



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

CAMPAGNE 2^{EME} SEMESTRE 2019



« Chimie de l'environnement et
Modélisation hydrodynamique »

Rapport semestriel
Juillet à septembre
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 de particules dans le
Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony**

Campagne 2^{eme} semestre 2019

Période de juillet à septembre 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 de particules dans le Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 2 ^{ème} semestre 2019. Période de juillet à septembre 2019.		
Auteurs	Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM.		
Résumé	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 2^{ème} semestre 2019 (juillet-septembre) 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). Cette campagne, caractérisée par une pluviométrie très faible 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. 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. En effet, les concentrations en métaux latéritiques sont globalement supérieures à celles recueillies lors de l'état de référence. Pour la St15, ceux-ci restent relativement invariables. 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 n'en contiendraient pas.		
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Kumar-Roiné S.	SKR	02/01/2020
Vérificateur 1	Fernandez JM.	JMFA	04/01/2020
Vérificateur 2	Pousse C.	CP	07/01/2020
Approbateur	Fernandez JM.	JMFA	04/01/2020
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V1.0	Rapport final		09/01/2019
COPIE – DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Vessiller Y.	Vale-NC, Département Environnement		

Ce rapport est cité comme suit : Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM. 2020. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 2^{ème} semestre 2019. Période de juillet à septembre 2019. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L15599/0002, 60p.

TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION	7
A.	CONTEXTE	7
B.	OBJECTIFS.....	7
II.	METHODOLOGIE	9
A.	SITE D'ETUDE	9
B.	ECHANTILLONNAGE	9
C.	CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES	11
III.	RESULTATS.....	12
A.	PARAMETRES METEOROLOGIQUES	12
B.	CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION.....	12
C.	COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION.....	24
IV.	INTERPRETATION	32
A.	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES.....	32
B.	CALCUL DES FLUX DES MATIERES.....	39
V.	SYNTHESE	43

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.*, 2014).

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.

B. OBJECTIFS

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

- En Baie Kwé, suite aux différents travaux d'excavation et d'ouverture progressive de la mine ;
- Dans la Rade Nord de Prony avec l'activité de l'usine ;
- Dans le Canal de la Havannah, en raison du rejet d'effluents industriels traités, *via* le diffuseur.

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. Toutefois, des réactions de précipitation se produisent dès la sortie de l'unité de traitement des effluents et permettent la formation de concrétions qui adhèrent sur la paroi du tuyau. De récents événements ont conduit à constater l'accumulation de plaques de nature carbonatée.

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 **deuxième semestre de 2019** et comparés aux campagnes précédentes des mouillages semestriels réalisées entre 2011-2019 et celles de l'état de référence en 2006/2007 ([Kumar-Roiné et al., 2019](#) ; [Fernandez et al., 2007](#)).

II. METHODOLOGIE

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

A. SITE D'ETUDE

Les sites instrumentés sont les suivants (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

B. ECHANTILLONNAGE

Les opérations de terrain ont été réalisées à bord du Slavko (Casy Express) au cours de 2 sorties. La pose et la récupération des lignes de mouillage équipées chacune d'un piège à particules séquentiel ont été effectuées, respectivement, le 30 juillet 2019 et le 19 septembre 2019 aux stations St06-KW1, St15 et St60-NE. Les 3 pièges ont été immergés avec une simple ligne de mouillage lestée.

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, à la verticale du mouillage, 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 (Derex et al., 2008).

La collecte des particules a été programmée pour débuter le 31 juillet 2019 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 16 septembre à 24h00 ; soit 48 jours plus tard. Au total, 12 échantillons de matériel particulaire ont été prélevés pour chacun des trois sites d'immersion soit 36 échantillons (Tableau 2).

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.

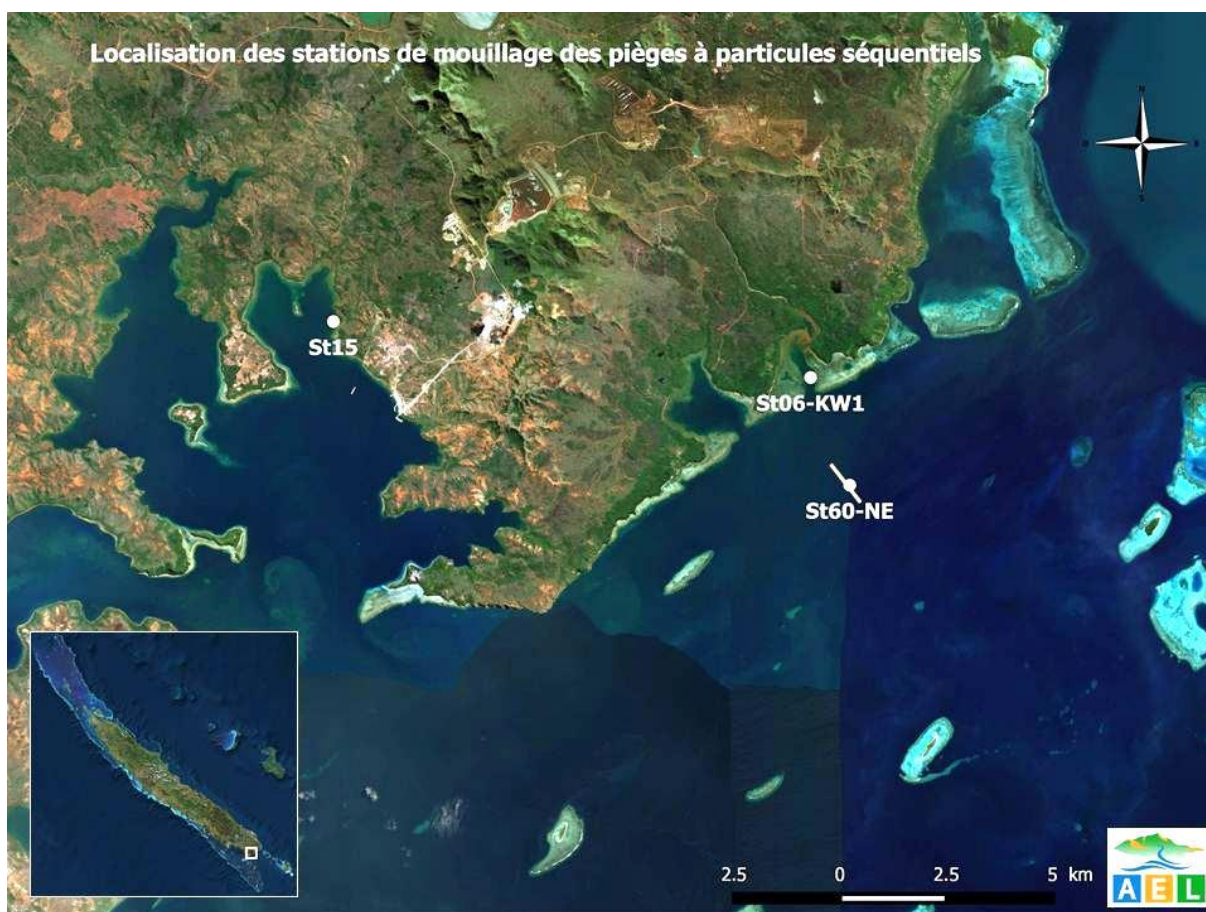


Figure 1 : Localisation géographique des stations de prélèvement du suivi des flux verticaux de particules dans la zone d'influence de l'usine de Vale-NC (le trait blanc représente le diffuseur).

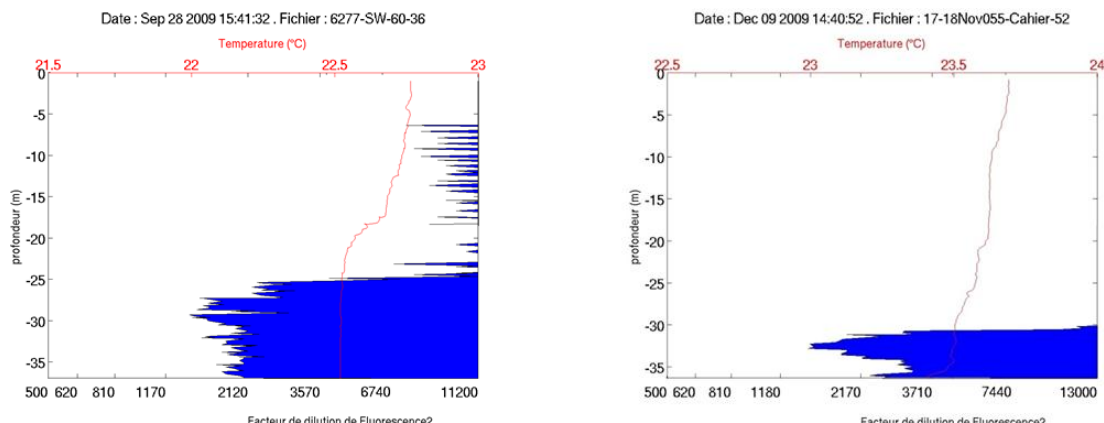


Figure 2 : Empreinte type de l'effluent par marquage à la rhodamine-WT pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

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

Période de collecte	St06-KW1	St15	St60-NE
	Prélèvement	Prélèvement	Prélèvement
31 Juillet - 04 Août	001	001	001
04 Août - 08 Août	002	002	002
08 Août - 12 Août	003	003	003
12 Août - 16 Août	004	004	004
16 Août - 20 Août	005	005	005
20 Août - 24 Août	006	006	006
24 Août - 28 Août	007	007	007
28 Août - 01 Septembre	008	008	008
01 Septembre - 05 Septembre	009	009	009
05 Septembre - 09 Septembre	010	010	010
09 Septembre - 13 Septembre	011	011	011
13 Septembre - 17 Septembre	012	012	012

C. CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant la période d'immersion des pièges (31 juillet au 16 septembre) 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, cette station météorologique étant actuellement en panne, elle ne permet pas l'acquisition des données nécessaires pour la période de l'étude.

III. RESULTATS

A. PARAMETRES METEOROLOGIQUES

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

La période du 31 juillet au 16 septembre 2019 compte 22 jours de pluies cumulant seulement 88,2 mm. La pluviométrie journalière maximale a été relevée le 27 août avec à peine 17,0 mm de pluie. Cette période est donc marquée par un temps exceptionnellement sec à l'image de la sécheresse que connaît l'ensemble du territoire (Figure 3).

Quant aux régimes de vents, les directions du vent mesurées sont restées principalement dans le secteur E à S. Toutefois, on dénombre plusieurs jours (21) où les vents ont soufflé du nord ou de l'ouest. Ces incursions ont été particulièrement soutenues lors des prélèvements 003 (08-11 août) et 008 à 010 (30 août- 06 septembre). La vitesse moyenne a été de $11,3 \pm 2,4$ m/s, oscillant entre 7,3 et 17,0 m/s ; les vents n'ont dépassé les 15 m/s qu'en 2 occasions associées aux vents de ENE et O (Figure 3).

Du point de vue historique, les précipitations cumulées lors de cette campagne aux trois stations suivies présentent un bilan pluviométrique déficitaire par rapport à celles relevées lors de la plupart des campagnes dont les cumuls ont été 2 à 10 fois plus importants. Elles demeurent toutefois comparables à celles de la campagne de l'état de référence de 2006 (54,5 mm) et des campagnes de 2015 (96 mm), 2017 (58,4 mm) et 2018 (105,2 mm ; Tableau 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).

B. CARACTERISATION DES MATIERES 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.

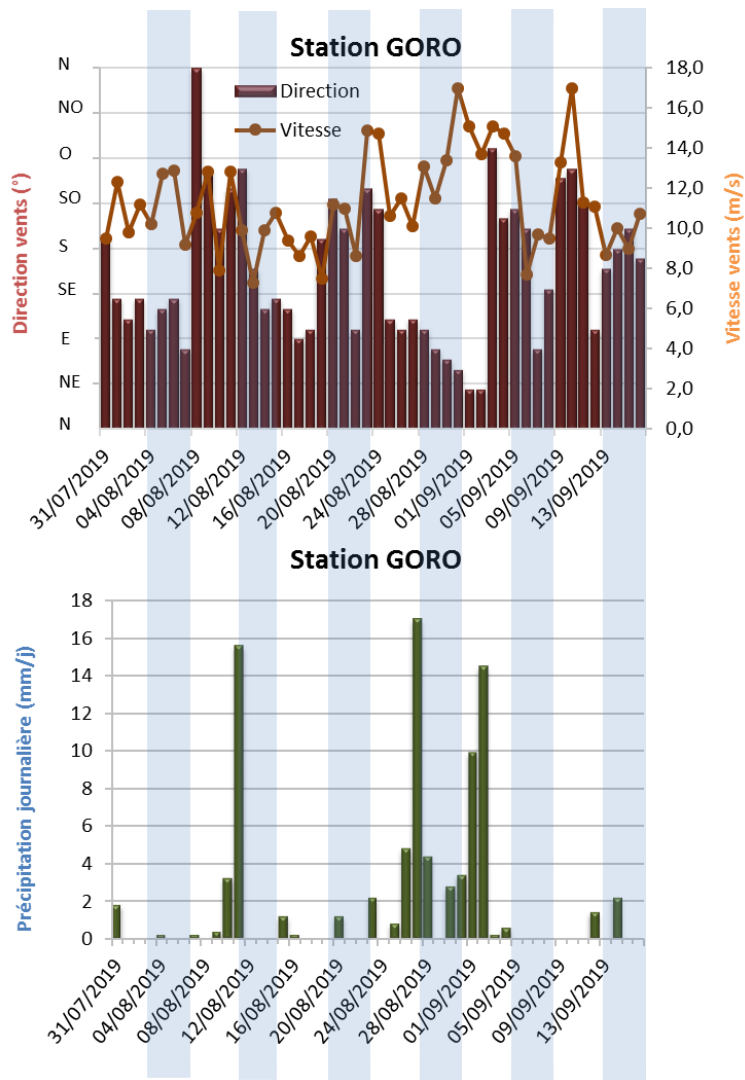


Figure 3 : Cumul journalier de précipitations et évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 31 juillet au 16 septembre 2019.

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
	1	Mars - Avr. 2007	x	x	-	272,6	ND	ND
	2	-	-	-	-	-	-	-
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
	1	Avr. - Juin 2014	-	-	x	260,9	8,3 ± 3,5	6,9 ± 2,5
	2	Sept - Oct. 2014	x	x	x	199,6	7,3 ± 2,9	5,9 ± 1,8
	1	Janv. - Mars 2015	x	x	x	242,6	12,0 ± 3,7	ND
2015	2	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
2016	1	Mai - Juil. 2016	PP	x	x	241,4	10,9 ± 3,1	6,2 ± 2,5
	1	Juil. - Sept. 2016	x	-	-	247,4	10,8 ± 2,4	6,2 ± 2,5
	2	Oct. - Nov. 2016	x	x	x	266,8	11,3 ± 2,5	5,9 ± 2,1
2017	1	Avr. - Mai 2017	x	x	x	443,2	12,5 ± 4,2	7,0 ± 3,6
	2	Sept. - Nov. 2017	x	x	x	58,4	11,0 ± 2,1	9,7 ± 13,1 (?)
2018	1	Mars - Avr. 2018	x	x	x	631,3	13,6 ± 3,3	ND
	2	Mai - Juil. 2018	x	x	x	105,2	11,1 ± 3,4 (IC)	ND
2019	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
	2	Juil. - Sept. 2019	x	x	x	88,2	11,3 ± 2,4	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 ; 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.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

Masses collectées

Avec une moyenne $3,57 \pm 2,31$ g, les masses de MES collectées se distribuent entre 0,458 g (prélèvement 003) et 7,42 g (prélèvement 012). Entre ces extrêmes, les quantités de MES piégées s'accroissent par palier (Figure 4).

Les pourcentages de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) quant à eux ne varient que peu. Ainsi, avec une moyenne de 85 ± 2 %, les MES piégées en St06-KW1 sont très majoritairement composées par de la fraction fine dont le diamètre est inférieur à $41 \mu\text{m}$ (Figure 5).

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

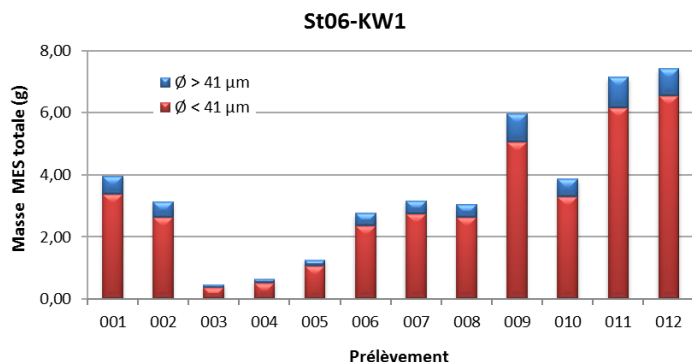


Figure 4 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

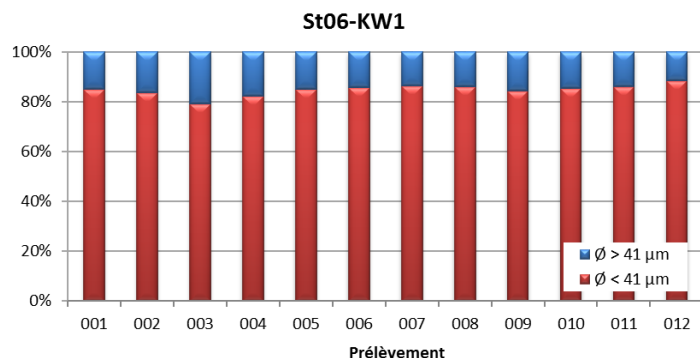


Figure 5 : Pourcentage massique en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

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	Oct. - Nov. 2015	7,77 $\pm$ 6,10	68 $\pm$ 6	47 $\pm$ 3
Mars - Avr. 2007	4,61 $\pm$ 4,47	ND	76 $\pm$ 3	Juil. - Sept. 2016	5,74 $\pm$ 4,58	80 $\pm$ 2	60 $\pm$ 6
Juil. - Août 2011	5,07 $\pm$ 4,86	ND	69 $\pm$ 4	Oct. - Nov. 2016	3,69 $\pm$ 2,78	79 $\pm$ 4	70 $\pm$ 5
Janv. - Mars 2012	7,89 $\pm$ 6,64	75 $\pm$ 3	84 $\pm$ 5	Avr. - Mai 2017	9,06 $\pm$ 8,06	75 $\pm$ 3	71 $\pm$ 4
Sept. - Oct. 2012	5,28 $\pm$ 2,62	70 $\pm$ 4	67 $\pm$ 3	Sept. - Nov. 2017	4,08 $\pm$ 4,61	83 $\pm$ 2	71 $\pm$ 6
Janv. - Févr. 2013	9,29 $\pm$ 5,71	77 $\pm$ 5	67 $\pm$ 8	Mars - Avr. 2018	19,5 $\pm$ 27,3	68 $\pm$ 6	62 $\pm$ 5
Juil. - Août 2013	11,6 $\pm$ 17,6	74 $\pm$ 4	46 $\pm$ 13	Mai - Juil. 2018	6,01 $\pm$ 4,57	84 $\pm$ 2	68 $\pm$ 3
Janv. - Mars 2014	12,1 $\pm$ 6,8	82 $\pm$ 4	84 $\pm$ 3	Mars - Mai 2019	10,3 $\pm$ 5,1	81 $\pm$ 3	58 $\pm$ 2
Sept - Oct. 2014	2,37 $\pm$ 1,68	84 $\pm$ 2	65 $\pm$ 4	Juil. - Sept. 2019	3,57 $\pm$ 2,31	85 $\pm$ 2	77 $\pm$ 3
Janv. - Mars 2015	13,6 $\pm$ 7,2	79 $\pm$ 4	73 $\pm$ 3				

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 48 ± 15 % du volume total), et les silts moyens (20-40 μm ; 31 ± 10 % du volume total). Au cours de cette campagne, la distribution des populations granulométriques montre une évolution dans le temps ; les particules fines ($\varnothing < 20 \mu\text{m}$) doublent dans le prélèvement 007 au détriment des particules grossières ($\varnothing > 20 \mu\text{m}$; Figure 6).

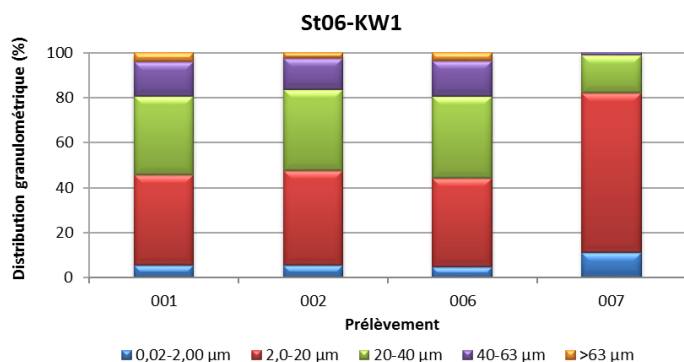


Figure 6 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Remarque : la détection de particules de $\varnothing > 41 \mu\text{m}$ dans les échantillons tamisés à $41 \mu\text{m}$ peut être le résultat d'un artéfact lié au mode de mesure/calcul de la Granulométrie Laser qui assimile des particules de forme allongée (paillettes) passant à travers la maille au moment du tamisage, à des sphères de diamètres intermédiaires.

Tableau 5 : Compilation des données moyennes $\pm$ 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.

St06-KW1					
Campagne	Distribution granulométrique (%)				
	0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
Juil. - Août 2011	8 $\pm$ 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
Juil. - Sept. 2019	7 $\pm$ 3	48 $\pm$ 15	31 $\pm$ 10	12 $\pm$ 7	3 $\pm$ 2

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 en 2018. 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 $\varnothing > 40 \mu\text{m}$. 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 $\varnothing > 63 \mu\text{m}$ (Tableau 5).

Compositions minéralogiques

La fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de MES collectées en St06-KW1 est majoritairement composée de minéraux d'origine marine, avec notamment la présence prépondérante des carbonates (Calcite et Aragonite). Décelée dans tous les prélèvements, l'Aragonite est un des constituants des coquilles d'invertébrés. Sa présence dénote de l'influence marine à cette station. A l'inverse, la Goethite ou encore Quartz et Gibbsite sont des minéraux d'origine terrestre.

Pour cette campagne, les proportions des minéraux d'origine latéritique (ex Goethite) et celles des carbonates ne varient guère entre les prélèvements et donc ne montrent pas d'alternance des influences terrigène et marine comme cela a été souvent observé à cette station (Tableau 6).

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

St06-KW1				
Prélèvement	% Calcite	% Aragonite	% Goethite	% Autres*
009	50	15	26	9
010	51	15	26	8
011	52	15	24	10
012	49	15	26	9

* : Serpentine, Talc, Quartz, Halite et Gibbsite.

Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St06-KW1 se distribuent entre 71 % et 81 % avec une moyenne de $77 \pm 3 \%$. Ainsi, les teneurs demeurent relativement homogènes au fil du temps de collecte avec des maximales collectées lors du prélèvement 003 à 005 (Figure 7).

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

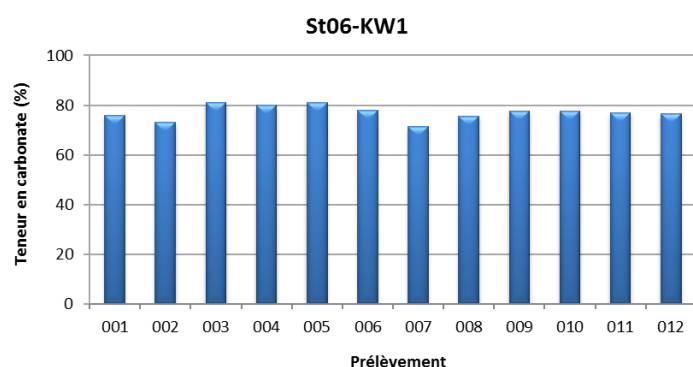


Figure 7 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

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 (éléments considérés comme étant exclusivement sous forme de CaCO_3 et MgCO_3 dans le contexte du sud calédonien). Cet écart est explicable par, d'une part, 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, et d'autre part, que le Mg des minéraux du cortège latéritique n'est pas comptabilisé.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Masses collectées

Les masses de MES collectées se distribuent entre 0,260 g et 1,71 g avec une moyenne de $0,779 \pm 0,469$ g. Les quantités maximales ont été piégées à la fin de la période de collecte (prélèvement 011 et 012 ; Figure 8). Pour le reste, elles ne dépassent pas 1,00 g.

La fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$), avec une moyenne de $97 \pm 1 \%$, est, d'une part, très largement dominante en St15 et, d'autre part, elle demeure très constante au fils du temps de collecte (Figure 9).

Parmi les différentes campagnes conduites à St15, la masse moyenne collectée en 2019 est considérable puisqu'elle est à minima 7 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 toutefois bien inférieure à celle de janvier-mars 2014 ($4,43 \pm 8,90$ g) et mars-mai 2019 ($3,07 \pm 2,11$).

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 partie haute de la gamme habituelle (Tableau 7).

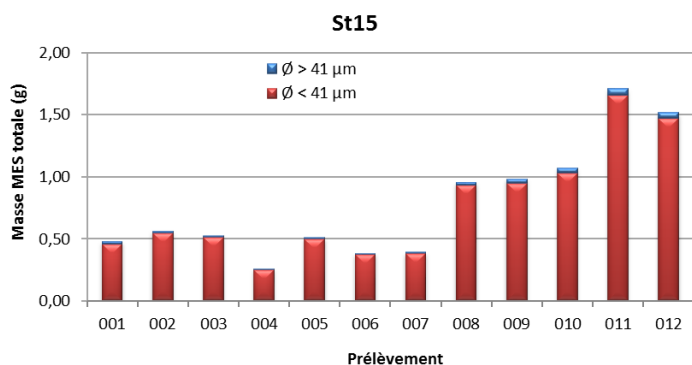


Figure 8 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\phi > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

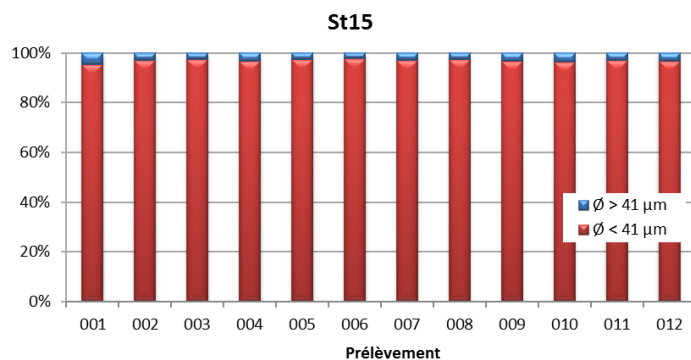


Figure 9 : Pourcentage massique en fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\phi > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Tableau 7 : Compilation des données moyennes $\pm$ écart-types de la MES totale, des pourcentages massiques en fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	Campagne	MES totaux (g)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	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	Juil. - Sept. 2019	0,779 $\pm$ 0,469	97 $\pm$ 1	38 $\pm$ 4

ND : valeur non déterminée.

Compositions granulométriques

La fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 53 $\pm$ 7 % du volume total), les silts moyens (classe 20-40 μm) composant la seconde population granulométrique (29 $\pm$ 6 % du volume total). La distribution des populations granulométriques montre une diminution des particules de $\phi < 20 \mu\text{m}$ en faveur des grains de $\phi > 20 \mu\text{m}$ pour le prélèvement de 008 et 009 (Figure 6).

Rappel : la détection de particules de $\phi > 41 \mu\text{m}$ dans les échantillons tamisés à 41 μm peut être le résultat d'un artefact lié au mode de mesure/calcul en Granulométrie Laser qui assimile les particules de forme allongée (paillettes) passant à travers la maille au moment du tamisage, à des sphères de diamètres intermédiaires.

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 première campagne (57 $\pm$ 1 % du volume total ; janvier-mars 2014). Toutefois, globalement une augmentation des grains de la classe 20-40 μm est observée au détriment de ceux de la classe 0,02-2,00 μm (Tableau 8).

Compositions minéralogiques

La fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées à St15 est majoritairement composée de minéraux d'origine latéritique dont notamment la Goethite. 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 notable entre deux influences avec les pas de collecte n'est constatée (Tableau 9).

Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) se distribuent entre 32 % et 49 % avec une moyenne de 38 $\pm$ 4 % soulignant, de ce fait, une influence prépondérante claire et constante des apports terrigènes à St15. Hors du prélèvement 003 où la valeur maximale est mesurée, les teneurs en carbonates montrent peu de tendance marquée en fonction du pas de prélèvement à cette station (Figure 11).

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les teneurs moyennes montrent une variation plus importante qu'en St06-KW1. Comme pour les deux dernières campagnes (mai-juillet 2018 ; 37 $\pm$ 2 % et mars - mai 2019 ; 37 $\pm$ 4 %), 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).

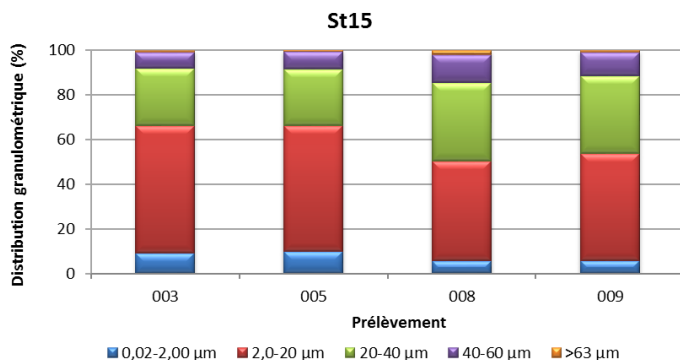


Figure 10 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St15.

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.

St15					
Campagne	Distribution granulométrique (%)				
	0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
Janv. - Mars 2014	25 $\pm$ 4	57 $\pm$ 1	15 $\pm$ 2	3 $\pm$ 2	1 $\pm$ 1
Sept. - Oct. 2014	14 $\pm$ 3	56 $\pm$ 10	18 $\pm$ 6	8 $\pm$ 4	4 $\pm$ 3
Janv. - Mars 2015	24 $\pm$ 10	55 $\pm$ 6	11 $\pm$ 6	5 $\pm$ 5	4 $\pm$ 5
Juil. - Sept. 2015	19 $\pm$ 4	53 $\pm$ 8	13 $\pm$ 2	6 $\pm$ 3	9 $\pm$ 8
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
Juil. - Sept. 2019	8 $\pm$ 2	53 $\pm$ 7	29 $\pm$ 6	9 $\pm$ 3	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*
009	28	4	37	31
010	26	4	40	29
011	29	4	40	26
012	28	5	43	25

* : Kaolinite, Serpentine, Chlorite, Muscovite, Talc, Quartz, Gypsum, Bassanite, Halite et Gibbsite.

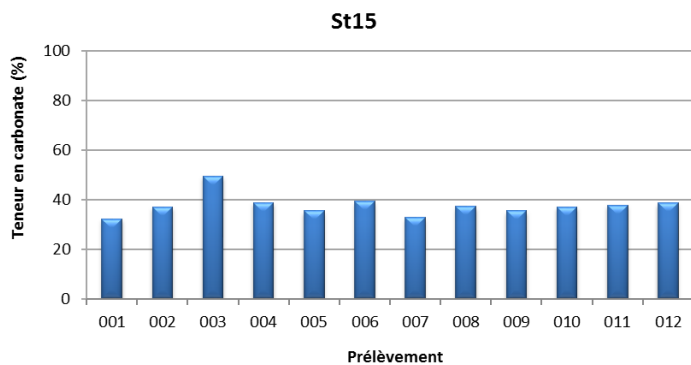


Figure 11 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Masses collectées

Les masses de MES collectées se distribuent entre 0,328 g et 4,37 g avec une moyenne de $2,00 \pm 1,51$ g. Les quantités piégées ne sont significatives qu'au début (prélèvement 001) et à la fin (011 et 012) de la période de collecte. Pour le reste, elles sont essentiellement faibles, dont le prélèvement 003 où une masse non quantifiable a été piégée (Figure 12).

Les MES sont composées majoritairement (70 ± 8 %) de fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$). En effet, tous les prélèvements présentent une part de fraction fine élevée comprise entre 57 et 90 %. Cependant, la proportion de particules de diamètre supérieur est plus importante, notamment par rapport aux 2 autres stations sauf dans le prélèvement 005 où la fraction fine constitue exceptionnellement 90 % de la masse piégée (Figure 13).

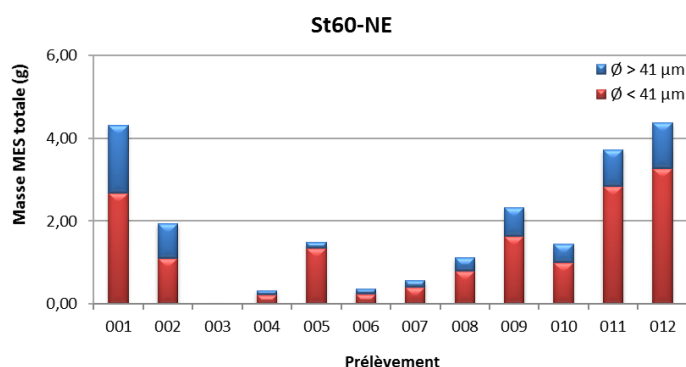


Figure 12 : Masse totale de MES piégées et composition en fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\phi > 41 \mu\text{m}$) des 11 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

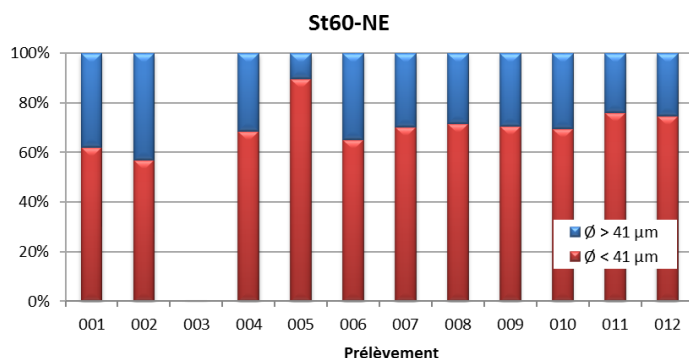


Figure 13 : Pourcentages massiques en fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et en fractions grossières ($\phi > 41 \mu\text{m}$) dans les 11 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 10 : Compilation des données moyennes $\pm$ écart-types de la MES totale, des pourcentages massiques en fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	Campagne	MES totaux (g)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)
Févr. - Mars 2007	$3,95 \pm 5,02$	ND	96 ± 1	Juil. - Sept. 2015	$1,98 \pm 1,84$	61 ± 6	91 ± 6
Juil. - Août 2011	ND	ND	ND	Mai - Juil. 2016	$3,42 \pm 2,03$	49 ± 6	76 ± 9
Janv. - Mar 2012	$1,92 \pm 1,77$	60 ± 18	80 ± 3	Oct. - Nov. 2016	$2,23 \pm 3,52$	28 ± 13	91 ± 7
Sept. - Oct. 2012	$0,820 \pm 1,079$	39 ± 9	85 ± 1	Avr. - Mai 2017	$3,11 \pm 2,84$	61 ± 5	91 ± 2
Janv. - Mars 2013	$2,51 \pm 2,71$	49 ± 14	77 ± 1	Sept. - Nov. 2017	$1,46 \pm 1,27$	59 ± 4	86 ± 2
Juil. - Août 2013	$1,17 \pm 1,42$	41 ± 7	75 ± 4	Mars - Avr. 2018	$3,66 \pm 3,62$	62 ± 6	77 ± 1
Avr. - Juin 2014	$1,49 \pm 1,01$	74 ± 8	83 ± 2	Mai - Juil. 2018	$1,67 \pm 1,27$	58 ± 4	81 ± 1
Sept. - Oct. 2014	$1,63 \pm 1,82$	60 ± 4	83 ± 2	Mars - Mai 2019	$3,83 \pm 2,63$	63 ± 6	74 ± 3
Janv. - Mars 2015	$3,19 \pm 3,11$	63 ± 8	88 ± 3	Juil. - Sept. 2019	$2,00 \pm 1,51$	70 ± 8	91 ± 4

ND : valeur non déterminée.

La moyenne en masse totale et en pourcentage de fraction fine obtenues de 2019 figurent parmi les valeurs les plus hautes de toutes les campagnes du suivi (Tableau 10).

Compositions granulométriques

La fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de la MES collectée en St60-NE, est composée de particules dont le mode est situé dans la classe 2,0-20 μm (silts fins) et cependant une forte représentation dans la classe 20-40 μm (silts moyens), avec des moyennes de $48 \pm 5 \%$ et $33 \pm 4 \%$ du volume total, respectivement. La distribution des populations granulométriques montre une évolution dans le temps, pour les particules de la classe $\phi < 20 \mu\text{m}$ qui ont augmenté dans les prélèvements 001, 002 et 008 au dépend des particules des classes $\phi > 20 \mu\text{m}$ (Figure 14).

Rappel : comme pour les stations St06-KW1 et St15, la détection de particules de $\phi > 41 \mu\text{m}$ dans les échantillons des fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) peut être le fait du mode de calcul employé en Granulométrie Laser qui assimile es particules de forme allongée (paillettes) passant à travers la maille au moment du tamisage, à des sphères de diamètre intermédiaires.

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 ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 ($85 \pm 2 \%$). La présence de traces de Goethite traduit une influence lointaine de termes sources terrigènes, mais globalement ces observations soulignent les influences marines constantes et quasi exclusives régnantes, à cette station (Tableau 12).

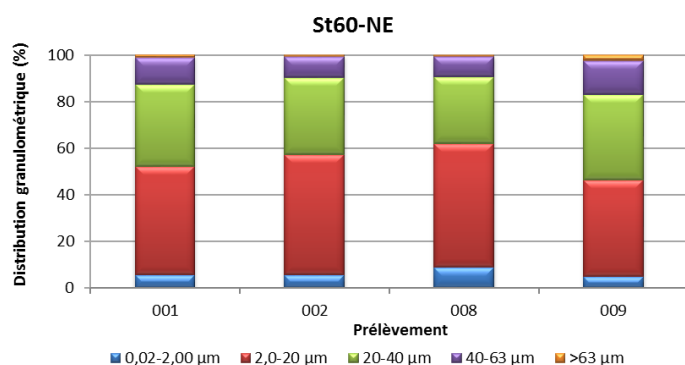


Figure 14 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

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
Juil. - Sept. 2019	6 $\pm$ 2	48 $\pm$ 5	33 $\pm$ 4	11 $\pm$ 3	1 $\pm$ 1

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
001	67	19	7	7
009	69	18	8	2
011	66	18	12	2
012	67	17	12	1

* : Talc, Quartz, Sidérite et Halite.

Teneurs en carbonates

En raison du manque de matière dans les pas de collecte 003, 004 et 006, les analyses n'ont été possibles que sur les 9 autres échantillons.

Les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées se distribuent entre 86 % et 98 %. Avec une moyenne de 91 ± 4 %, les teneurs n'évoluent guère avec les pas de prélèvements, sauf dans le godet 001 et 002 où l'on observe les valeurs maximales (Figure 15).

Entre les différentes campagnes à St60-NE, les teneurs moyennes ne descendent que rarement sous les 80 %. Pour cette campagne, elle est parmi les plus hautes obtenues et demeure comparable à celle de la campagne de l'état de référence en 2007 (96 ± 1 %). A l'inverse, elle est plus haute qu'en 2013 (77 ± 1 % et 75 ± 4 %). Ces observations soulignent que, par rapport aux 2 autres stations, les apports en carbonates à St60-NE sont constants et quasi exclusivement d'origine marine (Tableau 10).

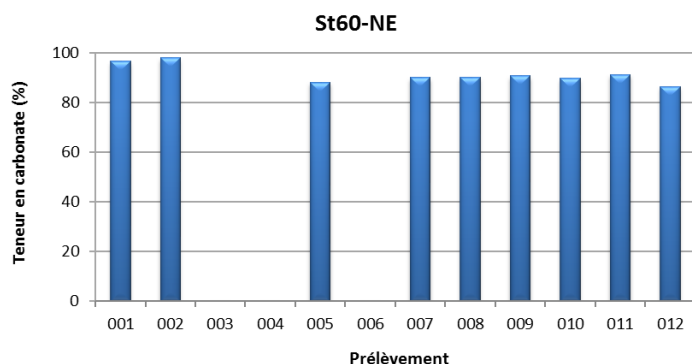


Figure 15 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 9 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

C. COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

Les valeurs des concentrations en métaux totaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) et en éléments majeurs (Ca et S) analysées dans les fractions fines de MES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 faibles concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées au début de la période d'immersion, à savoir dans le godet 002 tandis que le prélèvement 008 montre les valeurs les plus fortes. Inversement, pour le Ca, les teneurs minimales et maximales sont, respectivement, mesurées dans le godet 007 et 002.

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 $R^2 > 0,9352$. Elle montre aussi une tendance négative, plus qu'une corrélation, entre le Ca et les 5 métaux, puisque R^2 est 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	263 036	61,2	2 637	90 663	559	1 329
Max	302 509	82,9	3 392	118 857	756	1 715
Moyenne	285 951	71,1	2 981	104 633	675	1 504
Ecart-type	11 598	6,3	223	7 814	57	116
CV (%)	4	9	7	7	8	8

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.

St06-KW1						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,0000	-0,4043	-0,4093	-0,2652	-0,1900	-0,4093
Co		1,0000	0,9882	0,9397	0,9535	0,9892
Cr			1,0000	0,9703	0,9437	0,9970
Fe				1,0000	0,9352	0,9649
Mn					1,0000	0,9490
Ni						1,0000

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 $\pm$ 22 923	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
Juil. – Sept. 2019	285 951 $\pm$ 11 598	71,1 $\pm$ 6,3	2 981 $\pm$ 223	104 633 $\pm$ 7 814	675 $\pm$ 57	1 504 $\pm$ 116

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, les concentrations moyennes sont variables d'une année à l'autre. Les comparaisons montrent que les concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni obtenues en 2019 sont légèrement supérieures aux valeurs enregistrées en 2007 pour l'état de référence. Quant à la concentration moyenne en Ca, elle est comparable à celle mesurée en 2007. Comparées à la campagne précédente (mars-mai 2019), les concentrations en métaux obtenues pour cette campagne sont quasi-identiques tandis que celle en Ca est 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).

Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St06-KW1 se distribuent entre 2,35 et 3,07 avec une moyenne de $2,75 \pm 0,25$; les plus forts ratios ont été obtenus dans les godets 002-005 et les plus faibles dans les godets 007 et 008. Ainsi, l'évolution temporelle des ratios souligne l'alternance de l'influence relative des pôles marin (Ca) et terrigène (Fe) en fonction d'un certain nombre de facteurs hydro-climatiques (Tableau 16).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, à l'exception de celle 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 campagne de mai-juillet 2018 une hausse qui la rapprochait du taux initial établi lors de l'État de Référence. Depuis, ce ratio indique une augmentation de l'empreinte terrigène (Tableau 17).

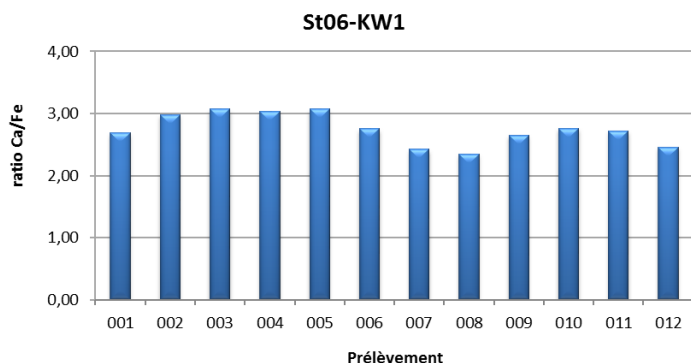


Tableau 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Tableau 17 : Compilation des données moyennes $\pm$ écart-types de normalisation du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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	Juil. – Sept. 2019	2,75 $\pm$ 0,25

2. Rade Nord de Prony (St15)

Concentrations en métaux et calcium

Parmi les 3 stations étudiées, la St15 se distingue par les concentrations moyennes en Co, Cr, Fe, Mn et Ni les plus hautes, et la concentration moyenne en Ca la plus basse. En ce qui concerne l'évolution des concentrations dans le temps, elles sont peu dispersées ; les plus faibles concentrations sont relevées dans les godets 003 et 004 pour tous les métaux sans exception (Tableau 18).

La matrice de corrélation confirme une similarité d'évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe et Ni ($R^2 > 0,9090$). En revanche, pour le Mn, le coefficient de corrélation est moins marqué (Tableau 19), ce qui pourrait indiquer un terme source composite pour cet élément (le Mn lié aux carbonates), 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 (État de Référence). D'autre part, elles sont parmi les plus basses qui aient été mesurées jusqu'à présent ; baisse qui est constatée depuis la campagne de mai-juillet 2018 pour laquelle les concentrations sont environ 2 à 3 fois plus faibles comparativement aux campagnes de janvier-mars 2014 et 2015. Cette dernière est celle qui présente les concentrations métalliques les plus hautes. Quant aux concentrations moyennes en Ca, elles suivent la tendance inverse ; depuis la campagne de mai-juillet 2018, elles représentent les maximales enregistrées jusqu'à présent (Tableau 20).

Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St15, relativement variables, se distribuent entre 0,599 et 1,06 avec une moyenne de $0,740 \pm 0,124$; les maximales correspondant aux prélèvements 003 et 004 (Figure 16).

Au regard des différentes campagnes conduites à St15, les ratios restent faibles et 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. *A contrario*, on notera que la présente et les deux précédentes campagnes (mai-juillet 2018 et 2019) se singularisent par le ratio maximal (Tableau 21), donc l'influence terrigène minimale depuis 2007.

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	109 263	117	4 779	148 109	1 145	1 690
Max	175 916	157	5 962	190 824	1 603	2 131
Moyenne	131 226	145	5 578	178 479	1 432	1 998
Ecart-type	16 568	12	389	11 854	142	140
CV (%)	13	8	7	7	10	7

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 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

St15						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,0000	-0,3769	-0,5822	-0,2800	0,0114	-0,5075
Co		1,0000	0,9565	0,9640	0,8387	0,9834
Cr			1,0000	0,9090	0,6685	0,9930
Fe				1,0000	0,7808	0,9431
Mn					1,0000	0,7384
Ni						1,0000

Tableau 20 : 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 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
Juil. – Sept. 2019	131 226 $\pm$ 16 568	145 $\pm$ 12	5 578 $\pm$ 389	178 479 $\pm$ 11 854	1 432 $\pm$ 142	1 998 $\pm$ 140

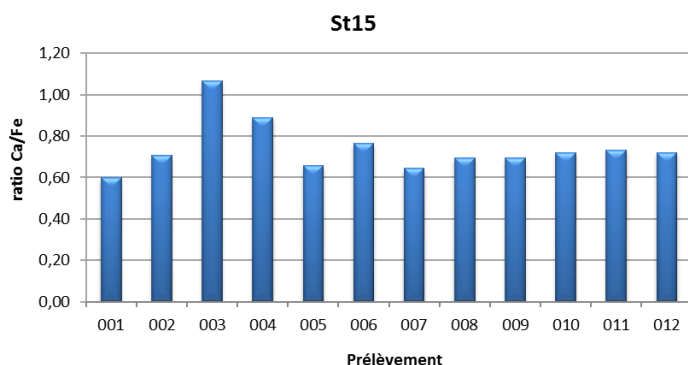


Figure 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St15.

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)	Avr. – Mai 2017	0,448 $\pm$ 0,115
Janv. - Mars 2014	0,050 $\pm$ 0,081	Sept. – Nov. 2017	0,418 $\pm$ 0,107
Sept. – Oct. 2014	0,401 $\pm$ 0,023	Mars – Avr. 2018	0,280 $\pm$ 0,064
Janv. - Mars 2015	0,273 $\pm$ 0,106	Mai – Juil. 2018	0,855 $\pm$ 0,061
Juil. - Sept. 2015	0,481 $\pm$ 0,041	Mai – Juil. 2019	0,843 $\pm$ 0,136
Mai - Juil. 2016	0,459 $\pm$ 0,323	Juil. - Sept. 2019	0,740 $\pm$ 0,124
Oct. – Nov. 2016	0,464 $\pm$ 0,052		

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 pour le Ca contrairement à celles des métaux ; les plus faibles quantités en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées dans les particules piégées dans le godet 001 et 002, tandis que les plus fortes s'observent de manière homogène 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 9 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

St60-NE						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	323 298	15,7	548	20 439	166	276
Max	369 719	23,2	746	27 855	375	396
Moyenne	342 444	20,9	690	25 572	250	361
Ecart-type	14 907	2,7	71	2 471	61	42
CV (%)	4	13	10	10	25	12

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 9 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

St60-NE						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,0000	-0,8815	-0,9031	-0,8679	-0,6103	-0,9228
Co		1,0000	0,9839	0,9844	0,8256	0,9826
Cr			1,0000	0,9920	0,7730	0,9929
Fe				1,0000	0,7978	0,9840
Mn					1,0000	0,7293
Ni						1,0000

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
Juil. - Sept. 2019	342 444 $\pm$ 14 907	20,9 $\pm$ 2,7	690 $\pm$ 71	25 572 $\pm$ 2 471	250 $\pm$ 61	361 $\pm$ 42

ND : valeur non déterminée.

Bien qu'un peu moins robuste en raison du nombre d'échantillons réduit, la matrice de corrélation montre une similarité certaine dans l'évolution des concentrations massiques des métaux latéritiques suivis. Cette corrélation est très marquée entre Co, Cr, Fe et Ni ($R^2 > 0,9826$), eux-mêmes inversement corrélés au Ca ($R^2 < -0,8815$) ; ce résultat dénote clairement de l'alternance des pôles terrigène et marin dans le Canal de la Havannah. Pour le Mn, la tendance diffère ; les corrélations sont plus faibles ($0,7293 < R^2 < 0,8256$) ce qui

indique que pour cet élément une source auxiliaire (comme les formes carbonatées) régit sa concentration (Tableau 23).

Entre les différentes campagnes conduites à St60-NE, les concentrations moyennes des éléments varient peu, plus particulièrement pour le Ca. En effet, les comparaisons montrent que la concentration moyenne en Ca obtenue lors de cette campagne 2019 sont semblables depuis celle enregistrée en 2007 pour l'État de Référence. Inversement, celles des métaux latéritiques reviennent à la hausse ; elles rejoignent les valeurs mesurées lors de la plupart des campagnes antérieures à mars-avril 2018. Cette évolution est toutefois à pondérer puisque toutes ces concentrations restent inférieures à celles de juillet-août 2013, campagne qui à ce jour montre les valeurs les plus hautes à St60-NE (Tableau 24).

Normalisation du calcium par le fer

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St60-NE se distribuent entre 11,9 et 18,1 avec une moyenne de $13,6 \pm 2,1$; les plus hautes valeurs ayant été obtenues lors de 2 premiers pas de collecte (001 et 002) après laquelle le ratio diminue et reste aux minimales enregistrées jusqu'au dernier pas de collecte. Ces ratios élevés confirment que l'influence marine demeure largement dominante à la station St60-NE, corroborant ainsi les résultats des teneurs en carbonates (Figure 17).

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).

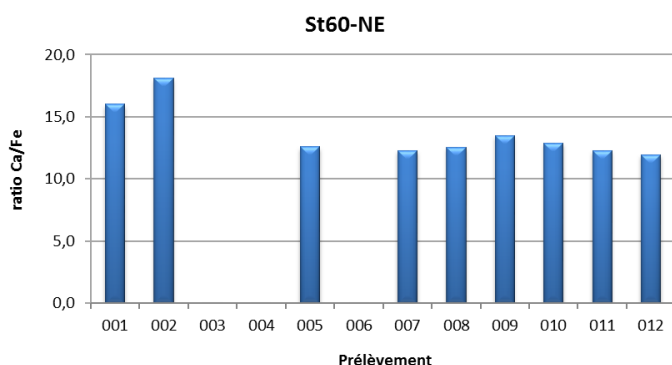


Figure 17 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 9 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Tableau 25 : Compilation des données moyennes $\pm$ écart-types de normalisation du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 $\pm$ 1,5
Juil. - Août 2011	ND	Mai - Juil. 2016	12,5 $\pm$ 2,4
Janv. - Mar 2012	14,3 $\pm$ 2,4	Oct. - Nov. 2016	19,8 $\pm$ 1,2
Sept. - Oct. 2012	19,0 $\pm$ 2,7	Avr. - Mai 2017	18,4 $\pm$ 2,4
Janv. - Mars 2013	11,8 $\pm$ 1,0	Sept. - Nov. 2017	14,4 $\pm$ 1,1
Juil. - Août 2013	8,99 $\pm$ 2,26	Mars - Avr. 2018	11,5 $\pm$ 0,6
Avr. - Juin 2014	17,2 $\pm$ 1,8	Mai - Juil. 2018	15,4 $\pm$ 0,9
Sept. - Oct. 2014	12,5 $\pm$ 1,8	Mars - Mai 2019	15,8 $\pm$ 1,9
Janv. - Mars 2015	11,7 $\pm$ 2,2	Juil. - Sept. 2019	13,6 $\pm$ 2,1

ND : valeur non déterminée.

Concentrations en soufre

Les concentrations en S dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St60-NE se distribuent entre 3230 mg/kg ps et 5959 mg/kg ps avec une moyenne de 3928 ± 797 mg/kg ps. La plus forte et la plus faible concentration ont été mesurées, respectivement, dans les godets 001 et 010 (Figure 18).

Il est à noter que la relation est peu significative entre le S et le Ca ($R^2 = 0,5839$) ; les apports en carbonates naturels du milieu semblent largement gouverner ce rapport et ne permettent 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 été du même ordre de grandeur voire bien inférieures (mai-juillet 2018). Cette campagne et celle d'avril-juin 2014 et de mars-mai 2019 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 001, 009, 011 et 012 de cette station n'ont pas montré la présence de minéraux gypseux dans les MES piégées (Annexe 3).

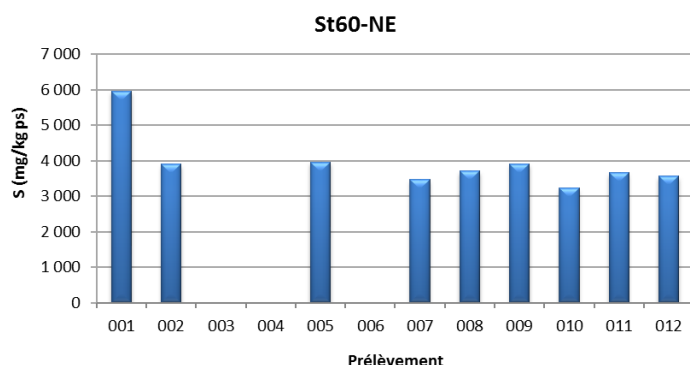


Figure 18 : Concentrations en soufre mesurées dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 9 prélèvements de MES collectés par le piège séquentiel à particules à St60-NE.

Tableau 26 : Compilation des moyennes $\pm$ écart-types des concentrations en soufre obtenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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	$2\,639 \pm 503$
Sept. - Oct. 2012	$3\,001 \pm 131$	Avr. - Mai 2017	$2\,808 \pm 118$
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	$2\,887 \pm 74$	Juil. - Sept. 2019	$3\,928 \pm 797$

ND : valeur non déterminée.

IV. INTERPRETATION

A. INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

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 19, Figure 20 et Figure 21 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, cette station étant actuellement en panne, les enregistrements par la station météorologique de GORO (usine) ont été pris en considération. 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, dus aux effets de relief.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

L'immersion du piège à particules séquentiel à St06-KW1 du 31 juillet au 17 septembre, avec un pas de temps de 96 h, a permis de révéler les observations suivantes (Figure 19) :

- Du 31 juillet-03 août (001) au 08-11 août (003) – les quantités de MES piégées décroissent significativement de l'échantillon 001 au 003, mais les concentrations de Ni et les ratios Ca/Fe n'évoluent qu'imperceptiblement. Les prélèvements 001 et 002 correspondent à une période relativement stable et soutenue des alizés (9 à 13 m/s journalier) ce qui semble avoir favorisé les flux des particules légèrement plus carbonatées probablement dû à la remise en suspension des MES de fond de baie. Par la suite, les régimes de vents deviennent instables et basculent dans le secteur O puis N, lesquels n'ont pas une grande incidence sur les flux des particules dans cette baie puisque les MES piégées dans l'échantillons 003 chutent à des niveaux infinitésimaux.
- Du 12-15 (005) au 28-31 août (008) – dans un premier temps (004 et 005), les quantités de MES piégées augmentent timidement tandis que les concentrations de Ni et les ratios Ca/Fe restent très stables. Ensuite, les quantités de MES augmentent et sont accompagnées par la hausse des teneurs en Ni, les ratios Ca/Fe suivant l'évolution inverse. Ces 5 pas de collecte sont caractérisés par des précipitations faibles cumulant à 38,0 mm et des régimes de vents subissant plusieurs rotations, associées à l'intensification de leur force (7 à 15 m/s journalier). Ces conditions météorologiques, notamment l'incursion de vents dans le secteur SSO-SO lors du prélèvement 006 et 007, semblent inverser la tendance en faveur des apports terrigènes. Par ailleurs, l'influence terrigène continue à augmenter dans l'échantillon 008 en dépit d'une nouvelle rotation de vents, cette fois-ci dans le secteur NE et de vitesse culminant à 17 m/s.
- Du 01-04 septembre (009) au 13-16 septembre (012) – dans l'échantillon 009 les quantités de MES doublent. Elles continuent à augmenter mais de manière plus progressive jusqu'à la conclusion de la

période de collecte (012). La hausse sur la quantité de MES piégées dans l'échantillons 009 est aussitôt ressentie avec une baisse et une hausse des concentrations en Ni et des ratios Ca/Fe, respectivement. Bien que cet épisode reste peu significatif, durant les prélèvements 009 à 011, on assiste à une instauration de l'influence marine qui est à lier à la rotation de vents dans le secteur O à plusieurs reprises ; cette orientation poussant des eaux marines du platier. A la conclusion de la période de collecte, on constate que le phénomène s'inverse en faveur des apports terrigènes dans l'échantillon 012, probablement dû au retour des vents des secteurs SSO puis S.

Pour cette campagne, marquée par une pluviométrie faible 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 (milieu 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 (côte nord). 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 avant de l'évacuer dans le canal de la Havannah.
- **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 plus 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).

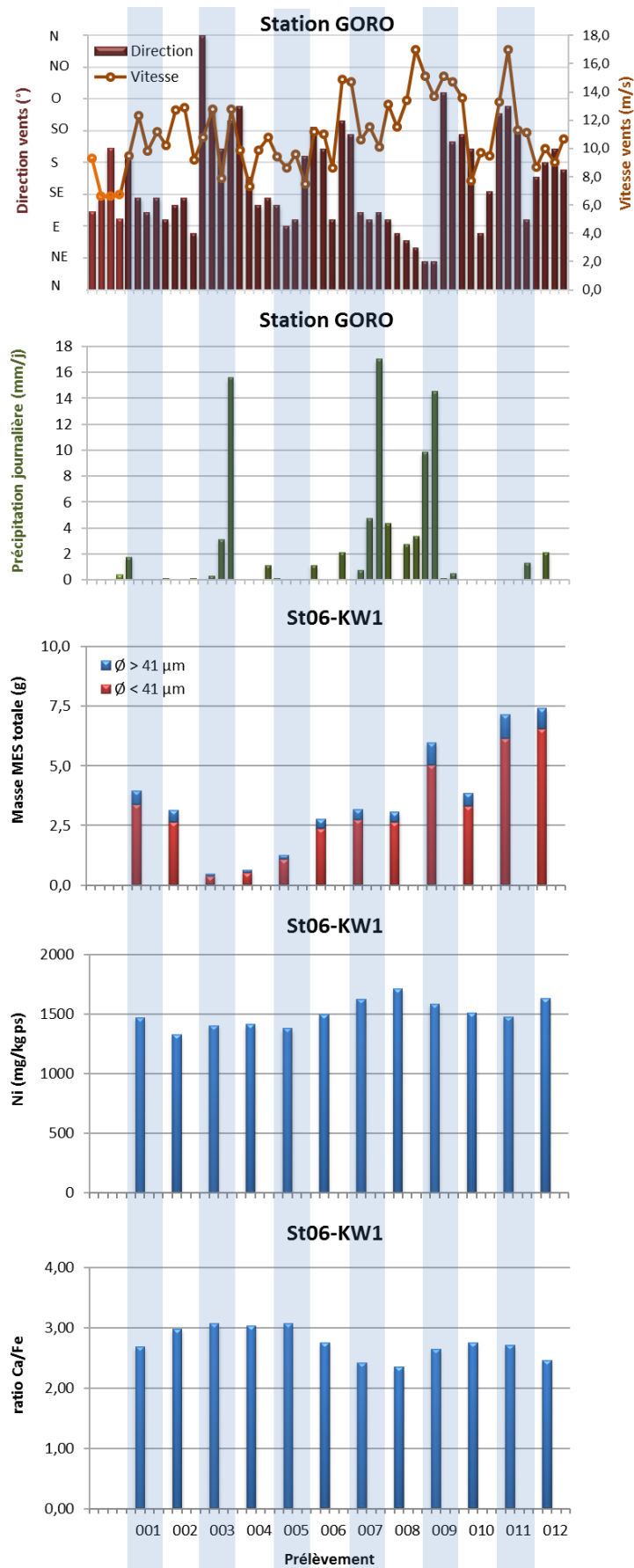


Figure 19 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\phi < 41 \mu m$) et fractions grossières ($\phi > 41 \mu m$) ainsi que des concentrations en 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 31 juillet au 17 septembre avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes (Figure 20) :

- Du 31 juillet-03 août (001) au 08-11 août (003) – les quantités de MES piégées entre ces trois pas de collecte restent stables. En comparaison, les concentrations de Ni et des ratios Ca/Fe évoluent de manière significative montrant un regain à l'empreinte marine certaine. Ces prélèvements correspondent à une période relativement sèche avec un cumul de précipitation nul à faible (0 à 15,6 mm journalier). A l'exception de l'échantillon 003, ce laps de temps est également associé à un régime d'alizés relativement stables et soutenus (9 à 13 m/s journalier). Ensuite, le vent tourne dans le secteur N puis à l'Ouest où il se maintient. Bien que cette instabilité n'ait pas eu d'impact sur la quantité de MES piégées, elle semble avoir influencé les flux des particules carbonatées.
- Du 12-15 (005) au 13-16 septembre (012) – L'instabilité dans les directions de vents continue à perdurer tout au long de cette période de collecte. En effet, à plusieurs reprises, le vent entame des rotations brutales et se renforce, dépassant le 15 m/s journalier et les averses deviennent également moins rares (cumul de 66,8 mm). Cette instabilité a des conséquences sur la quantité de MES piégées qui reste stable de l'échantillon 004 au 007, puis augmente par pallier jusqu'au dernier pas de collecte (012). En comparaison, les évolutions des concentrations de Ni et des ratios Ca/Fe sont faibles, sauf dans les échantillons 004 et 005 où l'influence terrigène est de nouveau observée. Par la suite, les valeurs demeurent invariables jusqu'à la conclusion de la période de collecte.

Pour cette campagne, marquée par une pluviométrie très faible et quelques épisodes venteux, 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. D'après les résultats des précédentes campagnes, les vents du secteur SE plaqueraient le panache le long de la ligne de côte nord de la baie, alors que les forts vents d'un large secteur S (de SO à S) peuvent remettre en suspension les particules légères déposées par faible profondeur (3 m) le long de la ligne de côte ainsi que 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 et la ligne de côte, 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.

Note : Les diverses observations effectuées lors de précédentes missions montrent que la variabilité des masses collectées à cette station 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.

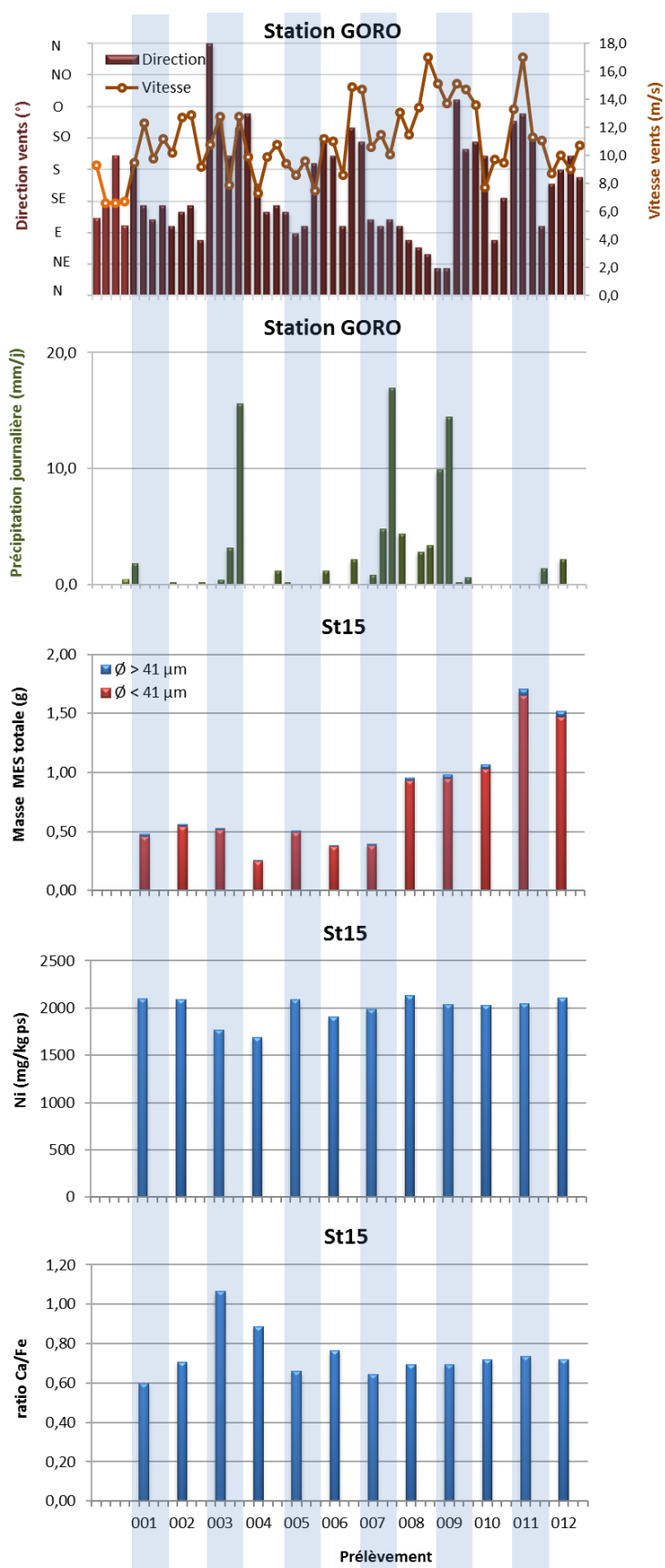


Figure 20 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\phi < 41 \mu m$) et fractions grossières ($\phi > 41 \mu m$) ainsi que des concentrations en 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 31 juillet au 17 septembre, avec un pas de temps de 96 h a permis de révéler les observations suivantes (Figure 21) :

- Du 31 juillet-03 août (001) au 24-27 août (006) – lors de 2 premiers pas de collecte (001 et 002), les conditions météorologiques restent relativement stables (régimes alizé modérés et faibles précipitations). Puis, plusieurs rotations de vents se succèdent. En dépit de cette instabilité, les quantités de MES piégées diminuent pour atteindre des niveaux infinitésimaux ne permettant pas la mise en place de la totalité des analyses pour les échantillons 002, 004 et 006. L'exception est faite pour l'échantillon 005 où les vents reviennent dans le secteur E-S et les masses MES piégées augmentent. Les concentrations de Ni quant à elles suivent la tendance inverse ; les teneurs augmentent tandis que les ratios Ca/Fe diminuent. Ces deux indicateurs traduisent l'accroissement temporaire de l'influence terrigène.
- Du 28-31 août (007) au 13-16 septembre (012) – les quantités de MES piégées augmentent, sextuplant entre les prélèvements 007 et 012. Comparativement, les évolutions des concentrations de Ni et des ratios de Ca/Fe sont bien modiques et uniformes. Ainsi, les importantes fluctuations observées pour la quantité de MES lors de ces prélèvements devraient être la conséquence de phénomènes tiers. 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 ; l'action d'une courantologie intense dans le Canal de la Havannah, comme le montre la modélisation hydrodynamique (Derex et Douillet, 2008), en est probablement la cause.

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 majoritairement 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 peut être envisagé comme suit :

- **L'origine terrigène** ne serait pas directement liée aux précipitations ou de manière indirecte et 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 (dépression fortes et cyclones).
- **L'origine marine** semble, d'après les ratios Ca/Fe obtenus, être favorisée par les vents du secteur E à SE qui balayent le complexe système de la barrière récifale et favorisent la circulation des eaux enrichies en tests de micro-organismes et débris carbonatés.

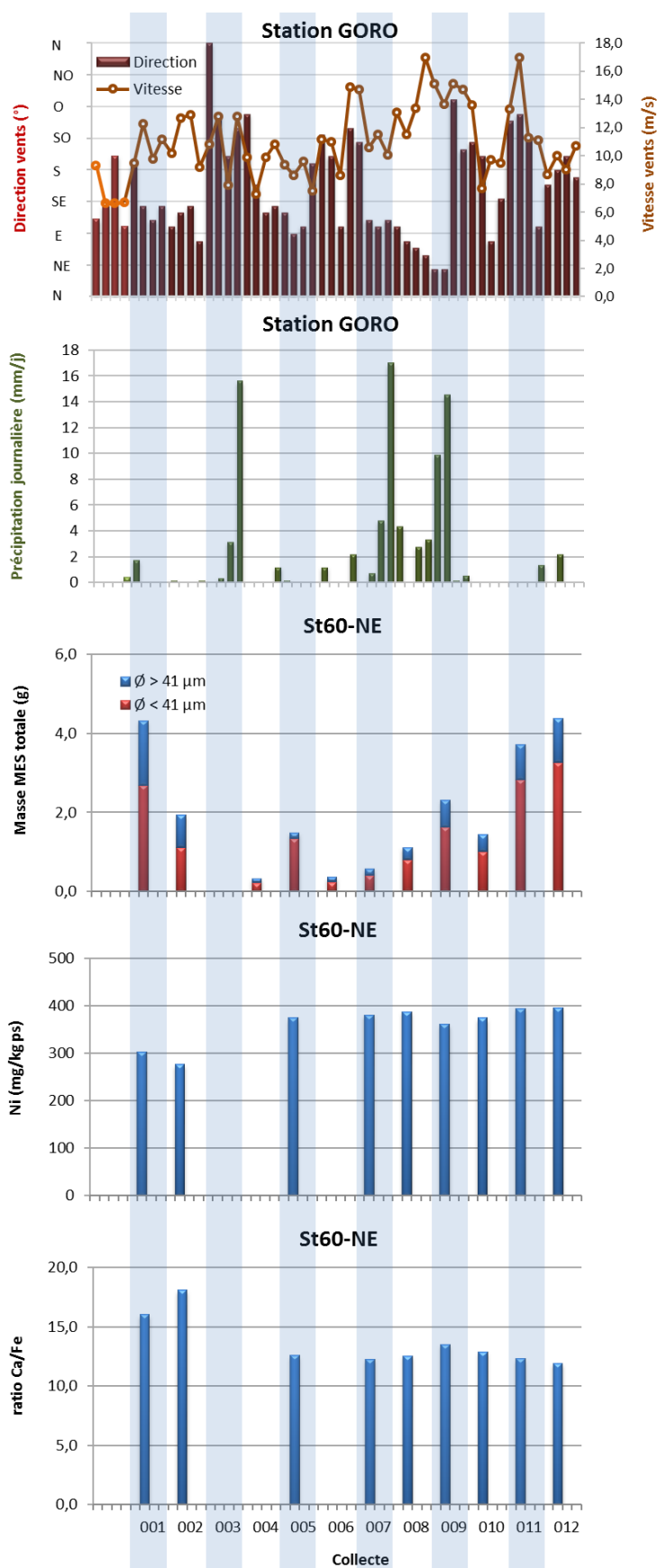


Figure 21 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\phi < 41 \mu m$) et fractions grossières ($\phi > 41 \mu m$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe mesurés dans les fractions fines piégées à St60-NE.

B. CALCUL DES FLUX DES MATIERES

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

1. Baie Kwé (St06-KW1)

Flux de matière en suspension

La densité moyenne de flux mesurée lors de cette campagne est de $17,8 \pm 11,5$ g/m²/j, valeur qui est comparable 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) ; 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	Oct. - Nov. 2015	38,8 $\pm$ 30,5	1 864
Mars - Avr. 2007	46,1 $\pm$ 44,7	1 106	Juil. - Sept. 2016	28,7 $\pm$ 22,9	1 379
Juil. - Août 2011	27,1 $\pm$ 30,0	1 299	Oct. - Nov. 2016	18,5 $\pm$ 13,9	886
Janv. - Mars 2012	39,5 $\pm$ 33,2	1 894	Avr. - Mai 2017	45,3 $\pm$ 40,3	2 173
Sept. - Oct. 2012	26,4 $\pm$ 13,1	1 267	Sept. - Nov. 2017	20,4 $\pm$ 23,0	979
Janv. - Févr. 2013	46,5 $\pm$ 28,5	2 231	Mars - Avr. 2018	97,7 $\pm$ 136,6	4 690
Juil. - Août 2013	58,1 $\pm$ 87,8	2 786	Mai - Juil. 2018	30,1 $\pm$ 22,8	1 443
Janv. - Mars 2014	60,7 $\pm$ 34,1	2 914	Mars - Mai 2019	51,5 $\pm$ 24,4	2 470
Sept - Oct. 2014	11,8 $\pm$ 8,41	569	Juil. - Sept. 2019	17,8 $\pm$ 11,5	856
Janv. - Mars 2015	66,3 $\pm$ 36,1	3 181			

Eléments métalliques

Illustré par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne 2019 sont de $27,4 \pm 18,3$ 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 et 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). Depuis, les densités sont revenues dans les gammes habituelles (Tableau 3 et Figure 22).

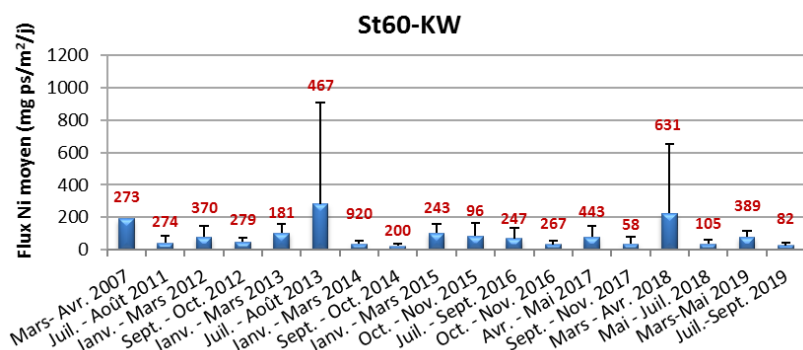


Figure 22 : Compilation des moyennes $\pm$ écart-types des flux en nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées et les cumuls des précipitations (légende en rouge) lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-KW1.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Flux de matière en suspension

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les densités moyennes de flux sont également très variables. Pour cette campagne 2019, la moyenne ($3,69 \pm 2,55$ g/m²/j) est environ 4 fois plus élevée que celle enregistrée en 2006 pour l'État de Référence.

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 franche du panache turbide 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/m²/j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m²)	Campagne	Densités de flux de MES (g/m²/j)	Cumul de masse de MES piégés (g/m²)
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	Juil. - Sept. 2019	3,69 $\pm$ 2,55	177

Éléments métalliques

Illustré par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne 2019 sont de $7,49 \pm 5,38$ 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 23) ; les apports en Ni résultent directement du lessivage du bassin versant.

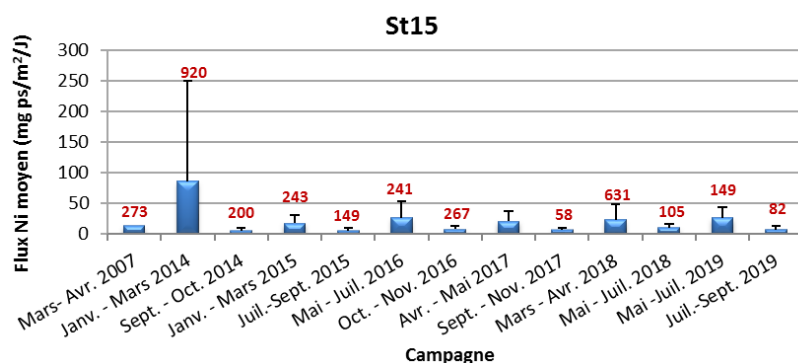


Figure 23 : Compilation des moyennes $\pm$ écart-types des flux en nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu m$) de MES piégées et les cumuls des précipitations (légende en rouge) lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Flux de matière en suspension

Les densités moyennes de flux sont moins variables à cette station. La valeur pour cette campagne est de $9,98 \pm 7,57 \text{ g/m}^2/\text{j}$, ce qui est bien inférieur aux quantités collectées en 2007 (État de Référence). A signaler que les moyennes obtenues depuis 2012 demeurent toutes inférieures à celle enregistrée en 2007 (Tableau 29).

Tableau 29 : 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-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	Juil. - Sept. 2019	$9,98 \pm 7,57$	439

ND : valeur non déterminée.

Éléments métalliques

Les flux moyens de Ni lors de cette campagne sont de $4,23 \pm 2,63 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$; valeur environ 2 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 de flux métallique peut être importante, puisqu'elle peut dépasser les 200 %, soit un facteur 3 (Figure 24).

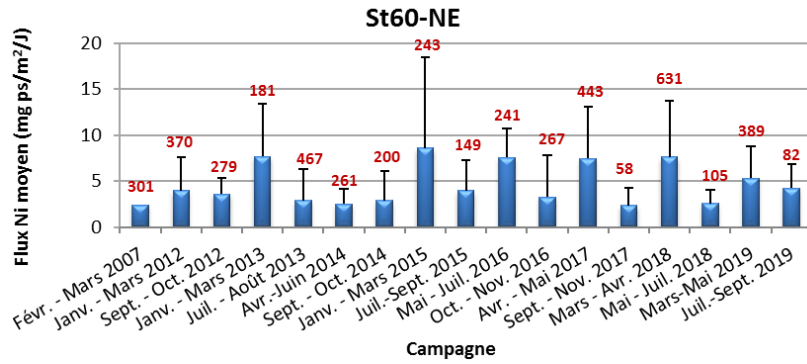


Figure 24 : Compilation des moyennes $\pm$ écart-types des flux en nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu m$) de MES piégées et les cumuls des précipitations (légende en rouge) lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.

V. SYNTHÈSE

La campagne de suivi des densités de flux verticaux de particules du deuxième semestre S2 de 2019 s'est déroulée du 31 juillet au 17 septembre aux stations St06-KW1, St15 et St60-NE. Cette campagne est caractérisée par une pluviométrie très faible et quelques 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 la formation de clapot (resuspension des particules), et occasionnellement, par l'intensité des précipitations (érosion des sols) ; 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., 2018](#)). 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 celles relevées à la même station lors des campagnes précédentes pour Fe et Mn ([Kumar-Roiné et al., 2018](#)) ; la St15 se trouve donc dans une zone de convergence de plusieurs termes sources en apports terrigènes. A cette station est souvent observé, des concentrations en métaux latéritiques (exemple de Ni) relativement 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. En outre, les précipitations atmosphériques ne sont 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, ces concentrations représentent, sans exception, avec les deux dernières campagnes, les minimales enregistrées jusqu'à 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 terme source diffus, des corrélations inter-éléments, par exemple, ne sont que rarement observées à cette station. En effet, dans ce système dit « ouvert » où interagissent plusieurs facteurs simultanément, peu, voire aucun lien pertinent ne peut être établi entre les paramètres météorologiques et les masses ou la qualité des particules piégées ; il semblerait que les particules de signature latéritique 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 d'un terme « source terrigène » ; cette observation repose sur les augmentations globales des valeurs moyennes des concentrations en métaux. Cette hausse semble liée à un ensemble de mécanismes qu'il n'est pas encore pertinent de tenter d'explicitier (érosion de la côte, contribution des rejets de l'émissaire marin ?). Il est toutefois à noter qu'à la station St60-NE, la campagne de juillet-août 2013 présente à ce jour les concentrations métalliques les plus hautes ce qui suggère, malgré tout, une certaine influence terrigène, même minime. En ce qui concerne l'évolution de gypse (CaSO_4), aucune trace d'enrichissement anormal n'est discernée pour Ca, mais les concentrations en S sont en légère hausse par rapport aux concentrations relevées aux campagnes antérieures à 2019. Les 4 analyses minéralogiques ne permettent toutefois pas de conforter l'hypothèse de la présence de minéraux gypseux à cette station. 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.

Remarque : Les analyses conduites sur les dépôts accumulés sur la conque des THOE immergés entre 14/03/2019 et 23/05/2019 dans le cadre du "suivi renforcé" montrent, par les niveaux de concentration mesurés, que ces particules diffèrent de celles collectées par les pièges à sédiment mouillés lors des deux campagnes de 2019. En effet et en accord avec Vale-NC, le passeur THOE a été immergé à 60 m (St60SW-B) au sud-ouest de l'orifice n°20 du segment resté opérationnel du diffuseur, tandis que le piège à sédiment PPS-4/5 a été aligné sur l'orifice n°100 (St60SW) pour des raisons de continuité et d'homogénéité du suivi des flux particulières ; ce segment n'ayant pas été fonctionnel, il n'a pas rejeté d'effluent. Cette constatation explique que les concentrations de Mn, élément qui caractérise les particules véhiculées par l'effluent, soient 3-4 fois plus faibles dans les particules collectées par le piège à sédiment. Par ailleurs, sensiblement plus élevée que d'ordinaire, la concentration moyenne en S semble conforter cette hypothèse. Pour les autres éléments, les différences ne sont pas perceptibles.

REFERENCES

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

Achard R., Fernandez JM., Moreton B., Haddad L., 2014. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah, la Rade Nord et la Baie Kwé : mission de janvier-mars et avril-juin 2014. Contrat Vale-NC/AEL n° 3052-2013, Rapport AEL 121205-VI-18, 70p.

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.

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. 2008. Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans le lagon sud de la Nouvelle-Calédonie. Modèle Hydrodynamique : Atlas de courants. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 83p.

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. 2018. 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 2018. Période de mars à avril 2018. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L06375/0001, 65p.

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.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS DE PRELEVEMENT DU SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LA ZONE D'INFLUENCE DE L'USINE DE VALE-NC (LE TRAIT BLANC REPRESENT LE DIFFUSEUR).....	10
FIGURE 2 : EMPREINTE TYPE DE L'EFFLUENT PAR MARQUAGE A LA RHODAMINE-WT POUR DES CONDITIONS COURANTOLOGIQUES DE MI-MAREES DE MORTE-EAU (GAUCHE) ET DE VIVE-EAU (DROITE) AU NIVEAU DE LA STATION ST60-SW.	11
FIGURE 3 : CUMUL JOURNALIER DE PRECIPITATIONS ET EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIERE) POUR LA PERIODE DU 31 JUILLET AU 16 SEPTEMBRE 2019.	13
FIGURE 4 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1.	15
FIGURE 5 : POURCENTAGE MASSIQUE EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTIONS GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DANS LES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1.	15
FIGURE 6 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1.	16
FIGURE 7 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST06-KW1.	17
FIGURE 8 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.	18
FIGURE 9 : POURCENTAGE MASSIQUE EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTIONS GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DANS LES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.....	18
FIGURE 10 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.	20
FIGURE 11 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.....	20
FIGURE 12 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DES 11 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	21
FIGURE 13 : POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET EN FRACTIONS GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DANS LES 11 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.	21
FIGURE 14 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.	22
FIGURE 15 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 9 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.	24
FIGURE 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST15.....	28
FIGURE 17 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 9 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.	30
FIGURE 18 : CONCENTRATIONS EN SOUFRE MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 9 PRELEVEMENTS DE MES COLLECTES PAR LE PIEGE SEQUENTIEL A PARTICULES A ST60-NE.	31
FIGURE 19 : DIAGRAMME COMBINE DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRECIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIEGEES, DE LA COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTIONS GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{m}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESURES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST06-KW1.	34
FIGURE 20 : DIAGRAMME COMBINE DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRECIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIEGEES, DE LA COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTIONS	

GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{M}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESURES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST15.	36
FIGURE 21 : DIAGRAMME COMBINE DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRECIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIEGEES, DE LA COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{M}$) ET FRACTIONS GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{M}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESURES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST60-NE.....	38
FIGURE 22 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{M}$) DE MES PIEGEES ET LES CUMULS DES PRECIPITATIONS (LEGENDE EN ROUGE) LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-KW1.....	40
FIGURE 23 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{M}$) DE MES PIEGEES ET LES CUMULS DES PRECIPITATIONS (LEGENDE EN ROUGE) LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST15.	41
FIGURE 24 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{M}$) DE MES PIEGEES ET LES CUMULS DES PRECIPITATIONS (LEGENDE EN ROUGE) LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-NE.....	42

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1 : LISTE ET POSITION DES STATIONS DE PRELEVEMENT DU SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LA ZONE D'INFLUENCE DE L'USINE DE VALE-NC.	9
TABEAU 2 : DETAIL DE COLLECTE DES ECHANTILLONS PAR LES PIEGES SEQUENTIELS MOUILLES A St06-KW1, St15 ET St60-NE. ...	11
TABEAU 3 : COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DE PIEGES SEQUENTIELS AUX STATIONS St06-KW1, St15 ET St60-NE.....	14
TABEAU 4 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-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 DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1.....	15
TABEAU 5 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DANS LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1....	16
TABEAU 6 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.	17
TABEAU 7 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-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 DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.	19
TABEAU 8 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.....	20
TABEAU 9 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.	20
TABEAU 10 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-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 DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE.....	21
TABEAU 11 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE.	23
TABEAU 12 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.	23
TABEAU 13 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	24
TABEAU 14 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	25
TABEAU 15 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1.....	25
TABEAU 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.	26
TABEAU 17 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A St06-KW1.....	26
TABEAU 18 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.	27
TABEAU 19 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.	27

TABLEAU 20 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.	28
TABLEAU 21 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A St15.	28
TABLEAU 22 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 9 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.	29
TABLEAU 23 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DES 9 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.	29
TABLEAU 24 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A St60-NE.	29
TABLEAU 25 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES COLLECTEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A St60-NE.	30
TABLEAU 26 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN SOUFRE OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE.	31
TABLEAU 27 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE ET DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-KW1.	39
TABLEAU 28 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTAL ET DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.	40
TABLEAU 29 : COMPILATION DES MOYENNES $\pm$ ECART-TYPES DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE ET DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE.	41

ANNEXES

ANNEXE 1.....	51
ANNEXE 2.....	52
ANNEXE 3.....	53
ANNEXE 4.....	57
ANNEXE 5.....	59

ANNEXE 1

METHODOLOGIE

IMMERSION DES PIEGES A SEDIMENT SEQUENTIELS

Les flux verticaux de particules apportées par le réseau hydrologique sont estimés par collecte de séries temporelles d'échantillons de matière en suspension (MES). Cette opération est assurée par le déploiement de pièges à particules de type séquentiel de 0,05 m² de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui sont grées 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.

GRANULOMETRIE

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

MINERALOGIE

Les déterminations minéralogiques sont effectuées par diffraction de rayons X (DRX) sur quatre échantillons de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$). Cette analyse a été confiée à l'ALS Metallurgy basé en Australie.

DOSAGE ELEMENTAIRE

Le dosage élémentaire, nécessaire pour le suivi des flux de polluants, est réalisé par la méthode dite « minéralisation eau régale ». Les échantillons de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) sont attaqués avec de l'acide à haute température en conditions hyperbares. Le Ca, Mg, S et 5 métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont analysés par ICP-OES. Des échantillons de référence (MESS-3 et PACS-2) ont été attaqués selon le même protocole pour la validation des résultats de mesures.

DOSAGE DES HCT

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

EVALUATION DES FLUX DE MES

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

ANNEXE 2

VARIABLES METEOROLOGIQUES

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

Prélèvement	GORO					Prélèvement	GORO				
	Date	RR	FXI	DXI	Régime		Date	RR	FXI	DXI	Régime
1	27/07/2019	0,0	9,3	110	ESE	7	24/08/2019	0,0	14,7	220	SO
	28/07/2019	0,0	6,6	130	SE		25/08/2019	0,8	10,6	110	ESE
	29/07/2019	0,0	6,6	200	SSO		26/08/2019	4,8	11,5	100	E
	30/07/2019	0,4	6,7	100	E		27/08/2019	17,0	10,1	110	ESE
2	31/07/2019	1,8	9,5	190	S	8	28/08/2019	4,4	13,1	100	E
	01/08/2019	0,0	12,3	130	SE		29/08/2019	0,0	11,5	80	E
	02/08/2019	0,0	9,8	110	ESE		30/08/2019	2,8	13,4	70	ENE
	03/08/2019	0,0	11,2	130	SE		31/08/2019	3,4	17,0	60	ENE
3	04/08/2019	0,2	10,2	100	E	9	01/09/2019	9,9	15,1	40	NNE
	05/08/2019	0,0	12,7	120	ESE		02/09/2019	14,5	13,7	40	NNE
	06/08/2019	0,0	12,9	130	SE		03/09/2019	0,2	15,1	280	O
	07/08/2019	0,2	9,2	80	E		04/09/2019	0,6	14,7	210	SSO
4	08/08/2019	0,0	10,8	360	N	10	05/09/2019	0,0	13,6	220	SO
	09/08/2019	0,4	12,8	260	O		06/09/2019	0,0	7,7	200	SSO
	10/08/2019	3,2	7,9	200	SSO		07/09/2019	0,0	9,7	80	E
	11/08/2019	15,6	12,8	240	OSO		08/09/2019	0,0	9,5	140	SE
5	12/08/2019	0,0	9,9	260	O	11	09/09/2019	0,0	13,3	250	OSO
	13/08/2019	0,0	7,3	160	SSE		10/09/2019	0,0	17,0	260	O
	14/08/2019	0,0	9,9	120	ESE		11/09/2019	0,0	11,3	230	SO
	15/08/2019	1,2	10,8	130	SE		12/09/2019	1,4	11,1	100	E
6	16/08/2019	0,2	9,4	120,0	ESE	12	13/09/2019	0,0	8,7	160	SSE
	17/08/2019	0,0	8,6	90	E		14/09/2019	2,2	10,0	180	S
	18/08/2019	0,0	9,6	100	E		15/09/2019	0,0	9,0	200	SSO
	19/08/2019	0,0	7,5	190	S		16/09/2019	0,0	10,7	170	S

- : données manquantes.

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	St15	St60-NE
		Masse Ech. Total (g)	Masse Ech. Total (g)	Masse Ech. Total (g)
31 Juillet - 04 Août	001	3,96	0,48	4,32
04 Août - 08 Août	002	3,13	0,56	1,94
08 Août - 12 Août	003	0,46	0,53	NT
12 Août - 16 Août	004	0,63	0,26	0,33
16 Août - 20 Août	005	1,26	0,51	1,49
20 Août - 24 Août	006	2,76	0,38	0,36
24 Août - 28 Août	007	3,17	0,39	0,57
28 Août - 01 Septembre	008	3,06	0,96	1,11
01 Septembre - 05 Septembre	009	5,98	0,98	2,32
05 Septembre - 09 Septembre	010	3,86	1,07	1,44
09 Septembre - 13 Septembre	011	7,14	1,71	3,72
13 Septembre - 17 Septembre	012	7,42	1,52	4,37

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

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	St15
		% CO3 total	% CO3 total	% CO3 total
31 Juillet - 04 Août	001	76	32	96
04 Août - 08 Août	002	73	37	98
08 Août - 12 Août	003	81	49	ND
12 Août - 16 Août	004	80	39	ND
16 Août - 20 Août	005	81	35	88
20 Août - 24 Août	006	78	39	ND
24 Août - 28 Août	007	71	33	90
28 Août - 01 Septembre	008	76	37	90
01 Septembre - 05 Septembre	009	78	36	91
05 Septembre - 09 Septembre	010	78	37	90
09 Septembre - 13 Septembre	011	77	38	91
13 Septembre - 17 Septembre	012	77	39	86

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
31 Juillet - 04 Août	001	5	40	35	9	6	4	0
04 Août - 08 Août	002	5	42	36	9	5	3	0
20 Août - 24 Août	006	5	39	36	9	6	4	0
24 Août - 28 Août	007	11	71	17	1	0	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
08 Août - 12 Août	003	9	57	26	5	3	1	0
16 Août - 20 Août	005	10	56	25	5	3	1	0
28 Août - 01 Sept.	008	6	45	35	8	5	2	0
01 Septembre - 05 Septembre	009	6	48	35	7	4	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
31 Juillet - 04 Août	001	6	47	35	7	4	1	0
04 Août - 08 Août	002	6	52	33	6	3	1	0
28 Août - 01 Septembre	008	9	53	28	6	3	1	0
01 Septembre - 05 Septembre	009	5	41	37	9	6	2	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	Kaolinite	Serpentine	Chlorite	Muscovite	Talc	Quartz	Gypsum	Bassanite	Aragonite	Calcite	Mg-calcite	Siderite type carbonate	Halite	Gibbsite	Goethite	Kaolinite
01 Sept. - 05 Sept.	009	26	0	2	0	0	1	1	0	0	15	13	37	0	3	2	26	0
05 Sept. - 09 Sept.	010	26	0	1	0	0	1	1	0	0	15	14	37	0	3	2	26	0
09 Sept. - 13 Sept.	011	24	0	1	0	0	1	1	0	0	15	14	38	0	5	2	24	0
13 Sept. - 17 Sept.	012	26	0	1	0	0	1	1	0	0	15	12	37	0	3	3	26	0
St15																		
Période de collecte	Prélèvement	% Composition minéralogique																
		Goethite	Kaolinite	Serpentine	Chlorite	Muscovite	Talc	Quartz	Gypsum	Bassanite	Aragonite	Calcite	Mg-calcite	Siderite type carbonate	Halite	Gibbsite	Goethite	Kaolinite
01 Sept. - 05 Sept.	009	37	8	2	2	1	1	1	0	0	4	16	12	0	2	14	37	8
05 Sept. - 09 Sept.	010	40	6	1	1	0	< 1	1	1	0	4	15	11	0	8	11	40	6
09 Sept. - 13 Sept.	011	40	8	1	1	0	< 1	1	< 1	1	4	17	12	0	5	9	40	8
13 Sept. - 17 Sept.	012	43	7	1	2	0	0	1	< 1	0	5	16	12	0	1	13	43	7
St60-NE																		
Période de collecte	Prélèvement	% Composition minéralogique																
		Goethite	Kaolinite	Serpentine	Chlorite	Muscovite	Talc	Quartz	Gypsum	Bassanite	Aragonite	Calcite	Mg-calcite	Siderite type carbonate	Halite	Gibbsite	Goethite	Kaolinite
31 Juil. - 04 Août	001	7	0	0	0	0	1	1	0	0	19	27	40	0	5	0	7	0
01 Sept. - 05 Sept.	009	8	0	0	0	0	0	0	0	0	18	26	43	2	2	0	8	0
09 Sept. - 13 Sept.	011	12	0	0	0	0	0	1	0	0	18	26	40	2	2	0	12	0
13 Sept. - 17 Sept.	012	12	0	0	0	0	0	1	0	0	17	26	41	1	1	0	12	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
31 Juillet - 04 Août	001	282 332	68,3	2 955	104 950	634	1 473
04 Août - 08 Août	002	270 724	61,2	2 637	90 663	559	1 329
08 Août - 12 Août	003	302 509	65,6	2 779	98 422	642	1 403
12 Août - 16 Août	004	297 434	67,2	2 818	97 929	652	1 415
16 Août - 20 Août	005	301 388	64,5	2 721	98 069	619	1 379
20 Août - 24 Août	006	288 693	71,6	2 986	104 745	673	1 499
24 Août - 28 Août	007	263 036	78,7	3 200	108 526	723	1 627
28 Août - 01 Septembre	008	279 327	82,9	3 392	118 857	756	1 715
01 Septembre - 05 Septembre	009	288 237	74,7	3 116	108 727	719	1 587
05 Septembre - 09 Septembre	010	288 140	72,8	3 011	104 348	695	1 512
09 Septembre - 13 Septembre	011	285 525	70,1	2 935	104 981	680	1 473
13 Septembre - 17 Septembre	012	284 064	76,4	3 216	115 376	745	1 632

St15							
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
31 Juillet - 04 Août	001	109 263	150	5 932	182 491	1 349	2 098
04 Août - 08 Août	002	130 265	154	5 802	184 521	1 542	2 092
08 Août - 12 Août	003	175 916	128	4 896	165 220	1 341	1 770
12 Août - 16 Août	004	131 435	117	4 779	148 109	1 145	1 690
16 Août - 20 Août	005	123 804	150	5 836	188 157	1 357	2 087
20 Août - 24 Août	006	136 687	138	5 292	178 718	1 378	1 906
24 Août - 28 Août	007	111 754	140	5 584	173 326	1 306	1 981
28 Août - 01 Septembre	008	130 998	157	5 962	188 940	1 580	2 131
01 Septembre - 05 Septembre	009	125 368	150	5 647	180 792	1 603	2 040
05 Septembre - 09 Septembre	010	129 357	146	5 687	179 753	1 471	2 026
09 Septembre - 13 Septembre	011	132 751	149	5 692	180 897	1 508	2 045
13 Septembre - 17 Septembre	012	137 116	157	5 826	190 824	1 601	2 107

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
31 Juillet - 04 Août	001	363 350	17,2	600	22 679	181	303	5 959
04 Août - 08 Août	002	369 719	15,7	548	20 439	166	276	3 896
08 Août - 12 Août	003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12 Août - 16 Août	004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16 Août - 20 Août	005	330 105	20,8	711	26 228	220	375	3 955
20 Août - 24 Août	006	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
24 Août - 28 Août	007	337 817	23,0	737	27 531	375	381	3 467
28 Août - 01 Septembre	008	338 211	22,1	741	26 954	260	387	3 704
01 Septembre - 05 Septembre	009	340 740	20,7	674	25 247	234	360	3 915
05 Septembre - 09 Septembre	010	336 475	21,8	709	26 126	273	374	3 230
09 Septembre - 13 Septembre	011	342 284	23,2	743	27 855	272	394	3 660
13 Septembre - 17 Septembre	012	323 298	23,2	746	27 092	270	396	3 566

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

ANNEXE 5

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

Flux de MES total et flux de métaux et de calcium particuliers 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
31 Juillet - 04 Août	001	19,8	5 589	1,35	58	2 077	12,5	29,2
04 Août - 08 Août	002	15,7	4 241	0,96	41	1 420	8,8	20,8
08 Août - 12 Août	003	2,3	693	0,15	6	225	1,5	3,2
12 Août - 16 Août	004	3,2	943	0,21	9	310	2,1	4,5
16 Août - 20 Août	005	6,3	1 891	0,40	17	615	3,9	8,7
20 Août - 24 Août	006	13,8	3 988	0,99	41	1 447	9,3	20,7
24 Août - 28 Août	007	15,8	4 165	1,25	51	1 719	11,5	25,8
28 Août - 01 Septembre	008	15,3	4 267	1,27	52	1 816	11,5	26,2
01 Septembre - 05 Septembre	009	29,9	8 613	2,23	93	3 249	21,5	47,4
05 Septembre - 09 Septembre	010	19,3	5 555	1,40	58	2 012	13,4	29,2
09 Septembre - 13 Septembre	011	35,7	10 196	2,50	105	3 749	24,3	52,6
13 Septembre - 17 Septembre	012	37,1	10 532	2,83	119	4 278	27,6	60,5

St15								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	Flux élémentaire (mg ps/m ² /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
31 Juillet - 04 Août	001	2,4	262	0,36	14	437	3,2	5,0
04 Août - 08 Août	002	0,3	40	0,05	2	56	0,5	0,6
08 Août - 12 Août	003	2,6	464	0,34	13	435	3,5	4,7
12 Août - 16 Août	004	1,3	171	0,15	6	193	1,5	2,2
16 Août - 20 Août	005	2,6	316	0,38	15	481	3,5	5,3
20 Août - 24 Août	006	1,9	262	0,26	10	342	2,6	3,6
24 Août - 28 Août	007	2,0	220	0,28	11	341	2,6	3,9
28 Août - 01 Septembre	008	4,8	626	0,75	28	903	7,6	10,2
01 Septembre - 05 Septembre	009	4,9	616	0,74	28	889	7,9	10,0
05 Septembre - 09 Septembre	010	5,3	691	0,78	30	961	7,9	10,8
09 Septembre - 13 Septembre	011	8,6	1 135	1,27	49	1 547	12,9	17,5
13 Septembre - 17 Septembre	012	7,6	1 040	1,19	44	1 447	12,1	16,0

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
31 Juillet - 04 Août	001	21,6	7 841	0,37	13	489	3,9	6,5
04 Août - 08 Août	002	9,7	3 588	0,15	5	198	1,6	2,7
08 Août - 12 Août	003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12 Août - 16 Août	004	1,6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16 Août - 20 Août	005	7,5	2 464	0,16	5	196	1,6	2,8
20 Août - 24 Août	006	1,8	ND	ND	ND	ND	ND	ND
24 Août - 28 Août	007	2,9	970	0,07	2	79	1,1	1,1
28 Août - 01 Septembre	008	5,6	1 880	0,12	4	150	1,4	2,2
01 Septembre - 05 Septembre	009	11,6	3 949	0,24	8	293	2,7	4,2
05 Septembre - 09 Septembre	010	7,2	2 416	0,16	5	188	2,0	2,7
09 Septembre - 13 Septembre	011	18,6	6 361	0,43	14	518	5,1	7,3
13 Septembre - 17 Septembre	012	21,9	7 064	0,51	16	592	5,9	8,7