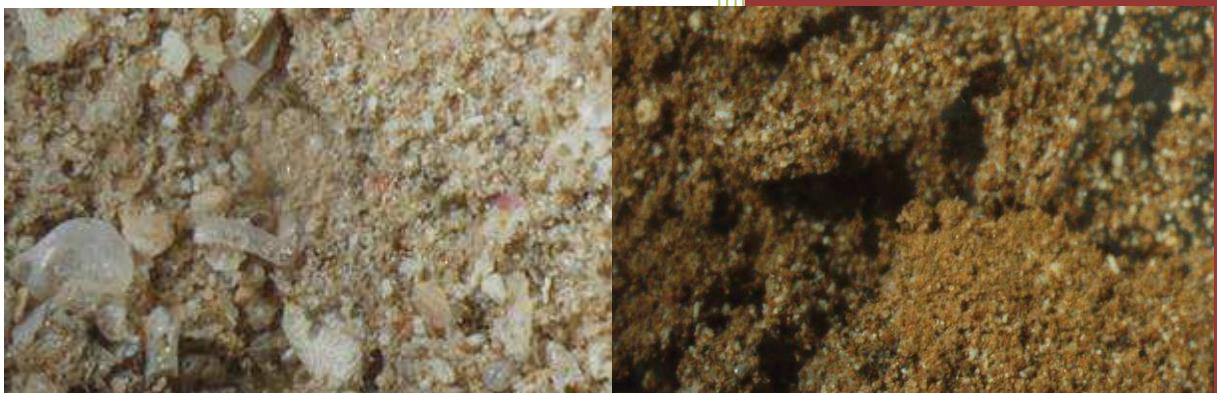




SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, LA BAIE KWE ET LA RADE NORD DE PRONY

CAMPAGNE 1^{ER} SEMESTRE 2021



« Chimie de l'environnement et
Modélisation hydrodynamique »

Rapport semestriel
provisoire
Juillet à août 2021

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 1^{er} semestre 2021

Période de juillet à août 2021

Nombre de pages : 60

	Ref AEL	Ref Client			
Identification	138-VI-17-P	L26981/0001			
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 1 ^{er} semestre 2021. Période de juillet à août 2021.				
Auteurs					
Résumé	<p>Dans le but de se conformer au plan de suivi réglementaire du milieu marin, il a été mis en place un programme de suivi pour un certain nombre de paramètres qui caractérisent la qualité des sédiments, dont les densités de flux verticaux de particules depuis 2006/2007. Ce rapport présente les résultats des campagnes de prélèvement du 1^{er} semestre 2021 (juillet-août) effectuées dans la zone d'influence du complexe minier et industriel de Prony Resources. Le programme de surveillance semestriel du milieu marin est réalisé sur un total de 3 stations dont la répartition a été révisée en 2014. A ce jour, les stations sont réparties en Baie Kwé (St06-KW1), en Rade Nord de la Baie du Prony (St15) et dans le Canal de la Havannah (St60-NE).</p> <p>Cette campagne, marquée par une pluviométrie très faible et une instabilité généralisée des régimes de vent, 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 sur les apports sont : (1) les précipitations pour la St15 via 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 autre que S pour la St06-KW1 via l'effet de dispersion des particules fines lessivées dans la Baie Kwé. Pour la St60-NE, comme à l'accoutumé, elle ne montre aucune corrélation pertinente ; les panaches latéritiques, beaucoup plus dilués à cette station, seraient conditionnés par un ensemble de mécanismes qu'il n'est pas encore possible d'expliquer.</p> <p>Depuis 2007, les ratios Ca/Fe en St06-KW1 mettent en évidence un enrichissement irrégulier de la Baie Kwé en matières latéritiques par rapport à l'état de référence. Le mécanisme se poursuit, comme le souligne cette campagne S1-2021 qui retrouve les niveaux de concentration en métaux de 2013. Une vigilance particulière est de mise pour la station St60-NE où le Mn augmente, mais il reste à déterminer l'origine. Pour la St15, le ratio Ca/Fe et les flux de Ni restent relativement invariables. En ce qui concerne les concentrations de Ca et S, aucun enrichissement au gypse (Ca_2SO_4) n'est décelé à St60-NE.</p>				
FONCTION	NOMS	VISA	DATE		
Rédacteur			28/10/2021		
Vérificateur 1			16/11/2021		
Vérificateur 2	-----		25/11/2021		
Approbateur			30/11/2021		
EVOLUTION					
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE			
V1.0	Rapport final	27/12/2021			
COPIE – DIFFUSION					
NOM	ORGANISME				
	Vale-NC, Département Environnement				

Ce rapport est cité comme suit :

Kumar-Roiné S., Moreton B., Drouzy M., Ighiouer S., Fernandez JM. 2021. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1^{er} semestre 2021. Période de juillet à août 2021. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L26981/0001, 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.....	14
C.	COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION.....	24
IV.	INTERPRETATION	34
A.	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES.....	34
B.	CALCUL DES FLUX DES MATIERES.....	41
V.	SYNTHESE	46

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 terme 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 et 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 consommés par l'homme, dont certains sont en bout de chaîne alimentaire.

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 sur le plancher sédimentaire.

Remarque : *Les expériences de laboratoire et la modélisation géochimique associée ont montré que seule la formation quantitativement négligeable de précipités carbonatés devrait se produire lorsque l'effluent entre en contact avec l'eau de mer ([Bodeï et Pointeau, 2009](#)) ; la mesure in-situ permet de discuter de cette hypothèse.*

Toutefois, des réactions de précipitation se produisent dans le tuyau lui-même, dès la sortie de l'unité de traitement des effluents en raison probablement de l'état de sursaturation de la solution. Il en résulte la formation de concrétions qui adhèrent sur la paroi du tuyau jusque dans le diffuseur. 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 Prony Resources, obtenus lors de la campagne du **premier semestre de 2021** et comparés aux campagnes précédentes des mouillages semestrielles réalisées entre 2011-2020 et celles de l'état de référence en 2006/2007 ([Kumar-Roiné et al., 2020](#) ; [Fernandez et al., 2007](#) ; [Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)).

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 Prony Resources.

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 Mia (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 06 juillet 2021 et le 24 août 2021 aux stations St06-KW1, St15 et St60-NE. Les 3 pièges ont été immergés avec une simple ligne de mouillage lestée.



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).

Rappel : Les pièges à particules de type séquentiel (Technicap, type PPS4/3) sont dotés d'une section efficace de 0,050 m² et 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 et une profondeur d'eau supérieure à 15 m afin de minimiser la collecte des particules potentiellement remises en suspension à partir de la couverture sédimentaire.

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'ayant environ que 5 m d'épaisseur lors des marées de vive-eau alors qu'elle dépasse largement les 10 m pour les courants faibles des marées de morte-eau (Figure 2). Il n'est donc pris en compte dans les pièges que les fractions particulières 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 07 juillet 2021 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 24 août 2021 à 00h00 ; 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.

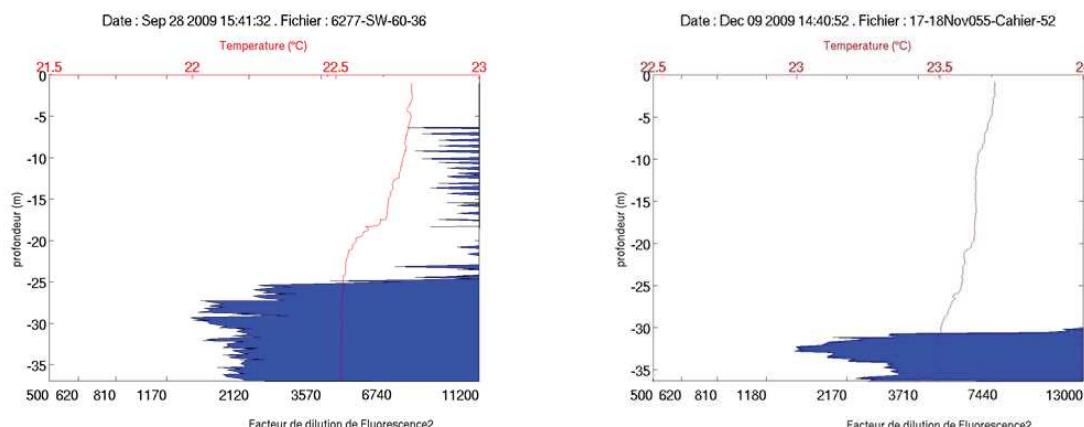


Figure 2 : Empreinte type de l'effluent par marquage à la rhodamine-WT pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

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
07 Juillet - 11 Juillet 2021	001	001	001
11 Juillet - 15 Juillet 2021	002	002	002
15 Juillet - 19 Juillet 2021	003	003	003
19 Juillet - 23 Juillet 2021	004	004	004
23 Juillet - 27 Juillet 2021	005	005	005
27 Juillet - 31 Juillet 2021	006	006	006
31 Juillet - 04 Août 2021	007	007	007
04 Août - 08 Août 2021	008	008	008
08 Août - 12 Août 2021	009	009	009
12 Août - 16 Août 2021	010	010	010
16 Août - 20 Août 2021	011	ND	011
20 Août - 24 Août 2021	012	ND	012

C. CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant la période d'immersion des pièges (07 juillet 2021 et le 23 août 2021) sont susceptibles d'avoir fortement influé sur la quantité et la nature de MES collectée.

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 résultats d'analyses.

III. RESULTATS

A. PARAMETRES METEOROLOGIQUES

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

Pour cette campagne, le cumul des précipitations du 07 juillet au 23 aout, relevé à la station météorologique GORO Usine ne s'est élevé qu'à 75,2 mm. Ainsi, au total pour toute la campagne, on compte 24 jours de pluie ; les pluviométries journalières maximales ont été enregistrées le 15 août avec à peine 12,5 mm/j de pluie. Cette période est donc marquée par un temps très sec (Tableau 3 et Figure 3).

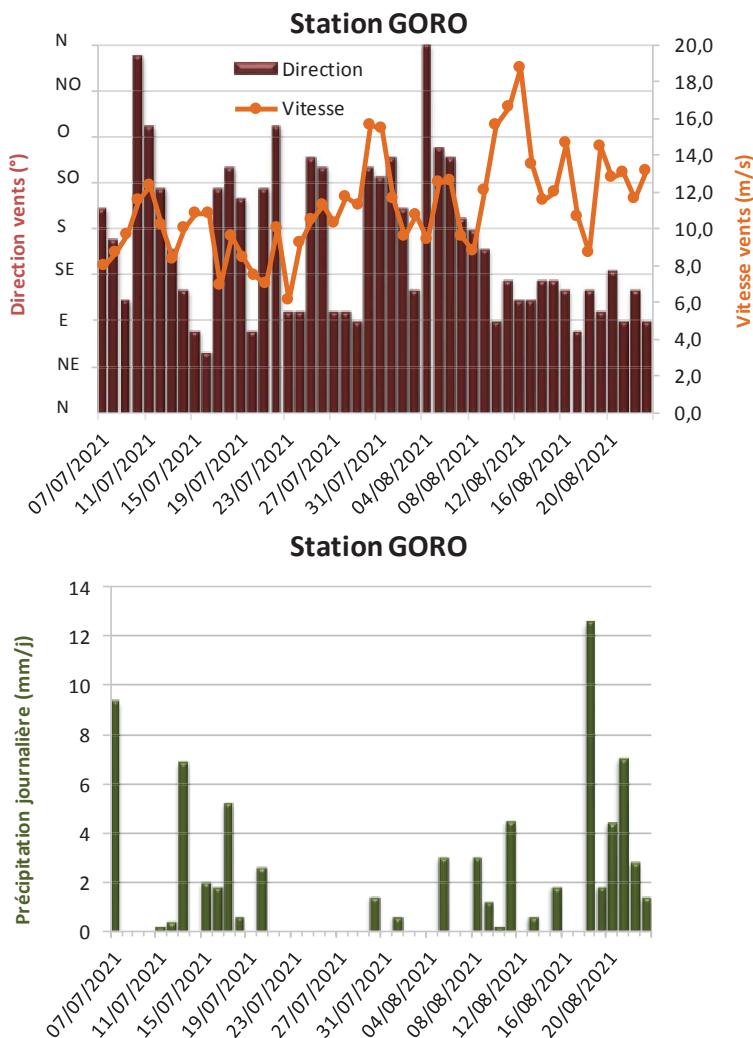


Figure 3 : Cumul journalier de précipitations, évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 07 juillet au 23 aout 2020.

Pour l'ensemble de la période de mouillage, la vitesse moyenne des vents enregistrée ($11,1 \pm 2,7$ m/s) par la station GORO Usine est proche de celles des précédentes campagnes, exception faite pour 2014 où les valeurs mesurées ne dépassent pas les 9 m/s (Tableau 3). Quant aux régimes de vents, cette campagne 2021 est marquée par un système assez perturbé. Les contre-alizés (vents d'O à N) ont été prédominants sur les premiers 2 tiers de la période de collecte. Ce n'est qu'à partir du 07 août que les alizés s'installent et soufflent durablement d'un large secteur SE jusqu'à la fin de la période de collecte (Figure 3).

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	Précipitation journalière (mm)*		Vitesse vents moyens journalière (m/s)*			
						Station GORO	Station GORO	Station GORO	Station GORO	Station IORO	
2006	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	Oct. - Nov. 2006	x	x	-	54,4	ND	ND	ND	ND	ND
2007	1	Févr. - Mars 2007	-	-	x	300,6	ND	ND	ND	ND	ND
	1	Mars - Avr. 2007	x	x	-	272,6	ND	ND	ND	ND	ND
2011	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	2	Juill. - Août 2011	x	-	-	273,7	11,3	$\pm 3,2$	ND	ND	ND
	1	Janv. - Mars 2012	x	-	x	370,1	12,3	$\pm 2,7$	IC	IC	IC
2013	2	Sept. - Oct. 2012	x	-	x	278,5	12	$\pm 2,4$	ND	ND	ND
	1	Janv. - Févr. 2013	x	-	x	181,2	12	$\pm 2,1$	ND	ND	ND
2014	2	Juill. - Août 2013	x	-	x	467	11,3	$\pm 3,6$	ND	ND	ND
	1	Janv. - Mars 2014	x	x	PP	920,2	9,3	± 4	6,6	$\pm 2,9$	
2015	1	Avr. - Juin 2014	-	-	x	260,9	8,3	$\pm 3,5$	6,9	$\pm 2,5$	
	2	Sept - Oct. 2014	x	x	x	199,6	7,3	$\pm 2,9$	5,9	$\pm 1,8$	
2016	1	Janv. - Mars 2015	x	x	x	242,6	12	$\pm 3,7$	ND	ND	ND
	2	Juill. - Sept. 2015	PP	x	x	148,9	11,6	$\pm 2,6$	ND	ND	ND
2017	2	Oct. - Nov. 2015	x	-	-	96	12,4	$\pm 3,1$	ND	ND	ND
	1	Juill. - Sept. 2016	PP	x	x	241,4	10,9	$\pm 3,1$	6,2	$\pm 2,5$	
2018	1	Avr. - Mai 2016	x	-	-	247,4	10,8	$\pm 2,4$	6,2	$\pm 2,5$	
	2	Oct. - Nov. 2016	x	x	x	266,8	11,3	$\pm 2,5$	5,9	$\pm 2,1$	
2019	1	Janv. - Mars 2017	x	x	x	443,2	12,5	$\pm 4,2$	7	$\pm 3,6$	
	2	Sept. - Nov. 2017	x	x	x	58,4	11	$\pm 2,1$	9,7	$\pm 13,1$ (?)	
2020	1	Mars - Avr. 2018	x	x	x	631,3	13,6	$\pm 3,3$	ND	ND	ND
	2	Mai - Juil. 2018	x	x	x	105,2	11,1	$\pm 3,4$ (IC)	ND	ND	ND
2021	1	Mars - Mai 2019	x	PP	x	389,3	12,4	$\pm 3,2$ (IC)	ND	ND	ND
	1	Mai - Juil. 2019	-	x	-	149,1	10,2	$\pm 3,2$	ND	ND	ND
2021	2	Juill. - Sept. 2019	x	x	x	88,2	11,3	$\pm 2,4$	ND	ND	ND
	1	Janv. - Mars 2020	x	PP	x	>225,3 (IC)	12,8	$\pm 3,0$ (IC)	ND	ND	ND
2021	2	Juill. - Août 2020	x	x	x	>107,3 (IC)	11,4	$\pm 3,4$ (IC)	ND	ND	ND
	1	Juill. - Août 2021	x	x	x	75,2	11,1	$\pm 2,7$	ND	ND	ND

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

B. CARACTERISATION DES MATIERES EN SUSPENSION

Les résultats concernant les masses de matière en suspension (MES) collectées par les pièges séquentiels et les teneurs en carbonates sont regroupés dans l'Annexe 3.

Remarque : les analyses de composition granulométrique et minéralogique sont en cours d'acquisition ; ils seront fournis dans le rapport final.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

Masses collectées et teneurs en carbonates

Avec une moyenne de $4,41 \pm 2,95$ g, les masses de MES collectées demeurent inférieures à 5,0 g sur la première moitié de la période de collecte. La quantité maximale a été mesurée pour le prélèvement 007 (12,1 g). Puis, les quantités de MES piégées décroissent brusquement et s'accroissent à nouveau pour rester autour de 5,0 g jusqu'à la fin de la période de collecte (Figure 4).

En ce qui concerne la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$), les pourcentages ne varient que très peu (Figure 5). Ainsi, avec une moyenne remarquablement stable de 84 ± 2 %, les MES piégées en St06-KW1 restent très majoritairement composées par de la fraction fine dont le diamètre est inférieur à $41 \mu\text{m}$.

De la même manière, les teneurs en carbonates dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES sont également assez homogènes temporellement. Avec une moyenne 66 ± 7 %, l'apport en carbonates, et donc l'influence océanique sont omniprésents, notamment dans les godets 002 à 006 (Figure 6).

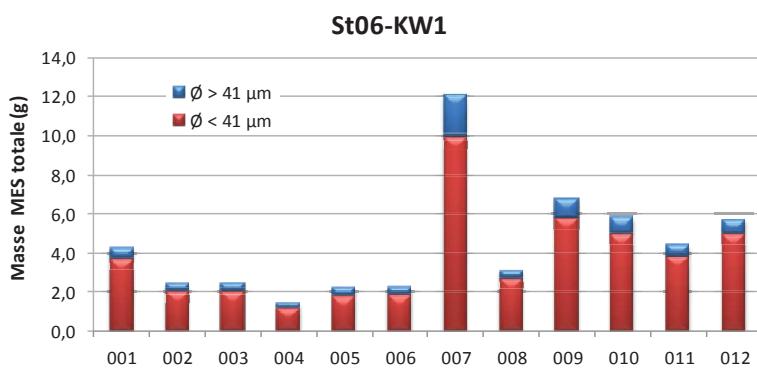


Figure 4 : Masse totale de MES piégée et composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

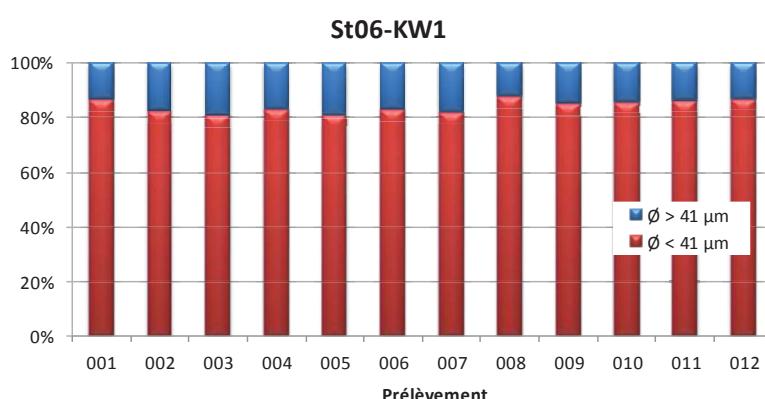


Figure 5 : Pourcentage massique en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

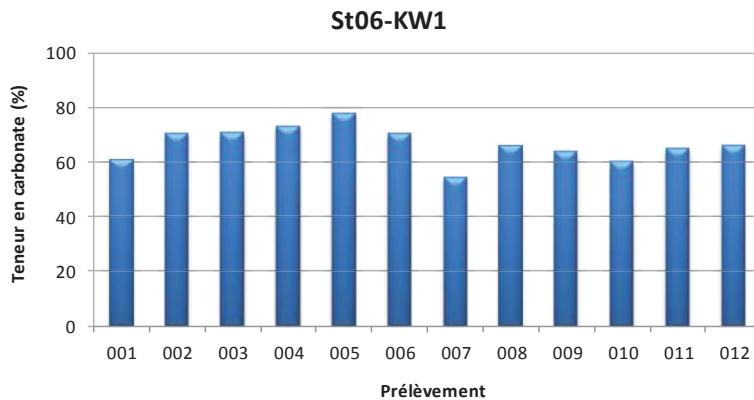


Figure 6 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, la masse moyenne de MES collectée lors de cette dernière est parmi les plus faibles, alors que le pourcentage moyen de fraction fine est parmi les plus forts. Quant à la teneur moyenne en carbonates, elle reste dans les gammes habituellement mesurées (Tableau 4) ; la teneur minimale coïncidant avec la masse maximale collectée pendant cette campagne (godet 007).

St06-KW1					
Année	Semestre	MES Moyenne (g)	% $\emptyset < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	
2006	S2	1,46 ±0,74	ND ND	74 ±2	
2007	S1	4,61 ±4,47	ND ND	76 ±3	
2011	S2	5,07 ±4,86	ND ND	69 ±4	
2012	S1	7,89 ±6,64	75 ±3	84 ±5	
	S2	5,28 ±2,62	70 ±4	67 ±3	
2013	S1	9,29 ±5,71	77 ±5	67 ±8	
	S2	11,6 ±17,6	74 ±4	46 ±13	
2014	S1	12,1 ±6,8	82 ±4	84 ±3	
	S2	2,37 ±1,68	84 ±2	65 ±4	
2015	S1	13,6 ±7,2	79 ±4	73 ±3	
	S2	7,77 ±6,10	68 ±6	47 ±3	
2016	S1	5,74 ±4,58	80 ±2	60 ±6	
	S2	3,69 ±2,78	79 ±4	70 ±5	
2017	S1	9,06 ±8,06	75 ±3	71 ±4	
	S2	4,08 ±4,61	83 ±2	71 ±6	
2018	S1	19,5 ±27,3	68 ±6	62 ±5	
	S2	6,01 ±4,57	84 ±2	68 ±3	
2019	S1	10,3 ±5,1	81 ±3	58 ±2	
	S2	3,57 ±2,31	85 ±2	77 ±3	
2020	S1	10,3 ±12,8	70 ±9	64 ±22	
	S2	3,65 ±2,26	80 ±2	71 ±3	
2021	S1	4,41 ±2,95	84 ±2	66 ±7	

ND : valeur non déterminée.

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

Compositions granulométriques et minéralogiques

La fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St06-KW1 est composée à la fois de particules dont le diamètre

se situe entre 2,0-20 µm, à savoir, les silts fins (moyenne de $32 \pm 2\%$ du volume total) et les silts moyens (20-40 µm ; $38 \pm 1\%$ du volume total). Au cours de cette campagne, la distribution des populations granulométriques montre peu d'évolution dans le temps, le godet 007 montrant les MES les plus grossières (Figure 7).

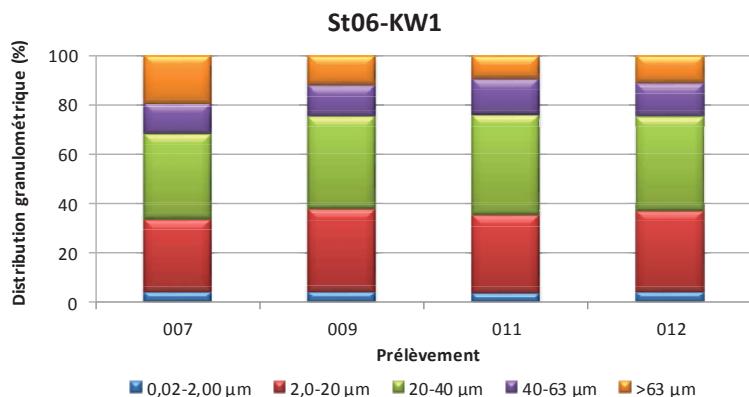


Figure 7 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

En ce qui concerne la composition minéralogique, la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des MES est majoritairement représentée par des carbonates (Calcite et Aragonite) d'origine marine ; décelé dans tous les prélèvements, l'Aragonite étant un des constituants des coquilles d'invertébrés, sa présence renforce l'idée d'un influence marine prépondérante. A l'inverse, la Goethite ou encore l'Hématite, la Gibbsite, la Serpentine et le Quartz sont des minéraux d'origine terrestre. Pour cette campagne, les proportions des minéraux d'origine latéritique (ex. Goethite) et celles des carbonates ne varient que dans le godet 009 où la présence des minéraux d'origine terrestre et d'origine marine devint équivalente (Tableau 5).

Prélèvement	Composition minéralogique (%)				
	Calcite-Ca	Calcite-Mg	Aragonite	Goethite	Autres
	3,0	27,0	21,0	32,5	16,5
007	3,0	27,0	21,0	32,5	16,5
009	4,0	26,0	20,0	39,0	11,0
011	3,0	32,0	23,0	28,0	14,0
012	3,0	28,0	21,5	33,0	14,5

Tableau 5 : Composition minéralogique de la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

Pour l'ensemble des campagnes, le mode granulométrique principal demeure la classe 2,0-20 µm (silts fins), avec un accroissement de la classe 20-40 µm (silts moyens) temporairement ; les proportions devenant quasi-équivalentes pour ces deux classes à partir de 2018. Entre 2011 et 2016, les proportions de silts fins connaissent une progression remarquable au détriment de la fraction $\phi > 63 \mu\text{m}$. Une baisse soudaine a ensuite été notée au premier semestre de 2017 où les pourcentages moyens sont comparables à ceux relevés pour l'État de Référence, un regain en silts fins semblerait à nouveau se dessiner. Pour cette campagne, ces pourcentages sont à nouveau en baisse (Tableau 6).

Remarque : Une différence en fraction carbonatée est observable entre les teneurs en calcite, d'une part, mesurées par DRX semi-quantitative, et d'autre part, calculées 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 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 ;
- le Mg des minéraux du cortège latéritique n'est pas comptabilisé.

Année	Semestre	St06-KW1				
		Distribution granulométrique (%)				
		0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
2011	S1	8 ±4	32 ±3	24 ±3	15 ±2	21 ±3
2012	S1	8 ±5	50 ±5	27 ±6	11 ±3	4 ±1
	S2	13 ±1	51 ±7	22 ±3	10 ±4	4 ±2
2013	S1	5 ±1	37 ±2	33 ±3	16 ±1	9 ±4
	S2	13 ±3	53 ±12	22 ±2	8 ±6	3 ±6
2014	S1	26 ±3	56 ±2	15 ±2	3 ±1	0 ±0
	S2	16 ±4	61 ±6	16 ±2	5 ±1	2 ±3
2015	S1	14 ±2	51 ±3	26 ±3	9 ±1	1 ±1
	S2	11 ±5	44 ±7	26 ±3	12 ±4	8 ±6
2016	S1	15 ±4	60 ±5	18 ±4	5 ±3	2 ±2
	S2	8 ±1	51 ±3	30 ±3	9 ±2	2 ±2
2017	S1	4 ±1	37 ±2	29 ±2	14 ±1	16 ±1
	S2	7 ±1	49 ±5	31 ±2	10 ±3	3 ±3
2018	S1	5 ±1	39 ±1	35 ±2	16 ±1	6 ±3
	S2	5 ±1	39 ±5	36 ±2	16 ±3	4 ±2
2019	S1	6 ±1	46 ±6	35 ±1	12 ±4	2 ±2
	S2	7 ±3	48 ±15	31 ±10	12 ±7	3 ±2
2020	S1	7 ±2	50 ±7	29 ±4	10 ±3	5 ±3
	S2	5 ±1	44 ±2	35 ±1	13 ±1	3 ±1
2021	S1	4 ±0	32 ±2	38 ±2	13 ±1	13 ±4

Tableau 6 : Compilation des données moyennes ± écart-types de la distribution granulométrique dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Note : En raison du manque de matière fine dans les pas de collecte 001 et 003 à 006, le dosage des éléments métalliques n'a été possible que sur les 7 autres échantillons.

Masses collectées et teneurs en carbonates

Avec une moyenne de $0,549 \pm 0,475 \text{ g}$, les masses de MES collectées montrent une forte variabilité et sont infinitésimales pour les 8 premiers pas de temps ; les masses ne dépassent pas les $0,400 \text{ g}$. Ensuite, des quantités maximales, à peine supérieures à $1,0 \text{ g}$, ont été piégées dans les godets 009 à 012 (Figure 8).

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$), avec une moyenne de $94 \pm 4 \%$, est très largement dominante en St15 au fil du temps de collecte ; le pourcentage de fraction fine minimal (83 %) a été relevé dans le godet 001. Pour le reste, les valeurs demeurent invariables temporellement (Figure 9).

C'est également le cas pour les teneurs en carbonate ; avec une moyenne de $39 \pm 1\%$, les valeurs n'oscillent pas, soulignant une influence prépondérante claire et quasi-constante des apports terrigènes à St15 (Figure 10).



St15							
Année	Semestre	MES Moyenne (g)	% Ø < 41 µm	Carbonate (%)			
2006	S2	0,105 ±0,065	ND	ND	ND	ND	ND
2007	S1	0,154 ±0,145	ND	ND	ND	ND	ND
2014	S1	4,43 ±8,90	88 ±6	9 ±4			
	S2	0,183 ±0,247	77 ±31	25 ±2			
2015	S1	0,556 ±0,596	86 ±10	25 ±7			
	S2	0,261 ±0,268	86 ±10	26 ±2			
2016	S1	1,73 ±1,49	76 ±23	19 ±9			
	S2	0,438 ±0,497	87 ±7	27 ±4			
2017	S1	1,61 ±1,16	92 ±5	28 ±4			
	S2	0,298 ±0,304	79 ±16	23 ±2			
2018	S1	1,67 ±1,93	86 ±6	19 ±3			
	S2	0,871 ±0,561	97 ±1	37 ±2			
2019	S1	3,07 ±2,11	90 ±3	37 ±4			
	S2	0,779 ±0,469	97 ±1	38 ±4			
2020	S1	16,7 ±51,9	80 ±14	18 ±8			
	S2	0,696 ±0,711	90 ±6	38 ±5			
2021	S1	0,549 ±0,475	94 ±4	39 ±1			

ND : valeur non déterminée

Tableau 7 : Compilation des données moyennes ± écart-types de la MES moyenne collectée (4 jours), 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 piéges séquentiels à St15.

Parmi les différentes campagnes conduites à St15, la masse moyenne collectée en 2021 est dans les gammes habituelles mesurées ; le « record absolu » ayant été mesuré lors de la campagne S1-2020 avec une masse moyenne 5 à 100 fois plus importante, toutes campagnes confondues. En outre, quelle que soit la campagne, les MES piégées sont majoritairement composées de fraction fine dont les proportions ne varient seulement que de ± 10 %. La moyenne mesurée en 2021 reste donc dans la partie haute de la gamme habituelle. Il en est de même pour la teneur moyenne en carbonate dont la plus basse (9 ± 4 %) a été enregistrée en S1-2014 (Tableau 7).

Compositions granulométriques et minéralogiques

Note : En raison du manque de matière fine les analyses granulométrique et minéralogique n'ont été possibles que sur 2 échantillons, les 010 et 011.

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de la MES des 2 prélèvements est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2,0-20 µm à savoir, les silts fins (40 % du volume total). Les silts moyens (classe 20-40 µm) composent la seconde population granulométrique (33 % du volume total) (Figure 11).

Pour ces deux prélèvements, la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES est très majoritairement composée de minéraux d'origine latéritique dont notamment la Goethite et la Serpentine (15 et 16 %, respectivement) ainsi que la Gibbsite, l'Hématite et Quartz. L'Aragonite et la Calcite, minéraux biogéniques d'origine marine, bien qu'en moindre quantité, ont également été décelés (Tableau 8).

Pour l'ensemble des campagnes conduites à St15, le mode principal demeure la classe 2,0-20 µm avec des proportions particulièrement stables depuis la première campagne de 2014. Toutefois, globalement à partir de 2016, une augmentation de la taille moyenne des grains (classe 20-40 µm) est observée au détriment de la classe 0,02-2,00 µm (Tableau 9).

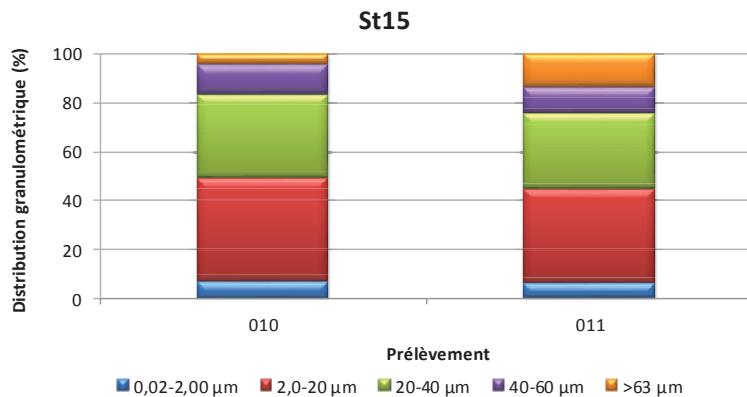


Figure 11 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 2 prélèvements du piège séquentiel à St15.

St15

Prélèvement	Composition minéralogique (%)				
	Calcite-Ca	Calcite-Mg	Aragonite	Goethite	Autres
010	6,0	13,0	8,5	41,0	31,5
011	6,0	13,6	11,0	36,0	33,4

Tableau 8 : Composition minéralogique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 2 prélèvements du piège séquentiel à St15.

St15

Année	Semestre	Distribution granulométrique (%)					
		0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm	
2014	S1	25 ±4	57 ±1	15 ±2	3 ±2	1 ±1	
	S2	14 ±3	56 ±10	18 ±6	8 ±4	4 ±3	
2015	S1	24 ±10	55 ±6	11 ±6	5 ±5	4 ±5	
	S2	19 ±4	53 ±8	13 ±2	6 ±3	9 ±8	
2016	S1	9 ±1	46 ±7	27 ±2	13 ±4	5 ±4	
	S2	13 ±2	60 ±5	21 ±3	5 ±3	0 ±1	
2017	S1	10 ±2	51 ±5	18 ±2	9 ±2	12 ±3	
	S2	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND	
2018	S1	9 ±1	52 ±2	28 ±1	9 ±1	1 ±1	
	S2	11 ±1	54 ±4	22 ±1	10 ±2	4 ±1	
2019	S1	13 ±1	61 ±5	20 ±1	5 ±4	1 ±1	
	S2	8 ±2	53 ±7	29 ±6	9 ±3	1 ±1	
2020	S1	12 (n=1)	59 (n=1)	22 (n=1)	6 (n=1)	1 (n=1)	
	S2	10 (n=1)	54 (n=1)	24 (n=1)	9 (n=1)	3 (n=1)	
2021	S1	7 ±1	40 ±3	33 ±2	11 ±1	9 ±6	

ND : valeur non déterminée

Tableau 9 : Compilation des données moyennes \pm écart-types de la distribution granulométrique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Note : En raison du manque de matière fine dans le godet 003 et 009, l'analyse des éléments n'a été possible que sur les 10 autres échantillons.

Masses collectées et teneurs en carbonates

Les masses de MES collectées sont aussi variables qu'aux stations St06-KW1 et St15. Les quantités piégées ne sont pas très importantes ; la masse moyenne est de $0,943 \pm 0,508$ et les quantités maximales piégées en fin de période de collecte dans les godets 011 et 012, dépassent à peine le seuil de 1,50 g (Figure 12).

Contrairement aux deux autres stations, les MES piégées à St60-NE sont composées de fractions fine et grossières en proportions quasi-équivalentes, les pélites ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) oscillant entre 40 % (003) et 65 % (001) (Figure 13).

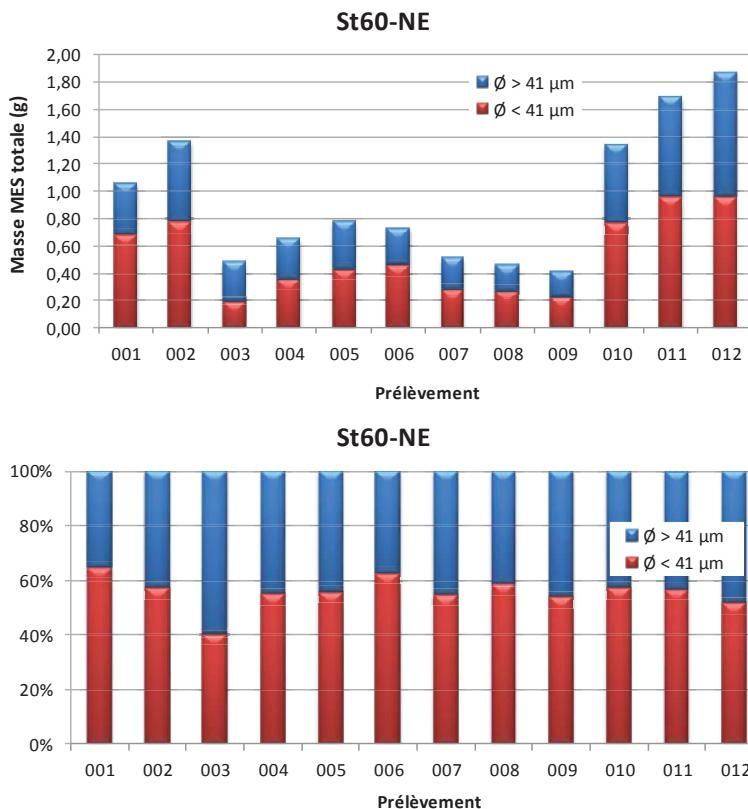


Figure 12 : Masse totale des MES piégées et composition en fractions fines ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\emptyset > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

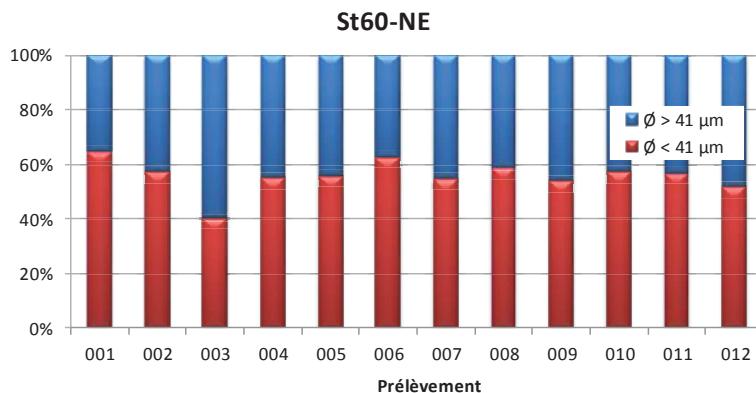


Figure 13 : Pourcentages massiques en fractions fines ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) et en fractions grossières ($\emptyset > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

La fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées est composée exclusivement des carbonates ($99 \pm 1\%$). Quel que soit le pas de collecte, les valeurs sont à plus de 99 %.

Les valeurs moyennes de masses totales et de pourcentages de fraction fine de cette campagne 2021 figurent parmi les plus faibles. Par ailleurs, cette dernière se singularise aussi par la teneur moyenne la plus haute en carbonates, confirmant la nature marine quasi-exclusive des apports en St60-NE (Tableau 10).

St60-NE						
Année	Semestre	MES Moyenne (g)	% Ø < 41 µm	Carbonate (%)		
2007	S1	3,95 ±5,02	ND	ND	96 ±1	
2011	S2	ND ND	ND	ND	ND ND	
2012	S1	1,92 ±1,77	60	±18	80 ±3	
	S2	0,82 ±1,08	39	±9	85 ±1	
2013	S1	2,51 ±2,71	49	±14	77 ±1	
	S2	1,17 ±1,42	41	±7	75 ±4	
2014	S1	1,49 ±1,01	74	±8	83 ±2	
	S2	1,63 ±1,82	60	±4	83 ±2	
2015	S1	3,19 ±3,11	63	±8	88 ±3	
	S2	1,98 ±1,84	61	±6	91 ±6	
2016	S1	3,42 ±2,03	49	±6	76 ±9	
	S2	2,23 ±3,52	28	±13	91 ±7	
2017	S1	3,11 ±2,84	61	±5	91 ±2	
	S2	1,46 ±1,27	59	±4	86 ±2	
2018	S1	3,66 ±3,62	62	±6	77 ±1	
	S2	1,67 ±1,27	58	±4	81 ±1	
2019	S1	3,83 ±2,63	63	±6	74 ±3	
	S2	2,00 ±1,51	70	±8	91 ±4	
2020	S1	3,90 ±2,75	45	±9	95 ±3	
	S2	1,52 ±1,67	50	±8	99 ±1	
2021	S1	0,943 ±0,508	56	±6	99 ±1	

ND : valeur non déterminée ; - : pas de campagne ou en cours

Tableau 10 : Compilation des données moyennes ± écart-types de la MES moyenne collectée (4 jours), des pourcentages massiques en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et des teneurs en carbonates dans la fraction fine lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.

Compositions granulométriques et minéralogiques

Note : En raison du manque de matière fine les analyses granulométrique et minéralogique n'ont été possibles que sur 2 échantillons, le 011 et 012.

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de la MES des 2 prélèvements (011 et 012) est composée de particules dont le mode principal est situé dans la classe 20-40 μm (silts moyens) ; la quantité moyenne est évaluée à $40 \pm 1\%$ du volume total. La distribution des populations granulométriques montre peu d'évolution dans le temps (Figure 14).

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées en St60-NE, est quasi-exclusivement composée de minéraux carbonatés (Calcite et Aragonite), dont les proportions restent très stables entre les 2 prélèvements. La présence de traces de Goethite, Serpentine, Gibbsite et Quartz traduit une influence lointaine de termes sources terrigènes, mais globalement ces observations traduisent une influence marine constante et quasi exclusive régnante, à cette station (Tableau 11).

Pour l'ensemble des campagnes conduites à St60-NE, aucune évolution temporelle particulière n'est discernable, parmi les 5 classes granulométriques étudiées ; depuis la première campagne en 2012, le mode principal des populations de particules alterne entre les classes 2,0-20 μm et 20-40 μm . Pour cette campagne 2021, excepté l'accroissement sensible de la fraction grossière ($>63 \mu\text{m}$) au détriment des grains de classe 2,0-20 μm , la distribution granulométrique montre des pourcentages moyens comparables à ceux relevés pour l'Etat de Référence. À noter toutefois, que pour la campagne de S2-2014, une très notable augmentation de la classe 2,0-20 μm au détriment des populations de diamètres 20-40 μm et 40-63 μm avait été décelée (Tableau 12).

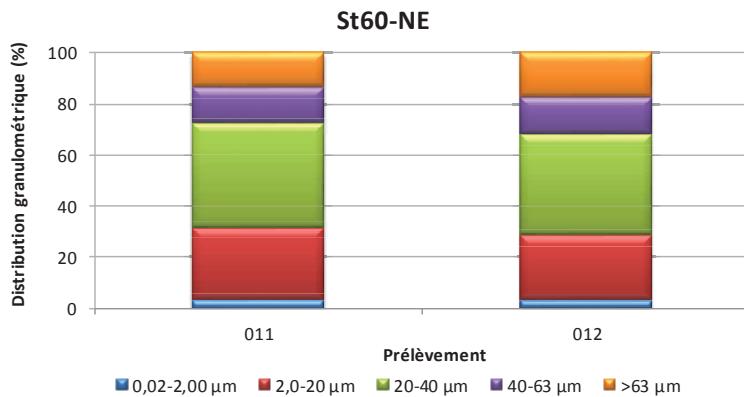


Figure 14 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 2 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Prélèvement	Composition minéralogique (%)				
	Calcite-Ca	Calcite-Mg	Aragonite	Goethite	Autres
011	12,0	42,0	36,0	5,0	5,0
012	12,0	41,0	34,0	4,0	9,0

Tableau 11 : Composition minéralogique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 2 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Année	Semestre	Distribution granulométrique (%)				
		0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
2012	S1	3 ±1	46 ±9	32 ±6	14 ±4	5 ±1
	S2	2 (n=1)	40 (n=1)	23 (n=1)	17 (n=1)	18 (n=1)
2013	S1	5 ±0	36 ±3	33 ±2	16 ±0	10 ±4
	S2	14 ±5	49 ±4	28 ±3	8 ±1	0 ±0
2014	S1	17 ±3	47 ±4	25 ±2	9 ±2	2 ±2
	S2	5 ±1	72 ±3	17 ±4	4 ±0	1 ±1
2015	S1	12 ±4	44 ±6	26 ±2	11 ±3	7 ±6
	S2	13 ±5	44 ±8	24 ±3	9 ±4	9 ±7
2016	S1	5 ±1	40 ±1	36 ±2	16 ±1	3 ±1
	S2	6 ±2	42 ±12	32 ±4	12 ±3	8 ±15
2017	S1	4 ±1	36 ±8	30 ±3	11 ±7	12 ±12
	S2	8 ±1	52 ±2	31 ±1	9 ±1	0 ±0
2018	S1	5 ±1	40 ±3	36 ±2	16 ±1	4 ±0
	S2	3 ±0	30 ±4	35 ±1	20 ±2	12 ±3
2019	S1	7 ±0	49 ±4	34 ±1	10 ±2	1 ±1
	S2	6 ±2	48 ±5	33 ±4	11 ±3	1 ±1
2020	S1	5 ±1	49 ±2	36 ±1	10 ±1	1 ±0
	S2	4 ±1	39 ±4	37 ±1	15 ±2	4 ±2
2021	S1	3 ±0	27 ±2	40 ±1	14 ±0	16 ±3

Tableau 12 : Compilation des données moyennes ± écart-types de la distribution granulométrique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-NE.

ND : valeur non déterminée

C. COMPOSITION GEOCHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

Les concentrations en métaux totaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) et en éléments majeurs (Ca et S) analysées dans les fractions fines de MES ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) sont regroupées dans l'Annexe 4.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

Concentration en élément et normalisation du calcium par le fer

Les plus fortes concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été mesurées au tout début de la période d'immersion, ainsi que vers la fin, à savoir dans le godet 001 et le godet 010. Pour le Ca, la teneur maximale est mesurée dans le godet 005. Entre les extrêmes, les valeurs varient avec des coefficients de 11 à 15 % (Tableau 13).

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St06-KW1 se distribuent entre 0,915 et 1,83 avec une moyenne de $1,27 \pm 0,27$; le plus fort ratio, comme pour la teneur en Ca, a été obtenu dans le godet 005 tandis que la plus faible valeur a été mesurée dans le godet 010 (Figure 15). Ainsi, l'évolution temporelle de ces 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.

L'étude de la matrice de corrélation montre la similarité d'évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn avec un fort coefficient de corrélation de Pearson $R > 0,970$. En revanche, pour cette campagne, la tendance négative entre Ca et les 5 métaux est peu significative ($-0,408 > R > -0,440$; Tableau 14).

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

Eléments (mg/kg ps)	St06-KW1					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	197 085	110	3 737	150 277	964	2 314
Max	287 583	174	5 913	233 434	1 476	3 717
Moyenne	241 125	145	4 908	194 706	1 228	3 081
Ecart-type	25 604	22,1	701	27 592	169	453
CV (%)	11	15	14	14	14	15

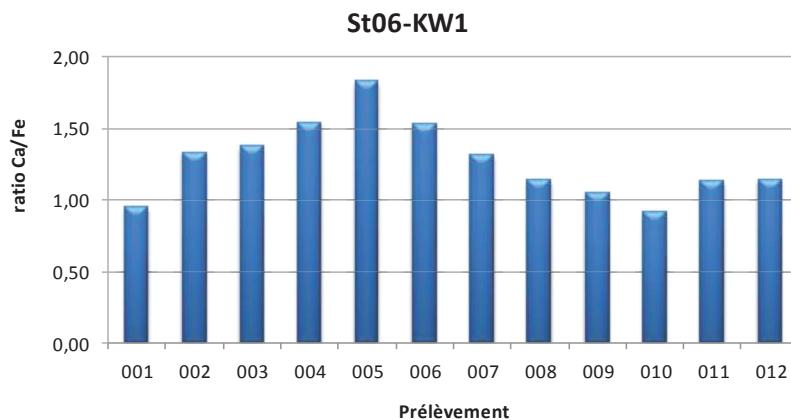


Figure 15 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

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

Eléments	St06-KW1					
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,0000	-0,4401	-0,4163	-0,4251	-0,4355	-0,4081
Co		1,0000	0,9970	0,9951	0,9806	0,9951
Cr			1,0000	0,9961	0,9782	0,9986
Fe				1,0000	0,9753	0,9951
Mn					1,0000	0,9699
Ni						1,0000

Note : Les travaux de synthèse décennale conduits récemment par Fernandez et Kumar-Roiné, 2021 sur les teneurs en différents éléments mesurés entre 2007 et 2020 ont relevé les mêmes constats ; ils confirment qu'un seul terme source terrigène est en capacité d'alimenter la baie Kwé et que sa nature est notablement invariante quelle que soit la campagne et les conditions météorologiques. En revanche, l'anti-corrélation entre les métaux et Ca est parfois significative, parfois non. Cela suggère que suivant les campagnes, les influences marines diffèrent selon la nature des apports riches en débris récifaux ou en tests d'organismes marins.

Toutes campagnes confondues, les concentrations moyennes montrent une variabilité d'une année à l'autre, notamment pour les métaux latéritiques. Pour le S1-2021, les concentrations en Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont largement supérieures aux valeurs de la plupart des campagnes antérieures y compris celle de 2007 (Etat de Référence). Quant au Ca, la concentration moyenne ne présente pas de différence significative.

Bien que les valeurs relevées en S2-2013 pour le Co, Cr, Mn et Ni demeurent encore les plus fortes enregistrées, il convient de noter que depuis la campagne de S1-2020, les concentrations des métaux du cortège latéritique ont quasi-doublé et que depuis, les teneurs semblent suivre une tendance à la hausse (Tableau 15).

Note : si les concentrations en métaux les plus fortes ont été enregistrées en juillet-août 2013, celles de janvier-mars 2014 correspondent aux plus basses. Quant à la première campagne de 2020, elle se singularise avec des concentrations moyennes en métaux et en Ca présentant de très forts écart-types encore jamais relevés auparavant. Ceci indique que des flux de particules de natures très différentes ont convergé vers l'emplacement du piége lors de cette campagne. Pour la présente campagne, les écart-types mesurés restant dans la normalité, on peut raisonnablement conclure que le flux de particules a été plus constant vers la zone d'étude.

En ce qui concerne le ratio Ca/Fe, l'évolution temporelle est assez fluctuante. Une baisse des moyennes entre la campagne 2007 (Etat de Référence) et celle du S2-2013, permet de conclure à une influence terrigène grandissante durant cette période. En S1-2014, l'empreinte terrigène a été minimale et à compter de la campagne de S2-2016, les ratios se sont progressivement rapprochés de la valeur initiale calculée lors de l'Etat de Référence ; ils tendent depuis S1-2020 à signaler un regain de l'influence terrigène (Tableau 16).

Tableau 15 : Compilation des données moyennes ± écart-types des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St06-KW1.

Année	Semestre	St06-KW1					
		Eléments (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
2007	S1	290 310 (n=1)	58,0 (n=1)	2 667 (n=1)	68 940 (n=1)	577 (n=1)	1 142 (n=1)
2011	S2	256 455 ±19 652	82,9 ±10,2	2 945 ±287	81 853 ±6 980	703 ±75	1 460 ±132
2012	S1	239 104 ±5 873	101 ±10	3 414 ±302	103 323 ±6 769	822 ±77	1 885 ±144
	S2	264 386 ±8 238	106 ±15	3 874 ±547	111 616 ±11 753	840 ±95	1 829 ±201
2013	S1	236 752 ±14 017	127 ±19	4 634 ±547	123 394 ±15 208	1 123 ±162	2 258 ±321
	S2	164 585 ±51 369	215 ±77	7 111 ±2 797	189 733 ±55 033	1 688 ±656	3 540 ±1 392
2014	S1	308 430 ±13 137	46,1 ±18,4	1 259 ±257	31 190 ±8 848	471 ±210	588 ±195
	S2	242 858 ±15 301	115 ±19	3 829 ±581	132 978 ±17 334	885 ±147	1 999 ±258
2015	S1	271 510 ±10 830	82,8 ±12,1	3 007 ±354	85 407 ±11 481	735 ±94	1 563 ±233
	S2	165 560 ±11 919	108 ±34	4 126 ±1 307	101 619 ±24 237	940 ±267	1 882 ±421
2016	S1	219 412 ±25 986	109 ±23	3 083 ±692	136 205 ±22 923	974 ±208	2 148 ±403
	S2	260 620 ±20 111	86,3 ±18,3	3 085 ±557	116 993 ±22 213	723 ±149	1 770 ±370
2017	S1	270 681 ±14 894	80,8 ±12,9	2 928 ±429	110 875 ±19 017	690 ±102	1 716 ±296
	S2	264 210 ±24 159	95,0 ±13,6	3 422 ±417	120 591 ±12 247	742 ±101	1 791 ±224
2018	S1	228 717 ±18 985	86,7 ±81,8	3 279 ±743	113 470 ±23 892	783 ±206	1 766 ±450
	S2	249 671 ±13 443	51,6 ±8,8	2 001 ±335	81 583 ±12 926	448 ±74	1 056 ±178
2019	S1	213 950 ±7 001	70,2 ±5,2	3 133 ±237	123 721 ±15 584	637 ±47	1 516 ±120
	S2	285 951 ±11 598	71,1 ±6,3	2 981 ±223	104 633 ±7 814	675 ±57	1 504 ±116
2020	S1	234 324 ±87 212	149 ±143	4 640 ±2 779	184 601 ±112 952	1 112 ±869	2 825 ±2 317
	S2	261 502 ±12 292	108 ±12	3 694 ±328	170 486 ±15 481	1 218 ±121	2 985 ±313
2021	S1	241 125 ±25 604	145 ±22	4 908 ±701	194 706 ±27 592	1 228 ±169	3 081 ±453

St06-KW1			
Année	Semestre	Ca/Fe	
2007	S1	4,21	(n=1)
2011	S2	3,17	±0,50
2012	S1	2,32	±0,18
	S2	2,4	±0,31
2013	S1	1,95	±0,33
	S2	0,98	±0,46
2014	S1	10,7	±3,13
	S2	1,86	±0,27
2015	S1	3,24	±0,53
	S2	1,72	±0,44
2016	S1	1,68	±0,48
	S2	2,32	±0,53
2017	S1	2,52	±0,53
	S2	2,21	±0,31
2018	S1	2,11	±0,49
	S2	3,16	±0,69
2019	S1	1,76	±0,25
	S2	2,75	±0,25
2020	S1	1,77	±0,92
	S2	1,55	±0,20
2021	S1	1,27	±0,27

Tableau 16 : Compilation des données moyennes ± écart-types de normalisation des concentrations 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.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Rappel : En raison du manque de matière fine dans les pas de collecte 001 et 003 à 006, l'analyse des éléments métalliques n'a été possible que sur les 7 autres échantillons.

Concentration en élément et calcium et normalisation du calcium par le fer

Parmi les 3 stations étudiées, la St15 se distingue par les concentrations moyennes en Co, Cr, Fe, Mn et Ni, les plus élevées, et la concentration moyenne en Ca la plus basse. Quel que soit l'élément, les concentrations sont extraordinairement invariable dans le temps, tout comme les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues (Figure 16 et Tableau 17).

Note : En raison du nombre d'échantillons réduit et d'homogénéité des concentrations mesurées, l'étude de la matrice de corrélation est peu pertinente à réaliser pour cette campagne. Les travaux de synthèse décennale ont toutefois montré que les métaux Fe et Mn ne se corrèlent que de manière moins marquée à trois autres métaux du cortège latéritique (Co, Cr et Ni), confortant alors l'hypothèse de l'existence de termes sources terrigènes différents dans l'alimentation de la Rade du Nord en MES (Fernandez et Kumar-Roiné, 2021).

Tableau 17 : Concentrations en métaux et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 7 prélèvements du piége séquentiel à St15.

Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	136 748	168	6 599	240 148	1 962	3 106
Max	143 847	177	6 930	250 166	1 962	3 191
Moyenne	140 140	172	6 785	244 468	1 897	3 160
Ecart-type	2 357	4	135	3 977	77	33
CV (%)	2	2	2	2	4	1

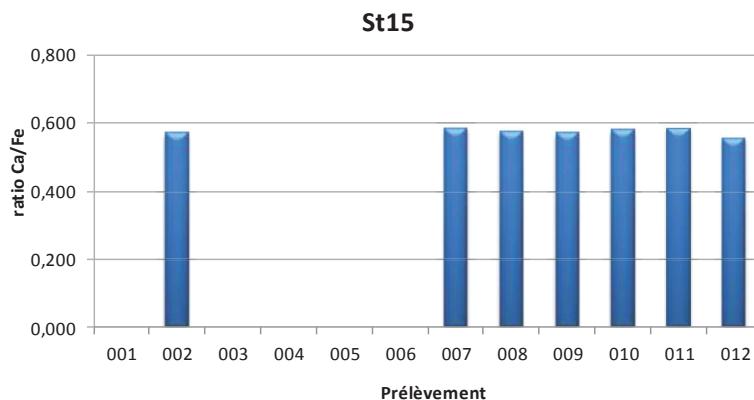


Figure 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 7 prélèvements du piége séquentiel à St15.

Toutes campagnes confondues, les concentrations moyennes en Ca montrent très peu d'homogénéité. A l'inverse, pour les éléments métalliques, les niveaux de concentrations sont comparables (Mn), voire même inférieurs (Co, et Cr) par rapport à ceux obtenus, y compris en 2007 (État de Référence) ; pour ceux du Fe et Ni, ils sont en revanche en légère augmentation. Pour tous les métaux, les niveaux les plus forts ont été enregistrés en S1-2015, les plus faibles en S2-2018. Depuis cette date, les concentrations moyennes sont en sensible hausse, notamment pour Fe et Ni (Tableau 18).

En ce qui concerne les ratios Ca/Fe calculés, ils restent faibles et traduisent l'influence terrigène amplement dominante et relativement constante à St15. Le ratio minimal, c'est-à-dire l'influence terrigène maximale, ayant été relevé lors de la campagne de janvier-mars 2014. À *contrario*, pour cette campagne S1-2021, un regain de l'empreinte océanique est manifeste, y compris par rapport à la campagne S1-2020.

Tableau 18 : Compilation des données moyennes ± écart-types des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES collectées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.

Année	Semestre	St15					
		Eléments (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
2007	S1	61 870 (n=1)	208 (n=1)	8 500 (n=1)	205 660 (n=1)	1 949 (n=1)	2 742 (n=1)
2014	S1	11 118 ±153	295 ±27	13 796 ±1 654	245 119 ±15 893	2 368 ±547	3 927 ±665
	S2	87 180 ±6 927	265 ±23	8 111 ±535	217 647 ±12 561	1 881 ±191	2 798 ±177
2015	S1	78 349 ±29 017	440 ±14	14 204 ±757	290 374 ±11 196	3 788 ±569	5 012 ±266
	S2	85 568 ±10 844	228 ±18	8 016 ±728	177 466 ±13 141	2 148 ±207	2 751 ±248
2016	S1	60 636 ±34 192	195 ±37	5 682 ±1 080	170 877 ±75 892	1 981 ±303	3 101 ±569
	S2	91 451 ±16 898	178 ±33	6 057 ±1 016	198 270 ±35 176	1 861 ±511	2 339 ±383
2017	S1	101 352 ±17 811	184 ±21	8 150 ±859	231 480 ±23 743	1 246 ±174	2 501 ±281
	S2	76 373 ±7 445	221 ±4	7 797 ±163	192 953 ±51 953	1 687 ±85	2 614 ±61
2018	S1	62 558 ±11 186	206 ±14	8 004 ±556	225 530 ±12 942	1 999 ±186	2 599 ±130
	S2	131 705 ±7 255	122 ±4	4 357 ±167	154 270 ±5 575	1 126 ±72	2 096 ±52
2019	S1	132 698 ±14 962	142 ±18	5 595 ±699	159 479 ±19 653	1 581 ±177	1 825 ±241
	S2	131 226 ±16 568	145 ±12	5 578 ±389	178 479 ±11 854	1 432 ±142	1 998 ±140
2020	S1	59 157 ±30 013	212 ±37	8 749 ±1 798	274 810 ±50 860	1 871 ±386	3 034 ±621
	S2	140 394 ±19 718	149 ±10	5 619 ±246	215 927 ±13 487	1 958 ±333	2 934 ±172
2021	S1	140 140 ±2 357	172 ±4	6 785 ±135	244 468 ±3 977	1 886 ±78	3 160 ±33

St15		
Année	Semestre	Ca/Fe
2007	S1	0,301 (n=1)
2014	S1	0,05 ±0,081
	S2	0,401 ±0,023
2015	S1	0,273 ±0,106
	S2	0,481 ±0,041
2016	S1	0,459 ±0,323
	S2	0,464 ±0,052
2017	S1	0,448 ±0,115
	S2	0,418 ±0,107
2018	S1	0,28 ±0,064
	S2	0,855 ±0,061
2019	S1	0,843 ±0,136
	S2	0,74 ±0,124
2020	S1	0,234 ±0,121
	S2	0,65 ±0,074
2021	S1	0,573 ±0,011

Tableau 19 : Compilation des données moyennes ± écart-types de normalisation du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à particules à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Note : En raison du manque de matière fine dans le pas de collecte 003 et 009, l'analyse des éléments n'a été possible que sur les 10 autres échantillons.

Concentration en élément et calcium et normalisation du calcium par le fer

Parmi les 3 stations étudiées, les plus faibles concentrations en métaux sont mesurées en St60-NE. Inversement, cette station présente les plus fortes teneurs en Ca qui ne varient que très peu au fil des pas de collecte. En ce qui concerne les métaux latéritiques, les concentrations maximales ont été mesurées dans le godet 001 pour Co, Fe et Ni tandis que pour le Cr et le Mn, elles ont été obtenues vers la fin de la période de collecte dans les godets 010 et 008, respectivement.

La matrice de corrélation (Tableau 21) montre une similarité certaine dans l'évolution des concentrations de Co, Fe et Ni avec un coefficient élevé ($R > 0,870$). En revanche, aucune autre corrélation n'est constatée y compris entre les 5 métaux latéritiques et le Ca ; l'alternance des influences terrigène et marine n'est donc pas démontrée (Figure 17), le terme source marin étant cependant largement prépondérant.

Les valeurs du ratio Ca/Fe se distribuent entre 13,3 et 16,0 avec une moyenne de $14,9 \pm 0,8$; la plus haute valeur ayant été obtenues dans le godet 006. Ces ratios élevés confirment que l'influence marine demeure largement dominante, corroborant ainsi les résultats des teneurs en carbonates (Figure 17).

Tableau 20 : Concentrations en métaux, soufre et calcium obtenues (moyennes, écart-types et valeurs extrêmes) dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Eléments (mg/kg ps)	St60-NE						
	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
Min	388 987	16,8	635	25 716	184	341	2 662
Max	413 166	21,6	746	29 513	238	405	2 732
Moyenne	401 016	18,2	683	26 905	203	366	2 691
Ecart-type	7 941	1,3	40	1 156	18	20	25
CV (%)	2	7	6	4	9	5	1

Les concentrations en S dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) se distribuent étroitement entre 2 662 mg/kg ps et 2 732 mg/kg ps avec une moyenne de $2 691 \pm 25$ mg/kg ps (Figure 18). Par ailleurs, il est à noter la relation peu significative entre S et Ca ($R = -0,540$). L'apport semble gouverné par les carbonates de calcium biogéniques, ne permettant pas d'émettre d'hypothèses concernant la possibilité d'une relation directe entre les concentrations en Ca et S qui proviendraient du Gypse (CaSO_4) évacué par le diffuseur dans le milieu (Tableau 21).

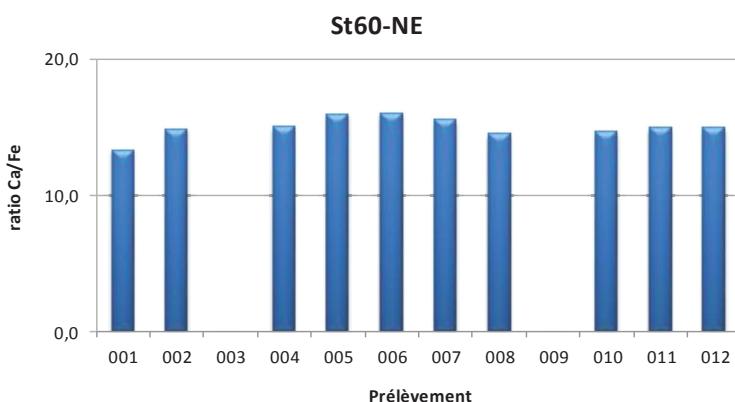


Figure 17 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

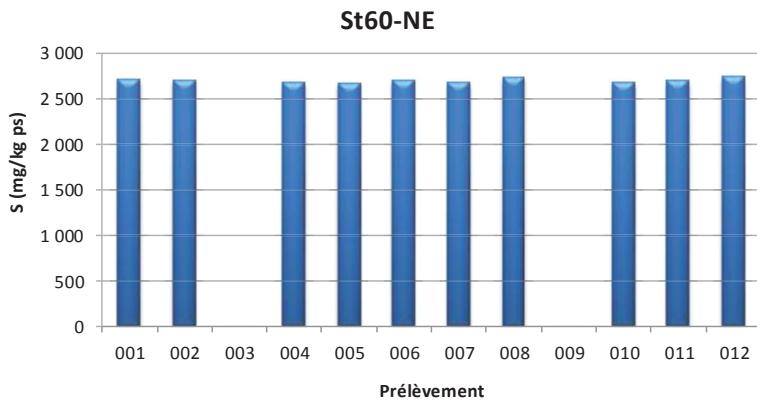


Figure 18 : Concentrations en soufre mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements de MES collectés par le piège séquentiel à particules à St60-NE.

Tableau 21 : Matrice de corrélation inter-éléments des concentrations de métaux et du calcium obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

St60-NE							
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
Ca	1,0000	-0,6413	-0,6592	-0,4564	-0,2501	-0,6926	-0,5399
Co		1,0000	0,6225	0,9210	0,5637	0,9032	0,3309
Cr			1,0000	0,6922	0,4549	0,7755	0,4280
Fe				1,0000	0,6490	0,8794	0,2589
Mn					1,0000	0,7277	0,3943
Ni						1,0000	0,5709

Toutes campagnes confondues (Tableau 22), les concentrations moyennes de Ca varient peu. En effet, les teneurs moyennes restent dans le même ordre de grandeur depuis 2007 (État de Référence). Pour cette campagne S1-2021, les concentrations en Ca sont en légère hausse ainsi que les métaux latéritiques par rapport à l'Etat de Référence. Cette variation est toutefois à relativiser puisque toutes ces concentrations restent bien inférieures à celles de S2-2013, campagne qui à ce jour montre les valeurs les plus hautes à St60-NE, excepté pour le Mn. En effet, pour ce dernier, de manière étonnante, la concentration moyenne mesurée en S2-2020 est le record (Tableau 22).

Quant à la concentration moyenne en S obtenue pour cette période de collecte, elle est inférieure aux niveaux moyens constatés en 2012 (état de référence ; Tableau 22).

Note : Les travaux de synthèse décennale conduite par Fernandez et Kumar-Roiné, 2021 ont mis en évidence qu'en effet les concentrations de Ca sont totalement indépendantes des teneurs en métaux et S mesurées dans les MES, elles-mêmes étant peu inter-correlées, sauf pour le Mn dont la distribution massique des concentrations mesurées entre 2007 et 2020 a relevé une certaine tendance commune avec Ca. En effet, le Mn a la faculté de co-précipiter avec les carbonates et, d'autre part, il est présent en quantités dans le terme source secondaire que constituent les effluents issus du diffuseur. De fait la possibilité de collecter des particules enrichies en Mn est ponctuelle et pourrait avoir été observée, notamment, pendant la campagne de juillet-août 2020 où une concentration anormalement haute de Mn a été mesurée ($840 \pm 451 \text{ mg/kg}$; Tableau 22).

En ce qui concerne l'évolution du ratio Ca/Fe moyen, le minimum ($8,99 \pm 2,26$) a été relevé lors de la campagne S2-2013 (Tableau 23). Depuis, les valeurs moyennes oscillent essentiellement entre 10,0 et 20,0 ; l'influence terrigène semble donc être en hausse à cette station, cependant une seule mesure a été enregistrée en 2007.

Tableau 22 : Compilation des données moyennes ± écart-types des concentrations en métaux et calcium obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges à St60-NE.

Année	Semestre	Eléments (mg/kg ps)							
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S	
2007	S1	340 410 (n=1)	11 (n=1)	332 (n=1)	9 910 (n=1)	109 (n=1)	136 (n=1)	ND	ND
2011	S2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2012	S1	293 760 ±16 723	25,6 ±6,6	662 ±72	20 959 ±2 895	254 ±123	423 ±78	2 903 ±18	
	S2	345 918 ±19 677	29 ±5,0	566 ±23	18 347 ±1 641	189 ±49	345 ±68	3 001 ±13	
2013	S1	306 914 ±5 219	21,3 ±2,6	834 ±58	26 131 ±2 022	262 ±25	478 ±39	3 113 ±28	
	S2	280 315 ±16 630	35,5 ±10,5	921 ±179	32 693 ±6 925	358 ±93	558 ±106	2 656 ±55	
2014	S1	302 211 ±9 477	19,6 ±2,3	569 ±41	17 740 ±1 958	195 ±32	322 ±36	3 812 ±83	
	S2	313 173 ±7 856	24,8 ±3,8	725 ±101	25 695 ±4 668	204 ±30	386 ±64	2 805 ±16	
2015	S1	325 637 ±9 166	31,6 ±6,5	848 ±174	28 754 ±5 415	329 ±61	506 ±95	2 887 ±74	
	S2	347 224 ±3 5214	25,6 ±3,8	702 ±63	22 628 ±2 287	298 ±38	416 ±41	2 776 ±16	
2016	S1	279 965 ±3 4471	25,9 ±5,2	439 ±51	22 735 ±2 589	251 ±35	365 ±52	2 746 ±83	
	S2	342 228 ±27 452	17,1 ±1,5	461 ±33	17 288 ±1 125	143 ±16	252 ±17	2 639 ±50	
2017	S1	349 128 ±7 429	33,2 ±5,9	643 ±59	19 309 ±2 487	302 ±77	397 ±32	2 808 ±11	
	S2	322 239 ±9 420	23,8 ±3,4	589 ±44	22 557 ±1 566	361 ±269	335 ±29	2 816 ±23	
2018	S1	287 342 ±4 920	23,3 ±0,9	621 ±29	24 993 ±1 291	219 ±42	365 ±25	3 325 ±35	
	S2	302 748 ±5 187	15,7 ±0,8	497 ±30	19 765 ±1 210	149 ±11	264 ±16	2 236 ±11	
2019	S1	275 221 ±10 174	16,4 ±2,4	438 ±90	17 679 ±2 349	192 ±38	289 ±45	4 062 ±79	
	S2	342 444 ±14 907	20,9 ±2,7	690 ±71	25 572 ±2 471	250 ±61	361 ±42	3 928 ±7	
2020	S1	357 090 ±13 987	18,9 ±2,6	597 ±68	23 539 ±2 497	372 ±233	304 ±36	3 136 ±31	
	S2	391 721 ±5 806	16 ±2,1	454 ±29	16 644 ±2 773	840 ±451	339 ±27	2 380 ±116	
2021	S1	401 016 ±7 941	18,2 ±1,3	683 ±40	26 905 ±1 156	203 ±18	366 ±20	2 691 ±25	

ND : valeur non déterminée.

St60-NE		
Année	Semestre	Ca/Fe
2007	S1	34,4 (n=1)
2011	S2	ND ND
2012	S1	14,3 ±2,4
	S2	19,0 ±2,7
2013	S1	11,8 ±1,0
	S2	8,99 ±2,26
2014	S1	17,2 ±1,8
	S2	12,5 ±1,8
2015	S1	11,7 ±2,2
	S2	15,4 ±1,5
2016	S1	12,5 ±2,4
	S2	19,8 ±1,2
2017	S1	18,4 ±2,4
	S2	14,4 ±1,1
2018	S1	11,5 ±0,6
	S2	15,4 ±0,9
2019	S1	15,8 ±1,9
	S2	13,6 ±2,1
2020	S1	15,3 ±1,7
	S2	24,4 ±5,6
2021	S1	14,9 ±0,8

ND : valeur non déterminée ; - : pas de campagne ou en cours

Tableau 23 : Compilation des données moyennes ± écart-types de normalisation des concentrations du calcium par le fer obtenu dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES collectées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à particules à St60-NE.

IV. INTERPRETATION

A. INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES

Les quantités de MES collectées et les concentrations en éléments inhérents sont indirectement dépendantes des 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 mesures 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 n'est plus en service, 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 au niveau des stations St06-KW1 et St60-NE ; les précédentes campagnes ont montré des écarts notables, mais constants donc corrélables, 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 07 juillet au 23 août, avec un pas de temps de 96 h, a permis de mettre en évidence les points suivants (Figure 19) :

- Du 07-10 juillet (001) au 23-26 juillet (005) – Au cours de cette période de 20 jours, les quantités de MES piégées restent faibles et diminuent légèrement. A contrario, les ratios Ca/Fe s'accroissent de façon plus soutenue et conjointement, les concentrations de Ni évoluent de manière opposée. Si durant cette période, la pluviométrie journalière a été relativement basse (en moyenne 1,5 mm), en revanche, les régimes de vents, ont été beaucoup plus instables. Sous régime dominant de contre-alizés, les vents ont oscillé sans cesse entre le secteur O et E, le tout accompagné de vents de vitesses faibles à modéré, passant de 6 m/s à 12 m/s ce qui semble avoir favorisé le flux des particules carbonatées des récifs frangeants vers l'emplacement du piège.
- Du 27-30 juillet (006) au 12-15 août (010) – En milieu de période (006 à 007), les quantités de MES piégées augmentent subitement puis chutent aussitôt pour le godet 008. Ces évolutions brusques semblent toutefois n'avoir eu que peu d'incidence sur les concentrations en Ni et les ratios Ca/Fe ; les valeurs de ratios Ca/Fe obtenus évoluent progressivement à la baisse jusqu'au prélèvement 010, et de manière concomitante, les concentrations de Ni suivent l'évolution inverse. Cette période (006 à 008) correspond encore à des régimes de contre-alizés. À partir du 08 août (009), les alizés s'installent durablement avec une accélération du vent passant de 9 à 19 m/s entre les godets 009 et 010. Ce renforcement semble avoir augmenté l'influence terrigène au niveau du chenal d'accès à la baie Kwé en dépit du temps sec qui a régné (en moyenne 0,8 mm sur les 20 jours).
- Du 16-19 août (011) au 20-23 août (012) – Pour cette fin de période de 8 jours, les alizés décélèrent sensiblement, ne dépassant pas les 15 m/s et le temps est un peu plus humide (en moyenne 3,7 mm),

conjonction météorologique qui ne semble toutefois pas avoir engendré de flux de matière terrigène vers l'emplacement du piège ; les ratios Ca/Fe augmentent et les teneurs en Ni diminuent traduisant un recul des apports terrigènes.

Pour cette campagne, peu de liens évidents entre le flux des particules collectées et les facteurs météorologiques se dégagent. Toutefois, ces observations contribuent, conjointement aux données des campagnes antérieures ([Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)), à la description de la dynamique sédimentaire suivante :

- **L'origine terrigène** est logiquement influencée par l'effet combiné de trois facteurs : direction et vitesse du vent et par les taux de précipitation dont les pondérations sont la clé de l'apparition et du transport des panaches terrigènes. Ainsi, le transport des particules liées aux précipitations vers la sortie de la baie (station St06-KW1) dépend étroitement des régimes des vents. En effet, comme cela a précédemment été démontré, les vents de secteurs S d'intensité modérée ont pour effet de remobiliser des particules terrigènes déposées le long de la côte nord de la baie et/ou y confiner un panache turbide, le cas échéant, sortant de la rivière Kwé. À *contrario*, les vents des secteurs E, N et O n'engendrent pas de remise en suspension des MES, mais facilitent l'expansion d'un éventuel panache dans la baie avant de l'évacuer vers le Canal de la Havannah.
- **L'origine marine** est amplifiée par temps sec et pour des vents d'un large secteur S (et notamment de SE) et d'intensité moyenne qui contribuent à la pénétration des masses d'eaux océaniques provenant du Canal de la Havannah, 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 carbonatées plus grossières sous l'effet de la houle créée, conséquence de l'altération mécanique du platier corallien qui délimite la Baie Kwe et le Canal de la Havannah.

Note : Pour mieux caractériser l'effet des précipitations sur les flux verticaux des particules, les apports de la Kwé 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).

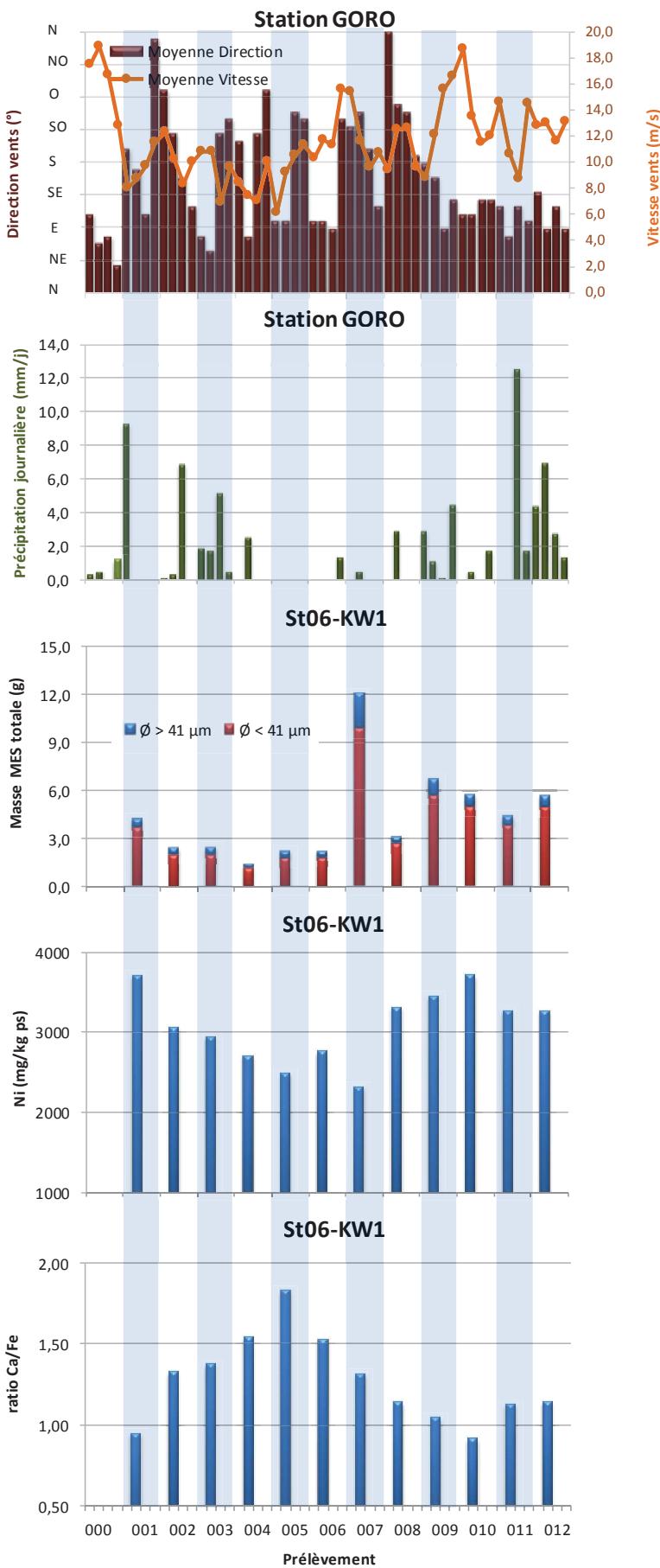


Figure 19 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe mesurées dans les fractions fines piégées à St06-KW1.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Rappel : En raison du manque de matière fine dans les pas de collecte 001 et 003 à 006, les analyses des éléments métalliques n'ont été possibles que sur les 7 autres échantillons.

L'immersion du piège à particules séquentiel à St15 du 07 juillet au 23 août avec un pas de temps de 96 h a permis d'émettre les observations suivantes (Figure 20) :

- **Du 07-10 juillet (001) au 04-07 août (008)** – Au cours de cette période de 36 jours, les quantités de MES piégées restent infinitésimales ce qui n'a pas permis le dosage des métaux pour tous les pas de collecte. Ces prélèvements correspondent à une période assez sèche (en moyenne 1,1 mm) mais particulièrement instable avec des régimes soutenus de contre-alizés tout au long de cette période ; ces perturbations ayant eu toutefois peu d'incidence sur les flux de matières particulières.
- **Du 08-11 (009) au 20-23 août (012)** – Les régimes d'alizés se renforcent dans cette deuxième période et les averses deviennent un peu plus abondantes (en moyenne 2,6 sur 16 jours) : ces conditions ont eu des conséquences sur la quantité de MES piégée puisque la masse maximale est atteinte dans le godet 010. En comparaison, l'évolution des concentrations de Ni et des ratios Ca/Fe restent modestes ; les valeurs mesurées entre les pas de temps de collecte sont remarquablement régulières, aucune alternance entre les apports (terrigenes vs carbonatés) n'est observée.

Toutes ces observations y compris celles formulées lors des campagnes antérieures ([Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)) permettent de décrire la dynamique sédimentaire qui affecte cette baie, ainsi :

- **L'origine terrigène** des particules est dictée 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 des précipitations fortes *via* le creek qui y débouche. Le transport de ces particules vers l'emplacement du piège est cependant relativement dépendant de l'action des régimes de vents. Ainsi, abritées des vents de N, E et S, les particules terrigènes apportées par le creek parviennent au niveau de la station du piège sans autre forçage que celui des courants de marée. Quant aux vents, ceux du secteur SE, ils peuvent plaquer le panache turbide le long de la ligne de côte nord de la rade ; par ailleurs, ceux d'un large secteur S à SO peuvent générer une remise en suspension des particules fines déposées, par faible profondeur (<3 m), le long de cette même ligne de côte. Les vents de composante O, quant à eux, peuvent remobiliser plus en profondeur, en particulier les particules plus riches en Ni déposées sur le talus prodeltaïque édifié par les apports du Creek de la rade Nord.
- **L'origine marine** est toujours peu marquée à cette station, comme le montrent les valeurs de ratios Ca/Fe obtenues qui sont très basses. La contribution marine, bien que peu évolutive, est principalement engendrée par les vents de secteur N et également par les vents d'O de forces faible à modéré qui alors apportent des débris carbonatés arrachés aux récifs frangeants du large (ex. : îlot Gabriel).

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

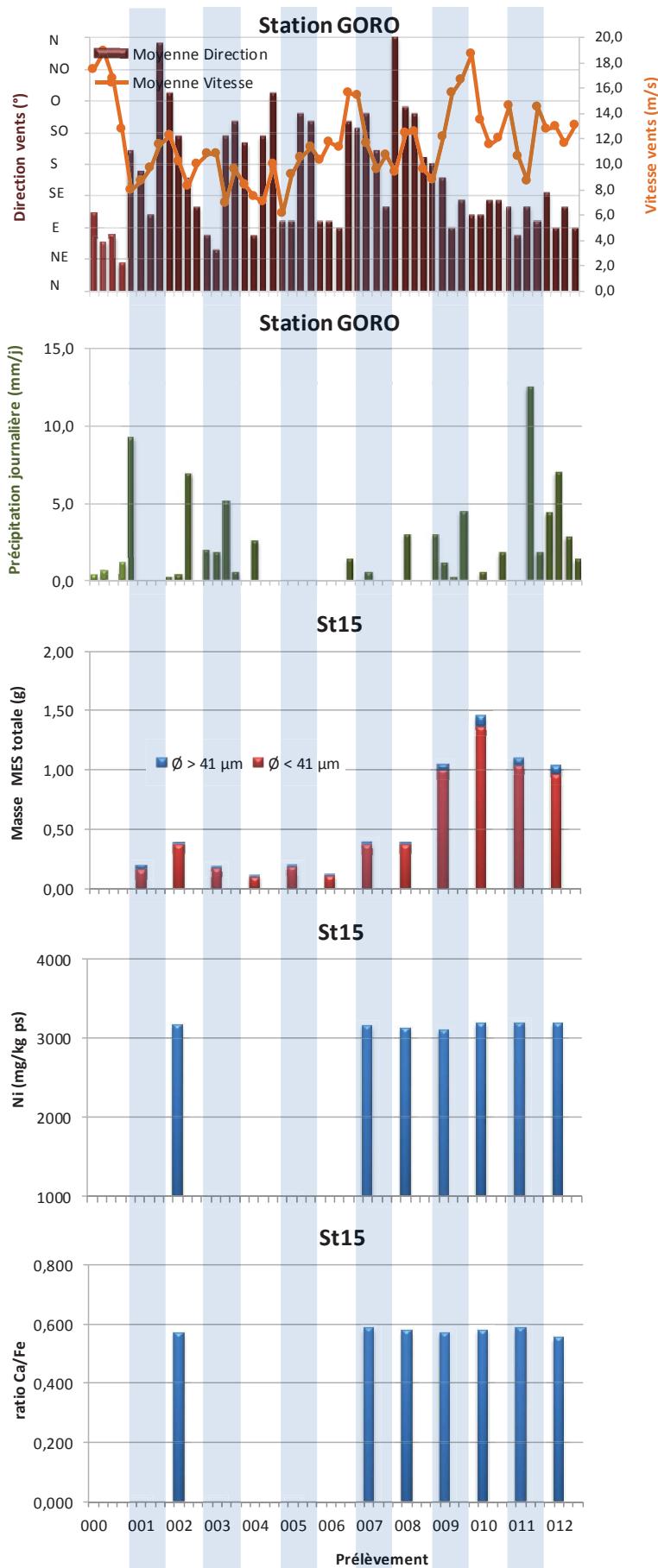


Figure 20 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe mesurées dans les fractions fines piégées à St15.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Note : En raison du manque de matière fine dans le pas de collecte 003 et 009, les analyses des éléments n'ont été possibles que sur les 10 autres échantillons.

L'immersion du piège séquentiel à particules à St60-NE du 07 juillet au 23 août, avec un pas de temps de 96 h a permis d'énoncer les observations suivantes (Figure 21) :

- **Du 07-10 juillet (001) au 04-07 août (008)** – Pendant cette première période, les quantités de MES piégées sont faibles (<1,50 g). Les teneurs maximales en Ni sont observées dans le godet 001 et 008 ; entre ces extrêmes les concentrations évoluent à la baisse, en même temps les ratios Ca/Fe suivent un effet miroir.
- **Du 08-11 (009) au 20-23 août (012)** – Le retour des alizés caractérise cette deuxième période notamment pendant les pas de collecte 009 et 010 où le vent s'est intensifié en passant de 9 à 19 m/s. Ces changements semblent avoir favorisé les flux de matière particulaire (godets 010 à 012) sans pourtant impacter la nature des apports ; les concentrations en Ni et les ratios Ca/Fe ne varient guère.

Peu de corrélations évidentes entre le flux des particules et les facteurs météorologiques se dégagent ; les flux des particules à cette station pouvant être régis majoritairement par d'autres mécanismes tels que l'intensité des courants de marées ([Derex et Douillet, 2008](#) ; [Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)). En raison de sa localisation (à 60 m au nord-est de l'émissaire) et les flux de particules peuvent être envisagés comme suit :

- **L'origine terrigène** ne serait pas en lien direct avec la lixiviation des sols, conséquence des précipitations. En effet, en raison de son éloignement à la côte et de l'intense hydrodynamisme régnant dans le Canal qui met en place de forts courants orientés SW-NE, il est peu probable que les particules latéritiques arrachées aux bassins versants de l'extrême sud calédonien puissent être directement transportées jusqu'à la station St60-NE. Toutefois, une combinaison de conditions hydro-climatiques et marégraphiques particulières d'intensités variables (comme cela était le cas pour la première campagne de 2020 ; [Kumar-Roiné et al., 2020](#)) peuvent conduire au transport de particules vers le large, notamment avec des vents faibles et variables de SW à NE.
- **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 récifal et contribuent à la circulation des eaux enrichies en tests de micro-organismes et débris carbonatés.

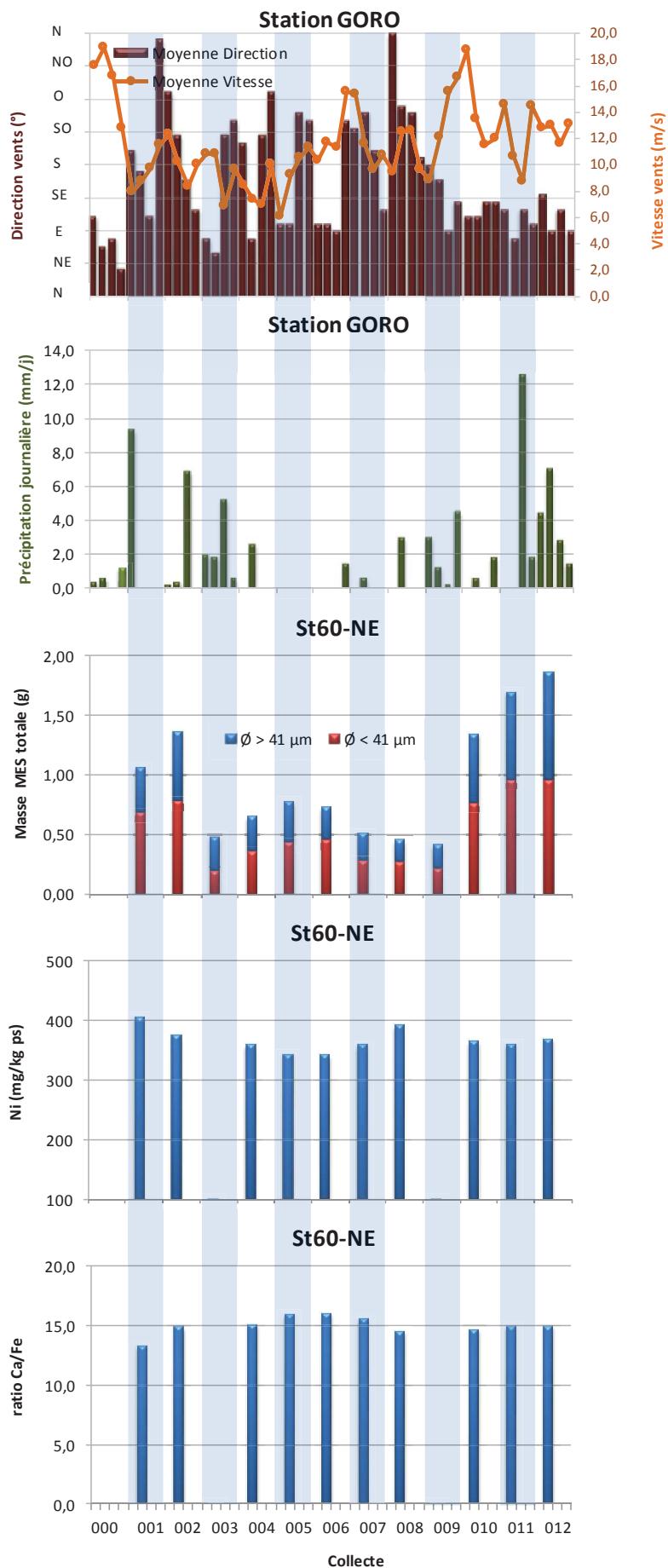


Figure 21 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations en nickel et des ratios Ca/Fe mesurées 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)

La densité moyenne de flux mesurée lors de cette campagne est de $22,1 \pm 14,8 \text{ g/m}^2/\text{j}$, valeur qui est comparable à celle enregistrée en 2006 pour l'État de Référence. Entre les différentes campagnes, les valeurs varient fortement sans montrer une tendance particulière ; la maximale étant mesurée en S1-2018 ($98 \pm 137 \text{ g/m}^2/\text{j}$) avec une très grande variabilité.

Illustrés par le cas du Ni, les flux métalliques moyens lors de cette campagne sont de $67,7 \pm 40,0 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$. Comme attendu, d'une campagne à l'autre, ces valeurs moyennes varient également beaucoup. Le flux maximum a été calculé pour S2-2013 ($282 \pm 626 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$) (Tableau 24), valeur moyenne qui décroît ensuite d'environ 50% et reste stable jusqu'à la campagne S1-2019. A compter de cette date les valeurs doublent et retrouvent depuis, le niveau de S2-2013.

Du fait de l'emplacement de la station St06-KW1, les flux des MES et en Ni mesurés sont directement dépendants de l'action combinée de la direction du vent, de sa vitesse et des précipitations, bien qu'il n'y ait pas de corrélation nette avec ce dernier paramètre. Ceci est particulièrement illustré par la campagne de S1-2014 où les 920 mm de pluie n'ont pas conduit à piéger une quantité supérieure à celles des campagnes de S2-2013 et S1-2018 dont les pluviométries ont été bien plus faibles (467 et 631 mm, respectivement). De fait en 2014, les vents du secteur E-SE, relativement plus faibles ($9,3 \pm 4,0 \text{ m/s}$) qu'en 2018, n'auraient permis ni l'expansion du panache turbide jusqu'à l'emplacement du piège, ni la formation d'un clapot suffisant pour engendrer des remises en suspension de particules (Tableau 24 ; [Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)).

2. Rade Nord de Prony (St15)

Entre les différentes campagnes conduites à St15, les densités moyennes de flux sont également très variables. Pour cette campagne 2021, la moyenne ($2,75 \pm 2,37 \text{ g/m}^2/\text{j}$) est environ 2,5 fois plus élevée que celle enregistrée en 2006 pour l'État de Référence, mais reste bien inférieure à celle relevée en S1-2020 ($84 \pm 260 \text{ g/m}^2/\text{j}$).

Les flux métalliques moyens pour cette campagne S1-2021 sont de $13,1 \pm 7,0 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$. Entre les campagnes, une fois de plus, celle de S1-2020 présente la valeur moyenne maximale ($590 \pm 1\,431 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$) (Tableau 25).

Ces valeurs moyennes exceptionnelles de S1-2020 sont à mettre en lien avec les précipitations, elles aussi exceptionnelles à la suite d'une perturbation atmosphérique induisant l'épisode pluvio-orageux intense du 29 février 2020 ; il a été mesuré à la station météorologique GORO Résidus un cumul de 480 mm en 24 h, combiné à du vent de secteur N-NE ([Kumar-Roiné et al., 2020](#)). Abritées de ces vents, les particules chargées en métaux latéritiques arrachées du petit bassin versant du Creek de la Rade Nord ont occupé toute la Rade Nord, comme enregistré par le piège à sédiments (Tableau 25).

Comparativement, la campagne S1-2014 marquée par trois épisodes météorologiques également très intenses (cumul 920 mm de pluie combiné aux alizés) n'a pas entraîné d'accroissement remarquable dans les apports en particules. En réalité, les flux sont variables et régis par l'ensemble des conditions hydro-climatiques examinées dans cette étude. En effet, ils sont générés par une conjonction de facteurs météorologiques, tous en lien avec le taux de précipitations atmosphériques, mais potentiellement accentués selon les régimes de vents qui s'installent de forme concomitante ([Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)).

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Les densités moyennes de flux sont moins variables à cette station. La valeur pour cette campagne est de $4,71 \pm 2,54 \text{ g/m}^2/\text{j}$, ce qui reste inférieur aux quantités collectées en 2007 (État de Référence). À signaler que les moyennes obtenues depuis 2012 demeurent toutes inférieures à celles enregistrées en 2007 y compris pour la S1-2020, campagne où la densité moyenne a été la deuxième plus forte relevée.

Note : les valeurs de 2007 proviennent malencontreusement d'une campagne de référence unique et ne permettent donc pas des comparaisons suffisamment robustes avec les données du suivi.

Les flux moyens de Ni lors de cette campagne S1-2021 sont de $1,91 \pm 0,93 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$; valeur comparable à celle obtenue en 2007 ($2,40 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$) lors de la définition de l'État de Référence. A l'inverse des densités de flux particulaires, entre les différentes campagnes la variation des flux métalliques peut être importante, puisqu'elle peut dépasser les 200 %, soit un facteur 3 (Tableau 26). Cette observation démontre que l'apport de particules terrigènes n'est qu'occasionnel comme cela a été le cas en S1-2020 (Tableau 26).

Tableau 24 : Compilation des moyennes ± écart-types des flux en matière particulaire totale, des cumuls de masses de MES totales piégées et des flux en Nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St60-KW1 et la compilation des données météorologiques

St06-KW1											
Année	Semestre	Campagne	Densités de flux de MES (g/m ² /j)		Cumul de masse de MES piégées (g/m ²)		Flux Ni moyen (mg ps/m ² /j)	Cumul journalier de précipitation (mm/j)*		Vitesse moyen journalier de vent*	
			mes	±st	mes	±st	mes	ND	mes	ND	
2006	2	Oct. - Nov. 2006	14,6	±7,4	350		ND	ND	54,4	ND	ND
2007	1	Mars - Avr. 2007	46,1	±44,7	1 106		192 (n=1)		273	ND	ND
2011	2	Juil. - Août 2011	27,1	±30,0	1 299		40,6 ±47,4		274	11,3	±3,2
2012	1	Janv. - Mars 2012	39,5	±33,2	1 894		77,3 ±70,7		370	12,3	±2,7
	2	Sept. - Oct. 2012	26,4	±13,1	1 267		48,4 ±25,4		279	12,0	±2,4
2013	1	Janv. - Févr. 2013	46,5	±28,5	2 231		101 ±58		181	12,0	±2,1
	2	JUIL. - Août 2013	58,1	±87,8	2 786		282 ±627		467	11,3	±3,6
2014	1	Janv. - Mars 2014	60,7	±34,1	2 914		35,9 ±22,0		920	9,3	±4
	2	Sept - Oct. 2014	11,8	±8,4	569		22,5 ±15,3		200	7,8	±2,9
2015	1	Janv. - Mars 2015	66,3	±36,1	3 181		102 ±58		243	12,0	±3,7
	2	Oct. - Nov. 2015	38,8	±30,5	1 864		82,8 ±82,7		96	12,4	±3,1
2016	1	JUIL. - Sept. 2016	28,7	±22,9	1 379		69,3 ±67,6		247	10,8	±2,4
	2	Oct. - Nov. 2016	18,5	±13,9	886		32,3 ±24,6		267	11,3	±2,5
2017	1	Avr. - Mai 2017	45,3	±40,3	2 173		76,9 ±67,8		443	12,5	±4,2
	2	Sept. - Nov. 2017	20,4	±23,0	979		36,5 ±41,3		58,4	11	±2,1
2018	1	Mars - Avr. 2018	98,0	±137	4 690		225 ±425		631	13,6	±3,3
	2	Mai - Juil. 2018	30,1	±22,8	1 443		34 ±29,3		105	11,1	±3,4 (IC)
2019	1	Mars - Mai 2019	51,5	±24,4	2 470		77,1 ±36,0		389	12,4	±3,2 (IC)
	2	JUIL. - Sept. 2019	17,8	±11,5	856		27,4 ±18,3		88,2	11,3	±2,4
2020	1	Janv. - Mars 2020	51,7	±63,9	2 482		246 ±554		>225 (IC)	12,8	±3,0 (IC)
	2	JUIL. - Août 2020	18,2	±11,3	876		54,7 ±36,6		>107 (IC)	11,4	±3,4 (IC)
2021	1	JUIL. - Août 2021	22,1	±14,8	1 059		67,7 ±40,0		75,2	11,1	±2,7

* 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) ; - : pas de campagne ou en cours ; ND : données météorologiques non disponibles suite à un dysfonctionnement technique ; IC : collecte des données incomplète suite à un dysfonctionnement technique.

Tableau 25 : Compilation des moyennes ± écart-types des flux en matière particulaire totale, des cumuls de masses de MES totales piégées et des flux en Nickel dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à ST15 et la compilation des données météorologiques.

St15											
Campagne	Semestre	Campagne	Densités de flux de MES (g/m ² /j)	Cumul de masse de MES piégées (g/m ²)	Flux Ni moyen (mg ps/m ² /j)	Cumul journalier de précipitation (mm/j)*	Vitesse moyen journalier de vent (m/s)*				
2006	2	Oct. – Nov. 2006	1,05 ±0,64	25,2	ND ND	54,4	ND	ND			
2007	1	Mars - Avr. 2007	1,55 ±1,45	37,1	13,8 (n=1)	272,6	ND	ND			
2014	1	Janv. - Mars 2014	22,2 ±44,5	1 063	86,8 ±165	920,2	9,3	±4,0			
	2	Sept. – Oct. 2014	0,91 ±1,23	43,8	5,76 ±3,62	199,6	7,3	±2,9			
2015	1	Janv. - Mars 2015	2,78 ±2,98	134	17,7 ±14,0	242,6	12	±3,7			
	2	Juil. - Sept. 2015	1,31 ±1,34	62,7	5,56 ±3,69	148,9	11,6	±2,6			
2016	1	Mai - Juil. 2016	8,67 ±7,44	416	26,7 ±26,8	241,4	10,9	±3,1			
	2	Oct. – Nov. 2016	2,19 ±2,48	105	7,76 ±6,11	266,8	11,3	±2,5			
2017	1	Avr. - Mai 2017	8,05 ±5,78	386	20,5 ±16,5	443,2	12,5	±4,2			
	2	Sept. – Nov. 2017	1,49 ±1,52	71	6,7 ±3,78	58,4	11	±2,1			
2018	1	Mars – Avr. 2018	8,34 ±9,63	400	23,2 ±25,2	631,3	13,6	±3,3			
	2	Mai – Juil. 2018	4,35 ±2,81	209	10,6 ±5,2	105,2	11,1	±3,4 (IC)			
2019	1	Mai – Juil. 2019	15,3 ±10,6	490	26,7 ±17,6	149,1	10,2	±3,2			
	2	Juil. – Sept. 2019	3,69 ±2,55	177	7,49 ±5,38	88,2	11,3	±2,4			
2020	1	Janv. – Mars 2020	84 ± 260	3341	590 ±1431	225,3 (IC)	12,8	±3,0 (IC)			
	2	Juil. – Août 2020	3,48 ±3,56	167	12,5 ±11,1	>107,3 (IC)	11,4	±3,4 (IC)			
2021	1	Juil. – Août 2021	2,75 ±2,37	132	13,1 ±7,0	75,2	11,1	±2,7	*		

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) ; - : pas de campagne ou en cours ; ND : données météorologiques non disponibles suite à un dysfonctionnement technique ; IC : collecte des données incomplète suite à un dysfonctionnement technique.

Tableau 26 : Compilation des moyennes ± écart-types des flux en matière particulaire totale, des cumuls de masses de MES totales piégées et des flux en nickel dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à ST60-NE et la compilation des données météorologiques.

St60-NE										
Campagne	Semestre	Campagne	Densités de flux de MES (g/m ² /j)	Cumul de masse de MES piégées (g/m ²)	Flux Ni moyen (mg ps/m ² /j)	Cumul journalier de précipitation (mm/j)*	Vitesse moyen journalier de vent (m/s)*			
2007	1	Févr. - Mars 2007	31,6 ±40,1	949	2,45 (n=1)	ND	ND	ND	ND	ND
2012	1	Janv. - Mar 2012	9,61 ±8,87	461	3,96 ±3,66	370,1	12,3	±2,7		
	2	Sept. - Oct. 2012	4,1 ±5,39	197	3,55 ±1,79	278,5	12	±2,4		
2013	1	Janv. - Mars 2013	12,6 ±13,6	603	7,72 ±5,70	181,2	12	±2,1		
	2	Juil. - Août 2013	5,85 ±7,09	281	2,87 ±3,44	467	11,3	±3,6		
2014	1	Avr. - Juin 2014	7,43 ±5,05	356	2,46 ±1,74	260,9	8,3	±3,5		
	2	Sept. - Oct. 2014	8,13 ±9,08	390	2,93 ±3,23	199,6	7,3	±2,9		
2015	1	Janv. - Mars 2015	16 ±15,6	766	8,57 ±9,87	242,6	12	±3,7		
	2	Juil. - Sept. 2015	9,88 ±9,20	474	3,97 ±3,31	148,9	11,6	±2,6		
2016	1	Mai - Juil. 2016	17,1 ±10,2	822	7,58 ±3,07	241,4	10,9	±3,1		
	2	Oct. - Nov. 2016	11,1 ±17,6	535	3,26 ±4,52	266,8	11,3	±2,5		
2017	1	Avr. - Mai 2017	15,5 ±14,2	745	7,46 ±5,60	443,2	12,5	±4,2		
	2	Sept. - Nov. 2017	7,28 ±6,36	350	2,36 ±1,95	58,4	11	±2,1		
2018	1	Mars - Avr. 2018	18,3 ±18,1	897	7,66 ±6,10	631,3	13,6	±3,3		
	2	Mai - Juil. 2018	8,37 ±6,34	402	2,58 ±1,44	105,2	11,1	±3,4 (IC)		
2019	1	Mai - Juil. 2019	19,2 ±12,2	919	5,3 ±3,48	389,3	12,4	±3,2 (IC)		
	2	Juil. - Sept. 2019	9,98 ±7,57	439	4,23 ±2,63	88,2	11,3	±2,4		
2020	1	Janv. - Mars 2020	19,5 ±13,8	935	7,19 ±4,19	225,3 (IC)	12,8	±3,0 (IC)		
	2	JUIL. - AOÛT 2020	7,62 ±8,35	366	2,94 ±3,20	>107,3 (IC)	11,4	±3,4 (IC)		
2021	1	JUIL. - AOÛT 2021	4,71 ±2,54	226	1,91 ±0,93	75,2	11,1	±2,7	*	

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) ; - : pas de campagne ou en cours ; ND : données météorologiques non disponibles suite à un dysfonctionnement technique ; IC : collecte des données incomplète suite à un dysfonctionnement technique.

V. SYNTHESE

La campagne S1-2021 de suivi des densités de flux verticaux de particules s'est déroulée du 07 juillet au 23 août aux stations St06-KW1, St15 et St60-NE. Cette campagne est caractérisée par une pluviométrie très faible et une instabilité généralisée des régimes de vent.

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 collectée sont majoritairement influencées par les variations de direction et vitesse du vent, entraînant des courants de surface et la formation de clapot, moteur de la resuspension des particules, en lien souvent indirect avec l'intensité des précipitations qui provoquent l'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 a permis de constater la mise en place d'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. À noter également que la campagne de S2-2013 présente à ce jour les concentrations métalliques et la densité de flux en Ni les plus hautes. Depuis cette date, une relative stabilité des charges terrigènes apportées dans la baie est manifeste. Toutefois, des conditions exceptionnelles, telles que rencontrées lors de la campagne du premier semestre de 2018 (forte pluviométrie et forts vents omniprésents avec le passage successif du cyclone HOLA et de 2 dépressions LINDA et IRIS ; [Kumar-Roiné et al., 2018](#)), ainsi que de 2020 (forte pluviométrie du 29 février ; [Kumar-Roiné et al., 2020](#)) ont eu des conséquences très notables sur la densité de flux en Ni ; ces deux campagnes enregistrent les deuxièmes plus fortes valeurs mesurées depuis 2007. Pour la présente campagne S1-2021, voire depuis S1-2020, on observe toutefois un regain de l'empreinte terrigène à la station St06-KW1.
- Les particules terrigènes piégées à la station St15 sont très majoritairement d'origine terrigène et proviennent probablement de différents termes sources qui sont différenciés par leurs compositions en Fe et Mn, comme cela a été souvent relevé lors des campagnes précédentes ([Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)). La St15 se trouve donc dans une zone de convergence de plusieurs termes sources de matériel terrigène ; selon les conditions météorologiques régnantes ces sources s'expriment de manière différenciée alors que, paradoxalement, les concentrations en métaux latéritiques, dont le Ni est le meilleur exemple, semblent relativement stables. Dans ce système, la dispersion des panaches turbides générés par les précipitations atmosphériques est modulée par l'action des vents en direction et vitesse pour déterminer l'expansion ou le confinement des particules issues du Creek de la rade Nord. 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 faibles valeurs moyennes du ratio Ca/Fe depuis 2007 (État de Référence), conforte ces interprétations, tout comme la constance des valeurs moyennes des concentrations en métaux latéritiques. Les densités de flux en Ni, les plus fortes, ont été mesurées en S1-2020 en lien avec la combinaison des précipitations exceptionnelles et des régimes de vent du secteur N-NE favorables à l'expansive de la planche terrigène.
- Les particules terrigènes piégées à St60-NE 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 de particules collectées ; 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 sont 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 montrer une empreinte 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 une somme de mécanismes qu'il n'est pas encore pertinent de tenter d'expliquer : érosion de la côte, contribution des rejets de l'émissaire marin, courants marins ?

A la station St60-NE (comme pour la station St60-KW1), la campagne de S2-2013 présente à ce jour, excepté du Mn, les concentrations métalliques les plus hautes ce qui suggère, malgré tout, la présence d'une signature terrigène certaine, même minime ; la concentration moyenne en Mn, pour la campagne S2-2020, dépasse à présent celles obtenues en S2-2013. Ces concentrations se distinguent par une très forte variation, déjà décelée en deux occasions auparavant, à savoir lors de la campagne de S2-2017 et S1-2020.

En ce qui concerne la présence de gypse (CaSO_4), aucune trace d'enrichissement anormal n'est discernée ni pour Ca, ni pour S. Ce composé étant par ailleurs très soluble, les analyses minéralogiques qui seront fournies prochainement permettraient de conforter l'hypothèse de la présence de minéraux gypseux à cette station.

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 cristallochimie 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. Modele Hydrodynamique : Altas 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 particulières. 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.

Fernandez JM., Kumar-Roiné S. 2021. Suivi semestriel des flux de matières en suspension. Rapport de synthèse 2010 2010-2020. Contrat AEL/Vale-NC 386-VI-20_P/L35746, 37p.

Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM. 2018. Suivi des densités de flux verticaux des particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1^{er} semestre 2018. Période de mars à avril 2018. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L06375/0001, 65p.

Kumar-Roiné S., Moreton B., Laurent A., Fernandez JM. 2020. Suivi des densités de flux verticaux des particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1^{er} semestre 2020. Période de janvier à mars 2020. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L26981/0001, 58p.

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 REPRESENTE 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, EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIERE) POUR LA PERIODE DU 07 JUILLET AU 23 AOUT 2020.....	12
FIGURE 4 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEE 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.....	14
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.....	14
FIGURE 6 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	15
FIGURE 7 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	16
FIGURE 8 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEE 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 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 7 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.....	18
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 2 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.....	20
FIGURE 12 : MASSE TOTALE DES MES PIEGEES ET COMPOSITION EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTIONS GROSSIERES ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DES 12 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 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.....	21
FIGURE 14 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 2 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.....	23
FIGURE 15 : 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 St06-KW1.....	24
FIGURE 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 7 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 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.....	30
FIGURE 18 : CONCENTRATIONS EN SOUFRE MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 10 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 MESUREES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A St06-KW1.....	36
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 MESUREES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A St15.....	38

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 MESUREES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A ST60-NE..... 40

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LISTE ET POSITION DES STATIONS DE PRELEVEMENT DU SUIVI DES FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LA ZONE D'INFLUENCE DE L'USINE DE PRONY RESOURCES.....	9
TABLEAU 2 : DETAIL DE COLLECTE DES ECHANTILLONS PAR LES PIEGES SEQUENTIELS MOUILLES A St06-KW1, St15 ET St60-NE ...	11
TABLEAU 3 : COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DE PIEGES SEQUENTIELS AUX STATIONS St06-KW1, St15 ET St60-NE.....	13
TABLEAU 4 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE LA MES MOYENNE COLLECTEE (4 JOURS), DES POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET DES TENEURS EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1.....	15
TABLEAU 5 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 4 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	16
TABLEAU 6 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1... ..	17
TABLEAU 7 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE LA MES MOYENNE COLLECTEE (4 JOURS), DES POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET DES TENEURS EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.....	19
TABLEAU 8 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 2 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.	20
TABLEAU 9 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.	20
TABLEAU 10 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE LA MES MOYENNE COLLECTEE (4 JOURS), DES POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET DES TENEURS EN CARBONATES DANS LA FRACTION FINE LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE.....	22
TABLEAU 11 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 2 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.....	23
TABLEAU 12 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St60-NE.....	23
TABLEAU 13 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	24
TABLEAU 14 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUE DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	25
TABLEAU 15 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St06-KW1.....	26
TABLEAU 16 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE NORMALISATION DES CONCENTRATIONS DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A St06-KW1.....	27
TABLEAU 17 : CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 7 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.	28
TABLEAU 18 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES COLLECTEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A St15.....	29

TABLEAU 19 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE NORMALISATION DU CALCIUM PAR LE FER OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A ST15.....	29
TABLEAU 20 : CONCENTRATIONS EN METAUX, SOUFRE ET CALCIUM OBTENUES (MOYENNES, ECART-TYPES ET VALEURS EXTREMES) DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	30
TABLEAU 21 : MATRICE DE CORRELATION INTER-ELEMENTS DES CONCENTRATIONS DE METAUX ET DU CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A ST60-NE.....	31
TABLEAU 22 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCIUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A ST60-NE.	32
TABLEAU 23 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DE NORMALISATION DES CONCENTRATIONS DU CALCIUM PAR LE FER OBTENU DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES COLLECTEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A ST60-NE.....	33
TABLEAU 24 : COMPILATION DES MOYENNES ± ECART-TYPES DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE, DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES ET DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-KW1 ET LA COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES ...	43
TABLEAU 25 : COMPILATION DES MOYENNES ± ECART-TYPES DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE, DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES ET DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST15 ET LA COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES.....	44
TABLEAU 26 : COMPILATION DES MOYENNES ± ECART-TYPES DES FLUX EN MATIERE PARTICULAIRE TOTALE, DES CUMULS DE MASSES DE MES TOTALES PIEGEES ET DES FLUX EN NICKEL DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A ST60-NE ET LA COMPILATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES.	45

ANNEXES

ANNEXE 1.....	54
ANNEXE 2.....	55
ANNEXE 3.....	56
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 grésés sur une ligne de mouillage. La collecte séquentielle est réalisée avec un pas de temps programmé de 96 heures (4 jours), soit un total de 12 échantillons pour 48 jours. Une fois réceptionnés au laboratoire, les prélèvements de MES sont séchés, conditionnés puis conservés dans des sachets à usage unique.

TAMISAGE

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

TENEUR EN CARBONATE

La teneur en carbonates est calculée par relation stœchiométrique à partir des concentrations de Ca et Mg établies en mg/kg après attaque totale (fusion alcaline) des fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES.

GRANULOMETRIE

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est réalisée sur douze 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 douze échantillons de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$). Cette analyse a été confiée au laboratoire ALS 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-4 et PACS-3) ont été attaqués selon le même protocole pour la validation des résultats de mesures.

DOSAGE DES HCT

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

EVALUATION DES FLUX DE MES

Une fois les MES caractérisées, les influences terrigène et marine (ratio de Ca/Fe) ainsi que les flux sont estimés (g/m²/j) et confrontés aux différents régimes météorologiques.

ANNEXE 2

VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES

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
001	07/07/2021	9,3	8,0	200	SSO	007	31/07/2021	0,0	15,4	230	SO
	08/07/2021	0,0	8,7	170	S		01/08/2021	0,6	11,6	250	OSO
	09/07/2021	0,0	9,7	110	ESE		02/08/2021	0,0	9,6	200	SSO
	10/07/2021	0,0	11,5	350	N		03/08/2021	0,0	10,7	120	ESE
002	11/07/2021	0,2	12,3	280	O	008	04/08/2021	0,0	9,4	360	N
	12/07/2021	0,4	10,2	220	SO		05/08/2021	3,0	12,5	260	O
	13/07/2021	6,9	8,3	160	SSE		06/08/2021	0,0	12,6	250	OSO
	14/07/2021	0,0	10,0	120	ESE		07/08/2021	0,0	9,6	190	S
003	15/07/2021	2,0	10,8	80	E	009	08/08/2021	3,0	8,8	180	S
	16/07/2021	1,8	10,8	60	ENE		09/08/2021	1,2	12,1	160	SSE
	17/07/2021	5,2	6,9	220	SO		10/08/2021	0,2	15,6	90	E
	18/07/2021	0,6	9,6	240	OSO		11/08/2021	4,5	16,6	130	SE
004	19/07/2021	0,0	8,4	210	SSO	010	12/08/2021	0,0	18,7	110	ESE
	20/07/2021	2,6	7,4	80	E		13/08/2021	0,6	13,5	110	ESE
	21/07/2021	0,0	7,0	220	SO		14/08/2021	0,0	11,5	130	SE
	22/07/2021	0,0	10,0	280	O		15/08/2021	1,8	12,0	130	SE
005	23/07/2021	0,0	6,1	100	E	011	16/08/2021	0,0	14,6	120	ESE
	24/07/2021	0,0	9,2	100	E		17/08/2021	0,0	10,6	80	E
	25/07/2021	0,0	10,5	250	OSO		18/08/2021	12,5	8,7	120	ESE
	26/07/2021	0,0	11,3	240	OSO		19/08/2021	1,8	14,5	100	E
006	27/07/2021	0,0	10,3	100	E	012	20/08/2021	4,4	12,8	140	SE
	28/07/2021	0,0	11,7	100	E		21/08/2021	7,0	13,0	90	E
	29/07/2021	0,0	11,3	90	E		22/08/2021	2,8	11,6	120	ESE
	30/07/2021	1,4	15,6	240	OSO		23/08/2021	1,4	13,1	90	E

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)
07 juil.-11 juil.	001	4,28	0,195	1,06
11 juil.-15 juil.	002	2,45	0,386	1,36
15 juil.-19 juil.	003	2,49	0,179	0,478
19 juil.-23 juil.	004	1,41	0,099	0,649
23 juil.-27 juil.	005	2,23	0,195	0,774
27 juil.-31 juil.	006	2,23	0,118	0,727
31 juil.-04 août	007	12,1	0,386	0,509
04 août-08 août	008	3,08	0,387	0,455
08 août-12 août	009	6,77	1,05	0,408
12 août-16 août	010	5,82	1,46	1,34
16 août-20 août	011	4,41	1,10	1,69
20 août-24 août	012	5,73	1,04	1,86

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	St15	St60-NE
		% CO3 total	% CO3 total	% CO3 total
07 juil.-11 juil.	001	60	ND	100
11 juil.-15 juil.	002	70	38	100
15 juil.-19 juil.	003	71	ND	ND
19 juil.-23 juil.	004	73	ND	100
23 juil.-27 juil.	005	78	ND	100
27 juil.-31 juil.	006	70	ND	100
31 juil.-04 août	007	54	39	100
04 août-08 août	008	66	39	100
08 août-12 août	009	64	39	ND
12 août-16 août	010	60	39	100
16 août-20 août	011	65	40	100
20 août-24 août	012	66	39	100

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

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.

Période de collecte	Prélèvement	St06-KW1					
		Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 juil.-11 juil.	001	215 918	174,3	5 804	229 027	1 380	3 709
11 juil.-15 juil.	002	256 862	143,8	4 844	193 736	1 172	3 056
15 juil.-19 juil.	003	257 841	138,0	4 691	187 674	1 175	2 940
19 juil.-23 juil.	004	267 915	125,2	4 304	173 759	1 068	2 705
23 juil.-27 juil.	005	287 583	115,4	3 990	157 259	1 013	2 491
27 juil.-31 juil.	006	257 298	127,5	4 396	168 358	1 104	2 756
31 juil.-04 août	007	197 085	110,0	3 737	150 277	964	2 314
04 août-08 août	008	238 455	153,1	5 250	208 863	1 275	3 298
08 août-12 août	009	229 148	167,5	5 523	219 697	1 414	3 446
12 août-16 août	010	213 529	174,4	5 913	233 434	1 476	3 717
16 août-20 août	011	234 252	157,1	5 270	207 207	1 346	3 271
20 août-24 août	012	237 614	154,2	5 173	207 186	1 352	3 267
St15							
Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 juil.-11 juil.	001	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11 juil.-15 juil.	002	136 748	169,0	6 847	240 148	1 736	3 165
15 juil.-19 juil.	003	ND	ND	ND	ND	ND	ND
19 juil.-23 juil.	004	ND	ND	ND	ND	ND	ND
23 juil.-27 juil.	005	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27 juil.-31 juil.	006	ND	ND	ND	ND	ND	ND
31 juil.-04 août	007	140 255	168,4	6 720	240 508	1 905	3 157
04 août-08 août	008	138 843	171,3	6 625	241 049	1 921	3 124
08 août-12 août	009	141 178	169,5	6 599	248 098	1 874	3 106
12 août-16 août	010	141 678	175,3	6 877	245 208	1 926	3 186
16 août-20 août	011	143 847	176,0	6 930	246 103	1 953	3 188
20 août-24 août	012	138 428	177,0	6 893	250 166	1 962	3 191

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

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

Période de collecte	Prélèvement	St60-NE						
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
07 juil.-11 juil.	001	391 110	21,6	727	29 513	230	405	2 702
11 juil.-15 juil.	002	402 327	19	672	27 147	191	374	2 692
15 juil.-19 juil.	003	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
19 juil.-23 juil.	004	406 730	18,1	651	27 126	210	359	2 669
23 juil.-27 juil.	005	411 948	17,0	639	25 906	184	342	2 662
27 juil.-31 juil.	006	413 166	16,8	635	25 809	196	341	2 693
31 juil.-04 août	007	399 451	17,6	667	25 716	208	358	2 671
04 août-08 août	008	400 353	18,4	732	27 684	238	391	2 730
08 août-12 août	009	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
12 août-16 août	010	399 190	18,2	746	27 382	189	365	2 672
16 août-20 août	011	396 893	17,7	671	26 634	196	359	2 683
20 août-24 août	012	388 987	18,2	691	26 139	187	368	2 732

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

ANNEXE 5

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

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

Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	St06-KW1					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 juil.-11 juil.	001	21,4	4 623	3,73	124	4 903	29,5	79,4
11 juil.-15 juil.	002	12,2	3 143	1,76	59,3	2 370	14,3	37,4
15 juil.-19 juil.	003	12,4	3 209	1,72	58,4	2 336	14,6	36,6
19 juil.-23 juil.	004	7,0	1 883	0,880	30,3	1 222	7,51	19,0
23 juil.-27 juil.	005	11,1	3 205	1,29	44,5	1 753	11,3	27,8
27 juil.-31 juil.	006	11,1	2 865	1,42	48,9	1 875	12,3	30,7
31 juil.-04 août	007	60,4	11 907	6,64	226	9 079	58,3	140
04 août-08 août	008	15,4	3 667	2,35	80,7	3 212	19,6	50,7
08 août-12 août	009	33,8	7 752	5,67	187	7 432	47,8	117
12 août-16 août	010	29,1	6 215	5,08	172	6 794	42,9	108
16 août-20 août	011	22,1	5 168	3,47	116	4 571	29,7	72,2
20 août-24 août	012	28,6	6 803	4,42	148	5 932	38,7	93,5

Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	St15					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 juil.-11 juil.	001	0,975	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11 juil.-15 juil.	002	1,93	264	0,326	13,2	463	3,35	6,11
15 juil.-19 juil.	003	0,895	ND	ND	ND	ND	ND	ND
19 juil.-23 juil.	004	0,495	ND	ND	ND	ND	ND	ND
23 juil.-27 juil.	005	0,975	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27 juil.-31 juil.	006	0,590	ND	ND	ND	ND	ND	ND
31 juil.-04 août	007	1,93	271	0,325	13,0	464	3,68	6,09
04 août-08 août	008	1,94	269	0,331	12,8	466	3,72	6,05
08 août-12 août	009	5,24	740	0,889	34,6	1 301	9,83	16,3
12 août-16 août	010	7,30	1 034	1,28	50,2	1 790	14,1	23,3
16 août-20 août	011	5,50	790	0,967	38,1	1 352	10,7	17,5
20 août-24 août	012	5,20	720	0,921	35,8	1 301	10,2	16,6

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

St60-NE								
Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	Flux élémentaire (mg ps/m ² /j)					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 juil.-11 juil.	001	5,29	2 069	0,114	3,85	156	1,22	2,14
11 juil.-15 juil.	002	6,81	2 742	0,128	4,58	185	1,30	2,55
15 juil.-19 juil.	003	2,39	NT	NT	NT	NT	NT	NT
19 juil.-23 juil.	004	3,25	1 320	0,06	2	88,0	0,681	1,16
23 juil.-27 juil.	005	3,87	1 594	0,066	2,47	100	0,711	1,32
27 juil.-31 juil.	006	3,63	1 502	0,061	2,31	93,8	0,712	1,24
31 juil.-04 août	007	2,55	1 017	0,045	1,70	65,4	0,530	0,911
04 août-08 août	008	2,28	911	0,042	1,66	63,0	0,541	0,889
08 août-12 août	009	2,04	NT	NT	NT	NT	NT	NT
12 août-16 août	010	6,70	2 673	0,122	4,99	183	1,27	2,45
16 août-20 août	011	8,46	3 358	0,149	5,68	225	1,66	3,04
20 août-24 août	012	9,31	3 620	0,169	6,43	243	1,74	3,43

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