

SUIVI DU MILIEU MARIN DANS LES BAIES KWE ET DE PORT BOISE :

ACQUISITION DE DONNEES PHYSICOCHIMIQUES DANS
LES SÉDIMENTS ET LA COLONNE D'EAU



RAPPORT FINAL

CAMPAGNE DE JANVIER
2020 À AVRIL 2020



« Chimie de l'environnement et
Modélisation hydrodynamique »



Photos de couverture AEL : THOË sur une ligne de mouillage

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL-LEA

SUIVI DU MILIEU MARIN DANS LES BAIES KWE ET DE PORT BOISE :

ACQUISITION DE DONNEES PHYSICOCHIMIQUES DANS LES SÉDIMENTS ET LA COLONNE D'EAU

Campagne de Janvier 2020 à Mai 2020

Moreton B., Drouzy M., Fernandez JM.

Nombre de pages : 86

	Ref AEL	Ref Client
--	---------	------------

Identification

294-OEIL-19-P

S.O.

Titre complet

Suivi du milieu marin dans les baies Kwe et de Port Boisé ; acquisition de données physicochimiques dans les sédiments et la colonne d'eau. Campagne de janvier 2020 à avril 2020.

Auteurs

Moreton B., Drouzy M., Fernandez JM.



Résumé

Dans le but d'épauler les suivis réglementaires actuellement menés par Vale NC, cette étude avait pour objectif principal d'effectuer des mesures temporelles des concentrations en métaux dissous dans les baies Kwe et Port Boisé, systèmes considérés respectivement, sous influence de l'activité minière et comme une référence. Dans le même objectif, la composition géochimique du sédiment de surface dans ces deux baies a été analysé. Ce rapport présente les résultats qui ont été obtenus pour les deux baies pendant la campagne de janvier-avril 2020.

Le suivi temporel a été marqué par un événement pluvieux important qui a eu des répercussions flagrantes sur les concentrations de métaux dissous dans la colonne d'eau, à la fois dans la baie Kwe et à Port Boisé. Les concentrations moyennes en nickel et cobalt dissous, éléments considérés comme des traceurs terrigènes, ont augmenté de manière très significative au cours des 8 jours, qui ont suivi ces fortes pluies. Au-delà, une baisse rapide de la concentration a été observée, conformément aux calculs prédictifs de la modélisation hydrodynamique (Drouzy, 2019) ; délai de 1 à 2 jours pour la baie Kwé (renouvellement rapide de l'eau dans ce système) et de 4 à 6 jours à Port Boisé (circulation plus complexe). Bien que l'impact terrigène soit clairement démontré, l'origine des sources métalliques dans la baie de Port Boisé est moins bien définie, contrairement à la baie Kwe où le creek constitue quasiment le seul vecteur de charges dissoute et particulaire.

La mesure des concentrations par exposition séquentielle d'échantillonneurs DGT™ a permis de décrire les conséquences des précipitations sur la lixiviation des sols et de mesurer les effets notables que celle-ci induit dans la colonne d'eau, en termes de qualité géochimique. Ces données ont également permis de préciser les phénomènes de dispersion des métaux dissous apportés par les creeks. Cette information était jusqu'à présent inaccessible avec la méthodologie classique d'échantillonnage ponctuel.

Sur chacune des deux stations (ST03 et ST06), une campagne de mesures à deux profondeurs simultanément, ainsi qu'une définition des termes sources terrigènes à Port Boisé, permettraient de conforter les hypothèses émises en termes de dispersion/diffusion verticale des métaux dans la colonne d'eau. Une nouvelle modélisation des trajectoires des veines d'eau serait un appui certain.

En ce qui concerne les sédiments, les résultats n'ont montré aucune preuve de la présence de composants organiques d'origine industrielle. L'analyse élémentaire dans les sédiments a confirmé que les deux baies sont principalement influencées par les apports marins. Toutefois, la baie Kwe montre des concentrations importantes en métaux, jusqu'à deux fois plus élevées qu'à Port Boisé, en raison des apports terrigènes apportés par la rivière Kwe.

APPROBATION

FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Moreton B.	BM	09/11/2020
Vérificateur 1	Fernandez JM	JMFA	25/11/2020
Vérificateur 2	Drouzy M	MD	16/11/2020
Approbateur	Pousse C	CP	25/11/2020

EVOLUTION

VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE
V1.0	Rapport final	20/10/2020
V1.1	Rapport final corrigé	17/11/2020
V1.2	Rapport final amendé	25/11/2020

COPIE - DIFFUSION

NOM	ORGANISME
Adrien Bertaud	OEIL & CCCE

Ce rapport est cité comme suit :

Moreton B, Drouzy M, Fernandez JM. 2020. Suivi du milieu marin dans les baies Kwe et de Port Boisé : acquisition de données physicochimiques dans les sédiments et la colonne d'eau. Campagne de janvier 2020 à avril 2020. Contrat AEL/OEIL 86p.

TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION	7
A.	CONTEXTE	7
B.	OBJECTIFS.....	7
II.	METHODOLOGIE	8
A.	SITE D'ÉTUDE.....	8
B.	ECHANTILLONNAGE D'EAU	9
C.	ECHANTILLONNAGE DE SÉDIMENT	12
III.	RESULTATS.....	15
A.	CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	15
B.	PROFILS DE SALINITÉ DES EAUX.....	17
C.	CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS DISSOUS	19
D.	GRANULOMETRIE DES SÉDIMENTS.....	29
E.	COMPOSITION GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS.....	31
F.	CONCENTRATIONS EN COMPOSÉS ORGANIQUES DANS LES SÉDIMENTS.....	35
IV.	DISCUSSION / CONCLUSION.....	36
A.	ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE ET SÉDIMENTAIRE DE LA ZONE D'ÉTUDES.	36
B.	MISE EN CONTEXTE DES RÉSULTATS DES MÉTAUX DISSOUS PAR RAPPORT À LA MODÉLISATION	43
C.	COMPORTEMENT DE LA COUVERTURE SÉDIMENTAIRE	47
D.	CONCLUSION GÉNÉRALE	48

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

L'Observatoire de l'environnement en Nouvelle Calédonie – OEIL – et le Comité Consultatif Coutumier Environnemental – CCCE – sont deux structures ayant pour mission commune le suivi de l'environnement et la communication auprès du grand public dans la zone d'influence du complexe industriel et minier de Vale Nouvelle-Calédonie. A ce titre, l'OEIL et le CCCE collaborent depuis plusieurs années dans le cadre d'actions communes pour l'acquisition de données environnementales indispensables au diagnostic de l'état des milieux naturels.

En 2014, l'OEIL a été mandaté par la province Sud pour évaluer la pertinence du plan de suivi réglementaire du milieu marin dans la zone d'influence du site de Vale Nouvelle-Calédonie. A l'issue de ce travail, un plan de suivi optimisé répondant pleinement aux objectifs définis par les gestionnaires a été remis à l'autorité publique en 2015.

Cette étude fait suite à l'objet du programme de travail par la mise en œuvre des actions de suivi du milieu marin préconisées par l'OEIL et qui sont complémentaires des suivis réglementaires actuellement menés par l'exploitant.

La baie Kwe est sous l'influence d'une partie conséquente des installations de Vale Nouvelle-Calédonie avec notamment la présence de l'aire de stockage des résidus, du centre de préparation du minerai, et de la fosse d'extraction minière sur son bassin versant. Par ailleurs, il s'agit également d'un site dont l'évolution et l'état préoccupent les populations riveraines. Dans ce contexte, l'ensemble des actions de suivis ont été menées dans la baie de Kwe et dans la baie de Port Boisé considérée comme son site de référence.

B. OBJECTIFS

Dans les baies Kwe et de Port Boisé (Figure 1), les objectifs de cette étude étaient de :

- Effectuer un suivi temporel de la concentration en métaux dissous, en complément des actions réglementaires actuellement déjà conduites ;
- Caractériser la composition géochimique du sédiment de surface (métaux, contaminants organiques, soufre, méthyl-mercure) et sa granulométrie ;
- Comparer les résultats issus des deux baies en vue d'identifier les effets potentiels des activités anthropiques sur le site sous influence directe (baie Kwe) par rapport au site supposé hors influence (baie de Port Boisé).

II. METHODOLOGIE

Note : La méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude pour l'analyse des concentrations en métaux dissous dans l'eau est essentiellement basée sur des techniques développées spécifiquement pour les milieux tropicaux oligotrophes (Moreton, et al. 2013). Elle diffère des autres méthodologies par son aspect intégrateur qui améliore grandement la représentativité des valeurs mesurées dans l'environnement.

A. SITE D'ÉTUDE

Les opérations de terrain ont été réalisées sur les stations situées dans les baies de la Kwe et de Port Boisé (Tableau 1, Figure 1).

1. La baie Kwe

La baie Kwe couvre une superficie de 2,10 Km² avec une profondeur maximale d'environ 32 mètres dans le chenal, pour une profondeur moyenne de 19 mètres. Cette baie est principalement alimentée en eau douce par la rivière Kwe dont le débit moyen est de 1,7 m³/s environ (Drouzy, 2019). Le bassin versant de la rivière Kwe s'étend sur 40 km² et abrite une grande partie des sites d'exploitation de la société minière Vale-NC. La station ST06 sur laquelle a été immergé le passeur d'échantillonneurs passifs THOË, est localisée dans le chenal d'accès au Canal de la Havannah et à l'embouchure de la rivière Kwe. Cette station fait partie du réseau de surveillance réglementaire des impacts environnementaux de Vale-NC, notamment en termes d'apports en métaux dissous et particuliers.

2. La baie de Port Boisé

La superficie de la baie de Port Boisé est légèrement plus grande que celle de la baie Kwe, elle atteint 2,74 km². La baie est alimentée en eau douce de la rivière nommée Trou Blue dont le bassin versant couvre 8,5 km². Trois autres petits creeks fournissent de l'eau douce à la baie. Bien que non réellement mesuré, il a été estimé que le débit moyen d'eau douce entrant dans la baie est de 0,38 m³/s dont 0,2 m³/s, 0,06 m³/s, 0,06 m³/s et 0,06 m³/s provenant de la Trou Bleu et de trois autres rivières (Drouzy, 2019).

En termes bathymétriques, le point le plus profond se situe dans le centre de la baie et atteint 38 mètres, tandis que la profondeur moyenne avoisine les 20 mètres. Anciennement exploité, le bassin versant de la baie de Port Boisé n'abrite plus aucun site minier aujourd'hui en activité. De ce fait, à ce jour la baie est considérée comme soumise à peu d'influence relative aux activités anthropiques contemporaines, on dénombre seul un gîte hôtelier. La station ST03 du suivi réglementaire en baie de Port Boisé est donc utilisée comme référence par rapport à la baie impactée de la Kwe.

3. Suivis réglementaires

Dans le cadre de la réglementation autorisant l'exploitation minière à la société Vale-NC, l'arrêté ICPE 2008 (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) exige la réalisation d'un suivi géochimique du milieu marin et des sédiments dans l'aire du lagon Sud potentiellement impactée par les activités industrielles.

Dans ce cadre, le laboratoire AEL suit depuis 2010 la qualité géochimique de l'eau et des sédiments aux stations ST03 et ST06, semestriellement et triennalement, respectivement. De plus, le flux de particules à la station ST06 fait également l'objet d'un suivi semestriel qui permet aussi de calculer les flux de métaux particuliers.

Tableau 1. Localisation des stations de prélèvement d'eau (référentiel WGS-84) et les profondeurs des sites.

Localisation	Station	Coordonnées au référentiel WGS-84		Profondeur (m)
		Longitude	Latitude	
Baie Kwe	ST06	166°59.112	22°20.830	30
Port Boisé	ST03	166°58.010	22°21.190	30



Figure 1. Localisation géographique des stations de prélèvement d'eau dans la baie de Port Boisé (ST03) et la baie Kwe (ST06).

B. ECHANTILLONNAGE D'EAU

Le suivi temporel des concentrations en métaux dissous a été abordé principalement avec l'exposition in-situ d'échantillonneurs passifs de type DGT™ grâce au passeur automatique THOË (ANNEXE 6). Au cours de cette même période et en complément analytique, des prélèvements d'eau ponctuels ont été réalisés à différentes dates selon la méthodologie classique pour l'analyse de Cr/Cr⁶⁺, As et Ca, éléments non dosables par la technique DGT™.

Les opérations de terrain ont été réalisées à bord du Mia (Casy Express) entre le 21/01/2020 et le 12/05/20.

1. Echantillonnage ponctuel

A chacune des deux stations (ST03 et ST06), les prélèvements ponctuels d'eaux ont été réalisés selon la programmation présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Date de prélèvement d'eau au station ST03 et ST06

Prélèvement	Date de prélèvement
1	21/01/2020
2	20/02/2020
3	12/03/2020
4	23/04/2020
5	12/05/2020

Les prélèvements ont été effectués avec des bouteilles de type « GoFlo », seulement à mi-profondeur afin de correspondre aux profondeurs d'immersion des deux passeurs THOË immergés.

Après filtration à 0,45µm, les paramètres déterminés ont été : **chrome hexavalent (Cr^{VI}) et chrome total (Cr_{total}), arsenic (As_{total}) et calcium (Ca_{total})**

2. Echantillonnage Passif

L'échantillonnage passif a été réalisé par des dispositifs de type DGT™. Un automate THOË a été mouillé à mi-profondeur (15 mètres du fond) le 21/01/2020 à chacune des deux stations et récupéré le 12/05/20 (Figure 2).

Le suivi été a été réalisé en séquences continues sur 96 jours à raison d'une DGT™ exposée individuellement pendant une durée optimale de 8 jours ; l'exposition de la première DGT de chaque appareil a été programmée pour débuter le 22/01/2020 à 00:00:00 pour une durée de 8 jours ; les 11 autres DGTs ont été exposées selon le même pas de temps (Tableau 3).

Les éléments dissous déterminés ont été : **Ag, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn.**



Figure 2. THOË recevant les DGTs et enregistreur de température associé.

Tableau 3. Programmation des 12 séquences d'exposition (ouverture et fermeture) des DGTs pour chaque appareil.

Sequence	Date de l'ouverture (jj/mm/aaaa)	Heure de l'ouverture (00:00)	Date de la fermeture (jj/mm/aaaa)	Heure de la fermeture (00:00)	Période d'immersion (j)
1	22/01/2020	00:00	30/01/2020	00:00	8
2	30/01/2020	00:00	07/02/2020	00:00	8
3	07/02/2020	00:00	15/02/2020	00:00	8
4	15/02/2020	00:00	23/02/2020	00:00	8
5	23/02/2020	00:00	02/03/2020	00:00	8
6	02/03/2020	00:00	10/03/2020	00:00	8
7	10/03/2020	00:00	18/03/2020	00:00	8
8	18/03/2020	00:00	26/03/2020	00:00	8
9	26/03/2020	00:00	03/04/2020	00:00	8
10	03/04/2020	00:00	11/04/2020	00:00	8
11	11/04/2020	00:00	19/04/2020	00:00	8
12	19/04/2020	00:00	27/04/2020	00:00	8

3. Analyse des DGTs en triplicat

Afin de s'assurer de la reproductibilité des réponses fournies par les DGT™, en fin de période de suivi, trois de ces échantillonneurs ont été déployés sur une ligne parallèle de chaque passeur THOË (Figure 3).

Les éléments dissous déterminés ont été : **Ag, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn.**

Note : en raison de conditions météorologiques défavorables qui ne permettaient pas la navigation, les DGT™ ont été récupérés après un déploiement de 19 jours (immersion, le 23/04/20 et récupération, le 12/05/20) au lieu des 8 initialement prévus.



Figure 3. DGT déployés sur chaque site d'échantillonnage (avant déploiement)

4. Suivi continu de la salinité/conductivité

Au cours de la période de déploiement des automates THOË, la salinité été mesurée, à mi-profondeur (15 mètres) en continu à l'aide de sondes autonomes (loggers). Ces capteurs ont enregistré une valeur toutes les 10 minutes afin de mettre évidence les éventuels apports d'eau douce, qu'ils proviennent des panaches de rivière ou des précipitations atmosphériques.

Afin de vérifier les mesures de salinité enregistrées par les loggers, des profils avec une sonde CTD Seabird 19plusV2 ont été effectués sur les deux stations à plusieurs reprises pendant la période d'étude.

C. ÉCHANTILLONNAGE DE SÉDIMENT

Au cours de l'étude, des sédiments ont été prélevés en chacun des deux sites. Pour examiner la variabilité intra-site ; trois échantillons de sédiments ont ainsi été prélevés dans un rayon de 50 mètres de circonférence, à partir des points d'échantillonnage en ST03 et ST06 (Tableau 4, Figure 4 et Figure 5).

Note : Un point d'échantillonnage au niveau de la station ST06 dans la baie Kwe a dû être déplacé en raison de l'impossibilité de collecter un sédiment composé de débris coralliens. L'échantillon a été repositionné à proximité du point de prélèvement d'eau ST06.

Tableau 4. Localisation des stations de prélèvement de sédiment (référentiel WGS-84)

Localisation	Station	Référence AEL	Coordonnées au référentiel WGS-84	
			Longitude	Latitude
Port Boisé	St03	ST03-001	166°58.009	-22°21.163
		ST03-002	166°57.989	-22°21.208
		ST03-003	166°58.034	-22°21.205
Baie Kwe	St06	ST06-004	166°59.112	-22°20.805
		ST06-005	166°59.112	-22°20.830
		ST06-006	166°59.138	-22°20.844

Le prélèvement des sédiments a été effectué avec un carottier conçu pour les faibles profondeurs (< 50 m) afin que la mise en œuvre puisse s'effectuer à partir d'une embarcation à faible tirant d'eau (Figure 6). Le carottier est composé de tubes amovibles de 0,60 m de longueur pour un diamètre externe de 8 cm. Des tubes en plexiglass ont été utilisés afin de s'assurer (i) de la qualité physique du prélèvement et (ii) de l'intégrité géochimique des sédiments. Par ailleurs, ce type de carottier présente l'avantage d'assurer une très bonne conservation de l'interface « eau-sédiments ».

Les sédiments prélevés ont été tamisés à 40 µm par voie humide à des fins, d'une part de normalisation des analyses et d'autre part, de récupération de la fraction sédimentaire chimiquement la plus réactive (pélites : Ø < 40 µm). Les paramètres suivants ont ensuite été déterminés :

- Distribution granulométrique des populations de particules ;
- Concentration des éléments (Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, S et Zn) ;
- Concentration en Méthyl-mercure ;
- Concentration en Carbone Organique Total ;

- Concentration en composés organiques :
 - Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
 - Phtalates
 - Octyphénol et nonyphénol.

Note : Les sédiments prélevés en triplicatas à chacune des deux stations (trois stations dans un rayon de 50 m) ont été rassemblés pour constituer un échantillon composite à des fins d'analyses des composés organiques d'origine industrielle.



Figure 4. Localisation géographique des stations de prélèvement de sédiments (trois points dans un rayon de 50 mètres autour de la station d'eau ST03).

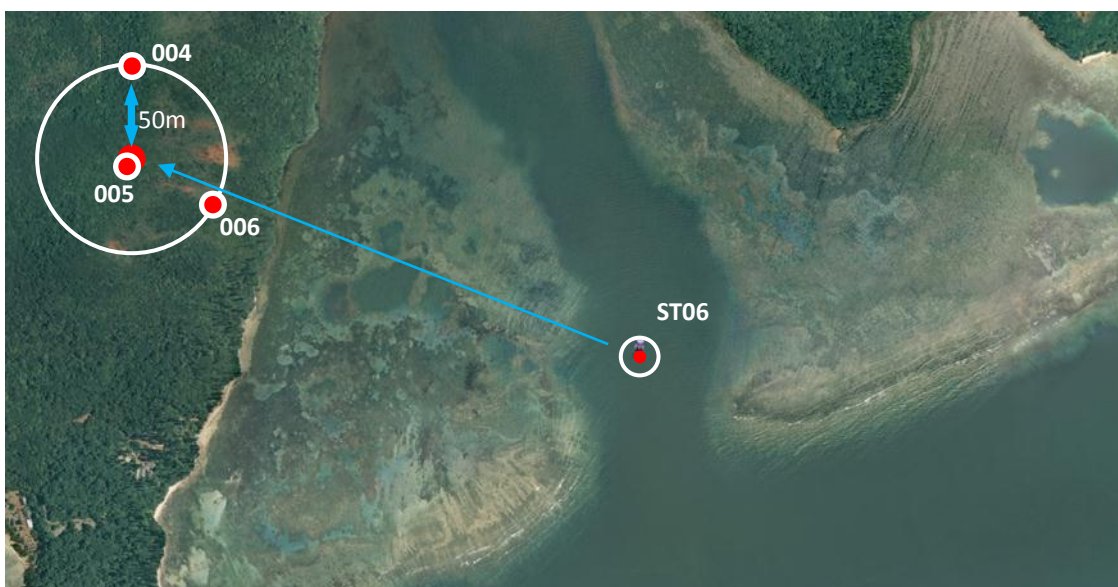


Figure 5. Localisation géographique des stations de prélèvement de sédiments (trois points dans un rayon de 50 mètres autour de la station d'eau ST06).



Figure 6. Carottier utilisé pour la récupération des sédiments de surface.

III. RESULTATS

A. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Les données météorologiques ont été obtenues de la station météorologique de Goro Usine. Le cumul journalier de précipitations, direction du vent et vitesse maximale des vents sont présentés dans les Figure 7, Figure 8, Figure 9 et Figure 10, respectivement.

1. Précipitations atmosphériques

Les précipitations ont été enregistrées sur 64 des 96 jours durant lesquels les passeurs THOË ont été immergés.

Le 29 février, un épisode pluvio-orageux de grande échelle a concerné tout le pays et a apporté des quantités de précipitations particulièrement importantes sur l'extrême sud de la Grande-Terre. Malheureusement, aucune donnée n'a été enregistrée pendant cette journée à la station « Goro Usine » (données non relevées), mais aux stations météorologiques « Résidus Goro » et « Pépinière Goro », 236 mm et 480 mm ont été observés, respectivement, sur la période de 24 heures comprise entre le 29/02/20-00:00 et le 01/03/20-23h00.

Pour l'ensemble de la période d'étude (96 jours) le total des précipitations enregistré à la station « Goro Usine » a été de 560 mm, hors précipitations manquantes entre le 29 février et le 1 mars. Si les précipitations manquantes (estimées entre 236 et 480 mm) sont prises en compte, le total des précipitations pour la période peut être compris entre 796 mm et 1040 mm.

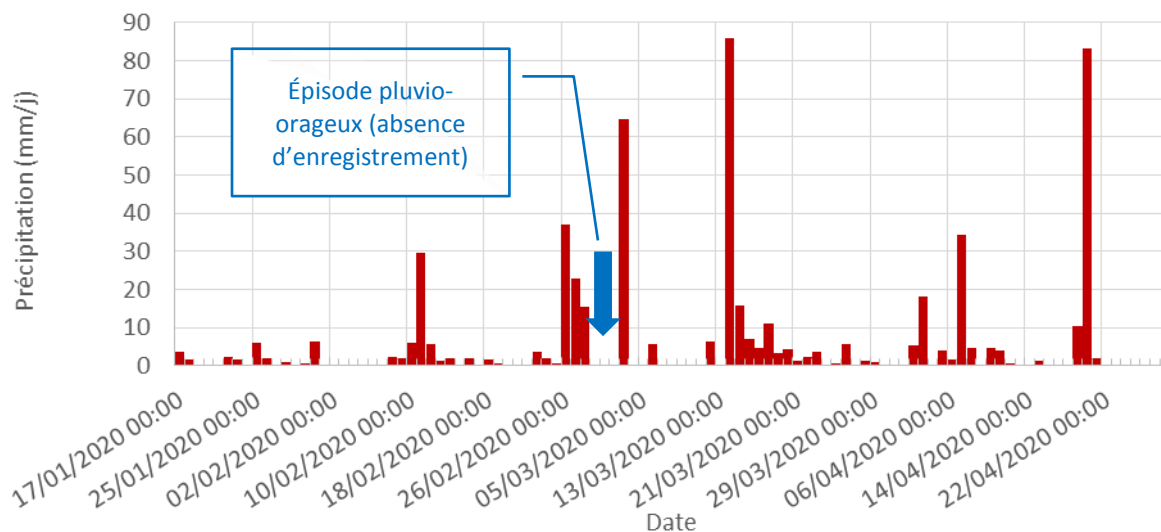


Figure 7. Cumul journalier de précipitations pour la période du 17 janvier au 21 avril 2020 (Station météo : Goro-Usine).

La comparaison avec les conditions pluviométriques historiques (8 dernières années) pour la même période (17 janvier au 21 avril) montre que les précipitations enregistrées au cours de la période d'étude se situent dans la fourchette précédemment observée (612 mm - 1507 mm), cependant, les précipitations quotidiennes maximales enregistrées à la station météorologique de « Pépinière Goro », étaient au-dessus des valeurs quotidiennes maximales enregistrées (la valeur suivante la plus élevée a été enregistrée en 2012 avec 270 mm). Hormis cet événement météorologique extrême, deux autres jours ont enregistré des taux supérieurs à 80 mm, le 14 Mars 2020 et le 20 Avril 2020.

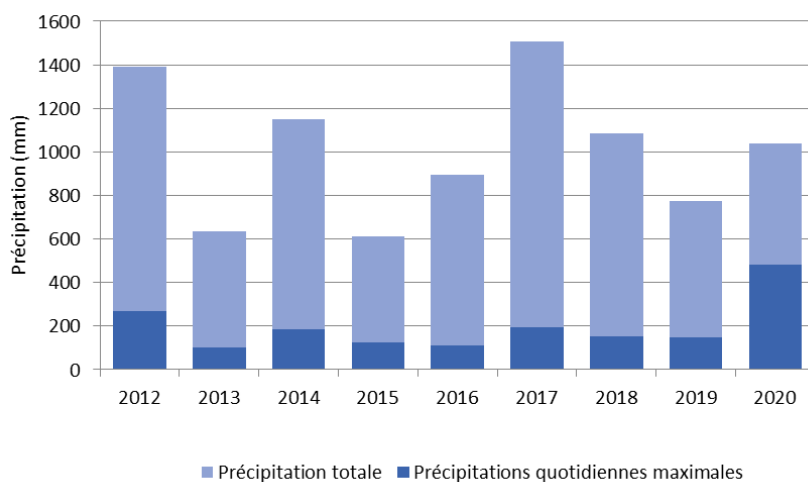


Figure 8. Précipitations journalières totales et maximales annuelles enregistrées pour la période du 17 janvier au 21 avril (Les valeurs pour 2020 tiennent compte des précipitations maximales obtenues à la station météorologique de 'Goro résidus' avec une valeur maximale de 480 mm sur 24h)

2. Régimes des Vents

a) Direction

La rose des vents montrant la fréquence des directions pendant la période d'étude est présentée dans la Figure 9. La direction des vents principale provenait des secteurs Est et Sud-Est. En effet, les vents de ces secteurs représentaient 78% des directions enregistrées. Pendant la période d'étude, aucun vent n'a été observé des secteurs Sud ou bien Ouest, alors que des vents du secteur Nord ont été enregistrés à 7 occasions les 15/03/20 et 16/03/20 ; pendant ces deux journées, les vitesses de vent maximales de secteur Nord ont été supérieures à 27 m/s.

Au cours de l'épisode pluvio-orageux, le vent enregistré aux deux stations météorologiques (« Goro Pépinière » et « Goro Résidu ») était de secteur nord-est les 29 février et 1er mars.

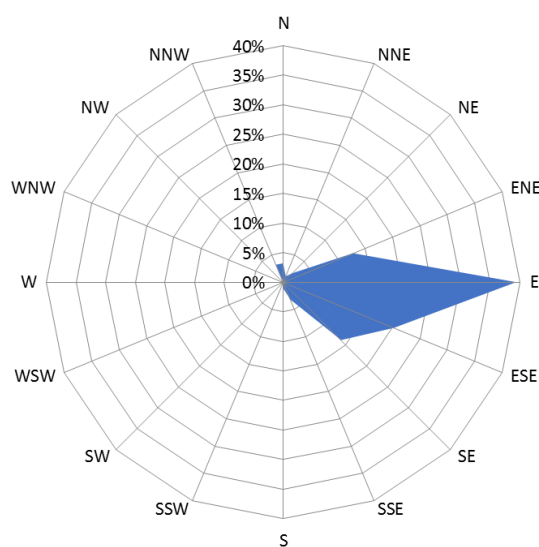


Figure 9. Fréquence des directions des vents en pourcentage d'occurrence pour la période du 17 janvier au 21 avril 2020.

b) Vitesse

La vitesse maximale journalière des vents pour la période du 17 janvier au 21 avril 2020 est présentée dans la Figure 10.

La vitesse maximale du vent enregistrée sur la période a été de 32,3 m/s au 15 mars ; la vitesse moyenne ayant été de $12,8 \pm 3,7$ m/s. Au cours de l'épisode pluvio-orageux, la vitesse maximale journalière pour la période du 29 février au 1er mars a varié entre 14,2 m/s (01/03/20) et 15,2 m/s (29/02/20), d'après les stations météorologiques « Goro Pépinière » et « Goro Résidu », respectivement.

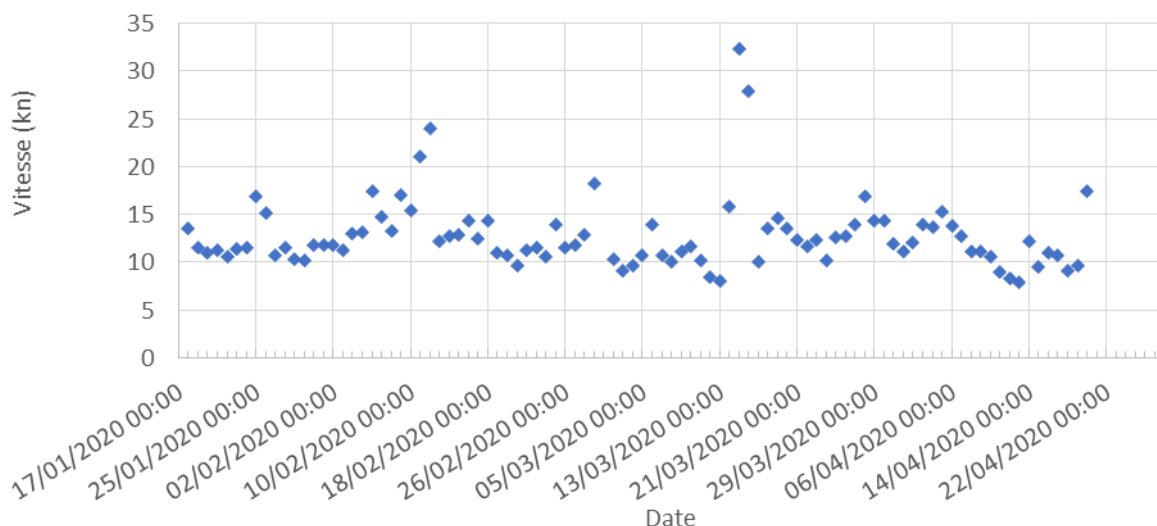


Figure 10. La vitesse maximale journalière des vents pour la période du 17 janvier au 21 avril 2020.

B. PROFILS DE SALINITÉ DES EAUX

Note : Un enregistreur de salinité a été fixé sur chaque ligne de mouillage pendant la période d'immersion de chacun des automates THOË. Les mesures de salinité ont été enregistrées à une fréquence de 10 minutes. L'enregistreur de salinité positionné à Port Boisé a développé une erreur pendant la période d'acquisition et a arrêté l'enregistrement après 64 jours. Après récupération, il a été déterminé qu'il s'agissait d'un défaut de fabrication.

1. Enregistrement en continu de la salinité *in-situ*

Les données obtenues par les enregistreurs de salinité sont présentées en Figure 11.

Au cours de la période d'étude, les valeurs moyennes de salinité étaient quasi identiques pour les deux baies avec des valeurs de $34,8 \pm 0,5$ ‰ et $34,8 \pm 0,7$ ‰, pour la station ST03 et ST06, respectivement.

Malgré de fortes pluies enregistrées le 29 février, très peu de changements de salinité dans la couche de mi-profondeur ont été observés. Vers la mi-mars, la salinité dans la baie de la Kwe a légèrement diminué avec une salinité minimale de 32,6 ‰ relevée à 05h30 le 18 Mars, ce qui est probablement la conséquence des précipitations observées le 14/03/20 (86 mm) suivies de 38 mm supplémentaires au cours des quatre jours suivants.

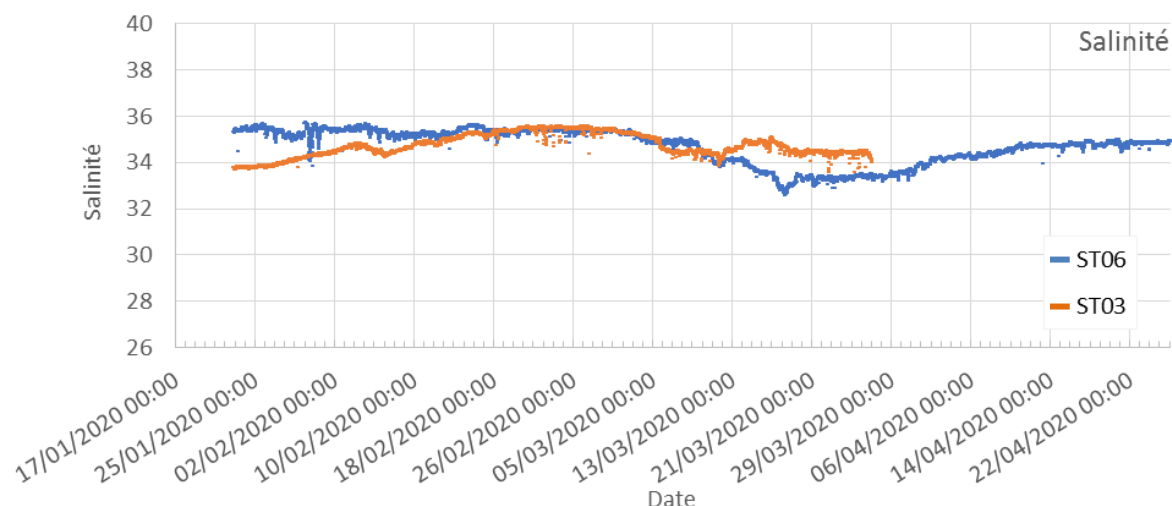


Figure 11. Salinité (‰) enregistrée à mi profondeur dans les baies de Port Boisé (orange) et Kwe (bleu)

2. Profils de salinité

Au cours de l'étude, plusieurs profils de salinité ont été réalisés avec une sonde CTD pour aider à comprendre la structure des masses d'eau et situer les résultats obtenus par les enregistreurs de salinité in-situ (Figure 12).

Les profils de salinité enregistrés périodiquement ont montré que des variations mineures de la salinité étaient détectables dans les 5 premiers mètres sous la surface. Au-delà de cette profondeur, la salinité était quasi constante. Les salinités les plus faibles dans les eaux de surface ont été observées le 24 avril dans les deux baies simultanément, la baie de Port Boisé montrant une dessalure légèrement plus élevée que la baie Kwe : 31,0 ‰ et 33,2 ‰, respectivement. Cette dessalure est à mettre en corrélation avec l'épisode pluvieux observé le 22 avril où 83 mm de précipitations cumulées avaient été enregistrées en un jour.

Note : À l'exception du 12/03 sur le site ST03, en parallèle des profils CTD, des prélèvements d'eau ont été réalisés à des fins d'analyses.

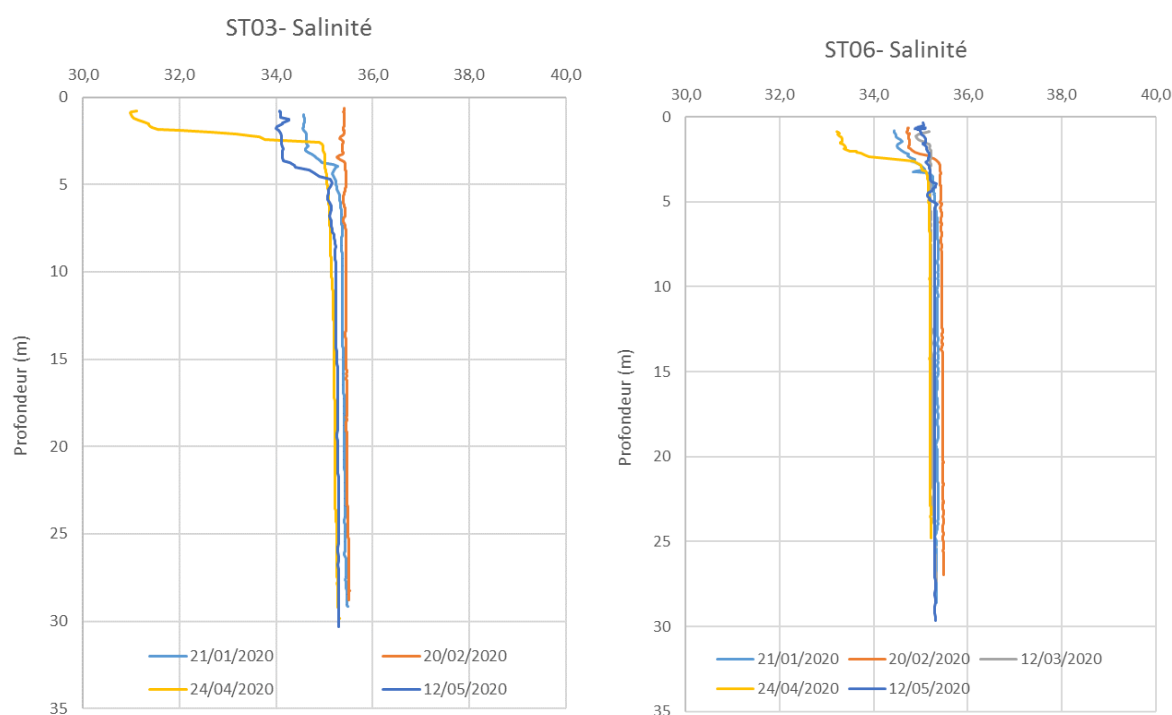


Figure 12. Profils de salinité (‰) dans les baies de Port Boisé (ST03) et Kwe (ST06) réalisés entre janvier et mai 2020.

C. CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS DISSOUS

1. Séries temporelles des concentrations en métaux dissous (Ag, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)

Rappel : Les concentrations déterminées à l'aide de dispositifs DGT™ sont des concentrations moyennes correspondant à la durée d'exposition de chaque DGT™. Le DGT™ pondère la variabilité des concentrations de métaux dissous dans le temps.

Les concentrations moyennes de métaux dissous obtenues pour chacune des deux baies sont présentées dans les Figure 13, Figure 14, Figure 15, Figure 16 et Figure 17.

a) Argent et Zinc

Les concentrations d'argent et zinc ont été constamment inférieures à la limite de quantification (0,05 µg/L et 5 µg/L, respectivement) dans les deux baies.

b) Cadmium

À l'exception de la première période (21/01/20-29/01/20 ;) dans la baie de Port Boisé (0,203 µg/L), les concentrations de Cd ont été inférieures à la limite de quantification (0,05 µg/L). Dans la baie Kwe, les concentrations de Cd sont toujours restées inférieures à la limite de quantification (0,05 µg/L).

c) Plomb

À l'exception de deux concentrations observées, dans la baie de Port Boisé pendant la deuxième période (0,105 µg/L) et dans la baie Kwe pendant la huitième période (0,084 µg/L), les concentrations de Pb ont été inférieures à la limite de quantification (0,050 µg/L).

d) Cobalt

Dans la baie Kwe, les concentrations de Co ont varié entre 0,056 µg/L et 0,671 µg/L au cours de la période de suivi. La concentration la plus faible a été observée dans la troisième période (06/02/20 - 14/02/20) et la concentration la plus élevée dans la sixième période (01/03/20 - 09/03/20). À l'exception de cette concentration très élevée, les valeurs ont montré une relative constance au cours des 96 jours.

Dans la baie de Port Boisé, les concentrations de Co ont varié entre <0,050 µg/L et 0,412 µg/L au cours des 96 jours de suivi. La concentration la plus faible a été observée dans la première période (21/01/20 - 29/01/20) et la concentration la plus élevée dans la sixième période (01/03/20 - 09/03/20), comme pour la baie Kwe. Les concentrations ont été remarquablement constantes ($0,051 \pm 0,004$ µg/L) au cours des quatre premières périodes, entre le 21/01/20 et le 22/02/20, puis ont augmenté régulièrement à partir de la septième période (25 / 03/20 au 26/04/20) avec des concentrations dépassant les 0,300 µg/L vers la fin de la période de suivi.

e) Manganèse

Les concentrations moyennes de Mn observées dans la baie Kwe ont été très variables ($0,176 \pm 0,148$ µg/L) avec une concentration maximale de 0,408 µg/L enregistrée entre le 01/03/20 et le 09/03/20 (sixième période).

Dans la baie de Port Boisé, la concentration de Mn a été constante au cours des 32 premiers jours ($0,097 \pm$

0,023 µg/L), doublant à 0,219 µg/L sur la cinquième période, puis augmentant presque d'un facteur neuf avec une concentration mesurée à 1,90 µg/L entre le 01/03/20 et le 09/03/20. La concentration a ensuite diminué au cours des 16 jours suivants avant d'augmenter brusquement à environ 2 µg/L pendant les trois périodes suivantes et doublé avec un maximum de 4,46 µg/L au cours des huit derniers jours de la période de surveillance (18/04/20 - 26/04/20).

f) Cuivre

Dans la baie de Port Boisé, à l'exception de la deuxième période d'exposition, les concentrations moyennes de cuivre ont été de $0,130 \pm 0,055$ µg /L avec trois périodes enregistrant des concentrations inférieures à la limite de quantification (huitième, dixième et onzième périodes : LQ=0,05 µg/L).

Dans la baie Kwe, six périodes (1, 2, 6, 7, 9 et 10) ont enregistré des concentrations inférieures à la limite de quantification (0,05 µg/L). Deux autres périodes enregistrent des concentrations juste au-dessus de 0,40 µg/L (troisième et quatrième périodes). Les quatre autres périodes ont enregistré des concentrations entre 0,065 µg/L et 0,097 µg/L

g) Nickel

Dans la baie Kwe les concentrations moyennes de nickel dissous ont varié de 0,340 µg/L à 1,74 µg/L, pour les 5^{ème} et 6^{ème} périodes, respectivement. A l'instar de la distribution du cobalt, cette concentration maximale a été suivie d'une importante décroissance, les concentrations de nickel ayant diminué à 1,18 µg L durant la 7^{ème} période, avant de revenir à des niveaux de concentrations d'environ 0,8 µg/L.

Les concentrations de Nickel observées dans la baie de Port Boisé ont suivi un profil similaire à celles de la baie Kwe bien que moins prononcé. Les concentrations ont été relativement stables au cours des quatre premières périodes ($0,279 \pm 0,023$ µg/L), puis ont augmenté à 0,709 µg/L et 0,785 µg/L au cours des 16 jours suivants (6^{ème} et 7^{ème} périodes, respectivement). Après cette dernière, les concentrations moyennes de nickel ont été réduites et se sont stabilisées au cours des 40 jours suivants, avec une concentration moyenne de $0,500 \pm 0,045$ µg/L.

h) Fer

En baie Kwe, à l'exception des quatrième et sixième périodes, les concentrations en fer ont été en moyenne de $0,386 \pm 0,133$ µg / L. Pour cet élément, Les valeurs ont montré deux pics de concentration, dont le plus élevé a été enregistré au cours de la sixième période, atteignant un maximum très important de 32,2 µg/L.

Dans la baie de Port Boisé, les concentrations de fer ont été initialement stables ($0,294 \pm 0,069$ µg/L) pendant des 40 premiers jours (21/01/20 -01/03/20). Une brusque augmentation, atteignant un facteur 26 (7,58 µg/L), a ensuite été mesurée, en correspondance avec la sixième période. Les concentrations sont revenues ensuite aux niveaux des valeurs antérieures ($0,275 \pm 0,169$ µg/L) avant de remonter progressivement au cours des 32 derniers jours et atteindre un peu moins de 14 µg/L. Dans la baie de Port Boisé, le schéma des concentrations observées pour le fer est très similaire à ceux de Co et Mn.

Note : Dans l'eau de mer, le fer existe sous des formes physico-chimiques très différentes (phase dissous, complexes de faible et haut poids moléculaires, colloïdal et particulaire). Cette diversité dans les niveaux de concentration observée au cours de cette étude pourrait être expliquée par la taille des pores du gel diffusif (environ 5 nm). Cette taille des pores permettant le passage de certaines fractions du fer colloïdal qui par la suite peut être fixé à la résine. De plus, étant donné que le temps de déploiement des DGT™ est plus long, ceci peut permettre aux espèces modérément labiles présentes dans l'eau de mer d'être fixées sur la résine ; la technique de préconcentration d'un échantillon d'eau ne permettant pas leur fixation en raison des temps de contact beaucoup plus courts.

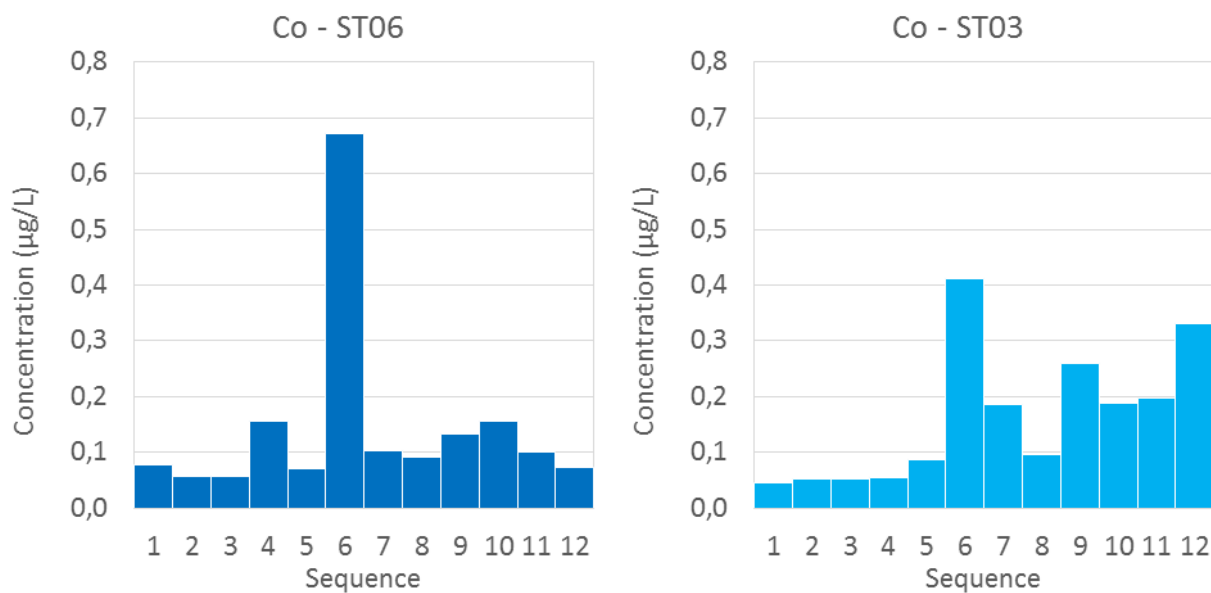


Figure 13. Concentrations de cobalt dissous déterminées par exposition d'échantillonneur passif de type DGT™ ; mesures effectuées à mi-profondeur sur les sites ST06 et ST03.

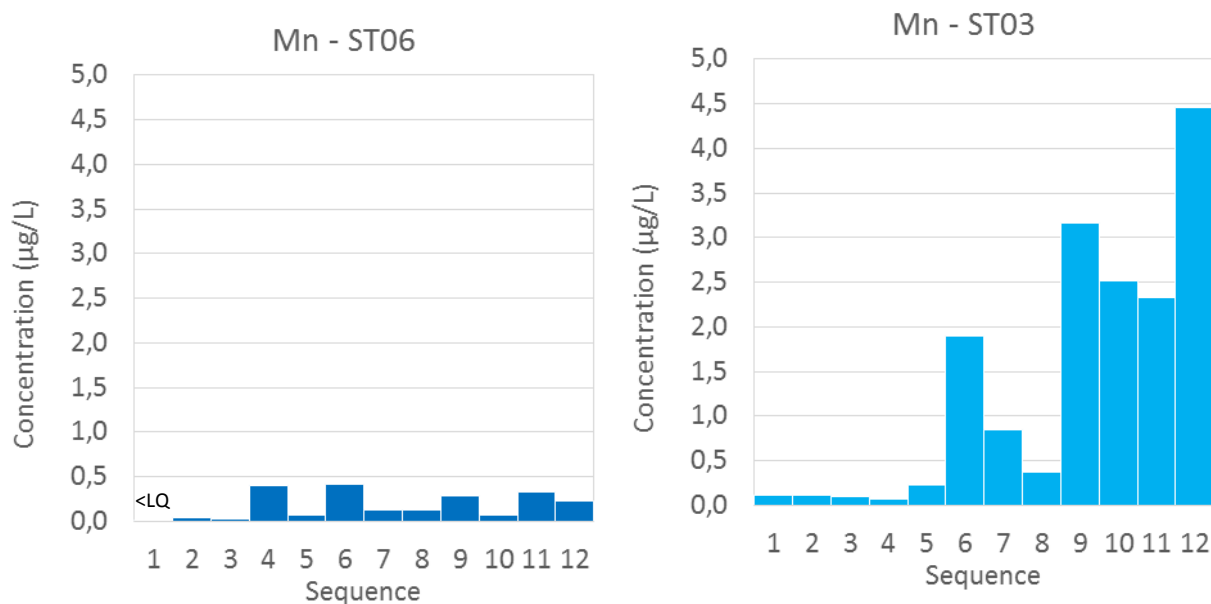


Figure 14. Concentrations de manganèse dissous déterminées par exposition d'échantillonneur passif de type DGT™ ; mesures effectuées à mi-profondeur sur les sites ST06 et ST03.

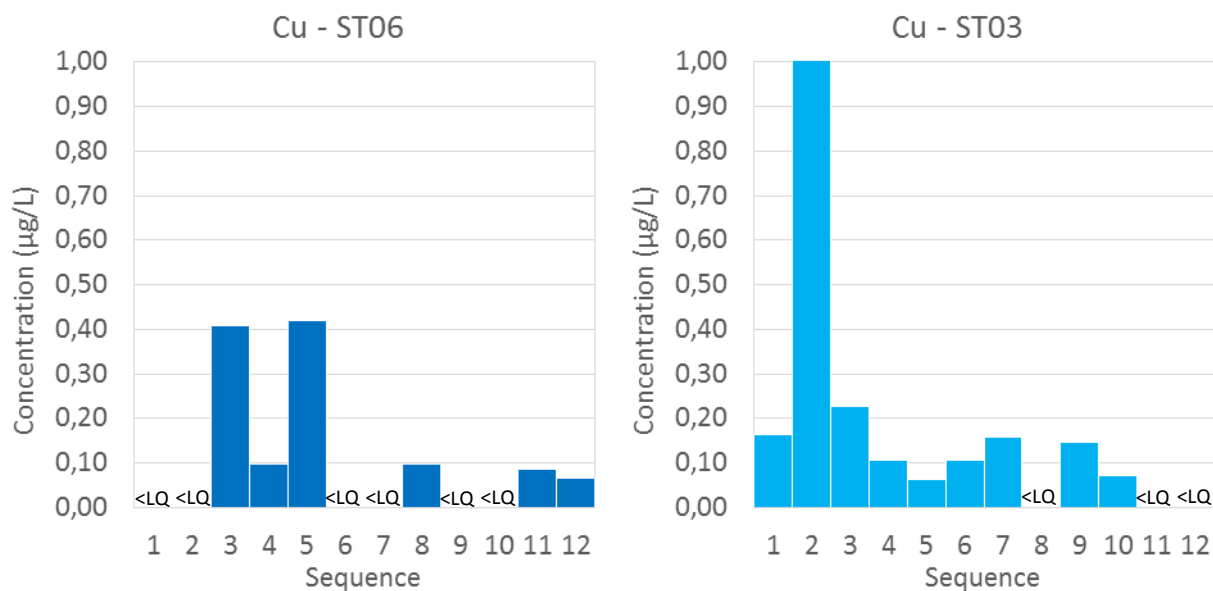


Figure 15. Concentrations de cuivre dissous déterminées par exposition d'échantillonneur passif de type DGT™ ; mesures effectuées à mi-profondeur sur les sites ST06 et ST03.

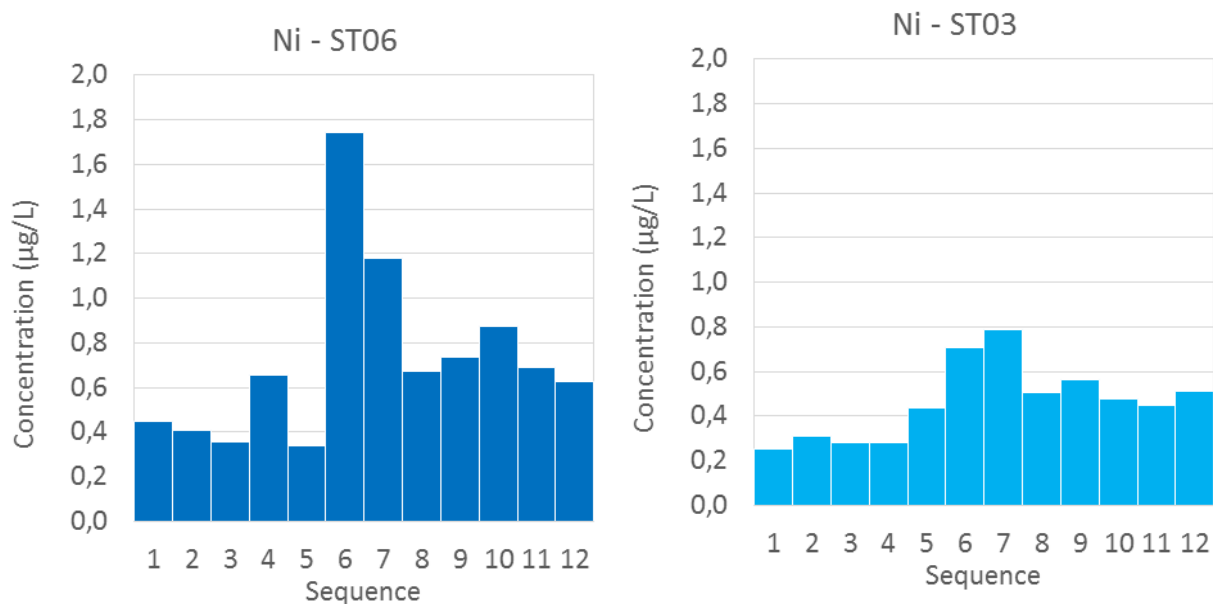


Figure 16. Concentrations de nickel dissous déterminées par exposition d'échantillonneur passif de type DGT™ ; mesures effectuées à mi-profondeur sur les sites ST06 et ST03.

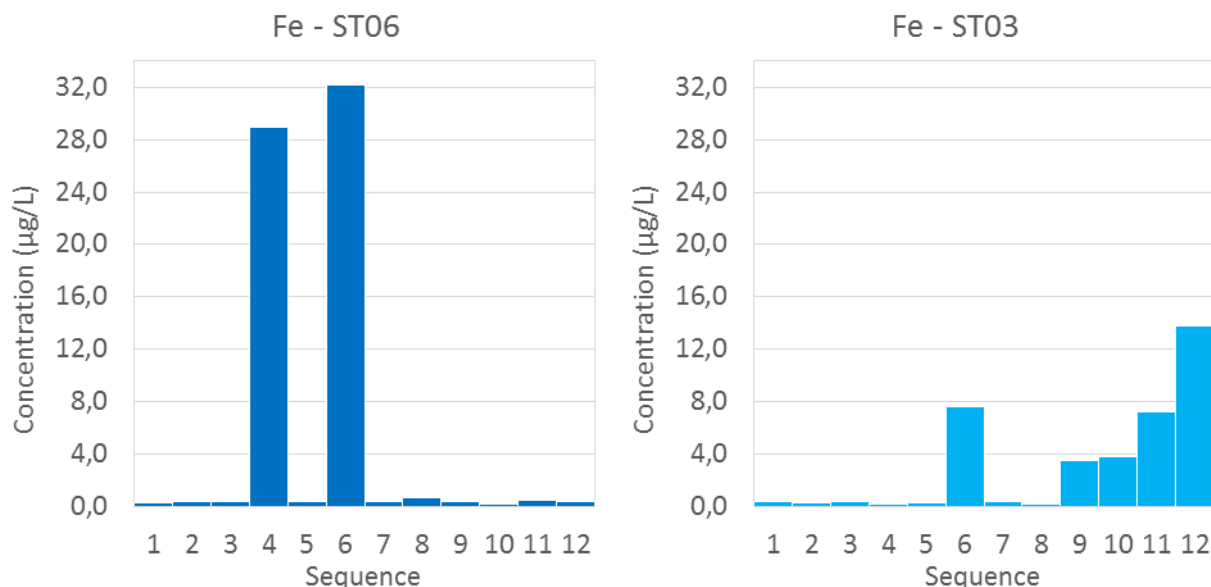


Figure 17. Concentrations de fer dissous déterminées par exposition d'échantillonneur passif de type DGT™ ; mesures effectuées à mi-profondeur sur les sites ST06 et ST03.

i) Comparaison avec les données historiques du suivi réglementaire

Bien que la méthode de détermination des concentrations en métaux dissous ne soit pas identique entre les prélèvements ponctuels (préconcentration) et les échantillonneurs passifs (DGT™), une comparaison des données historiques de la saison chaude (août 2009 à août 2019) est tout à fait pertinente en raison de la nature du complexant (Chelex 100) utilisé dans les deux cas pour la fixation des métaux ; la discussion ci-dessous est conduite pour les eaux de la **couche de mi-profondeur, correspondant à la côte d'immersion des THOË**.

La comparaison entre les données historiques collectées au cours des dix dernières années dans le cadre de la surveillance semestrielle de Vale-NC et les données obtenues par les échantillonneurs DGT est présentée dans le Tableau 5.

Le cobalt – Pendant cette campagne, les concentrations de cobalt ont varié entre la limite de quantification (LQ=0,027 µg/L) et 0,41 µg/L (ST03) ou 0,66 µg/L (ST06). Par rapport au suivi historique en saison fraîche, ces valeurs maximales sont entre 2 et 4 fois plus élevées, respectivement.

Entre août 2009 et août 2019, les concentrations sont comprises entre la limite de quantification (LQ=0,027 µg/L) et 0,066 µg/L dans les deux baies. Les concentrations obtenues au cours de cette étude sont similaires, la plupart du temps avec cependant des niveaux significativement plus élevés mesurés dans les deux baies, mais occasionnellement, d'environ un facteur 10 fois.

Le manganèse - Les concentrations moyennes ($0,227 \pm 0,135$ µg/L) et maximale (0,408 µg/L), déterminées au cours de cette étude étaient tout à fait similaires aux concentrations historiques mesurées dans la baie Kwe ($0,178 \pm 0,097$ µg/L et 0,397 µg/L, respectivement).

Pour la baie de port Boisé, les concentrations moyennes de manganèse dissous ($0,121 \pm 0,058$ µg/L) étaient équivalentes aux moyennes historiques ($0,162 \pm 0,087$ µg/L). Cependant, le niveau de la concentration maximale mesurée au cours de cette étude (4,463 µg/L), n'a jamais été enregistrée au cours des 10 dernières années de suivi (0,313 µg/L en 2015).

Le cuivre - Les concentrations de cuivre mesurées au cours de cette étude dans la baie Kwe (0,030 µg/L à 0,130 µg/L) étaient pour la plupart similaires à celles observées au cours des 10 dernières années : inférieure à la limite de quantification (LQ= 0,050 µg/L) à 0,097 µg/L. Toutefois, en 2020, deux valeurs plus élevées que la moyenne (> 0,4 µg/L) ont été enregistrées.

Pour Port Boisé, les concentrations de cuivre déterminées par les DGT™ étaient, soit équivalentes aux valeurs historiques (0,028 µg/L à 0,077 µg/L), soit légèrement plus élevées (<0,050 µg/L à 0,227 µg/L). Durant cette campagne une valeur inhabituellement haute a été observée (1,772 µg/L).

Le nickel - Les concentrations de nickel dissous ont atteint un maximum de 1,74 µg/L dans la baie Kwe. Par comparaison, les concentrations obtenues dans les suivis réglementaires ont enregistré un maximum de 0,310 µg/L de nickel dissous. Ce niveau de concentration est similaire aux valeurs observées au début de cette étude (0,340 µg/L).

Dans la baie de Port Boisé, les concentrations moyennes historiques de nickel dissous ($0,202 \pm 0,087$ µg/L) sont similaires ($0,279 \pm 0,023$ µg/L) avec les concentrations déterminées au début de cette étude avec les DGT™ ; la concentration maximale déterminée dans les dix dernières années (0,398 µg/L) était similaire à celles observées au cours des 24 dernier jours avec une concentration moyenne de $0,476 \pm 0,032$ µg/L.

Le fer - Au cours de l'étude, les concentrations de fer étaient généralement plus élevées (10 fois ; Tableau 5) que celles observées au cours des 10 dernières années. Les concentrations historiques ont atteint un maximum de 0,180 µg/L et 0,104 µg/L dans les baies de Port Boisé et Kwe, respectivement (voir « Note » sur le fer).

Le plomb – Le plomb a pu être quantifié à deux reprises, avec les concentrations de 0,11 µg/L et 0,08 µg/L dans les baies de Port Boisé et Kwe, respectivement. Comparativement aux données historiques les concentrations restent du même ordre que celles déterminées dans les deux baies.

Tableau 5. Récapitulatif des concentrations minimales et maximales historiques obtenues par échantillonnage ponctuel dans le cadre de la surveillance semestrielle de Vale NC entre août 2009 et août 2019.

ST03		Cd (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
Données historique	Min	<0,10	<0,027	<0,03	<0,07	0,03	0,06	<0,10	<1,0
	Max	<0,10	0,066	0,08	0,10	0,32	0,40	0,13	<1,0
DGT	Min	<0,05	0,040	0,06	0,16	0,06	0,25	<0,05	<5,0
	Max	<0,05	0,410	1,77	13,80*	4,46	0,79	0,11	<5,0
ST06		Cd (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
Données historique	Min	<0,10	<0,027	<0,03	0,06	0,03	0,02	<0,10	<1,0
	Max	<0,10	0,07	0,13	0,18	0,40	0,31	0,21	<1,0
DGT	Min	<0,05	0,056	0,07	0,17	<0,05	0,34	<0,05	<5,0
	Max	<0,05	0,671	0,42	32,2*	0,41	1,74	0,08	<5,0

(*) : Voir « Note » pour le fer

2. Résultats des DGT en triplicat

Les concentrations, déterminées à partir des triplicats de DGTs déployés simultanément dans les deux baies, sont présentées dans la Figure 18.

Les concentrations d'Ag, Cd, Cu, Pb et Zn ont été inférieures aux limites de quantification respectives¹. Pour les

¹ LQ = 0,05µg/L pour Ag, Cd, Co, Mn, Ni, Pb. LQ = 0,1µg/L pour Fe et LQ = 5µg/L pour Zn

éléments Co, Mn, Ni et Fe, les concentrations en triplicat sont en bon accord, à l'exception du fer qui a montré, uniquement dans la baie Kwe, (St06) une variation importante (40%) entre les différentes DGTs. Pour la station ST03, une des valeurs de Fe étaient inférieures à la limite de quantification (LQ=0,1 µg/L) ; ce niveau de variations est à rapprocher des commentaires faits sur le comportement de cet élément dans le milieu (voir « Note » pour le fer).

Rappel : L'exposition des plaquettes de triplicats de DGT a excédé les 8 jours initialement programmés, durée conseillée dans l'étude menée par Moreton et al (2013) pour le lagon de Nouvelle Calédonie. En effet, en raison de mauvaises conditions météorologiques, la campagne de relevage a été décalée de 11 jours. Toutefois, si les résultats semblent pouvoir être altérés au delà de 15 jours, notamment par le développement de potentiels biofilms, les risques de saturation des résines, même jusqu'à 28 jours d'exposition, n'a pas été mise en évidence (Moreton et al, 2013). Ainsi dans notre étude, les paquets de triplicats ont été immergées dans les deux baies simultanément et ont été affectées à des conditions de milieu identiques, fournissant ainsi des résultats relatifs comparables. Le cas des concentrations de Mn illustre ces propos puisqu'elles étaient de 0,157 µg/L et 0,219 µg/L avec seulement un écart type relatif de 4% et 3% pour le Port boisé et la Baie Kwe, respectivement.

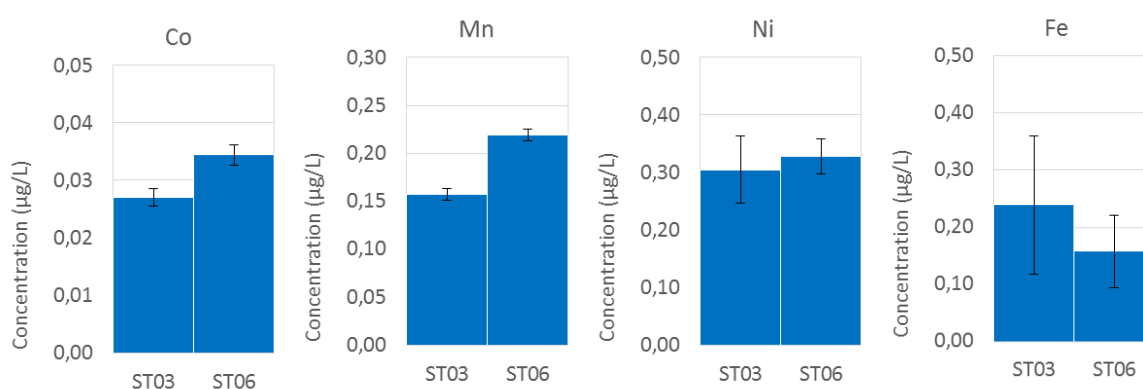


Figure 18. Concentrations de Co, Mn, Ni et Fe déterminées par DGT en triplicat dans les deux baies.

Ce qu'il faut retenir

Pendant les 96 jours où les DGT™ ont été exposés, les concentrations de métaux dissous (Co, Cu, Fe, Mn et Ni) ont varié de manière significative. En particulier, les concentrations ont été généralement plus faibles au cours des 40 premiers jours, alors qu'au cours de la sixième période d'exposition, des pics de concentrations très élevées ont été observées à la suite de l'épisode de fortes précipitations atmosphériques du 29 février.

Globalement, les concentrations en nickel les plus élevées ont été mesurées durant les 40 derniers jours de l'étude, particulièrement en baie Kwe. En ce qui concerne le cobalt, le manganèse et le fer, elles ont aussi été supérieures à celles observées au début de l'étude, mais elles ont été plus importantes à Port Boisé qu'en baie Kwé.

Cette étude a également montré que le suivi continu des concentrations permet de mettre en évidence des niveaux de concentrations élevés qui sont la conséquence de la lixiviation des sols due aux aléas climatiques. Ces données ne sont accessibles que grâce à des installations automatiques ne nécessitant pas l'intervention de personnel in-situ ; les intempéries limitant systématiquement l'accessibilité aux sites de prélèvement.

3. Cr^{6+} , Cr_{total} , As, Ca

Les concentrations de Ca, Cr^{6+} , Cr_{total} et As ont été déterminées à partir d'échantillons d'eau ponctuels et les résultats sont présentés dans les Figure 19, Figure 20 et Figure 21.

a) Calcium

Les concentrations moyennes de Ca dans les échantillons d'eau prélevés dans Port Boisé et Baie Kwe étaient très similaires à 407 ± 17 mg/L et 403 ± 15 mg/L, respectivement. Une légère variation temporelle a été observée, ainsi les concentrations globales de Ca étaient légèrement inférieures en avril, ce qui est probablement attribuable à l'événement pluvieux enregistré où plus de 80 mm de pluie se sont cumulé. Cette hypothèse est étayée par les profils verticaux de salinité qui montrent la présence d'une légère dessalure pendant l'échantillonnage d'avril ; en effet, l'influence de l'eau douce a légèrement dilué l'eau de mer, mais globalement les concentrations se situent dans la fourchette observée sur une période de 10 ans (août 2009 et août 2019).

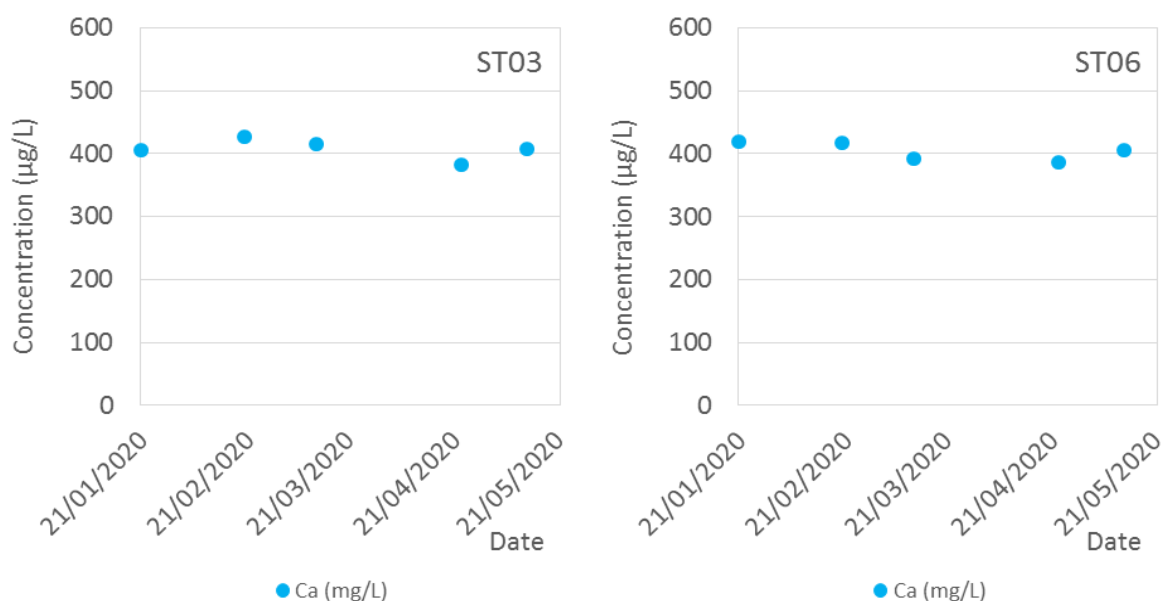


Figure 19. Concentrations de calcium déterminées dans l'eau de mer prélevée à mi-profondeur sur les sites ST03 et ST06.

b) Chrome hexavalent et chrome total

Les concentrations de Cr^{6+} oscillent entre $0,114$ µg/L (23/04/20) et $0,226$ µg/L (12/03/20) à Port Boisé et entre $0,107$ µg/L (20/02/20) et $0,166$ µg/L (12/03/20) pour la baie Kwe. Le maximum et le minimum se situent dans la gamme des concentrations obtenues au cours des dix dernières années de surveillance réglementaires ($0,149 \pm 0,03$ µg/L et $0,161 \pm 0,125$ µg/L pour la baie de Port Boisé et de la Kwe, respectivement).

La très grande majorité du Cr dissous déterminé est sous forme hexavalente avec en moyenne $81 \pm 9\%$ et $75 \pm 11\%$ dans la baie de Port boisé et la baie Kwe, respectivement ; la prédominance de cette forme est en adéquation avec les conditions régnantes dans les baies (pH $\sim 8,2$ et Eh typiquement supérieur à $0,6$ V). La quantité d'ions Cr^{3+} dissous est relativement faible, car ceux-ci forment des complexes stables.

Les concentrations de Cr_{total} déterminées dans la baie de Port Boisé et la baie Kwe étaient quasi identiques avec des moyennes de $0,173 \pm 0,048$ µg/L et $0,171 \pm 0,012$ µg/L, respectivement. Tout comme le Cr^{6+} , les concentrations Cr_{total} obtenues sont en accord avec les données historiques des 10 dernières années (Aout

2009 à Aout 2019) où les valeurs moyennes sont de $0,149 \pm 0,030 \mu\text{g/L}$ et $0,161 \pm 0,125 \mu\text{g/L}$, pour la baie de Port Boisé et la baie Kwe, respectivement.

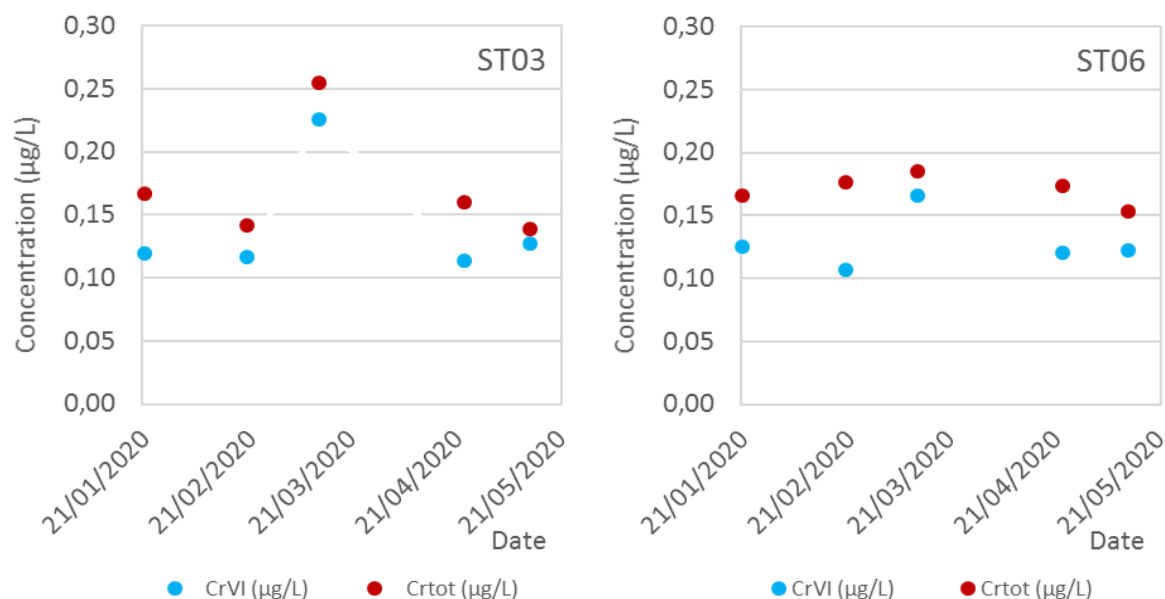


Figure 20. Les concentrations de chrome (Cr^{6+} et Cr_{total}) déterminées dans l'eau de mer prélevée à mi-profondeur sur les sites ST03 et ST06.

c) Arsenic

Les concentrations d'As déterminées dans la baie de Port Boisé et la baie Kwe étaient très similaires : $1,95 \pm 0,14 \mu\text{g/L}$ et $1,89 \pm 0,07 \mu\text{g/L}$, respectivement. De façon similaire au Ca, les concentrations d'As ont été relativement stables au cours de la période, exception faite d'une sensible augmentation de concentration à $2,13 \mu\text{g/L}$ observée le 12 mars dans la baie de Port Boisé.

Comparativement aux données historiques, les concentrations étaient du même ordre de grandeur avec une moyenne de $1,71 \pm 0,41 \mu\text{g/L}$ et $1,82 \pm 0,68 \mu\text{g/L}$ pour la baie de Port Boisé et la baie Kwe, respectivement.

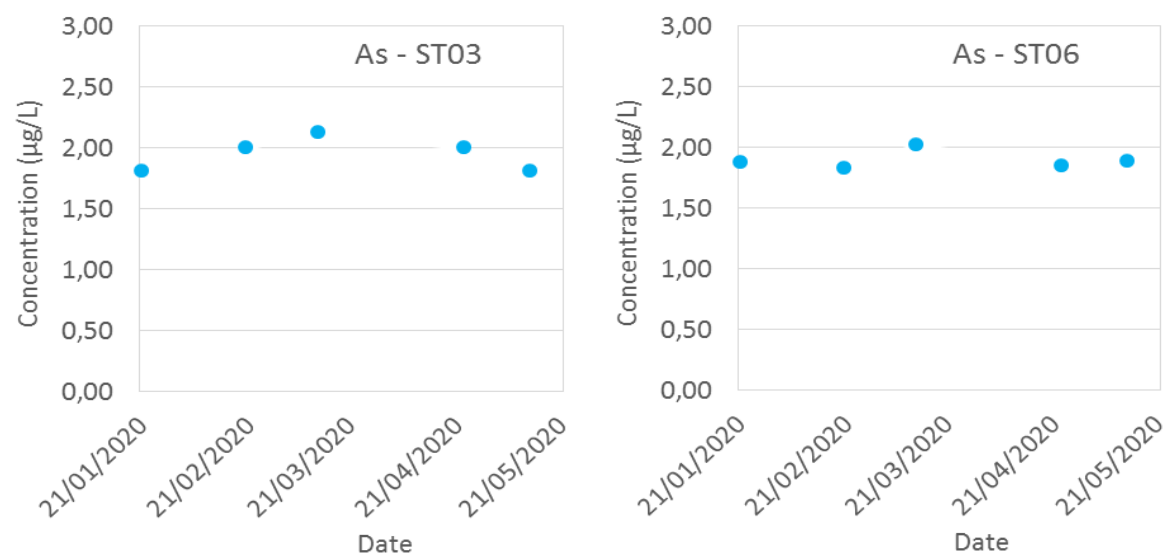


Figure 21. Les concentrations d'As déterminées dans l'eau de mer prélevée à mi-profondeur sur les sites ST03 et ST06.

Note : Dans cette étude, les concentrations mesurées pour ces éléments (Cr^{6+} , Cr_{total} , As et Ca) sont du même de grandeur que les valeurs historiques. Toutefois, il est nécessaire de souligner que pendant l'épisode pluvieux aucun prélèvement n'a pu être réalisé manuellement. De ce fait, il n'est pas exclu que des valeurs supérieures pour Cr^{6+} , Cr_{total} , As auraient pu être mesurées et inversement pour Ca.

4. Comparaison avec les seuils de toxicité

Rappel : CE_{10} (Concentration d'effet médiane générant une réponse d'effet chez 10% de la population testée). Les CE_{10} peuvent être considérées comme des concentrations ne provoquant aucun effet toxique significatif (NOEC).

Dans le cadre du « Programme Prédictif » conduit pour Vale-NC (Goro-Nickel 2006-2009), les tests écotoxicologiques visant à évaluer l'impact des rejets industriels de l'usine (Breau et al., 2009) ont permis d'établir un certain nombre de « concentrations seuils » pour les métaux individuels. Un résumé des CE_{10} établies pour trois espèces (le bécasseau *T. maxima*, le pétoncle *M. gloriosa* et le pétoncle *B. vexillum*) est présenté dans le Tableau 6 et comparé aux concentrations maximales en métaux dissous obtenues à partir de notre étude.

Il apparaît que, pour tous les métaux testés, aucune des concentrations observées ne dépassait la CE_{10} les plus basses établies pour les trois espèces étudiées.

Tableau 6. Récapitulatif des concentrations maximales obtenues dans le cadre de ce suivi comparativement au seuil de toxicité (CE_{10}) pour une espèce de bécasseau et deux espèces de pétoncle (Breau et al., 2009).

Métal ($\mu g/L$)	CE_{10} Bécasseau <i>T. maxima</i>	CE_{10} Pétoncle <i>M. gloriosa</i>	CE_{10} Pétoncle <i>B. vexillum</i>	Baie Kwe ($\mu g/L$)	Baie Port Boisé ($\mu g/L$)
Cu	12,5 - 25	12,1	4,3	0,42	1,77
Co	187	633	86	0,671	0,41
Cr^{VI}	1555	2376	1015	0,17	0,23
Mn	1084	7749	812	0,41	4,46
Ni	-	12	<25	1,74	0,79
Zn	174	34	27	<5	<5

Ce qu'il faut retenir

Les concentrations de calcium, de chrome hexavalent, de chrome total et d'arsenic restent relativement stables au cours de la période d'étude pour les eaux de mi-profondeur, quelle que soit la baie.

Les résultats obtenus se situent dans la gamme des concentrations observées au cours des 10 dernières années de suivi réglementaire dans les deux baies.

L'absence de variation temporelle pour ces paramètres s'explique par la méthodologie (prélèvements manuels ponctuels) qui n'a pas permis l'échantillonnage pendant l'épisode pluvieux.

D. GRANULOMETRIE DES SÉDIMENTS

Rappel : Le pourcentage de sédiments inférieurs à 40 μm a été déterminé par tamisage. Cette fraction fine est considérée comme la fraction la plus réactive des sédiments en raison des surfaces spécifiques élevées des particules de petite taille qui montrent une propension à interagir avec les composés chimiques dissous (réactions de précipitation/dissolution).

1. Fraction fine < 40 μm

Sur les trois échantillons de sédiment collectés à Port Boisé, la fraction pélitique ($\phi < 40 \mu\text{m}$) représente $48\% \pm 8\%$ de la masse. Comparativement, les sédiments prélevés dans la baie Kwe sont plus grossiers puisqu'ils sont composés de seulement $26\% \pm 10\%$ de pélites (Figure 22).

Le sédiment le plus fin dans la baie Kwe a été déterminé sur le site 004. Cette composition est en conformité avec les résultats d'études précédentes (Kumar-Roiné, *et al.* 2018) qui ont montré que la fraction grossière représente la plus grande proportion à la station ST06 (62%) par rapport à la station ST03 (45%).

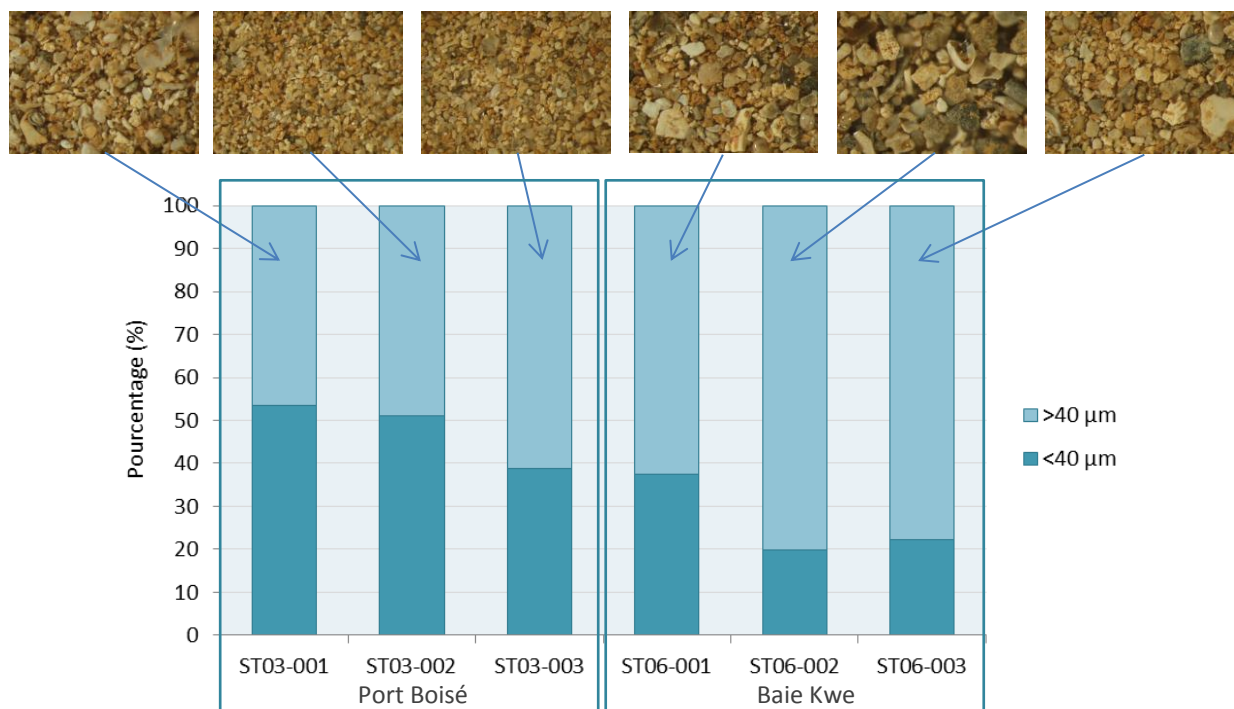


Figure 22. Pourcentage de fraction fine de diamètre inférieur et supérieur à 40 μm pour les stations ST03 (Port Boisé) et ST06 (baie Kwe). Observations microscopiques de la fraction supérieure à 40 μm (grossissement x6.4).

2. Composition granulométrique par laser

Un examen plus détaillé des sédiments a été effectué par granulométrie laser. La Figure 23 représente la distribution granulométrique par classe de taille pour les sédiments collectés dans les deux baies.

D'une manière générale, la granulométrie laser confirme la nature plus fine des sédiments de Port Boisé par rapport à ceux de la baie Kwe. Par ailleurs, les résultats montrent que, pour Port Boisé, la fraction pélitique est très majoritairement composée de particules dont le diamètre est inférieur à 20 μm . La présence de cette population granulométrique prouve que la baie de Port Boisé est, d'un point de vue hydrodynamique, moins active que la baie Kwe.

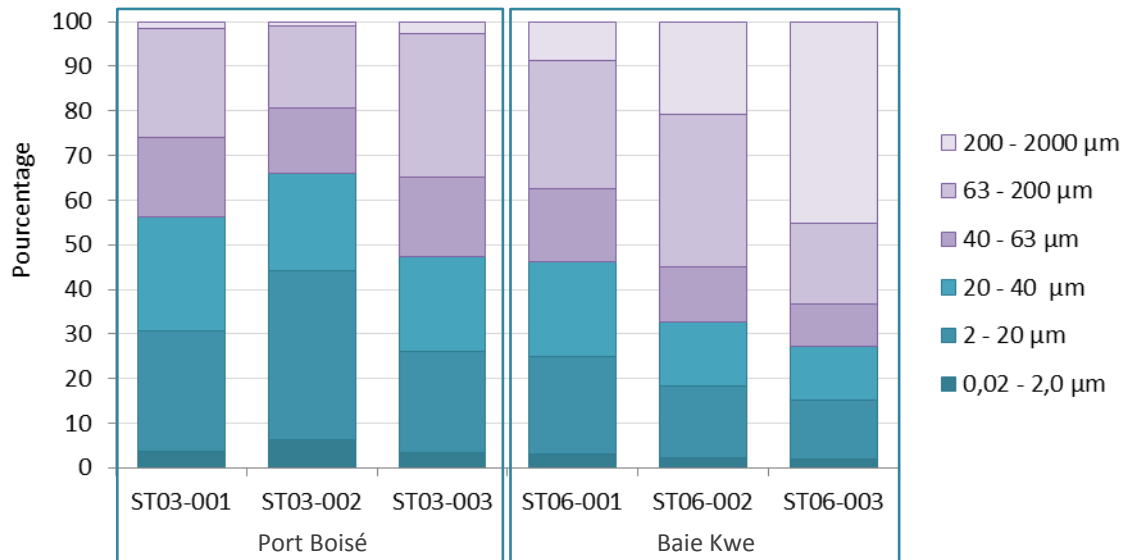


Figure 23. . Composition granulométrique par classe de taille déterminée par granulométrie laser, pour les sédiments prélevés dans les stations ST03 (Port Boisé) et ST06 (baie Kwe).

Par ailleurs, les résultats de la baie de Port Boisé montrent que les sédiments localisés à l'ouest (ST03-002) sont de nature plus fine (Figure 23 et Figure 24). Cette observation est en accord avec les données de cartographie des substrats (habitats) obtenue par prospection acoustique AGDS (Gautier, 2008). En effet, la cartographie souligne que l'échantillonnage a été effectué en bordure d'une zone de transition entre les vases sableuses et les vases fluides (Figure 24 ; Gautier, 2008).

Note : L'analyse granulométrique de la fraction fine ($<40\mu\text{m}$) des sédiments collectés en 2018 aux stations ST03 (Port Boisé) et ST06 (baie Kwe) a montré que la majorité des particules mesuraient entre 2 et $20\mu\text{m}$ (Kumar - Roiné, et al.2018), ce qui concorde avec les résultats ici présentés.

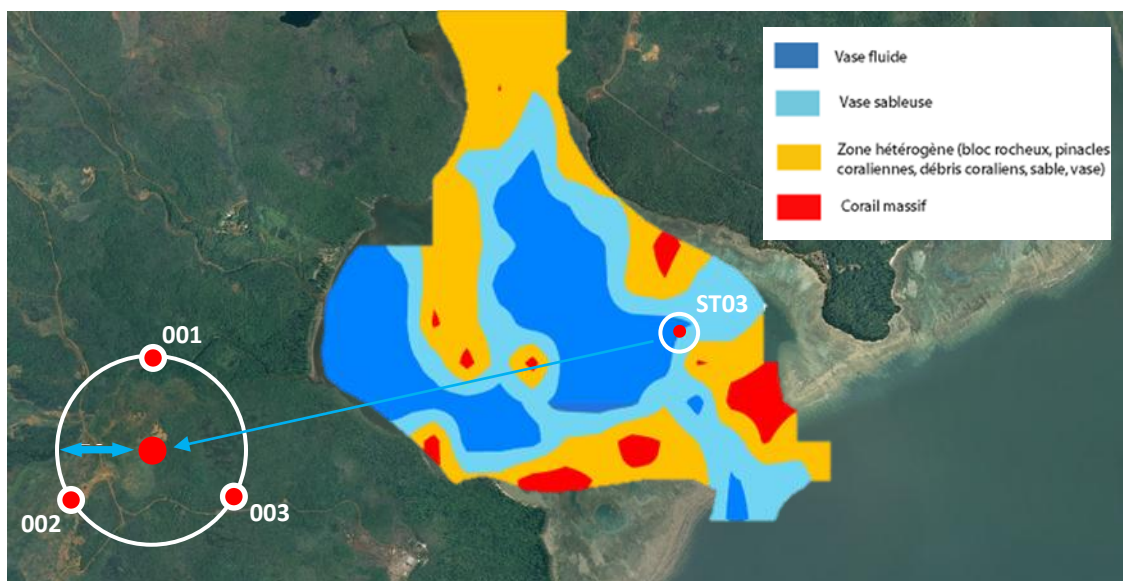


Figure 24. Carte de Port Boisé interpolée du type de fonds obtenu par une méthode de discrimination acoustique (AGDS) (Gautier, 2008)

E. COMPOSITION GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS

Rappel : La biodisponibilité et la toxicité des contaminants sont influencées par la taille des grains de sédiments. La capacité des sédiments à fixer des contaminants diminue avec l'augmentation de la taille des grains, ce qui se traduit par un potentiel de concentration des contaminants plus élevé dans les fractions de sédiments les plus fines. Pour cette raison l'analyse de la composition géochimique a été réalisée sur la fraction inférieure à 40µm.

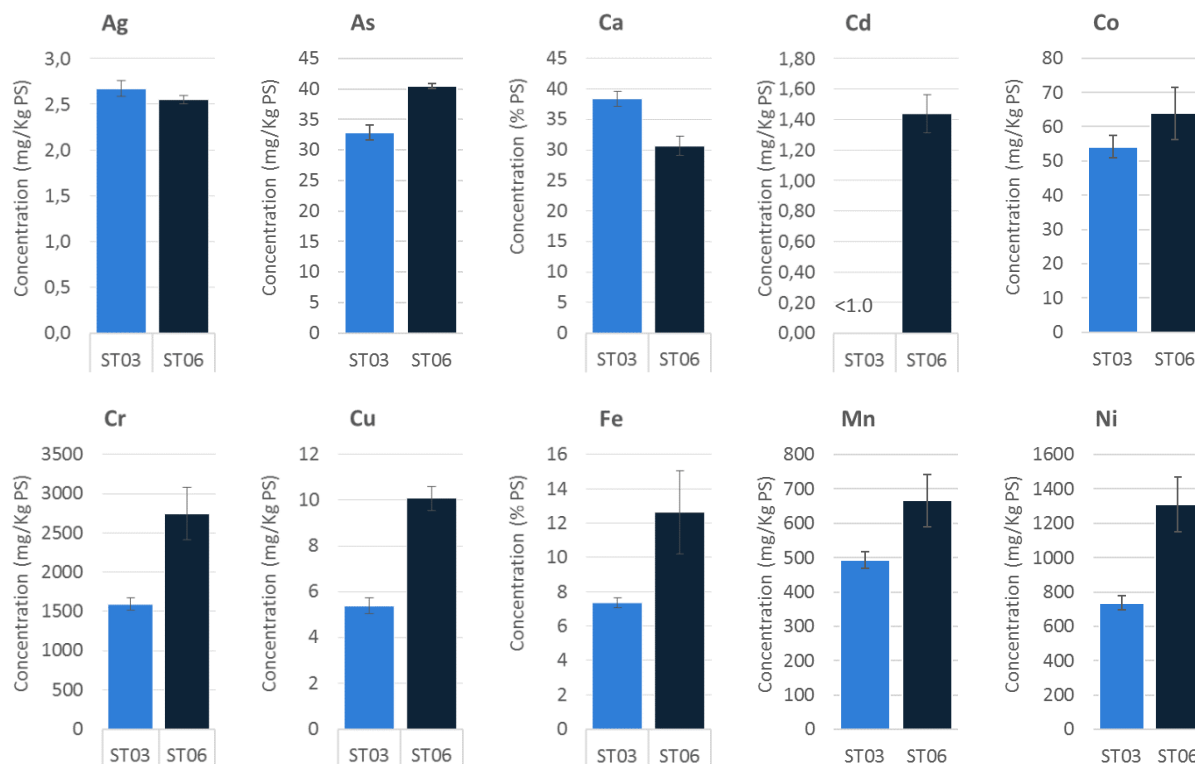
1. Concentrations en Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S et Zn

Les concentrations des éléments Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S et Zn déterminées dans les sédiments des deux baies sont présentés dans la Figure 25.

Pour la majorité des éléments, les concentrations dans les triplicats ont été assez homogènes (variation <20%) pour les deux baies, à l'exception de Zn, Hg et MeHg qui ont varié plus fortement : respectivement ; 22%, 41%, pour Zn et Hg dans la baie de Port Boisé et 34%, 27% et 30% pour Zn, Hg et MeHg dans la baie Kwe.

À l'exception de l'argent, le calcium et le mercure, les concentrations dans les sédiments ont été systématiquement plus élevées dans la baie Kwe que dans Port Boisé. Elles ont été plus importantes de 18% à 187% pour Co et Cu, respectivement et pour Cr, Fe, Ni et Zn la différence a atteint 64% à 78%. Ces observations dénotent que l'influence terrigène est plus forte dans la Baie Kwe qu'à Port Boisé, ce que confortent les concentrations en Ca plus fortes mesurées dans les sédiments fins de cette dernière.

Les concentrations de S sont environ 30% plus élevées dans les sédiments de la baie Kwe que dans ceux de la baie de Port Boisé, avec respectivement $0,36 \pm 0,1\%$ et $0,27 \pm 0,02\%$. Si ces résultats sont comparables aux concentrations de S déterminées dans des échantillons de MES du canal de la Havannah ($0,30 \pm 0,04\%$) et de la baie de Prony (St15 ; $0,31 \pm 0,13\%$), il conviendra cependant de suivre les apports en S par la Kwé en raison des apports en sulfates liés à l'aire de stockage des résidus (Parc KO2).



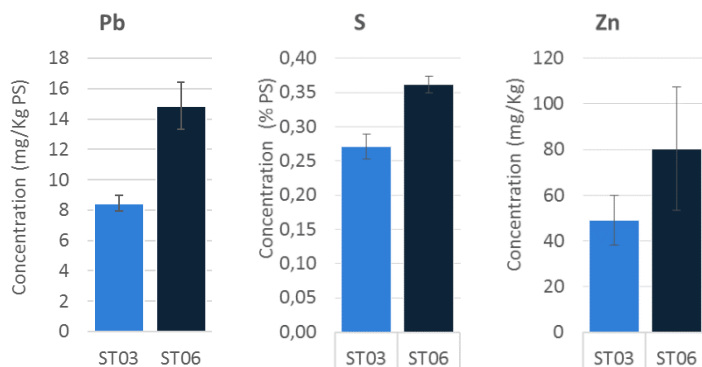


Figure 25. Concentrations en argent, arsenic, calcium, cadmium, cobalt, chrome, fer, manganèse, nickel, plomb, soufre et zinc déterminées dans la fraction fine des sédiments de la baie de Port Boisé et de la baie Kwe.

2. Concentrations en Hg et MeHg et teneurs en Carbone organique

Les concentrations en Hg et MeHg déterminées dans les sédiments des deux baies sont présentées dans la Figure 26.

Les concentrations de mercure total étaient similaires, avec une concentration moyenne de $17,7 \pm 7,2 \mu\text{g/kg}$ et $15,0 \pm 4,0 \mu\text{g/kg}$ pour la baie de Port Boisé et la baie Kwe, respectivement. Sur ces concentrations, seule une faible fraction est sous forme de méthyl-mercure (considéré comme la forme de mercure la plus toxique).

Les concentrations de méthyl-mercure sont respectivement de $0,26 \pm 0,03 \mu\text{g/kg}$ et $0,34 \pm 0,10 \mu\text{g/kg}$ pour la baie de Port Boisé et la baie Kwe ; ces concentrations représentant seulement 1,5% et 2,3% du mercure total.

Aucune donnée historique n'existe pour les concentrations de mercure dans les sédiments des deux baies. Cependant, en comparant les valeurs guide australiennes de la qualité des sédiments aux concentrations dans les deux baies, il s'avère que les valeurs mesurées restent environ 10 fois inférieures aux valeurs seuils ($150 \mu\text{g/kg}$) (ANZECC & ARMCANZ 2000).

Les concentrations carbones déterminées dans les sédiments des deux baies sont présentées dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Globalement, les concentrations de COT étaient légèrement plus faibles à Port Boisé qu'en Baie Kwe, les deux sites présentant une faible variabilité intra-site avec des concentrations variant de 0,65 à 0,87% à Port Boisé et entre 1,00 et 1,05% à Baie Kwe.

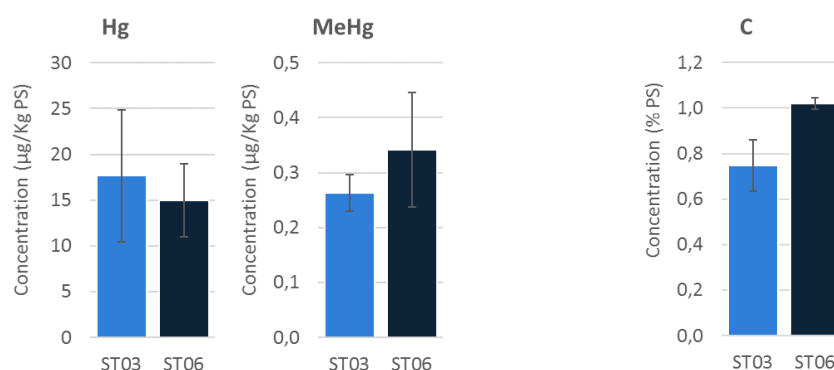


Figure 26. Concentrations de mercure, de méthyl-mercure (gauche) et concentrations de carbone organique déterminées dans la fraction fine des sédiments de la baie de Port Boisé et de la baie Kwe.

3. Comparaison avec les données historiques du suivi réglementaire

a) Baie Kwe

Les concentrations de métaux dans les sédiments prélevés au cours de cette étude et les données historiques obtenues, à la fois dans les particules (pièges à sédiments) et les sédiments de surface prélevés dans le cadre de la surveillance triennale de Vale-NC, sont présentées dans le Tableau 7.

Dans le cadre du programme de surveillance, Ag, As, Cd et Pb n'ont pas été étudiés et il n'est donc pas possible de confronter ces résultats avec des données historiques. Dans le cas du zinc, des données historiques existent, mais la méthode utilisée pour déterminer les concentrations antérieures est moins sensible, ce qui fait que toutes les valeurs historiques sont inférieures à la limite de quantification (<250 mg/kg).

Les concentrations de Ca, Co, Cr, Fe, Mn, Ni et S sont similaires aux concentrations déterminées dans les sédiments de la baie Kwe depuis le début du suivi réglementaire. Les concentrations de cobalt déterminées au cours de cette étude (64 ± 8 mg/kg) sont proches de la valeur la plus basse antérieurement observée (67 mg/kg). Inversement, les concentrations de Ca sont légèrement plus élevées dans cette étude avec une concentration moyenne de $30,6 \pm 1,6\%$ contre $28,4 \pm 3,1\%$ historiquement.

La comparaison avec les particules collectées dans les pièges à sédiments positionnés dans la baie Kwe montre que les signatures géochimiques sont assez proches, bien que les concentrations soient plus élevées que dans les sédiments pour Co, Cr, Mn et Ni.

Tableau 7. Comparaison des concentrations de métaux déterminées dans les sédiments de la baie Kwe avec celles obtenues lors du suivi triennal des sédiments de surface et des concentrations de métaux déterminées dans les particules collectées dans les pièges à sédiments positionnés dans la baie Kwe dans le cadre du suivi semestriel réglementaire. Les valeurs entre parenthèses sont les concentrations minimales et maximales.

Suivi	Ca (%)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Fe (%)	Mn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	S (mg/Kg)
ST06 (moyenne de trois prélèvements)	$30,6 \pm 1,6$ (29,3 – 32,4)	64 ± 8 (58 – 73)	2747 ± 333 (2545 – 3131)	$12,6 \pm 2,4$ (11,2 – 15,4)	666 ± 76 (621 – 754)	1311 ± 158 (1214 – 1493)	3619 ± 122 (3524 – 3757)
ST06 sédiment (suivi triennal)*	$23,3 \pm 1,6$ (22,2 – 25,2)	88 ± 18 (67 – 115)	3326 ± 1333 (1891 – 5510)	$9,6 \pm 3,0$ (6,0 – 13,8)	643 ± 152 (398 – 817)	1450 ± 561 (1043 – 2371)	
ST06 Flux particulaire (suivi semestriel)**	$24,6 \pm 3,1$ (3,7 – 32,8)	94 ± 23 (26 – 385)	3376 ± 773 (931 – 14035)	$10,8 \pm 2,3$ (2,1 – 32,6)	803 ± 194 (275 – 3395)	1745 ± 403 (374 – 6971)	3728 ± 874 (2368 – 5807)

*Suivi des sédiments surface 2006, 2009, 2012, 2015 et 2018.

**Suivi semestriel de 2011 à 2019.

b) Baie de Port Boisé

Les concentrations de métaux dans les sédiments prélevés au cours de cette étude et les données historiques obtenues dans les sédiments de surface dans le cadre de la surveillance triennale de Vale NC, sont présentées dans les Tableau 8.

Semblable à la baie Kwe, les trois échantillons de sédiments collectés autour du point ST03 ont des teneurs en cobalt, chrome, fer, manganèse et nickel similaires à celles observées dans les échantillons du suivi réglementaire de la baie. Toutefois, la concentration en calcium est légèrement supérieure à la moyenne des valeurs historiques avec des concentrations de $38,3 \pm 1,2\%$ contre une moyenne de $26,2 \pm 2,1\%$ pour les résultats du suivi triennal.

Tableau 8. Comparaison des concentrations en métaux déterminées dans les sédiments de la baie de Port Boisé avec celles obtenues lors du suivi triennal des sédiments de surface de cette même baie. Les valeurs entre parenthèses sont les concentrations minimale et maximale.

Suivi	Ca (%)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Fe (%)	Mn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)
ST03 (moyenne de trois prélèvements)	38,3 ± 1, 2 (37,0 – 39,2)	54 ± 3 (51 – 58)	1591 ± 81 (1531 – 1683)	7,3 ± 2,8 (7,0 – 7,6)	493 ± 24 (466 – 512)	736 ± 42 (696 – 779)
ST03 sédiment (suivi triennale)*	26,2 ± 2, 1 (24,3 – 28,4)	62 ± 26 (26 – 88)	1761 ± 1058 (748 – 3012)	5,1 ± 2,8 (2,7 – 8,8)	643 ± 152 (398 – 817)	881 ± 593 (305 – 1654)

*Suivi des sédiments surface 2006, 2009, 2012, 2015 et 2018.

4. Comparaison avec des valeurs guides (ANZECC & ARMCANZ 2000 et Guide CNRT)

Rappel : Les valeurs guides par défaut (DGV) indiquent les concentrations pour lesquelles il existe un faible risque d'effets inacceptables. En revanche, les valeurs guides « supérieures » (GV-élevé), fournissent une indication des concentrations auxquelles on peut déjà s'attendre à observer des effets indésirables en lien avec la toxicité.

Ces deux valeurs guides pour la qualité des sédiments (Australie et Nouvelle-Zélande), sont basées sur des échantillons de sédiments avec des granulométries normalisées à 2 mm. Dans notre étude, la taille des particules analysées a été normalisée à 40µm, fraction sédimentaire considérée comme la plus réactive en termes géochimiques. Par conséquent, les résultats exprimés dans le rapport maximisent les concentrations métalliques par unité de masse.

Parmi les éléments pour lesquels des valeurs guides existent, on observe que les concentrations de Cd, Cu, Pb sont inférieures à la DGV. Pour les éléments, Ag et As, les concentrations déterminées dans le sédiment sont supérieures au DGV, mais inférieures au GV-élevé. Deux métaux se distinguent, Cr et Ni, dont les concentrations émergent nettement au-dessus des valeurs des GV-élevés ; ces concentrations sont entre 8 et 27 fois plus élevées, respectivement. Bien que ces concentrations dépassent très notablement le GV-élevé, il est important de considérer les teneurs naturelles des sols et sédiments mesurées en Nouvelle-Calédonie, compte tenu du contexte géologique.

En effet, ces valeurs (Tableau 9) se situent dans la gamme de concentrations typiquement observées dans les sédiments des zones sous influence marine et terrestre modérée (Beliaeff, *et al.*, 2011).

Tableau 9. Concentration moyenne de Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Ag et As déterminé dans les sédiments des deux baies comparer avec des valeurs guides d'Australie et Nouvelle Zélande et les concentrations typiquement observées en Nouvelle-Calédonie.

Métaux	Valeurs indicatives par défaut (DGV) (mg/kg)	Valeur guide supérieure (GV-high) (mg/kg)	Baie Port Boisé (ST03) moy. (mg/kg)	Baie Kwe (ST06) moy. (mg/kg)	Influence marin (mg/kg) ¹	Influence terrigène modérée (mg/kg) ¹
Ag	1,0	4.0	2,67 ± 0,09	2,55 ± 0,04		
As	20	70	32,9 ± 1,2	40,49 ± 0,39		
Cd	1,5	10	<1	1,44 ± 0,13		
Cr	80	370	1591 ± 81	2747 ± 333	2608 ± 1014	7820 ± 3520
Cu	65	270	5,39 ± 0,34	10,07 ± 0,54		
Ni	21	52	736 ± 42	1311 ± 158	1080 ± 50	2300 ± 535
Pb	50	220	8,45 ± 0,53	14,9 ± 1,5		

¹ Beliaeff, *et al.*, (2011)

F. CONCENTRATIONS EN COMPOSÉS ORGANIQUES DANS LES SÉDIMENTS

Les résultats pour les composés organiques déterminés dans les sédiments des deux baies sont présentés dans le Tableau 10

Les concentrations de tous les composés organiques sont inférieures aux limites de quantification respectives, dans les deux baies.

Tableau 10. Concentrations des composés organiques déterminées dans les sédiments pour les stations ST03 et ST06.

Station		ST03	ST06
Paramètre			
Alkylphenols			
4-t-Octylphenol	mg/kg MS	<0,010	<0,010
Nonylphenol (mixture of isomers)	mg/kg MS	<0,10	<0,10
Phthalates			
Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Butyl benzyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-cyclohexylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-isobutylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-n-butyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-n-octylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-n-propylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-pentylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Diethyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Dimethyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Polycyclic Aromatics Hydrocarbons (PAHs)			
Acenaphthene	mg/kg MS	<0,0059	<0,0065
Acenaphthylene	mg/kg MS	<0,004	<0,0043
Anthracene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benz(a)anthracene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benzo(a)pyrene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0013
Benzo(b)fluoranthene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benzo(g,h,i)perylene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benzo(k)fluoranthene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Chrysene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Dibenzo(a,h)anthracene	mg/kg MS	<0,0012	<0,00064
Fluoranthene	mg/kg MS	<0,0058	<0,0083
Fluorene	mg/kg MS	<0,0014	<0,0079
Indeno(1,2,3,cd)pyrene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Naphthalene	mg/kg MS	<0,023	<0,033
Phenanthrene	mg/kg MS	<0,014	<0,017
Pyrene	mg/kg MS	<0,0035	<0,005

IV. DISCUSSION / CONCLUSION

A. ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET SÉDIMENTAIRE DE LA ZONE D'ÉTUDES.

Les baies Kwe et de Port boisé ont fait l'objet de nombreux suivis depuis la mise en place des arrêtés environnementaux dans le cadre de l'autorisation d'exploitation minière accordée à VALE-NC. Dans ce contexte, des prélèvements et mesures *in situ* ont été régulièrement effectués par le laboratoire AEL/LEA (suivi semestriels) depuis 2007.

En parallèle, un outil numérique de modélisation hydrodynamique a été implémenté pour compléter ces analyses et mesures ponctuelles, afin d'obtenir des informations spatio-temporelles sur la courantologie de la zone. Ces informations, reliées aux forçages naturels que sont le vent, la marée et les précipitations, permettent l'interprétation des mesures *in situ* à la lumière de l'hydrodynamique locale.

1. Modèle utilisé et validation

Le modèle tridimensionnel utilisé est le modèle MARS-3, développé par l'IFREMER. Ce modèle, implémenté dans les lagons sud-ouest et sud de Nouvelle-Calédonie dès 1999, a permis de dresser des atlas de courants prenant en compte l'ensemble des conditions hydro-climatiques régnantes (Douillet, 2001 ; Derex et al, 2008). Lors de sa construction, le modèle a été testé et validé par confrontation modèle/mesures (Douillet et Le Gendre, 2008). Sa fiabilité dans la reproduction du déplacement des masses d'eau et des matières dissoutes et particulières a donc été vérifiée.

2. Bathymétrie de la zone

La connaissance de la bathymétrie de la zone étudiée ainsi que sa géomorphologie est indispensable pour la compréhension des phénomènes courantologiques y tenant place. Une campagne bathymétrique a donc été réalisée en 2015 afin d'établir une carte des fonds de haute résolution (Drouzy, 2019 ; Figure 27).

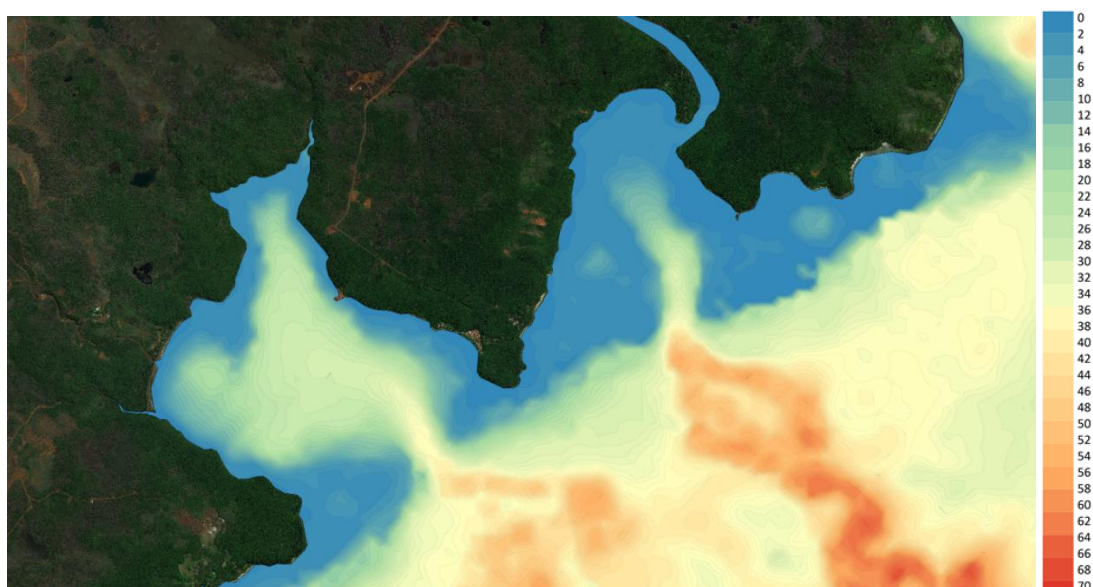


Figure 27 : Bathymétrie (en mètres) des baies de Kwe et de Port Boisé

Il s'avère qu'une grande partie de la baie de la Kwe est profonde de moins de 5m (zone de platier corallien), et que seul son chenal atteint des profondeurs d'environ 35 mètres en sortie de baie. La baie de Port Boisé se révèle plus profonde, 25m en moyenne, avec des platiers coralliens se limitant aux pourtours de la côte.

Ces différences géomorphologiques notables suggèrent la mise en place de phénomènes hydrodynamiques particuliers pour chacune des deux baies.

3. Temps de résidence des eaux

Le temps de résidence des eaux est une information capitale dans la considération de l'évolution de traceurs conservatifs dissous, tels que certains métaux (Ni, ...) très peu complexés dans l'eau. Cette grandeur traduit le temps nécessaire à chaque « particule d'eau » faisant partie d'un volume de contrôle, pour quitter ce volume.

Ici, les baies sont assimilées au volume de contrôle et les temps de résidence respectifs ont été calculés en chaque point des baies Kwe et de Port Boisé. En d'autres termes, ces valeurs sont une indication du « temps de renouvellement » de toute l'eau initialement contenue dans les baies.

Les temps de résidence varient évidemment en fonction des conditions de forçages physiques que représentent le vent, la marée et l'arrivée d'eau douce par les rivières.

A titre indicatif, la Figure 28 illustre les temps de résidence moyens, obtenus à l'issue de 102 simulations lancées en diverses conditions météorologiques.

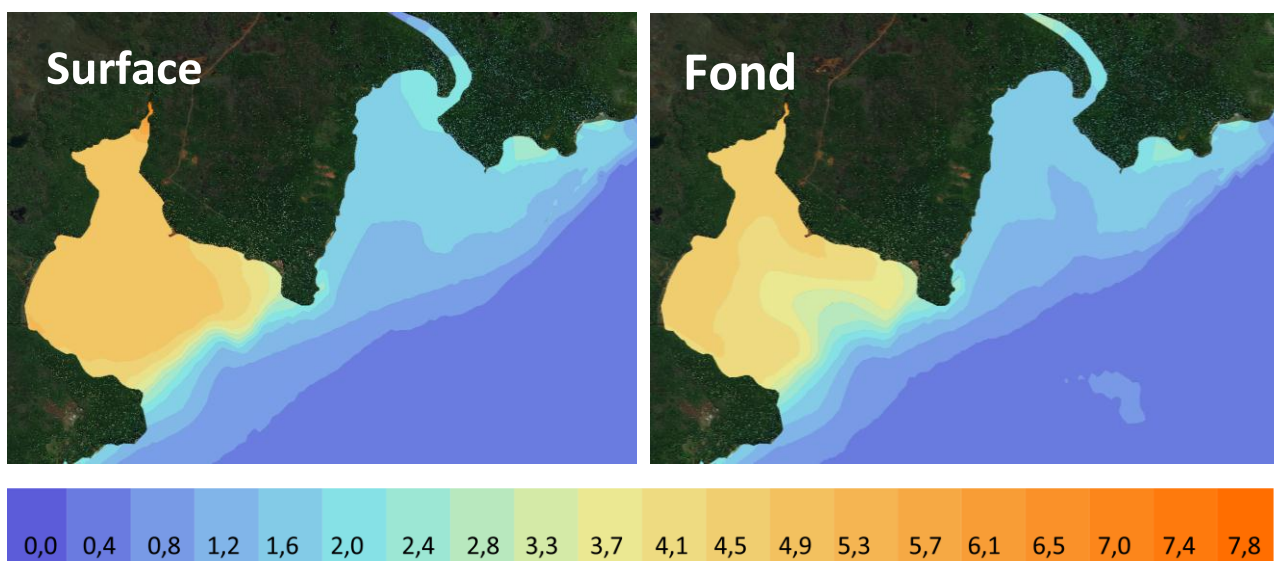


Figure 28 : temps de résidence moyen, pour des conditions météorologiques moyennes (en jours) pour les baies de Port boisé et de la Kwe, en surface et au fond.

Il apparaît que les deux baies se distinguent par des temps de résidence dont les ordres de grandeurs sont très différents. En effet, la baie Kwe est rapidement renouvelée de son volume d'eau initial : quelques heures à proximité du chenal de sortie et 2 jours au niveau des récifs frangeants.

A contrario, le renouvellement des eaux de la baie de Port Boisé est bien plus long : 4 à 6 jours pour la majeure partie de cette dernière. Par ailleurs, il est à noter que les temps de résidence de la baie Kwe sont quasiment identiques entre la surface et le fond, alors qu'en baie de Port Boisé, ils présentent une légère hétérogénéité. En l'occurrence, le temps de renouvellement est plus rapide en profondeur, indiquant de plus forts courants sortant dans les couches profondes.

4. Courantologie

Les simulations hydrodynamiques permettent de connaître l'évolution des courants dans le temps, notamment de visualiser les changements pouvant intervenir au cours d'un cycle de marée et pour des vents alizés moyens (6 m/s). L'ANNEXE 5 présente l'évolution horaire des courants en baie Kwe et de Port Boisé, d'un étal de marée basse jusqu'au suivant. Les Figure 29 et Figure 30 illustrent les intensités et direction de courant en surface dans les baies et dans le Canal de la Havannah, pour une marée montante et une marée descendante, respectivement.

La Figure 29 démontre que l'intensité des courants est maximale durant la marée montante au niveau des zones de plus faibles profondeurs, à savoir les platiers coralliens des baies et en particulier à la pointe Puka. Les masses d'eau empruntent donc, à marée montante, un chemin forcé depuis la baie de la Kwe vers la baie de Port Boisé.

Il est également à noter la formation d'un tourbillon cyclonique dans la baie de Port Boisé, impliquant une « stagnation » des masses d'eau et expliquant les temps de résidence plus longs.

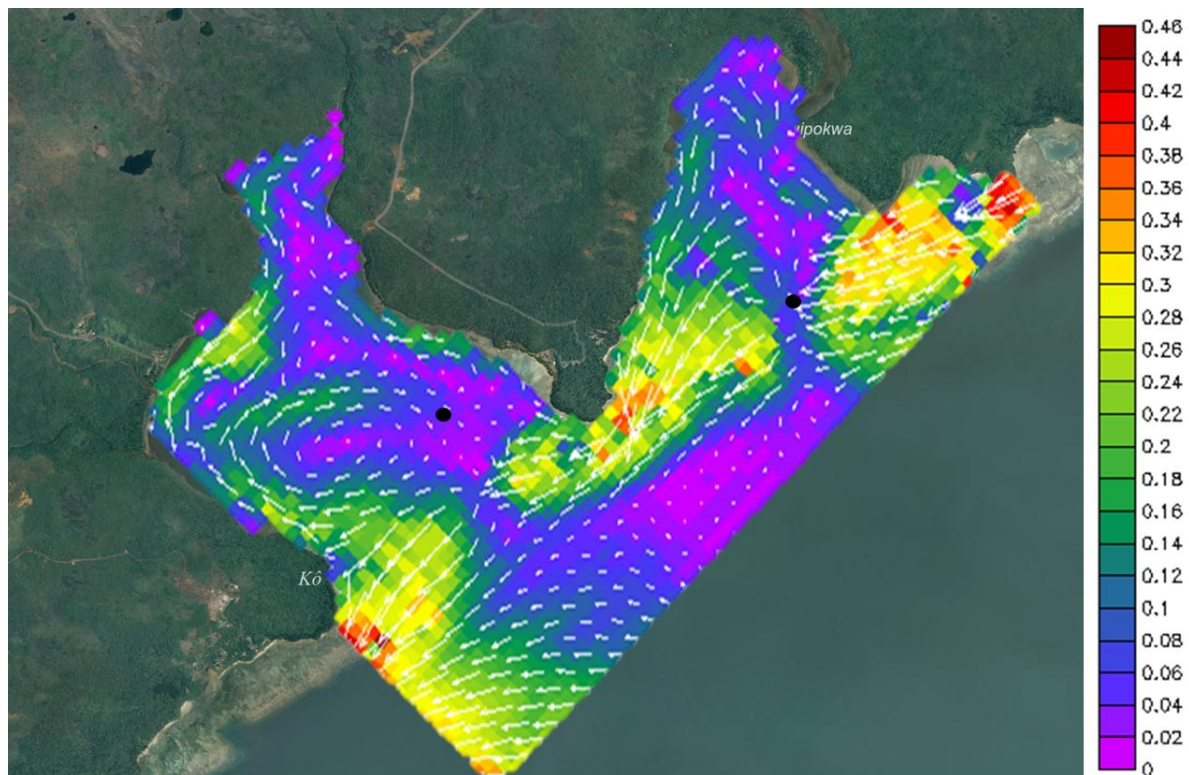


Figure 29 : Représentation des intensités (nuance de couleurs, en m/s) et direction (vecteurs) des courants de surface lors d'une marée montante. Les points noirs représentent les points d'échantillonnage dans les deux baies.

La Figure 30, quant à elle, représente les intensités et directions de courants au cours de la marée descendante. Dans le canal de la Havannah, l'intensification des courants vers l'Est entraîne les eaux des deux baies. Les eaux de Port Boisé sortent préférentiellement par le chenal d'accès à la baie, tandis que les eaux de la Kwe atteignent le canal de la Havannah aussi bien en empruntant le chenal d'accès qu'en passant par-dessus le platier. Toutefois, on observe encore une vitesse importante des courants sur le platier corallien qui sépare les 2 baies, correspondant au transfert de masses d'eau de la baie Kwe vers Port Boisé.

Le tourbillon de Port Boisé est également visible à marée descendante, les courants anticycloniques se maintenant, indiquant une grande indépendance de l'hydrodynamique de Port Boisé par rapport à l'extérieur de la baie, et expliquant les temps de résidence très longs observés plus haut.

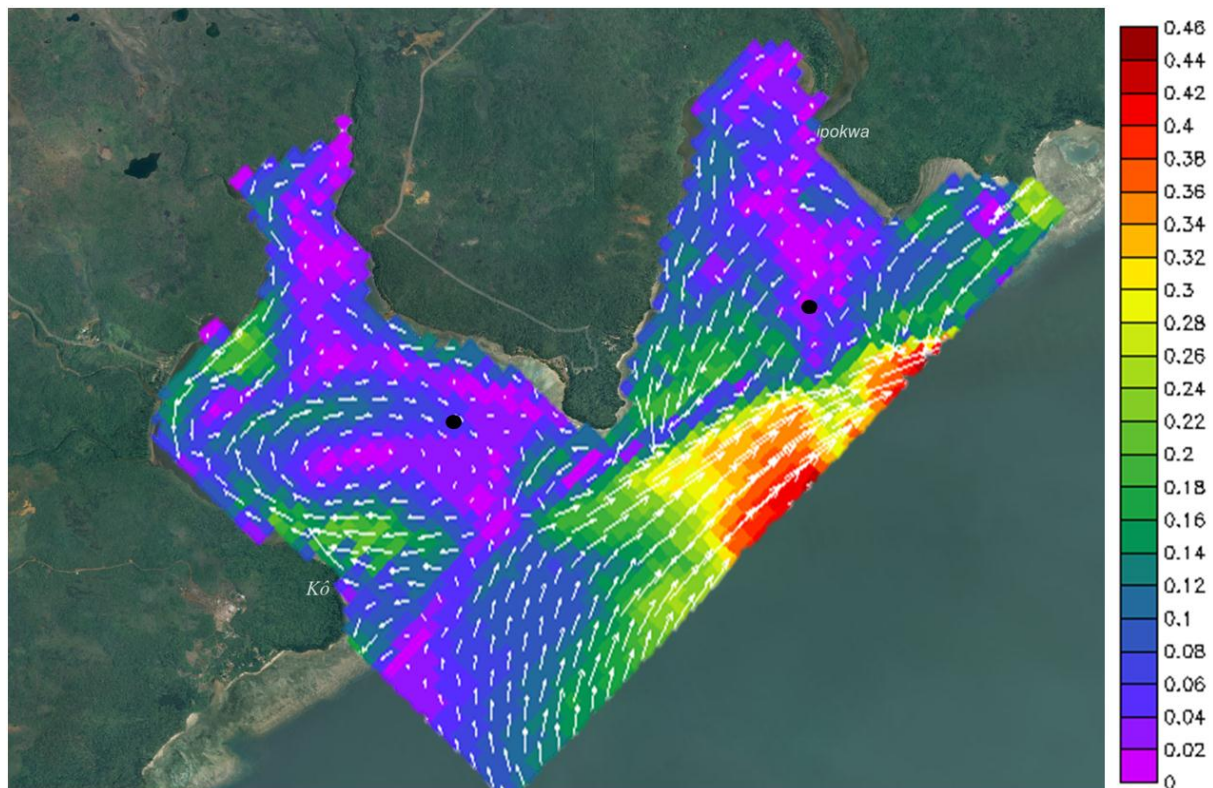


Figure 30 : Représentation des intensités (nuance de couleurs, en m/s) et direction (vecteurs) des courants de surface lors d'une marée descendante. Les points noirs représentent les points d'échantillonnage dans les deux baies.

5. Dispersion des matières dissoutes en provenance de la rivière Kwe

Un focus a été réalisé sur les apports de la rivière Kwe, sous influence anthropique directe. Ainsi dans la suite des travaux présentés, il est à noter que seul le débit de la rivière Kwe est reproduit dans le modèle (ni les débits des creeks, ni celui de la Trou Bleu de Port Boisé ne sont considérés). Le déplacement des masses d'eau, ainsi que le transport des matières dissoutes et/ou particulières contenues, dépendent de forçages physiques naturels. Le vent, le débit de rivière et les marées sont les principaux moteurs conditionnant l'hydrodynamisme d'une zone et influant sur la diffusion/dispersion spatio-temporelle des matières dissoutes/particulaires, ainsi :

- Le vent va intensifier le mélange vertical en augmentant la friction à la surface de l'eau et provoquer/faciliter la pénétration de la couche dessalée de surface, ainsi que les fractions dissoutes. Selon son orientation, il va conditionner le transport des matières dissoutes dans une direction préférentielle et réduire son étalement dans l'espace.
- Le débit de la rivière Kwe va également jouer un rôle dans cette distribution, plus le débit est élevé, plus la couche dessalée amenée par la rivière va s'étendre et recouvrir un espace important de la baie.
- Enfin, l'amplitude de la marée va conditionner l'intensité des courants de marée. Ces derniers influent sur la vitesse de transport horizontal et vertical des matières dissoutes.

La Figure 31 illustre la comparaison entre la distribution du matériel dissous sous l'effet d'un débit moyen ou bien d'une crue de rivière.

Dans le cas du débit moyen et d'un alizé de 6 m/s, le panache est contraint le long de la côte Est de la baie et se trouve être transporté en direction de la baie de Port Boisé, au terme de 48h de simulation. **Ces conditions météorologiques sont celles majoritairement observées dans le lagon Sud de la Calédonie et peuvent être considérées comme représentatives d'une dynamique moyenne dans la distribution des matières dissoutes issues de la rivière Kwe.**

A contrario, le cas de la crue et en l'absence de vent illustre une dispersion spatiale très rapide et importante des matières dissoutes au cours des 48 heures de simulation. **Ces conditions météorologiques sont très ponctuelles (crue annuelle). Le schéma de dispersion obtenu peut donc être considéré comme représentatif de la dispersion des eaux douces et des apports terrigènes dissous issus de la rivière Kwe suite à de fortes précipitations.**

En résumé:

Plus le débit de la rivière Kwe augmente, plus l'apport d'eau douce et les matières dissoutes contenues vont gagner du terrain rapidement et se répandre sur toute la surface des baies respectives. L'épaisseur de cette couche d'eau dessalée va dépendre de l'intensité du vent et des courants de marée.

Plus l'intensité du vent augmente, plus le panache d'eau douce va être confiné. Sa distribution est alors moins étendue, en revanche, la pénétration (par mélange) de la couche dessalée et des matières dissoutes est intensifiée.

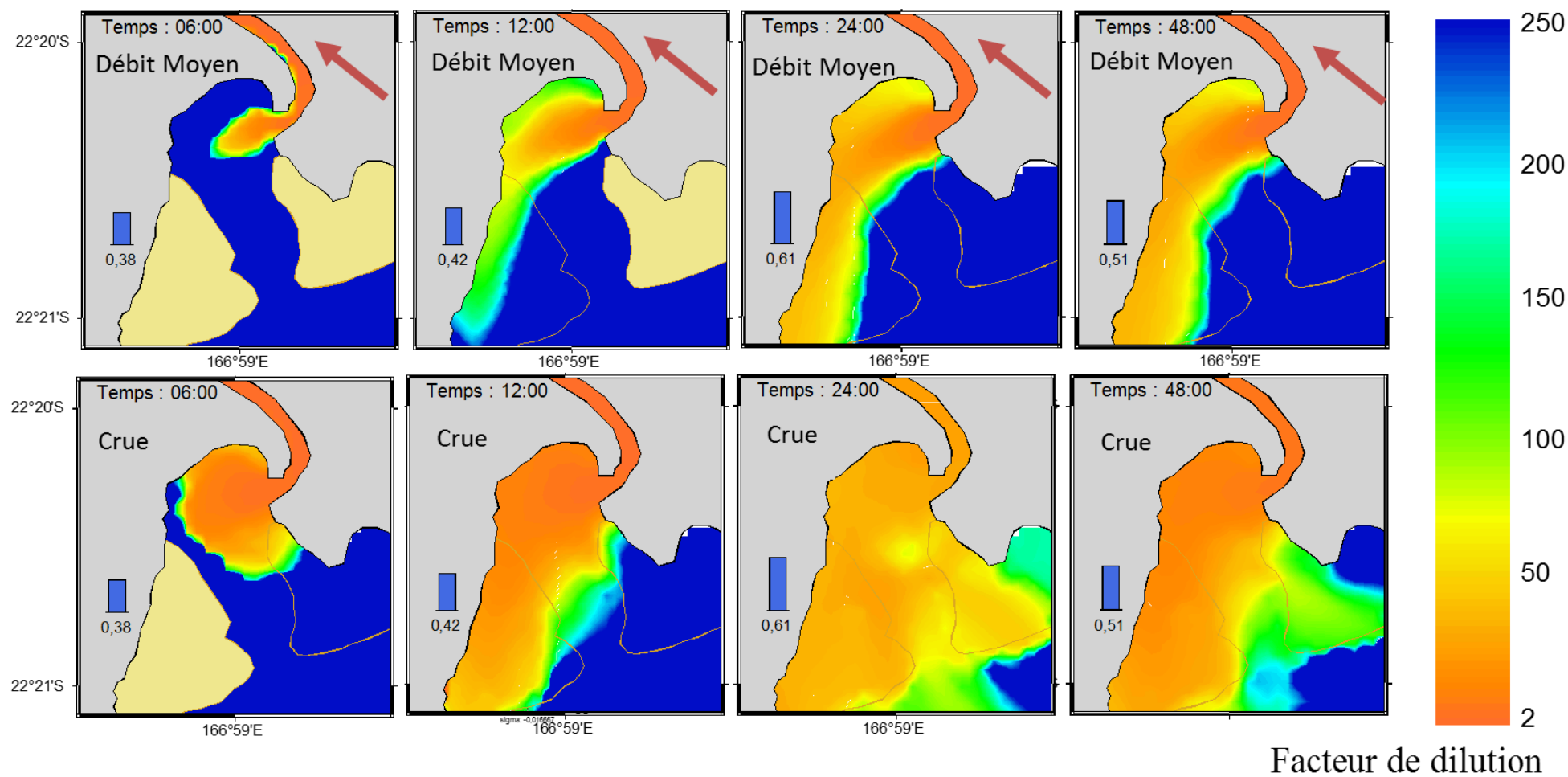


Figure 31 : Evolution de la dispersion de la matière dissoute, en facteur de dilution, par rapport à une concentration initiale apportée par la rivière Kwe, en surface et à mi-profondeur, dans le cas météorologique d'un alizé à 6 m/s, d'une marée de Morte Eau et de débit moyen et de crue.

6. Transport Particulaire des matières en provenance de la baie Kwe

Le couplage entre le modèle hydrodynamique existant et un modèle sédimentaire a fait l'objet d'études récentes (Drouzy, 2019), Il est maintenant possible de reproduire la dynamique des eaux, le transport et le dépôt des sédiments mais également le remaniement du sédiment après son premier dépôt (remise en suspension du matériel sédimentaire et charriage).

Dans le cadre de ces travaux, l'apport terrigène de la rivière Kwe a pu, en première approche, être simulé et une cartographie moyenne théorique de la déposition des fines particules sédimentaires (latérites 9 μm) a été dressée pour la baie Kwe et jusqu'à Port Boisé. Ainsi au terme de 140 jours de simulation, en conditions réelles de vent, précipitations et marée, la déposition du sédiment est illustrée en Figure 32:

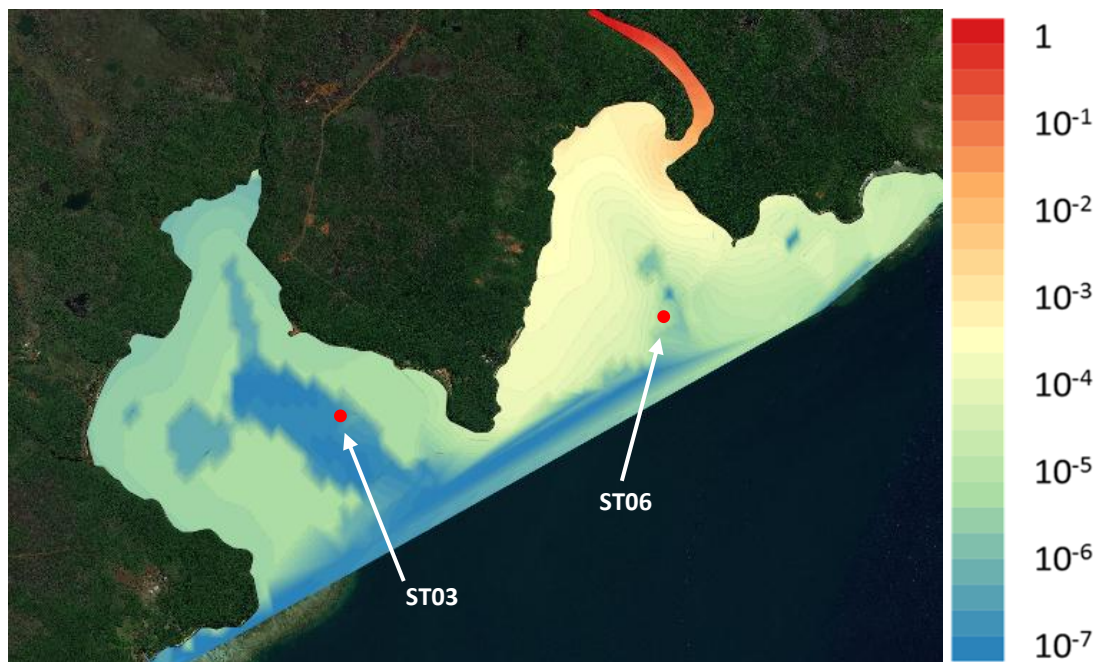


Figure 32 : Répartition de la quantité de vase déposée (en kg/m^2), après 140 jours de simulation

Cette répartition montre que la présence de matériel sédimentaire provenant de la Kwe (seule source implémentée dans le modèle) en baie de Port Boisé est manifeste. Le calcul tend à montrer qu'il existe une influence de l'apport terrigène de la Kwe en baie de Port Boisé.

7. Conclusions

Les informations et connaissances obtenues par le biais de la modélisation présentent l'avantage de couvrir des échelles de temps et d'espace supérieures aux techniques expérimentales et surtout permettent de sérier les facteurs d'influence. Il est donc nécessaire de considérer avec prudence, les seuls résultats issus des simulations. Entre autres situations à vérifier, il apparaît qu'en conditions météorologiques dominantes (Alizé modéré et débit moyen de rivière), le panache d'eau douce issu de la Kwe longe la côte pour atteindre, en moins de 24 heures, la baie de Port Boisé (Figure 31). Ce résultat de calcul s'applique autant au matériel dissous (exemple des métaux) qu'au matériel particulaire (MES) transportés ; ainsi une partie des MES amenées par la rivière Kwe semble sédimenter dans Port Boisé. Cependant, cette quantité n'a pas été quantifiée, mais reste probablement faible.

B. MISE EN CONTEXTE DES RÉSULTATS DES MÉTAUX DISSOUS PAR RAPPORT À LA MODÉLISATION

1. Baie Kwe

Au cours de l'étude, un épisode pluvieux important (480mm) sur le bassin versant de la rivière Kwe a été observé entre le 29 février et le 1er mars avec des vents compris entre 14,2 et 15,2 m/s de direction nord-est. Ces précipitations ont engendré des conditions de crue qui se sont traduites par une augmentation rapide et conséquente des concentrations en métaux dissous transportés directement dans la baie via la rivière Kwe.

La modélisation conduite pour cette baie a démontré que les forts et soudains apports d'eaux douces couvrent la totalité de la surface de la baie (Figure 31). Par ailleurs, les conditions de marée (morte eau) régnaient pendant cette période ont pu contribuer aussi à la pénétration verticale du panache d'eau douce et donc amplifier la diffusion des métaux en profondeur ; les pics de concentrations en Co, Fe et Ni, observées durant cette période corroborent l'hypothèse d'une importante dissipation des métaux dissous vers les couches profondes.

En effet, en prenant la concentration de Co dissous comme exemple (Figure 33), on peut voir clairement que la concentration maximale (0,67 µg/L) a été enregistrée consécutivement à l'épisode pluvieux du 29 mars. Les eaux inhérentes de crue ont probablement concerné l'échantillonneur THOË, positionné à la mi-profondeur en baie Kwe, dans les 24 premières heures qui ont suivi cette pluie (Figure 31).

Par ailleurs, les courants faibles, qui sont générés à marée montante comme à marée descendante (Figure 29 et Figure 30), ont permis aux eaux riches en cobalt dissous de n'être évacuées de la baie que lentement ; les phénomènes de dilution sont ainsi devenus importants, comme le traduit la baisse notable du niveau de concentration la semaine suivante.

Avec un traceur comme le nickel, les effets engendrés par cet épisode pluvieux perdurent un peu plus longtemps. En effet, en raison de sa concentration significativement élevée dans le milieu (1,74 µg/L), la diminution est plus progressive mais atteint quand même, avec un délai plus important, des valeurs proches des normales mesurées (0,4 – 0,6 µg/L).

La modélisation du renouvellement des masses d'eau a montré des temps de résidence variant entre 1,2 jour (vent d'ouest) et 1,8 jour (pas de vent), c'est-à-dire des durées bien inférieures au temps d'exposition des DGTs. Les temps de résidence théoriques estimés pour la baie Kwe, n'est donc pas en totale adéquation avec le retour relativement lent aux valeurs 'normales' de concentration, pour le nickel notamment, considéré comme un traceur conservatif. En effet, les calculs sont à pondérer, d'une part, en raison des conditions météorologiques qui ont prévalu ultérieurement (succession d'épisodes pluvieux modérés et rotations des vents au secteur nord et forte intensité), et d'autre part, par l'évolution des apports en eau douce inhérents de la rivière.

Dans ces conditions, les résultats de la modélisation hydrodynamique suggèrent que le panache longe la côte nord puis ouest de la baie Kwe avant de pénétrer, en partie, dans la baie de Port Boisé.

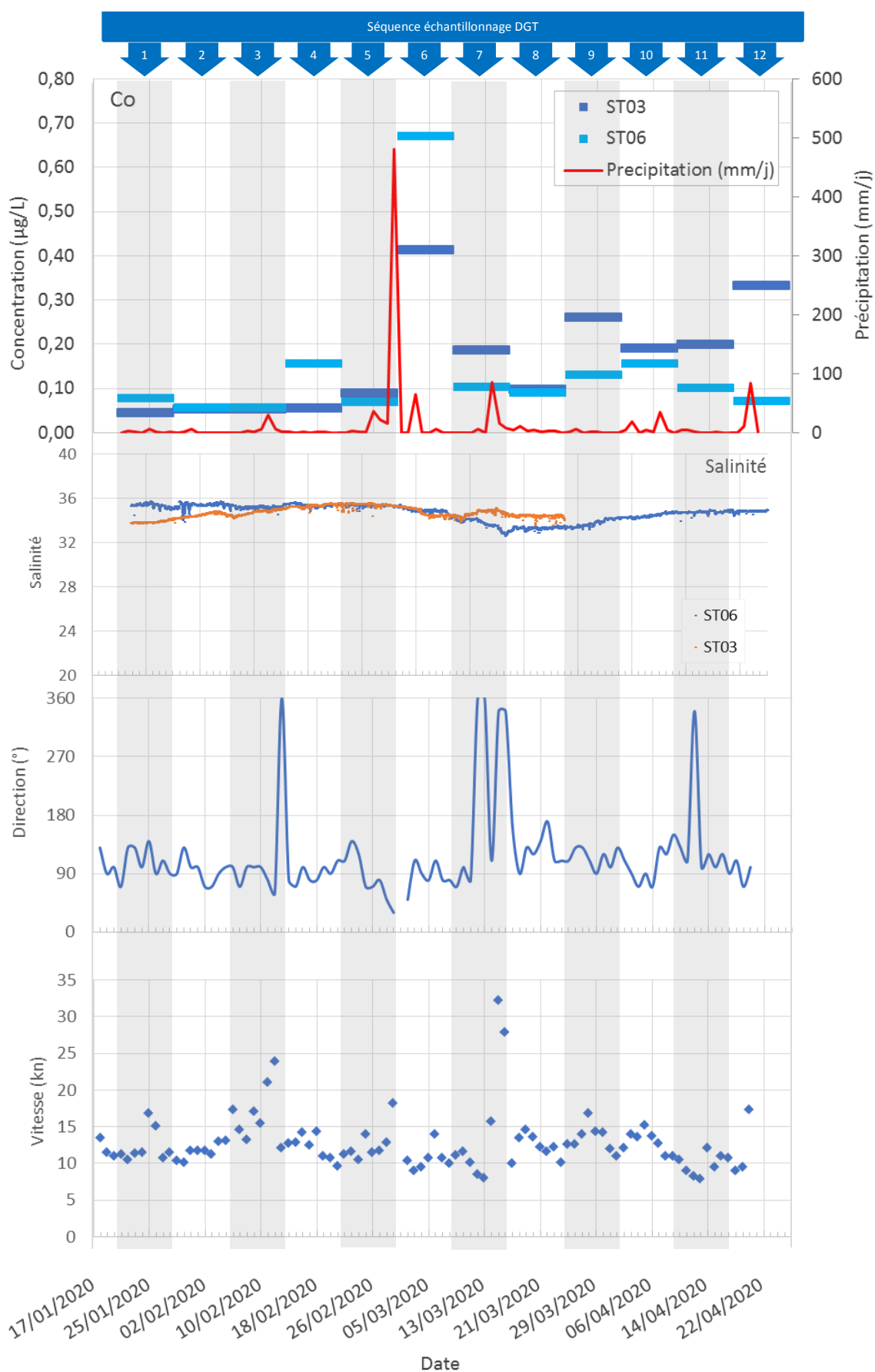


Figure 33. Diagramme combiné des concentrations de cobalt déterminé par DGT dans les deux baies, du cumul journalier des précipitations, la salinité, la direction et la vitesse journalières.

2. Port Boisé

Dans la baie de Port Boisé, les effets des précipitations extrêmes survenues du 29 février au 1er mars sont également visibles, mais dans une moindre mesure par rapport à la baie Kwe. En effet, le Co, le Fe et le Mn montrent de fortes augmentations de concentrations (x5, x28 et x9, respectivement); la concentration en Ni ayant augmenté moins significativement (x1,6). Contrairement à la baie Kwe, les concentrations en Co, Fe et Mn dissous ont augmenté vers la fin de la période.

Le comportement particulier de cette baie est à rechercher principalement dans les contributions des différents apports d'eaux douces et, dans une moindre mesure à la connexion hydrodynamique qui semble exister entre les deux baies voisines. Pour rappel, la baie de Port Boisé est alimentée directement en eau douce par la rivière Trou Bleu et par trois autres creek (sans nom) de moindres importances.

Bien que leurs débits cumulés ne soient pas connus, ils sont probablement bien inférieurs à celui de la rivière Kwe, compte tenu des surfaces des bassins versants respectifs. En effet, le débit moyen de la rivière Trou Bleu est environ 5 fois inférieur à celui de la rivière Kwe. Par ailleurs, globalement son bassin versant semble moins impacté par les activités minières (pas d'exploitation minière en cours); les précipitations atmosphériques ont donc une action érosive limitée sur les mécanismes de lixiviation des sols. Cependant, il est possible d'observer les effets de l'érosion du bassin versant Est de la baie (Figure 34).



Figure 34 : Creeks de la bordure ouest de la baie de Port Boisé, Panaches turbides générés par la lixiviation des minières orphelines du Cap N'Doua, Panache de la Tour Bleu peu marqué, après un très fort épisode pluvieux en mars 2009 (Photo: Céline Casalis, Vale-NC).

Toutefois, dans la baie de Port Boisé, une source potentielle d'apports en métaux dissous est identifiée avec les creeks débouchant à l'ouest de la baie (Figure 34). Cependant, avec des régimes hydrologiques très variables, (crues) liés à l'intensité des précipitations, les apports en baie de Port Boisé sont vraisemblablement ponctuels et, de surcroît, limités par la présence de bancs de sable aux embouchures (cas du creek longeant le terrain de camping de Port Boisé). Pour ces systèmes, les contributions respectives restent donc à définir, tant en métaux dissous qu'en charge particulaire. Par ailleurs et quel que soit le cas de figure, les courants modélisés dans la baie montrent que tous les panaches se disperseraient selon un gyre cyclonique les dirigeant vers le centre de la baie (et en particulier sur la station ST03).

Déjà suggérée antérieurement, une autre source de métaux dissous entrant dans la baie de Port Boisé, pourrait être une veine d'eau provenant de la baie Kwe. En effet, cette hypothèse a été soulevée en cas de crue de la Kwe, le flux d'eau douce permettant de recouvrir la totalité de la baie avant d'être canalisé et accéléré au niveau du platier séparant les deux baies (Pointe Puka), la vitesse atteignant près de 0,5 m/s lors d'une marée descendante (Figure 29). Bien qu'il n'ait pas été réalisé de modélisation de la dilution au-delà des limites de la baie Kwe, il a été montré (Drouzy, 2019) que pour des conditions de crue similaires à celles observées à la fin de février 2020, le taux de dilution du panache était faible (<50) à la pointe Puka qui sépare les deux baies. Il est donc hautement probable que le pic de concentrations de métaux dissous observé dans la baie de Port Boisé après les importantes pluies soit généré, en grande partie, par des apports provenant de la rivière Kwe. Le panache en métaux dissous, une fois dans la baie de Port Boisé est pris en charge dans le tourbillon pendant plusieurs jours en diffusant verticalement dans les couches plus profondes. Cette hypothèse est confortée par les temps de résidence théoriques calculés qui sont considérablement plus long que ceux de la baie Kwe.

A Port Boisé, les concentrations de Co, Fe et Mn observées en fin d'étude, pourraient correspondre à de nouveaux apports en eaux douces provenant de la rivière Kwe. En effet par débits faibles à moyens, le panache d'eau douce n'atteint pas la partie centrale de la baie Kwe où se trouve la station ST06, mais longe la côte ouest de la baie jusqu'à la pointe Puka séparant les deux baies et se répand dans Port Boisé ; les profils CTD enregistrés au cours de l'étude ont montré à plusieurs reprises (21/01/20, 24/04/20 et 12/05/20 ; Figure 12) que les salinités des eaux de surface étaient plus faibles à la station ST03 (Port Boisé) que à la station ST06 dans la baie de Kwe.

3. Conclusions

Cette campagne de mesures intégrées a démontré, grâce aux échantillonneurs DGTs exposés séquentiellement sur une période de 3 mois (THOË), qu'il est maintenant possible de **décrire les conséquences des précipitations sur la lixiviation des sols et de mesurer les effets dans la colonne d'eau**, en termes de qualité géochimique. Ces données ont également permis de préciser les phénomènes de dispersion des métaux dissous apportés par les creeks. **Cette information était jusqu'à présent inaccessible avec la méthodologie classique** qui consiste à recueillir des valeurs ponctuelles espacées temporellement ; le seul phénomène apparent mis en évidence a été la prépondérance des niveaux de concentration des eaux de surface.

Dans l'objectif de concrétiser les mécanismes, sur chacune des deux stations (ST03 et ST06) une campagne de mesures à deux profondeurs simultanément, permettrait de conforter les hypothèses émises de dispersion/diffusion verticale des métaux dans la colonne d'eau.

Dans la baie de Port Boisé, bien qu'il y ait vraisemblablement une entrée, plus ou moins continue, d'eau dessalée lié aux apports de la rivière Kwe, il est difficile de quantifier le flux à ce stade des connaissances. Afin de vérifier le niveau d'influence des eaux de la baie Kwé dans Port Boisé, il serait judicieux de procéder à :

- Une modélisation plus poussée, simulant des trajectoires des "particules d'eau" et quantifier les apports théoriques (volumes d'eaux). Celle-ci pourraient permettre de déterminer une corrélation entre les conditions météorologiques (précipitation, direction et vitesse des vents) et les niveaux de concentrations théoriques dans la baie de Port Boisé.
- Des études de terrain complémentaires sur la baie de Port Boisé. Elles permettraient de bâtir une meilleure compréhension de l'importance des différentes sources d'eau douce dans cette dernière pour distinguer l'influence supposée des eaux de la baie Kwé. En effet, il semble pertinent de :
 - o Acquérir une connaissance des contributions en matières dissoutes et particulaires de tous les creeks de Port Boisé, en fonction des régimes météorologiques ;

- Ajouter un point d'échantillonnage supplémentaire dans le nord de la baie de Port Boisé (à l'écart du gyre), pour une période de temps limitée à la compréhension des mécanismes de dilution des eaux douces. Cette étape permettrait de différencier les termes sources que sont la Trou Bleu et les creeks à l'ouest de la baie.

C. COMPORTEMENT DE LA COUVERTURE SÉDIMENTAIRE

1. Composés organiques

Les composés organiques étaient indétectables dans les sédiments des deux baies, ce qui indique que les apports provenant des activités industrielles ne sont probablement pas significatifs ou bien sont suffisamment dilués, voire décomposés, avant d'être enfouis dans les couches sédimentaires.

Afin de s'assurer de leur absence dans l'environnement, il serait intéressant d'étudier les sédiments qui composent le lit de la rivière Kwé, sur plusieurs stations en aval du parc à résidus de la Kwé (KO2) et sur une station en amont.

2. Métaux et calcium

Les résultats de l'analyse des sédiments fins des deux baies montrent qu'ils sont principalement d'origine marine avec de fortes proportions de calcium présentes dans les deux baies avec $38,3 \pm 1,2$ mg/kg et $30,6 \pm 1,6$ mg/kg pour la baie de Port Boisé et la baie Kwe, respectivement. Il a été montré que l'influence terrigène est plus forte dans la baie Kwe avec, à l'exception du mercure, des concentrations en métaux dans les sédiments plus élevées que dans la baie de Port Boisé. Par exemple, les concentrations en nickel dans le sédiment sont presque deux fois plus fortes dans la baie Kwe que dans Port Boisé (736 ± 158 mg/kg et 1311 ± 158 mg/kg, respectivement).

Les concentrations de nickel et de chrome déterminées dans les sédiments des deux baies sont typiques de celles observées dans les zones côtières autour de la Nouvelle-Calédonie (Beliaeff, et al., 2011). Cependant, la comparaison avec les valeurs guides (ANZECC & ARMCANZ 2000) met en évidence les conditions géologiques très spécifiques de la Nouvelle-Calédonie où les concentrations de nickel et de chrome trouvées dans les sédiments côtiers dépassent largement les valeurs guides supérieures.

Pour les autres éléments pour lesquels des valeurs guides sont disponibles (Ag, As, Cd, Cu et Pb), les concentrations de Cd, Cu et Pb dans les deux baies sont inférieures aux valeurs par défaut et les concentrations d'Ag et d'As sont supérieures aux valeurs par défaut mais inférieures aux valeurs supérieures préconisées.

Des calculs récents (Drouzy, 2019) ont montré que 48% des particules originaires de la rivière Kwe sont exportées vers le canal de la Havannah et 11% des particules longeraient la côte ouest de la baie Kwe, contourneraient la pointe Puka qui sépare les deux baies et termineraient dans Port Boisé. Ces calculs pourraient trouver une validation avec la collecte séquentielle de matières particulaires par piège à sédiment.

Des investigations complémentaires sont encore nécessaires pour déterminer les pourcentages respectifs des autres termes sources définis (creeks) qui alimentent en particules la couverture sédimentaire de la baie de Port Boisé.

L'ensemble de ces observations permettent de conclure qu'il est difficile de considérer la baie de Port Boisé comme une « baie de référence », en raison notamment des apports supposés provenant de la rivière Kwe.

D. CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans chacune des baies Kwé et de Port Boisé, cette étude avait pour objectifs :

- D'effectuer un suivi temporel à haute fréquence, par séquences intégratives de 8 jours consécutifs, des concentrations en métaux dissous pour Ag, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, en complément des actions réglementaires semestrielles. Des prélèvements ponctuels à plus faible fréquence (mensuelle environ), ont aussi été réalisés pour le dosage de Cr^{6+} , Cr_{total} , As, Ca ;
- De caractériser la composition géochimique du sédiment de surface par l'analyse de Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S et Zn, Hg, MeHg, COT, solvants organiques, et granulométrie, afin de suivre son évolution ; ces déterminations complètent le suivi réglementaire triennal.
- De permettre l'analyse de l'impact présumé des activités anthropiques pour la baie Kwé et de discuter du fonctionnement de la baie voisine de Port Boisé, initialement considérée comme une zone témoin exempte d'exploitation minière récente.

En ce qui concerne la colonne d'eau, grâce au déploiement de la méthodologie **d'échantillonnage passif séquentiel**, il a été possible de décrire de manière bien plus précise qu'auparavant :

- L'évolution notable des concentrations en métaux dissous inhérentes aux lessivage des sols par les pluies, pour les bassins versants respectifs. Cette information n'a été accessible que grâce aux installations automatiques ne nécessitant pas l'intervention de personnel in-situ ; les intempéries limitent systématiquement les déplacements sur les sites de prélèvement ;
- Les mécanismes de dispersion/dilution des éléments dissous et leur transport jusque là seulement accessibles à l'issue de la modélisation hydrodynamique (Drouzy, 2019), pour des raisons identiques précédemment exposées.

Ainsi, pendant les 96 jours de mesures, des variations très significatives des concentrations de métaux dissous (Co, Cu, Fe, Mn et Ni) ont été mesurées, enregistrant même les pics de concentrations les plus élevées jamais observées depuis la mise en place des suivi environnementaux en 2010, tant en baie Kwe qu'à Port Boisé. Ces maxima ont été mesurés à la suite de l'épisode de fortes précipitations atmosphériques du 29 février et traduisent les effets de lixiviation des sols ; ce sont les événements pluvieux qui permettent de jauger la vulnérabilité des bassins versants, appréciation très difficilement mesurable par la méthodologie classique des prélèvements ponctuels.

De manière plus précise, les concentrations en cobalt (0,67 $\mu\text{g/L}$), fer (32,2 $\mu\text{g/L}$) et nickel (1,74 $\mu\text{g/L}$) les plus élevées ont été mesurées en baie Kwe (Tableau 11), où par rapport aux données historiques, elles sont multipliées par 180, 10 et 6, respectivement. Inversement, c'est à Port Boisé qu'ont été mesurées les plus fortes valeurs de manganèse (4,46 $\mu\text{g/L}$) et de cuivre (1,77 $\mu\text{g/L}$), elles aussi supérieures aux maxima historiques d'un facteur 22 et 14, respectivement (Tableau 11).

Tableau 11 : Facteurs de concentration maximaux des éléments métalliques aux stations ST03 et ST06 par rapport aux données historiques 2008-2019.

	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
ST03	<LQ	6	22	138	14	2	1	<LQ
ST06	<LQ	10	3	179	1	6	1	<LQ

Note : Les concentrations de calcium, de chrome hexavalent, de chrome total et d'arsenic ne montrent pas d'évolution au cours de la période d'étude en raison de la fréquence mensuelle des prélèvements manuels réalisés et de l'impossibilité logistique d'organiser une campagne pendant l'épisode pluvieux.

En ce qui concerne les sédiments, les concentrations en métaux et en soufre ont montré que les valeurs les plus fortes étaient relevées dans la baie Kwé ; les concentrations en calcium les plus fortes correspondant à la baie de Port de Boisé, indiquant que l'influence marine y est plus marquée qu'à la baie Kwé. Au regard des polluants/solvants organiques mesurés, aucun parmi les 28 composés dosés, n'a été quantifiable (concentrations inférieures aux LQ respectives).

En l'état actuel, cette étude montre que la mise en évidence des impacts de l'activité minière sont difficiles à établir clairement. Toutefois en baie Kwé, les fortes concentrations en cobalt et en nickel, tant dans la colonne d'eau que dans les sédiments, suggèrent que ces deux traceurs d'origine latéritique sont des produits de lixiviation des latérites jaunes qui font actuellement l'objet de leur exploitation ; par nature, les couches supérieures (latérites rouges et cuirasses) étant très appauvries en ces deux éléments, les concentrations dans les eaux et les sédiments sont alors plus faibles. Par voie de conséquence, les concentrations en baie Kwe contrastent donc avec les analyses réalisées en baie de Port Boisé, où quasiment seul le manganèse, qui entre dans la composition de la cuirasse (au même titre que le fer) est quantitativement bien représenté dans les eaux.

Toutefois, l'ensemble des résultats ne permettent pas de considérer la baie de Port Boisé comme dénuée de toute influence minière. En effet, d'une part, d'anciennes concessions minières ont par le passé été exploitées et sont aujourd'hui en proie aux mécanismes de lixiviation des sols par les pluies et, d'autre part, il semble qu'une fraction des eaux provenant de la Kwé puissent être transportée jusque dans Port Boisé où, avec la circulation générale, elles sont ensuite diluées en atteignant les couches plus profondes.

De cette étude, il ressort assez clairement la nécessité d'effectuer des calculs de flux de matière (modélisation hydrodynamique) entre ces deux baies et des mesures géochimiques intégratrices complémentaires de type séquentiel, pas uniquement dans la couche de mi-profondeur qui a été ici étudiée, mais aussi dans la veine de surface. En effet, ces mesures mériteraient d'être mises en place sur un plus long terme afin de statuer sur le fonctionnement des deux baies et leurs impacts respectifs liés, soit à leurs passifs historiques ou bien à des perturbations d'origines anthropiques actuelles.

REFERENCES

ANZECC & ARMCANZ (2000). Australian & New Zealand Guidelines for Freshwater and Marine quality (2018) <https://www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/guideline-values/default/sediment-quality-toxicants>.

Breau L., Senia J., Pangrani A., Garcia K., Debenay J.P. (2009). Développement de méthodes d'évaluation de la toxicité et analyse du risque chimique de l'effluent pour l'environnement marin. Convention de Recherche IRD/Goro-Nickel n°1124, « Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans le lagon sud de la Nouvelle-Calédonie », Volet 2 « Ecotoxicologie ». Rapport Final, IRD-Nouméa, 15/06/2009, 117 p. + Annexes.

Douillet P et Le Gendre R (2008). Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle hydrodynamique, notice technique – validation. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 54p.

Drouzy M (2019). Etude de l'impact terrigène naturel et anthropique sur un système lagunaire tropical grâce à une approche de Modélisation 3D hydro-sédimentaire liée à un réseau de mesures, Thèse, 389p.

Fernandez JM, Kumar-Roiné S et Pousse C (2018). Suivi des taux d'accumulation et évolution géochimique des sédiments en Baie du Prony, Baie Kwe et Ile Ouen, Campagne 2017, Contrat AEL/Vale-NC E98145, 63p.

Gautier,S (2008). Typologie des fonds lagonaire, par prospection acoustique (AGDS) d'un site minier en milieu tropical (NC), Rapport de stage, Intechmer/CNAM, Cherbourg, 52p.

Kaplan H, Laurent A, Moreton B, David M, Kumar-Roiné S, Fernandez JM (2018). Suivi de la qualité physico-chimique de l'eau de mer de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie, 2ème semestre 2018, Contrat AEL/Vale-NC n° L06375/0001.

Kaplan H, Laurent A, Drouzy M, Fernandez JM (2020). Suivi de la qualité physico-chimique de l'eau de mer de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie, 2ème semestre 2019, Contrat AEL/Vale-NC n° L15599-0002.

Kumar-Roiné S, Kaplan H, Laurent A, Moreton B, Drouzy M, Fernandez JM (2018). Evolution géophysique et géochimique des sédiments marins de surface, Suivi triennal 2018, Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/L06375/000, 47p.

Kumar-Roiné S, Moreton B, Laurent A, Fernandez JM (2020). Suivi des densités de flux verticaux de particules dans la Canal de la Havannah, la Baie Kwe et la Rade Nord de Prony, Campagne 2eme semestre 2019, Période de juillet à septembre 2019, Contrat AEL/Vale-NC138-VI-17-P/PO-L15599/0002, 60p.

Moreton B, Gonzalez J-L, Fernandez JM, Pluchino S, Kaplan H (2013). Utilisation d'échantillonneurs passifs en tant qu'indicateur de la pression chimique liée à l'activité minière en Nouvelle Calédonie, Programme ADIIP, CNRT « Le nickel et son environnement-2009 », 75p.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT D'EAU DANS LA BAIE DE PORT BOISÉ (ST03) ET LA BAIE KWE (ST06).....	9
FIGURE 2. THOË RECEVANT LES DGTs ET ENREGISTREUR DE TEMPÉRATURE ASSOCIÉ.	10
FIGURE 3. DGT DÉPLOYÉS SUR CHAQUE SITE D'ÉCHANTILLONNAGE (AVANT DÉPLOIEMENT)	11
FIGURE 4. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENTS (TROIS POINTS DANS UN RAYON DE 50 MÈTRES AUTOUR DE LA STATION D'EAU ST03).	13
FIGURE 5. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENTS (TROIS POINTS DANS UN RAYON DE 50 MÈTRES AUTOUR DE LA STATION D'EAU ST06).	13
FIGURE 6. CAROTTIER UTILISÉ POUR LA RÉCUPÉRATION DES SÉDIMENTS DE SURFACE.	14
FIGURE 7. CUMUL JOURNALIER DE PRÉCIPITATIONS POUR LA PÉRIODE DU 17 JANVIER AU 21 AVRIL 2020 (STATION MÉTÉO : GORO-USINE).	15
FIGURE 8. PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES TOTALES ET MAXIMALES ANNUELLES ENREGISTRÉES POUR LA PÉRIODE DU 17 JANVIER AU 21 AVRIL (LES VALEURS POUR 2020 TIENNENT COMPTE DES PRÉCIPITATIONS MAXIMALES OBTENUES À LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE DE 'GORO RÉSIDUS' AVEC UNE VALEUR MAXIMALE DE 480 MM SUR 24H)	16
FIGURE 9. FRÉQUENCE DES DIRECTIONS DES VENTS EN POURCENTAGE D'OCCURRENCE POUR LA PÉRIODE DU 17 JANVIER AU 21 AVRIL 2020.	16
FIGURE 10. LA VITESSE MAXIMALE JOURNALIÈRE DES VENTS POUR LA PÉRIODE DU 17 JANVIER AU 21 AVRIL 2020.	17
FIGURE 11. SALINITÉ (‰) ENREGISTRÉE À MI PROFONDEUR DANS LES BAIES DE PORT BOISÉ (ORANGE) ET KWE (BLEU)	18
FIGURE 12. PROFILS DE SALINITÉ (‰) DANS LES BAIES DE PORT BOISÉ (ST03) ET KWE (ST06) RÉALISÉS ENTRE JANVIER ET MAI 2020.	18
FIGURE 13. CONCENTRATIONS DE COBALT DISSOUS DÉTERMINÉES PAR EXPOSITION D'ÉCHANTILLONNEUR PASSIF DE TYPE DGT™ ; MESURES EFFECTUÉES À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST06 ET ST03.	21
FIGURE 14. CONCENTRATIONS DE MANGANÈSE DISSOUS DÉTERMINÉES PAR EXPOSITION D'ÉCHANTILLONNEUR PASSIF DE TYPE DGT™ ; MESURES EFFECTUÉES À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST06 ET ST03.	21
FIGURE 15. CONCENTRATIONS DE CUIVRE DISSOUS DÉTERMINÉES PAR EXPOSITION D'ÉCHANTILLONNEUR PASSIF DE TYPE DGT™ ; MESURES EFFECTUÉES À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST06 ET ST03.	22
FIGURE 16. CONCENTRATIONS DE NICKEL DISSOUS DÉTERMINÉES PAR EXPOSITION D'ÉCHANTILLONNEUR PASSIF DE TYPE DGT™ ; MESURES EFFECTUÉES À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST06 ET ST03.	22
FIGURE 17. CONCENTRATIONS DE FER DISSOUS DÉTERMINÉES PAR EXPOSITION D'ÉCHANTILLONNEUR PASSIF DE TYPE DGT™ ; MESURES EFFECTUÉES À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST06 ET ST03.	23
FIGURE 18. CONCENTRATIONS DE Co, Mn, Ni ET Fe DÉTERMINÉ PAR DGT EN TRIPLICAT DANS LE DEUX BAIES.	25
FIGURE 19. CONCENTRATIONS DE CALCIUM DÉTERMINÉES DANS L'EAU DE MER PRÉLEVÉE À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST03 ET ST06.	26
FIGURE 20. LES CONCENTRATIONS DE CHROME (Cr ⁶⁺ ET Cr _{TOTAL}) DÉTERMINÉES DANS L'EAU DE MER PRÉLEVÉE À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST03 ET ST06.	27
FIGURE 21. LES CONCENTRATIONS D'AS DÉTERMINÉES DANS L'EAU DE MER PRÉLEVÉE À MI-PROFONDEUR SUR LES SITES ST03 ET ST06.	27
FIGURE 22. POURCENTAGE DE FRACTION FINE DE DIAMÈTRE INFÉRIEUR ET SUPÉRIEUR À 40 µm POUR LES STATIONS ST03 (PORT BOISÉ) ET ST06 (BAIE KWE). OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES DE LA FRACTION SUPÉRIEURE À 40 µm (GROSSISSEMENT X6.4).	29
FIGURE 23. . COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE PAR CLASSE DE TAILLE DÉTERMINÉE PAR GRANULOMÉTRIE LASER, POUR LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS LES STATIONS ST03 (PORT BOISÉ) ET ST06 (BAIE KWE).....	30
FIGURE 24. CARTE DE PORT BOISÉ INTERPOLÉE DU TYPE DE FONDS OBTENU PAR UNE MÉTHODE DE DISCRIMINATION ACOUSTIQUE (AGDS) (GAUTIER, 2008).....	30
FIGURE 25. CONCENTRATIONS EN ARGENT, ARSENIC, CALCIUM, CADMIUM, COBALT, CHROME, FER, MANGANÈSE, NICKEL, PLOMB, SOUFRE ET ZINC DÉTERMINÉES DANS LA FRACTION FINE DES SÉDIMENTS DE LA BAIE DE PORT BOISÉ ET DE LA BAIE KWE.	32
FIGURE 26. CONCENTRATIONS DE MERCURE, DE MÉTHYL-MERCURE (GAUCHE) ET CONCENTRATIONS DE CARBONE ORGANIQUE DÉTERMINÉES DANS LA FRACTION FINE DES SÉDIMENTS DE LA BAIE DE PORT BOISÉ ET DE LA BAIE KWE.....	32
FIGURE 27 : BATHYMÉTRIE (EN MÈTRES) DES BAIES DE KWE ET DE PORT BOISÉ	36
FIGURE 28 : TEMPS DE RÉSIDENCE MOYEN, POUR DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES MOYENNES (EN JOURS) POUR LES BAIES DE PORT BOISÉ ET DE LA KWE, EN SURFACE ET AU FOND.....	37
FIGURE 29 : REPRÉSENTATION DES INTENSITÉS (NUANCE DE COULEURS, EN M/s) ET DIRECTION (VECTEURS) DES COURANTS DE SURFACE LORS D'UNE MARÉE MONTANTE. LES POINTS NOIRS REPRÉSENTENT LES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE DANS LES DEUX BAIES.	38
FIGURE 30 : REPRÉSENTATION DES INTENSITÉS (NUANCE DE COULEURS, EN M/s) ET DIRECTION (VECTEURS) DES COURANTS DE SURFACE LORS D'UNE MARÉE DESCENDANTE. LES POINTS NOIRS REPRÉSENTENT LES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE DANS LES DEUX BAIES.	39

FIGURE 31 : EVOLUTION DE LA DISPERSION DE LA MATIÈRE DISSOUTE, EN FACTEUR DE DILUTION, PAR RAPPORT À UNE CONCENTRATION INITIALE APPORTÉE PAR LA RIVIÈRE KWE, EN SURFACE ET À MI-PROFONDEUR, DANS LE CAS MÉTÉOROLOGIQUE D'UN ALIZÉ À 6 M/S, D'UNE MARÉE DE MORTE EAU ET DE DÉBIT MOYEN ET DE CRUE.	41
FIGURE 32 : RÉPARTITION DE LA QUANTITÉ DE VASE DÉPOSÉE (EN KG/M ²), APRÈS 140 JOURS DE SIMULATION	42
FIGURE 33. DIAGRAMME COMBINÉ DES CONCENTRATIONS DE COBALT DÉTERMINÉ PAR DGT DANS LES DEUX BAIES, DU CUMUL JOURNALIER DES PRÉCIPITATIONS, LA SALINITÉ, LA DIRECTION ET LA VITESSE JOURNALIÈRES.	44
FIGURE 34 : CREEKS DE LA BORDURE OUEST DE LA BAIE DE PORT BOISÉ, PANACHES TURBIDES GÉNÉRÉS PAR LA LIXIVIATION DES MINIÈRES ORPHELINES DU CAP N'DOUA, PANACHE DE LA TOUR BLEU PEU MARQUÉ, APRÈS UN TRÈS FORT ÉPISODE PLUVIEUX EN MARS 2009 (PHOTO: CÉLINE CASALIS, VALE-NC).	45

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1. LOCALISATION DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT D'EAU (RÉFÉRENTIEL WGS-84) ET LES PROFONDEURS DES SITES.....	9
TABEAU 2. DATE DE PRÉLÈVEMENT D'EAU AU STATION ST03 ET ST06	10
TABEAU 3. PROGRAMMATION DES 12 SÉQUENCES D'EXPOSITION (OUVERTURE ET FERMETURE) DES DGTs POUR CHAQUE APPAREIL	11
TABEAU 4. LOCALISATION DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENT (RÉFÉRENTIEL WGS-84)	12
TABEAU 5. RÉCAPITULATIF DES CONCENTRATIONS MINIMALES ET MAXIMALES HISTORIQUES OBTENUES PAR ÉCHANTILLONNAGE PONCTUEL DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE SEMESTRIELLE DE VALE NC ENTRE AOÛT 2009 ET AOÛT 2019.	24
TABEAU 6. RÉCAPITULATIF DES CONCENTRATIONS MAXIMALES OBTENUES DANS LE CADRE DE CE SUIVI COMPARATIVEMENT AU SEUIL DE TOXICITÉ (CE ₁₀) POUR UNE ESPÈCE DE BÉNITIER ET DEUX ESPÈCES DE PÉTONCLE (BREAU ET AL., 2009).	28
TABEAU 7. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE MÉTAUX DÉTERMINÉES DANS LES SÉDIMENTS DE LA BAIE KWE AVEC CELLES OBTENUES LORS DU SUIVI TRIENNAL DES SÉDIMENTS DE SURFACE ET DES CONCENTRATIONS DE MÉTAUX DÉTERMINÉES DANS LES PARTICULES COLLECTÉES DANS LES PIÈGES À SÉDIMENTS POSITIONNÉS DANS LA BAIE KWE DANS LE CADRE DU SUIVI SEMESTRIEL RÉGLEMENTAIRE. LES VALEURS ENTRE PARENTHÈSES SONT LES CONCENTRATIONS MINIMALES ET MAXIMALES.	33
TABEAU 8. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN MÉTAUX DÉTERMINÉES DANS LES SÉDIMENTS DE LA BAIE DE PORT BOISÉ AVEC CELLES OBTENUES LORS DU SUIVI TRIENNAL DES SÉDIMENTS DE SURFACE DE CETTE MÊME BAIE. LES VALEURS ENTRE PARENTHÈSES SONT LES CONCENTRATIONS MINIMALE ET MAXIMALE.	34
TABEAU 9. CONCENTRATION MOYENNE DE Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Ag ET As DÉTERMINÉ DANS LES SÉDIMENTS DES DEUX BAIES COMPARER AVEC DES VALEURS GUIDES D'Australie ET Nouvelle Zélande ET LES CONCENTRATIONS TYPIQUEMENT OBSERVÉES EN NOUVELLE- CALÉDONIE.	34
TABEAU 10. CONCENTRATIONS DES COMPOSÉS ORGANIQUES DÉTERMINÉES DANS LES SÉDIMENTS POUR LES STATIONS ST03 ET ST06.	35
TABEAU 11 : FACTEURS DE CONCENTRATION MAXIMAUX DES ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES AUX STATIONS ST03 ET ST06 PAR RAPPORT AUX DONNÉES HISTORIQUES 2008-2019.	48

ANNEXES

ANNEXE 1.....	55
ANNEXE 2.....	57
ANNEXE 3.....	58
ANNEXE 4.....	62

Annexe 1

COLONNE D'EAU : VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES

Minimums, maximums, moyennes et écart-types des données physico-chimiques mesurés à la station ST06 et ST03.

Date	Station	Statistiques descriptives	Fluorescence (mg/m³)	Salinité (‰)	Température (°C)	Turbidité (NTU)	Oxygène dissous (%)
21/01/20	ST06	Minimum	0,01	34,44	25,66	0,34	53,75
		Maximum	0,56	35,38	26,28	4,20	83,86
		Moyenne	0,35	35,28	25,93	0,83	77,24
		Ecart-type	0,11	0,21	0,13	0,79	7,71
20/02/20	ST06	Minimum	0,01	34,70	25,88	0,23	73,16
		Maximum	1,33	35,48	27,40	1,23	103,84
		Moyenne	0,69	35,40	26,15	0,52	84,53
		Ecart-type	0,23	0,19	0,38	0,15	4,95
12/03/20	ST06	Minimum	0,36	34,90	26,72	0,47	49,04
		Maximum	0,82	35,33	27,25	3,17	87,79
		Moyenne	0,57	35,23	26,78	0,87	84,82
		Ecart-type	0,08	0,06	0,09	0,51	7,31
24/04/20	ST06	Minimum	0,08	33,21	25,80	1,31	49,13
		Maximum	0,66	35,22	25,98	5,27	86,90
		Moyenne	0,46	35,03	25,90	2,83	82,43
		Ecart-type	0,12	0,51	0,03	0,88	9,02
12/05/20	ST06	Minimum	0,10	34,87	24,32	0,06	52,87
		Maximum	2,42	35,35	24,84	11,74	97,44
		Moyenne	0,50	35,17	24,74	2,92	77,35
		Ecart-type	0,28	0,14	0,08	2,63	12,91

Date	Station	Statistiques descriptives	Fluorescence (mg/m ³)	Salinité (‰)	Température (°C)	Turbidité (NTU)	Oxygène dissous (%)
21/01/20	ST03	Minimum	0,05	34,56	25,53	0,32	66,56
		Maximum	1,01	35,48	26,92	3,38	85,43
		Moyenne	0,46	35,30	26,05	0,72	81,58
		Ecart-type	0,23	0,25	0,35	0,57	4,93
20/02/20	ST03	Minimum	0,09	35,26	25,75	0,13	84,39
		Maximum	3,30	35,52	27,81	4,63	92,60
		Moyenne	0,89	35,46	26,32	0,82	90,11
		Ecart-type	0,84	0,04	0,58	0,98	1,94
12/03/20	ST03	Minimum	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
		Maximum	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
		Moyenne	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
		Ecart-type	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
24/04/20	ST03	Minimum	0,31	30,98	25,77	0,37	50,96
		Maximum	0,94	35,31	26,18	3,14	91,08
		Moyenne	0,64	34,95	25,89	0,69	84,56
		Ecart-type	0,13	0,90	0,08	0,41	6,68
12/05/20	ST03	Minimum	0,16	33,99	23,91	0,46	60,10
		Maximum	1,38	35,29	24,86	13,73	88,12
		Moyenne	0,77	35,01	24,64	1,44	84,64
		Ecart-type	0,23	0,46	0,30	1,95	6,91

Note : S.O. = sans objet

Annexe 2

COLONNE D'EAU : CONCENTRATIONS DE Cr^{6+} , Cr_{tot} , As et Ca

Concentrations des éléments dissous (Cr^{6+} , Cr_{tot} , As et Ca) déterminé à la station ST03 à mi-profondeur lors de la campagne de suivi entre janvier et mai 2020.

Date	As ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI) ($\mu\text{g/L}$)	Cr-tot ($\mu\text{g/L}$)	Ca (g/L)
21/01/20	1,81	$0,119 \pm 0,002$	$0,167 \pm 0,001$	404 ± 7
20/02/20	2,00	0,116	0,116	426
12/03/20	2,13	0,255	0,226	415
24/04/20	2,00	0,160	0,114	381
12/05/20	1,81	0,139	0,127	407

Concentrations des éléments dissous (CrVI, Crtot, As et Ca) déterminé à la station ST06 à mi-profondeur lors de la campagne de suivi entre janvier et mai 2020.

Date	As ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI) ($\mu\text{g/L}$)	Cr-tot ($\mu\text{g/L}$)	Ca (mg/L)
21/01/20	1,88	$0,125 \pm 0,006$	$0,166 \pm 0,003$	418 ± 8
20/02/20	1,83	0,107	0,176	417
12/03/20	2,02	0,166	0,185	391
24/04/20	1,85	0,120	0,173	385
12/05/20	1,89	0,122	0,153	405

Annexe 3

SEDIMENTS : CONCENTRATIONS EN COMPOSES ORGANIQUES & COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

Concentrations des composés organiques déterminées dans les sédiments pour les stations ST03 et ST06.

Station		ST03	ST06
Référence AEL		D097-S-007	D097-S-008
Paramètre			
Alkylphenols			
4-t-Octylphenol	mg/kg MS	<0,010	<0,010
Nonylphenol (mixture of isomers)	mg/kg MS	<0,10	<0,10
Phthalates			
Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Butyl benzyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-cyclohexylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-isobutylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-n-butyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-n-octylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-n-propylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Di-pentylphthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Diethyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Dimethyl phthalate	mg/kg MS	<0,80	<0,80
Sum of 10 Phthalates	mg/kg MS	<8,0	<8,0
Polycyclic Aromatics Hydrocarbons (PAHs)			
Acenaphthene	mg/kg MS	<0,0059	<0,0065
Acenaphthylene	mg/kg MS	<0,004	<0,0043
Anthracene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benz(a)anthracene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benzo(a)pyrene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0013
Benzo(b)fluoranthene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benzo(g,h,i)perylene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Benzo(k)fluoranthene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Chrysene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Dibenzo(a,h)anthracene	mg/kg MS	<0,0012	<0,00064
Fluoranthene	mg/kg MS	<0,0058	<0,0083
Fluorene	mg/kg MS	<0,0014	<0,0079
Indeno(1,2,3,cd)pyrene	mg/kg MS	<0,0012	<0,0017
Naphthalene	mg/kg MS	<0,023	<0,033
Phenanthrene	mg/kg MS	<0,014	<0,017
Pyrene	mg/kg MS	<0,0035	<0,005
Somme des PAH - Lowerbound	mg/kg MS	0	0
Some des PAH - Upperbound	mg/kg MS	0,068	0,096

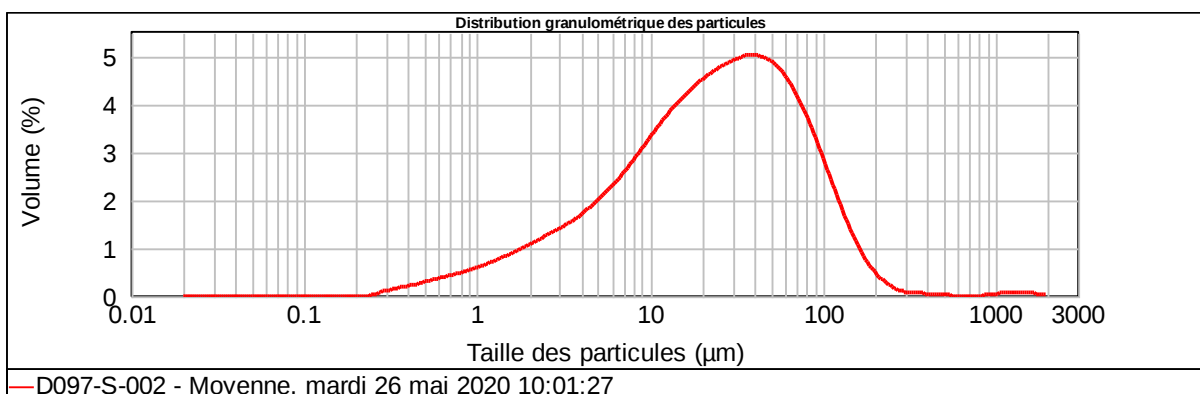
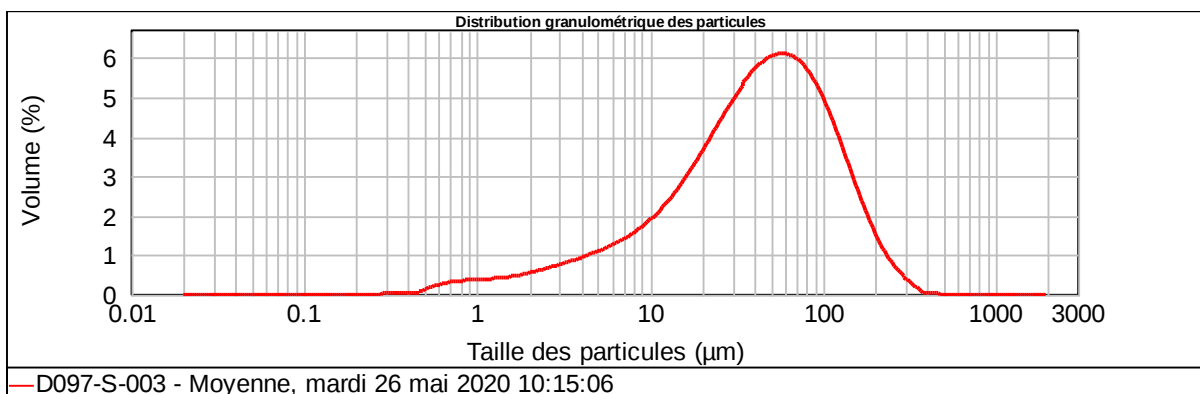
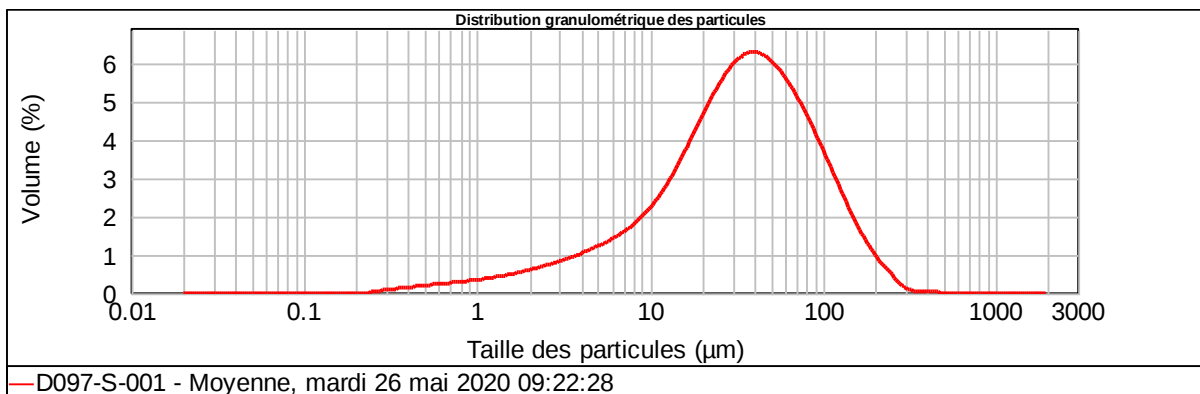
Concentrations des métaux, mercure, méthyl-mercure et carbone organique total déterminées dans les sédiments pour les stations ST03 et ST06 lors de la campagne de suivi en 2020.

Station		ST03 rep.1	ST03 rep.2	ST03 rep.3	Moyenne	Max	Min
Référence AEL		D097-S-001	D097-S-002	D097-S-003			
Paramètre							
Ag	mg/kg MS	2,75	2,58	2,67	2,67 ± 0,09	2,75	2,58
As	mg/kg MS	32,1	32,2	34,2	32,9 ± 1,2	34,2	32,1
Ca	% MS	39,2	37,0	38,8	38,3 ± 1,2	39,2	37,0
Cd	mg/kg MS	<1,0	<1,0	<1,0	-	-	-
Co	mg/kg MS	51,1	57,6	53,6	54,1 ± 3,3	57,6	51,1
Cr	mg/kg MS	1531	1683	1561	1591 ± 81	1683	1531
Cu	mg/kg MS	5,00	5,64	5,53	5,39 ± 0,34	5,64	5,00
Fe	% MS	7,03	7,60	7,39	7,34 ± 0,29	7,60	7,03
Mn	mg/kg MS	466	512	501	493 ± 24	512	466
Ni	mg/kg MS	696	779	734	736 ± 42	779	696
Pb	mg/kg MS	8,51	7,89	8,94	8,45 ± 0,53	8,94	7,89
S	mg/kg MS	2554	2901	2672	2709 ± 176	2901	2554
Zn	mg/kg MS	36,8	57,7	52,6	49,0 ± 10,9	57,7	36,8
Hg	µg/kg MS	26,0	13,0	14,0	17,7 ± 7,2	26,0	13,0
Méthyl mercure (Me-Hg)	µg/kg	0,23	0,30	0,26	0,26 ± 0,03	0,30	0,23
Carbone organique total	% MS	0,87	0,72	0,65	0,75 ± 0,11	0,87	0,65

Station		ST06 rep.1	ST06 rep.2	ST06 rep.3	Moyenne	Max	Min
Référence AEL		D097-S-004	D097-S-005	D097-S-006			
Paramètre							
Ag	mg/kg MS	2,52	2,53	2,60	2,55 ± 0,04	2,60	2,52
As	mg/kg MS	40,90	40,44	40,12	40,49 ± 0,39	40,90	40,12
Ca	% MS	32,4	29,3	30,3	30,6 ± 1,6	32,4	29,3
Cd	mg/kg MS	1,57	1,32	1,42	1,44 ± 0,13	1,57	1,32
Co	mg/kg MS	72,6	58,1	60,9	63,9 ± 7,7	72,6	58,1
Cr	mg/kg MS	3131	2545	2564	2747 ± 333	3131	2545
Cu	mg/kg MS	10,68	9,85	9,68	10,07 ± 0,54	10,68	9,68
Fe	% MS	15,4	11,2	11,3	12,6 ± 2,4	15,4	11,2
Mn	mg/kg MS	754	624	621	666 ± 76	754	621
Ni	mg/kg MS	1493	1226	1214	1311 ± 158	1493	1214
Pb	mg/kg MS	16,6	13,6	14,4	14,9 ± 1,5	16,6	13,6
S	mg/kg MS	3577	3757	3524	3619 ± 122	3757	3524
Zn	mg/kg MS	110,7	71,9	58,6	80,4 ± 27,1	110,7	58,6
Hg	µg/kg MS	19	15	11	15 ± 4	19,0	11,0
Méthyl mercure (Me-Hg)	µg/kg	0,24	0,33	0,45	0,34 ± 0,10	0,45	0,24
Carbone organique total	% MS	1,05	1,01	1,00	1,02 ± 0,03	1,05	1,00

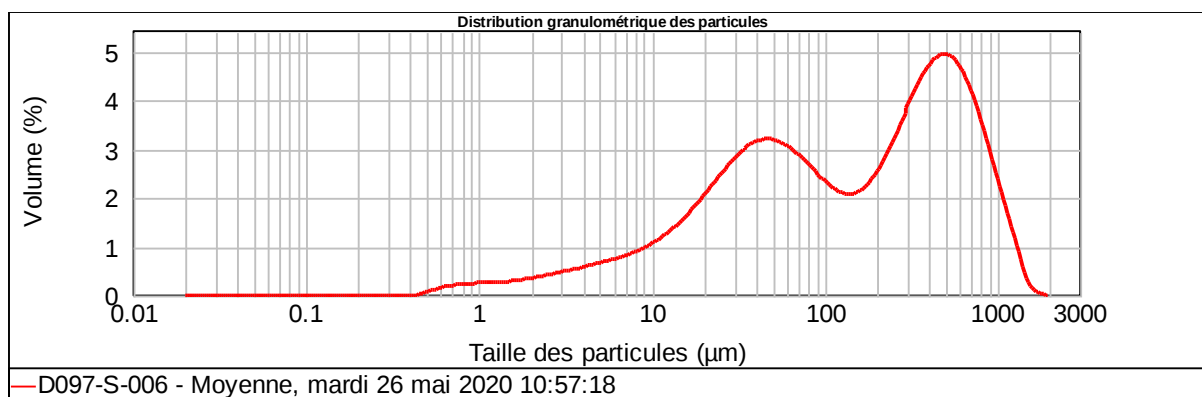
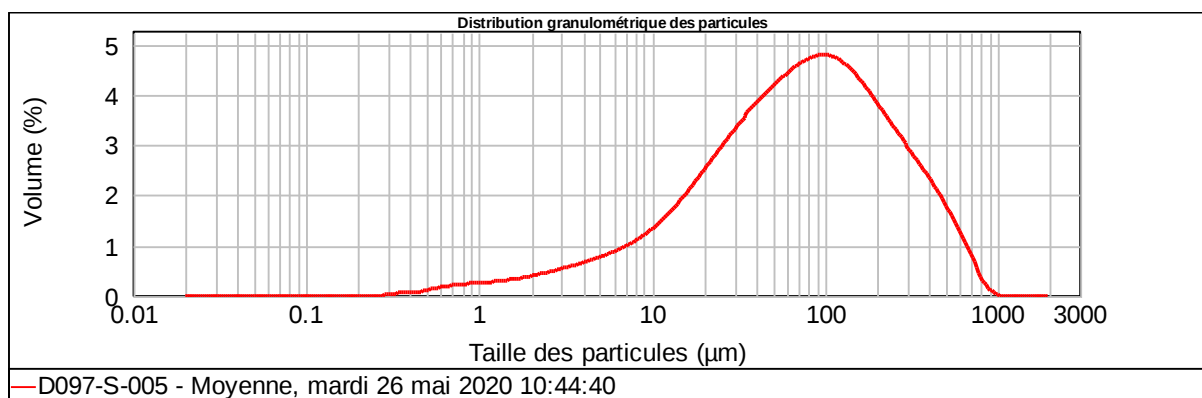
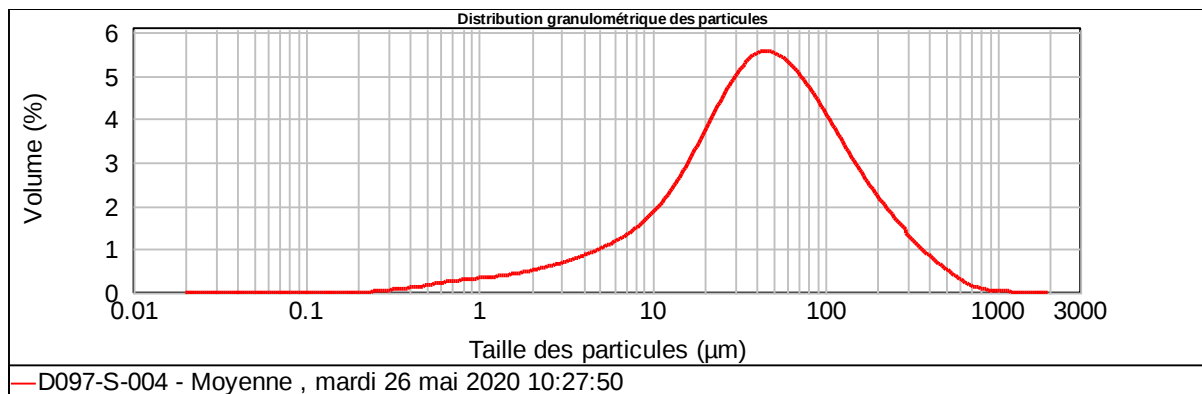
Composition granulométrique des sédiments collectés à la station ST03 par benne de type Vanne Veen.

Référence AEL	ST03					
	% Classe de taille					
	0,02 à 2,00 µm	2,0 à 20 µm	20 à 40 µm	40 à 63 µm	63 à 200 µm	200 à 2000 µm
D097-S-001	6,20	38,10	21,80	14,41	18,53	0,96
D097-S-002	3,24	22,93	21,18	17,68	32,18	2,79
D097-S-003	3,11	21,90	21,23	16,22	28,77	8,76



Composition granulométrique des sédiments collectés à la station ST06 par benne de type Vanne Veen.

Référence AEL	ST06					
	Distribution granulométrique (%)					
	0,02 à 2,00 μm	2,0 à 20 μm	20 à 40 μm	40 à 63 μm	63 à 200 μm	200 à 2000 μm
D097-S-004	3,57	27,03	25,55	17,82	24,56	1,48
D097-S-005	2,36	16,07	14,30	12,23	34,12	20,92
D097-S-006	2,04	13,25	12,02	9,36	18,07	45,26



Annexe 4

COLONNE D'EAU : METAUX DISSOUS

Concentrations de métaux dissous mesurées par DGT™ à mi-profondeur à la station ST03 lors de la campagne de suivi de janvier à mai 2020.

Période		Ag (µg/L)	Cd (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
21/01/2020	29/01/2020	<0,05	<0,05	<0,05	0,165	0,366	0,117	0,250	<0,05	<5
29/01/2020	06/02/2020	<0,05	<0,05	0,053	1,772	0,303	0,109	0,306	0,105	<5
06/02/2020	14/02/2020	<0,05	<0,05	0,053	0,227	0,341	0,097	0,278	<0,05	<5
14/02/2020	22/02/2020	<0,05	<0,05	0,054	0,106	0,190	0,065	0,282	<0,05	<5
22/02/2020	01/03/2020	<0,05	<0,05	0,088	0,062	0,269	0,219	0,437	<0,05	<5
01/03/2020	09/03/2020	<0,05	<0,05	0,412	0,106	7,582	1,900	0,709	<0,05	<5
09/03/2020	17/03/2020	<0,05	<0,05	0,186	0,158	0,395	0,850	0,785	<0,05	<5
17/03/2020	25/03/2020	<0,05	<0,05	0,097	<0,05	0,156	0,367	0,507	<0,05	<5
25/03/2020	02/04/2020	<0,05	<0,05	0,261	0,146	3,502	3,166	0,564	<0,05	<5
02/04/2020	10/04/2020	<0,05	<0,05	0,189	0,070	3,796	2,510	0,474	<0,05	<5
10/04/2020	18/04/2020	<0,05	<0,05	0,198	<0,05	7,250	2,331	0,445	<0,05	<5
18/04/2020	26/04/2020	<0,05	<0,05	0,331	<0,05	13,798	4,463	0,508	<0,05	<5

COLONNE D'EAU : METAUX DISSOUS

Concentrations de métaux dissous mesurées par DGT™ à mi-profondeur à la station ST06 lors de la campagne de suivi de janvier à mai 2020.

Période		Ag (µg/L)	Cd (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
21/01/2020	29/01/2020	<0,05	<0,05	0,078	<0,05	0,246	<0,05	0,445	<0,05	<5
29/01/2020	06/02/2020	<0,05	<0,05	0,057	<0,05	0,391	<0,05	0,409	<0,05	<5
06/02/2020	14/02/2020	<0,05	<0,05	0,056	0,407	0,377	<0,05	0,353	<0,05	<5
14/02/2020	22/02/2020	<0,05	<0,05	0,156	0,097	28,996	0,392	0,654	<0,05	<5
22/02/2020	01/03/2020	<0,05	<0,05	0,070	0,419	0,365	0,063	0,340	<0,05	<5
01/03/2020	09/03/2020	<0,05	<0,05	0,671	<0,05	32,212	0,408	1,742	<0,05	<5
09/03/2020	17/03/2020	<0,05	<0,05	0,104	<0,05	0,369	0,129	1,176	<0,05	<5
17/03/2020	25/03/2020	<0,05	<0,05	0,092	0,096	0,677	0,125	0,670	<0,05	<5
25/03/2020	02/04/2020	<0,05	<0,05	0,132	<0,05	0,371	0,289	0,735	<0,05	<5
02/04/2020	10/04/2020	<0,05	<0,05	0,157	<0,05	0,175	0,072	0,875	<0,05	<5
10/04/2020	18/04/2020	<0,05	<0,05	0,102	0,086	0,483	0,331	0,688	<0,05	<5
18/04/2020	26/04/2020	<0,05	<0,05	0,072	0,065	0,402	0,232	0,627	<0,05	<5

Annexe 5

COURANTOLOGIE

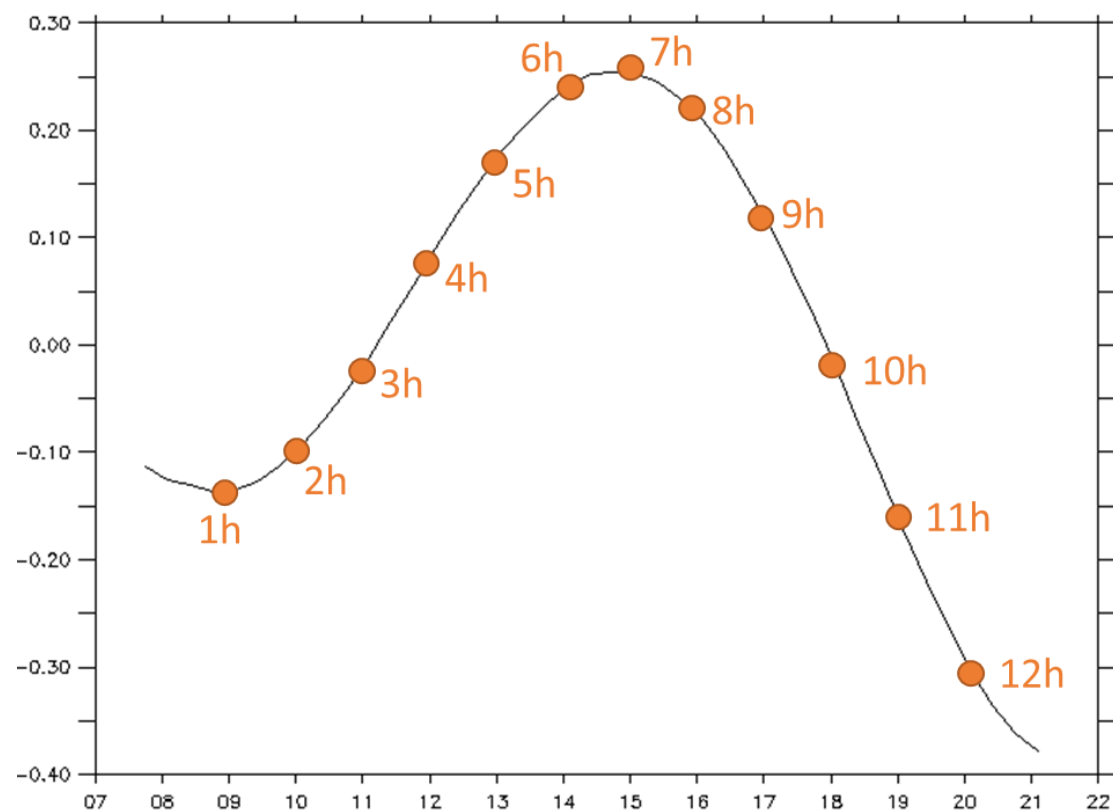
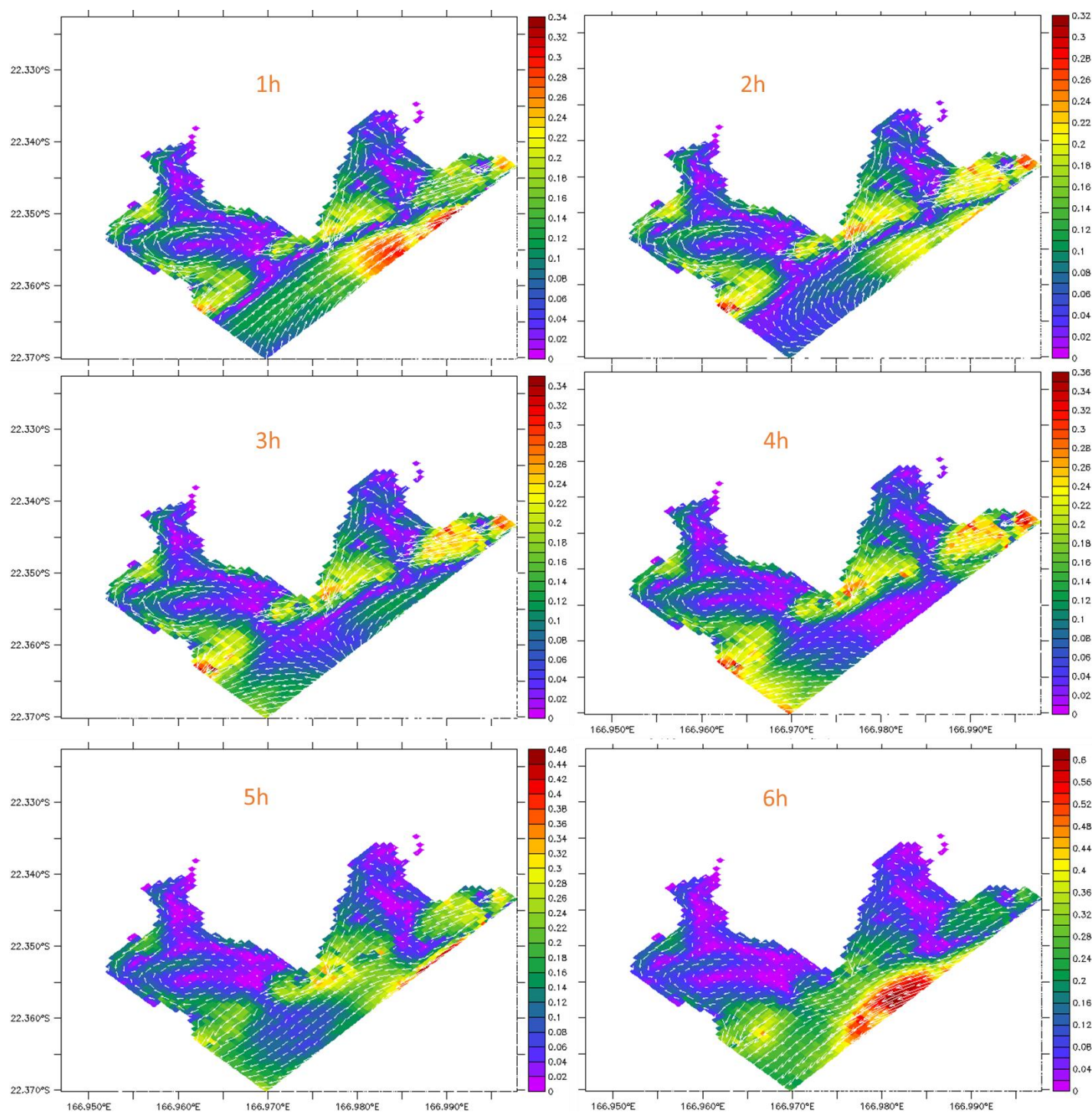
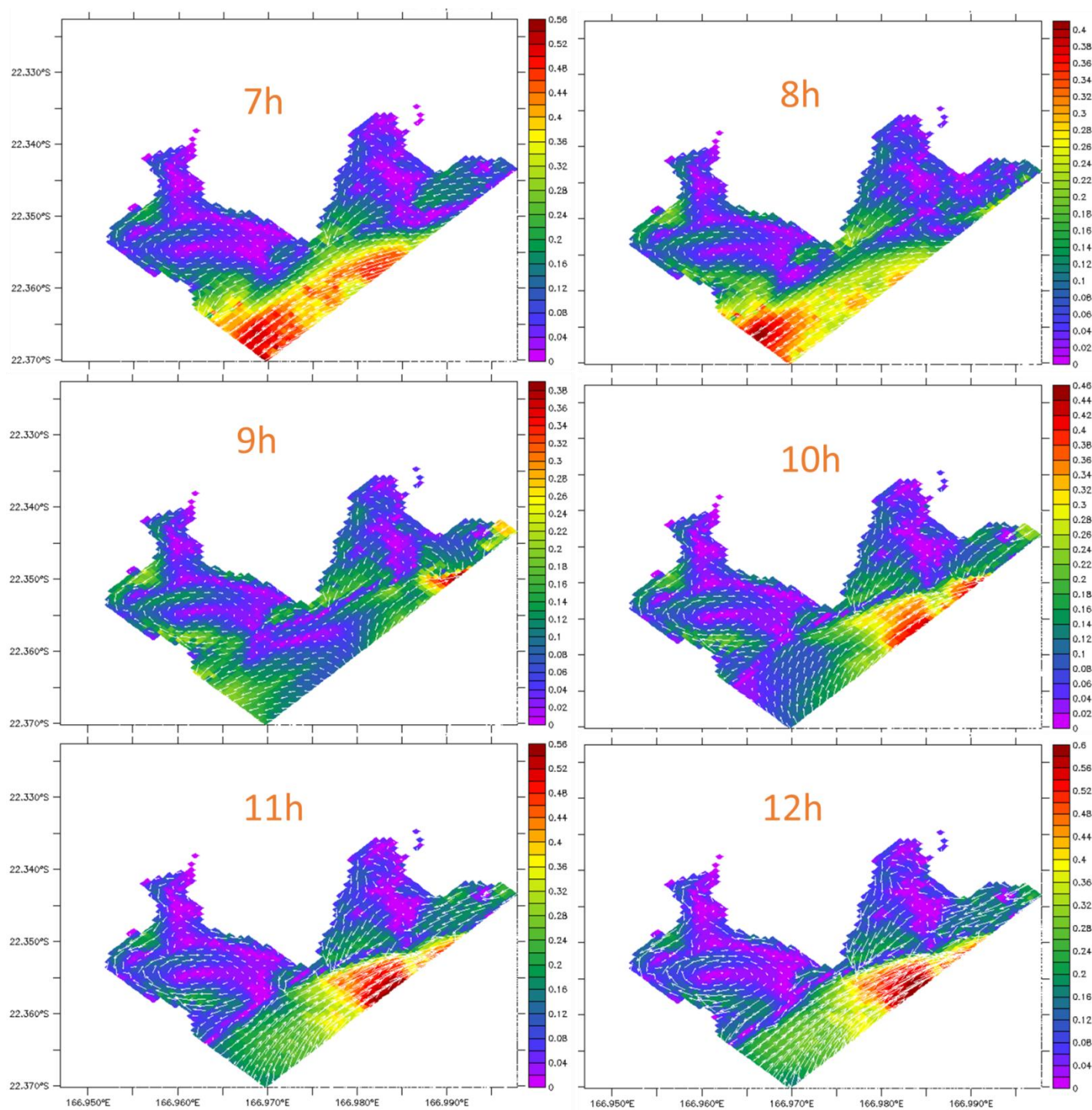


Illustration de la variation de la hauteur d'eau (en cm) sur un cycle de marée et représentation des heures d'extraction pour cartographie.



Représentation des intensités (nuance de couleurs, en m/s) et direction (vecteurs) des courants de surface au cours d'un cycle de marée.



Représentation des intensités (nuance de couleurs, en m/s) et direction (vecteurs)des courants de surface au cours d'un cycle de marée.

Annexe 6

METHODOLOGIE

La technique de « l'échantillonnage passif » qui a été employée, permet la surveillance de l'environnement en utilisant un dispositif de piégeage des métaux dissous par accumulation sur un support chimique (complexant) par simple exposition dans l'eau, (in-situ). Cette stratégie contraste avec l'échantillonnage ponctuel, qui consiste à prélever un volume d'eau à un moment donné pour lequel la concentration est calculée. A l'inverse, l'échantillonnage passif permet les calculs de concentrations chimiques moyennes qui sont représentatives de la durée d'exposition d'un « échantillonneur passif » de type DGT™ ; cette exposition étant comprise entre un et plusieurs jours.

1. La Technique DGT™

Les DGT™ sont des dispositifs simples à mettre en œuvre. Ils accumulent (sur une résine) les cations métalliques dissous les plus "labiles" (ions hydratés, complexes minéraux, « petits » complexes organiques) en fonction de leur concentration dans le milieu et du temps d'immersion.

Le dispositif est composé d'un support plastique, sur lequel sont disposés successivement une phase chimique pour laquelle les cations métalliques ont une très forte affinité (résine Chelex 100), un hydrogel de diffusion d'épaisseur connue et un filtre de protection (membrane) en polycarbonate. Les cations métalliques migrent à travers le gel de diffusion et se fixent de façon irréversible sur la résine, La diffusion, contrôlée par les propriétés physiques du gel, ainsi que la température et la concentration en métal dans le milieu à échantillonner, déterminent la cinétique d'accumulation des métaux sur la résine.

Au cours de l'immersion, la température de l'eau doit être relevée car les coefficients de diffusion varient sensiblement avec celle-ci.

Après l'exposition du DGT™, l'élution de la résine et le dosage de la solution, la concentration moyenne en métal dans le milieu aquatique (CDGT) est estimée par l'équation suivante :

$$CDGT = M \Delta g / (DtA)$$

Avec :

- (M) est la masse de cations métalliques concentrée sur la résine et déterminée après analyse,
- (Δg) est l'épaisseur de gel,
- (t) le temps d'exposition,
- (A) la surface du gel exposée, et
- (D) le coefficient de diffusion du métal à travers le gel,

Note : Les métaux fixés sur la résine sont récupérés à l'aide d'une solution d'acide nitrique. La méthode analytique pour mesurer les métaux contenus dans l'éluât acide, selon les possibilités analytiques du laboratoire, s'effectue par ICP-MS, ICP-OES ou par absorption atomique four graphite (AAS-GF).

2. Passeur d'échantillons passif (THOË)

THOË est un passeur automatique d'échantillonneurs passifs de type DGT™ qui permet d'exposer séquentiellement in-situ chaque dispositif DGT™ sur une période de temps préprogrammée. Il permet ainsi de collecter des séries chronologiques ininterrompues de concentrations. L'échantillonneur peut exposer jusqu'à 12 dispositifs DGT™ à chaque période de déploiement en mer.

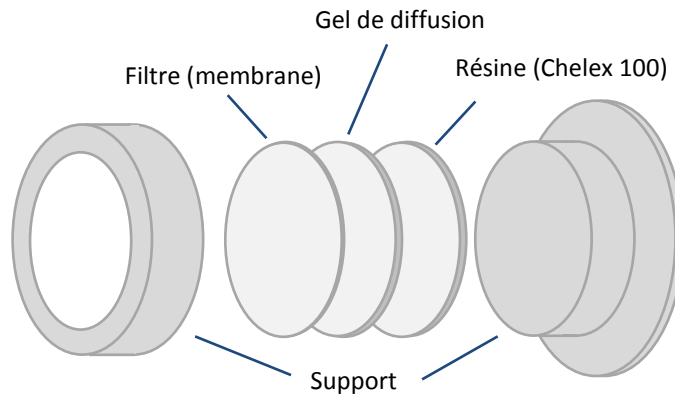


Diagramme explosé d'un dispositif DGT.

3. Techniques d'analyses des éléments

a) Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} .

Le suivi des niveaux de concentration en métaux dissous sera assuré par des échantillonneurs passifs (DGT = Diffusive Gel in Thin layer)

Au laboratoire, chaque DGT™ sera conditionnée avant immersion puis, éluee avec une solution acide après leur récupération. Les éléments seront analysés par ICP-MS.

b) Chrome hexavalent (CrVI)

Après filtration le dosage sera conduit par Voltamétrie. Cette méthode est spécialement adaptée à la matrice saline (Achterberg et Van den Berg, 1994).

c) Arsenic (As_{total})

L'arsenic dissous total est analysé par spectrométrie de masse (ICP-MS) en direct après dilution, comme pour certains autres éléments dont la concentration dépasse naturellement le $\mu\text{g/L}$. Le dosage sera réalisé après filtration du prélèvement. Les analyses ont été réalisées par le laboratoire Micro-Polluant.

d) 4. Calcium (Ca_{total})

Le dosage du Calcium dissous total sera déterminé par ICP-OES (Spectrométrie d'Emission Optique couplée à une torche plasma, selon la norme NF EN 11885, après filtration.

Limites de quantification pour des éléments inorganiques à déterminer dans l'eau de mer.

Elément	Technique de prélèvement	Méthode d'analyse	LQ (µg/L)
Cd*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,05
Co*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,05
Cu*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,05
Fe*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,1
Mn*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,05
Ni*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,05
Pb*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	0,05
Zn*	Echantillonneur passif (DGT)	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	5
As	Ponctuel	ICP-MS (NF 17294-2:2016)	1
Cr/CrVI	Ponctuel	Voltamétrie (AdSV)	0,05
Ca	Ponctuel	ICP-OES (NF 11858)	50

*Pour les éléments déterminés par DGT, les LQ sont données pour des périodes de déploiement de 7 jours.

4. Analyse des sédiments

e) 1. Granulométrie Laser

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silt et argiles) est conduite sur la fraction brute ($\varnothing < 2000 \mu\text{m}$) par Granulométrie Laser selon la méthode interne.

Les analyses ont été réalisées par AEL/UNC.

1. Dosage de : Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S et Zn

L'analyse de la concentration en métaux totaux contenus dans les sédiments sera conduite, après digestion par eau régale (ISO 12914), par ICP-OES (NF ISO 22036), exception faite de Hg qui sera analysé par le laboratoire ALS selon la norme NF ISO 16772.

Les analyses ont été réalisées par AEL.

2. Méthyl-mercure

Le méthyl-mercure est dosé par spectrométrie de masse (GC-ICP-SFMS) après extraction.

Les analyses ont été réalisées au laboratoire ALS.

3. Carbone Organique Total

La concentration de Carbone Total (CT) est déterminée par oxydation catalytique à 900°C sous flux d'O₂; le CO₂ produit étant détecté par Infra-Rouge (IR).

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire ALS.

4. Composés Organiques

Dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) - Méthode par chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse (CG-SM) NF ISO 18287 Août 2006

Dosage des phtalate - Méthode par chromatographie en phase gazeuse avec détection par capture d'électrons (ECD) (GC/ECD) US EPA 8061A.

Dosage des octyphénol et nonyphénol - Méthode par chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse (CG-SM) Standard européenne BT WI CSS99040.

Toutes ces analyses ont été réalisées au laboratoire ALS.

5. Méthodologie analytique et limites de quantification

Pour les sédiments, les limites de quantification pour le dosage des éléments métalliques, le calcium et les composés organiques sont regroupées dans les tableaux 3 et tableau 4.

Tableau 4. Limites de quantification pour l'analyse des éléments dans les sédiments.

Métaux	Méthode d'analyse	LQ (mg/kg MS)
Ag	ICP-OES	10
As	ICP-OES	50
Ca	ICP-OES	50
Cd	ICP-OES	50
Co	ICP-OES	12
Cr	ICP-OES	50
Cu	ICP-OES	10
Fe	ICP-OES	50
Hg	SFX	0,01
Mn	ICP-OES	20
Ni	ICP-OES	50
Pb	ICP-OES	50
S	ICP-OES	50
Zn	ICP-OES	250

6. Bulletin d'analyse externe



4, rue de Bort-lez-Orignas
ZAC de Grimaud / BP 40 010
57 070 SAINT JULIEN-LES-METZ
Téléphone : 03 87.50.60.70
Télécopie : 03 87.50.61.31
contact@mp-tech.net
www.mp-tech.net

RAPPORT D'ANALYSES VAPC017_MEY_R1

AEL/LEA Nouméa
Madame Marion DROUZY
BP A5 promenade R. Laroque

98848 - Nouméa cedex

Vos références Réf. CAEL837 - n°Dossier AEL: D002-E-d1+D097

Echantillon reçu le 16/03/2020 Analyse effectuée le : 20/03/2020

Norme : Suivant NF EN ISO 17294-2

Technique : ICP_MS

Matrice : Eaux salines ou saumâtres
Nom du préleveur : Non communiqué
Température de réception des échantillons : 16 °C

Résultats sous réserve, température de l'enceinte non-conforme à réception

Date	Description	Validé par
23/03/2020	Rapport final	Maxime CACHIA
		

Responsable d'analyse

Référence externe :	
Référence interne :	
Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	

Référence externe :	
Référence interne :	
Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	

Référence externe :	
Référence interne :	
Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	

Référence externe :	
Référence interne :	
Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	

Référence externe :	
Référence interne :	
Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	

Référence externe : D0097a1-E-001	
Référence interne : VAPC112	
Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	1,81

Référence externe : D0097a1-E-002
Référence interne : VAPC113

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	2,00

Référence externe : D0097a2-E-001
Référence interne : VAPC114

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	1,88

Référence externe : D0097a2-E-002
Référence interne : VAPC115

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	1,83

MicroPolluants Technologie SA

9 sur 9 Pages

VAPC017_MEY_R1

La reproduction de ce rapport d'analyses n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 9 page(s) et 0 annexe(s).
Le présent rapport ne concerne que les objets soumis à essais.



4, rue de Bort-les-Orgues
ZAC de Grimon / BP 40 010
57 070 SAINT JULIEN-LES-METZ
Téléphone : 03 87.50.60.70
Télécopie : 03 87.50.61.31
contact@mp-tech.net
www.mp-tech.net

RAPPORT D'ANALYSES VAPG002_MEY_R1

AEL/LEA Nouméa
Monsieur Benjamin MORETON
BP A5 promenade R. Laroque

98848 - Nouméa cedex

Vos références Analyse selon devis 2006-002LD

Echantillon reçu le 26/06/2020

Analyse effectuée le : 03/07/2020

Norme : Suivant NF EN ISO 17294-2

Technique : ICP_MS

Matrice : Eaux salines ou saumâtres
Nom du préleveur : Non communiqué
Température de réception des échantillons : 14 °C

Résultats sous réserve, température de l'enceinte non-conforme à réception

Date	Description	Validé par
06/07/2020	Rapport final	Marie VINGERT
		

Responsable d'analyse

MicroPolluants Technologie SA

1 sur 3 Pages

VAPG002_MEY_R1

Référence externe : DO97a3-E-001
Référence interne : VAPF062

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	2,13

Référence externe : DO97a3-E-002
Référence interne : VAPF063

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	2,02

Référence externe : DO97a4-E-001
Référence interne : VAPF064

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	2,00

Référence externe : DO97a4-E-002
Référence interne : VAPF065

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	1,85

Référence externe : DO97a5-E-001
Référence interne : VAPF066

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	1,81

Référence externe : DO97a5-E-002
Référence interne : VAPF067

Eléments totaux	Concentration en µg/L
As	1,89

MicroPolluants Technologie SA

3 sur 3 Pages

VAPG002_MEY_R1

La reproduction de ce rapport d'analyses n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 page(s) et 0 annexe(s).
Le présent rapport ne concerne que les objets soumis à essais.



CERTIFICATE OF ANALYSIS

Work Order	: PR2025471	Issue Date	: 30-Mar-2020
Customer	: AELULEA	Laboratory	: ALS Czech Republic, s.r.o.
Contact	: Benjamin Moreton	Contact	: Client Service
Address	: 101 Promenade Roger Laroque – BP A5 98848 Nouméa Cédex New Caledonia	Address	: Na Harfe 336/9 Prague 9 - Vysocany 190 00 Czech Republic
E-mail	: bmoreton@ael-environnement.nc	E-mail	: customer.support@alsglobal.com
Telephone	: ----	Telephone	: +420 226 226 228
Project	: ENR 15 27	Page	: 1 of 4
Order number	: ----	Date Samples	: 12-Mar-2020
		Received	
		Quote number	: PR2017AELNC-NC0001 (CZ-200-17-0502)
Site	: ----	Date of test	: 13-Mar-2020 - 27-Mar-2020
Sampled by	: client	QC Level	: ALS CR Standard Quality Control Schedule

General Comments

This report shall not be reproduced except in full, without prior written approval from the laboratory.

The laboratory declares that the test results relate only to the listed samples. If the section "Sampled by" of the Certificate of analysis states: "Sampled by Customer" then the results relate to the sample as received.

Sample for the method S-TOC1-IR is dried at 105 °C and pulverized prior to analysis.

Responsible for accuracy

Signatories
Zdeněk Jiráček

Position
Environmental Business Unit
Manager

Testing Laboratory No. 1163
Accredited by CAI according to
CSN EN ISO/IEC 17025:2018



Issue Date : 30-Mar-2020
 Page : 2 of 4
 Work Order : PR2025471
 Customer : AEL/LEA



Analytical Results

Sub-Matrix: SEDIMENT

Parameter	Method	LOR	Unit	Client sample ID		D097-S-001		D097-S-002		D097-S-003	
				Laboratory sample ID		PR2025471-001		PR2025471-002		PR2025471-003	
				Client sampling date / time		[12-Mar-2020]		[12-Mar-2020]		[12-Mar-2020]	
Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU
Physical Parameters											
Dry matter @ 105°C	S-DRY-GRCI	0.10	%	55.1	± 6.0%	55.0	± 6.0%	59.4	± 6.0%		
Nonmetallic Inorganic Parameters											
Total Organic Carbon	S-TOC1-IR	0.10	% DW	0.87	± 15.3%	0.72	± 15.4%	0.65	± 15.5%		
Extractable Metals / Major Cations											
Mercury	S-HG-AFSHB	0.010	mg/kg DW	0.026	± 20.0%	0.013	± 20.0%	0.014	± 20.0%		
Miscellaneous Organic Compounds											
Methyl mercury	S-MEHG	0.05	µg/kg	0.233	—	0.298	—	0.259	—		

Sub-Matrix: SEDIMENT

Parameter	Method	LOR	Unit	Client sample ID		D097-S-004		D097-S-005		D097-S-006	
				Laboratory sample ID		PR2025471-004		PR2025471-005		PR2025471-006	
				Client sampling date / time		[12-Mar-2020]		[12-Mar-2020]		[12-Mar-2020]	
Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU
Physical Parameters											
Dry matter @ 105°C	S-DRY-GRCI	0.10	%	51.7	± 6.0%	55.3	± 6.0%	56.4	± 6.0%		
Nonmetallic Inorganic Parameters											
Total Organic Carbon	S-TOC1-IR	0.10	% DW	1.05	± 15.2%	1.01	± 15.2%	1.00	± 15.2%		
Extractable Metals / Major Cations											
Mercury	S-HG-AFSHB	0.010	mg/kg DW	0.019	± 20.0%	0.015	± 20.0%	0.011	± 20.0%		
Miscellaneous Organic Compounds											
Methyl mercury	S-MEHG	0.05	µg/kg	0.243	—	0.333	—	0.45	—		

Sub-Matrix: SEDIMENT

Parameter	Method	LOR	Unit	Client sample ID		D097-S-007		D097-S-008		---	
				Laboratory sample ID		PR2025471-007		PR2025471-008		---	
				Client sampling date / time		[12-Mar-2020]		[12-Mar-2020]		---	
Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU	Result	MU
Physical Parameters											
Dry matter @ 105°C	S-DRY-GRCI	0.10	%	62.3	± 6.0%	56.8	± 6.0%	---	---	---	---
Polycyclic Aromatics Hydrocarbons (PAHs)											
Naphthalene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.023	---	<0.033	---	---	---	---	---
Acenaphthylene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.004	---	<0.0043	---	---	---	---	---
Acenaphthene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0059	---	<0.0065	---	---	---	---	---
Fluorene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0014	---	<0.0079	---	---	---	---	---
Phenanthrene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.014	---	<0.017	---	---	---	---	---
Anthracene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Fluoranthene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0058	---	<0.0083	---	---	---	---	---
Pyrene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0035	---	<0.005	---	---	---	---	---
Benz(a)anthracene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Chrysene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Benzo(b)fluoranthene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Benzo(k)fluoranthene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Benzo(a)pyrene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0013	---	---	---	---	---
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Dibenzo(a,h)anthracene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0064	---	---	---	---	---
Benzo(g,h,i)perylene	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	<0.0012	---	<0.0017	---	---	---	---	---
Sum of PAH - Lowerbound	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	0	---	0	---	---	---	---	---
Sum of PAH - Upperbound	S-PAHHMS02	-	mg/kg DW	0.068	---	0.096	---	---	---	---	---
Alkylphenols											
Nonylphenol (mixture of isomers)	S-AEOGMS01	0.10	mg/kg DW	<0.10	---	<0.10	---	---	---	---	---
4-t-Octylphenol	S-AEOGMS01	0.010	mg/kg DW	<0.010	---	<0.010	---	---	---	---	---
Phthalates											
Dimethyl phthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	---	---
Diethyl phthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	---	---

Right Solutions • Right Partner

www.alsglobal.eu

Issue Date : 30-Mar-2020
 Page : 3 of 4
 Work Order : PR2025471
 Customer : AEL/LEA



Sub-Matrix: SEDIMENT				Client sample ID	D097-S-007		D097-S-008		---	
				Laboratory sample ID	PR2025471-007		PR2025471-008		---	
				Client sampling date / time	[12-Mar-2020]		[12-Mar-2020]		---	
Parameter	Method	LOR	Unit	Result	MU	Result	MU	Result	MU	
Phthalates - Continued										
Di-n-propylphthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Di-n-butyl phthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Di-isobutylphthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Di-pentylphthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Butyl benzyl phthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Di-cyclohexylphthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Di-n-octylphthalate	S-PTHGMS01	0.80	mg/kg DW	<0.80	---	<0.80	---	---	---	
Sum of 10 Phthalates	S-PTHGMS01	8.0	mg/kg DW	<8.0	---	<8.0	---	---	---	

When sampling time information is not provided by the client, sampling dates are shown without a time component. In these instances, the time component has been assumed by the laboratory for processing purposes. If no sampling date is provided, the sampling date will be assumed by the laboratory and displayed in brackets without a time component. Measurement uncertainty is expressed as expanded measurement uncertainty with coverage factor $k = 2$, representing 95% confidence level.

Key: LOR = Limit of reporting; MU = Measurement Uncertainty. The MU does not include sampling uncertainty.

The end of result part of the certificate of analysis

Brief Method Summaries

Analytical Methods	Method Descriptions
Location of test performance: Bendlova 1587/7 Ceska Lipa Czech Republic 470 01	
S-DRY-GRCI	CZ_SOP_D06_01_045 (CSN ISO 11465, CSN EN 12880, CSN EN 14346), CZ_SOP_D06_07_046 (CSN ISO 11465, CSN EN 12880, CSN EN 14346, CSN 46 5735) Determination of dry matter by gravimetry and determination of moisture by calculation from measured values.
S-TOC1-IR	CZ_SOP_D06_07_117 (methodology of Elementar Company, CSN ISO 10694, CSN EN 13137:2002, CSN EN 15936) Determination of total carbon (TC), total organic carbon (TOC) by combustion method with IR detection and calculation of total inorganic carbon (TIC) and carbonates from measured values.
Location of test performance: Na Harfe 336/9 Prague 9 - Vysočany Czech Republic 190 00	
S-AEOGMS01	CZ_SOP_D06_03_167 (European Standard BT WI CSS99040) Determination of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates by gas chromatography method with MS or MS/MS detection and calculation of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates sums from measured values
S-DRY-GRCI	CZ_SOP_D06_01_045 (CSN ISO 11465, CSN EN 12880, CSN EN 14346), CZ_SOP_D06_07_046 (CSN ISO 11465, CSN EN 12880, CSN EN 14346, CSN 46 5735) Determination of dry matter by gravimetry and determination of moisture by calculation from measured values.
S-HG-AFSHB	CZ_SOP_D06_02_096 (CSN EN ISO 17852, PSA Application Note 025, ISO 16772, samples prepared as per CZ_SOP_D06_02_002 (CSN EN 13657, ISO 11466) chap. 10.3 to 10.16, 10.17.5, 10.17.6, 10.17.9 to 10.17.14) Determination of Mercury by Fluorescence Spectrometry. Sample was homogenized and mineralized by aqua regia prior to analysis.
S-MEHG	Methylmercury in soils, solids, and sediments by ID-GC-ICP-MS performed by ALS Sweden -Premium Analyses
S-PTHGMS01	CZ_SOP_D06_03_159 except chap. 9.1 (US EPA 8061A, CPSC-CH-C1001-09.3) Determination of phthalates by gas chromatography method with MS detection and calculation of phthalates sums from measured values
Location of test performance: V Rajl 900 Pardubice - Zelene Predmestí Czech Republic 530 02	
S-PAHHMS02	CZ_SOP_D06_06_180 except chap. 10.3.3.1 - 10.3.3.6, 10.3.3.8 - 10.3.3.10, 10.3.5 (US EPA 429, ISO 11338, US EPA 3540): Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by isotope dilution method using HRGC-HRMS and calculation of polyaromatic hydrocarbons sums from measured values. The samples were stored in laboratory in the darkness and under temperature <4°C. Actual LOQ are noticed in the annex.
Preparation Methods	
Location of test performance: Bendlova 1587/7 Ceska Lipa Czech Republic 470 01	
*S-PPHOM.07	CZ_SOP_D06_07_P01 Preparation of solid samples for analysis (crushing, milling and pulverizing).
*S-PPHOM0.3	CZ_SOP_D06_07_P01 Preparation of solid samples for analysis (crushing, milling and pulverizing).
Location of test performance: Na Harfe 336/9 Prague 9 - Vysočany Czech Republic 190 00	
*S-PPHOM2	Drying and sieving of sample on the grain size < 2 mm

Issue Date : 30-Mar-2020
Page : 4 of 4
Work Order : PR2025471
Customer : AEL/LEA



A "" symbol preceding any method indicates laboratory or subcontractor non-accredited test. In the case when a procedure belonging to an accredited method was used for non-accredited matrix, would apply that the reported results are non-accredited. Please refer to General Comment section on front page for information. If the report contains subcontracted analysis, those are made in a subcontracted laboratory outside the laboratories ALS Czech Republic, s.r.o.
The calculation methods of summation parameters are available on request in the client service.



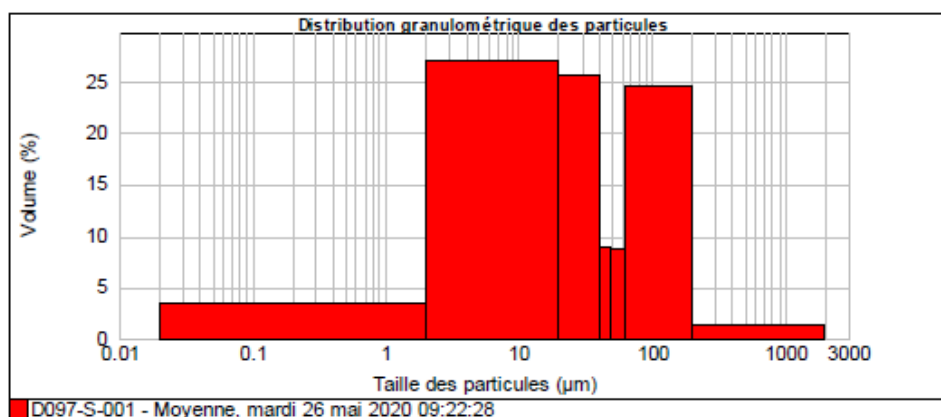
MASTERSIZER 2000

Rapport d'analyse

Nom de l'échantillon: D097-S-001 - Moyenne Ref SOP: Mesuré le: mardi 26 mai 2020
 Origine: Mesuré par: Administrateur Calculé le: mercredi 27 mai 2020
 Référence de lot: Source du résultat: Moyenne

Particule: Fraunhofer Accessoire: Hydro 2000S (A) Obscurité: 5.21 %
 Indice de réfraction particule: 0.000 Absorption: 0 Modèle de calcul: Analyse standard
 Dispersant: Eau Gamme: 0.020 à 2000.0... μm Résiduel pondéré: 0.214 %
 Indice de réfraction dispersant: 1.330 Result Emulation: Dé...

Concentration: 0.0081 %Vol Moyenne en volume D[4,3]: 48.110 μm Surface spécifique: 0.58 m^2/g
 Span (10% - 90%): 2.972 Moyenne en surface D[3,2]: 10.720 μm Uniformité: 0.924
 Type de distribution: Volume
 d(0.1): 5.860 μm d(0.5): 34.387 μm d(0.9): 108.067 μm



Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %
0.020	3.57	20.000	25.55	50.000	8.79	200.000	1.48				
2.000	27.03	40.000	9.02	63.000	24.96	2000.000					
20.000		50.000		200.000							

Notes de l'opérateur:



MASTERSIZER



Rapport d'analyse

Nom de l'échantillon: D097-S-002 - Moyenne

Ref SOP:

Mesuré le: mardi 26 mai 2020

Origine:

Mesuré par: Administrateur

Calculé le: mardi 26 mai 2020

Référence de lot:

Source du résultat: Moyenne établie

Particule:	Fraunhofer	Accessoire:	Hydro 2000S (A)	Obscuration:	6.87 %
Indice de réfraction particule:	0.000	Absorption:	0	Modèle de calcul:	Analyse standard
Dispersant:	Eau	Gamme:	0.020 à 2000.000 µm	Résiduel pondéré:	0.106 %
Indice de réfraction dispersant:	1.330	Result Emulation:	Dé...		

Concentration: 0.0071 %Vol Moyenne en volume D[4,3]: 40.679 µm Surface spécifique: 0.831 m²/g

Span (10% - 90%): 3.620

Moyenne en surface D[3,2]: 7.217 µm

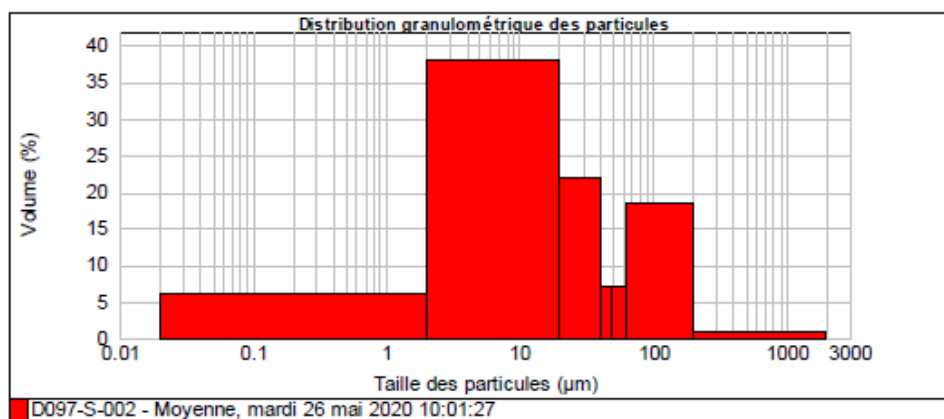
Uniformité: 1.26

Type de distribution: Volume

d(0.1): 3.187 µm

d(0.5): 24.175 µm

d(0.9): 90.688 µm



Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %
0.020	6.20	20.000	21.80	50.000	7.16	200.000	0.96				
2.000	38.10	40.000	7.25	63.000	18.53	2000.000					
20.000		50.000		200.000							

Notes de l'opérateur:



MASTERSIZER



Rapport d'analyse

Nom de l'échantillon: D097-S-003 - Moyenne

Ref SOP:

Mesuré le: mardi 26 mai 2020

Origine:

Mesuré par: Administrateur

Calculé le: mardi 26 mai 2020

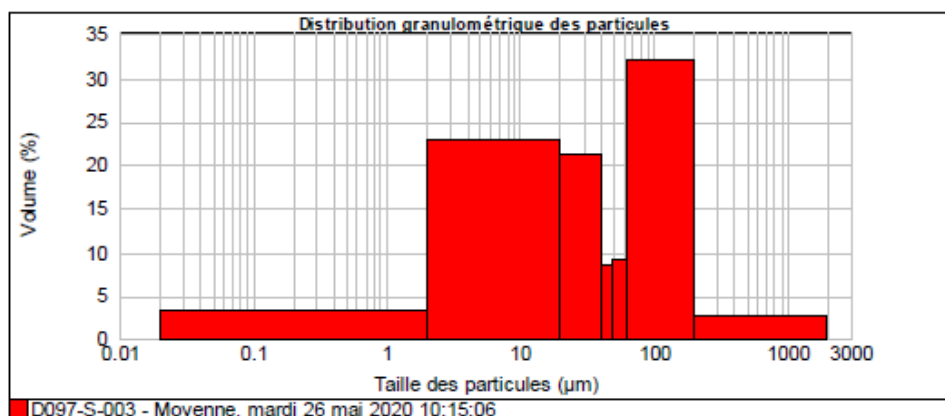
Référence de lot:

Source du résultat: Moyenne établie

Particule:	Fraunhofer	Accessoire:	Hydro 2000S (A)	Obscurcissement:	4.31 %
Indice de réfraction particule:	0.000	Absorption:	0	Modèle de calcul:	Analyse standard
Dispersant:	Eau	Gamme:	0.020 à 2000.000 µm	Résiduel pondéré:	0.128 %
Indice de réfraction dispersant:	1.330	Result Emulation:	Dé...		

Concentration:	0.0080 %Vol	Moyenne en volume D[4,3]:	58.648 µm	Surface spécifique:	0.472 m ² /g
Span (10% - 90%):	2.893	Moyenne en surface D[3,2]:	12.705 µm	Uniformité:	0.908
Type de distribution:	Volume				

d(0.1): 6.559 µm d(0.5): 42.948 µm d(0.9): 130.823 µm



Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %
0.000	3.24	20.000	21.18	60.000	9.16	200.000	2.79				
2.000	22.93	40.000	8.51	60.000	32.18						
20.000		80.000		200.000							

Notes de l'opérateur:



MASTERSIZER



Rapport d'analyse

Nom de l'échantillon: D097-S-004 - Moyenne

Ref SOP:

Mesuré le: mardi 26 mai 2020

Origine:

Mesuré par: Administrateur

Calculé le: mardi 26 mai 2020

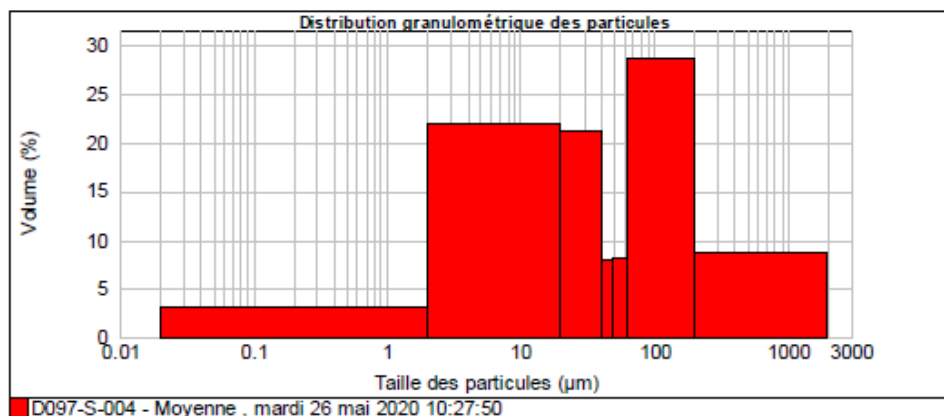
Référence de lot:

Source du résultat: Moyenne établie

Particule:	Fraunhofer	Accessoire:	Hydro 2000S (A)	Obscurité:	5.20 %
Indice de réfraction particule:	0.000	Absorption:	0	Modèle de calcul:	Analyse standard
Dispersant:	Eau	Gamme:	0.020 à 2000.000 µm	Résiduel pondéré:	0.089 %
Indice de réfraction dispersant:	1.330	Result Emulation:	Dé...		

Concentration:	0.0097 %Vol	Moyenne en volume D[4,3]:	77.217 µm	Surface spécifique:	0.469 m ² /g
Span (10% - 90%):	3.989	Moyenne en surface D[3,2]:	12.788 µm	Uniformité:	1.28
Type de distribution:	Volume				

d(0.1): 7.209 µm d(0.5): 44.405 µm d(0.9): 184.360 µm



Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %
0.020	3.11	20.000	21.23	50.000	8.18	200.000	8.76				
2.000	21.90	40.000	8.04	63.000	28.77	2000.000					
20.000		80.000		200.000							

Notes de l'opérateur:



MASTERSIZER



Rapport d'analyse

Nom de l'échantillon: D097-S-005 - Moyenne

Ref SOP:

Mesuré le: mardi 26 mai 2020

Origine:

Mesuré par: Administrateur

Calculé le: mardi 26 mai 2020

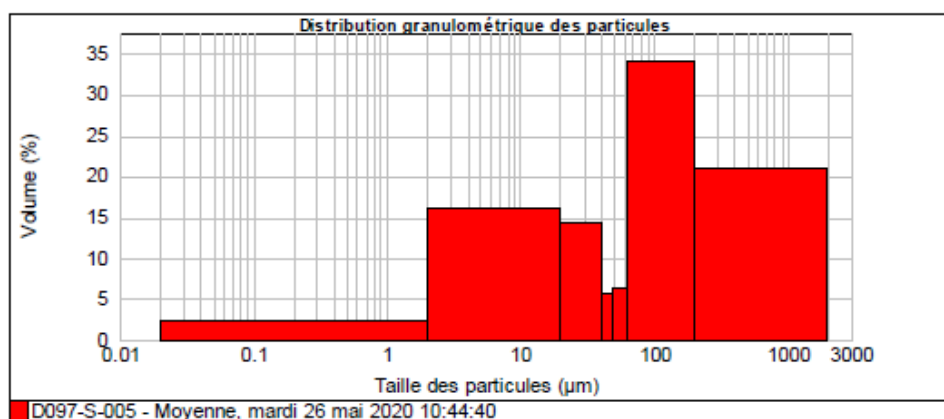
Référence de lot:

Source du résultat: Moyenne établie

Particule:	Fraunhofer	Accessoire:	Hydro 2000S (A)	Obscurité:	4.19 %
Indice de réfraction particule:	0.000	Absorption:	0	Modèle de calcul:	Analyse standard
Dispersant:	Eau	Gamme:	0.020 à 2000.000 μm	Résiduel pondéré:	0.145 %
Indice de réfraction dispersant:	1.330	Result Emulation:	Dé...		

Concentration:	0.0105 %Vol	Moyenne en volume D[4,3]:	128.869 μm	Surface spécifique:	0.353 m^2/g
Span (10% - 90%):	4.316	Moyenne en surface D[3,2]:	16.984 μm	Uniformité:	1.31
Type de distribution:	Volume				

d(0.1): 9.868 μm d(0.5): 74.692 μm d(0.9): 332.245 μm



Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %
0.020	2.36	20.000	14.30	50.000	6.47	200.000	20.92				
2.000	16.07	40.000	5.76	63.000	34.12	2000.000					
20.000		60.000		200.000							

Notes de l'opérateur:



MASTERSIZER



Rapport d'analyse

Nom de l'échantillon: D097-S-006 - Moyenne

Ref SOP:

Mesuré le: mardi 26 mai 2020

Origine:

Mesuré par: Administrateur

Calculé le: mardi 26 mai 2020

Référence de lot:

Source du résultat: Moyenne établie

Particule: Fraunhofer

Accessoire: Hydro 2000S (A)

Obscurité: 4.84 %

Indice de réfraction particule: 0.000

Absorption: 0

Modèle de calcul: Analyse standard

Dispersant: Eau

Gamme: 0.020 à 2000.000 µm

Résiduel pondéré: 0.183 %

Indice de réfraction dispersant: 1.330

Result Emulation: Dé...

Concentration: 0.0148 %Vol

Moyenne en volume D[4,3]: 280.702 µm

Surface spécifique: 0.285 m²/g

Span (10% - 90%): 5.052

Moyenne en surface D[3,2]: 21.042 µm

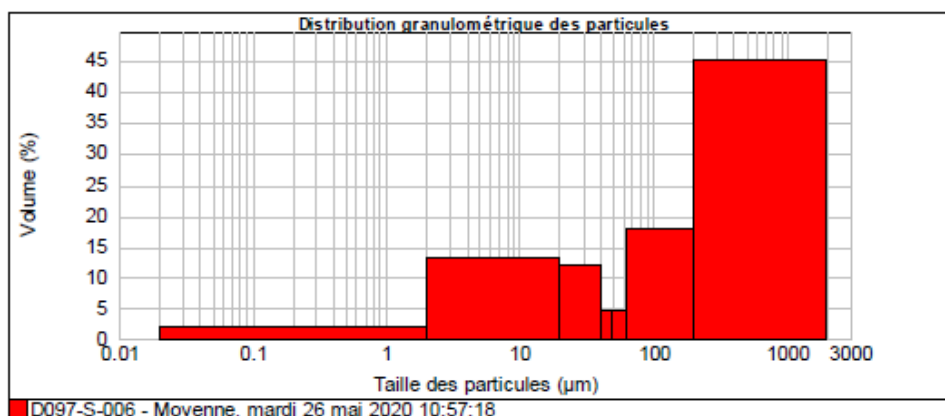
Uniformité: 1.64

Type de distribution: Volume

d(0.1): 12.046 µm

d(0.5): 144.305 µm

d(0.9): 741.067 µm



Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %	Taille (µm)	Volume en %
0.020	2.04	20.000	12.02	50.000	4.72	200.000	45.26				
2.000	13.25	40.000	4.54	63.000	18.07						
20.000		60.000		200.000							

Notes de l'opérateur: