



**SUIVI STATION ST16 : TAUX D'ACCUMULATION ET
ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS AU DROIT
DU PORT DE COMMERCE (BAIE DU PRONY) - 2012 -**



Photo de couverture AEL : Port de commerce de Vale-NC (février 2007)

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

Contrat AEL/Vale-NC n° E29928

***Suivi station St16 : Taux d'accumulation et évolution
géochimique des sédiments au droit du port de commerce
(Baie du Prony) - 2012 -***

Février 2012

Fernandez Jean Michel

Moreton Benjamin

Le Grand Hélène

Creuzil Jérémie

	N/Ref	V/Ref	
Identification	110302-VI-11	Contrat E29928	
Titre complet	Suivi station St16 : Taux d'accumulation et évolution géochimique des sédiments au droit du port de commerce (Baie du Prony) - 2012 -		
Auteurs	Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H, Creuzil J.		
Résumé	<p>Le programme de travail ici présenté a été défini en accord avec les arrêtés ICPE-2008 relatifs à l'autorisation d'exploitation des installations industrielles et portuaires. Ce document rend compte de l'étude de géochronologie et de suivi géochimique annuel des impacts sur les sédiments.</p> <p>Les sédiments montrent une très légère évolution de la plus part des paramètres étudiés, du bas vers le haut de la carotte. Ainsi, il est mis en évidence que l'influence terrigène augmente progressivement dans les horizons récents du sédiment. Deux épisodes sédimentologiques semblent se dessiner et donc la limite est située u niveau de l'horizon (10-11 cm). L'influence terrigène se traduit clairement par une augmentation progressive de Fe vers la surface, parallèlement à une diminution de Ca. Pour les autres éléments métalliques qui sont autant de signatures des apports latéritiques, la tendance est la même, avec de surcroît une très nette surconcentration dans la couche de sub-surface (1-2 cm).</p> <p>Les concentrations en métaux disponibles et les distributions verticales dans les sédiments sont du même ordre de grandeur que celles obtenues antérieurement. La disponibilité potentielle ne représentent, par rapport aux concentrations totales, que de 0,2 % à 1,5 % pour Cr et Ni, et 7,7 % et 45,3 % pour le Co et Mn. Les niveaux de surface et sub-surface sont enrichis en soufre échangeable, notamment, c'est-à-dire combiné avec la matière sédimentaire.</p> <p>La courbe du Pb-210 dans les sédiments montre un hiatus entre les horizons (10-11 cm) et (11-12 cm). Cette distribution permet de distinguer deux épisodes de décroissance radioactive. Le changement sédimentaire est daté avec vraisemblance de 1955 ±3 ans. Le taux de sédimentation à la station St16 est actuellement de 0,12 g/cm²/an.</p>		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Fernandez JM		14/02/12
Vérificateur 1	Moreton B		15/02/12
Vérificateur 2	Creuzil J		15/02/12
Approbateur(s)	Fernandez JM		16/02/12
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V1.0	Rapport définitif		16/02/12
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Casalis C	Département environnement Vale-NC		

Ce rapport est cité comme suit :

Fernandez JM, Moreton B, Le Grand H, Creuzil J, 2012. Suivi station St16 : Taux d'accumulation et évolution géochimique des sédiments au droit du port de commerce (Baie du Prony) – 2012-. Contrat AEL/Vale-NC n° E29928, 35p.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	7
2	OBJECTIFS.....	8
3	METHODOLOGIE	9
3.1	SITE D'ÉTUDE ET CONDITIONS DE CAROTTAGE.....	9
3.2	ECHANTILLONNAGE	10
3.3	PARAMÈTRES PHYSIQUES, GÉOCHIMIQUES ET ANALYSES	11
4	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	12
4.1	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA CAROTTE.....	12
4.2	GRANULOMÉTRIE DES PARTICULES	13
4.3	MINÉRALOGIE DES SÉDIMENTS.....	14
4.4	COMPOSITION GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS.....	15
4.4.1	Attaques totales	15
4.4.2	Extractions séquentielles.....	16
4.4.3	Composition en soufre	18
4.5	RADIOACTIVITÉ EN PLOMB-210	19
5	CONCLUSION	21
	REFERENCES.....	22
	LISTE DES FIGURES	23
	LISTE DES TABLEAUX	24
	LISTE DES ANNEXES	25

1 INTRODUCTION

Le programme de travail ici présenté a été défini en accord avec les arrêtés ICPE-2008 relatifs à l'autorisation d'exploitation des installations industrielles et portuaires.

Cette étude donne suite :

- D'une part, à une demande de définition de « *l'Etat de référence* » des taux d'accumulation des sédiments au niveau du port de commerce de Vale-NC ;
- D'autre part, à une étude de l'évolution géochimique des sédiments potentiellement impactés par l'activité portuaire future.

Ce document rend compte de l'étude de géochronologie destinée à l'estimation des taux d'accumulation et des résultats du programme de géochimie annuel pour le suivi des impacts de l'activité portuaire et maritime sur les sédiments.

2 OBJECTIFS

L'étude a été conduite au droit du port de commerce de Vale-NC et plus précisément au niveau de la station St16 qui fait déjà l'objet du suivi physico-chimique trimestriel de la colonne d'eau (Contrat Vale-NC/AEL, n°C2445, 2010) et d'évaluation des concentrations bio-disponibles (Contrats IRD/Vale-Inco n°C2325, et Vale-NC 2009 n°C2466, 2010).

Les objectifs du programme ici présenté étaient :

- d'effectuer une première estimation des taux d'accumulation des couches récentes. Ce calcul vient compléter les informations déjà acquises régionalement dans le cadre des suivis sédimentologiques de toute la zone potentiellement impactée par l'activité industrielle (Convention IRD/Goro-Ni n°1230, 2007) ;
- d'affiner le bilan en matière d'impact géochimique dans les sédiments de surface. Les précisions demandées portaient sur la distribution verticale des métaux totaux et extraits séquentiellement dans les sédiments, ainsi que les teneurs en soufre. La station St16 a fait l'objet d'une première étude de suivi géochimique (Contrat AEL/Vale-NC n°E20532, 2010).

3 METHODOLOGIE

RAPPEL : La méthodologie déployée dans le cadre de cette étude a été spécifiquement développée pour les niveaux de concentration à l'état de traces dans les milieux lagunaires tropicaux et les techniques ont été validées par des publications dans les revues scientifiques internationales à comité de lecture. Les techniques analytiques estampillées NF ou ISO, ne sont pas applicables dans le contexte des milieux lagunaires de la Nouvelle-Calédonie. En outre, pour répondre spécifiquement aux objectifs annoncés, il a été nécessaire de mettre en œuvre des techniques de carottage adaptées pour individualiser les couches sédimentaires d'épaisseur centimétrique.

3.1 SITE D'ÉTUDE ET CONDITIONS DE CAROTTAGE

Les opérations de terrain ont été réalisées le 10 mai 2011 à bord du Slavko. Le carottage a été effectué sur la station telle que prédéfinie dans le cahier des charges.

Le positionnement de la station a été effectué par GPS (Global Positioning System) et rapporté au référentiel universel WGS 84 (Tableau 1).

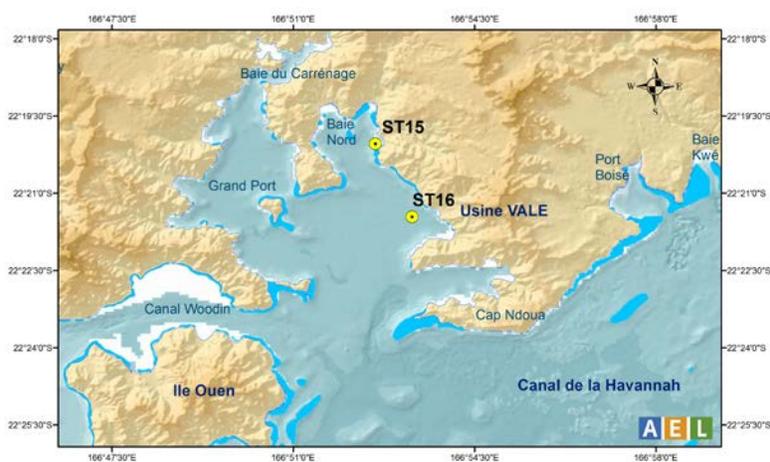


Figure 1 : Localisation du site de carottage St16 pour l'évaluation des taux d'accumulation et du suivi annuel des impacts géochimiques de l'activité portuaire.

Tableau 1 : Localisation et principales caractéristiques de la station St16. Dimension de la carotte.

Date	Station	Longitude Est	Latitude Sud	Profondeur (m)	Longueur carotte (cm)
10/05/2011	St16	166°53.300	22°21.455	45	20

Le travail de terrain a consisté à extraire une carotte sédimentaire avec un « *carottier-tube* » afin d'échantillonner, avec précision, les horizons nécessaires aux études géochronologique et géochimique.

3.2 ECHANTILLONNAGE

Une carotte de 20 cm de profondeur a été extraite afin de déterminer les taux d'accumulation dans l'aire du port de commerce de Vale-NC et de réaliser le suivi de l'impact géochimique de celui-ci. Cette carotte vient compléter les informations obtenues lors d'un premier carottage pour lequel seulement les cinq premiers centimètres avaient été analysés dans l'objectif de dresser un bilan de l'état initial des métaux potentiellement disponibles (suivi de la qualité géochimique des sédiments, contrat Vale-NC/AEL n°E20532, 2010).

Le prélèvement de la carotte 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. Le carottier est composé de tubes amovibles de 0,60 m ou 1,20 m de longueur pour un diamètre externe de 8 cm. Un tube en plexiglass a été utilisé afin de conserver 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* ».

La carotte a été maintenue verticale jusqu'à son découpage en 20 horizons d'une épaisseur égale à 1 cm. Une prise d'essai d'un volume exact de 5 mL de sédiment a été effectuée à l'aide d'une seringue dans chaque horizon pour les déterminations des densités et de la porosité des sédiments nécessaires au calcul des taux d'accumulation.

Les échantillons de carottes ont ensuite été conditionnés dans des sachets en vinyle à usage unique (Whirl-pack), congelés puis lyophilisés.

La détermination des taux d'accumulation sédimentaire a été réalisée par la méthode dite du « *Pb-210 en excès* ». Dans cet objectif, la radioactivité des radionucléides naturels ^{210}Pb et ^{226}Ra a été déterminée par « *spectrométrie gamma basse énergie* » dans chaque horizon de sédiment brut.

Les opérations réalisées sur chaque horizon de la carotte sont les suivantes :

- Analyse des populations de grains par granulométrie laser ;
- Détermination de la composition minéralogique par diffraction de rayons X (DRX) ;
- Détermination de la concentration totale des métaux après attaque des carottes par fusion alcaline et analyse par spectrométrie d'émission (ICP-OES) ;
- Détermination de la concentration en métaux associés aux différentes phases géochimiques composant les horizons. Cette étape a été conduite par extraction séquentielle puis analyse par spectrométrie d'émission (ICP-OES) ;
- Analyse du soufre, dont le suivi reflètera le niveau d'impact des activités portuaires sur le milieu marin.

Tous les échantillons de sédiments destinés au dosage des métaux ont été tamisés par voie humide afin de récupérer les fractions pélitiques (particules de diamètre inférieur à 40 μm) ; la fraction pélitique étant considérée de longue date, comme la fraction très majoritairement réactive en matière d'échanges géochimiques avec les métaux (Mayer and Fink, 1979; Ackerman, 1980; Deely and Fergusson, 1994; He and Walling, 1996).

3.3 PARAMÈTRES PHYSIQUES, GÉOCHIMIQUES ET TECHNIQUES D'ANALYSES

Les méthodes de traitement et d'analyses sont décrites en Annexe 1.

4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA CAROTTE

Les valeurs des paramètres physiques sont regroupées en Annexe 2.

L'observation visuelle de la carotte montre que les sédiments passent d'une couleur brune dans les 7 premiers centimètres à une couleur à dominante beige dans la deuxième moitié de la carotte. Ce changement de couleur suggère que les sédiments qui composent les couches de surface sont potentiellement plus riches en particules terrigènes.

Ce premier examen permet aussi de constater que les sédiments sont de nature silto-argileuse ; très fluide dans les premiers centimètres de la carotte, la vase devient plus compacte, seulement à 5 centimètres sous l'interface. La compacité augmente régulièrement vers le bas de la carotte jusqu'à rencontrer des niveaux très pauvres en eau à partir de 15 cm de profondeur.

Les mesures de la densité humide met en évidence une augmentation régulière des valeurs avec la profondeur, ce qui traduit la compaction progressive observée des sédiments. Les valeurs sont comprises entre 1,22 et 1,71 g/cm³ ; globalement, les densités les plus faibles se mesurent dans les tout premiers horizons, les plus élevées dans les derniers (Figure 2). La densité sèche des sédiments est plus variable et permet difficilement de mettre en évidence une tendance si ce n'est une diminution assez marquée en surface (0-4 cm). Les densités mesurées sont comprises entre 2,02 et 2,69 g/cm³ pour une valeur moyenne de 2,36 ± 0,22 g/cm³, compatible avec le type de matériel sédimentaire.

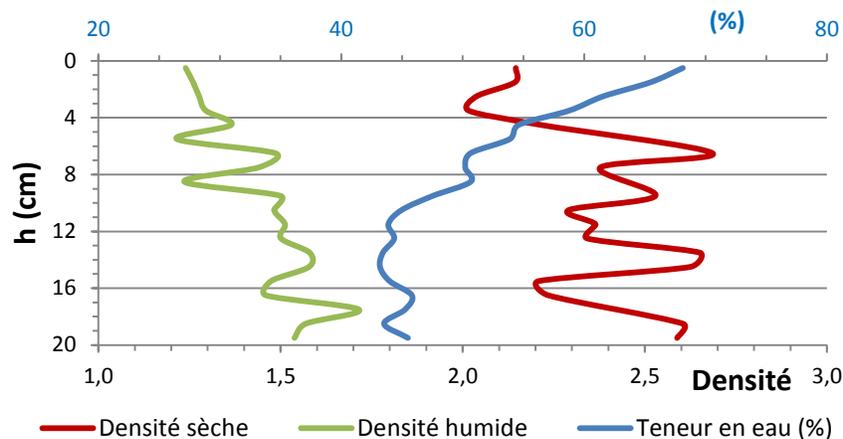


Figure 2 : Représentation graphique des densités sèche et humide ainsi que de la teneur en eau des sédiments de la carotte St16.

La teneur en eau décroît considérablement mais de manière régulière jusqu'à environ l'horizon (11-12 cm) ; les valeurs passent de 68,1% en surface à 43,9 %. Dans la strate en dessous, les teneurs sont remarquablement constantes autour de 44,4 ±0,9 % en masse jusqu'au bas de la carotte.

4.2 GRANULOMÉTRIE DES PARTICULES

Les valeurs de tous les paramètres granulométriques sont regroupées en Annexe 2.

Le pourcentage en fractions pélitiques des sédiments ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) augmente régulièrement du bas vers le haut de la carotte, c'est-à-dire des sédiments les plus anciens aux plus récents. Les proportions en particules fines s'échelonnent, d'environ 95 %, dans les 3 derniers centimètres de la carotte, à quasiment 99 % dans les horizons de surface (Figure 2). Les observations au microscope optique permettent de constater que les sédiments de surface contiennent bien moins de débris carbonatés de fort diamètre (tests de micro-organismes marins), que les horizons du bas de la carotte (Figure 4).

En parallèle, l'étude granulométrique montre un affinement de la composition sédimentaire dans les horizons récents. En effet, dans les horizons de surface, au moins 50 % de la masse sont constitués de grains dont le diamètre est inférieur à 6,5 μm ; pour les sédiments les plus anciens du bas de la carotte, ce diamètre passe à 12,2 μm (Tableau 2). Cette différence est vraisemblablement imputable à la quantité de débris plus ou moins fins générés par l'altération des tests de micro-organismes marins.

Dans le détail, deux classes granulométriques émergent de manière notable au cours du temps, les fractions argileuses comprises entre 0,02 et 2 μm et les populations d'argiles silteuses entre 2 et 20 μm (Figure 5). Les autres classes montrent une tendance à la diminution relative, particulièrement pour les silts fins et moyens.

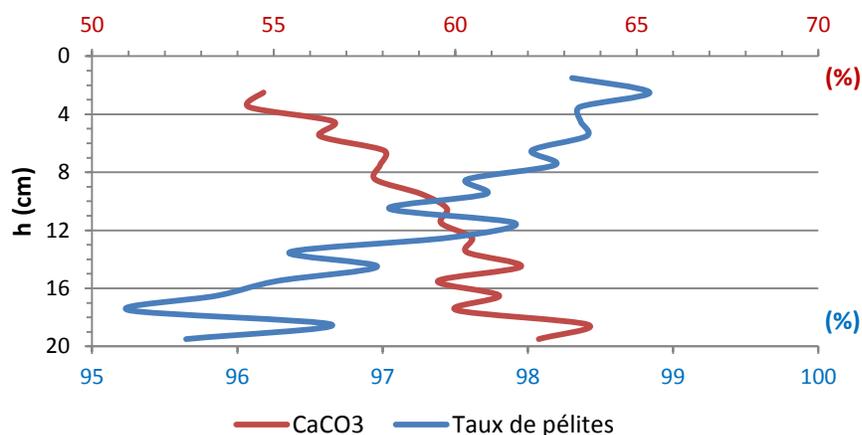


Figure 3 : Représentation graphique de l'évolution des pourcentages en fractions pélitiques et carbonates dans les sédiments de la carotte St16 (Port de commerce de Vale-NC).



Figure 4 : Observations au microscope optique des horizons de surface (0-1 cm, photo de gauche) et du bas de la carotte (19-20 cm, photo de droite) dans laquelle la proportion de débris carbonatés issus des micro-organismes marins est supérieure. Grossissement x 11,5.

Tableau 2 : Analyse granulométrique des sédiments de la carotte St16 : Valeurs des diamètres volumiques moyens et des percentiles 10, 50 et 90%.

Horizon	Diamètre volumique (µm)			
	Moyenne	d (0.1)	d (0.5)	d (0.9)
ST16 (0-1cm)	10,4	1,3	6,5	24,7
ST16 (1-2cm)	12,4	1,4	8,4	29,0
ST16 (10-11cm)	14,7	1,9	9,9	34,5
ST16 (19-20cm)	16,1	2,2	12,2	35,5

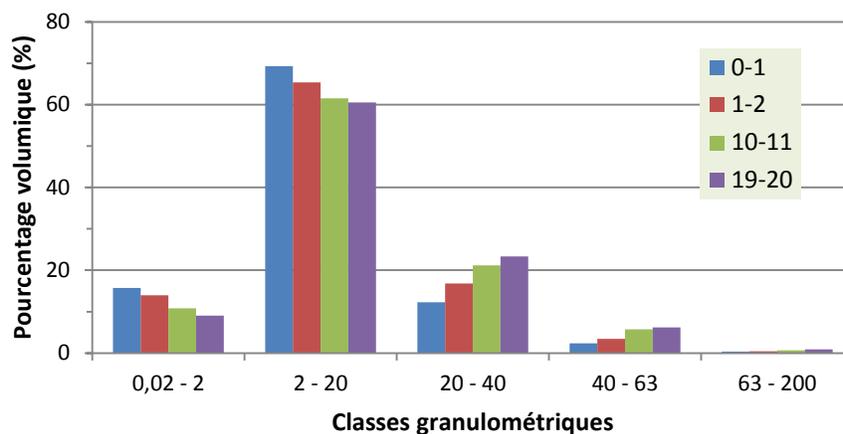


Figure 5 : Distribution granulométrique en pourcentage volumique pour les horizons (0-1 cm), (1-2 cm), (10-11 cm), (19-20 cm) de la carotte St16.

4.3 MINÉRALOGIE DES SÉDIMENTS

Les valeurs des paramètres minéralogiques et des teneurs en carbonates sont regroupées en Annexe 2.

Les analyses réalisées par diffractométrie de rayons X montrent que les sédiments contiennent seulement des traces de marqueurs terrigènes d'origine latéritique comme la goethite. A l'inverse, les minéraux comme la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite (constituant des coquilles d'invertébrés) sont amplement majoritaires. Leur présence met en évidence la prédominance claire de l'origine marine des sédiments particulièrement pour les plus anciens localisés au bas de la carotte.

Des traces infimes de spinelles chromifères et magnésiochromites semblent avoir été décelées ainsi que de kieselite ($MgSO_4 \cdot H_2O$) et d'antalarite ($Cu_3(SO_4)(OH)_4$).

Cette composition minéralogique est en parfait accord avec les teneurs en carbonates déterminées dans les sédiments dont la valeur oscille de 54,3 à 63,7 % (Figure 3) ; la teneur moyenne étant de $59,1 \pm 2,5$ %.

Tableau 3 : Composition minéralogique des sédiments pour les horizons (0-1 cm), (1-2 cm), (10-11 cm), (19-20 cm) de la carotte St16.

HORIZON	MINÉRAL					
	Mg-Calcite	Calcite	Aragonite	Goethite	Kaolinite / Halloysite?	Autres
0 - 1 cm	▲	▲	▲	▲	Δ	Halite + ? à ~4.82Å
1 - 2 cm	▲	▲	▲	▲	Δ	? à ~4.82Å
10 - 11 cm	▲	▲	▲	▲	Δ	? à ~4.82Å
19 - 20 cm	▲	▲	▲	▲	Δ	? à ~4.82Å

▲ = présence ; Δ = Probabilité de présence à l'état de traces

4.4 COMPOSITION GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS

Les valeurs des paramètres géochimiques sont regroupées en Annexe 3.

4.4.1 Attaques totales

Les concentrations obtenues sont relativement peu variables pour Co, Cr, Fe, Mn (4,4 à 6,8 %) alors que celles de Ni montrent une relative hétérogénéité (15 %), (Figure 6, Tableau 4). Toutefois, pour les 5 métaux, les concentrations suivent une même tendance à l'augmentation, entre le bas et le haut de la carotte, c'est-à-dire vers les sédiments récents. En d'autres termes, un enrichissement progressif est constaté au cours du temps. Enfin, pour tous les métaux, particulièrement pour Fe, Ni et Co, les profils de concentration présentent une discontinuité remarquable au niveau de l'horizon (8-9 cm).

Les concentrations en calcium se montrent relativement moins dispersées le long de la carotte et à l'inverse des métaux, les valeurs diminuent progressivement vers la surface de la carotte. Enfin, le profil de concentration de Ca semble décrire deux strates sédimentaires dont la limite pourrait être située aussi au niveau de l'horizon (8-9 cm).

En sub-surface (1-2 cm), pour tous les métaux et en particulier le chrome, les niveaux de concentrations augmentent fortement ; le manganèse fait exception à cette évolution.

La matrice de proximité (coefficient de corrélation de Pearson), montre que seul le cobalt et le fer possèdent des comportements géochimiques corrélables ($R^2 = 0,843$), les autres éléments ne montrant que des tendances globalement semblables, ce qui traduit la faible influence terrigène dans les sédiments prélevés. A l'opposé, l'évolution des concentrations du calcium est totalement dissociée de celle de tous les métaux (Tableau 5).

Tableau 4 : Statistiques descriptives de concentrations totales en Ca, Co, Cr, Fe, Mn et Ni dans les sédiments de la carotte St16.

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca mg/kg	20	192 874	220 293	209 288	7 659
Co mg/kg	20	100	129	111	6
Cr mg/kg	20	3 061	4 161	3 390	231
Fe mg/kg	20	80 514	98 060	89 733	3 906
Mn mg/kg	20	820	1 089	945	60
Ni mg/kg	20	1 367	2 383	1 644	247

Figure 7 : Profils des concentrations totales en métaux (Co, Cr, Fe, Mn, Ni) et du calcium dans la fraction pélitique des sédiments de la carotte St16.

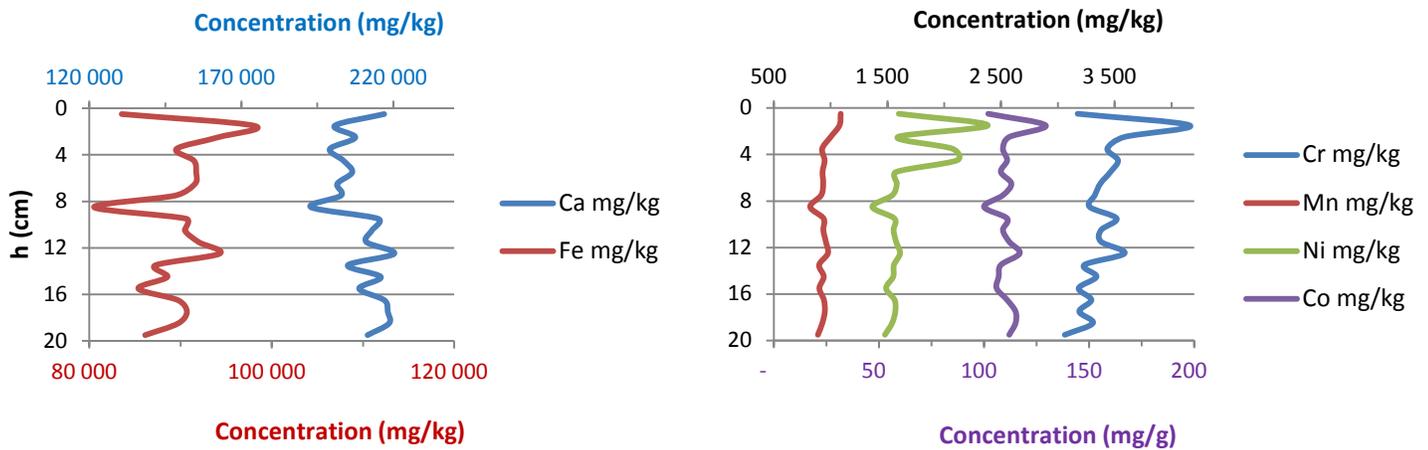


Tableau 5 : Matrice de similarité/dissimilarité (corrélation de Pearson) pour les concentrations en métaux et calcium dans les sédiments de la carotte St16.

	Ca mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Fe mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg
Ca mg/kg	1					
Co mg/kg	0,119	1				
Cr mg/kg	-0,251	0,712	1			
Fe mg/kg	0,117	0,843	0,778	1		
Mn mg/kg	0,299	0,469	0,528	0,510	1	
Ni mg/kg	-0,328	0,598	0,746	0,565	0,512	1

4.4.2 Extractions séquentielles

Rappel : Compte tenu de la précision demandée en termes d'impact des activités portuaires dans le milieu marin, l'analyse de la concentration totale des métaux contenus dans les sédiments ne fournit qu'une information globale qui ne permet ni d'évaluer les niveaux de disponibilité de ces éléments chimiques, ni d'estimer les variations dues aux apports industriels de faibles intensités. Afin de suivre et/ou de différencier les impacts des sources terrestres et/ou anthropiques, l'analyse des différentes phases géochimiques qui composent le sédiment est amplement préférable. Les deux premières phases géochimiques (matière organique et carbonates) et leurs métaux associés fournissent surtout une évaluation de la fraction la plus facilement disponible

pour les organismes vivants. Les deux dernières phases (oxydes et résidu) représentent des fractions dans lesquelles les métaux sont de moins en moins disponibles et peuvent être assimilées à des signatures géochimiques des apports terrigènes.

Pour toutes les phases géochimiques extraites, les concentrations sont du même ordre de grandeur que celles obtenues antérieurement (Contrat AEL/Vale-NC, n° E20532, 2010). D'autre part, la distribution dans les sédiments est très similaire entre les deux campagnes, ce qui dénote d'une bonne reproductibilité compte tenu des variables introduites notamment par les opérations d'échantillonnage c'est-à-dire d'extraction de la carotte sur le terrain et de découpage des horizons sédimentaires.

Ainsi pour les métaux liés aux phases organiques et carbonatées, on retrouve entre les campagnes, les pics de concentration en sub-surface pour Co, Cr et Ni ; le niveau de surface (0-1 cm) concentre préférentiellement le manganèse et particulièrement le fer (Figure 8).

Pour la phase réductible (oxy-hydroxydes), la concentration maximale de chaque élément est mesurée dans l'horizon de surface.

En termes de proportions, la disponibilité potentielle ne représente par rapport aux concentrations totales que 1,5 % pour le chrome, 0,2 % pour le fer, 1,2 % pour le nickel et 5,9 % pour le zinc ; pour le cobalt (7,7 %), les proportions augmentent et ceci est particulièrement accentué pour le manganèse (45,3 %). Pour la campagne de 2010, les valeurs étaient tout à fait comparables, respectivement : Co (2,3 %), Fe (0,5 %), Ni (1,3 %) et Zn (3,7 %), d'une part et Co (10,8 %) et Mn (53,8 %), d'autre part.

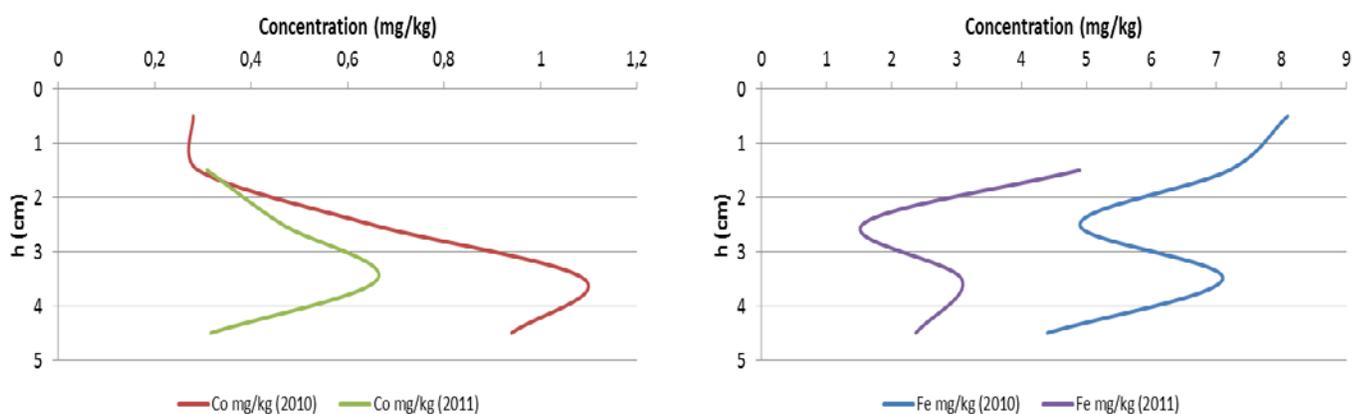


Figure 8 : Profils de concentration de Co et Fe dans la phase organique des sédiments au niveau de la station St16, pour les campagnes 2010 et 2011.

Tableau 6 : Valeurs des concentrations moyennes et écart-types pour Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn dans les phases organiques et carbonatées des sédiments de la carotte St16.

		MÉTAUX DANS LA PHASE ORGANIQUE (mg/kg)							MÉTAUX DANS LA PHASE CARBONATÉE (mg/kg)							
		Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
2011	Moyenne	0,44	36,6	0,5	2,98	20,8	1,21	14 290	6,23	6,45	1,60	181	328,7	11,8	2,56	201 970
	Ecart-type	0,17	9,6	0,1	1,43	4,6	0,37	1 299	0,16	0,63	0,87	12	27,5	0,5	0,58	7 467
2010	Moyenne	0,65	36,90	0,30	6,34	11,42	0,58	10960	6,20	12,62	1,36	147,8	341,8	9,5	1,66	187143
	Ecart-type	0,37	7,91	0,04	1,60	5,53	0,11	805	0,50	0,31	0,18	13,8	37,1	0,5	0,42	9497

Tableau 7 : Valeurs des concentrations moyennes et écart-types pour Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn dans les phases réductibles et résiduelles des sédiments de la carotte St16.

		MÉTAUX DANS LA PHASE RÉDUCTIBLE (mg/kg)							MÉTAUX DANS LA PHASE RÉSIDUELLE (mg/kg)								
		Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
2011	Moyenne	11,4	11,6	<LQ	273	76,6	14,3	3,60	5 633	69	2762	-	81830	346	1026	37	242
	Ecart-type	0,8	1,2	-	48	4,8	1,0	0,54	528	1	9	-	57	33	1	6	50
2010	Moyenne	7,24	7,38	0,66	205	69,6	8,0	1,10	8 746	47,8	1955	6,96	32 688	232	734	42,6	284
	Ecart-type	1,42	1,23	0,09	69	10,9	1,1	0,20	1 206	7,5	240	1,06	2 023	37	119	5,3	43

4.4.3 Composition en soufre

D'une façon générale, les concentrations montrent une tendance à la baisse avec la profondeur d'enfouissement (Figure 9) ; Pour le soufre lixiviable, les teneurs décroissent de 1735 à 1244 mg/kg, pour la fraction échangeable, elles passent de 1477 à 2525 mg/kg.

Les niveaux de concentration en soufre lixiviable et échangeable sont sensiblement proches pour 4 horizons les plus anciens. En effet, dans le niveau le plus récent (0-1 cm) la concentration en soufre échangeable est maximale (2525 mg/kg) alors la fraction lixiviable n'est que de 1724 mg/kg.

Au vu de ces résultats, la disponibilité en soufre par solubilisation directe semble considérablement moins élevée que la proportion extraite obtenue par attaque chimique ménagée. Il ressort de ces tests qu'une fraction non négligeable du soufre est faiblement combinée à la matière organo-minérale, notamment par adsorption.

Par rapport aux résultats de la campagne précédente (Contrat AEL/Vale-NC n° E20532, 2010), les résultats sont très comparables : les valeurs de soufre échangeable demeurant plus importantes avec un pic de concentration atteignant 1810 mg/kg.

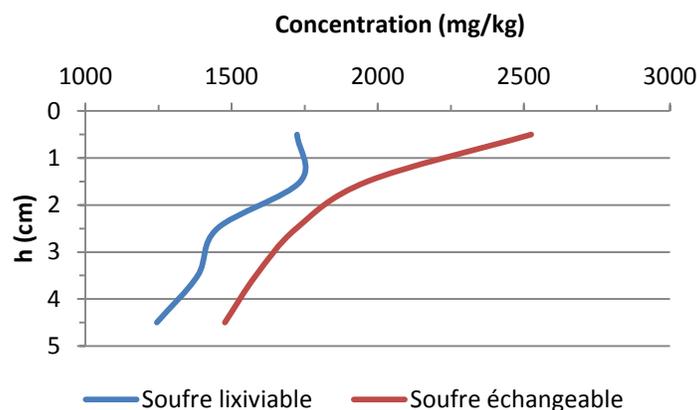


Figure 9 : Evolution des concentrations en soufre lixiviable et en soufre échangeable dans la fraction brute des sédiments de la carotte St16.

4.5 RADIOACTIVITÉ EN PLOMB-210

Les valeurs des spectrométries gamma des différents radio-chronomètres sont regroupées en Annexe 4.

Les niveaux de radioactivité du « *Pb-210 en excès* » dans les dépôts de cette carotte s'intègrent aux valeurs les plus élevées mesurées dans le lagon de Nouvelle-Calédonie : elles s'échelonnent de 163 ± 13 mBq/g en surface à 8 ± 3 mBq/g au bas de la carotte. S'agissant d'un radionucléide généré au sein de la roche mère, la radioactivité due au Ra-226 demeure logiquement du même niveau qu'antérieurement obtenu ($2,4 \pm 0,6$ mBq/g).

Les valeurs de Cs-137 sont systématiquement inférieures à 2,1 mBq/g ce qui ne permet pas pour cette carotte de dessiner un profil de radioactivité de ce radio-traceur artificiel afin de conforter la géochronologie des événements sédimentaires. Toutefois, ce radionucléide est mesurable dans l'horizon (9-10 cm) où l'on compte $0,38 \pm 0,12$ mBq/g.

La représentation semi-logarithmique des mesures du « *²¹⁰Pb en excès* » montre une tendance globale à la décroissance de la radioactivité avec la profondeur (Figure 10). Cependant, deux épisodes peuvent être distingués :

- Le premier permet de mettre en évidence une diminution continue de la radioactivité depuis la surface jusqu'à l'horizon (10-11 cm). Sur cette station profonde (45 m), très peu de perturbations, comme la bioturbation ou le remaniement, semblent affecter le dépôt ; la droite semi-logarithmique de régression ($R^2=0,943$) permet alors de calculer un taux d'accumulation des sédiments et de procéder à une datation des événements ;
- Le deuxième montre dans les 10 derniers centimètres de la carotte, une décroissance plus rapide de la radioactivité du « *Pb-210 en excès* » avec la profondeur, Cette décroissance suit également une droite semi-logarithmique dont le coefficient est hautement significatif ($R^2=0,964$) et qui permet d'estimer le taux d'accumulation des sédiments.

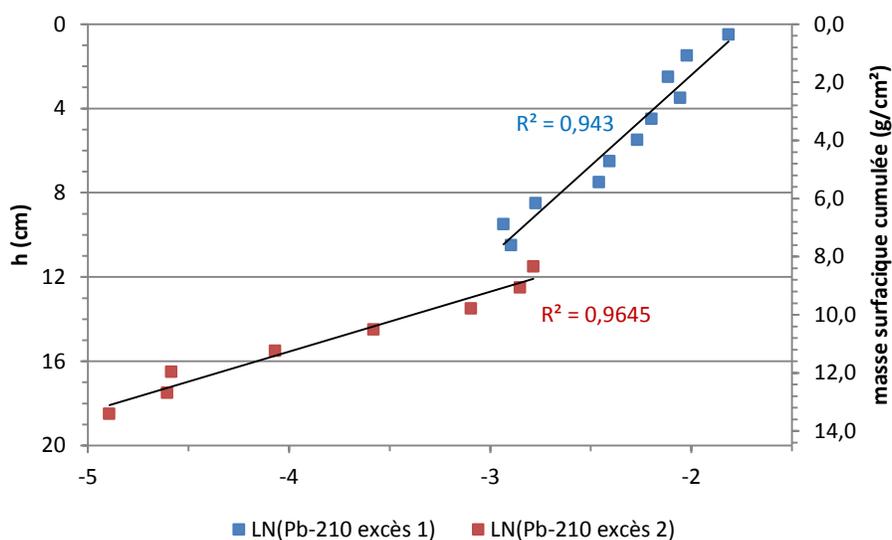


Figure 10 : Profil vertical de la radioactivité du « *²¹⁰Pb en excès* » dans les sédiments de la carotte St16

Les calculs effectués sur la base des mesures spectrométriques ont permis de caractériser les 11 premiers centimètres du dépôt. Il ressort qu'au niveau de l'interface « eau-sédiments » :

- le flux massique de particules ou taux d'accumulation est de **0,12 g/cm²/an** ;
- le flux moyen de Pb-210 est de 0,022 Bq/cm²/an, valeur en accord avec les calculs effectués pour d'autres sites en Nouvelle-Calédonie.

Les excellentes caractéristiques de cette carotte, notamment l'absence de couche bioturbée, permettent de procéder à une datation géochronologique des horizons de la première section de la carotte, moyennant les deux modèles théoriques CIC (Robbins et Edgington, 1975) et CRS (Appleby et Oldfield, 1978) ; le premier modèle étant basé sur des hypothèses de sédimentation et de flux de Pb-210 constants, le deuxième ne supposant qu'un flux constant.

Malgré les différences dans les approches théoriques, la datation des horizons par les deux modèles concordent, relativement bien. Ils situent tous les deux la limite inférieure de la série sédimentaire supérieure à moins d'une dizaine d'année l'une de l'autre : 1955 pour le CIC et 1963 pour le CRS (Tableau 11).

Par ailleurs, la présence exceptionnelle dans l'hémisphère sud de Cs-137 quantifiable dans l'horizon (9-10 cm) s'avère d'une grande utilité. Elle suggère que celui-ci est contemporain du pic de retombées atmosphériques radioactives générées par les essais d'armes nucléaires qui se sont intensifiés de 1963 à 1966 : la géochronologie calculée par le modèle CIC montre que l'horizon (9-10 cm) peut être daté de 1962, ce qui est en accord avec les traces de Cs-137. Il semble donc que le modèle CIC soit approprié au cas d'étude.

Pour la deuxième section de la carotte (11-20 cm), le taux d'accumulation peut être estimé à une valeur inférieure à 0,1 g/cm²/an.

Figure 11 : Datation des horizons sédimentaires de la section supérieure (0-12 cm) de la carotte St16 par les modèles CRS et CIC. Identification de l'horizon contenant du Cs-137 (bande verte)

Horizon (cm)	MODÈLE « CONSTANT RATE SUPPLY » (CRS)			MODÈLE: « CONSTANT INITIAL CONCENTRATION » (CIC)		
	Po-210 (Bq/g)	Age (an)	Date calculée	M cumulées (g/cm ²)	Age (an)	Date calculée
0-1	0,1629	0,000	2011,7	0,395	3,331	2008,4
1-2	0,1325	4,123	2007,6	0,830	6,999	2004,7
2-3	0,1206	7,918	2003,8	1,321	11,138	2000,6
3-4	0,1282	11,810	1999,9	1,855	15,641	1996,1
4-5	0,1111	16,541	1995,2	2,474	20,863	1990,8
5-6	0,1034	21,296	1990,4	3,034	25,590	1986,1
6-7	0,0901	26,456	1985,2	3,768	31,774	1979,9
7-8	0,0855	31,748	1980,0	4,485	37,820	1973,9
8-9	0,0624	37,731	1974,0	5,094	42,962	1968,7
9-10	0,0532	42,929	1968,8	5,881	49,597	1962,1
10-11	0,0553	48,137	1963,6	6,697	56,475	1955,2

5 CONCLUSION

Un relatif mais constant appauvrissement en carbonates des couches les plus anciennes vers les plus récentes et à l'inverse, un enrichissement progressif en particules fines (pélites), caractérisent cette carotte. Cependant, deux zones se distinguent par leurs teneurs en eau et leurs valeurs de porosité ; la limite semble se situer au niveau de l'horizon (11-12 cm). Au-dessus, les sédiments sont plus riches en particules argilo-silteuses ($\varnothing < 20 \mu\text{m}$), alors qu'en dessous les proportions de silts fins et moyens augmentent.

L'influence terrigène se traduit clairement par une augmentation faible mais progressive de Fe vers la surface, parallèlement à une diminution de Ca. Pour les autres éléments métalliques qui sont autant de signatures des apports latéritiques, la tendance est la même avec de surcroît une très nette surconcentration dans la couche de sub-surface (1-2 cm).

Les concentrations en métaux disponibles et les distributions verticales dans les sédiments sont du même ordre de grandeur que celles obtenues antérieurement. En termes de proportions, la disponibilité potentielle ne représentent, par rapport aux concentrations totales, que de 0,2 % à 1,5 % pour des métaux comme Cr et Ni, alors cette fraction augment à 7,7 % pour le Co et 45,3 % pour Mn.

Les niveaux de surface et sub-surface sont enrichis en soufre échangeable, notamment, c'est-à-dire combiné avec la matière sédimentaire.

La courbe du Pb-210 dans les sédiments montre un hiatus entre les horizons (10-11 cm) et (11-12 cm). Cette distribution permet de distinguer deux épisodes de décroissance radioactive. Le changement sédimentaire est daté avec vraisemblance de 1955 ± 3 ans. Le taux de sédimentation à la station St16 est actuellement de $0,12 \text{ g/cm}^2/\text{an}$.

REFERENCES

- Ackermann F., 1980. A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of Estuarine and coastal sediments. *Environment technology letters*, vol. 1, pp 518-527.
- Appleby PG et Oldfield F, 1978. The assessment of Pb-210 data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia* 103, pp29-35.
- Deely J.M. & Fergusson J.E., 1994. Heavy metal and organic matter concentrations and distribution in dated sediments of a small estuary adjacent to a small urban area. *Sci. Total Environ.*, 153, 97-111.
- Dolbecq M, Le Grand H, Breau L et Fernandez JM, 2011. Suivi des taux d'accumulation dans la Rade du Nord, la Baie du Prony et l'île Ouen (Nouvelle Calédonie). *Contrat AE/Vale-NC n°E20532*, 55p.
- Fernandez JM, Chevillon Ch, Dolbecq M, Legendre R, Belhandouz A, Lamoureux JP, 2007. Etat de référence : distribution superficielle des sédiments, flux sédimentaires et taux d'accumulation dans la Baie du Prony et dans la baie Kwé. *Convention IRD/Goro-Ni n°1230*, 55p.
- He, Q., Walling, D.E., 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of Cs-137 and unsupported Pb-210 by mineral soils and sediments. *J. Environ. Radioac.*, 30 (2): 117-137.
- Mayer L.M. & Fink L.K., 1979. Granulometry dependence of Cr accumulation in estuarine sediments in Maine. *Estuarine and coastal marine science*, II, pp. 491-503.
- Robbins JA et Edgington DN, 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 39, pp285-304.
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M., 1979. Sequential procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, Vol. 51, pp. 844-851.
- Valette-Silver N.J., 1993. The use of sediments cores to reconstruct Historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments, *Estuaries*, Vol. 16, n°38, pp 577-588.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION DU SITE DE CAROTTAGE St16 POUR L'ÉVALUATION DES TAUX D'ACCUMULATION ET DU SUIVI ANNUEL DES IMPACTS GÉOCHIMIQUES DE L'ACTIVITÉ PORTUAIRE.	9
FIGURE 2 : REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES DENSITÉS SÈCHE ET HUMIDE AINSI QUE DE LA TENEUR EN EAU DES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.....	12
FIGURE 3 : REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'ÉVOLUTION DES POURCENTAGES EN FRACTIONS PÉLITIQUES ET CARBONATES DANS LES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16 (PORT DE COMMERCE DE VALE-NC).....	13
FIGURE 4 : OBSERVATIONS AU MICROSCOPE OPTIQUE DES HORIZONS DE SURFACE (0-1 CM, PHOTO DE GAUCHE) ET DU BAS DE LA CAROTTE (19-20 CM, PHOTO DE DROITE). GROSSISSEMENT X 11,5.....	14
FIGURE 5 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE EN POURCENTAGE VOLUMIQUE POUR LES HORIZONS (0-1 CM), (1-2 CM), (10-11 CM), (19-20 CM) DE LA CAROTTE St16.	14
LES CONCENTRATIONS OBTENUES SONT RELATIVEMENT PEU VARIABLES POUR CO, CR, FE, MN (4,4 À 6,8 %) ALORS QUE CELLES DE NI MONTRENT UNE RELATIVE HÉTÉROGÉNÉITÉ (15 %), (FIGURE 6, TABLEAU 4). TOUTEFOIS, POUR LES 5 MÉTAUX, LES CONCENTRATIONS SUIVENT UNE MÊME TENDANCE À L'AUGMENTATION, ENTRE LE BAS ET LE HAUT DE LA CAROTTE, C'EST-À-DIRE VERS LES SÉDIMENTS RÉCENTS. EN D'AUTRES TERMES, UN ENRICHISSEMENT PROGRESSIF EST CONSTATÉ AU COURS DU TEMPS. ENFIN, POUR TOUS LES MÉTAUX, PARTICULIÈREMENT POUR FE, MI ET CO, LES PROFILS DE CONCENTRATION PRÉSENTENT UNE DISCONTINUITÉ REMARQUABLE AU NIVEAU DE L'HORIZON (8-9 CM).	15
FIGURE 7 : PROFILS DES CONCENTRATIONS TOTALES EN MÉTAUX (CO, CR, FE, MN, NI) ET DU CALCIUM DANS LA FRACTION PÉLITIQUE DES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.....	16
FIGURE 8 : PROFILS DE CONCENTRATION DE CO ET FE DANS LA PHASE ORGANIQUE DES SÉDIMENTS AU NIVEAU DE LA STATION St16, POUR LES CAMPAGNES 2010 ET 2011.....	17
FIGURE 9 : ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SOUFRE LIXIVIABLE ET EN SOUFRE ÉCHANGEABLE DANS LA FRACTION BRUTE DES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.....	18
FIGURE 10 : PROFIL VERTICAL DE LA RADIOACTIVITÉ DU « ²¹⁰ Pb EN EXCÈS » DANS LES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16	19
FIGURE 11 : DATATION DES HORIZONS SÉDIMENTAIRES DE LA SECTION SUPÉRIEURE (0-12 CM) DE LA CAROTTE St16 PAR LES MODÈLES CRS ET CIC. IDENTIFICATION DE L'HORIZON CONTENANT DU Cs-137 (BANDE VERTE).....	20

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LOCALISATION ET PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA STATION St16. DIMENSION DE LA CAROTTE.	10
TABLEAU 2 : ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16 : VALEURS DES DIAMÈTRES VOLUMIQUES MOYENS ET DES PERCENTILES 10, 50 ET 90%.	14
TABLEAU 3 : COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SÉDIMENTS POUR LES HORIZONS (0-1 cm), (1-2 cm), (10-11 cm), (19-20 cm) DE LA CAROTTE St16.	15
TABLEAU 4 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE CONCENTRATIONS TOTALES EN Ca, Co, Cr, Fe, Mn ET Ni DANS LES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.	16
TABLEAU 5 : MATRICE DE SIMILARITÉ/DISSIMILARITÉ (CORRÉLATION DE PEARSON) POUR LES CONCENTRATIONS EN MÉTAUX ET CALCIUM DANS LES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.	16
TABLEAU 6 : VALEURS DES CONCENTRATIONS MOYENNES ET ÉCART-TYPES POUR Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni ET ZN DANS LES PHASES ORGANIQUES ET CARBONATÉES DES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.	17
TABLEAU 7 : VALEURS DES CONCENTRATIONS MOYENNES ET ÉCART-TYPES POUR Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni ET ZN DANS LES PHASES RÉDUCTIBLES ET RÉSIDUELLES DES SÉDIMENTS DE LA CAROTTE St16.	18

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DES MÉTHODES DE TRAITEMENTS ET D'ANALYSES DES ÉCHANTILLONS.

ANNEXE 2 : CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES, GRANULOMÉTRIQUES ET MINÉRALOGIQUES. CALCULS DES TENEURS EN CARBONATES

ANNEXE 3 : CONCENTRATIONS EN MÉTAUX TOTAUX ET CALCIUM. RÉSULTATS DES EXTRACTIONS SÉQUENTIELLES POUR LES MÉTAUX, LE CALCIUM ET LE SOUFRE.

ANNEXE 4 : RÉSULTATS DES SPECTROMÉTRIES GAMMA POUR LA DÉTERMINATION DU Pb-210, RA226.

ANNEXE – 1

Description des méthodes de traitement et d'analyses des échantillons

Dosage des carbonates

Les teneurs en carbonate sont déterminées par la méthode dite du « calcimètre de Bernard ». Cette méthode consiste en une attaque du sédiment grâce à une solution d'acide chlorhydrique qui génère la formation de CO₂. Le volume de gaz est titré et la concentration en carbonate de calcium est déterminée par relation stœchiométrique.

Granulométrie

L'étude de la distribution des populations de particules fines (silts et argiles) est conduite sur la fraction < 2000 µm. La distribution de ces populations est réalisée par granulométrie laser (Malvern), après remise en suspension des sédiments, ajout d'agent dispersant (Pyrophosphates de Na/K) et agitation aux ultrasons.

Minéralogie (DRX)

Les espèces minérales ont été déterminées par diffraction de rayons X (DRX) sur des échantillons modérément broyés. L'appareil utilisé est un Philips (PW1050/25) équipé d'une anticathode Cu. La recherche des minéraux a été réalisée avec le code UPDSM.

Dosage de la concentration totale des métaux

L'analyse de la concentration totale des métaux contenus dans les horizons de la carotte St16 a été conduite par attaque totale des sédiments par fusion alcaline (voir protocole « *dosage des métaux dans les phases géochimiques* »). Après mise en solution, les métaux Ca, Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été dosés par ICP-OES.

Dosage des métaux dans les phases géochimiques

Les étapes d'extraction séquentielles ont été conduites conformément au protocole de type Tessier et al. (1979) comprenant 4 ou 5 phases géochimiques.

Pour chaque échantillon, 2 g de pélites ont été nécessaires pour extraire les métaux des 4 phases géochimiques afin de séparer les formes suivantes :

- **Formes oxydables** : Cette fraction représente les métaux liés à la matière organique du sédiment. Leur extraction est conduite par un oxydant fort (H₂O₂, 110 vol) en milieu acide ;
- **Formes acido-solubles** : C'est une fraction facilement solubilisable par l'utilisation d'un acide faible tamponné en solution (CH₃COOH/CH₃COONH₄) qui attaque en particulier la matrice carbonatée du sédiment. Elle contient également des éléments très faiblement liés aux autres phases géochimiques ;

- **Formes réductibles** : Elles sont associées aux oxy-hydroxydes de fer et manganèse principalement. Leur extraction s'opère avec un agent réducteur puissant (NH_2OH , HCl) en milieu faiblement acide ;
- **Formes réfractaires** : Elles représentent les éléments métalliques fortement liés ou constituant la matière minérale tels que les silicates et aluminosilicates. L'analyse des métaux réfractaires a été conduite après attaque de la matrice géochimique par fusion alcaline, selon le protocole en vigueur à l'IRD. Brièvement, il s'agit de faire réagir du tétraborate de lithium et du sédiment à haute température (1100°C) puis, après refroidissement partiel, de dissoudre les billes d'amalgame formées dans une solution acide (HCl).

Tous les réactifs utilisés sont de marque Merck, qualité ProAnalysis. Les béchers et ustensiles sont soit en PEHD ou en Teflon®.

Après mise en solution, les huit métaux suivants ont été analysés par ICP-OES : Ca, Cu, Co, Cr, Fe, Mn, Ni et Zn.

Dosage du soufre lixiviable

L'extraction du soufre lixiviable s'est faite par agitation mécanique de 1g de sédiment dans 100 mL pendant 16 heures. Les échantillons ont ensuite été centrifugés à 3000 RPM puis filtrés à $0,45\ \mu\text{m}$ avant d'être analysés à l'ICP-OES.

Dosage du soufre échangeable selon la procédure d'extraction BCR

L'attaque a été conduit sur 1 g de sédiment sec avec 40 ml d'acide acétique 0,11 M pendant 16 h à température ambiante ; l'échantillon a ensuite été centrifugé à 1500 RPM pendant 20 minutes puis filtré à $0,45\ \mu\text{m}$ avant d'être analysé par ICP-OES.

Géochronologie

La datation des horizons sédimentaires nécessaire à l'évaluation des taux d'accumulation, a été obtenue par l'analyse de la radioactivité d'un radioisotope, le ^{210}Pb , naturellement présent dans les sédiments. La technique consiste à déterminer :

- *le ^{210}Pb « atmosphérique », dit « en excès »* qui provient indirectement de la désintégration du ^{222}Rn , descendant gazeux du ^{226}Ra contenu dans les roches qui se dégage dans l'atmosphère. Intégré aux aérosols, en quantités importantes selon un flux supposé constant, le ^{210}Pb est d'abord entraînés par les pluies, puis transporté par les rivières jusqu'à la mer, où il va sédimenter avec les particules.
- *le ^{210}Pb « supporté »* qui apparaît au sein même de la roche (ou du sédiment) et ne subit donc pas le cycle atmosphérique. Son apport aux sédiments découle de l'érosion des sols et de son transport fluvial vers le bassin de sédimentation.

Le ^{210}Pb constitue un excellent outil permettant la datation des carottes sédimentaires sur une échelle de temps de l'ordre de 100 ans (He & Walling, 1996 ; Valette-Silver, 1993).

Dans les couches sédimentaires, la radioactivité du ^{210}Pb d'origine atmosphérique décroît de manière exponentielle en fonction du temps à un taux fixé par sa période de demi-vie ($T_{1/2} = 22,26$ ans). A une profondeur donnée sous l'interface eau-sédiment, la radioactivité du ^{210}Pb dépend donc de la durée écoulée depuis sa déposition et du taux d'accumulation. La radioactivité propre du ^{210}Pb en excès est calculée en soustrayant à la radioactivité totale du ^{210}Pb celle du ^{210}Pb « supporté », mesurée dans les niveaux les plus profonds, où la contribution atmosphérique est négligeable.

L'âge t du sédiment A est alors obtenu selon les équations suivantes (modèles CIC et CRS):

$$t_{CIC} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{210}\text{Pb}^0}{{}^{210}\text{Pb}} \right)_A$$

$$t_{CRS} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left(\frac{A_{(\infty)}}{A_{(\infty)} - A(t)} \right)$$

Avec

$$\lambda = 3,11 \cdot 10^{-2} \text{ an}^{-1};$$

$({}^{210}\text{Pb}^0)_A$ = la radioactivité dans le niveau de surface ($h = 0$);

$({}^{210}\text{Pb})_A$ = la radioactivité à la profondeur h ;

$A(\infty)$ = le flux total de Pb-210;

$A(t)$ = le flux de Pb-210 pour l'instant t .

Le taux d'accumulation « a » ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) est alors : $a = h/t$

La radioactivité du ${}^{210}\text{Pb}$ a été déterminée par spectrométrie gamma basse énergie à 46.54 keV. La chaîne de mesures utilisée est composée d'un spectromètre ORTEC X et d'un détecteur au béryllium de 80 % de rendement.

ANNEXE – 2

Caractérisation physique, granulométrique et minéralogique. Teneurs en carbonates des sédiments de la carotte St16.

PARAMÈTRES PHYSIQUES DES SÉDIMENTS

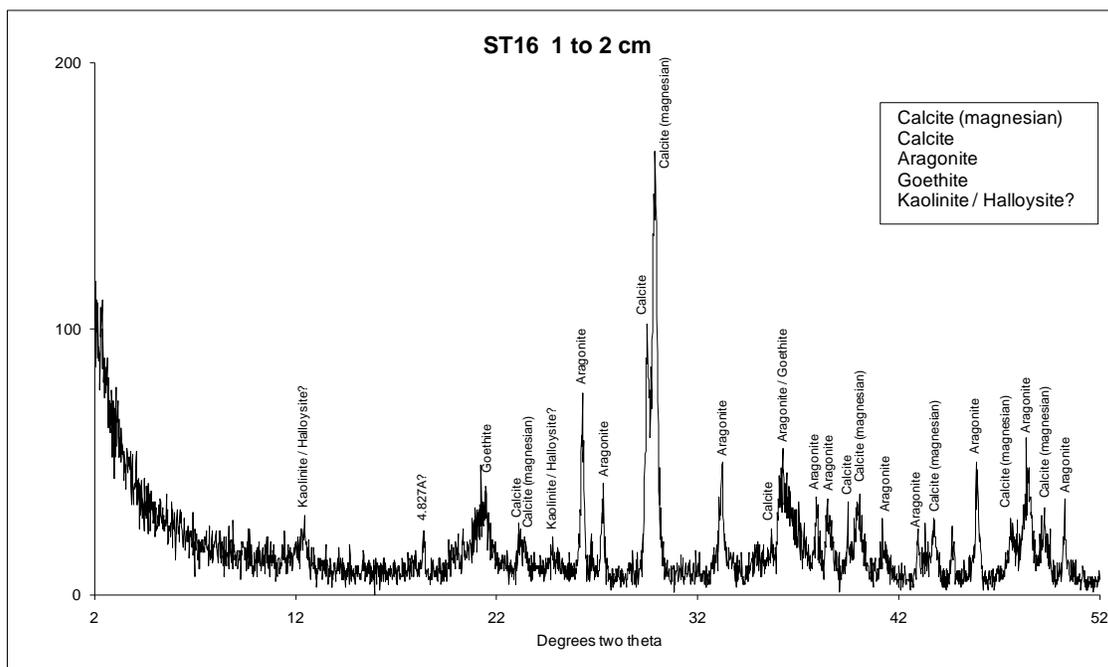
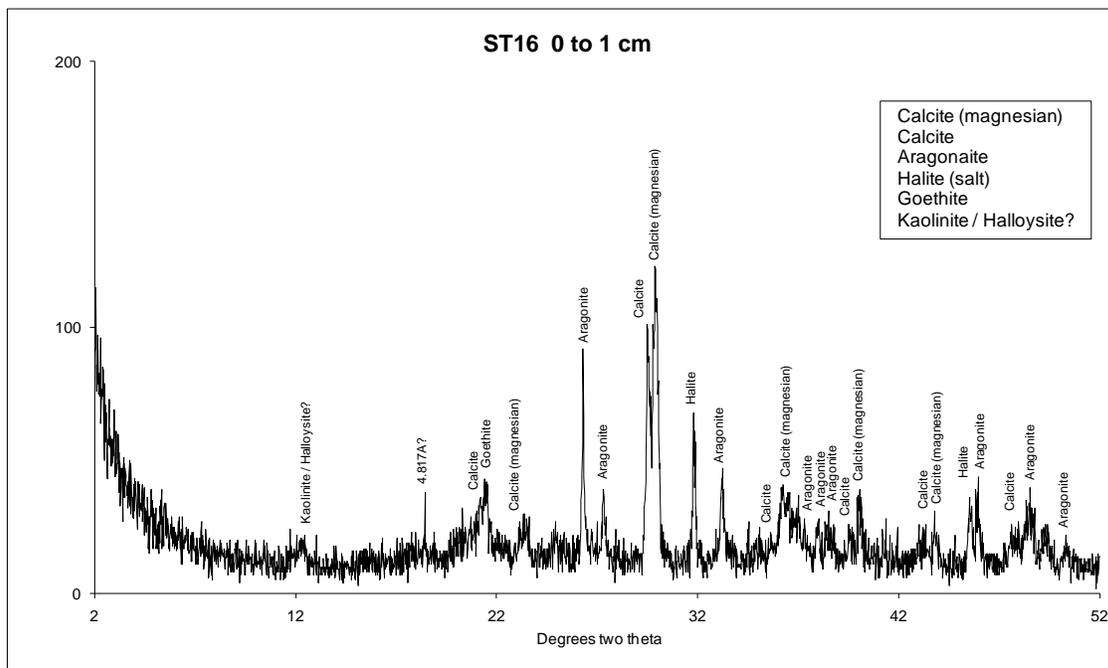
Horizon (cm)	Densité sèche	Densité humide	Teneur eau (%)	Porosité (%)	CaCO ₃ (%)	Pélites (%)
0-1	2,27	1,25	68,4	82,6	ND	ND
1-2	2,14	1,26	65,5	79,7	ND	98,3
2-3	2,04	1,28	61,5	75,9	54,72	98,8
3-4	2,02	1,29	58,8	73,5	54,32	98,4
4-5	2,21	1,36	54,6	72,0	56,65	98,4
5-6	1,53	1,22	53,9	63,3	56,27	98,4
6-7	2,69	1,49	50,6	72,7	58,04	98,0
7-8	2,38	1,44	50,2	69,9	57,93	98,2
8-9	1,54	1,24	50,7	60,5	57,8	97,6
9-10	2,53	1,50	47,5	68,9	59,07	97,7
10-11	2,29	1,48	45,0	64,4	59,77	97,0
11-12	2,36	1,51	43,9	64,1	59,61	97,9
12-13	2,34	1,50	44,4	64,3	60,46	97,5
13-14	2,65	1,58	43,4	66,3	60,31	96,4
14-15	2,62	1,58	43,2	65,9	61,81	97,0
15-16	2,21	1,47	44,0	62,6	59,52	96,3
16-17	2,23	1,46	45,8	64,6	61,21	95,9
17-18	3,75	1,71	45,3	75,0	60,03	95,3
18-19	2,60	1,57	43,5	66,0	63,65	96,7
19-20	2,59	1,54	45,5	67,6	62,3	95,6

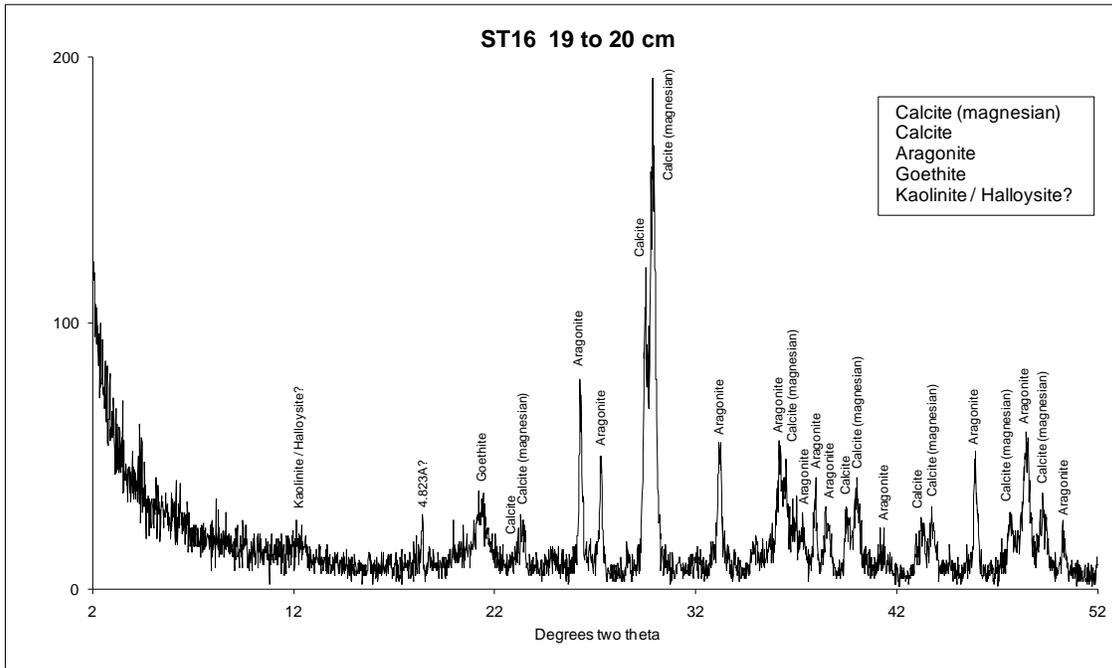
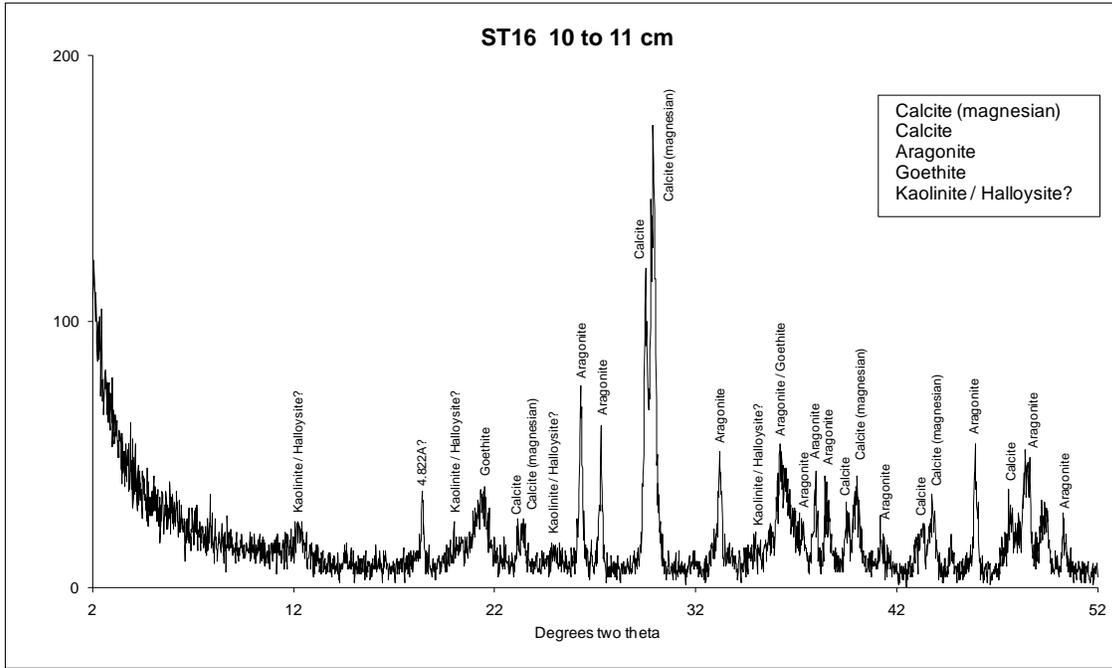
ND = Détermination non possible en raison du manque de matière

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES SÉDIMENTS

POURCENTAGE VOLUMÉTRIQUE ENTRE LES CLASSES GRANULOMÉTRIQUES							
	0,02-2 µm	2-20 µm	20-40 µm	40-50 µm	50-63 µm	63-200 µm	> 200 µm
0-1	15,7	69,3	12,3	1,6	0,8	0,3	0,0
1-2	13,9	65,4	16,8	2,3	1,1	0,4	0,0
10-11	10,8	61,6	21,2	3,8	2,0	0,7	0,0
19-20	9,1	60,5	23,4	4,0	2,2	0,9	0,0

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SÉDIMENTS





ANNEXE – 3

Résultats de calculs de concentration en métaux totaux, calcium. Résultats des extractions séquentielles de métaux, calcium et soufre dans les sédiments de la carotte St16.

COMPOSITION DES SÉDIMENTS EN MÉTAUX TOTAUX ET CALCIUM

HORIZON (cm)	Ca (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
0-1	216 970	102	3 174	83 542	1 089	1 600
1-2	200 717	129	4 161	98 060	1 078	2 383
2-3	207 495	112	3 584	94 094	1 000	1 591
3-4	199 097	109	3 435	89 542	926	2 071
4-5	203 574	111	3 529	91 455	947	2 113
5-6	206 473	108	3 463	91 708	929	1 577
6-7	201 529	113	3 374	91 575	935	1 583
7-8	202 776	109	3 325	89 420	917	1 543
8-9	192 874	100	3 279	80 514	820	1 367
9-10	215 026	111	3 517	90 632	938	1 561
10-11	212 922	109	3 380	90 464	936	1 554
11-12	211 121	112	3 380	91 980	958	1 576
12-13	220 293	117	3 587	94 276	976	1 611
13-14	205 002	108	3 232	87 234	899	1 557
14-15	215 880	107	3 340	88 552	940	1 551
15-16	208 738	106	3 183	85 364	901	1 488
16-17	217 042	111	3 295	89 723	941	1 563
17-18	218 154	115	3 188	90 692	949	1 569
18-19	218 561	115	3 308	89 718	927	1 541
19-20	211 513	112	3 061	86 111	888	1 478

Concentrations obtenues après attaque totale de la fraction pélitique ($\phi < 40 \mu\text{m}$) des sédiments.

COMPOSITION DES SÉDIMENTS EN SOUFRE EXTRACTIBLE

HORIZON (cm)	Soufre lixiviable (mg/kg)	Soufre échangeable (mg/kg)
0-1	1 724	2 525
1-2	1 735	1 964
2-3	1451	1 721
3-4	1 384	1 583
4-5	1 244	1 477

Concentrations obtenues après digestion sélective du soufre sur la fraction brute des sédiments.

COMPOSITION DES SÉDIMENTS EN MÉTAUX TOTAUX ET CALCIUM

MATIERE ORGANIQUE : concentrations en mg/kg									
Campagne	Horizon	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
2011	0-1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	1-2	0,3	23,5	0,6	4,9	24,5	1,0	<LQ	15 777
	2-3	0,5	40,7	0,4	1,6	17,7	1,1	<LQ	14 841
	3-4	0,7	46,0	0,6	3,1	25,0	1,8	<LQ	13 759
	4-5	0,3	36,5	0,5	2,4	16,0	1,0	<LQ	12 784
2010	Horizon	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
	0-1	0,3	25,4	0,3	8,1	21,1	0,6	<LD	9 968
	1-2	0,3	32,4	0,3	7,2	10,2	0,5	<LD	10 426
	2-3	0,7	39,4	0,3	4,9	9,7	0,5	<LD	11 376
	3-4	1,1	43,4	0,3	7,1	8,9	0,8	<LD	12 032
4-5	0,9	43,9	0,3	4,4	7,2	0,6	<LD	10 996	

ND : analyses non réalisée par manque de matière.

CARBONATES : concentrations en mg/kg									
Campagne	Horizon	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
2011	0-1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	1-2	6,4	6,9	1,1	168	365	11,8	2,3	207 639
	2-3	6,2	6,4	1,1	185	325	12,4	2,1	197 813
	3-4	6,0	5,6	2,9	195	299	11,1	3,4	193 576
	4-5	6,4	7,0	1,3	174	326	11,9	2,5	208 854
2010	Horizon	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
	0-1	7,0	12,4	1,1	142	406	9,3	1,5	201 020
	1-2	6,1	12,7	1,3	154	337	8,8	2,2	181 260
	2-3	6,3	12,9	1,6	169	330	10,2	2,0	176 076
	3-4	5,7	12,9	1,4	138	325	9,7	1,3	190 463
4-5	5,9	12,2	1,4	136	311	9,5	1,3	186 894	

ND : analyses non réalisée par manque de matière.

OXY-HYDROXYDES : concentrations en mg/kg									
Campagne	Horizon	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
2011	0-1	ND							
	1-2	11,0	11,6	<LQ	335	83,0	13,4	3,2	5480
	2-3	10,5	10,0	<LQ	230	77,2	13,6	3,2	5472
	3-4	11,8	11,9	<LQ	285	73,7	14,7	3,6	6397
	4-5	12,4	12,9	<LQ	241	72,3	15,5	4,4	5182
2010	Horizon								
	0-1	9,5	9,1	0,6	321	88,1	9,8	1,3	7209
	1-2	6,7	7,1	0,7	163	69,2	7,5	1,2	10066
	2-3	7,7	8,1	0,8	215	68,3	8,4	1,2	9801
	3-4	6,3	6,6	0,6	169	62,4	7,5	1,0	7974
	4-5	6,0	6,0	0,6	157	61,5	7,0	0,8	8680

ND : analyses non réalisées par manque de matière.

RESIDU : concentrations en mg/kg									
Campagne	Horizon	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Ca
2011	0-1	ND							
	1-2	69,3	2 775	< LQ	81 874	299,1	1 027	45,4	183
	2-3	69,7	2 759	< LQ	81 884	352,6	1 026	36,2	293
	3-4	68,4	2 753	< LQ	81 782	374,6	1 026	37,1	220
	4-5	67,9	2 760	< LQ	81 778	357,3	1 025	30,5	271
2010	Horizon								
	0-1	39,5	1731	5,7	29745	192	593	39,2	267
	1-2	58,4	2279	8,5	35143	284	896	50,9	346
	2-3	47,9	1780	7,1	33097	226	736	41,5	239
	3-4	52,1	2139	7,2	33598	253	794	44,1	307
	4-5	43,0	1848	6,3	31859	207	649	37,3	260

ND : analyses non réalisées par manque de matière.

Exceptionnellement pour la campagne 2011, les valeurs de concentrations dans la phase résiduelle sont issues du calcul :

« concentration en métaux totaux – somme des concentrations dans les 3 premières phases de l'extraction séquentielle ».

ANNEXE – 4

Résultats de spectrométrie gamma pour le calcul des taux de sédimentations à la carotte St16.

RADIOACTIVITÉ DU Pb-210 ET DU Ra-226

Horizon (cm)	Masse cumulée (g/cm ²)	Ra-226 (Bq/kg)	Incertitude (Bq/kg)	Pb-210 supporté (Bq/kg)	Incertitude (Bq/kg)	Pb-210 excès (Bq/kg)	Incertitude (Bq/kg)
0-1	0,395	4,1	1,6	167,0	11,0	162,9	12,6
1-2	0,830	2,5	0,4	135,0	4,0	132,5	4,4
2-3	1,321	2,4	0,4	123,0	4,0	120,6	4,4
3-4	1,855	1,8	0,6	130,0	4,0	128,2	4,6
4-5	2,474	1,86	0,28	113,0	3,0	111,1	3,3
5-6	3,034	1,6	0,4	105,0	4,0	103,4	4,4
6-7	3,768	1,89	0,25	92,0	3,0	90,1	3,3
7-8	4,485	2,5	0,5	88,0	4,0	85,5	4,5
8-9	5,094	2,3	0,4	64,7	2,7	62,4	3,1
9-10	5,881	1,93	0,29	55,1	2,4	53,2	2,7
10-11	6,697	2,03	0,24	57,3	2,0	55,3	2,2
11-12	7,546	2,3	0,5	64,0	4,0	61,7	4,5
12-13	8,381	2,2	0,3	60,0	3,0	57,8	3,3
13-14	9,275	3,7	0,5	49,0	3,0	45,3	3,5
14-15	10,171	3,1	0,5	31,0	3,0	27,9	3,5
15-16	10,996	2,3	0,5	19,4	2,4	17,1	2,9
16-17	11,787	2,3	0,4	12,5	1,6	10,2	2,0
17-18	12,726	2,2	0,3	12,2	1,9	10,0	2,2
18-19	13,612	2,4	0,4	9,9	2,3	7,5	2,7
19-20	14,451	2,8	0,5	12,0	2,5	9,2	3,0