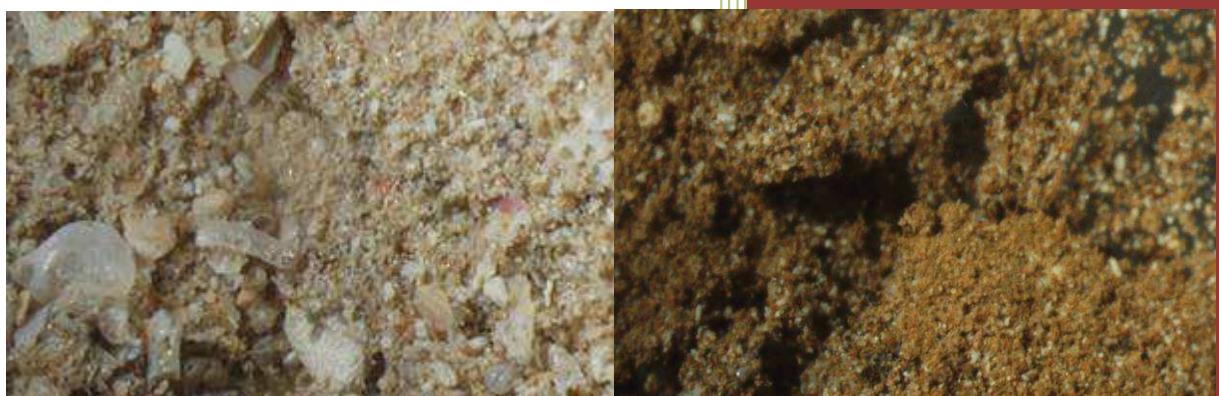




SUIVI DES DENSITES DE FLUX VERTICAUX DE PARTICULES DANS LE CANAL DE LA HAVANNAH, LA BAIE KWE ET LA RADE NORD DE PRONY

CAMPAGNE 2^{EME} SEMESTRE 2021



« Chimie de l'environnement et
Modélisation hydrodynamique »

Rapport semestriel
Octobre à novembre
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 2^{ème} semestre 2021

Période d'octobre à novembre 2021

Nombre de pages : 60

	Ref AEL	Ref Client			
Identification	138-VI-17-P	L36941/0001			
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 2 ^{ème} semestre 2021. Période d'octobre à novembre 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 2^{ème} semestre 2021 (octobre-novembre) 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 relativement forte mais épars dans le temps et une instabilité des régimes de vent plus généralisée, 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 S2-2021 qui retrouve les niveaux de concentration en métaux de 2013, une année des records. Une vigilance particulière est de mise pour la station St60-NE où le Mn augmente, mais il reste à déterminer son 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			09/03/2022		
Vérificateur 1			15/03/2022		
Vérificateur 2			09/05/2022		
Approbateur			09/05/2022		
EVOLUTION					
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE			
V1.0	Rapport final	10/05/2022			
COPIE – DIFFUSION					
NOM	ORGANISME				
	Prony Resources, Département Environnement				

Ce rapport est cité comme suit :

Kumar-Roiné S., Moreton B., Drouzy M., Ighiouer S., Fernandez JM. 2022. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 2^{ème} semestre 2021. Période d'octobre à novembre 2021. Contrat AEL/Vale-NC 138-VI-17-P/PO-L36941/0001, 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	35
A.	INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES.....	35
B.	CALCUL DES FLUX DES MATIERES.....	42
V.	SYNTHESE	47

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

Cette étude fait suite, d'une part, à la définition de « l'Etat de référence » des densités de flux verticaux de particules, déterminées pour le Canal de la Havannah, la Rade Nord et la Baie Kwé en 2007 ([Fernandez et al., 2007](#)) et, d'autre part, elle assure la continuité du suivi depuis 2011 pour le Canal de la Havannah et la Baie Kwé ([Fernandez et al., 2012a](#)) et depuis 2014 pour la Rade Nord ([Achard et al., 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 donc 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, dont notamment les coquillages, en bout de chaîne alimentaire, sont consommés par l'homme.

B. OBJECTIFS

Dans le contexte de la mise en exploitation de l'usine de Prony Resources (ex 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 concrétiions 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 **deuxième semestre de 2021** et comparés aux campagnes précédentes des mouillages semestrielles réalisées entre 2011-2021 et celles de l'état de référence en 2006/2007 ([Kumar-Roiné et al., 2021](#) ; [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 05 octobre 2021 et le 23 novembre 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 Prony Resources (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 octobre 2021 à 00h00 avec un pas de temps par godet de 96 heures (4 jours) ; elle s'est terminée le 23 novembre 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.

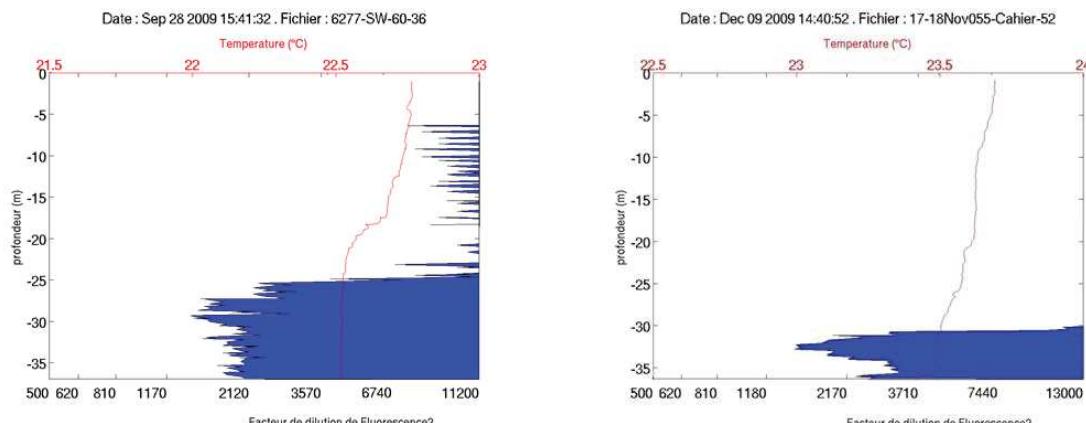


Figure 2 : Empreinte type de l'effluent par marquage à la rhodamine-WT pour des conditions courantologiques de mi-marées de morte-eau (gauche) et de vive-eau (droite) au niveau de la station St60-SW.

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 octobre-10 octobre	001	001	001
10 octobre -14 octobre	002	002	002
14 octobre-18 octobre	003	003	003
18 octobre-22 octobre	004	004	004
22 octobre-26 octobre	005	005	005
26 octobre-30 octobre	006	006	006
30 octobre-03 novembre	007	007	007
03 novembre-07 novembre	008	008	008
07 novembre-11 novembre	009	009	009
11 novembre-15 novembre	010	010	010
15 novembre-19 novembre	011	ND	011
19 novembre-23 novembre	012	ND	012

C. CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant la période d'immersion des pièges (07 octobre 2021 et le 23 novembre 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 (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 octobre au 23 novembre 2021, s'est élevé à 281,9 mm ; les pluviométries journalières maximales ont été enregistrées le 21 octobre avec 77,6 mm/j. Au total, on compte 17 jours pluvieux repartis entre les 12 et 22 octobre (198,7 mm sur 11 jours) et entre les 17 et 21 novembre (72,1 mm sur 5 jours) ; entre les deux périodes, c'est-à-dire du 23 octobre au 16 novembre, soit 25 jours, il n'est enregistré que 11,1 mm de pluie cumulée. Cette campagne de mouillage est donc marquée par l'alternance des périodes pluvieuse et sèche (Tableau 3 et Figure 3).

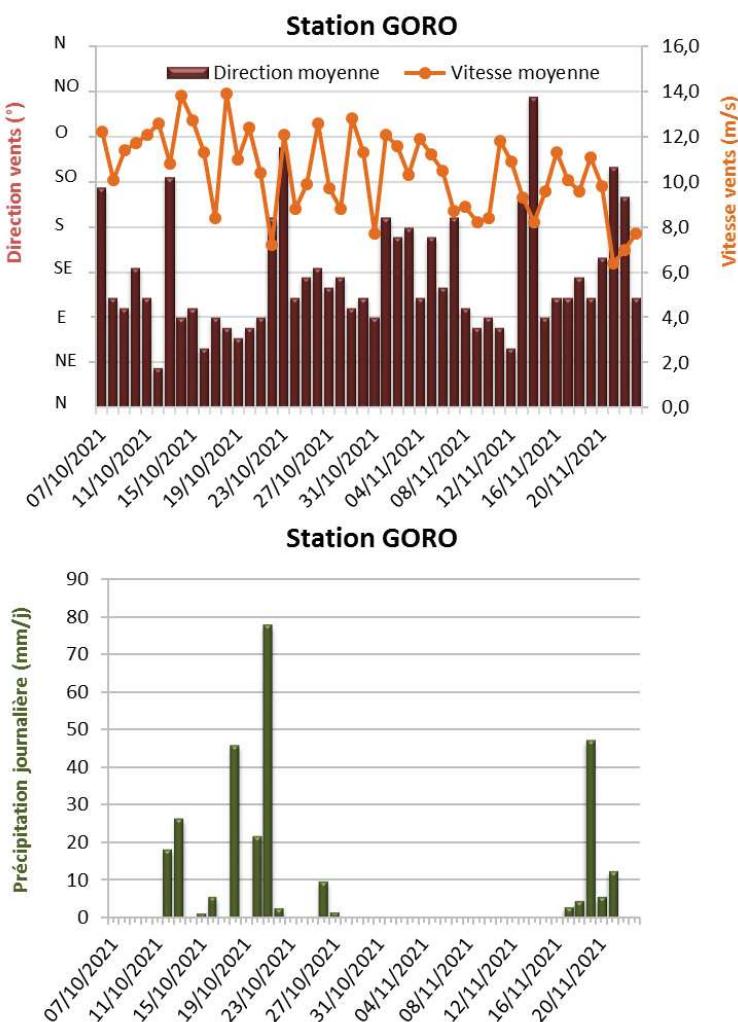


Figure 3 : Cumul journalier de précipitations, évolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) pour la période du 07 octobre au 23 novembre 2021.

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

Année	Semestre	Campagne	St06-KW1	St15	St60-NE	Précipitation journalière (mm)*		Vitesse vents moyens journalière (m/s)*			
						Station GORO		Station GORO		Station IORO	
2006	S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	Oct. - Nov. 2006	x	x	-	54,4	ND	ND	ND	ND	ND
2007	S1	Févr. - Mars 2007	-	-	x	300,6	ND	ND	ND	ND	ND
	S1	Mars - Avr. 2007	x	x	-	272,6	ND	ND	ND	ND	ND
2011	S2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	Juil. - Août 2011	x	-	-	273,7	11,3	±3,2	ND	ND	ND
2012	S1	Janv. - Mars 2012	x	-	x	370,1	12,3	±2,7	IC	IC	IC
	S2	Sept. - Oct. 2012	x	-	x	278,5	12,0	±2,4	ND	ND	ND
2013	S1	Janv. - Févr. 2013	x	-	x	181,2	12,0	±2,1	ND	ND	ND
	S2	JUIL. - Août 2013	x	-	x	467	11,3	±3,6	ND	ND	ND
2014	S1	Janv. - Mars 2014	x	x	PP	920,2	9,3	±4	6,6	±2,9	±2,9
	S1	Avr. - Juin 2014	-	-	x	260,9	8,3	±3,5	6,9	±2,5	±2,5
2015	S2	Sept - Oct. 2014	x	x	x	199,6	7,3	±2,9	5,9	±1,8	±1,8
	S1	Janv. - Mars 2015	x	x	x	242,6	12,0	±3,7	ND	ND	ND
2016	S2	JUIL. - Sept. 2015	PP	x	x	148,9	11,6	±2,6	ND	ND	ND
	S2	Oct. - Nov. 2015	x	-	-	96	12,4	±3,1	ND	ND	ND
2017	S1	Mai - Juil. 2016	PP	x	x	241,4	10,9	±3,1	6,2	±2,5	±2,5
	S1	JUIL. - Sept. 2016	x	-	-	247,4	10,8	±2,4	6,2	±2,5	±2,5
2018	S2	Oct. - Nov. 2016	x	x	x	266,8	11,3	±2,5	5,9	±2,1	±2,1
	S1	Avr. - Mai 2017	x	x	x	443,2	12,5	±4,2	7	±3,6	±3,6
2019	S2	Sept. - Nov. 2017	x	x	x	58,4	11,0	±2,1	9,7	±13,1 (?)	±13,1 (?)
	S1	Mars - Avr. 2018	x	x	x	631,3	13,6	±3,3	ND	ND	ND
2020	S2	Mai - Juil. 2018	x	x	x	105,2	11,1	±3,4 (IC)	ND	ND	ND
	S1	Mars - Mai 2019	x	PP	x	389,3	12,4	±3,2 (IC)	ND	ND	ND
2021	S1	Mai - Juil. 2019	-	x	-	149,1	10,2	±3,2	ND	ND	ND
	S2	JUIL. - Sept. 2019	x	x	x	88,2	11,3	±2,4	ND	ND	ND
2020	S1	Janv. - Mars 2020	x	PP	x	>225,3 (IC)	12,8	±3,0 (IC)	ND	ND	ND
	S2	JUIL. - Août 2020	x	x	x	>107,3 (IC)	11,4	±3,4 (IC)	ND	ND	ND
2021	S1	JUIL. - Août 2021	x	x	x	75,2	11,1	±2,7	ND	ND	ND
	S2	Oct. - Nov. 2021	x	x	x	281,9	10,4	±1,8	ND	ND	ND

* données de précipitations atmosphériques et régimes des vents couvrant uniquement les périodes de programmation des piéges (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.

Pour l'ensemble de la période de mouillage, la vitesse moyenne des vents enregistrée ($10,5 \pm 1,8$ m/s) par la station GORO Usine est légèrement inférieure à celles des précédentes campagnes. Elle reste toutefois largement supérieure aux moyennes mesurées en 2014 où les valeurs ne dépassent pas les 9 m/s (Tableau 3). On notera une décélération des vents assez progressive à partir du 05 novembre jusqu'au dernier jour du mouillage (Tableau 3).

Quant aux régimes de vents, cette campagne 2021 est marquée par des vents venant essentiellement du secteur Est. La mise en place des contre-alizés (vents d'Ouest à Nord) a notamment ponctué le début et la fin de la

période de collecte. Ce n'est qu'entre les 24 octobre et 07 novembre que les alizés d'un large secteur Sud-Est ont soufflé de manière un peu plus durable (Figure 3).

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.

1. Baie Kwé (St06-KW1)

Masses collectées et teneurs en carbonates

Avec une moyenne de $3,63 \pm 3,33$ g, les masses de MES collectées demeurent inférieures à 2,0 g sur la première moitié de la période de collecte. A partir du godet 007, les masses s'accroissent ; la quantité maximale a été mesurée pour le prélèvement 009 (7,71 g). Puis, les quantités de MES piégées décroissent brusquement pour rester inférieures à 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 peu (Figure 5). Ainsi, excepté pour les prélèvements 010 et 011, la moyenne est remarquablement stable ($70 \pm 6\%$), les MES piégées en St06-KW1 restant très majoritairement composées par de la fraction fine dont le diamètre est inférieur à $41 \mu\text{m}$.

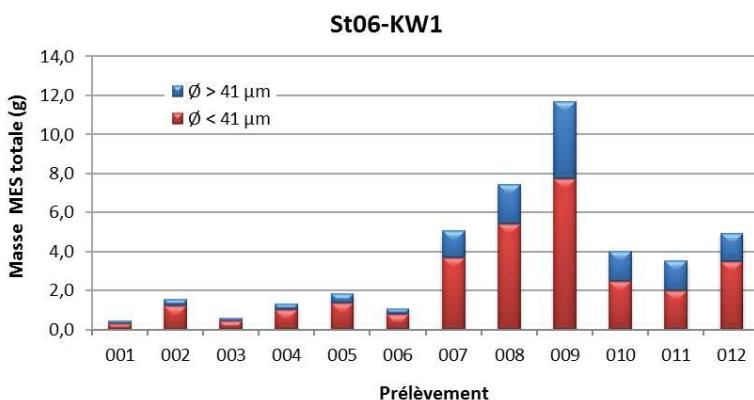


Figure 4 : Masse totale de MES piégée et composition en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

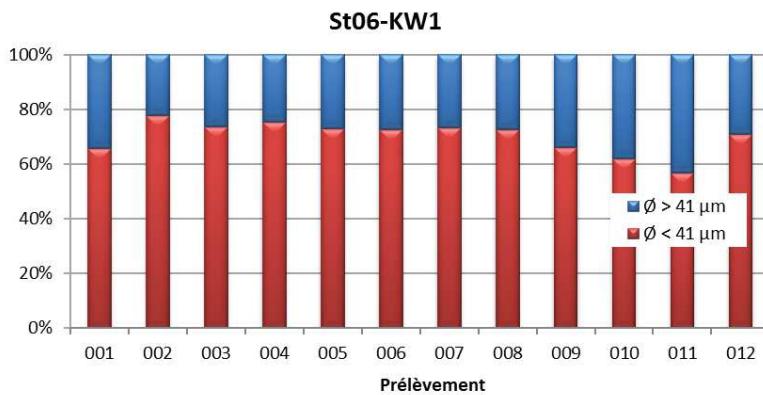


Figure 5 : Pourcentage massique en fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fractions grossières ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

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 $67 \pm 6\%$, l'apport en carbonates, et donc l'influence océanique sont omniprésents (Figure 6).

Entre les différentes campagnes conduites à St06-KW1, la masse moyenne de MES collectée lors de cette dernière est parmi les plus faibles ; c'est également le cas pour le pourcentage moyen de fraction fine. Quant à la teneur moyenne en carbonates, elle reste dans les gammes habituellement mesurées (Tableau 4).

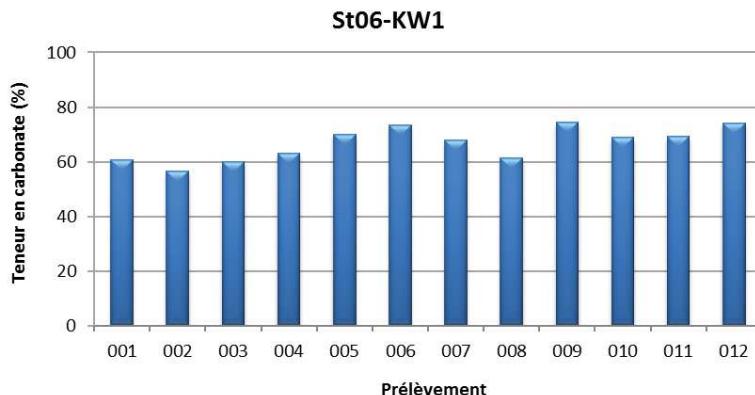


Figure 6 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

St06-KW1						
Année	Semestre	MES Moyenne (g)	% $\phi < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)		
2006	S2	1,46 ±0,74	ND	74 ±2		
2007	S1	4,61 ±4,47	ND	76 ±3		
2011	S2	5,07 ±4,86	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		
	S2	3,63 ±3,33	70 ±6	67 ±6		

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 ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 $42 \pm 3\%$ du volume total) et les silts moyens (20-40

μm ; $36 \pm 2\%$ du volume total). Au cours de cette campagne, la distribution des populations granulométriques montre peu d'évolution dans le temps, le godet 009 montrant les MES les plus grossières (Figure 7).

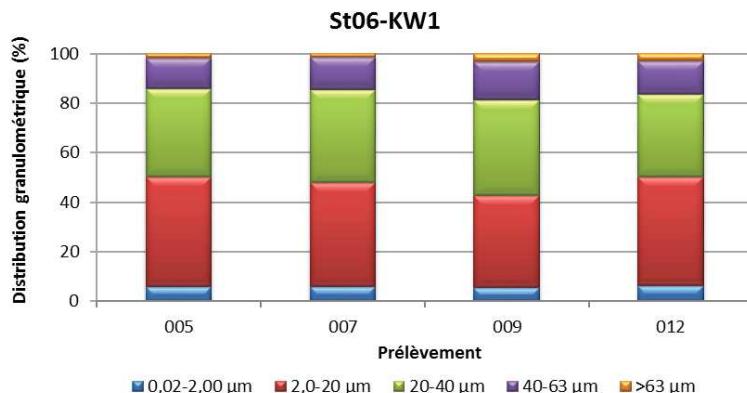


Figure 7 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 4 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

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 007 où la présence des minéraux d'origine terrestre augmente sensiblement (Tableau 5).

Prélèvement	Composition minéralogique (%)				
	Calcite-Ca	Calcite-Mg	Aragonite	Goethite	Autres
005	6,1	35,8	27,8	26,4	3,9
007	1,5	31,4	22,3	31,6	13,2
009	5,0	33,5	22,7	28,6	10,2
012	5,6	34,9	25,0	28,9	5,6

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 $\phi > 40 \mu\text{m}$. Une baisse soudaine a ensuite été notée au premier semestre 2017 où les pourcentages moyens sont comparables à ceux relevés pour l'État de Référence. En 2019-2020, un regain en silts fins semblait 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
	S2	6 ±0	42 ±3	36 ±2	14 ±1	2 ±1

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)

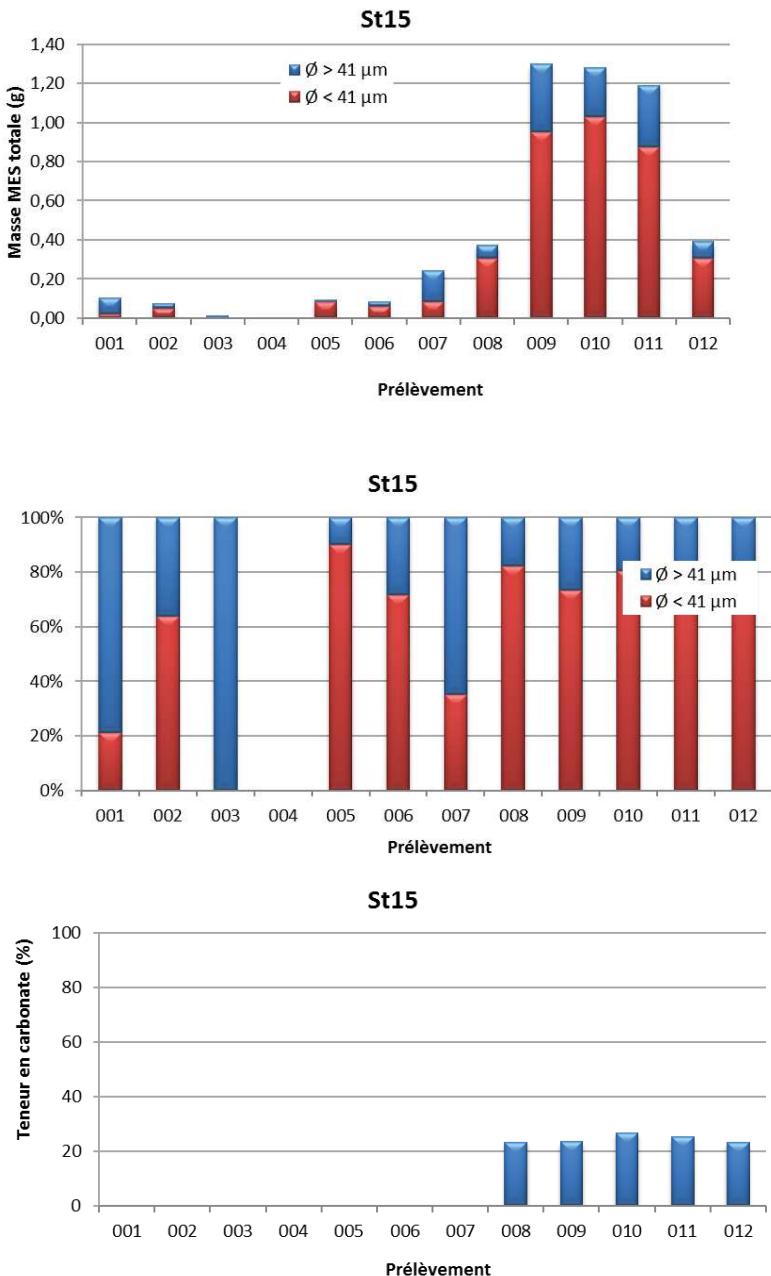
Note : En raison du manque de matière fine dans les pas de collecte 001 à 007, le dosage des éléments métalliques n'a été possible que sur les 5 derniers échantillons.

Masses collectées et teneurs en carbonates

Avec une moyenne de $0,468 \pm 0,521 \text{ g}$, les masses de MES collectées montrent une forte variabilité et sont infinitésimales pour les 8 premiers pas de temps. En effet, aucune matière n'a été piégée dans le godet 004, voire dans le 003, ailleurs les masses ne dépassent pas les $0,400 \text{ g}$, jusqu'au godet 008 inclus. Ensuite, des quantités maximales, à peine supérieures à $1,0 \text{ g}$, ont été piégées dans les godets 009 à 011 ; celles-ci décroissent brusquement en fin de période de collecte (godet 012 ; Figure 8).

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) est principalement dominante en St15 au fil du temps de collecte sauf dans les godets 001, 003 et 007. Toutefois, dans l'ensemble, avec une moyenne de $61 \pm 29 \%$, les valeurs montrent une importante variabilité temporelle (Figure 9).

En revanche, pour les teneurs en carbonate ; avec une moyenne de $24 \pm 2 \%$, les valeurs n'oscillent que peu, 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
2007	S1	0,154	±0,145	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
	S2	0,468	±0,521	61	±29	22	±5

ND : valeur non déterminée

Tableau 7 : Compilation des données moyennes ± écart-types de la MES moyenne collectée (4 jours), des pourcentages massiques en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et des teneurs en carbonates dans la fraction fine lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à St15.

Parmi les différentes campagnes conduites à St15, la masse moyenne collectée en S2-2021 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 % sauf lors de cette campagne où la moyenne la plus faible est mesurée. Il en est de même pour la teneur en carbonates dont la moyenne mesurée en S2-2021 reste dans la partie basse de la gamme habituelle ; la plus faible (9 ± 4 %) ayant 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 3 échantillons, les 009, 010 et 011.

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de la MES des 3 prélèvements est composée majoritairement de particules dont le mode se situe dans la classe 2,0-20 µm à savoir, les silts fins (44 % du volume total). Les silts moyens (classe 20-40 µm) composent la seconde population granulométrique (32 % du volume total) (Figure 11).

Pour ces trois 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 Gibbsite (10, 12 et 11 %, respectivement) ainsi que la Serpentine, la Vermiculite ou encore la Kaolinite. 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 ; ces évolutions sont notamment manifestes en 2021 (Tableau 9).

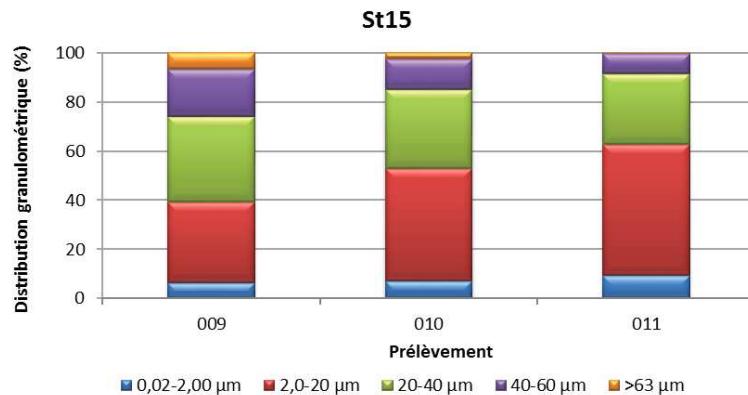


Figure 11 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 3 prélèvements du piège séquentiel à St15.

Prélèvement	Composition minéralogique (%)				
	Calcite-Ca	Calcite-Mg	Aragonite	Goethite	Autres
009	4,4	10,7	8,2	35,0	41,7
010	5,0	12,8	9,1	38,3	34,8
011	4,9	13,6	8,4	37,5	35,6

Tableau 8 : Composition minéralogique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 3 prélèvements du piège séquentiel à 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
	S2	8	±1	39	±1	41	±0	15	±1	2	±1

Tableau 9 : 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 St15.

ND : valeur non déterminée

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Note : En raison du manque de matière fine dans les godets 005 et 006, 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 voire nuls comme dans le godet 006. En effet, la masse moyenne est de $0,721 \pm 0,853$ et les quantités ne dépassent pas le seuil de 1,5 g sauf en fin de période de collecte où la masse maximale de 3,01 g a été collectée dans le godet 012 (Figure 12).

Contrairement aux deux autres stations, les MES piégées à St60-NE sont composées de fractions fines et grossières en proportions quasi-équivalentes, les pélites ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) oscillant entre 46 % (001) et 58 % (009) (Figure 13).

La fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des MES collectées est composée exclusivement de carbonates ($87 \pm 5\%$). Quel que soit le pas de collecte, les valeurs sont à plus de 78 % (Figure 14).

Les moyennes de pourcentages de fraction fine et de teneur en carbonate de cette campagne 2021 figurent dans la gamme habituelle des valeurs mesurées depuis 10 ans, reconfirmant ainsi la nature marine quasi-exclusive des apports en St60-NE. Néanmoins, cette campagne se singularise par la moyenne des masses totales la plus basse (Tableau 10).

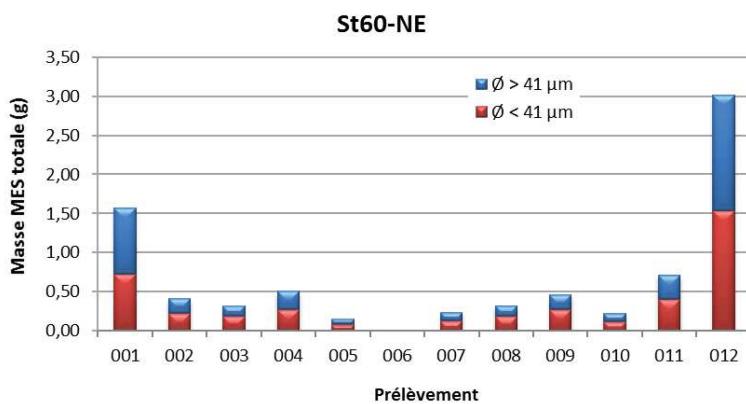


Figure 12 : Masse totale des MES piégées et composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

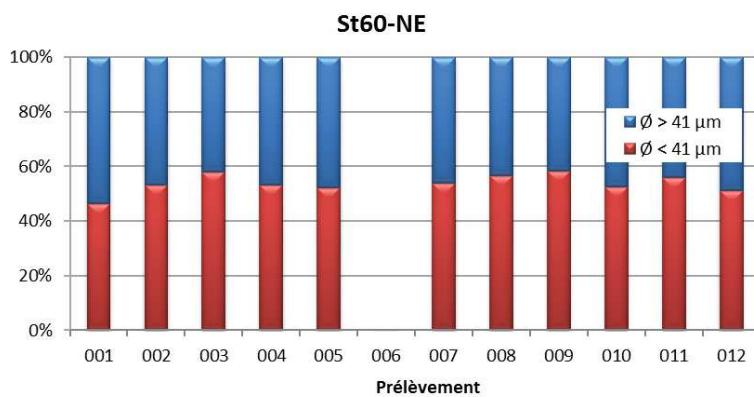


Figure 13 : Pourcentages massiques en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et en fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) dans les 12 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

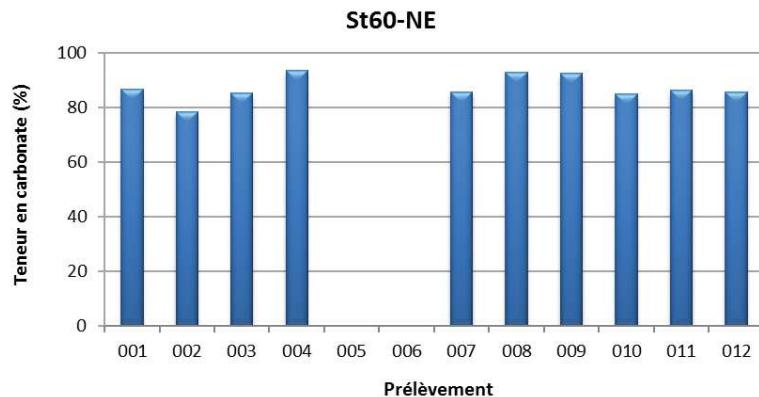


Figure 14 : Teneurs en carbonates contenues dans les fractions fines ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

St60-NE					
Année	Semestre	MES Moyenne (g)	% $\emptyset < 41 \mu\text{m}$	Carbonate (%)	
2007	S1	3,95 ±5,02	ND	ND	96 ±1
2011	S2	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	
	S2	0,721 ±0,853	54 ±3	87 ±5	

ND : valeur non déterminée

Tableau 10 : Compilation des données moyennes ± écart-types de la MES moyenne collectée (4 jours), des pourcentages massiques en fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) 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 001 et 012.

La fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) de la MES des 2 prélèvements (001 et 012) est composée à la fois de particules dont le diamètre se situe entre 2,0-20 μm , à savoir, les silts fins (moyenne de $39 \pm 1\%$ du volume total) et les silts

moyens (20-40 µm ; 41 % du volume total). La distribution des populations granulométriques ne montre pas d'évolution dans le temps (Figure 15).

La fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) 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 voire Halite, Hématite 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 µ. Excepté des accroissements ponctuels de la fraction grossière ($>63 \mu\text{m}$) au détriment des grains de classe 2,0-20 µm comme celui observé lors de la campagne S1-2021, 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 supérieurs à 40 µm avait été décelée (Tableau 12).

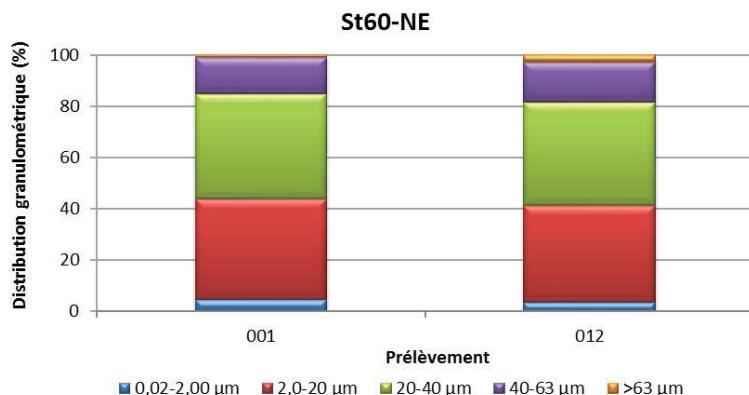


Figure 15 : Distribution granulométrique de la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 2 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

Prélèvement	Composition minéralogique (%)				
	Calcite-Ca	Calcite-Mg	Aragonite	Goethite	Autres
	12,1	46,4	36,2	3,1	2,2
001	12,1	46,4	36,2	3,1	2,2
012	11,9	46,2	36,5	2,3	3,1

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

Année	Semestre	St60-NE				
		Distribution granulométrique (%)				
		0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	>63 µm
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
	S2	4 ±1	39 ±1	41 ±0	15 ±1	2 ±1

ND : valeur non déterminée

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

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 ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 dans la deuxième moitié de la période d'immersion, notamment dans les godets 007 et 008 tandis que les minimales ont été relevées dans le godet 002. Pour le Ca, les maximales et minimales sont mesurées dans le godet 012 et 002, respectivement. Entre ces extrêmes, les valeurs varient avec des coefficients de 10 à 18 % (Tableau 13).

Les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues en St06-KW1 se distribuent entre 1,52 et 2,39 avec une moyenne de 1,96 ± 0,28 ; le plus fort ratio a été obtenu dans le godet 002 tandis que la plus faible valeur a été mesurée dans les godets 007 et 008 (Figure 16).

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.

St06-KW1						
Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	202 231	66,1	2 321	84 463	511	1 457
Max	276 246	128,2	4 330	165 155	1 025	2 751
Moyenne	245 220	101,0	3 512	127 538	800	2 199
Ecart-type	24 698	17,4	571	23 282	147	365
CV (%)	10	17	16	18	18	17

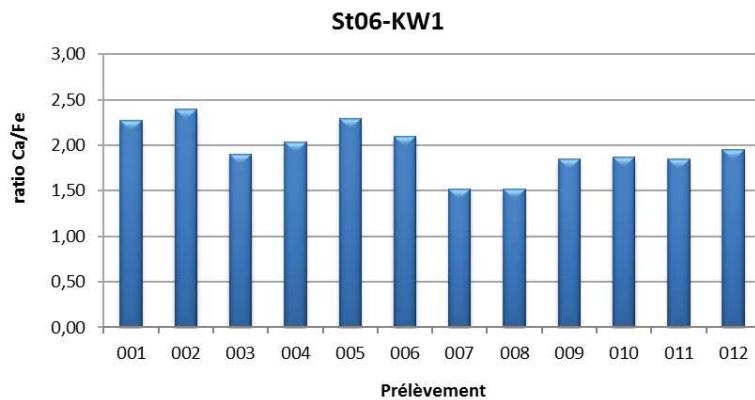


Figure 16 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 12 prélèvements du piège séquentiel à St06-KW1.

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 piège séquentiel à St06-KW1.

St06-KW1						
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Ca	1,0000	0,4922	0,5460	0,6316	0,5382	0,5020
Co		1,0000	0,9968	0,9395	0,9949	0,9987
Cr			1,0000	0,9467	0,9959	0,9969
Fe				1,0000	0,9427	0,9371
Mn					1,0000	0,9962
Ni						1,0000

Le phénomène de l’alternance des influences terrigène (Fe) et marine (Ca), habituellement observé à cette station, est donc imperceptible pour cette campagne, constat étayé par le manque de corrélations négatives entre Ca et ces 5 métaux ($0,490 > R > 0,630$). Cette étude de matrice de corrélations montre toutefois une forte similarité d’évolution des concentrations massiques pour Co, Cr, Fe, Ni et Mn ($R > 0,930$) indiquant que les apports en métaux dans la Baie Kwé semblent émaner d’un seul ou d’un terme source prépondérant (Tableau 14).

Note : Les travaux de synthèse décennale conduits récemment par Fernandez et Kumar-Roiné, 2021 sur les teneurs en différents éléments métalliques 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 notamment 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,

le degré d'influence du pôle marin diffère selon que la nature des apports est riche en débris récifaux ou en tests d'organismes marins.

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.

		St06-KW1					
Année	Semestre	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
	S2	245 220 ±24 698	101 ±17	3 512 ±571	127 538 ±23 282	800 ±147	2 199 ±365

Toutes campagnes confondues, les concentrations moyennes montrent une variabilité d'une année à l'autre, notamment pour les métaux latéritiques. Pour le S2-2021, 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 (Tableau 15), ce qui indique une constance dans l'apport particulaire d'origine marine.

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 globalement 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 piège 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 homogène sur 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'État de Référence ; ils tendent globalement depuis S1-2020 à signaler un regain de l'influence terrigène (Tableau 16).

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
	S2	1,96	±0,28

Tableau 16 : Compilation des données moyennes ± écart-types de normalisation des concentrations du calcium par le fer obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES piégées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges à St06-KW1.

2. Rade Nord de Prony (St15)

Rappel : En raison du manque de matière fine dans les pas de collecte 001 à 007, l'analyse des éléments métalliques n'a été possible que sur les 5 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 invariables dans le temps, tout comme les valeurs du rapport Ca/Fe obtenues (Figure 17 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 émise 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 ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 5 prélèvements du piége séquentiel à St15.

Eléments (mg/kg ps)	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Min	78 283	180	6 897	213 926	1 560	3 293
Max	92 960	208	7 872	246 660	1 989	3 774
Moyenne	83 485	198	7 621	235 157	1 755	3 654
Ecart-type	6 506	11	408	13 759	160	204
CV (%)	8	5	5	6	9	6

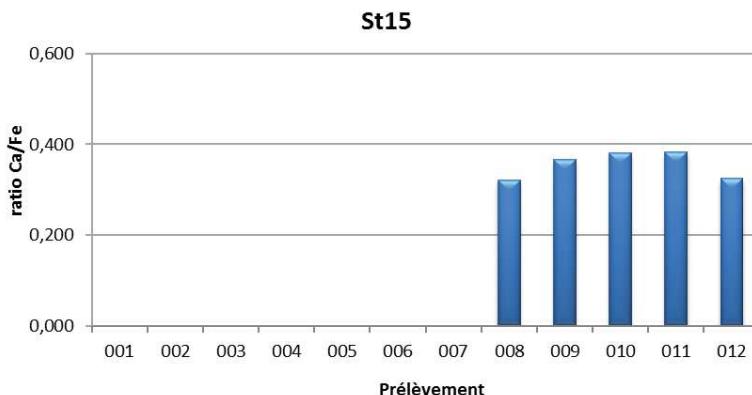


Figure 17 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\emptyset < 41 \mu\text{m}$) des 5 prélèvements du piége séquentiel à St15.

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 (Co, Cr, Fe), voire même inférieurs (Mn) pour cette campagne 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 12).

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	
	S2	83 485 ±6 506	198 ±11	7 621 ±408	235 157 ±13 759	1 755 ±160	3 654 ±204	

St15			
Année	Semestre	Ca/Fe	
2007	S1	0,301	(n=1)
	S1	0,050	±0,081
2014	S2	0,401	±0,023
	S1	0,273	±0,106
2015	S2	0,481	±0,041
	S1	0,459	±0,323
2016	S2	0,464	±0,052
	S1	0,448	±0,115
2017	S2	0,418	±0,107
	S1	0,280	±0,064
2018	S2	0,855	±0,061
	S1	0,843	±0,136
2019	S2	0,74	±0,124
	S1	0,234	±0,121
2020	S2	0,650	±0,074
	S1	0,573	±0,011
2021	S2	0,356	±0,030

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

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, a été relevé lors de la campagne de janvier-mars 2014 ($0,050 \pm 0,081$). Depuis, l'empreinte océanique est un peu plus prononcée ; les valeurs moyennes oscillant essentiellement entre 0,300 et 0,900.

3. Canal de la Havannah (St60-NE)

Note : En raison du manque de matière fine dans le pas de collecte 005 et 006, 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 toujours 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 007 (Co, Cr, et Ni) et 008 (Fe) tandis que pour le Mn, elle a été obtenue dès le début de la période de collecte dans le godet 003.

La matrice de corrélation (Tableau 21) montre une similarité certaine dans l'évolution des concentrations de Co, Cr et Ni avec un coefficient élevé ($R > 0,930$). Curieusement, une corrélation faible mais significativement positive est également constatée entre le Fe et le Ca ($R = 0,803$) ; l'alternance des influences terrigène et marine n'est donc pas démontrée pour cette campagne (Figure 18).

Les valeurs du ratio Ca/Fe se distribuent entre 14,5 et 17,1 avec une moyenne de $15,6 \pm 1,0$; la plus haute valeur ayant été obtenue dans le godet 002. Ces ratios élevés confirment que l'influence marine demeure largement dominante, corroborant ainsi les résultats des teneurs en carbonates (Figure 18).

Les concentrations en S dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) se distribuent entre 2 518 mg/kg ps et 3 711 mg/kg ps ($\times 1,5$) avec une moyenne de $3\ 044 \pm 385$ mg/kg ps (Figure 19). Par ailleurs, il est à noter l'absence de corrélation entre S et Ca ($R = -0,066$). L'apport en Ca semble être gouverné et dominé par les concentrations en carbonates de calcium biogéniques, ne permettant pas de fait, d'émettre d'hypothèses concernant la relation directe entre les concentrations en Ca et S qui proviendraient de la dissolution du Gypse (CaSO_4) évacué par le diffuseur dans le milieu (Tableau 21).

Toutes campagnes confondues (Tableau 22), les concentrations moyennes de Ca varient peu ; la teneur moyenne obtenue pour cette campagne reste dans le même ordre de grandeur depuis 2007 (État de Référence). En revanche, celles des métaux latéritiques, sont en hausse notamment pour le Fe. 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. Quant à la concentration moyenne en S obtenue pour cette période de collecte, elle est comparable 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 ± 451 mg/kg ; Tableau 22).

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	293 468	14,4	491	17 196	141	263	2 518
Max	354 813	17,4	606	24 235	220	322	3 711
Moyenne	328 507	15,7	554	21 168	171	293	3 044
Ecart-type	18 890	0,8	32	1 992	27	16	385
CV (%)	6	5	6	9	16	5	13

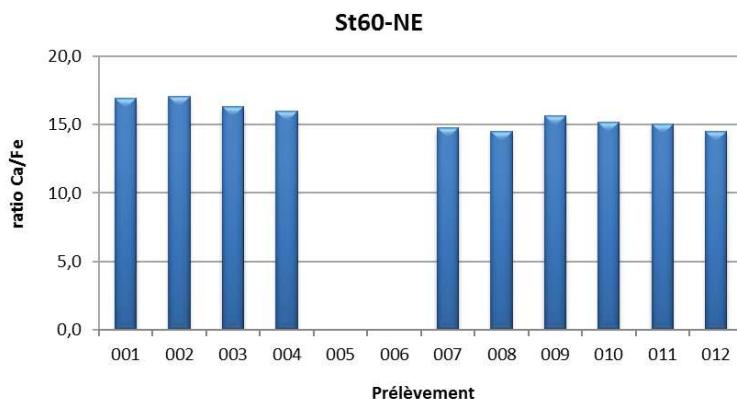


Figure 18 : Normalisation des concentrations en calcium par le fer mesurées dans la fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements du piège séquentiel à St60-NE.

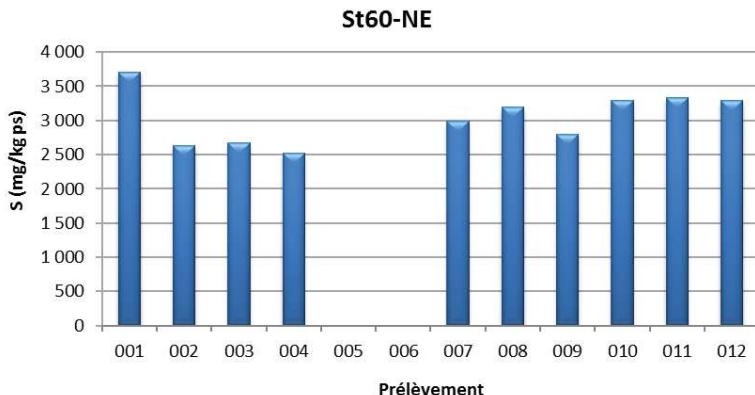


Figure 19 : Concentrations en soufre mesurées dans la fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) des 10 prélèvements de MES collectés par le piège séquentiel à particules à St60-NE.

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

St60-NE							
Eléments	Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
Ca	1,0000	0,1172	0,2201	0,8031	-0,4411	0,3017	-0,0661
Co		1,0000	0,9389	0,5040	0,4790	0,9447	0,1939
Cr			1,0000	0,6444	0,2903	0,9586	0,3064
Fe				1,0000	-0,2989	0,6429	0,1343
Mn					1,0000	0,3735	-0,4528
Ni						1,0000	0,0979

Suivi des densités de flux verticaux des particules 2^{ème} semestre 2021

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.

St60-NE													
Année	Semestre	Éléments (mg/kg ps)											
		Ca		Co		Cr		Fe		Mn		Ni	
		(n=1)		(n=1)		(n=1)		(n=1)		(n=1)		ND	
2007	S1	340 410	(n=1)	11,0	(n=1)	332	(n=1)	9 910	(n=1)	109	(n=1)	136	(n=1)
2011	S2	ND	ND	ND	ND	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
	S2	345 918	±19 677	29	±5,0	566	±23	18 347	±1 641	189	±49	345	±68
2013	S1	306 914	±5 219	21,3	±2,6	834	±58	26 131	±2 022	262	±25	478	±39
	S2	280 315	±16 630	35,5	±10,	921	±179	32 693	±6 925	358	±93	558	±106
2014	S1	302 211	±9 477	19,6	±2,3	569	±41	17 740	±1 958	195	±32	322	±36
	S2	313 173	±7 856	24,8	±3,8	725	±101	25 695	±4 668	204	±30	386	±64
2015	S1	325 637	±9 166	31,6	±6,5	848	±174	28 754	±5 415	329	±61	506	±95
	S2	347 224	±3 5214	25,6	±3,8	702	±63	22 628	±2 287	298	±38	416	±41
2016	S1	279 965	±3 4471	25,9	±5,2	439	±51	22 735	±2 589	251	±35	365	±52
	S2	342 228	±27 452	17,1	±1,5	461	±33	17 288	±1 125	143	±16	252	±17
2017	S1	349 128	±7 429	33,2	±5,9	643	±59	19 309	±2 487	302	±77	397	±32
	S2	322 239	±9 420	23,8	±3,4	589	±44	22 557	±1 566	361	±269	335	±29
2018	S1	287 342	±4 920	23,3	±0,9	621	±29	24 993	±1 291	219	±42	365	±25
	S2	302 748	±5 187	15,7	±0,8	497	±30	19 765	±1 210	149	±11	264	±16
2019	S1	275 221	±10 174	16,4	±2,4	438	±90	17 679	±2 349	192	±38	289	±45
	S2	342 444	±14 907	20,9	±2,7	690	±71	25 572	±2 471	250	±61	361	±42
2020	S1	357 090	±13 987	18,9	±2,6	597	±68	23 539	±2 497	372	±233	304	±36
	S2	391 721	±5 806	16	±2,1	454	±29	16 644	±2 773	840	±451	339	±27
2021	S1	401 016	±7 941	18,2	±1,3	683	±40	26 905	±1 156	203	±18	366	±20
	S2	328 507	±18 890	15,7	±0,8	554	±32	21 168	±1 992	171	±27	293	±16

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
	S2	16,5 ±1,0

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 obtenues dans les fractions fines ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) de MES collectées lors des différentes campagnes d'immersion des pièges séquentiels à particules à St60-NE.

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 par rapport à l'état de référence, cependant une seule mesure a été enregistrée en 2007.

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 20, Figure 21 et Figure 22 apportent une vue d'ensemble afin de tenter d'expliquer les différents épisodes et les observations marquantes en rapport avec les conditions hydro-climatiques.

Rappel : En temps normal, les 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 octobre au 23 novembre 2021, avec un pas de temps de 96 h, a permis de mettre en évidence les points suivants (Figure 20) :

- Du 07-10 (001) au 27-30 octobre (006) – Au cours de cette période de 24 jours, les quantités de MES piégées restent faibles et ne varient que peu contrairement aux concentrations de Ni et les ratios Ca/Fe. En effet, les teneurs en Ni s'accroissent environ d'un facteur de 1,5 entre les godets 001/002 et 003/006 et conjointement les ratios Ca/Fe évoluent de manière opposée. Durant cette période, la pluviométrie journalière a été relativement haute (en moyenne 8,7 mm) et les régimes de vents, principalement du secteur E ont été instables ce qui semble avoir favorisé le flux des particules enrichies en Ni vers l'emplacement du piège ; ces perturbations météorologiques n'ont toutefois pas eu d'incidence sur les quantités de MES piégées, seule la signature terrigène a augmenté progressivement.
- Du 31 octobre-03 novembre (007) au 08-11 novembre (009) – les quantités de MES piégées et les concentrations de Ni augmentent subitement pour atteindre les valeurs maximales dans le godet 009 et 007/008, respectivement. *A contrario*, les ratios Ca/Fe suivent l'évolution inverse ; dans les godets 007 et 008 sont donc mesurés les ratios minimaux. Si durant cette période, les conditions météorologiques ont été relativement stables (précipitations cumulées de 0,2 mm et des vents du secteur S puis E, respectivement, d'intensités moyennes à faibles), elles semblent avoir été progressivement favorables au transport de la matière terrigène par les eaux sortant au niveau du chenal d'accès à la baie Kwé.
- Du 12-15 (010) au 20-23 novembre (012) – Pour cette fin de période de 12 jours, les vents, principalement du secteur S décélèrent sensiblement, ne dépassant pas les 10 m/s lors du dernier pas de collecte, et le temps devient plus humide (en moyenne 6,0 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, les observations des campagnes antérieures ([Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)), contribuent 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. Le transport des particules liées aux précipitations vers la sortie de la baie (station St06-KW1) dépend toutefois 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 d'être évacué 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).

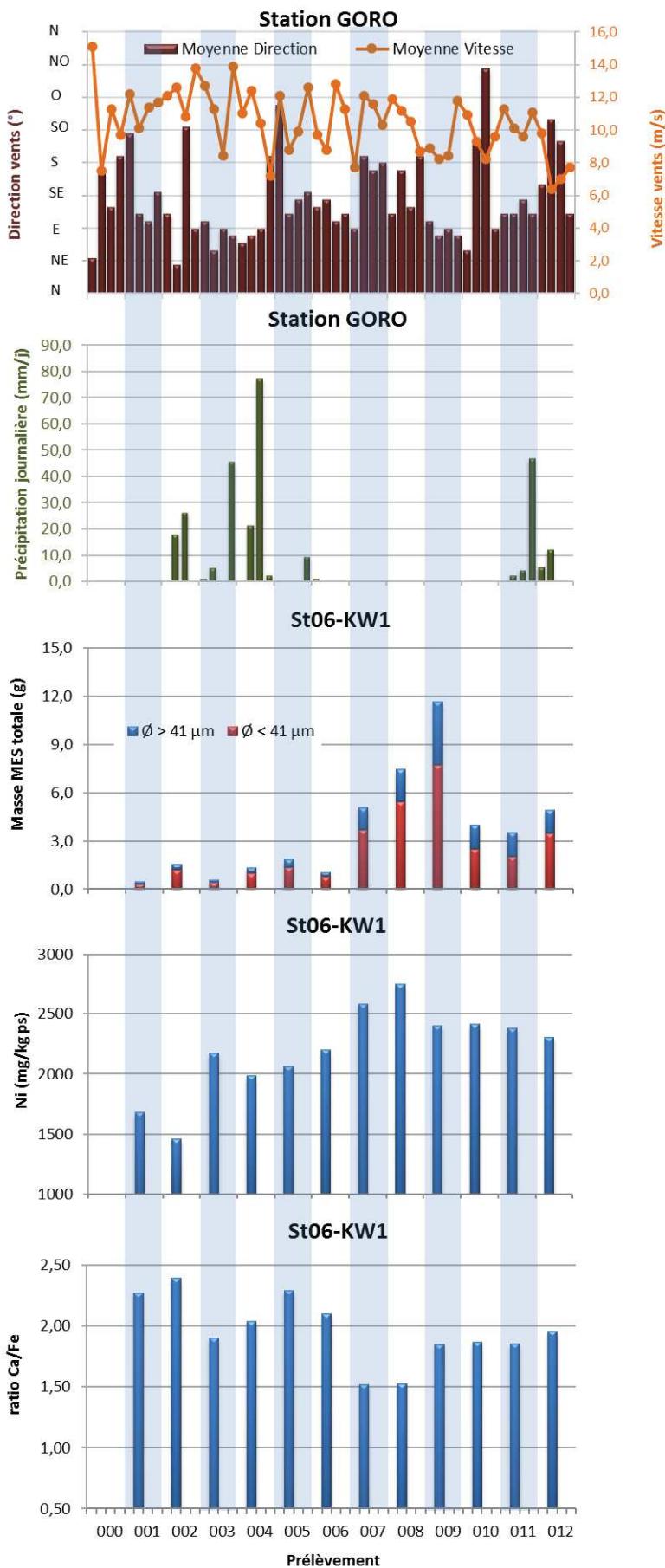


Figure 20 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fraction fine ($\phi < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\phi > 41 \mu\text{m}$) ainsi que des concentrations 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 à 007, les analyses des éléments métalliques n'ont été possibles que sur les 5 autres échantillons.

L'immersion du piège à particules séquentiel à St15 du 07 octobre au 23 novembre 2021 avec un pas de temps de 96 h a permis d'émettre les observations suivantes (Figure 21) :

- **Du 07-10 octobre (001) au 31 octobre-03 novembre (007)** – Au cours de cette période de 28 jours, les quantités de MES piégées restent infinitésimales ce qui n'a pas permis le dosage des métaux pour ces pas de collecte. Bien que ces prélèvements correspondent à une période assez arrosée (en moyenne 7,5 mm) et instable dû à plusieurs rotations de vents, ces perturbations n'ont pas eu d'incidence sur les flux de matière particulaire.
- **Du 04-07 (008) au 20-23 novembre (012)** – Les régimes de vents s'affaiblissent dans cette deuxième période et les averses deviennent moins abondantes (en moyenne 3,6 mm sur 20 jours) : pourtant ces conditions ont eu des conséquences sur la quantité de MES piégée puisque la masse maximale est atteinte dans les godets 009, 010 et 011. En comparaison, l'évolution des concentrations de Ni et des ratios Ca/Fe restent modestes ; les valeurs mesurées entre les 5 pas de temps de collecte sont remarquablement régulières, aucune alternance entre les apports (terrigenes vs carbonatés) n'est observée.

Pour cette campagne, peu de liens évidents entre le flux des particules collectées et les facteurs météorologiques se dégagent. Toutefois, les observations 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 force faible à modérée 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).

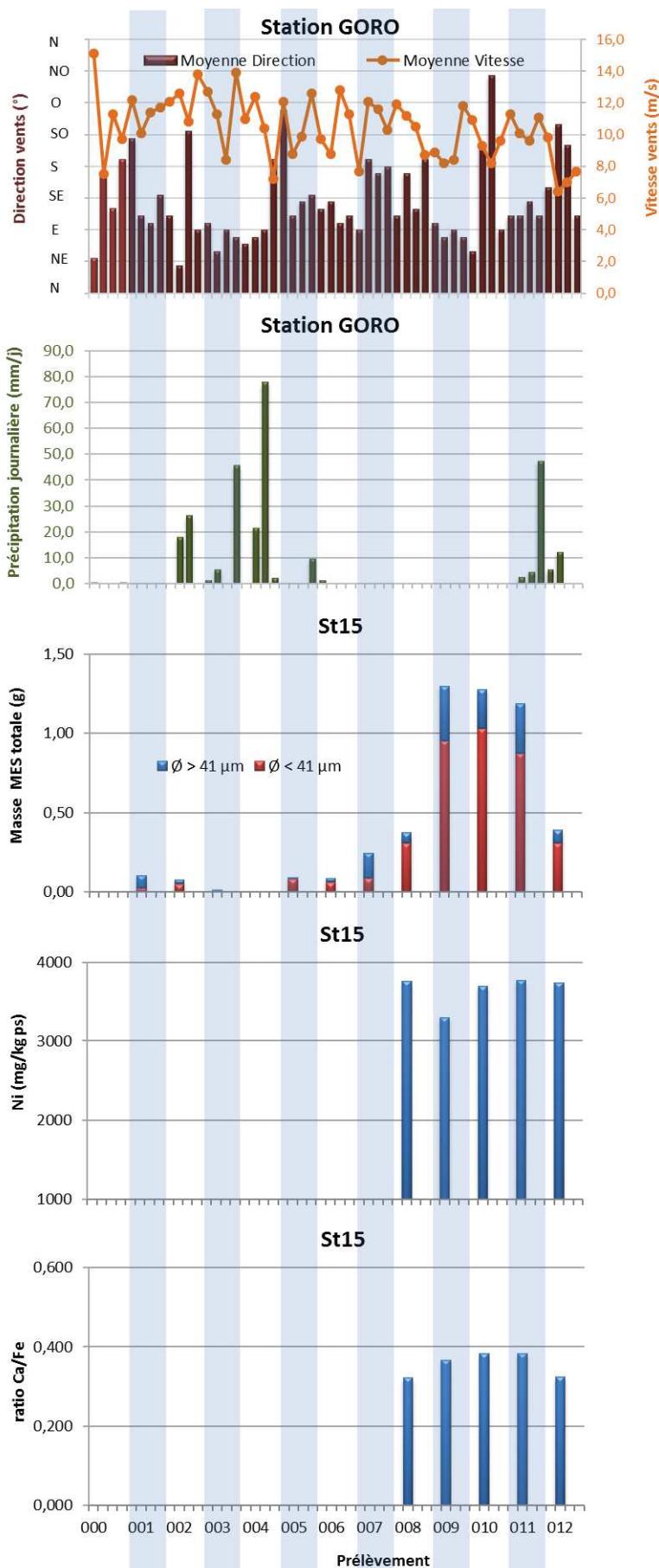


Figure 21 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) ainsi que 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 005 et 006, 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 octobre au 23 novembre, avec un pas de temps de 96 h a permis d'énoncer les observations suivantes (Figure 22) :

- Du 07-10 (001) au 27-30 octobre (006) – Pendant cette première période, les quantités de MES piégées sont faibles (<1,50 g). Les teneurs maximales en Ni évoluent à la hausse, en même temps les ratios Ca/Fe suivent un effet miroir ; ces évolutions sont toutefois à peine perceptibles.
- Du 31 octobre-03 novembre (007) au 20-23 novembre (012) – Tout comme pour la première période, les évolutions sont minimes pendant cette deuxième période, sauf pour la quantité maximale de MES piégée dans le godet 012 ; les concentrations en Ni et les ratios Ca/Fe ne varient guère.

Invariablement, 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 SO-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 SO 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 SE du lagon de Nouvelle Calédonie et contribuent à la circulation des eaux enrichies en tests de micro-organismes et débris carbonatés.

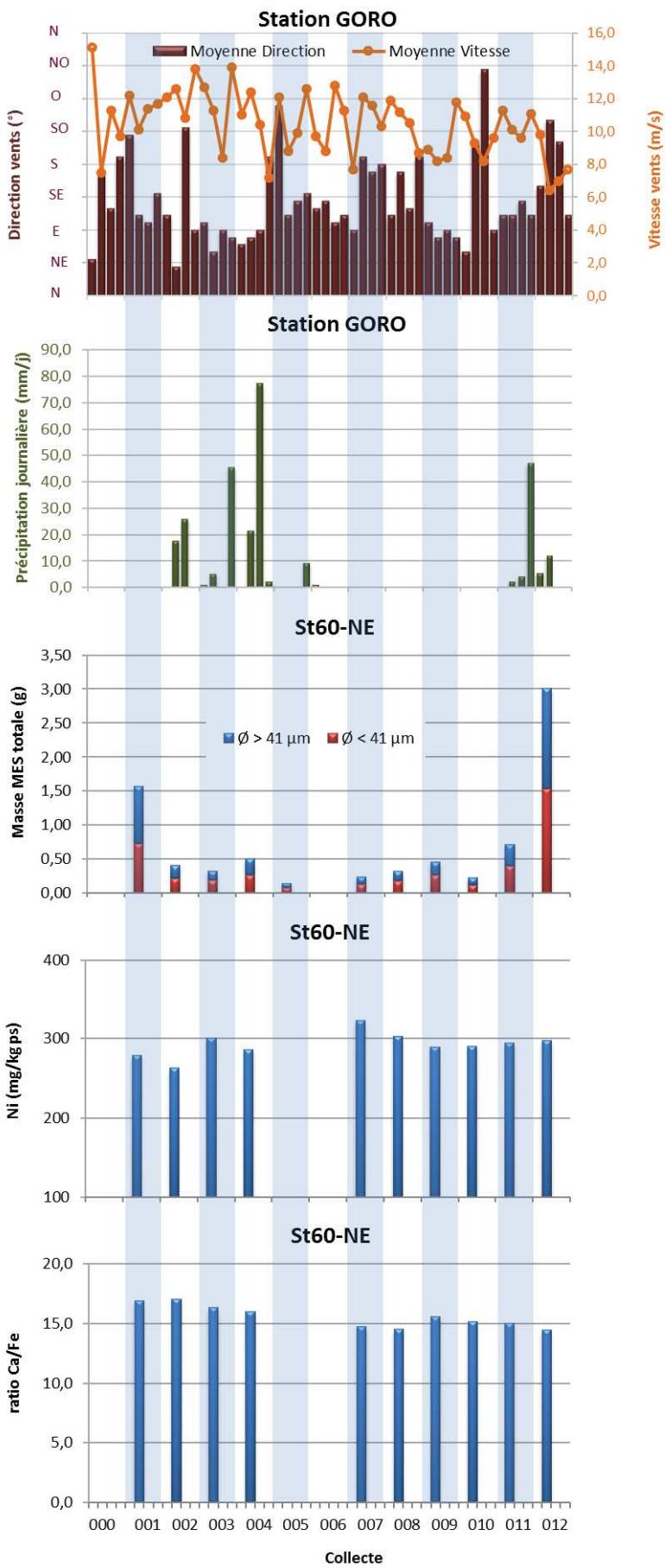


Figure 22 : Diagramme combiné de la direction et la vitesse moyennes journalières des vents, du cumul journalier des précipitations, des masses totales de MES piégées, de la composition en fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) et fraction grossière ($\varnothing > 41 \mu\text{m}$) ainsi que 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 $18,1 \pm 16,6 \text{ g/m}^2/\text{j}$, 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 au 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 $43,4 \pm 42,6 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$. Comme attendu, d'une campagne à l'autre, ces valeurs moyennes varient également beaucoup. Le flux maximum a été calculé au S2-2013 ($282 \pm 627 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$). Depuis cette valeur moyenne a fortement diminué ; ce niveau ayant été rarement atteint, excepté pour les campagnes S1-2018 et S1-2020 (Tableau 24).

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 directe 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 terrigènes sédimentées (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 ($2,34 \pm 2,60 \text{ g/m}^2/\text{j}$) est environ 2 fois plus élevée que celle enregistrée en 2006 pour l'État de Référence, mais reste bien inférieure à celle relevée au S1-2020 ($84 \pm 260 \text{ g/m}^2/\text{j}$).

Les flux métalliques moyens pour cette campagne S2-2021 sont de $16,4 \pm 8,4 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$. Entre les campagnes, celle du 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 au petit bassin versant du Creek de la Rade Nord ont occupé toute la Rade Nord, comme le prouve les enregistrements du piège à sédiments (Tableau 25).

Comparativement, la campagne S1-2014 marquée par trois épisodes météorologiques également très intenses n'a pas entraîné d'accroissement remarquable dans les apports en particules (cumul 920 mm de pluie, mais combiné aux alizés de SE). En conclusion, les flux sont variables et régis par l'ensemble des conditions hydro-climatiques : conjonction de facteurs, 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 entre les différentes campagnes sont moins variables à cette station. La valeur pour cette campagne est de $3,60 \pm 4,26 \text{ g/m}^2/\text{j}$, 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 S2-2021 sont de $1,13 \pm 1,29 \text{ mg ps/m}^2/\text{j}$; 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. Cette observation démontre que l'apport de particules terrigènes n'est qu'occasionnel comme cela a été le cas dernièrement au 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*
										(m/s)
2006	S2	Oct. - Nov. 2006	14,6	±7,4	350	ND	ND	54,4	ND	ND
2007	S1	Mars - Avr. 2007	46,1	±44,7	1 106	192 (n=1)	273	ND	ND	ND
2011	S2	Juil. - Août 2011	27,1	±30,0	1 299	40,6 ±47,4	274	11,3	±3,2	
2012	S1	Janv. - Mars 2012	39,5	±33,2	1 894	77,3 ±70,7	370	12,3	±2,7	
	S2	Sept. - Oct. 2012	26,4	±13,1	1 267	48,4 ±25,4	279	12,0	±2,4	
2013	S1	Janv. - Févr. 2013	46,5	±28,5	2 231	101 ±58	181	12,0	±2,1	
	S2	JUIL. - Août 2013	58,1	±87,8	2 786	282 ±627	467	11,3	±3,6	
2014	S1	Janv. - Mars 2014	60,7	±34,1	2 914	35,9 ±22,0	920	9,3	±4	
	S2	Sept - Oct. 2014	11,8	±8,4	569	22,5 ±15,3	200	7,3	±2,9	
2015	S1	Janv. - Mars 2015	66,3	±36,1	3 181	102 ±58	243	12,0	±3,7	
	S2	Oct. - Nov. 2015	38,8	±30,5	1 864	82,8 ±82,7	96	12,4	±3,1	
2016	S1	JUIL. - Sept. 2016	28,7	±22,9	1 379	69,3 ±67,6	247	10,8	±2,4	
	S2	Oct. - Nov. 2016	18,5	±13,9	886	32,3 ±24,6	267	11,3	±2,5	
2017	S1	Avr. - Mai 2017	45,3	±40,3	2 173	76,9 ±67,8	443	12,5	±4,2	
	S2	Sept. - Nov. 2017	20,4	±23,0	979	36,5 ±41,3	58,4	11	±2,1	
2018	S1	Mars - Avr. 2018	98,0	±137	4 690	225 ±425	631	13,6	±3,3	
	S2	Mai - Juil. 2018	30,1	±22,8	1 443	34 ±29,3	105	11,1	±3,4 (IC)	
2019	S1	Mars - Mai 2019	51,5	±24,4	2 470	77,1 ±36,0	389	12,4	±3,2 (IC)	
	S2	JUIL. - Sept. 2019	17,8	±11,5	856	27,4 ±18,3	88,2	11,3	±2,4	
2020	S1	Janv. - Mars 2020	51,7	±63,9	2 482	246 ±554	>225 (IC)	12,8	±3,0 (IC)	
	S2	JUIL. - Août 2020	18,2	±11,3	876	54,7 ±36,6	>107 (IC)	11,4	±3,4 (IC)	
2021	S1	JUIL. - Août 2021	22,1	±14,8	1 059	67,7 ±40,0	75,2	11,1	±2,7	
	S2	Oct. - Nov. 2021	18,1	±16,6	871	43,4 ±42,6	281,9	10,4	±1,8	

* 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 \pm 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 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	S2	Oct. – Nov. 2006	1,05 \pm 0,64	25,2	ND ND	54,4	ND	ND
2007	S1	Mars - Avr. 2007	1,55 \pm 1,45	37,1	13,8 (n=1)	272,6	ND	ND
2014	S1	Janv. - Mars 2014	22,2 \pm 44,5	1 063	86,8 \pm 165	920,2	9,3	\pm 4,0
	S2	Sept. – Oct. 2014	0,91 \pm 1,23	43,8	5,76 \pm 3,62	199,6	7,3	\pm 2,9
2015	S1	Janv. - Mars 2015	2,78 \pm 2,98	134	17,7 \pm 14,0	242,6	12	\pm 3,7
	S2	Juil. - Sept. 2015	1,31 \pm 1,34	62,7	5,56 \pm 3,69	148,9	11,6	\pm 2,6
2016	S1	Mai - Juil. 2016	8,67 \pm 7,44	416	26,7 \pm 26,8	241,4	10,9	\pm 3,1
	S2	Oct. – Nov. 2016	2,19 \pm 2,48	105	7,76 \pm 6,11	266,8	11,3	\pm 2,5
2017	S1	Avr. - Mai 2017	8,05 \pm 5,78	386	20,5 \pm 16,5	443,2	12,5	\pm 4,2
	S2	Sept. – Nov. 2017	1,49 \pm 1,52	71	6,7 \pm 3,78	58,4	11	\pm 2,1
2018	S1	Mars – Avr. 2018	8,34 \pm 9,63	400	23,2 \pm 25,2	631,3	13,6	\pm 3,3
	S2	Mai - Juil. 2018	4,35 \pm 2,81	209	10,6 \pm 5,2	105,2	11,1	\pm 3,4 (IC)
2019	S1	Mai - Juil. 2019	15,3 \pm 10,6	490	26,7 \pm 17,6	149,1	10,2	\pm 3,2
	S2	Juil. – Sept. 2019	3,69 \pm 2,55	177	7,49 \pm 5,38	88,2	11,3	\pm 2,4
2020	S1	Janv. – Mars 2020	84,0 \pm 260	3341	590 \pm 1431	225,3 (IC)	12,8	\pm 3,0 (IC)
	S2	Juil. – Août 2020	3,48 \pm 3,56	167	12,5 \pm 11,1	>107,3 (IC)	11,4	\pm 3,4 (IC)
2021	S1	Juil. – Août 2021	2,75 \pm 2,37	132	13,1 \pm 7,0	75,2	11,1	\pm 2,7
	S2	Oct. - Nov. 2021	2,34 \pm 2,60	103	16,4 \pm 8,4	281,9	10,4	\pm 1,8

données de précipitations et vents courant 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 \pm 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-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	S1	Févr. - Mars 2007	31,6 $\pm 40,1$	949	2,45 (n=1)	ND	ND	ND
2012	S1	Janv. - Mar 2012	9,61 $\pm 8,87$	461	3,96 $\pm 3,66$	370,1	12,3	$\pm 2,7$
	S2	Sept. - Oct. 2012	4,10 $\pm 5,39$	197	3,55 $\pm 1,79$	278,5	12	$\pm 2,4$
2013	S1	Janv. - Mars 2013	12,6 $\pm 13,6$	603	7,72 $\pm 5,70$	181,2	12	$\pm 2,1$
	S2	Juil. - Août 2013	5,85 $\pm 7,09$	281	2,87 $\pm 3,44$	467	11,3	$\pm 3,6$
2014	S1	Avr. - Juin 2014	7,43 $\pm 5,05$	356	2,46 $\pm 1,74$	260,9	8,3	$\pm 3,5$
	S2	Sept. - Oct. 2014	8,13 $\pm 9,08$	390	2,93 $\pm 3,23$	199,6	7,3	$\pm 2,9$
2015	S1	Janv. - Mars 2015	16,0 $\pm 15,6$	766	8,57 $\pm 9,87$	242,6	12	$\pm 3,7$
	S2	Juil. - Sept. 2015	9,88 $\pm 9,20$	474	3,97 $\pm 3,31$	148,9	11,6	$\pm 2,6$
2016	S1	Mai - Juil. 2016	17,1 $\pm 10,2$	822	7,58 $\pm 3,07$	241,4	10,9	$\pm 3,1$
	S2	Oct. - Nov. 2016	11,1 $\pm 17,6$	535	3,26 $\pm 4,52$	266,8	11,3	$\pm 2,5$
2017	S1	Avr. - Mai 2017	15,5 $\pm 14,2$	745	7,46 $\pm 5,60$	443,2	12,5	$\pm 4,2$
	S2	Sept. - Nov. 2017	7,28 $\pm 6,36$	350	2,36 $\pm 1,95$	58,4	11	$\pm 2,1$
2018	S1	Mars - Avr. 2018	18,3 $\pm 18,1$	897	7,66 $\pm 6,10$	631,3	13,6	$\pm 3,3$
	S2	Mai - Juil. 2018	8,37 $\pm 6,34$	402	2,58 $\pm 1,44$	105,2	11,1	$\pm 3,4$ (IC)
2019	S1	Mai - Juil. 2019	19,2 $\pm 12,2$	919	5,3 $\pm 3,48$	389,3	12,4	$\pm 3,2$ (IC)
	S2	Juil. - Sept. 2019	9,98 $\pm 7,57$	439	4,23 $\pm 2,63$	88,2	11,3	$\pm 2,4$
2020	S1	Janv. - Mars 2020	19,5 $\pm 13,8$	935	7,19 $\pm 4,19$	225,3 (IC)	12,8	$\pm 3,0$ (IC)
	S2	Juil. - Août 2020	7,62 $\pm 8,35$	366	2,94 $\pm 3,20$	>107,3 (IC)	11,4	$\pm 3,4$ (IC)
2021	S1	Juil. - Août 2021	4,71 $\pm 2,54$	226	1,91 $\pm 0,93$	75,2	11,1	$\pm 2,7$
	S2	Oct. - Nov. 2021	3,60 $\pm 4,26$	159	1,13 $\pm 1,29$	281,9	10,4	$\pm 1,8$

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 S2-2021 de suivi des densités de flux verticaux de particules s'est déroulée du 07 octobre au 23 novembre aux stations St06-KW1, St15 et St60-NE. Cette campagne est caractérisée par une pluviométrie relativement élevée mais avec de fortes disparités dans le temps ; hormis le début et la fin de la période de mouillage, l'entretempo a été très sec. Quant aux régimes de vents, la campagne a été marquée par une instabilité plus généralisée.

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 ([Fernandez et Kumar-Roiné, 2021](#)), 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 déposées, en lien souvent indirect avec l'intensité des précipitations qui provoquent l'érosion des sols. Globalement subissant des influences terrigènes et marines alternées d'intensités variables, entre 2007 (État de Référence) et 2013, la diminution importante du ratio moyen Ca/Fe a donc 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 par rapport à l'état de référence. 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.
- 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 suspension, 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 relative 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 des campagnes de S2-2017 et S1-2020.

En ce qui concerne la présence de gypse (CaSO_4) dans les particules piégées, aucune trace d'enrichissement anormal n'est discernée ni pour Ca, ni pour S ; ce minéral étant par ailleurs très soluble dans l'eau. 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. 2021. 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 2021. Période de juillet à août 2021. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L26981/0001, 60p.
- Kumar-Roiné S., Moreton B., Drouzy M., Boulai E., Fernandez JM. 2020. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1er semestre 2020. Période de janvier à mars 2020. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L26981/0001, 58p.
- 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 1er semestre 2021. Période de juillet à août 2021. Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L26981/0001, 60p.

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 PRONY RESOURCES (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 St06-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 OCTOBRE AU 23 NOVEMBRE 2021.....	12
FIGURE 4 : MASSE TOTALE DE MES PIEGEE 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 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 FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) 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 5 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15....	18
FIGURE 11 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 3 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.....	20
FIGURE 12 : MASSE TOTALE DES MES PIEGES 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 St60-NE.....	21
FIGURE 13 : POURCENTAGES MASSIQUES EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET EN FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) DANS LES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.....	21
FIGURE 14 : TENEURS EN CARBONATES CONTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 10 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.	22
FIGURE 15 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 2 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St60-NE.....	23
FIGURE 16 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 12 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St06-KW1.....	25
FIGURE 17 : NORMALISATION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM PAR LE FER MESUREES DANS LA FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DES 5 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.....	28
FIGURE 18 : 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.....	31
FIGURE 19 : 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.....	32
FIGURE 20 : DIAGRAMME COMBINE DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRECIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIEGES, DE LA COMPOSITION EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESUREES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A St06-KW1.	37
FIGURE 21 : DIAGRAMME COMBINE DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRECIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIEGES, DE LA COMPOSITION EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESUREES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A St15.	39
FIGURE 22 : DIAGRAMME COMBINE DE LA DIRECTION ET LA VITESSE MOYENNES JOURNALIERES DES VENTS, DU CUMUL JOURNALIER DES PRECIPITATIONS, DES MASSES TOTALES DE MES PIEGES, DE LA COMPOSITION EN FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) ET FRACTION GROSSIERE ($\phi > 41 \mu\text{m}$) AINSI QUE DES CONCENTRATIONS EN NICKEL ET DES RATIOS Ca/Fe MESUREES DANS LES FRACTIONS FINES PIEGEES A St60-NE.....	41

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 FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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 3 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 FRACTION FINE ($\phi < 41 \mu\text{m}$) 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.	24
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.....	25
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 CALCUM 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 5 PRELEVEMENTS DU PIEGE SEQUENTIEL A St15.....	28
TABLEAU 18 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCUM 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.....	30
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.	31
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.	32
TABLEAU 22 : COMPILATION DES DONNEES MOYENNES ± ECART-TYPES DES CONCENTRATIONS EN METAUX ET CALCUM OBTENUES DANS LES FRACTIONS FINES ($\phi < 41 \mu\text{m}$) DE MES PIEGEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES A St60-NE.	33
TABLEAU 23 : 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 COLLECTEES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'IMMERSION DES PIEGES SEQUENTIELS A PARTICULES A St60-NE.	34
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	44

TABLEAU 25 : COMPILATION DES MOYENNES \pm 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.	45
TABLEAU 26 : COMPILATION DES MOYENNES \pm 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.....	46

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 $0,05 \text{ m}^2$ de section efficace (Technicap, type PPS4/3) qui sont gréés 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 stoechiométrique 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 à l'Université de Nouvelle-Calédonie.

DOSAGE ELEMENTAIRE

Le dosage élémentaire, nécessaire pour le suivi des flux de polluants, est réalisé par la méthode dite « minéralisation eau régale ». Les échantillons de fraction fine ($\varnothing < 41 \mu\text{m}$) sont attaqués avec de l'acide à haute température en conditions hyperbares. Le Ca, Mg, S et 5 métaux (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont analysés par ICP-OES. Des échantillons de référence (MESS-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 ($\text{g/m}^2/\text{j}$) 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	07/10/2021	0,0	12,2	220,0	SO	007	31/10/2021	0,0	7,7	90,0	E
	08/10/2021	0,0	10,1	110,0	ESE		01/11/2021	0,2	12,1	190,0	S
	09/10/2021	0,0	11,4	100,0	E		02/11/2021	0,0	11,6	170,0	S
	10/10/2021	0,0	11,7	140,0	SE		03/11/2021	0,0	10,3	180,0	S
002	11/10/2021	0,0	12,1	110,0	ESE	008	04/11/2021	0,0	11,9	110,0	ESE
	12/10/2021	18,1	12,6	40,0	NE		05/11/2021	0,0	11,2	170,0	S
	13/10/2021	26,3	10,8	230,0	SO		06/11/2021	0,0	10,5	120,0	ESE
	14/10/2021	0,0	13,8	90,0	E		07/11/2021	0,0	8,7	190,0	S
003	15/10/2021	1,2	12,7	100,0	E	009	08/11/2021	0,0	8,9	100,0	E
	16/10/2021	5,4	11,3	60,0	ENE		09/11/2021	0,0	8,2	80,0	E
	17/10/2021	0,0	8,4	90,0	E		10/11/2021	0,0	8,4	90,0	E
	18/10/2021	45,7	13,9	80,0	E		11/11/2021	0,0	11,8	80,0	E
004	19/10/2021	0,4	11,0	70,0	ENE	010	12/11/2021	0,0	10,9	60,0	ENE
	20/10/2021	21,6	12,4	80,0	E		13/11/2021	0,0	9,3	210,0	SSO
	21/10/2021	77,6	10,4	90,0	E		14/11/2021	0,0	8,2	310,0	NO
	22/10/2021	2,4	7,2	190,0	S		15/11/2021	0,0	9,6	90,0	E
005	23/10/2021	0,0	12,1	260,0	O	011	16/11/2021	0,0	11,3	110,0	ESE
	24/10/2021	0,0	8,8	110,0	ESE		17/11/2021	2,7	10,1	110,0	ESE
	25/10/2021	0,0	9,9	130,0	SE		18/11/2021	4,4	9,6	130,0	SE
	26/10/2021	9,5	12,6	140,0	SE		19/11/2021	47,1	11,1	110,0	ESE
006	27/10/2021	1,4	9,7	120,0	ESE	012	20/11/2021	5,6	9,8	150,0	SSE
	28/10/2021	0,0	8,8	130,0	SE		21/11/2021	12,3	6,4	240,0	OSO
	29/10/2021	0,0	12,8	100,0	E		22/11/2021	0,0	7,0	210,0	SSO
	30/10/2021	0,0	11,3	110,0	ESE		23/11/2021	0,0	7,7	110,0	ESE

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 oct.-10 oct.	001	0,465	0,104	1,57
10 oct. -14 oct.	002	1,55	0,075	0,412
14 oct.-18 oct.	003	0,589	0,014	0,322
18 oct.-22 oct.	004	1,34	<0,001	0,508
22 oct.-26 oct.	005	1,87	0,092	0,148
26 oct.-30 oct.	006	1,06	0,085	<0,001
30 oct.-03 nov.	007	5,06	0,242	0,239
03 nov.-07 nov.	008	7,46	0,374	0,321
07 nov.-11 nov.	009	11,7	1,30	0,462
11 nov.-15 nov.	010	4,01	1,28	0,228
15 nov.-19 nov.	011	3,53	1,19	0,713
19 nov.-23 nov.	012	4,95	0,392	3,01

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 oct.-10 oct.	001	61	ND	87
10 oct. -14 oct.	002	56	ND	78
14 oct.-18 oct.	003	60	ND	85
18 oct.-22 oct.	004	63	ND	93
22 oct.-26 oct.	005	70	12	ND
26 oct.-30 oct.	006	73	ND	ND
30 oct.-03 nov.	007	68	ND	86
03 nov.-07 nov.	008	62	23	93
07 nov.-11 nov.	009	74	23	92
11 nov.-15 nov.	010	69	27	85
15 nov.-19 nov.	011	69	25	86
19 nov.-23 nov.	012	74	23	85

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	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 oct.-10 oct.	001	221 499	77,4	2 755	97 533	584	1 679
10 oct. -14 oct.	002	202 231	66,1	2 321	84 463	511	1 457
14 oct.-18 oct.	003	218 962	98,2	3 413	115 093	777	2 176
18 oct.-22 oct.	004	231 947	89,6	3 115	113 920	699	1 983
22 oct.-26 oct.	005	259 196	94,8	3 341	112 966	750	2 063
26 oct.-30 oct.	006	271 856	100,4	3 500	129 395	815	2 202
30 oct.-03 nov.	007	251 010	120,5	4 104	165 155	944	2 583
03 nov.-07 nov.	008	224 571	128,2	4 330	147 397	1 025	2 751
07 nov.-11 nov.	009	275 522	110,3	3 869	149 138	905	2 401
11 nov.-15 nov.	010	253 265	111,5	3 833	135 682	869	2 413
15 nov.-19 nov.	011	256 332	108,9	3 825	138 278	871	2 378
19 nov.-23 nov.	012	276 246	105,7	3 738	141 430	852	2 306

Période de collecte	Prélèvement	Elément (mg/kg ps)					
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 oct.-10 oct.	001	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10 oct. -14 oct.	002	ND	ND	ND	ND	ND	ND
14 oct.-18 oct.	003	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18 oct.-22 oct.	004	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22 oct.-26 oct.	005	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26 oct.-30 oct.	006	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30 oct.-03 nov.	007	ND	ND	ND	ND	ND	ND
03 nov.-07 nov.	008	78 283	208,1	7 763	243 291	1 989	3 762
07 nov.-11 nov.	009	78 416	179,7	6 897	213 926	1 560	3 293
11 nov.-15 nov.	010	92 960	201,2	7 744	243 258	1 741	3 701
15 nov.-19 nov.	011	87 520	200,6	7 872	228 650	1 809	3 774
19 nov.-23 nov.	012	80 244	198,7	7 827	246 660	1 675	3 741

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						
		Elément (mg/kg ps)						
		Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	S
07 oct.-10 oct.	001	326 179	15,2	530	19 301	141	278	3 711
10 oct.-14 oct.	002	293 468	14,4	491	17 196	182	263	2 626
14 oct.-18 oct.	003	320 007	15,9	562	19 581	220	300	2 674
18 oct.-22 oct.	004	354 813	15,1	532	22 185	159	286	2 518
22 oct.-26 oct.	005	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26 oct.-30 oct.	006	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30 oct.-03 nov.	007	321 848	17,4	606	21 843	207	322	2 990
03 nov.-07 nov.	008	351 827	15,9	571	24 235	142	303	3 193
07 nov.-11 nov.	009	350 702	15,4	544	22 463	160	290	2 797
11 nov.-15 nov.	010	319 775	15,2	560	21 083	143	290	3 299
15 nov.-19 nov.	011	324 003	16,1	571	21 506	182	294	3 339
19 nov.-23 nov.	012	322 451	16,2	577	22 283	175	298	3 296

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 oct.-10 oct.	001	2,33	515	0,180	6,41	227	1,36	3,90
10 oct. -14 oct.	002	7,76	1 568	0,513	18,0	655	3,97	11,3
14 oct.-18 oct.	003	2,95	645	0,289	10,1	339	2,29	6,41
18 oct.-22 oct.	004	6,68	1 548	0,598	20,8	760	4,67	13,2
22 oct.-26 oct.	005	9,34	2 421	0,886	31,2	1 055	7,00	19,3
26 oct.-30 oct.	006	5,28	1 434	0,530	18,5	683	4,30	11,6
30 oct.-03 nov.	007	25,3	6 353	3,05	104	4 180	23,9	65,4
03 nov.-07 nov.	008	37,3	8 379	4,78	162	5 499	38,2	103
07 nov.-11 nov.	009	58,3	16 062	6,43	226	8 694	52,8	140
11 nov.-15 nov.	010	20,1	5 080	2,24	76,9	2 722	17,4	48,4
15 nov.-19 nov.	011	17,7	4 524	1,92	67,5	2 441	15,4	42,0
19 nov.-23 nov.	012	24,7	6 830	2,61	92,4	3 497	21,1	57,0

Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	St15					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 oct.-10 oct.	001	0,520	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10 oct. -14 oct.	002	0,375	ND	ND	ND	ND	ND	ND
14 oct.-18 oct.	003	0,070	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18 oct.-22 oct.	004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22 oct.-26 oct.	005	0,460	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26 oct.-30 oct.	006	0,425	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30 oct.-03 nov.	007	1,21	ND	ND	ND	ND	ND	ND
03 nov.-07 nov.	008	1,87	146	0,389	14,5	455	3,72	7,03
07 nov.-11 nov.	009	6,49	509	1,17	44,8	1 388	10,1	21,4
11 nov.-15 nov.	010	6,40	594	1,29	49,5	1 556	11,1	23,7
15 nov.-19 nov.	011	5,95	520	1,19	46,8	1 359	10,8	22,4
19 nov.-23 nov.	012	1,96	157	0,390	15,3	483	3,28	7,33

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

Période de collecte	Prélèvement	Flux MES (g/m ² /j)	St60-NE					
			Ca	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
07 oct.-10 oct.	001	7,83	2 554	0,119	4,15	151	1,10	2,18
10 oct.-14 oct.	002	2,06	605	0,030	1,01	35,4	0,376	0,542
14 oct.-18 oct.	003	1,61	515	0,026	0,905	31,5	0,354	0,483
18 oct.-22 oct.	004	2,54	901	0,038	1,35	56,4	0,403	0,728
22 oct.-26 oct.	005	0,740	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26 oct.-30 oct.	006	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30 oct.-03 nov.	007	1,20	385	0,021	0,724	26,1	0,248	0,385
03 nov.-07 nov.	008	1,61	565	0,025	0,916	38,9	0,228	0,486
07 nov.-11 nov.	009	2,31	810	0,036	1,26	51,9	0,370	0,669
11 nov.-15 nov.	010	1,14	365	0,017	0,638	24,0	0,163	0,331
15 nov.-19 nov.	011	3,57	1 155	0,057	2,04	76,7	0,649	1,05
19 nov.-23 nov.	012	15,0	4 850	0,244	8,68	335	2,63	4,48

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