particules peuvent être décrits comme suit :

- **L'origine terrigène** est souvent influencée par l'effet combiné de la direction du vent et sa vitesse, et accessoirement par les précipitations. Comme cela a précédemment été démontré, les vents de secteur S-SO d'intensité modérée ont pour effet de remobiliser des particules terrigènes ou favoriser le confinement d'un panache turbide sortant de la rivière Kwé vers le fond de la baie. Ainsi, d'après plusieurs observations recueillies lors des campagnes antérieures marquées par une forte pluviométrie, le transport des particules liées aux précipitations jusqu'à la St06-KW1 dépend étroitement des régimes des vents. *A contrario*, les vents des secteurs E, N et O ne favorisent pas la formation d'un clapot pour engendrer des remises en suspension mais facilitent l'expansion d'un éventuel panache dans la baie.
- **L'origine marine** est favorisée par temps sec et par des vents, principalement d'un large secteur S (et notamment de SE) et d'intensité moyenne, qui contribuent au déplacement des masses d'eaux océaniques enrichies en particules carbonatées et en tests de micro-organismes marins, comme les foraminifères. Par ailleurs, les vents de secteur S sont également capables de mettre en suspension les particules grossières par la houle créée, conséquence de l'altération mécanique du platier corallien qui délimite la Baie Kwe et le Canal de la Havannah. Les vents du secteur N, quant à eux, même forts ne contribueraient pas au déplacement des masses d'eaux enrichies en particules carbonatées à la St06-KW1.

Note : Pour mieux caractériser l'effet des précipitations sur les flux verticaux des particules, les apports du creek devraient être inclus dans ces études. En effet, d'après [Drouzy \(2016\)](#), le débit d'eau douce dans la Baie Kwé est un des facteurs les plus influents sur le mélange vertical du panache. L'intensité du débit régit à la fois la distance et la rapidité de dispersion dans l'espace (par poussée mécanique de l'eau) et le mélange de deux masses d'eaux de densités différentes (l'eau salée étant plus dense que l'eau dessalée).

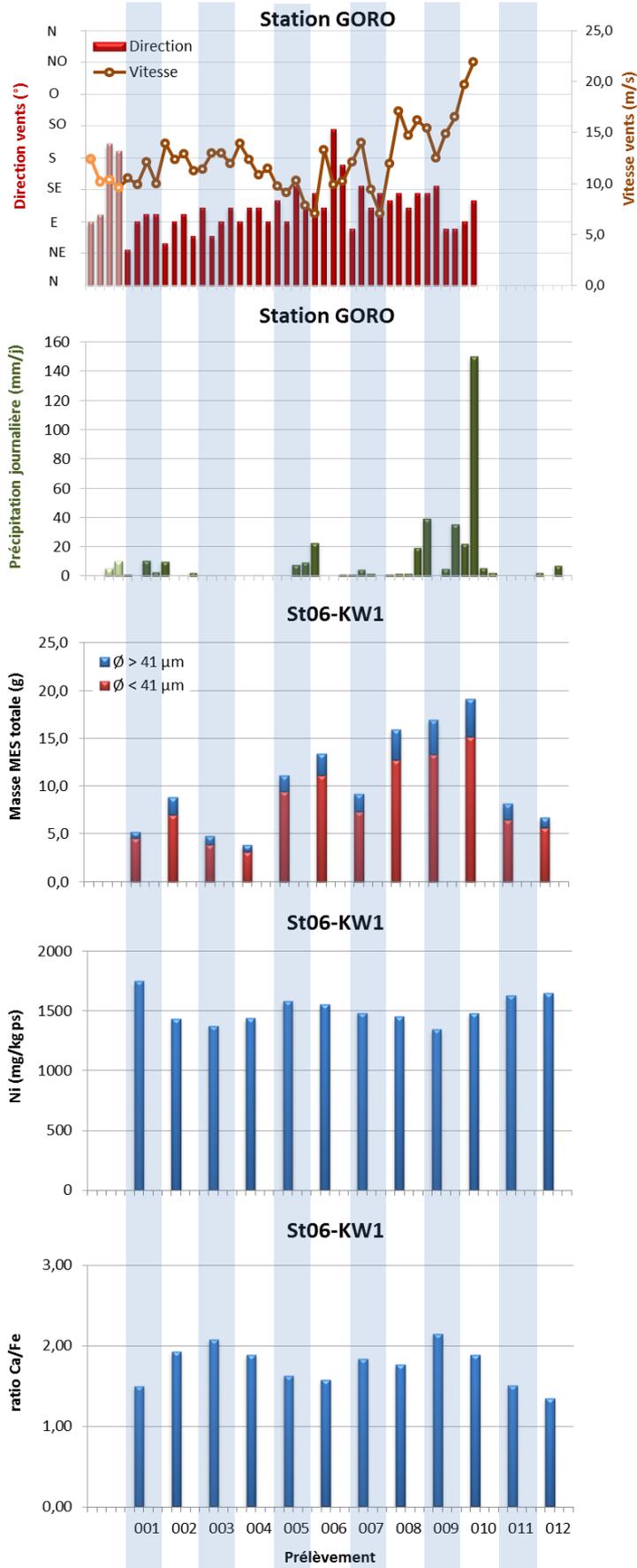


Figure 20 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\phi > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe mesurés dans les fractions fines piégées à St06-KW1.

2. Rade Nord de Prony (St15)

L'immersion du piège à particules séquentiel à St15 du 17 mai au 03 juillet avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes (Figure 21) :

- Du 17-20 mai (001) au 29 mai-01 juin (004) – les quantités de MES piégées infinitésimales n'ont pas permis la mise en place d'analyses.
- Du 02-05 juin (005) au 10-13 juin (007) – les quantités de MES piégées entre ces trois pas de collecte augmentent de manière singulière. En comparaison, les évolutions des concentrations de Ni et des ratios Ca/Fe demeurent peu significatives. Ces prélèvements correspondent à une période relativement sèche avec un cumul de précipitation nul à faible (0 à 5,8 mm journalier). En revanche, il est associé à une période de régime des vents instables notamment lors du prélèvement 005 où les Alizés amorcent une rotation complète. Toutefois, en dépit de l'impact sur la quantité de MES piégées, cette instabilité ne semble que peu influencer les flux des particules terrigènes.
- Du 14-17 juin (007) au 30 juin-03 juillet (012) – l'instabilité dans les directions de vents continue à perdurer pendant cette période. Mais le temps reste sec et la force du vent ne dépasse pas les 11 m/s entre les prélèvements 007 et 010. Lors de deux derniers pas de collecte (011 et 012), les conditions se dégradent toutefois ; le vent se renforce et entame des rotations brutales avec l'arrivée de fortes précipitations. Les quantités de MES piégées diminuent dans un premier temps puis augmentent radicalement dans les prélèvements 011 et 012. Les évolutions sont moins nettes pour les concentrations de Ni ; elles diminuent, puis augmentent puis diminuent à nouveau. Les ratios Ca/Fe suivent les évolutions miroir. Il est à noter que même si en réponse à la détérioration du temps la quantité de MES piégées augmente dans les godets 011 et 012, cet épisode a eu peu d'impact sur les flux de particules terrigènes puisque les concentrations de Ni ont diminué.

Pour cette campagne, marquée par une pluviométrie modérée et des épisodes venteux instables, aucune corrélation directe n'a pu être mise en évidence entre le flux des particules et les facteurs météorologiques. Cependant, à la lumière des observations recueillies lors des études antérieures et en raison de sa localisation (station située au droit de l'embouchure du Creek de la Rade Nord et en contrebas d'un talus formé d'une couche de sédiment fluide non consolidée), les différents flux de particules peuvent être décrits comme suit :

- **L'origine terrigène** est influencée par l'effet combiné de la pluviométrie, de la direction du vent et sa vitesse. En raison de sa dimension réduite, la baie du Creek de la Rade Nord reçoit les particules latéritiques entraînées par les précipitations *via* le creek qui y débouche. Le transport de ces particules à l'emplacement du piège est cependant relativement dépendant de l'action des régimes de vents, comme cela a été observé lors de cette campagne. D'après les résultats des précédentes campagnes, ceux du secteur SE plaqueraient le panache le long de la ligne de côte nord de la baie. Les forts vents d'un large secteur S (de SO à SE) peuvent remettre en suspension les particules légères déposées par faible profondeur (3 m) sur le haut du talus. Les vents de composante O, quant à eux, peuvent remobiliser plus en profondeur les particules plus riches en Ni déposées sur le talus, mais apportent également des débris carbonatés du large.
- **L'origine marine** est peu marquée à cette station. En effet, les valeurs de ratios Ca/Fe obtenues sont basses. La contribution marine, bien que peu évolutive, est principalement engendrée par les vents de secteur N mais également par les vents d'O faibles à modérés qui apportent des tests carbonatés du large et n'induisent pas de remobilisation des sédiments côtiers du fond de rade.

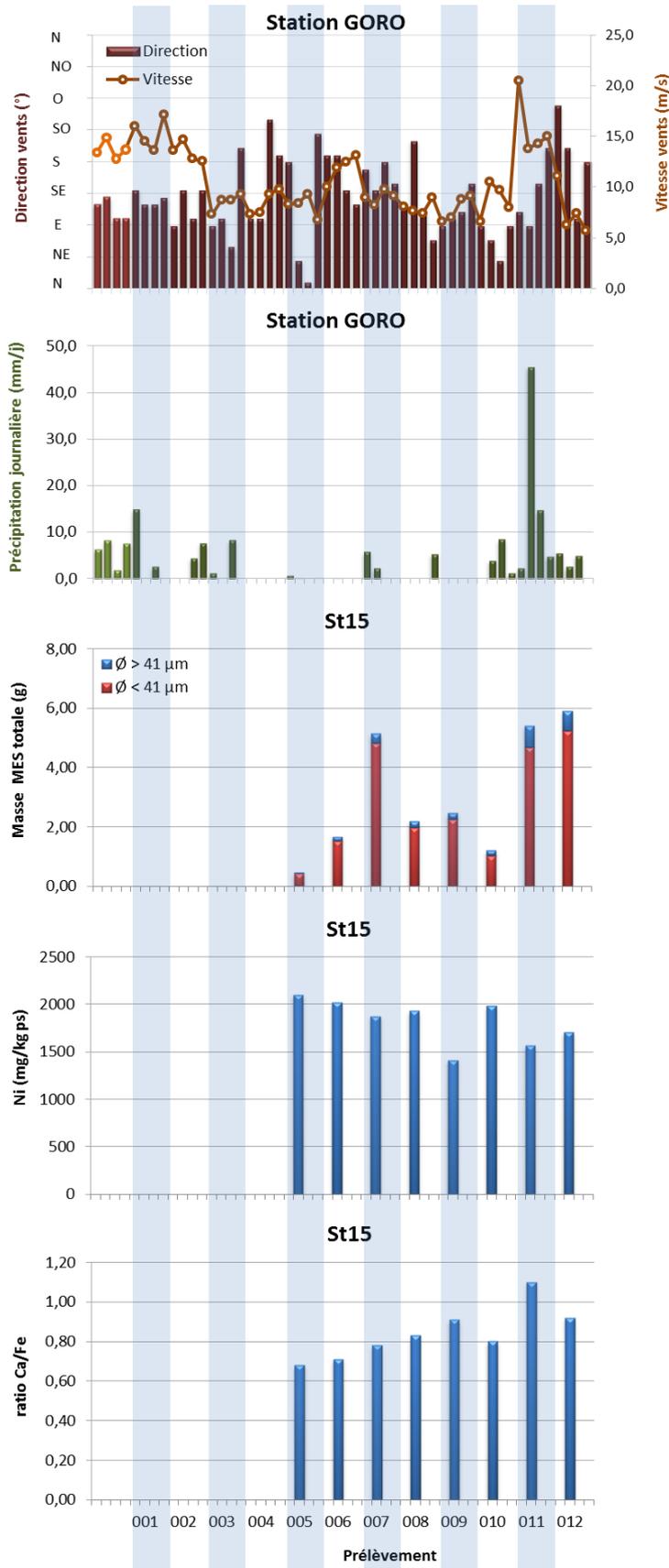


Figure 21 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\phi > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe 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 15 mars au 01 mai, avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes (Figure 22) :

- Du 15-18 mars (001) au 04-07 avril (006) – Les conditions météorologiques restent relativement stables pendant cette période sauf la seule brève incursion dans le secteur SO correspondant au prélèvement 006. En dépit de cette stabilité, les quantités de MES piégées augmentent dans un premier temps (de 001 à 002) puis diminuent (de 003 à 005). Pour les concentrations de Ni, on constate qu'elles commencent par s'affaiblir (de 001 à 002) pour demeurer peu variables par la suite. Les ratios Ca/Fe suivent les évolutions miroir. Ces deux indicateurs traduisent l'accroissement de l'influence océanique. Il est à noter que préalablement à la collecte de l'échantillon 001, prélèvement correspondant à la concentration de Ni maximale et au ratio Ca/Fe minimal, les vents ont soufflé de secteur S-SO.
- Du 08-11 avril (007) au 28 avril-01mai (012) – les quantités de MES piégées augmentent, doublant entre les prélèvements 006-007 et 009-011 puis diminuent d'autant dans le dernier godet 012. Comparativement, les évolutions observées pour les concentrations de Ni et des ratios de Ca/Fe sont bien modiques et uniformes sauf pour les derniers prélèvements 011 et 012 où les concentrations en Ni et les ratios Ca/Fe évoluent, respectivement, à la hausse et à la baisse. Ainsi, les importantes fluctuations observées pour la quantité de MES lors de ces prélèvements devraient être la conséquence de phénomènes distincts. Les analyses ne permettent pas non plus de distinguer clairement les corrélations entre les fluctuations dans les régimes de vents (direction et vitesse) et les valeurs de Ca/Fe et Ni, hormis le fait que les vents E-SE renforcés lors du prélèvement 008 à 010 pourraient favoriser les apports carbonatés à cette station. En effet, le plus fort ratio Ca/Fe a été mesuré dans le prélèvement 010 lorsque la force de vents était à sa maximale, soufflant de secteur E (apports du récif barrière). Pour les pas de collecte suivants (011 et 012), les données météorologiques incomplètes ne permettent pas de situer le retour de l'influence terrigène en relation avec l'épisode pluvieux du prélèvement 010.

Peu de corrélation entre le flux des particules et les facteurs météorologiques se dégage ; les flux et la sédimentation des particules à cette station pouvant être régis par d'autres mécanismes tels que les courants de marées. En raison de sa localisation (station située dans le Canal de la Havannah, à 60 m au nord-est de l'émissaire) le flux de particules peuvent être envisagé comme suit :

- **L'origine terrigène** ne serait pas directement générée par les précipitations ou de manière peu significative. En effet, en raison de son éloignement à la côte et de l'intense hydrodynamisme régnant dans le Canal, il est peu probable que les particules latéritiques arrachées aux bassins versants de l'extrême sud calédonien par les précipitations puissent être transportées jusqu'à la station St60-NE, sauf cas exceptionnel combinant une très intense pluviométrie et le régime des vents d'un large secteur N favorables au transport des particules vers le large.
- **L'origine marine** semble, d'après les ratios Ca/Fe obtenus, être favorisée par les vents du secteur E à SE (voire O) qui balayent le complexe système récifal et favorisent la circulation des eaux enrichies en tests de micro-organismes et débris carbonatés.

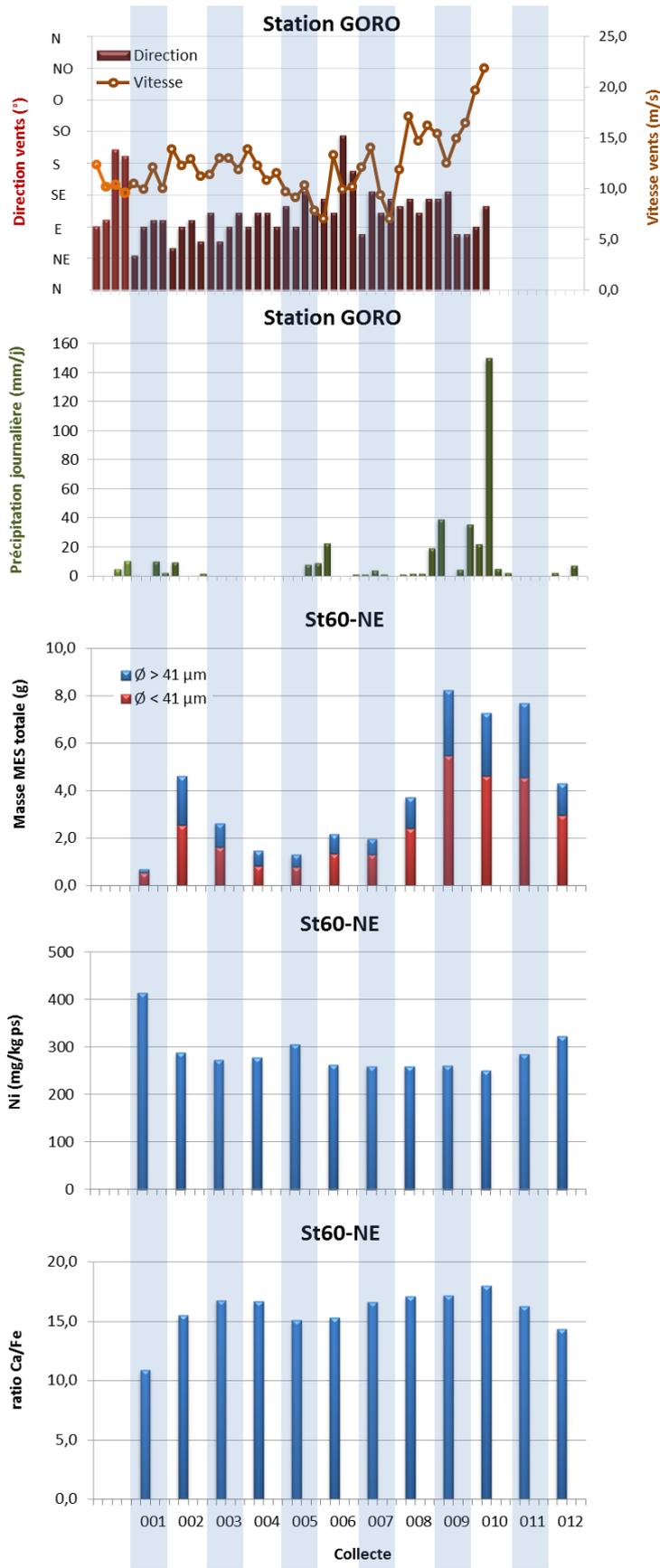


Figure 22 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe mesurés dans les fractions fines piégées à St60-NE.

B. CALCUL DES FLUX DES MATIÈRES

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 $51,5 \pm 25,4$ g/m²/j, valeur qui est supérieure à celle enregistrée en 2006 pour l'état de référence. Entre les différentes campagnes, les densités moyennes de flux peuvent varier fortement sans montrer une tendance particulière ; la maximale étant mesurée lors de la campagne de mars-avril 2018 (Tableau 27) où un vent d'intensité supérieure à la normale ($13,6 \pm 3,3$ m/s) a été enregistré tout le long de la campagne. En effet, du fait de l'emplacement de la station St06-KW1, le flux des MES mesuré est directement dépendant de l'action combinée de la direction du vent et sa vitesse et accessoirement des précipitations. Ceci est particulièrement illustré par la campagne de janvier-mars 2014 où les 920,2 mm de pluie n'ont pas conduit à piéger une quantité supérieure à celle de la campagne de mars-avril 2018 dont la pluviométrie a été plus faible (631,3 mm), en raison du régime de vents. En effet, pour la campagne de 2014, des vents beaucoup plus faibles ($9,3 \pm 4,0$ m/s) n'auraient pas favorisé, d'une part, l'expansion du panache turbide jusqu'à l'emplacement du piège, et d'autre part, la formation d'un clapot suffisant pour engendrer des remises en suspension des particules, d'où la valeur inférieure.

Tableau 27 : Compilation des moyennes \pm écart-types 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-KW1.

St06-KW1					
Campagne	Densités de flux de MES (g/m ² /j)	Cumul de masse de MES piégées (g/m ²)	Campagne	Densités de flux de MES (g/m ² /j)	Cumul de masse de MES piégées (g/m ²)
Oct. - Nov. 2006	14,6 \pm 7,4	350	Janv. - Mars 2015	66,3 \pm 36,1	3 181
Mars - Avr. 2007	46,1 \pm 44,7	1 106	Oct. - Nov. 2015	38,8 \pm 30,5	1 864
Juil. - Août 2011	27,1 \pm 30,0	1 299	Juil. - Sept. 2016	28,7 \pm 22,9	1 379
Janv. - Mars 2012	39,5 \pm 33,2	1 894	Oct. - Nov. 2016	18,5 \pm 13,9	886
Sept. - Oct. 2012	26,4 \pm 13,1	1 267	Avr. - Mai 2017	45,3 \pm 40,3	2 173
Janv. - Févr. 2013	46,5 \pm 28,5	2 231	Sept. - Nov. 2017	20,4 \pm 23,0	979
Juil. - Août 2013	58,1 \pm 87,8	2 786	Mars - Avr. 2018	97,7 \pm 136,6	4 690
Janv. - Mars 2014	60,7 \pm 34,1	2 914	Mai - Juil. 2018	30,1 \pm 22,8	1 443
Sept - Oct. 2014	11,8 \pm 8,41	569	Mars - Mai 2019	51,5 \pm 24,4	2470

Éléments métalliques

Illustré par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne sont de $77,1 \pm 36,0$ mg ps/m²/j. D'une campagne à l'autre, les valeurs moyennes varient fortement, le flux maximum a été calculé pour juillet-août 2013 (282 ± 626 mg ps/m²/j). Ensuite, les flux en Ni diminuent fortement et ne dépassent pas le seuil de 102 mg ps/m²/j jusqu'à la campagne de mars-avril 2018 (225 ± 425 mg ps/m²/j). Pour ces deux campagnes, on notera que les précipitations relevées ont été de 467,0 mm contre 631,3 mm, respectivement. En dépit d'une plus haute pluviométrie, le flux métallique moyen relevé en mars-avril 2018 demeure comparable à celui de juillet-août 2013. Il est également à noter que les précipitations exceptionnelles de janvier-mars 2014 (920,2 mm) ont eu peu de conséquence sur le flux métallique ($35,9 \pm 22,0$) ce qui est à lier avec la faible intensité des

vents ($9,3 \pm 4,0$ m/s) qui n’a probablement pas permis l’expansion du panache de manière homogène dans toute la baie. Depuis, les densités sont revenues dans les gammes habituelles (Tableau 3 et Figure 23).

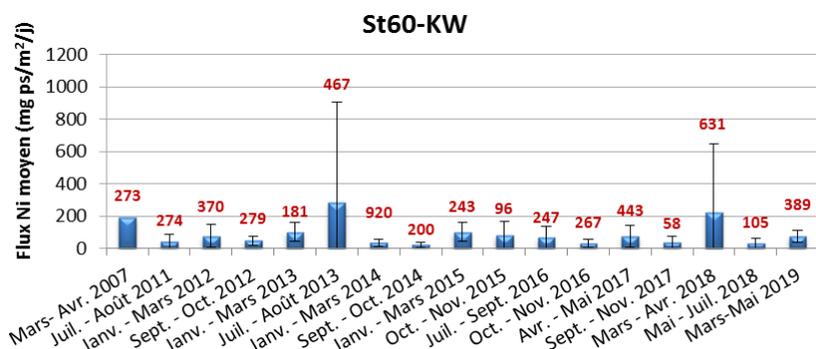


Figure 23 : Compilation des moyennes \pm écart-types des flux en nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées et les cumuls des précipitations (légende en rouge) lors des différentes campagnes d’immersion des pièges séquentiels à St60-KW1.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Flux de matière en suspension

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les densités moyennes de flux sont très variables. Pour cette campagne 2019, la moyenne ($15,3 \pm 10,6$ g/m²/j) est environ 15 fois plus élevée que celle enregistrée en 2006 pour l’état de référence ; elle constitue la deuxième plus forte valeur mesurée depuis. Il est à noter que la valeur moyenne exceptionnelle de janvier-mars 2014 ($22,2 \pm 44,5$ g/m²/j) est à mettre en lien avec les précipitations, elles aussi exceptionnelles (920,2 mm), combinées à la faible intensité des vents ($9,3 \pm 4,0$ m/s) (Tableau 3 et Tableau 28) qui a probablement permis l’expansion du panache de manière homogène dans toute la baie.

Tableau 28 : Compilation des moyennes \pm écart-types 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 ² /j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m ²)	Campagne	Densités de flux de MES (g/m ² /j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m ²)
Oct. – Nov. 2006	1,05 \pm 0,64	25,2	Oct. – Nov. 2016	2,19 \pm 2,48	105
Mars - Avr. 2007	1,55 \pm 1,45	37,1	Avr.- Mai 2017	8,05 \pm 5,78	386
Janv. - Mars 2014	22,2 \pm 44,5	1 063	Sept. – Nov. 2017	5,95 \pm 6,08	71
Sept. – Oct. 2014	0,91 \pm 1,23	43,8	Mars – Avr. 2018	8,34 \pm 9,63	400
Janv. - Mars 2015	2,78 \pm 2,98	134	Mai – Juil. 2018	4,35 \pm 2,81	209
Juil. - Sept. 2015	1,31 \pm 1,34	62,7	Mai – Juil. 2019	15,3 \pm 10,6	490
Mai - Juil. 2016	8,67 \pm 7,44	416			

Éléments métalliques

Illustré par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne sont de $26,7 \pm 17,6$ mg ps/m²/j. Entre les campagnes, la valeur moyenne maximale ($85,8 \pm 165$ mg ps/m²/j) a été relevée en janvier-mars 2014. Depuis, elle a diminué et demeure en dessous de la valeur de $27,0$ mg ps/m²/j. La valeur maximale de 2014 est à relier avec la pluviométrie exceptionnelle de 920,2 mm mesurée lors de la campagne associée à l’absence de vents forts permettant l’expansion des panaches dans la rade (Figure 24) ; les apports en Ni résultent directement du lessivage du bassin versant. A l’inverse pour cette campagne 2019, les valeurs de Ni mesurées

sont faibles, malgré les flux considérables mesurés, car elles sont à relier à la remise en suspension d'une forte proportion de sédiments, mais plus carbonatés.

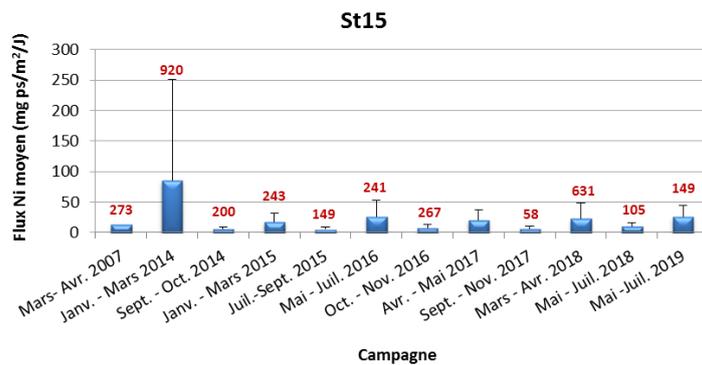


Figure 24 : Compilation des moyennes ± écart-types des flux en nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées et les cumuls des précipitations (légende en rouge) lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Flux de matière en suspension

Pour cette station, les densités moyennes de flux sont également variables et pour 2019 la valeur est de $19,2 \pm 12,2 \text{ g/m}^2/\text{j}$, ce qui représente le maximum atteint, hormis les quantités collectées en 2007 (Etat de référence). A signaler que les moyennes obtenues depuis 2012 demeurent toutes inférieures à celle enregistrée de 2007 (Tableau 29).

Tableau 29 : Compilation des moyennes ± écart-types 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 ($\text{g/m}^2/\text{j}$)	Cumul de masse de MES piégés (g/m^2)	Campagne	Densités de flux de MES ($\text{g/m}^2/\text{j}$)	Cumul de masse de MES piégés (g/m^2)
Févr. - Mars 2007	$31,6 \pm 40,1$	949	Juil. - Sept. 2015	$9,88 \pm 9,20$	474
Juil. - Août 2011	ND	ND	Mai - Juil. 2016	$17,1 \pm 10,2$	822
Janv. - Mar 2012	$9,61 \pm 8,87$	461	Oct. - Nov. 2016	$11,1 \pm 17,6$	535
Sept. - Oct. 2012	$4,10 \pm 5,39$	197	Avr. - Mai 2017	$15,5 \pm 14,2$	745
Janv. - Mars 2013	$12,6 \pm 13,6$	603	Sept. - Nov. 2017	$7,28 \pm 6,36$	350
Juil. - Août 2013	$5,85 \pm 7,09$	281	Mars - Avr. 2018	$18,3 \pm 18,1$	897
Avr. - Juin 2014	$7,43 \pm 5,05$	356	Mai - Juil. 2018	$8,37 \pm 6,34$	402
Sept. - Oct. 2014	$8,13 \pm 9,08$	390	Mai - Juil. 2019	$19,2 \pm 12,2$	919
Janv. - Mars 2015	$16,0 \pm 15,6$	766			

ND : valeur non déterminée.

Éléments métalliques

Les flux moyens de Ni lors de cette campagne sont de $5,30 \pm 3,48 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$; valeur deux fois plus élevée que celle obtenue en 2007 ($2,40 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$) lors de l'état de référence. Entre les différentes campagnes, la variation des densités moyennes est importante, puisqu'elle peut être de plus de 200% (moyenne multipliée par un facteur 3 ; Figure 25).

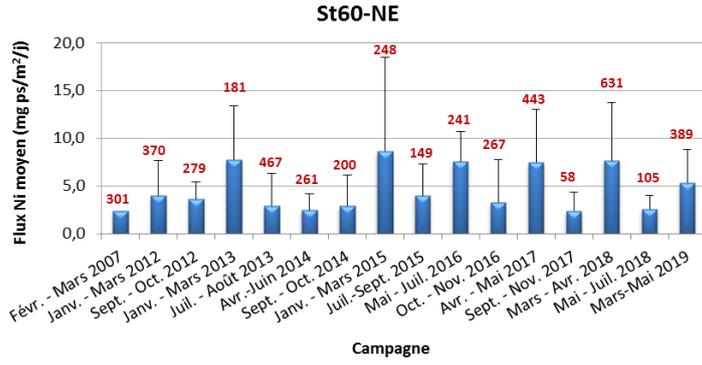


Figure 25 : Compilation des moyennes \pm écart-types des flux en nickel dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées et les cumuls des précipitations (légende en rouge) lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.

V. SYNTHÈSE

La campagne de suivi des densités de flux verticaux de particules du première semestre de 2019 s'est déroulée du 15 mars au 01 mai aux stations St06-KW1 et St60-NE et du 17 mai au 03 juillet avec une ligne de mouillage lestée instrumentée. Cette campagne est caractérisée par une pluviométrie modérée et des épisodes venteux.

Les principales observations relevées sur les 3 stations sont les suivantes :

- Les particules terrigènes piégées à la station St06-KW1 proviennent d'une même formation géologique. Comme souvent observé, la quantité et la nature de la matière piégée sont majoritairement influencées par les variations de direction et vitesse du vent, entraînant des courants et du clapot, et occasionnellement, par l'intensité des précipitations ; la station subit donc des influences terrigènes et marines alternées mais d'intensités variables. Globalement, entre 2007 (état de référence) et 2013, la diminution importante du ratio moyen Ca/Fe permet de constater une influence grandissante du terme source terrigène. Cette observation est étayée également par les valeurs moyennes des concentrations en métaux qui sont globalement en augmentation. A noter également, la campagne de juillet-août 2013 présente à ce jour les concentrations métalliques et la densité du flux en Ni les plus hautes à St06-KW1. Depuis, une stabilisation des apports terrigènes est manifeste. Toutefois, les conditions exceptionnelles de la première campagne de 2018 avec une forte pluviométrie et de forts vents omniprésents avec le passage successif du cyclone HOLA et de 2 dépressions LINDA et IRIS ont eu des conséquences sur la densité du flux en Ni ; elle constitue la deuxième plus forte valeur mesurée depuis 2007, ce qui est à relier avec la plus forte masse moyenne de MES piégée (Kumar-Roiné *et al.*, 2018b). Pour cette campagne 2019, avec des perturbations météorologiques comparativement mineures, la densité de flux en Ni revient dans la grandeur d'ordre habituelle.
- Les particules terrigènes piégées à la station St15 proviennent probablement de différents termes sources différenciables par leurs compositions en Mn. Cette observation concorde avec celle relevée à la même station lors des campagnes précédentes pour Fe et Mn (Kumar-Roiné *et al.*, 2018b) ; la St15 se trouve donc dans une zone de convergence de plusieurs termes sources en apports terrigènes. Comme souvent observé, les concentrations en métaux latéritiques (exemple de Ni) restent particulièrement stables entre les pas de prélèvements, ce qui pourrait être expliqué par la latence des phénomènes de sédimentation des particules fines et/ou à la faible dynamique de renouvellement des masses d'eau dans la Rade Nord lorsque peu de perturbations météorologiques se succèdent. Sous des conditions de régime de vents peu stables, comme cela a été le cas lors de cette campagne, on a pu observer que les précipitations atmosphériques ne semblent être qu'un forçage secondaire ; l'action de la direction de vents déterminerait la dispersion ou le confinement de la couche turbide issue du Creek lors des apports induits par les précipitations. Quant à l'apport marin, très modeste à St15, il serait favorisé par les vents modérés d'un large secteur N à O qui contribuent au déplacement des particules détritiques carbonatées provenant des formations récifales et de tests de micro-organismes en particulier. De surcroît, la relative stabilité des valeurs moyennes du ratio Ca/Fe depuis 2007 (état de référence), permet de constater que la forte influence terrigène continue de s'exercer à St15, même pour cette campagne où les valeurs moyennes des concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont bien inférieures à celles relevées en 2007. Par ailleurs, elles représentent, sans exception, avec la dernière campagne de 2018, les minimales enregistrées jusqu'au présent. Il est également à noter que la campagne de janvier-mars 2014 présente à ce jour les densités du flux en Ni les plus hautes à St15 ; cette observation est à relier avec la plus forte masse moyenne de MES piégée qui serait la conséquence directe des précipitations exceptionnelles (920,2 mm).

- Les particules terrigènes piégées à St60-NE pour cette campagne semblent provenir d'un seul terme source ; cette corrélation n'est que rarement observée à cette station. En effet, dans ce système dit « ouvert » où interagissent plusieurs facteurs simultanément, peu, voire aucune corrélation pertinente ne peut être établie entre les paramètres météorologiques et les particules piégées ; il semblerait que ces particules latéritiques ne constituent pas une réponse en lien direct avec le lessivage des sols de la côte sud de Nouvelle Calédonie, mais le résultat de l'effet des mécanismes d'érosion de la ligne de côte plus globaux. Cependant, en dépit d'une empreinte océanique forte, depuis 2007 (état de référence), les ratios moyens Ca/Fe ont évolué vers des valeurs tendant à prendre en compte une influence grandissante du terme « source terrigène ». Cette observation repose sur les augmentations globales des valeurs moyennes des concentrations en métaux. Pour cette campagne, cet accroissement n'est représenté que par le Fe, Mn et Ni tandis que les concentrations d'autres métaux restent comparables. Cette hausse semble liée à un ensemble de mécanismes qu'il n'est pas encore pertinent de tenter d'expliquer (érosion de la côte, contribution des rejets de l'émissaire marin ?).

Il est à noter qu'à la station St60-NE, la campagne de juillet-août 2013 présente à ce jour les concentrations métalliques les plus hautes. Depuis les valeurs semblent se stabiliser et tendent même à la baisse ce qui est le cas pour cette campagne 2019 et celle précédente. En ce qui concerne l'évolution de gypse (CaSO_4), aucune trace d'enrichissement anormal n'est discernée pour Ca. Quant aux concentrations en S, elles sont en légère hausse par rapport aux concentrations relevées des campagnes précédentes. Toutefois, les 4 analyses minéralogiques ne confortent pas cet hypothèse ; <1 % de MES piégées à cette station est composé de gypse. Afin de consolider ces hypothèses, ne disposant pas de valeur de référence en 2007, il serait judicieux d'analyser des MES provenant d'un mouillage témoin.

REFERENCES

- Achard, R. 2013. Dynamique des contaminants inorganiques dans les sédiments de dragage : rôle spécifique de la matière organique.
- 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 produits 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.
- Drouzy M., 2016. Modélisation hydrodynamique de la Baie Kwé; Première partie : Simulation de dispersion du panache en conditions forcées. Contrat Vale-NC/AEL 100-VI-16-P, 57p.
- 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., Le Grand H., Dolbecq M., Creuzil J. 2012a. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah et la baie Kwé : mission de juillet et août 2011. Rapport AEL 110308-VI-11, 44p.
- Fernandez JM., Moreton B., Le Grand H. 2012b. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah (diffuseur) et la baie Kwé : mission de janvier et février 2012. Contrat Vale-NC/AEL n° 2684, Rapport AEL 110308-VI-11, 53p.
- Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM. 2018a. Suivi des densités de flux verticaux des particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne. Campagne 2^{eme} semestre 2018. Période de mai à juillet 2018. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L06375/0001, 64p.
- Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM. 2018b. 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^{er} semestre 2018. Période de mars à avril 2018. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L06375/0001, 65p.

LISTE DES FIGURES

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 BLANC REPRÉSENTE LE DIFFUSEUR).....	10
FIGURE 2 : EMPREINTE TYPE DE L'EFFLUENT PAR MARQUAGE À LA RHODAMINE-WT POUR DES CONDITIONS COURANTOLOGIQUES DE MI-MARÉES DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET DE VIVE-EAU (DROITE) AU NIVEAU DE LA STATION ST60-SW.	11
FIGURE 3 : CUMUL JOURNALIER DE PRÉCIPITATIONS ET ÉVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIÈRE) POUR LA PÉRIODE DU 15 MARS AU 01 MAI 2019.	14
FIGURE 4 : CUMUL JOURNALIER DE PRÉCIPITATIONS ET ÉVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIÈRE) POUR LA PÉRIODE DU 17 MAI AU 03 JUILLET 2019.	15
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.	17
FIGURE 6 : POURCENTAGE MASSIQUE EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) ET FRACTIONS GROSSIÈRES ($\varnothing > 41 \mu\text{M}$) DANS LES 12 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST06-KW1.	17
FIGURE 7 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 4 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST06-KW1.	18
FIGURE 8 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 12 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST06-KW1.	20
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 8 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST15.	21
FIGURE 10 : POURCENTAGE MASSIQUE EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) ET FRACTIONS GROSSIÈRES ($\varnothing > 41 \mu\text{M}$) DANS LES 8 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST15.....	21
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 4 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST15.	22
FIGURE 12 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 8 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST15.....	23
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.....	24
FIGURE 14 : POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) ET EN FRACTIONS GROSSIÈRES ($\varnothing > 41 \mu\text{M}$) DANS LES 12 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST60-NE.	24
FIGURE 15 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 4 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST60-NE.	25
FIGURE 16 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 10 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST60-NE.	26
FIGURE 17 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESURÉES DANS LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 10 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST15.....	31
FIGURE 18 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESURÉES DANS LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) DES 10 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À ST60-NE.	33
FIGURE 19 : 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.	34
FIGURE 20 : DIAGRAMME COMBINÉ DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIÈRES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRÉCIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIÉGÉES, DE LA COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) ET FRACTIONS GROSSIÈRES ($\varnothing > 41 \mu\text{M}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESURÉS DANS LES FRACTIONS FINES PIÉGÉES À ST06-KW1.	38

FIGURE 21 : DIAGRAMME COMBINÉ DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIÈRES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRÉCIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIÉGÉES, DE LA COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) ET FRACTIONS GROSSIÈRES ($\varnothing > 41 \mu\text{M}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS CA/FE MESURÉS DANS LES FRACTIONS FINES PIÉGÉES À ST15. 40

FIGURE 22 : DIAGRAMME COMBINÉ DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIÈRES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRÉCIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIÉGÉES, DE LA COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{M}$) ET FRACTIONS GROSSIÈRES ($\varnothing > 41 \mu\text{M}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS CA/FE MESURÉS DANS LES FRACTIONS FINES PIÉGÉES À ST60-NE..... 42

FIGURE 23 : COMPILATION DES MOYENNES \pm ÉCART-TYPES 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-KW1. 44

FIGURE 24 : COMPILATION DES MOYENNES \pm ÉCART-TYPES 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..... 45

FIGURE 25 : COMPILATION DES MOYENNES \pm ÉCART-TYPES 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. 46

LISTE DES TABLEAUX

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.	9
TABLEAU 2 : DÉTAIL DE COLLECTE DES ÉCHANTILLONS PAR LES PIÈGES SÉQUENTIELS MOUILLÉS À St06-KW1, St15 ET St60-NE. ...	11
TABLEAU 3 : COMPILATION DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES LORS DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DE PIÈGES SÉQUENTIELS AUX STATIONS St06-KW1, St15 ET St60-NE.....	16
TABLEAU 4 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES DE LA MES TOTALE, DES POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) ET DES TENEURS EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIÈGES SÉQUENTIELS À St06-KW1.....	17
TABLEAU 5 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DANS LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES MES PIÉGÉES LORS DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIÈGES SÉQUENTIELS À St06-KW1. ...	19
TABLEAU 6 : COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À St06-KW1.....	19
TABLEAU 7 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES DE LA MES TOTALE, DES POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) ET DES TENEURS EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIÈGES SÉQUENTIELS À St15.	21
TABLEAU 8 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.	22
TABLEAU 9 : COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À St15.	22
TABLEAU 10 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES DE LA MES TOTALE, DES POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) ET DES TENEURS EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIÈGES SÉQUENTIELS À St60-NE.....	24
TABLEAU 11 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.	25
TABLEAU 12 : COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À St60-NE.	26
TABLEAU 13 : 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.....	27
TABLEAU 14 : 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.....	27
TABLEAU 15 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.....	28
TABLEAU 16 : 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.	29
TABLEAU 17 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.....	29
TABLEAU 18 : 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 St15.	30
TABLEAU 19 : MATRICE DE CORRÉLATION INTER-ÉLÉMENTS DES CONCENTRATIONS DE MÉTAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 8 PRÉLÈVEMENTS DU PIÈGE SÉQUENTIEL À St15.	30

TABLEAU 20 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.	30
TABLEAU 21 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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 SÉQUENTIELS À PARTICULES À ST15.....	31
TABLEAU 22 : 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.....	32
TABLEAU 23 : 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.....	32
TABLEAU 24 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.	32
TABLEAU 25 : COMPILATION DES DONNÉES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.....	34
TABLEAU 26 : COMPILATION DES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.	35
TABLEAU 27 : COMPILATION DES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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-KW1.....	43
TABLEAU 28 : COMPILATION DES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.....	44
TABLEAU 29 : COMPILATION DES MOYENNES ± ÉCART-TYPES 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.....	45

ANNEXES

ANNEXE 1.....	55
ANNEXE 2.....	56
ANNEXE 3.....	58
ANNEXE 4.....	62
ANNEXE 5.....	64

ANNEXE 1

METHODOLOGIE

IMMERSION DES PIÈGES A SÉDIMENT SÉQUENTIELS

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 m² de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui sont grésés sur une ligne de mouillage. 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.

GRANULOMÉTRIE

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.

MINÉRALOGIE

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'ALS Metallurgy basé en Australie.

DOSAGE ÉLÉMENTAIRE

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 (g/m²/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					Prélèvement	GORO				
	Date	RR	FXI	DXI	Régime		Date	RR	FXI	DXI	Régime
1	15/03/2019	1,6	10,5	50	NE	7	08/04/2019	1,8	12,1	80	E
	16/03/2019	0,4	9,9	90	E		09/04/2019	5,0	14,0	140	SE
	17/03/2019	11,2	12,1	100	E		10/04/2019	2,2	9,4	110	ESE
	18/03/2019	3,2	10,0	100	E		11/04/2019	0,0	7,0	130	SE
2	19/03/2019	10,4	13,9	60	ENE	8	12/04/2019	2,0	11,9	120	ESE
	20/03/2019	0,0	12,3	90	E		13/04/2019	2,4	17,1	130	SE
	21/03/2019	1,4	12,9	100	E		14/04/2019	2,6	14,7	110	ESE
	22/03/2019	2,8	11,2	70	ENE		15/04/2019	20,0	16,2	130	SE
3	23/03/2019	0,0	11,4	110	ESE	9	16/04/2019	39,6	15,4	130	SE
	24/03/2019	1,0	13,0	70	ENE		17/04/2019	0,4	12,5	140	SE
	25/03/2019	0,0	13,0	90	E		18/04/2019	5,6	14,9	80	E
	26/03/2019	0,0	11,9	110	ESE		19/04/2019	36,1	16,5	80	E
4	27/03/2019	0,0	13,9	90	E	10	20/04/2019	22,6	19,7	90	E
	28/03/2019	0,0	12,3	110	ESE		21/04/2019	150,0	21,9	120	ESE
	29/03/2019	1,4	10,8	110	ESE		22/04/2019	6,0	-	-	-
	30/03/2019	0,0	11,5	90	E		23/04/2019	3,0	-	-	-
5	31/03/2019	0,0	9,7	120	ESE	11	24/04/2019	-	-	-	-
	01/04/2019	0,4	9,1	90	E		25/04/2019	-	-	-	-
	02/04/2019	8,5	10,3	140	SE		26/04/2019	-	-	-	-
	03/04/2019	10,1	7,8	110	E		27/04/2019	-	-	-	-
6	04/04/2019	23,2	7,0	130	SE	12	28/04/2019	3,0	-	-	-
	05/04/2019	0,4	13,3	110	ESE		29/04/2019	1,0	-	-	-
	06/04/2019	0,0	9,9	220	SO		30/04/2019	8,0	-	-	-
	07/04/2019	2,0	10,2	170	S		01/05/2019	-	-	-	-

- : données manquantes.

Prélèvement	GORO					Prélèvement	GORO				
	Date	RR	FXI	DXI	Régime		Date	RR	FXI	DXI	Régime
1	17/05/2019	14,9	16,0	140	SE	7	10/06/2019	5,8	9,0	170	S
	18/05/2019	0,0	14,5	120	ESE		11/06/2019	2,4	8,2	140	SE
	19/05/2019	2,6	13,6	120	ESE		12/06/2019	0,2	9,8	180	S
	20/05/2019	0,0	17,1	130	SE		13/06/2019	0,0	9,1	150	SSE
2	21/05/2019	0,0	13,6	90	E	8	14/06/2019	0,0	8,1	120	ESE
	22/05/2019	0,0	14,7	140	SE		15/06/2019	0,0	7,7	210	SSO
	23/05/2019	4,4	12,8	100	E		16/06/2019	0,0	7,4	110	ESE
	24/05/2019	7,7	12,6	140	SE		17/06/2019	5,4	9,0	70	ENE
3	25/05/2019	1,2	7,3	90	E	9	18/06/2019	0,0	6,6	90	E
	26/05/2019	0,0	8,7	100	E		19/06/2019	0,0	7,0	100	E
	27/05/2019	8,3	8,7	60	ENE		20/06/2019	0,0	8,8	110	ESE
	28/05/2019	0,0	9,3	200	SSO		21/06/2019	0,0	9,1	150	SSE
4	29/05/2019	0,0	7,3	100	E	10	22/06/2019	0,0	6,6	90	E
	30/05/2019	0,0	7,5	100	E		23/06/2019	4,0	10,5	70	ENE
	31/05/2019	0,0	9,3	240	OSO		24/06/2019	8,5	9,7	40	NE
	01/06/2019	0,0	9,8	190	S		25/06/2019	1,2	8,0	90	E
5	02/06/2019	0,8	8,3	180	S	11	26/06/2019	2,4	20,5	110	ESE
	03/06/2019	0,4	8,4	40	NE		27/06/2019	45,4	13,8	90	E
	04/06/2019	0,0	9,3	10	N		28/06/2019	14,7	14,3	150	SSE
	05/06/2019	0,2	6,8	220	SO		29/06/2019	4,8	15,0	200	SSO
6	06/06/2019	0,0	10,0	190	S	12	30/06/2019	5,6	11,1	260	O
	07/06/2019	0,4	11,9	190	S		01/07/2019	2,6	6,3	200	SSO
	08/06/2019	0,0	12,5	140	SE		02/07/2019	5,0	7,4	100	E
	09/06/2019	0,2	13,1	120	ESE		03/07/2019	0,0	5,7	180	S

ANNEXE 3

CARACTERISATION DES MES

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

Période de collecte	Prélèvement	St06-KW1	St60-NE	Période de collecte	Prélèvement	St15
		Masse Ech. Total (g)	Masse Ech. Total (g)			Masse Ech. Total (g)
15 Mars - 19 Mars	001	5,22	0,68	17 Mai - 21 Mai	001	NT
19 Mars - 23 Mars	002	8,90	4,59	21 Mai - 25 Mai	002	NT
23 Mars - 27 Mars	003	4,79	2,62	25 Mai - 29 Mai	003	NT
27 Mars - 31 Mars	004	3,84	1,46	29 Mai - 02 June	004	NT
31 Mars - 04 Avril	005	11,13	1,30	02 June - 06 June	005	0,48
04 Avril - 08 Avril	006	13,43	2,16	06 June - 10 June	006	1,68
08 Avril - 12 Avril	007	9,21	1,97	10 June - 14 June	007	5,15
12 Avril - 16 Avril	008	15,97	3,71	14 June - 18 June	008	2,20
16 Avril - 20 Avril	009	16,95	8,23	18 June - 22 June	009	2,47
20 Avril - 24 Avril	010	19,18	7,27	22 June - 26 June	010	1,23
24 Avril - 28 Avril	011	8,18	7,66	26 June - 30 June	011	5,43
28 Avril - 01 Mai	012	6,71	4,29	30 June - 03 Juil.	012	5,91

NT : échantillons non traitée (n° non-conformité : 66)

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

Période de collecte	Prélèvement	St06-KW1	St60-NE	Période de collecte	Prélèvement	St15
		% CO3 total	% CO3 total			% CO3 total
15 Mars - 19 Mars	001	56	71	17 Mai - 21 Mai	001	ND
19 Mars - 23 Mars	002	61	74	21 Mai - 25 Mai	002	ND
23 Mars - 27 Mars	003	61	75	25 Mai - 29 Mai	003	ND
27 Mars - 31 Mars	004	59	76	29 Mai - 02 June	004	ND
31 Mars - 04 Avril	005	57	75	02 June - 06 June	005	34
04 Avril - 08 Avril	006	57	67	06 June - 10 June	006	35
08 Avril - 12 Avril	007	59	71	10 June - 14 June	007	37
12 Avril - 16 Avril	008	59	74	14 June - 18 June	008	38
16 Avril - 20 Avril	009	58	75	18 June - 22 June	009	30
20 Avril - 24 Avril	010	57	76	22 June - 26 June	010	39
24 Avril - 28 Avril	011	58	76	26 June - 30 June	011	44
28 Avril - 01 Mai	012	57	75	30 June - 03 Juil.	012	39

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

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

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
04 Avril - 08 Avril	006	6	47	35	7	4	1	0
12 Avril - 16 Avril	008	5	38	37	10	7	4	0
16 Avril - 20 Avril	009	5	45	35	8	5	2	0
20 Avril - 24 Avril	010	7	52	33	6	2	0	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
10 June - 14 June	007	13	58	21	4	3	2	0
18 June - 22 June	009	11	59	21	4	3	2	1
26 June - 30 June	011	14	68	18	0	0	0	0
30 June - 03 Jul.	012	10	59	24	4	2	1	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
16 Avril - 20 Avril	009	6	44	35	8	5	2	0
20 Avril - 24 Avril	010	7	52	33	6	3	0	0
24 Avril - 28 Avril	011	7	51	33	6	3	0	0
28 Avril - 01 Mai	012	7	49	33	6	4	1	0

Composition minéralogique des fractions fines de MES collectées à St06-KW1, ST15 et St60-NE par le piège à particules séquentiel.

St06-KW1																		
Période de collecte	Prélèvement	% Composition minéralogique																
		Goethite	Clay minerals	Kaolinite	Serpentine	Chlorite	Talc	Amphibole	Plagioclase	Quartz	Gypsum	Bassanite	Aragonite	Calcite	Mg-calcite	Siderite	Halite	Gibbsite
04 Avril - 08 Avril	6	23	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	13	11	44	1	2	2
12 Avril - 16 Avril	8	21	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	15	10	47	1	2	1
16 Avril - 20 Avril	9	22	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	14	9	44	1	5	2
20 Avril - 24 Avril	10	23	0	0	1	0	1	0	0	1	0	< 1	14	11	43	1	4	1

St15																		
Période de collecte	Prélèvement	% Composition minéralogique																
		Goethite	Clay minerals	Kaolinite	Serpentine	Chlorite	Talc	Amphibole	Plagioclase	Quartz	Gypsum	Bassanite	Aragonite	Calcite	Mg-calcite	Siderite	Halite	Gibbsite
10 June - 14 June	7	37	0	11	2	0	< 1	0	0	1	0	0	4	16	23	0	1	7
18 June - 22 June	9	32	0	11	1	1	< 1	0	0	1	0	0	5	19	23	0	0	7
26 June - 30 June	11	29	0	9	2	1	< 1	0	0	1	0	0	9	12	25	0	0	12
30 June - 03 Jul.	12	38	1	7	2	1	0	0	0	< 1	0	0	7	12	20	0	0	11

St60-NE																		
Période de collecte	Prélèvement	% Composition minéralogique																
		Goethite	Clay minerals	Kaolinite	Serpentine	Chlorite	Talc	Amphibole	Plagioclase	Quartz	Gypsum	Bassanite	Aragonite	Calcite	Mg-calcite	Siderite	Halite	Gibbsite
16 Avril - 20 Avril	9	1	0	0	< 1	0	0	0	0	1	< 1	0	17	22	55	1	1	1
20 Avril - 24 Avril	10	1	0	0	0	0	0	0	0	< 1	< 1	0	18	22	56	1	1	0
24 Avril - 28 Avril	11	4	< 1	0	0	0	0	0	0	< 1	< 1	0	20	21	54	0	0	1
28 Avril - 01 Mai	12	3	0	0	< 1	0	0	0	0	1	0	0	17	23	55	0	0	0

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 à particules séquentiel.

St06-KW1							
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
15 Mars - 19 Mars	001	206 197	79,2	3 660	137 622	712	1 751
19 Mars - 23 Mars	002	225 368	66,9	3 009	117 028	598	1 437
23 Mars - 27 Mars	003	226 801	63,2	2 885	109 075	563	1 375
27 Mars - 31 Mars	004	216 401	65,9	3 019	114 553	588	1 439
31 Mars - 04 Avril	005	209 295	71,6	3 304	128 414	665	1 582
04 Avril - 08 Avril	006	210 456	71,1	3 274	133 539	657	1 554
08 Avril - 12 Avril	007	217 879	68,3	3 110	118 610	625	1 486
12 Avril - 16 Avril	008	217 551	69,2	3 067	122 838	634	1 455
16 Avril - 20 Avril	009	214 038	64,0	2 801	99 693	591	1 347
20 Avril - 24 Avril	010	206 924	69,2	2 926	109 483	633	1 484
24 Avril - 28 Avril	011	208 894	75,9	3 211	138 672	679	1 631
28 Avril - 01 Mai	012	207 601	77,7	3 326	155 121	697	1 651

St15							
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
17 Mai - 21 Mai	001	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21 Mai - 25 Mai	002	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25 Mai - 29 Mai	003	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29 Mai - 02 June	004	ND	ND	ND	ND	ND	ND
02 June - 06 June	005	120 160	159	6 322	176 758	1 484	2 101
06 June - 10 June	006	124 195	157	6 173	174 922	1 697	2 021
10 June - 14 June	007	132 209	143	5 674	170 501	1 649	1 874
14 June - 18 June	008	137 140	146	5 790	164 258	1 736	1 933
18 June - 22 June	009	109 283	105	4 083	119 801	1 232	1 411
22 June - 26 June	010	138 385	148	5 835	172 234	1 756	1 982
26 June - 30 June	011	158 199	128	5 197	143 577	1 463	1 564
30 June - 03 Juil.	012	142 011	148	5 687	153 779	1 627	1 711

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

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

St60-NE								
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)						
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
15 Mars - 19 Mars	001	263 571	23,1	698	24 197	298	414	3 775
19 Mars - 23 Mars	002	277 258	16,7	440	17 914	175	289	5 577
23 Mars - 27 Mars	003	281 163	15,3	418	16 791	149	274	3 335
27 Mars - 31 Mars	004	284 860	15,7	395	17 126	192	278	2 761
31 Mars - 04 Avril	005	279 327	16,9	465	18 559	193	306	3 327
04 Avril - 08 Avril	006	250 769	15,1	394	16 408	168	263	3 402
08 Avril - 12 Avril	007	265 703	14,6	393	16 013	164	260	4 555
12 Avril - 16 Avril	008	274 789	15,0	382	16 115	192	260	4 336
16 Avril - 20 Avril	009	279 049	14,7	384	16 274	201	261	4 876
20 Avril - 24 Avril	010	281 976	14,4	366	15 683	175	251	4 734
24 Avril - 28 Avril	011	284 345	16,5	421	17 527	189	285	4 094
28 Avril - 01 Mai	012	279 844	18,6	497	19 541	213	323	3 976

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 ² /j)	Flux élémentaire (mg ps/m ² /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
15 Mars - 19 Mars	001	26,1	5 382	2,07	96	3 592	18,6	45,7
19 Mars - 23 Mars	002	44,5	10 018	2,97	134	5 202	26,6	63,9
23 Mars - 27 Mars	003	24,0	5 432	1,51	69	2 612	13,5	32,9
27 Mars - 31 Mars	004	19,2	4 155	1,27	58	2 199	11,3	27,6
31 Mars - 04 Avril	005	55,7	11 647	3,98	184	7 146	37,0	88,0
04 Avril - 08 Avril	006	67,2	14 132	4,77	219,8	8 967	44,1	104,4
08 Avril - 12 Avril	007	46,1	10 033	3,15	143	5 462	28,8	68,4
12 Avril - 16 Avril	008	79,9	17 371	5,53	245	9 809	50,6	116,2
16 Avril - 20 Avril	009	84,8	18 140	5,42	237	8 449	50,1	114,2
20 Avril - 24 Avril	010	95,9	19 844	6,64	281	10 499	60,7	142,3
24 Avril - 28 Avril	011	41,0	8 554	3,11	131	5 679	27,8	66,8
28 Avril - 01 Mai	012	33,6	6 965	2,61	112	5 204	23,4	55,4

St15								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	Flux élémentaire (mg ps/m ² /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
17 Mai - 21 Mai	001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21 Mai - 25 Mai	002	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25 Mai - 29 Mai	003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29 Mai - 02 June	004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
02 June - 06 June	005	2,35	282	0,37	15	415	3,5	4,9
06 June - 10 June	006	8,40	1 043	1,32	51,9	1 469	14,3	17,0
10 June - 14 June	007	25,75	3 404	3,68	146	4 390	42,5	48,3
14 June - 18 June	008	11,00	1 509	1,61	64	1 807	19,1	21,3
18 June - 22 June	009	12,35	1 350	1,30	50	1 480	15,2	17,4
22 June - 26 June	010	6,10	844	0,90	36	1 051	10,7	12,1
26 June - 30 June	011	27,10	4 287	3,47	141	3 891	39,6	42,4
30 June - 03 Juil.	012	29,55	4 196	4,37	168	4 544	48,1	50,6

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

St60-NE								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	Flux élémentaire (mg ps/m ² /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
15 Mars - 19 Mars	001	3,45	909	0,08	2	83	1,0	1,4
19 Mars - 23 Mars	002	23,0	6 363	0,38	10	411	4,0	6,6
23 Mars - 27 Mars	003	13,1	3 683	0,20	5	220	2,0	3,6
27 Mars - 31 Mars	004	7,30	2 079	0,11	3	125	1,4	2,0
31 Mars - 04 Avril	005	6,55	1 830	0,11	3	122	1,3	2,0
04 Avril - 08 Avril	006	10,9	2 721	0,16	4,3	178	1,8	2,9
08 Avril - 12 Avril	007	9,9	2 617	0,14	4	158	1,6	2,6
12 Avril - 16 Avril	008	18,6	5 097	0,28	7	299	3,6	4,8
16 Avril - 20 Avril	009	41,2	11 483	0,60	16	670	8,3	10,7
20 Avril - 24 Avril	010	36,4	10 250	0,52	13	570	6,4	9,1
24 Avril - 28 Avril	011	38,3	10 890	0,63	16	671	7,2	10,9
28 Avril - 01 Mai	012	21,5	6 003	0,40	11	419	4,6	6,9