



**SUIVI DES TAUX D'ACCUMULATION DANS :
LA RADE DU NORD (BAIE DU PRONY), LA BAIE KWE ET
L'ÎLE OUVEN (NOUVELLE-CALÉDONIE)**



RAPPORT FINAL

19 janvier 2011



CONTRAT DE CONSULTANCE AEL-LEA/VALE-NC

Convention n°E20532

#

#

#

SUIVI DES TAUX D'ACCUMULATION DANS LA RADE DU NORD (BAIE DU PRONY),
LA BAIE KWE ET L'ÎLE OUEN (NOUVELLE-CALEDONIE)

Mathieu DOLBECQ

Hélène LE GRAND

Ludovic BREAU

Jean-Michel FERNANDEZ

AEL-LEA, Nouvelle-Calédonie, Janvier 2011



Nombre de pages : 55

	N/Réf	V/Réf
Identification	N° 100216-VI-03	E20532
Titre	SUIVI DES TAUX D'ACCUMULATION DANS LA RADE DU NORD (BAIE DU PRONY), LA BAIE KWE ET L'ÎLE OUEN (NOUVELLE CALEDONIE)	
Auteurs	DOLBECQ M, LE GRAND H, BREAU L, FERNANDEZ JM	

Résumé :

Cette étude fait suite à la demande de définition de « l'Etat de référence » des taux d'accumulation effectué en 2007 dans la Rade du Nord (Baie du Prony) et dans la baie Kwe (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230). L'étude présentée a pour propos la surveillance des apports particuliers effectuée sur un total révisé de 3 stations réparties comme suit : St15 (Rade du Nord), St06-1 (Baie Kwe) et St13-3 (Île Ouen) ; ce suivi étant réalisé tri-annuellement. Un 4^{ème} carottage a été effectué au droit du port de commerce de Vale-NC pour le suivi annuel des impacts géochimiques liés aux activités maritimes.

Pour la Rade du Nord (St15), les résultats mettent en évidence l'impact de la rupture des digues de rétention de mars 2006 et de la fuite d'acide d'avril 2009. Les conditions de sédimentation semblent revenir progressivement à la normale tout comme dans la Baie Kwé, où l'impact des activités d'excavation semble manifeste dans les premiers centimètres de la carotte. Face à l'Île Ouen (St 13-3), le régime sédimentaire semble avoir été modifié durant ces 20 dernières années, mais cette interprétation demande à être vérifiée.

En ce qui concerne le port de commerce de Vale-NC (St16), les profils géochimiques ne permettent, pour l'instant, que la mise en évidence d'un état de référence des éléments disponibles ou facilement labiles dont ont suivra l'évolution dans le temps.

APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Mathieu Dolbecq,		06/01/2011
Vérificateur	Ludovic Breau		07/01/2011
Approbateur	Jean-Michel Fernandez		18/01/2011

EVOLUTION		
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE
1.0	Rapport final	18/01/2011

COPIE - DIFFUSION	
NOM	ORGANISME
C. Casalis	VALE NC, Département Environnement

Sommaire

INTRODUCTION.....	7
OBJECTIFS	7
METHODOLOGIE.....	7
Site d'étude.....	7
Echantillonnage et conditionnement	8
Méthodes analytiques.....	9
RESULTATS & DISCUSSION	10
Carotte St15	10
Caractéristiques physiques de la carotte.....	10
Granulométrie des particules.....	11
Minéralogie des sédiments	11
Composition chimique des sédiments	12
Détermination du ²¹⁰ Pb.....	15
Discussion	16
Carotte St06-1	17
Caractéristiques physiques de la carotte.....	17
Granulométrie des particules.....	17
Minéralogie des sédiments	18
Composition chimique des sédiments	19
Détermination du ²¹⁰ Pb.....	22
Discussion	23
Carotte St13-3.....	23
Caractéristiques physiques de la carotte.....	23
Granulométrie des particules.....	24
Minéralogie des sédiments	25
Composition chimique des sédiments	25
Détermination du ²¹⁰ Pb.....	27
Discussion	28
Carotte St16	29
Distribution des métaux associés aux phases géochimiques des sédiments	29
Disponibilité du Soufre	34
CONCLUSION	35
LISTE DES FIGURES.....	36
LISTE DES TABLEAUX.....	37
LISTE DES ANNEXES	38

INTRODUCTION

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

Cette étude fait suite à une demande de définition de « l'Etat de référence » des taux d'accumulation des sédiments au niveau de la proche embouchure des creeks de la Rade du Nord (Baie du Prony) et de la Kwé (Convention Goro-Ni n°1230, 2007).

Dans le but de se conformer aux arrêtés ICPE, Vale-NC demande un programme de suivi des taux d'accumulation des deux aires précédemment citées ainsi qu'un complément d'information à proximité de l'Ile Ouen et au droit de la zone portuaire.

Ce document présente la première étude de ce suivi triennal des flux sédimentaires déposés dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie.

OBJECTIFS

Dans les trois zones décrites (Rade du Nord–St15-, Baie Kwé–St06-1- et Ile Ouen–St133-3-), l'objectif est d'estimer l'évolution des taux d'accumulation sédimentaire récents. Cette estimation permet de retracer la chronologie des événements sédimentaires dans la continuité des études de référence de 2007.

Par ailleurs, un quatrième site (St16-1) a été échantillonné par carottage afin d'étudier périodiquement (annuellement) avec la meilleure précision possible la couche centimétrique des sédiments déposés au droit du port de commerce de l'usine de Vale-NC. Cette opération est destinée à suivre précisément l'impact environnemental de son activité industrielle.

METHODOLOGIE

Site d'étude

Les opérations de terrain ont été réalisées lors de deux campagnes conduites du 16 au 17 mars 2010 et le 8 avril 2010 à bord du Manta sur les quatre stations telles que prédéfinies dans le cahier des charges (

Figure 1).

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

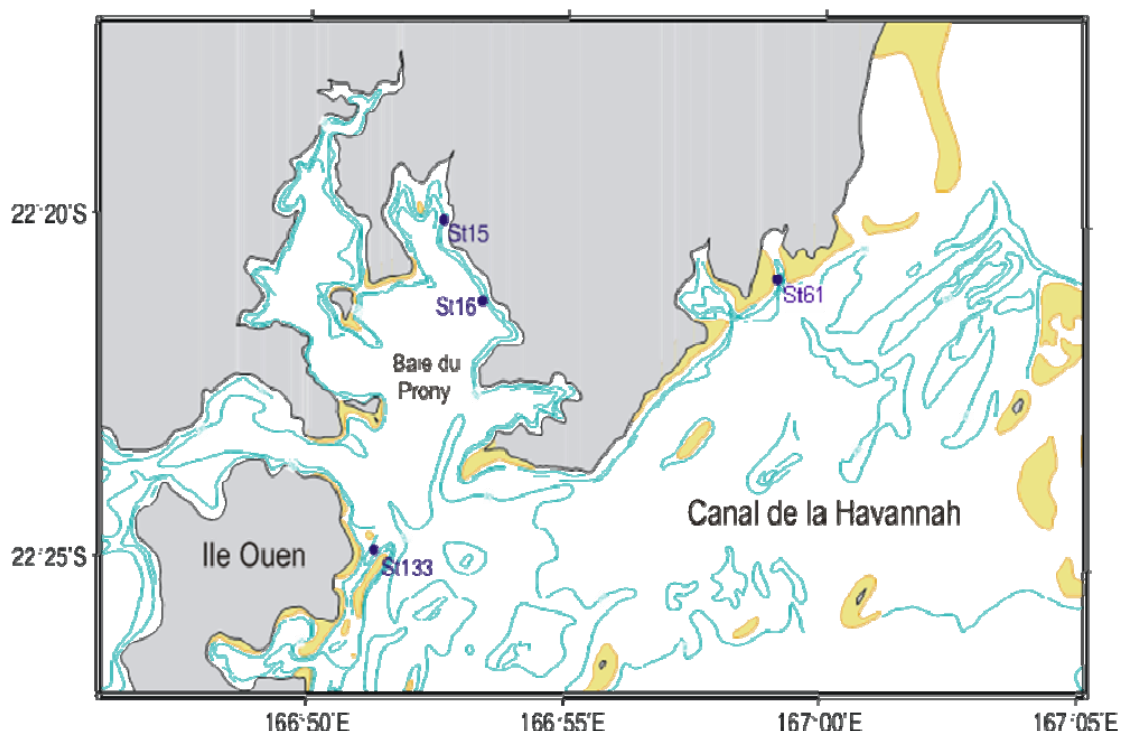


Figure 1 : Localisation des sites de carottage du suivi triennal des taux d'accumulation (Stations St06-1, St15 et St13-3). Localisation de la carotte St16 pour le suivi annuel des impacts du port de commerce de Vale-NC.

Echantillonnage et conditionnement

Trois carottes ont été extraites afin de déterminer les taux d'accumulation aux stations St06-1 (Baie Kwé), St13-3 (Ile Ouen) et St15 (Rade du Nord) (Tableau 1). La carotte St15 a été prélevée exactement au même endroit que la carotte PR-1 du précédent rapport ; de même, la carotte St06-1 aurait dû reprendre la position de la carotte KW1 mais a été décalée de 350 mètres à l'intérieur de la baie car le prélèvement était rendu difficile par la présence inattendue d'une couche de sable impénétrable pour notre carottier.

Afin de réaliser le suivi de l'impact géochimique du port de commerce à la station St16, un carottage a été effectué dont seulement les cinq premiers centimètres ont été analysés pour le suivi de la qualité géochimique des sédiments.

Les prélèvements de carotte ont été effectués 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 est utilisé par site de carottage afin de conserver chaque carotte verticalement depuis son prélèvement jusqu'à son découpage. Ce carottier présente l'avantage d'assurer la conservation de l'interface eau-sédiments dans les meilleures conditions.

Les carottes des stations St15 et St06-1 ont été échantillonnées en horizons d'une épaisseur égale à 2 cm. Respectivement, 21 et 26 horizons ont ainsi été échantillonnés directement à bord du N/O Manta. Les carottes St13-3 et St16 ont été échantillonnées en 22 et 13 horizons d'épaisseur égale à 1 cm, respectivement. 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.

Tableau 1 : Date de prélèvement, positionnement GPS des stations (référentiel universel WGS 84), profondeur d'eau et longueur de la carotte aux quatre stations échantillonnées.

Station	Date	Longitude Est	Latitude Sud	Profondeur (m)	Longueur (cm)
St15	16/03/2010	166°52.590	22°20.037	24	42
St06-1	17/03/2010	166°59.077	22°20.643	27	44
St13-3	08/04/2010	166°52.421	22°24.533	60	13
St16	16/03/2010	166°53.300	22°21.455	42	26

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 après analyse des deux radionucléides naturels (^{210}Pb et ^{226}Ra) par spectrométrie gamma basse énergie dans chaque horizon.

Tous les échantillons de sédiments destinés à l'analyse des métaux ont ensuite été tamisés par voie humide afin de récupérer les fractions pélitiques (particules de diamètre inférieur à 40 μm) sur lesquelles diverses analyses géochimiques et minéralogiques ont été effectuées.

Les analyses réalisées sur chaque fraction pélitique des carottes St15, St06-1 et St13-3 sont les suivantes :

- Analyse granulométrique des carottes 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 ICP-OES.

Pour la station St16, les analyses suivantes ont été effectuées :

- Détermination de la concentration des métaux associés aux différentes phases géochimiques composant les horizons par extraction séquentielle puis analyse par ICP-OES. Ces analyses ont été effectuées sur la fraction pélitique des sédiments.
- Analyse du soufre, dont le suivi reflètera le niveau d'impact des activités portuaires sur le milieu marin. Ces analyses ont été réalisées à partir de l'échantillon global non tamisé.

Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques utilisées dans ce rapport sont décrites en Annexe 1.

RESULTATS & DISCUSSION

Carotte St15

Caractéristiques physiques de la carotte

Les résultats des paramètres physiques des sédiments sont regroupés dans l'Annexe 5.

L'examen visuel de cette carotte montre clairement une évolution d'une vase très fluide en surface vers un sédiment plus compact vers le fond. Sa couleur brun-orangé sombre est caractéristique d'un contenu important en oxydes de fer latéritiques (Figure 2).

La densité humide des sédiments de chaque horizon augmente globalement avec la profondeur, ce qui traduit la compaction progressive des sédiments (Figure 3). Cette tendance générale s'effectue par paliers entrecoupés de brusques augmentations significatives de modifications dans le régime des apports. Les valeurs les plus faibles s'observent dans les deux premiers horizons, soit $1,50 \text{ g/cm}^3$. Après une augmentation sensible ($1,62 \text{ g/cm}^3$) à l'horizon 5 cm, les valeurs se stabilisent vers $1,56 \text{ g/cm}^3$ entre 7 et 13 cm de profondeur avant d'augmenter à nouveau nettement jusqu'à $1,78 \text{ g/cm}^3$ à l'horizon 17 cm. Un nouveau palier s'observe ensuite entre 19 et 29 cm de profondeur avec une densité humide moyenne de $1,67 \text{ g/cm}^3$. Le bas de la carotte se caractérise par une augmentation très marquée des valeurs jusqu'à $1,94 \text{ g/cm}^3$; ces valeurs décroissent ensuite jusqu'à $1,75 \text{ g/cm}^3$ dans l'horizon le plus profond.



Figure 2 : Photographie de la carotte St15.

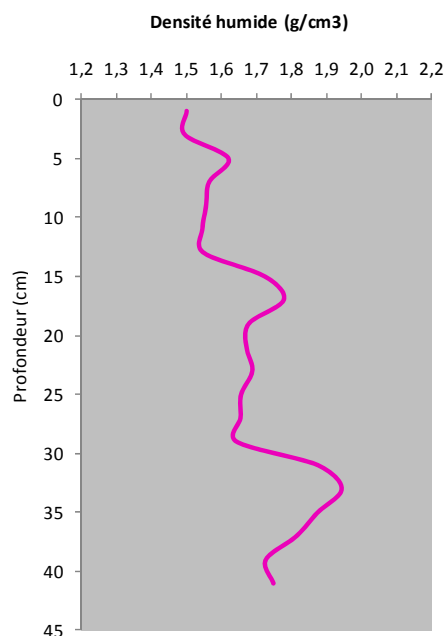


Figure 3 : Profil vertical de la densité humide de la carotte St15.

Granulométrie des particules

Comme le souligne la Figure 4 ci-dessous, même si le taux de pélites montre une hétérogénéité relative dans sa distribution verticale ($82,5 \pm 6,7 \%$) celui-ci tend à l'augmentation depuis les horizons les plus anciens vers les plus récents. Les niveaux plus anciens situés au dessous de 28-30 cm présentent un taux de pélites compris entre 70 et 80 % ; ce taux croît progressivement jusqu'à 93,1 % vers la surface de la carotte. Cette augmentation traduit donc un enrichissement en particules fines au cours du temps. Cet enrichissement est entrecoupé d'une diminution marquée entre les horizons 7 et 5 cm avant de reprendre jusqu'à la surface.

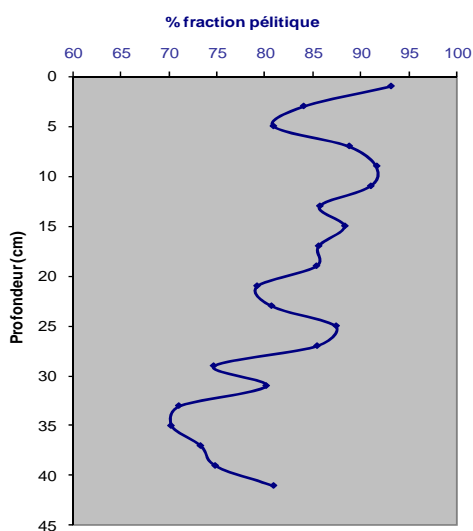


Figure 4 : Evolution verticale du taux de pélites (< 40 µm) dans la carotte St15.

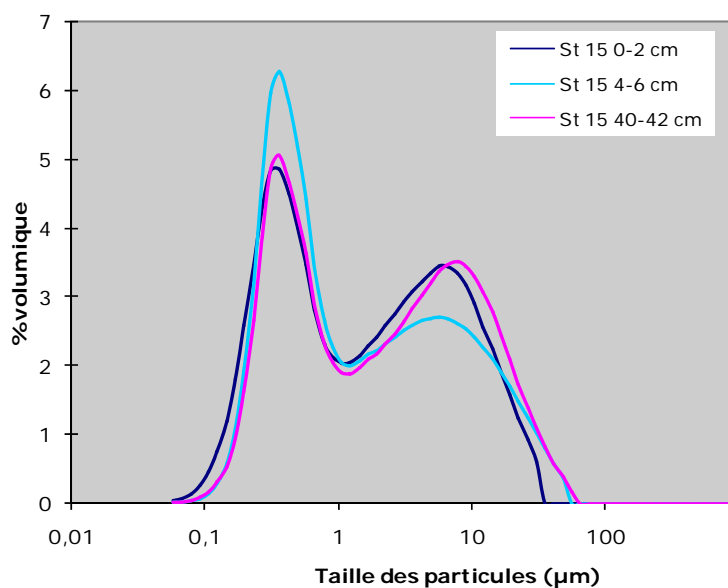


Figure 5 : Distribution granulométrique des pélites de la carotte St15.

L'analyse granulométrique de la fraction fine, réalisée par diffraction laser sur les horizons 0-2 cm, 4-6 cm et 40-42 cm, révèle l'existence de populations de particules caractérisées par deux modes principaux dans les trois horizons étudiés (Figure 5). Les trois spectres présentent un mode à 0,3 µm identique et un deuxième mode qui diffère selon les horizons. En effet, le spectre de l'horizon 40-42 cm présente un mode à 7,7 µm alors que les horizons 0-2 cm et 4-6 cm présentent tous les deux un mode à 5,7 µm mais dont la population est mieux représentée en proportion dans l'horizon supérieur. La taille moyenne des pélites a diminué au cours du temps.

Minéralogie des sédiments

Les résultats de l'analyse minéralogique sont présentés en Annexe 3.

Chacun des trois horizons contient les minéraux suivants : la calcite et l'aragonite (minéraux carbonatés d'origine marine), ainsi que la gibbsite, la kaolinite, la goethite et l'augite qui sont des minéraux issus de l'altération des roches péridotiques.

Les horizons de surface (0-2 cm et 4-6 cm) contiennent en outre de la lizardite (orthoantigorite, un minéral issu de l'altération des roches ultrabasiques) que l'on ne retrouve pas dans l'horizon le plus ancien (base de la carotte). Par ailleurs, en particulier l'horizon 4-6 cm (et 40-42 cm dans une moindre mesure) contient un minéral d'origine latéritique riche en oxydes de fer, l'hématite, qui est absent dans l'horizon supérieur. L'horizon 40-42 cm est le seul à contenir des traces de talc issu du métamorphisme.

Composition chimique des sédiments

L'ensemble des résultats sont regroupés dans l'annexe 2. Les profils verticaux des concentrations totales en Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn déterminées dans les sédiments sont présentés à la Figure 6.

Calcium :

Les concentrations en calcium sont relativement faibles dans ces sédiments, avec une valeur moyenne de $33,2 \pm 6,6$ mg/g. Trois tendances successives s'observent le long du profil de concentrations. De la surface de la carotte jusqu'à la cote 19 cm de profondeur, une légère augmentation globale s'observe mais celle-ci est marquée par une succession de fortes variations de la concentration qui oscille entre 25 et plus de 40 mg/g. Les concentrations diminuent ensuite régulièrement jusqu'à 23 mg/g entre 19 et 30 cm de profondeur, puis augmentent à nouveau régulièrement dans la couche la plus profonde jusqu'à 39 mg/g au fond (couche contenant les débris coquillés).

Cobalt :

Les concentrations en cobalt présentent de grandes variations allant de 233 $\mu\text{g/g}$ à 514 $\mu\text{g/g}$ avec une valeur moyenne de 369 ± 85 $\mu\text{g/g}$. Des horizons les plus anciens vers les plus récents, la concentration augmente d'abord légèrement de 469 $\mu\text{g/g}$ au bas de la carotte à 514 $\mu\text{g/g}$ au niveau 28-30 cm. Au dessus de ce niveau la concentration tend nettement à une diminution jusqu'au niveau 2-4 cm, de 513 à 233 $\mu\text{g/g}$. Le niveau supérieur montre quant à lui une concentration de 359 $\mu\text{g/g}$. L'écart entre ces deux niveaux correspond avec l'augmentation de concentration la plus nette de cette série.

Chrome :

Les concentrations en chrome ne présentent pas de tendance nette le long de cette carotte. La concentration moyenne est de $15,8 \pm 1,9$ mg/g.

Cuivre :

La concentration en cuivre est faible avec une valeur moyenne de $17,3 \pm 2,2$ $\mu\text{g/g}$. Du bas de la carotte jusqu'à 5 cm de la surface, la concentration diminue de manière régulière de 20,2 à 13,8 $\mu\text{g/g}$. Dans les premiers 5 cm, on note qu'elle augmente brusquement jusqu'à 21,7 $\mu\text{g/g}$.

Fer :

Le fer présente une distribution différente de part et d'autre de l'horizon 20-22 cm. En

dessous de cette limite, sa valeur est quasi-constante, soit 355 ± 10 mg/g. Au dessus, cette concentration tend à diminuer mais fluctue beaucoup avec une valeur moyenne de 277 ± 31 mg/g. Comme pour le cobalt, on observe une augmentation importante de la concentration dans l'horizon le plus récent.

Manganèse :

La concentration moyenne en manganèse le long de la carotte est de $2,8 \pm 0,5$ mg/g. Elle décroît progressivement de 3,9 mg/g dans l'horizon le plus bas jusqu'à 2,0 mg/g au niveau 2-4 cm. Le niveau supérieur affiche une concentration à 2,8 mg/g ce qui représente, comme pour le fer, 50% d'augmentation dans l'horizon centimétrique de surface.

Nickel :

Comme pour le fer (et le Mn ?), Du bas de la carotte jusqu'à l'horizon 24-26 cm, la concentration en nickel est presque constante avec une valeur de $4,9 \pm 0,2$ mg/g. De l'horizon 24-26 cm à l'horizon 2-4 cm, la concentration décroît progressivement jusqu'à 2,8 mg/g. Une concentration plus élevée (4,2 mg/g) s'observe aussi dans l'horizon de surface.

Zinc :

Du bas de la carotte à l'horizon 14-16 cm, la concentration en zinc diminue de manière progressive de 195 à 167 μ g/g. Au dessus de 14 cm, la distribution verticale ne suit pas une tendance nette mais fluctue entre 118 et 195 μ g/g jusqu'à la surface.

En résumé

Globalement pour tous les métaux, on observe les évolutions suivantes :

- une diminution nette des concentrations entre la surface (0-2 cm) et l'horizon sous-jacent (2-4 cm) ;
- des concentrations variables entre les horizons 2-4 cm et 14-16 cm environ autour d'une valeur moyenne ;
- une tendance générale à l'augmentation des concentrations (exception faite de Ca) entre les horizons 14-16 cm et 27-29 cm ;
- une certaine stabilisation des concentrations jusqu'au bas de la colonne sédimentaire, exception faite de Ca (voir de Mn) qui augmentent considérablement.

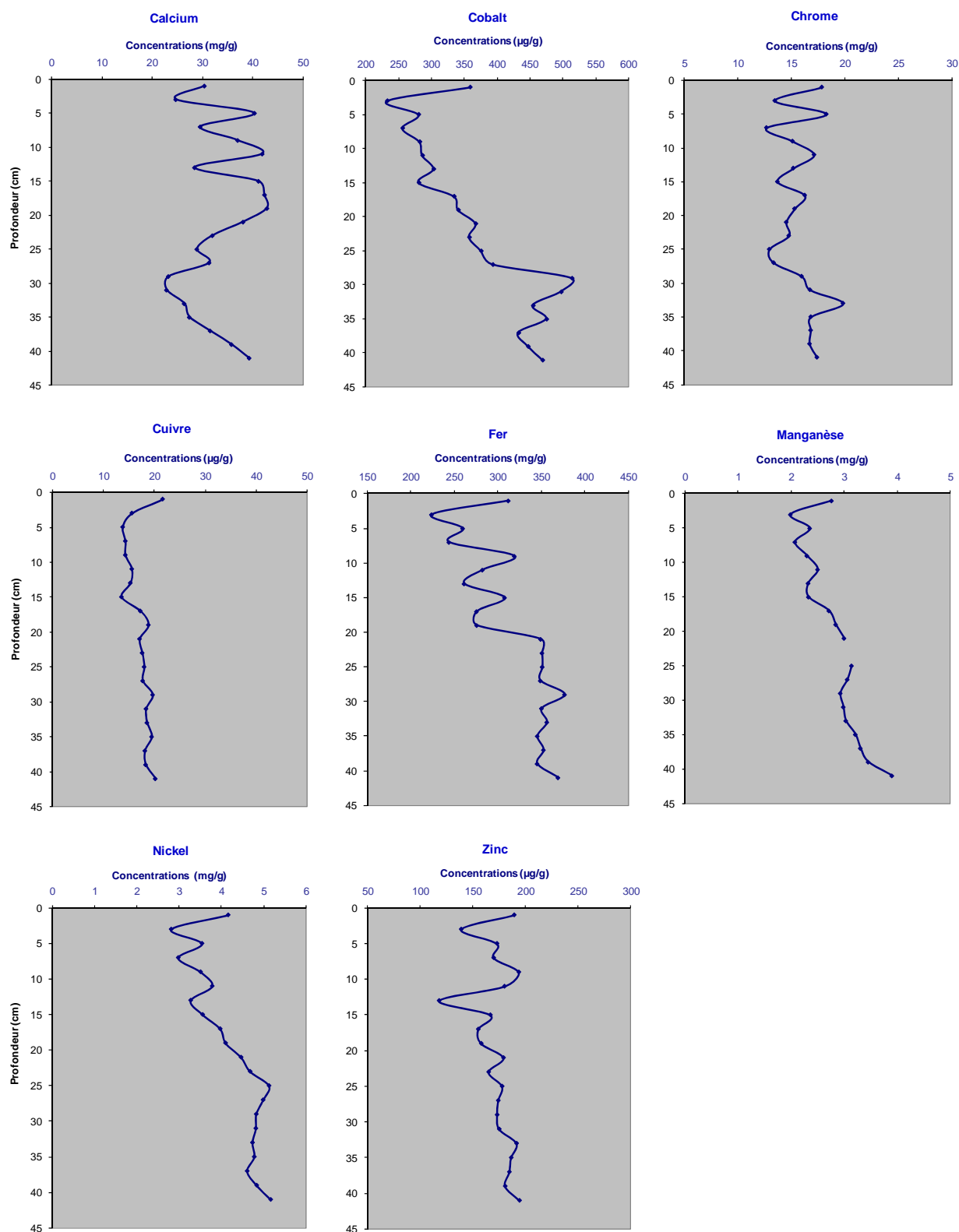


Figure 6 : Evolution verticale des concentrations en calcium et métaux (Cu, Co, Fe, Mn, Ni et Zn) dans la carotte de la station St15.

Détermination du ^{210}Pb

Les résultats de l'analyse de la radioactivité par spectrométrie gamma sont présentés en annexe 4.

La radioactivité du ^{210}Pb décroît de 40,9 mBq/g dans les sédiments de surface à 9,3 mBq/g à 35 cm de profondeur. La radioactivité du ^{226}Ra est normalement constante dans tous les échantillons, soit $2,5 \pm 0,3$ mBq/g. Pour le ^{137}Cs , elle est toujours inférieure à 1 Bq/g voire inférieure à la limite de détection ; compte tenu de son très faible niveau de radioactivité, ce radionucléide artificiel n'est donc pas utilisable pour la datation.

La courbe semi-logarithmique représentant l'évolution de la radioactivité du ^{210}Pb avec la profondeur (Figure 7) permet de distinguer chronologiquement trois épisodes radiologiques distincts :

- Le premier, entre les cotes 13 à 35 cm, montre une diminution régulière de la radioactivité du ^{210}Pb . Elle est le reflet du régime sédimentaire relativement constant qui a prévalu pendant la mise en place du dépôt. Une droite de régression semi-logarithmique ($R^2 = 0,959$) a permis de calculer le taux d'accumulation : $0,36 \text{ g/cm}^2/\text{an}$;
- Le deuxième se caractérise par une augmentation anormale de la radioactivité du ^{210}Pb avec la profondeur (entre les cotes 5 et 13 cm) ;
- Le troisième épisode concerne les 5 premiers centimètres où la distribution du radio-traceur revient progressivement à une distribution normale, c'est-à-dire à une décroissance en fonction de la profondeur.

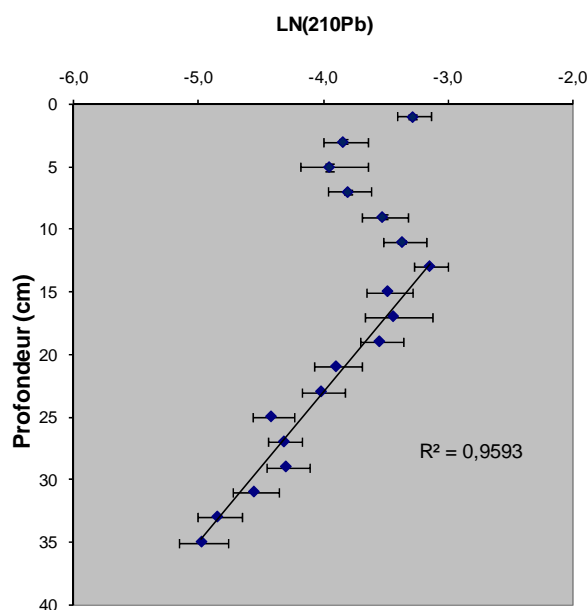


Figure 7 : Profil vertical de la radioactivité du ^{210}Pb dans la carotte St15.

Discussion

La variabilité importante des taux de pélites et des concentrations en métaux montre que le dépôt sédimentaire résulte d'événements brusques, à répétition. Cependant malgré ces fluctuations, du bas de la carotte jusqu'à l'horizon 12-14 cm, s'observe une tendance nette à l'accroissement de la teneur en particules fines au cours du temps. Cet accroissement s'accompagne d'une modification dans la nature du matériel particulaire comme l'indique l'évolution minéralogique : présence d'hématite dans les couches les plus anciennes, substituée progressivement par de la lizardite dans les horizons récents). Globalement, ces apports reflètent l'évolution du lessivage des sols plus ou moins remaniés qui mobilise des particules de tailles variées, phénomène qui va en s'épuisant dans le temps pour ne transporter majoritairement que le matériel de faible diamètre.

Globalement pour la carotte St15, l'ensemble des paramètres géochimiques permet de dégager la chronologie suivante :

- Du bas de la carotte jusqu'à la cote 28 cm environ, la diminution des concentrations en calcium biogène (CaCO_3) reflète une nette décroissance de l'influence marine au cours du temps. Cette atténuation s'accompagne d'une augmentation des concentrations de certains métaux marqueurs des apports terrigènes, comme le cobalt, le fer (hématite), voire le chrome.
- Des cotes 28 cm à 15 cm, on observe une phase d'inversion complète des influences marines. Cette augmentation s'accompagne d'une diminution des apports en métaux terrigènes comme le cobalt, le nickel, le fer ou le manganèse. L'augmentation de la fraction pélitique des sédiments est dans ce cas attribuable aux altérations de carbonates biogènes.
- Des cotes 15 cm à 5 cm environ, les sédiments sont caractérisés par une radioactivité anormalement décroissante vers les couches les plus récentes. Cette décroissance est à relier à des phénomènes de dilution isotopique générés par des apports en matériel particulaire pauvre en ^{210}Pb atmosphérique. Cet apport peut correspondre avec la mise en place brusque d'une grande quantité de matériel particulaire appauvri en ^{210}Pb , comme les remblais qui constituaient les bassins de rétention des eaux pluviales et de drainage (accident de mars 2006). Cette hypothèse est confortée par la brusque diminution du taux de pélites et par les variations conséquentes de la densité humide.
- De la cote 5 cm jusqu'à la surface, la remontée du taux de pélites suggère un retour progressif aux conditions normales de dépôt. Par ailleurs, les concentrations en métaux, systématiquement beaucoup plus élevées dans l'horizon de surface (0-2 cm), suggèrent que l'enrichissement en métaux puisse provenir d'un événement particulier ; les sols attaqués par le déversement de la solution d'acide sulfurique d'avril 2009 (Convention IRD/Goro-Ni, n° 2284) pourraient être la cause.

Pour les deux épisodes les plus anciens, un taux moyen d'accumulation a pu être évalué à $0,36 \text{ g/cm}^2/\text{an}$. Cette valeur est en parfaite correspondance avec la moyenne calculée en 2007

(contrat de consultance IRD/GoroNi, Convention n°1230). Cependant, dans l'étude 2010, il n'a pas été possible de décomposer les profils semi-logarithmiques pour distinguer deux épisodes sédimentaires ; l'observation d'anomalies radioactives du ^{210}Pb au niveau d'horizons sédimentaires équivalents entre les deux carottes conforte cependant la probabilité de l'existence réelle de deux phénomènes sédimentaires dans les deux carottes. Une étude plus détaillée permettrait de relier ces épisodes sédimentaires avec les activités humaines passées (édification du bagne à l'embouchure du Creek de la Rade Nord, déforestation, ouverture des pistes,...) en effectuant un second carottage dans une aire plus profonde de la rade.

Carotte St06-1

Caractéristiques physiques de la carotte

Les résultats des paramètres physiques des sédiments sont regroupés dans l'Annexe 5.

L'examen visuel montre une colonne sédimentaire de couleur brune, fluide en surface et de densité humide élevée au dessous de 20 cm (Figure 8). Globalement, une augmentation graduelle de la densité humide s'observe avec la profondeur. Les valeurs oscillent de 1,44 à 1,48 g/cm³ dans les trois premiers horizons, puis passent à 1,59 g/cm³ à l'horizon 7 cm. Les valeurs augmentent ensuite progressivement jusqu'à la cote 30 cm de profondeur où elles oscillent entre 1,63 et 1,74 g/cm³ jusqu'au bas de la carotte (Figure 9).



Figure 8 : Photographie de la carotte St06-1.

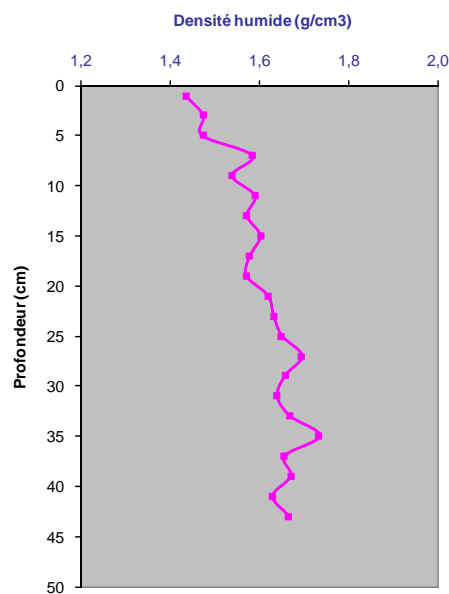


Figure 9 : Profil vertical de la densité humide de la carotte St06-1.

Granulométrie des particules

La proportion de particules fines du sédiment total ne montre pas d'évolution très nette au cours du temps bien que, dans l'horizon de surface une légère augmentation semble se

dessiner. Les teneurs en pélites s'échelonnent entre 74,3 et 82,4 % sur l'ensemble de la carotte (Figure 10).

L'étude détaillée de la distribution des populations granulométriques met en évidence la présence de deux modes, dont le principal présente des différences entre les trois horizons étudiés. Le mode secondaire est relativement similaire entre les trois horizons étudiés (Figure 11) ; comme pour la carotte St15 ce mode secondaire est de 0,3 μm .

Respectivement, pour les horizons 0-2 cm, 4-6 cm et 40-42 cm, le mode principal est de 26,2 μm , 22,5 μm et 14,2 μm ; dans l'horizon le plus ancien, la distribution est plus étalée et proportionnellement, les fines tailles de particules sont plus nombreuses que dans les niveaux supérieurs. Au cours du temps la taille moyenne des pélites augmente alors que parallèlement la distribution granulométrique se resserre autour des modes principaux respectifs.

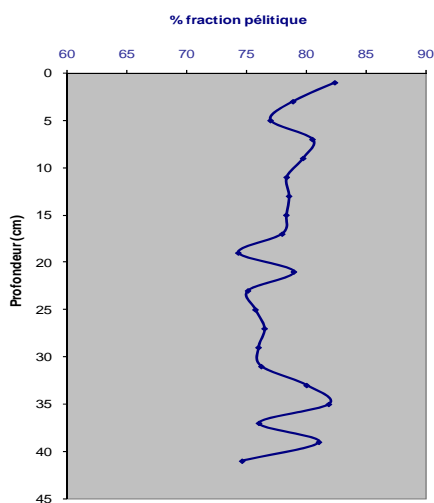


Figure 10 : Evolution verticale du taux de pélites (fraction fine, < 40 μm) dans la carotte St06-1.

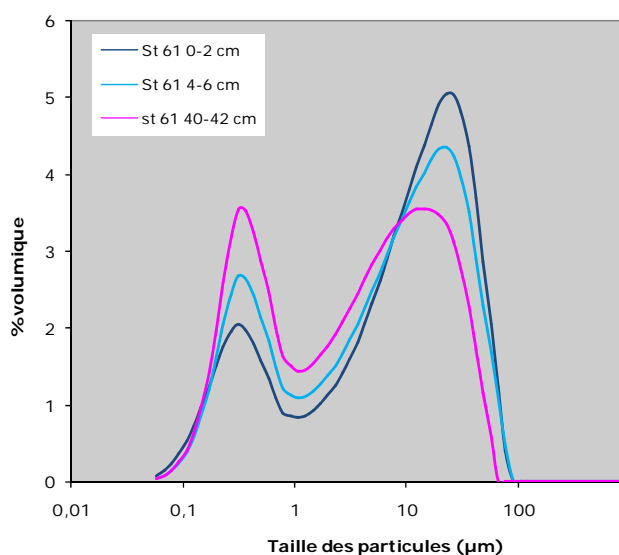


Figure 11 : Distribution granulométrique des pélites de la carotte St06-1.

Minéralogie des sédiments

Les résultats de l'analyse minéralogique sont présentés en Annexe 3.

Les trois horizons contiennent tous les minéraux suivants : la calcite, la calcite magnésienne et l'aragonite (minéraux carbonatés d'origine marine), ainsi que la donathite (spinel chromo-ferrugineuse), la goethite, le talc et le quartz d'origine terrigène.

Dans les horizons 0-2 cm et 4-6 cm on décèle un minéral issu de l'altération des roches ultrabasiques, la lizardite, que l'on ne trouve pas dans l'horizon le plus ancien (base de la carotte). L'horizon 4-6 cm contient des traces d'un minéral, l'hématite qui constitue la cuirasse des séries latéritiques.

Composition chimique des sédiments

L'ensemble des résultats sont regroupés dans l'annexe 2 et la Figure 12 illustre graphiquement les concentrations mesurées en fonction de la profondeur pour Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn.

Calcium :

Cet élément majeur est un traceur de l'influence marine et sa concentration diminue fortement dans l'horizon de surface (0-2 cm). En-dessous, bien que peu marquées, deux tendances peuvent être observées : de l'horizon de subsurface (2-4 cm) jusqu'à la cote 21 cm, les concentrations diminuent très légèrement de 242 à 213 mg/g. Au dessous de 21 cm, les concentrations montrent une tendance à l'augmentation à nouveau (230 mg/g) à 35 cm de profondeur. La base de la carotte ne montre en revanche aucune tendance mais, les valeurs varient fortement d'un horizon à l'autre.

Cobalt :

Le cobalt montre dans l'ensemble un profil inverse à celui observé pour le calcium, exception faite pour l'horizon de surface où la concentration diminue également. En-dessous, les valeurs augmentent globalement de 137 µg/g en subsurface à 161 µg/g à 21 cm de profondeur selon deux phases successives : de la subsurface jusqu'à 11 cm de profondeur, les concentrations augmentent jusqu'à 156 µg/g puis diminuent brusquement à la cote 13 cm (137 µg/g). Une nouvelle phase d'augmentation est observée jusqu'à la cote 21 cm, où les valeurs atteignent 161 µg/g. Entre 21 cm et 29 cm, les concentrations diminuent jusqu'à 139 µg/g puis se stabilisent jusqu'à la base de la carotte malgré des fluctuations répétées.

Chrome :

Les concentrations en chrome ne montrent aucune tendance particulière dans la moitié supérieure de la colonne sédimentaire. Une très légère augmentation s'observe entre la base de la carotte et la cote 21 cm. Les concentrations n'oscillent que très légèrement autour de 7,3 mg/g. Cette constance dans les concentrations est à relier à la présence des spinels dont l'altérabilité est quasi-nulle dans le temps.

Cuivre :

Le profil vertical des concentrations se caractérise par une diminution globale d'un facteur 3 des valeurs entre la base de la carotte et la cote 5 cm. Cette diminution connaît de fortes variations pour passer de 16,3 à 7,3 µg/g respectivement entre les cotes 43 et 21 cm puis devient quasiment constante entre les cotes 21 et 3 cm. Dans les sédiments les plus récents (0-2 cm), la concentration augmente sensiblement à environ 10 µg/g.

Fer :

L'évolution des concentrations en fer le long de la colonne sédimentaire est identique à celle du cobalt ; une relativement forte diminution de la concentration dans l'horizon de surface (0-

2 cm) caractérise la carotte. En dessous, les concentrations subissent une augmentation en deux étapes : entre 5 et 11 cm de profondeur, puis entre 13 et 21 cm où elles atteignent 173 mg/g. Les concentrations diminuent ensuite légèrement jusqu'à 152 mg/g à 29 cm puis fluctuent dans les sédiments les plus anciens.

Manganèse :

Le profil du manganèse est identique à celui du chrome puisqu'il présente des variations de concentrations très peu marquées, toutes les valeurs étant comprises entre 1,1 et 1,4 mg/g sur l'ensemble de la colonne sédimentaire. Un très léger enrichissement en Mn est noté dans l'horizon de surface.

Nickel :

Le profil vertical des concentrations en nickel est proche de ceux de Cr et Mn. En effet, comme pour le manganèse, les variations observées sont très faibles : les concentrations sont comprises dans une fourchette allant de 2,4 à 3,2 mg/g entre le haut et le bas de la colonne sédimentaire. Toutefois, on note une très légère tendance progressive à la diminution des concentrations dans les sédiments les plus récents.

Zinc :

L'évolution verticale des concentrations en zinc se rapproche davantage de celle du cuivre que de celle des autres métaux. Celle-ci correspond à une diminution globale des valeurs dans les horizons les plus récents, soit de 170 à 69 µg/g. La plus forte diminution s'observe entre les horizons 37 cm (170 µg/g) et 31 cm (89 µg/g).

En résumé

Globalement, on observe les évolutions suivantes :

- une diminution nette des concentrations dans l'horizon de surface (0-2 cm) par rapport aux dépôts sous-jacents, pour Ca, Co, Fe (voire Ni). A l'inverse, les éléments Cu, Mn et dans une toute moindre mesure Zn (voire Cr) y sont plus concentrés en surface ;
- des tendances soit à l'augmentation des concentrations avec la profondeur pour (Co, Fe, Ni, voire Zn), soit, inversement à la diminution (Ca Cr, voire Cu) jusqu'à la cote 23 cm environ ;
- de fortes variations dans les sédiments les plus anciens mais, aucune sans tendance particulière n'est observable.

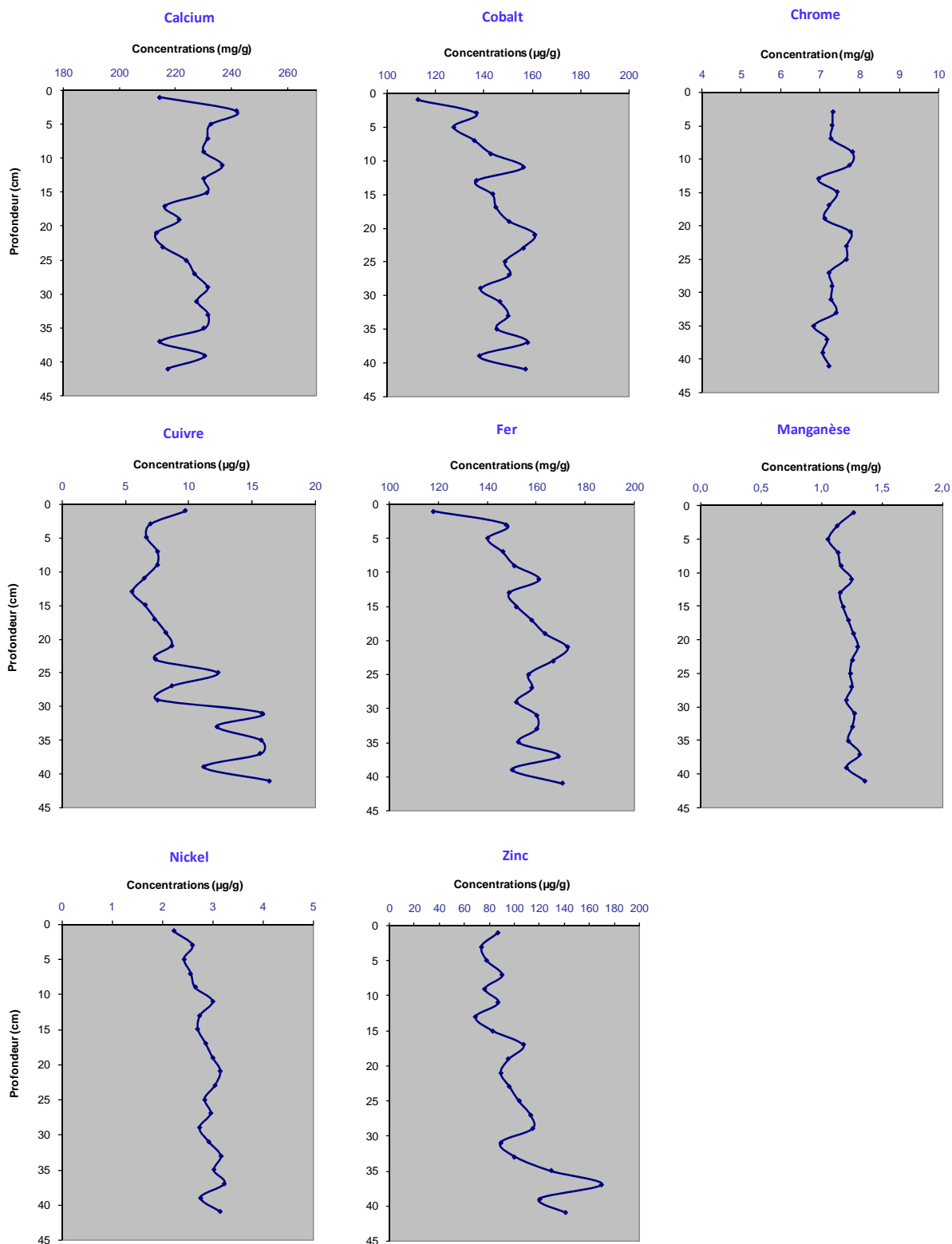


Figure 12 : Evolution verticale des concentrations en calcium et métaux (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) dans la carotte de la station St06-1.

Détermination du ^{210}Pb

Les résultats de l'analyse de la radioactivité par spectrométrie gamma sont présentés en annexe 4.

La radioactivité du ^{210}Pb s'échelonne de 114 mBq/g en surface à 65 mBq/g en bas de carotte avec une radioactivité constante attribuée au ^{226}Ra égale à $2,0 \pm 0,1$ mBq/g. Les valeurs de ^{137}Cs sont systématiquement inférieures à 3,2 mBq/g ce qui ne permet pas de disposer de ce radio-traceur artificiel pour la datation des événements sédimentaires.

La courbe semi-logarithmique (Figure 13) représentant l'évolution de la radioactivité du ^{210}Pb avec la profondeur permet de distinguer chronologiquement deux (voire trois) épisodes sédimentaires distincts :

- Le premier, entre les cotes 13 à 37 cm, montre une diminution régulière de la radioactivité du ^{210}Pb . Elle est le reflet d'un régime sédimentaire relativement constant qui a prévalu pendant la mise en place du dépôt. Une droite de régression semi-logarithmique ($R^2 = 0,807$) a permis de calculer le taux d'accumulation qui est relativement élevé : $1,83 \text{ g/cm}^2/\text{an}$;
- Le deuxième se caractériserait par une faible augmentation anormale de la radioactivité du ^{210}Pb avec la profondeur (entre 5 à 13 cm) ;
- Le troisième épisode concernerait les 5 premiers centimètres où la distribution du radio-traceur revient progressivement à une distribution normale.

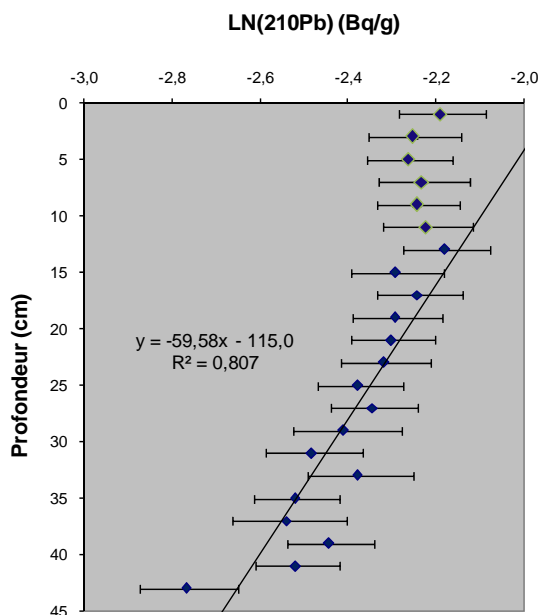


Figure 13 : Profil vertical de la radioactivité du ^{210}Pb dans la carotte St06-1.

Discussion

Cette carotte St06-1 est caractérisée par un taux de pélites qui fluctue relativement peu ($74,3 \pm 2,4\%$) mais dont la mise en place s'est produite de manière pulsée. Toutefois, en particulier dans les cinq premiers centimètres de la carotte, une tendance nette à l'augmentation des teneurs en fractions pélitiques se dessine accompagnée d'une augmentation légère des modes.

Globalement, l'ensemble des paramètres permet de dégager les points suivants :

- Outre les apports carbonatés, les 13 premiers centimètres de la colonne sédimentaire peuvent être le résultat de la combinaison de deux phénomènes :
 - Le mélange de particules générées d'une part, par l'érosion naturelle de la couverture superficielle des sols (riches en ^{210}Pb) et d'autre part, par les apports de matériel terrigène issu de l'excavation des couches anciennes (appauvris en traceur) ;
 - Le remaniement partiel attribué aux mécanismes de bioturbation (activité biologique).
- L'influence marine, s'est maintenue relativement constante, hormis un fléchissement progressif entre les cotes 25 et 15 cm et une régression plus nette qui concerne en particulier l'horizon de surface (0-2 cm). Cette dernière se traduit par une claire diminution de la concentration en calcium dans les sédiments de surface ;
- Les apports en matériel particulaire généré par l'excavation des séries latéritiques anciennes (creusement de la mine) pauvres en Fe sont identifiables dans l'horizon de surface.

Le dépôt de sub-surface témoigne d'une accumulation sédimentaire intense ($1,83 \text{ g/cm}^2/\text{an}$) liée d'une part à la grande extension du bassin versant de la Kwé et d'autre part, à l'érosion des constructions coralliennes qui constituent une importante partie de l'estuaire. Cette altération est mise en évidence par l'importante concentration en calcium ; les carbonates biogènes représentent $56,6 \pm 2,0 \%$ de la masse sédimentée.

Carotte St13-3

Caractéristiques physiques de la carotte

Les résultats des paramètres physiques des sédiments sont regroupés dans l'Annexe 5.

Par rapport aux deux précédentes, la carotte St13-3 présente un aspect beaucoup plus grossier et rugueux avec une présence de sable plus importante (Figure 14).

La densité humide augmente régulièrement depuis la surface ($1,56 \text{ g/cm}^3$) jusqu'à la cote 12 cm ($2,04 \text{ g/cm}^3$) puis diminue ensuite légèrement dans le bas de la carotte pour se stabiliser à $1,96 \text{ g/cm}^3$ (Figure 15).



Figure 14 : Photographie de la carotte St13-3.

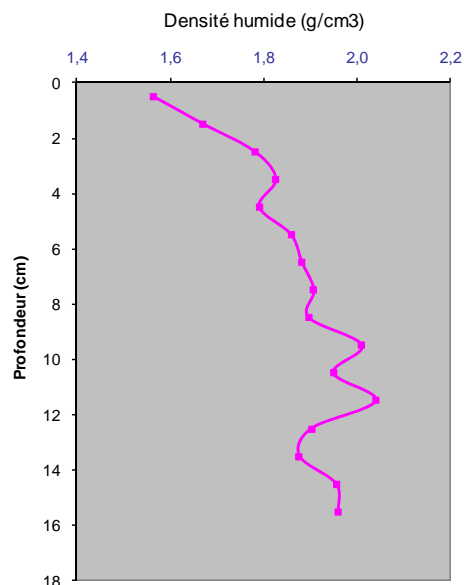


Figure 15 : Profil vertical de la densité humide de la carotte St13-3.

Granulométrie des particules

Les pourcentages de fraction pélitique ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) ne montre pas de tendance bien définie le long de la colonne sédimentaire bien qu'une très légère augmentation soit décelable du bas vers le haut de la carotte. La relative variabilité des teneurs ne s'échelonne que de 58,7 % dans l'horizon 11-12 cm à 69 % dans l'horizon 5-6 cm (Figure 16).

L'étude granulométrique indique que cette fraction pélitique est composée de trois populations de grains pour chacun des trois horizons étudiés (Figure 17) :

- Un premier mode à $0,3 \mu\text{m}$ est mesuré dans les trois horizons, comme pour les deux autres carottes ;
- Une deuxième population de particules avec un mode à $4,8 \mu\text{m}$ est observable dans les trois horizons échantillonnés mais quantitativement, la proportion diffère d'un sédiment à l'autre ;
- Pour les horizons 0-1 cm et 15-16 cm, le troisième mode est mesuré à $30,5 \mu\text{m}$. Dans l'horizon de surface la population de grains correspondante est amplement majoritaire. Pour l'horizon 4-5 cm, le troisième mode n'est que $22,5 \mu\text{m}$ et la proportion de grains est faible.

De même que le taux de pélites, la distribution granulométrique au sein de cette fraction présente une variabilité relative observable.

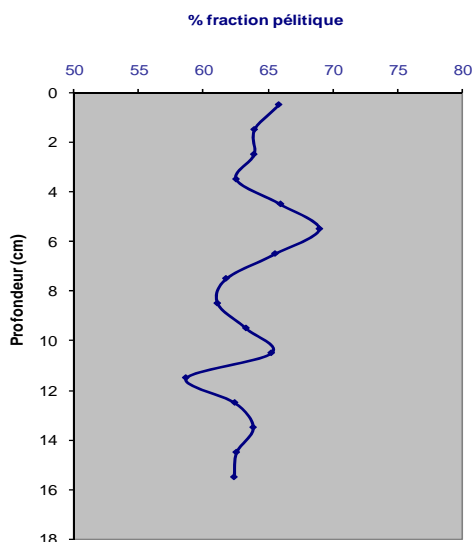


Figure 16 : Evolution verticale du taux de pélites (fraction < 40 µm) dans la carotte St13-3.

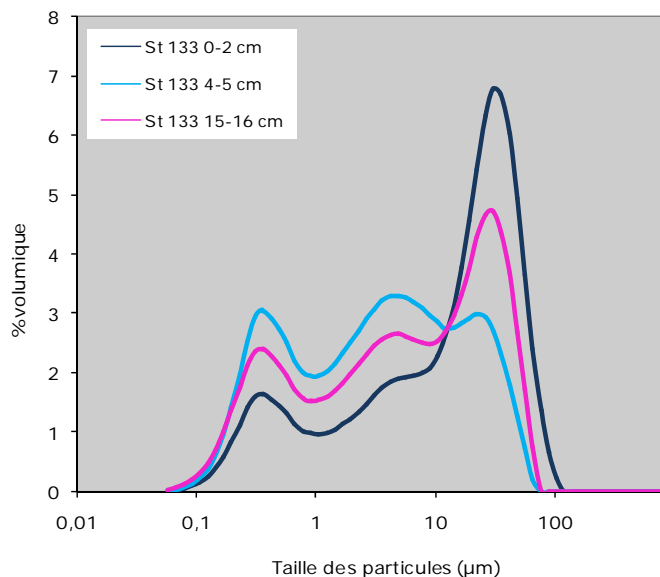


Figure 17 : Distribution granulométrique des pélites de la carotte St13-3.

Minéralogie des sédiments

Les résultats de l'analyse minéralogique sont présentés en Annexe 3.

Contrairement aux deux autres sites, les principaux minéraux présents dans les échantillons de cette carotte sont des minéraux calciques : calcite, calcite magnésienne et aragonite.

Toutefois, dans l'horizon supérieur (0-2 cm), on décèle des minéraux terrigènes comme le quartz, la lizardite ainsi que la goethite. Dans l'horizon 4-5 cm la lizardite (orthoantigorite) est remplacée par de la gibbsite (minéral présent dans les latérites). L'horizon 15-16 cm contient de la lizardite, du quartz, de la goethite et de la gibbsite.

Composition chimique des sédiments

L'ensemble des résultats d'analyses sont regroupés dans l'annexe 2 et la Figure 18 illustre graphiquement les concentrations mesurées en fonction de la profondeur pour Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn.

Calcium :

L'origine essentiellement carbonatée du sédiment explique les concentrations en calcium élevées par rapport aux deux autres carottes. En revanche, le profil ne présente pas de tendance nette et montre une forte variabilité verticale avec une fourchette de valeurs allant de 315 à 361 mg/g.

Cobalt :

De même que pour le calcium, le profil des concentrations en cobalt présente une variabilité marquée tout le long de la colonne sédimentaire (de 27 à 37 µg/g) mais, bien que modeste, on observe une tendance globale à l'augmentation des horizons les plus anciens vers les plus récents. A l'inverse du calcium, les concentrations sont bien plus faibles que pour les deux autres carottes (St15 et St06-1), comme pour tous les autres éléments métalliques ci-dessous qui composent le cortège latéritique.

Chrome :

Le profil de concentration en chrome est relativement régulier avec très peu de variations (concentrations comprises entre 1,2 et 1,4 mg/g). Une très légère hausse des concentrations entre le bas et le haut de la carotte est observable.

Cuivre :

Dans la partie supérieure de la carotte, les concentrations augmentent nettement entre 0-1 cm (2,5 mg/g) et 3-4 cm (8,1 mg/g) puis chutent à 0,6 mg/g au niveau de l'horizon 4-5 cm. En-dessous, les valeurs de la concentration oscillent entre 0,6 et 4,6 µg/g.

Fer :

La concentration augmente de 40,6 à 49,0 mg/g entre la surface et la cote 3 cm, puis diminue progressivement et irrégulièrement jusqu'en bas de la carotte.

Manganèse :

Les concentrations augmentent depuis la surface (0,35 mg/g) à l'horizon 2-3 cm (0,43 mg/g), puis diminuent à nouveau rapidement autour des 0,30 mg/g (horizon 5-6 cm) et décroît encore faiblement jusqu'en bas de carotte (0,26 mg/g).

Nickel :

De la surface jusqu'à 6 cm de profondeur, la concentration diminue de 0,52 à 0,31 mg/g, avec des fluctuations importantes. En dessous de 6 cm elle augmente à nouveau légèrement jusqu'à 0,48 mg/g en bas de carotte.

Zinc :

Les valeurs de zinc étant trop proches de la limite de détection et présentant des fluctuations excessives, celles-ci ne seront donc pas présentées.

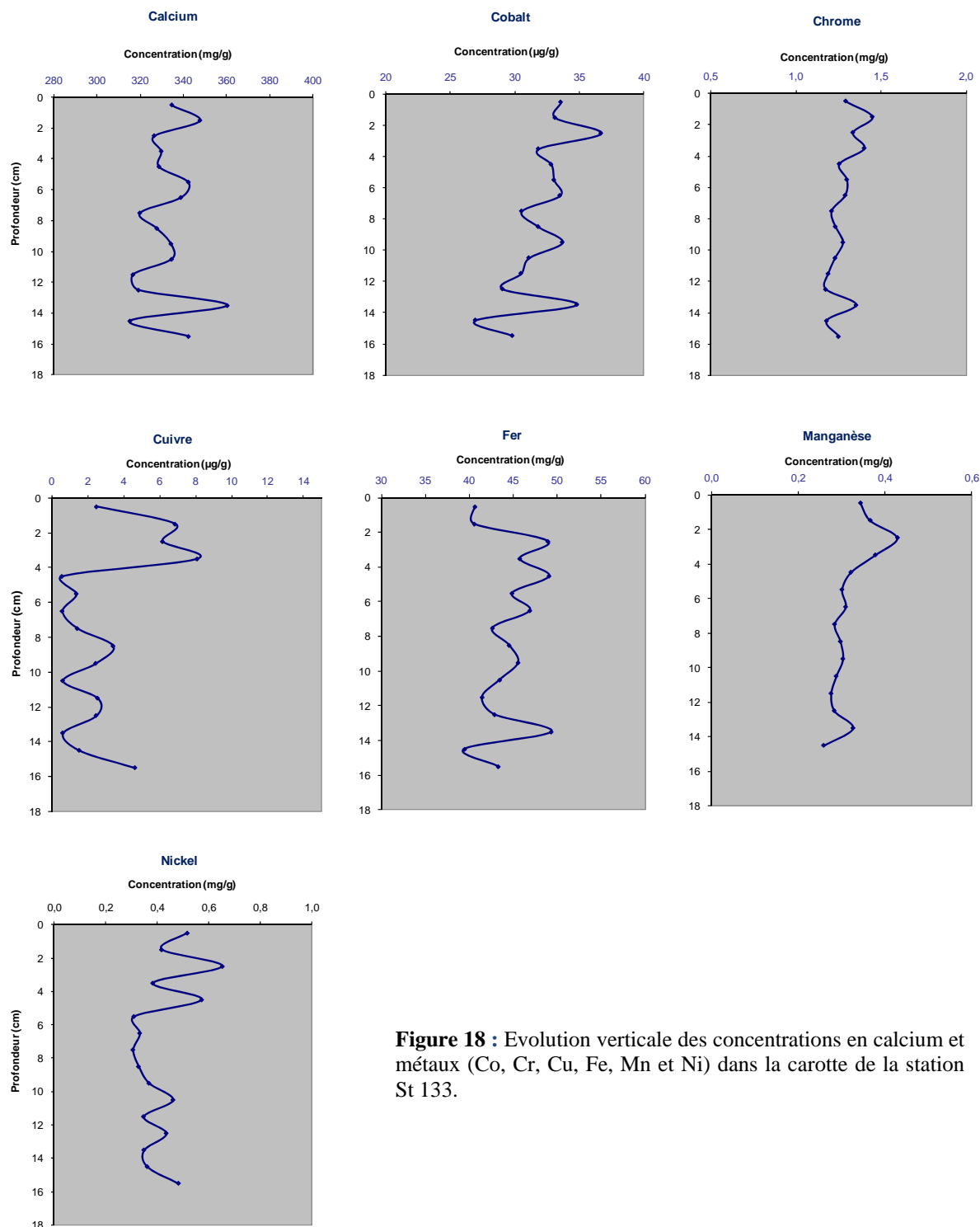


Figure 18 : Evolution verticale des concentrations en calcium et métaux (Co, Cr, Cu, Fe, Mn et Ni) dans la carotte de la station St 133.

Détermination du ²¹⁰Pb

Toutes les valeurs brutes résultant de la métrologie nucléaire sont regroupées en Annexe 4.

Les niveaux de radioactivité du ²¹⁰Pb dans les dépôts de cette carotte sont les plus élevés mesurés : elle s'échelonne de 150 mBq/g en surface à 49 mBq/g en bas de la carotte. Celle due au ²²⁶Ra demeure logiquement du même niveau que précédemment (2,1 ± 0,2 mBq/g).

Les valeurs de ^{137}Cs sont systématiquement inférieures à 3 mBq/g ce qui ne permet pas non plus pour cette carotte, de disposer de ce radio-traceur artificiel pour conforter la géochronologie des événements sédimentaires.

La représentation semi-logarithmique des mesures de ^{210}Pb montre une tendance globale à la décroissance de la radioactivité avec la profondeur. Deux épisodes peuvent être distingués (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 19) :

- Le premier permet de distinguer une diminution de la radioactivité depuis la surface jusqu'à la cote 13,5 cm. Sur cette station profonde (60 m), peu de perturbations, comme la bioturbation ou le remaniement, semblent affecter ce dépôt ; une droite semi-logarithmique de régression ($R^2=0,812$) permet de calculer un taux de sédimentation de 0,84 g/cm²/an ;
- Une diminution de la radioactivité plus rapide dans les derniers centimètres de la carotte. Cette décroissance suit une droite semi-logarithmique dont le coefficient est hautement significatif ($R^2=0,937$). Le taux de sédimentation calculé ne serait plus que de 0,17 g/cm²/an.

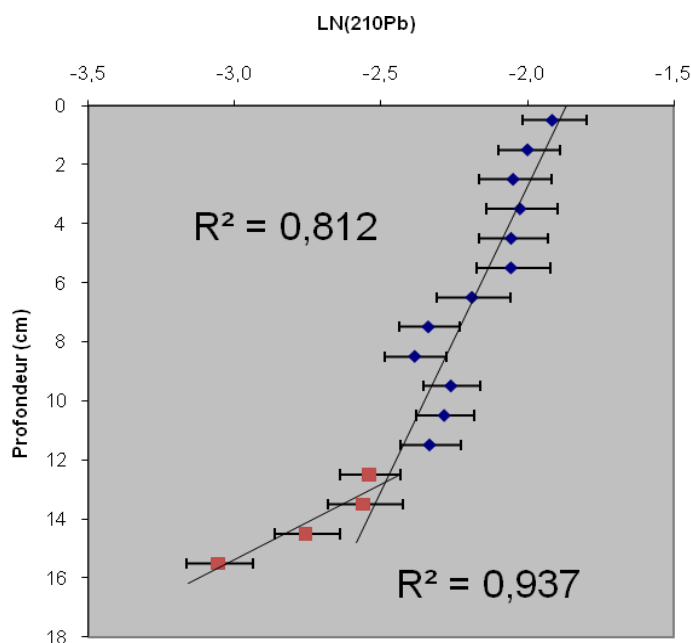


Figure 19 : Profil vertical de la radioactivité du ^{210}Pb dans la carotte St13-3.

Discussion

En ce qui concerne la carotte St13-3, l'ensemble des paramètres permet de dégager les points suivants :

- Contrairement aux deux autres carottes très marquées par l'influence du substrat latéritique, les dépôts de la carotte St13-3 montrent une prédominance très nette des apports d'origine marine. Ces apports sont plus grossiers que pour les deux autres

sites, ce qui traduit un niveau d'hydrodynamisme élevé.

- Les profils de concentrations en calcium et du taux de pélites montrent que la sédimentation des particules s'est effectuée de manière relativement constante et que seuls les sédiments de la base de carotte (horizons 13-14 cm à 15-16 cm) présentent des caractéristiques quelque peu différentes.
- Les hypothèses ci-dessus présentées semblent être corroborées par les mesures de la radioactivité du ^{210}Pb qui montrent assez nettement la mise en place récente d'un processus de sédimentation rapide dont l'apparition pourrait être estimée il y a plus de 20 ans approximativement. Cependant, en l'absence d'un traceur complémentaire cette géochronologie est à considérer avec précaution.

Carotte St 16

Distribution des métaux associés aux phases géochimiques des sédiments

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 intensité. 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 les métaux associés fournissent surtout une évaluation de la fraction la plus facilement assimilable par les organismes vivants. La phase carbonatée reflète l'importance de l'influence marine. Les deux dernières phases (oxydes et résidue) représentent des fractions dans lesquelles les métaux sont de moins en moins disponibles et peuvent être assimilées à des signatures géochimiques des apports terrigènes.

Les concentrations de Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn et Ca dans les quatre phases géochimiques des pélites constitutives de chacun des cinq premiers horizons de la carotte St16 sont regroupées en Annexe 2.

Métaux liés à la matière organique

Dans l'ensemble, les concentrations en métaux liés à cette phase sont très faibles (Figure 20), en particulier celles de Fe et Ni qui représentent moins de 0,1 % de leurs concentrations totales dans les pélites. Pour les autres métaux et le Ca, cette fraction est comprise entre 0,5 et 5,8 %.

Les concentrations de Co, Cu, Cr et Ni sont plus faibles dans les deux et trois premiers centimètres de la carotte que dans les niveaux les plus profonds. Tandis que les concentrations de Cr augmentent progressivement avec la profondeur, soit de 25 µg/g en surface à 43 µg/g

dans le dernier niveau (4-5), les concentrations de Co, Cu et Ni augmentent brusquement dans les deuxième et troisième niveaux. Cette augmentation est particulièrement marquée pour le Co dont les concentrations triplent avec la profondeur (0-1 : 0,28 µg/g ; 4-5 : 0,94 µg/g). Les concentrations de Mn sont deux fois plus élevées en surface (21 µg/g) que dans le reste de la carotte (9 µg/g). Les concentrations de Fe varient entre les différents niveaux étant presque deux fois plus élevées dans le premier (0-1), deuxième (1-2) et troisième (3-4) niveaux (7,5 µg/g) que dans les deux autres horizons (4,7 µg/g). Les concentrations de Ca sont constantes entre les différents niveaux de la carotte.

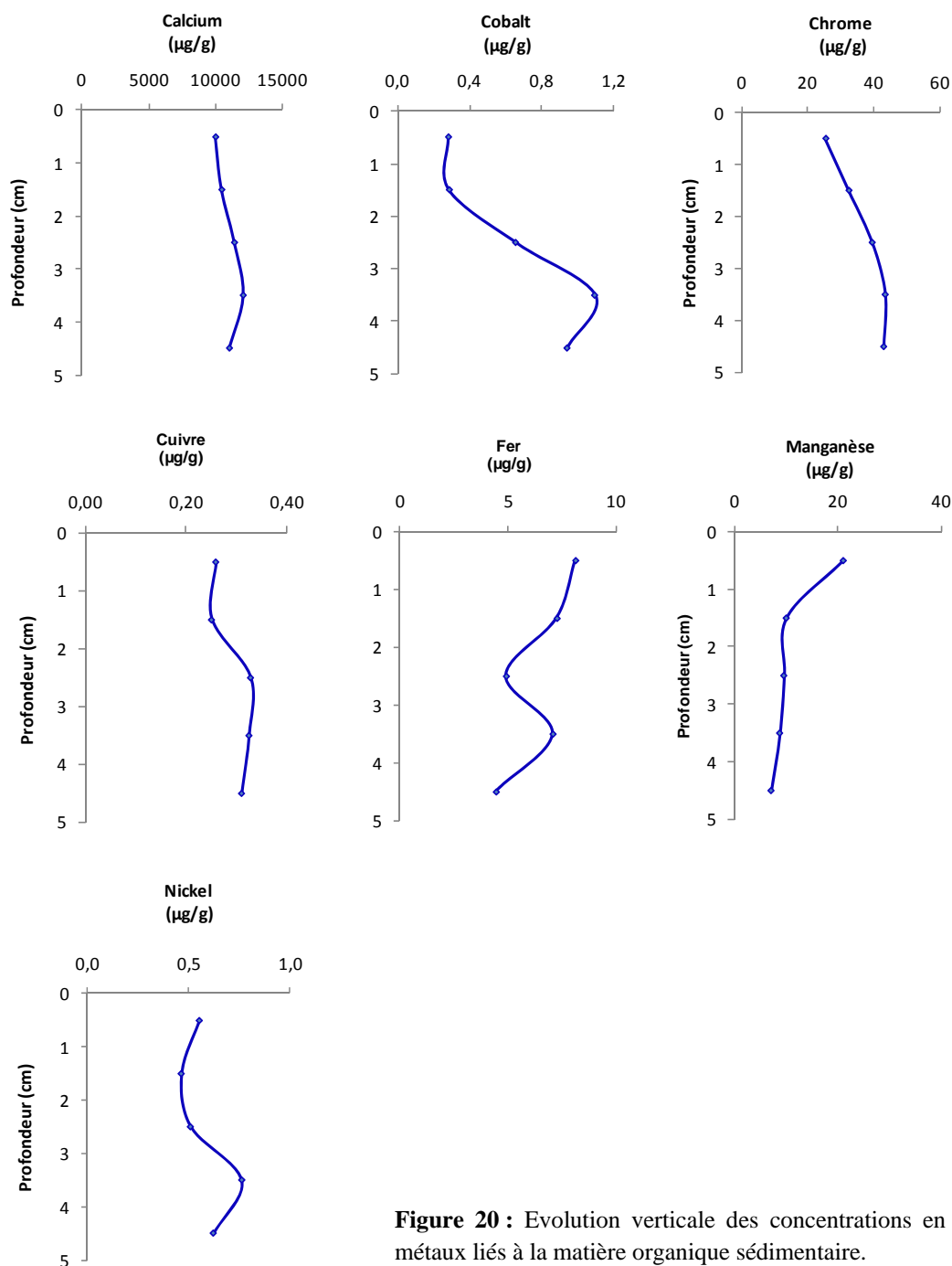
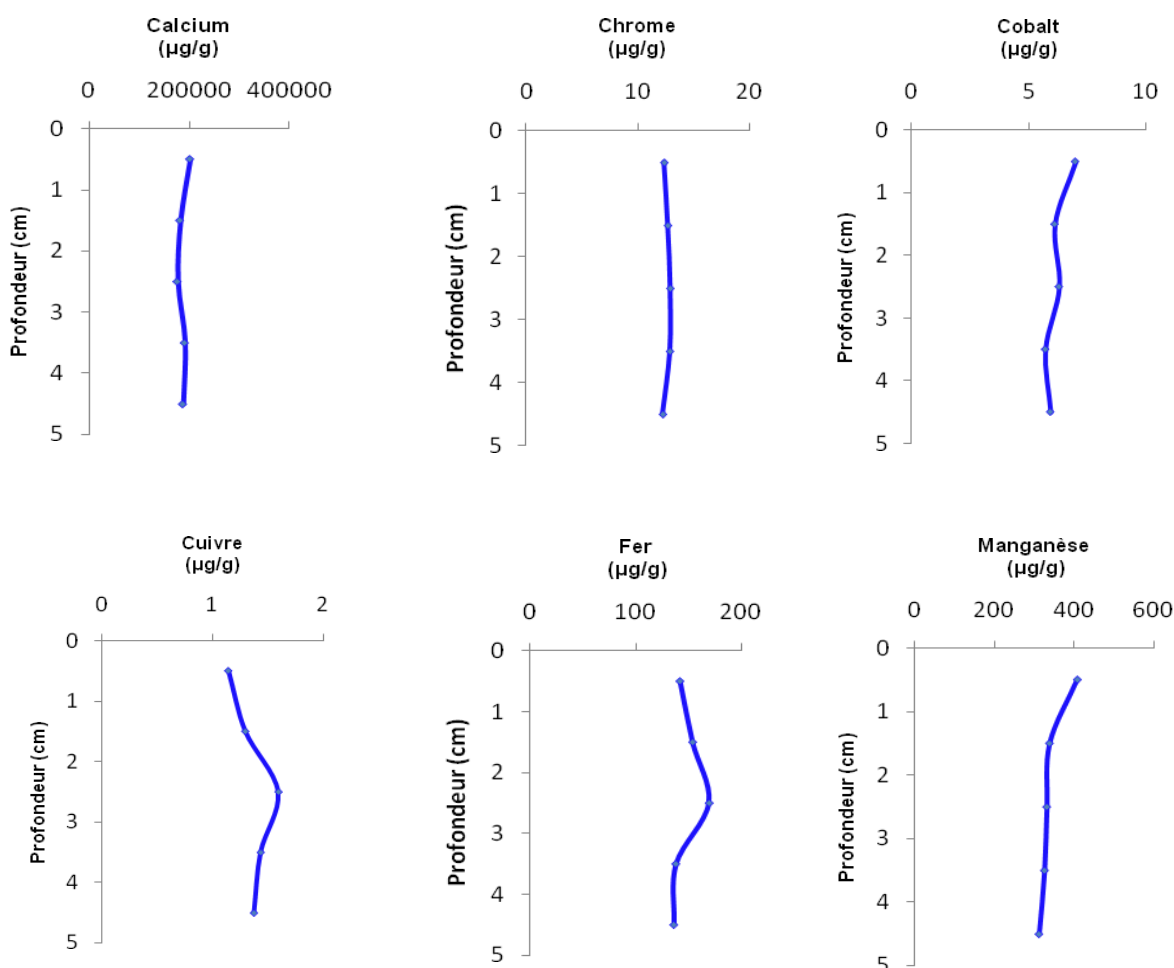


Figure 20 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés à la matière organique sédimentaire.

Métaux liés aux carbonates

Bien que supérieures à celle déterminées précédemment, les concentrations de Cr, Fe, Ni et Zn sont assez faibles dans la phase carbonatée (Figure 21) ; celles-ci représentent moins de 5 % des concentrations totales des pélites. Les concentrations de Co et Cu sont plus élevées avec des valeurs comprises entre 8 et 16 % des concentrations totales respectives. Cette phase constitue la phase dominante du Mn et (logiquement) du Ca dont leur concentration représente plus de 50 et 90 % de leurs concentrations totales.

Les profils de concentration de Ca ($187.142 \pm 9.497 \mu\text{g/g}$), Cr ($12,6 \pm 0,3 \mu\text{g/g}$), Co ($6,2 \pm 0,5 \mu\text{g/g}$), Cu ($1,4 \pm 0,2$), Fe ($147,7 \pm 14,0 \mu\text{g/g}$), Ni ($9,5 \pm 0,5 \mu\text{g/g}$) ne varient que très légèrement entre les différents niveaux de la carotte. Les concentrations de Mn sont légèrement plus élevées en surface ($406 \mu\text{g/g}$) que dans le reste de la carotte ($326 \pm 11 \mu\text{g/g}$). Les concentrations de Zn sont légèrement plus élevées dans les deuxième et troisième niveaux de la carotte que dans les trois autres.



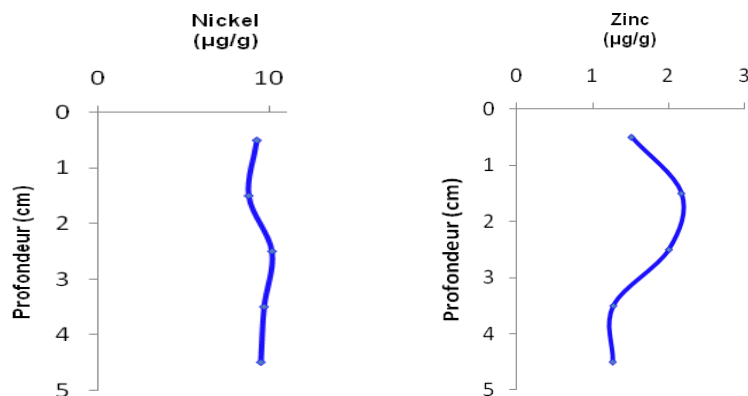


Figure 21 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés aux carbonates sédimentaires.

Métaux liés aux oxy-hydroxydes

Les métaux Cr, Fe et Ni liés aux oxy-hydroxydes ont des concentrations assez faibles comparables à celles déterminées dans les carbonates (

Figure 22) ; celles-ci sont comprises entre 0,5 à 2 % des concentrations totales, celles de Co représentant de 9 à 17 %. Les concentrations de Cu sont deux fois plus faibles que celles mesurées dans la phase carbonatée et représentent entre 6 et 8 % des concentrations totales du cuivre. Avec de 9 à 12 % de la concentration totale du manganèse total, les oxy-hydroxydes contiennent environ, 6 fois plus de Mn que la phase organique mais, 4 à 5 fois moins que la phase carbonatée. Les concentrations de Ca dans cette phase sont 20 à 30 fois plus faibles que celles mesurées dans la phase carbonatée ; celles-ci représentent moins de 5 % de sa concentration totale dans les pélites.

Les profils de Co, Cr, Cu et Fe sont similaires avec des concentrations de surface supérieures à celles mesurées dans les quatre autres niveaux. Cette variation est particulièrement notable pour le Fe dont les concentrations diminuent presque de moitié entre le premier niveau (321 µg/g) et les autres niveaux (176 ± 26 µg/g). Le Ni et Zn présentent des concentrations de surface légèrement plus élevées que les concentrations des derniers niveaux. Les deuxième et troisième niveaux des profils de Mn et Ca montrent des concentrations légèrement plus élevées qu'aux trois autres niveaux.

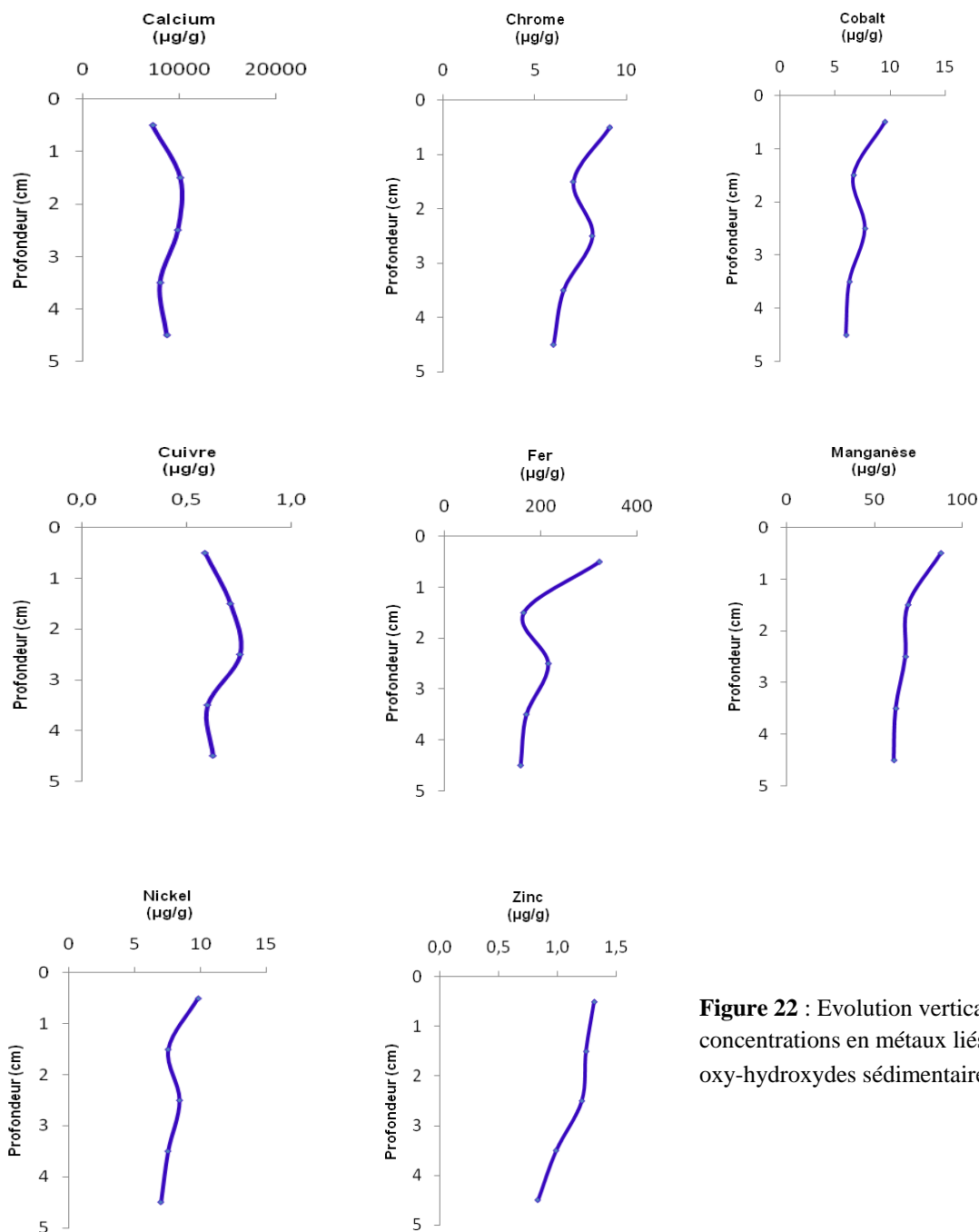


Figure 22 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés aux oxy-hydroxydes sédimentaires.

Métaux liés aux résidus

La phase résiduelle contient plus de 90 % de la concentration totale en Cr, Fe, Ni et Zn et plus de 70 % de la concentration total en Co et Cu. Le Mn, présent en moindre proportion que les autres métaux, représente tout de même 30 à 40 % de sa concentration totale dans les pélites. A l'inverse, les concentrations de Ca sont, logiquement, très faibles dans cette phase représentant moins de 0,5 % de sa concentration totale.

Les distributions des concentrations des métaux et du calcium dans les sédiments sont similaires avec des concentrations plus élevées dans les deuxièmes (1-2 cm) et quatrièmes (3-4 cm) niveaux de la carotte St16 (Figure 23/ Figure 24).

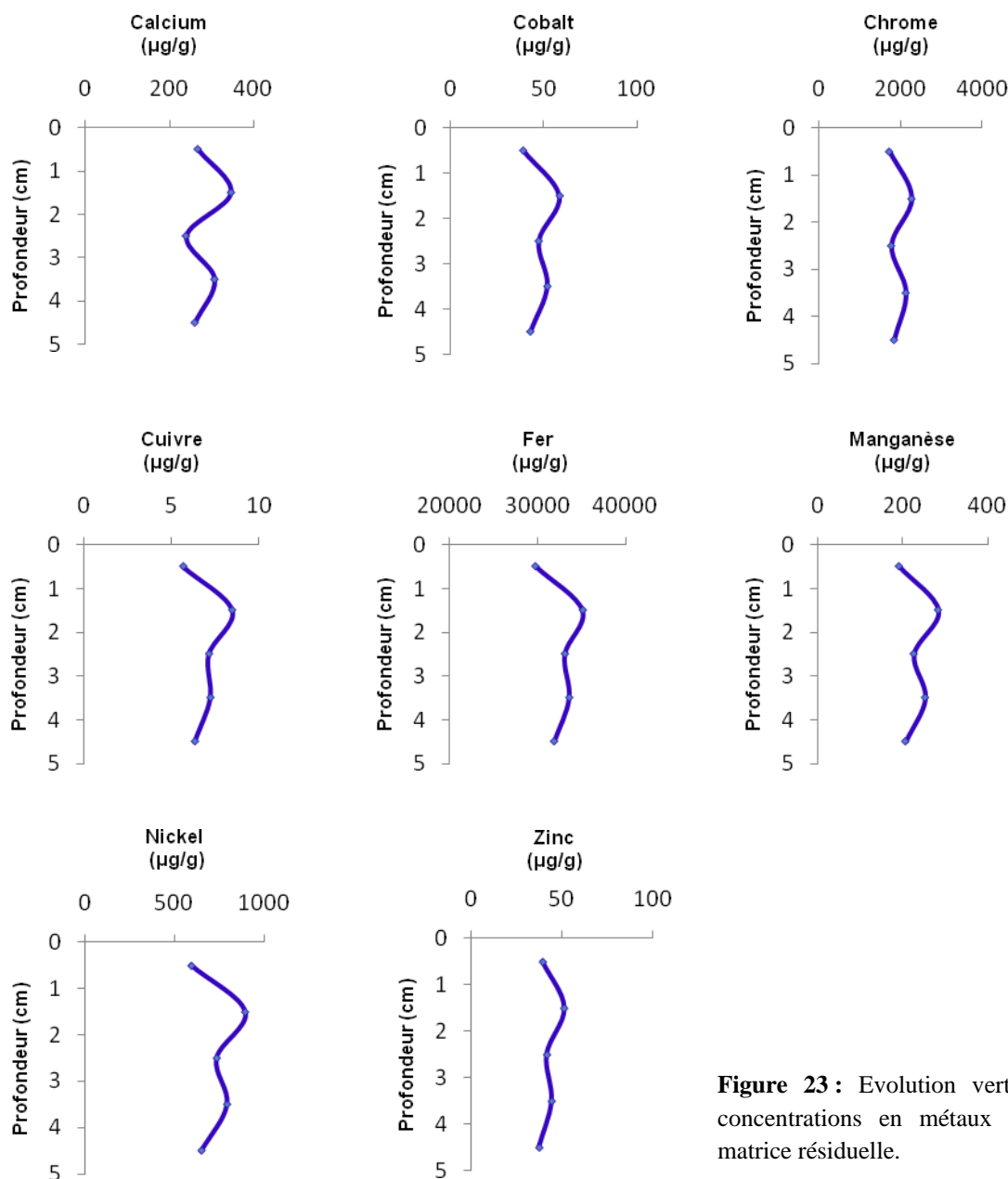


Figure 23 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés à la matrice résiduelle.

Disponibilité du Soufre

Les niveaux de soufre lixiviable et échangeable sont sensiblement proches (Figure 24). Le profil de soufre lixiviable présente une légère décroissance progressive avec la profondeur, allant de 1,37 à 1,01 mg/g. Les valeurs de concentrations en soufre échangeable ne sont que très peu supérieures à celle du soufre lixiviable. Le maximum de concentration en soufre échangeable se situe sur l'horizon 1-2 cm avec une valeur de 1,81 mg/g.

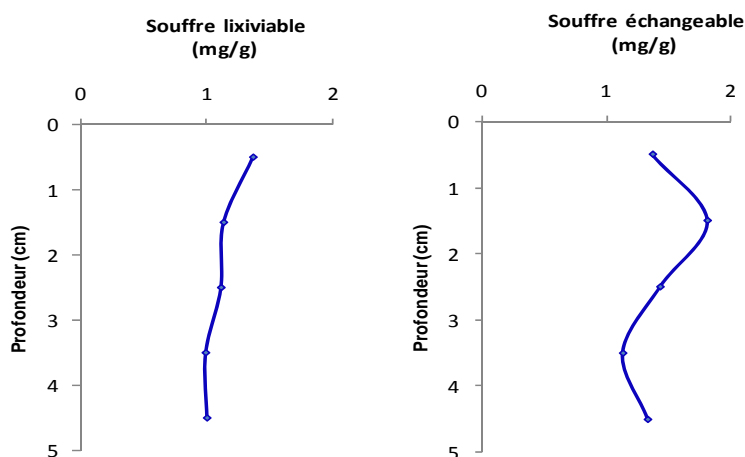


Figure 24 : Evolution verticale des concentrations en soufre lixiviable et en soufre échangeable dans la fraction brute des sédiments.

Discussion

Les analyses réalisées permettent d'établir un état de référence détaillé des niveaux de concentration des éléments métalliques (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn), du calcium et du soufre contenu dans les fractions pélitiques sédiments de la station portuaire St16.

Les concentrations déterminées ne présentent pas particularités spécifiques mais sont conformes aux résultats obtenus pour des milieux lagunaires similaires.

CONCLUSION

Les sédiments de la station St15 résultent des événements sédimentaires qui se sont succédés au cours des trois dernières années (2007-2010), à savoir :

- l'apport accidentel de mars 2006 suite à la rupture de la digue de rétention des eaux pluviales et de drainage. Paradoxalement, cet accident n'a pas été mis en évidence par l'étude de la carotte PR-1 prélevée quelques mois après la date de l'effondrement (Convention IRD/Goro-Ni, n°1230). Un glissement récent du matériel particulaire sédimenté sur le talus vers le bas de la pente pourrait constituer une explication plausible. Il est à noter que les carottes ne correspondent pas exactement en terme de positionnement géographique, quelques dizaines de mètre, au niveau du talus prodeltaïque peuvent être d'une importance relative ;
- l'apport accidentel en particules enrichies en métaux suite à l'altération des sols du bassin versant du Creek de la Rade Nord par la solution d'acide sulfurique ;

Afin d'améliorer les interprétations, il serait pertinent d'envisager une analyse géochimique plus fines des sédiments (extractions séquentielles) et de procéder ultérieurement à un carottage supplémentaire. La localisation de ce dernier devrait être déterminée à une plus grande distance de l'embouchure que l'actuelle afin de limiter les effets dus à la progradation du prisme deltaïque pour ne prendre en compte que les flux de particules verticaux.

En ce qui concerne la station St06-1, les sédiments traduisent, pour leurs horizons les plus récents, des changements dans leur nature, origine et probablement quantité. Toutefois, ces apports semblent progressivement diminuer en masse et un retour à des conditions normales d'alimentation par la rivière Kwe semble se profiler. Comme pour la carotte St15, la datation des événements sédimentaires qui se sont succédés est impossible en raison notamment des apports massifs qui constituent les 10 à 12 premiers centimètres du dépôt.

Aucune donnée antérieure n'étant disponible pour la couverture sédimentaire échantillonnée au niveau de la carotte St13-3, seule une étude ultérieure (campagne de suivi 2013) permettra d'observer une éventuelle évolution des rythmes sédimentaires.

Cette dernière observation s'applique également pour les sédiments de la station St16 mais d'un point de vue géochimique. L'analyse détaillée par extraction séquentielles des métaux permettra maintenant de déceler toute évolution future.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des sites de carottage du suivi triennal des taux d'accumulation (Stations St06-1, St15 et St13-3). Localisation de la carotte St16 pour le suivi annuel des impacts du port de commerce de Vale-NC.	8
Figure 2 : Photographie de la carotte St15.	10
Figure 3 : Profil vertical de la densité humide de la carotte St15.....	10
Figure 4 : Evolution verticale du taux de pélites (< 40 µm) dans la carotte St15.	11
Figure 5 : Distribution granulométrique des pélites de la carotte St15.	11
Figure 6 : Evolution verticale des concentrations en calcium et métaux (Cu, Co, Fe, Mn, Ni et Zn) dans la carotte de la station St15.	14
Figure 7 : Profil vertical de la radioactivité du ²¹⁰ Pb dans la carotte St15.	15
Figure 8 : Photographie de la carotte St06-1.	17
Figure 9 : Profil vertical de la densité humide de la carotte St06-1.	17
Figure 10 : Evolution verticale du taux de pélites (fraction fine, < 40 µm) dans la carotte St06-1.....	18
Figure 11 : Distribution granulométrique des pélites de la carotte St06-1.	18
Figure 12 : Evolution verticale des concentrations en calcium et métaux (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) dans la carotte de la station St06-1.	21
Figure 13 : Profil vertical de la radioactivité du ²¹⁰ Pb dans la carotte St06-1.	22
Figure 14 : Photographie de la carotte St133.	24
Figure 15 : Profil vertical de la densité humide de la carotte St133.....	24

Figure 16 : Evolution verticale du taux de pélites (fraction < 40 µm) dans la carotte St133.....25

Figure 17 : Distribution granulométrique des pélites de la carotte St13-3.....25

Figure 18 : Evolution verticale des concentrations en calcium et métaux (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) dans la carotte de la station St133.....27

Figure 19 : Profil vertical de la radioactivité du ²¹⁰Pb dans la carotte St133.28

Figure 20 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés à la matière organique sédimentaire.30

Figure 21 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés aux carbonates sédimentaires.32

Figure 22 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés aux oxy-hydroxydes sédimentaires.33

Figure 23 : Evolution verticale des concentrations en métaux liés à la matrice résiduelle.34

Figure 24 : Evolution verticale des concentrations en soufre lixiviable et en soufre échangeable dans la fraction brute des sédiments.....34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Date de prélèvement, positionnement GPS des stations (référentiel universel WGS 84), profondeur d'eau et longueur de la carotte aux quatre stations échantillonnées.....9

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 :** Méthodologie
- Annexe 2 :** Concentrations de Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn et Ca dans les quatre phases géochimiques des pélites constitutives de chacun des cinq premiers horizons de la carotte St16.
- Annexe 3 :** Diffractogrammes de rayons X des sédiments choisis pour l'analyse minéralogique.
- Annexe 4 :** Spectrométrie gamma des niveaux sédimentaires des carottes de l'étude.
- Annexe 5 :** Caractéristiques physiques (densité humide et pourcentage de pélites) des trois carottes prélevées.
- Annexe 6 :** Concentrations totales en métaux dans les trois carottes.
- Annexe 7 :** Tableau des concentrations en soufre lixiviable et en soufre échangeable (en mg/L).

ANNEXE 1

Méthodologie

Granulométrie laser

Cette technique permet de connaître la distribution granulométrique des particules d'un sédiment, c'est à dire de déterminer la taille des particules qui constituent des ensembles de grains ainsi que la quantité de particules à l'intérieur de plusieurs classes de tailles. La taille des particules est une caractéristique fondamentale qui affecte leur capacité à la mise en suspension, leur transport, leur dépôt et enfin leurs propriétés chimiques.

Principe de la mesure

Ce type de mesure est basé sur la diffraction d'un faisceau laser par des particules selon la théorie de Mie. Les particules présentes dans un faisceau laser parallèle diffractent la lumière selon des angles fixes en fonction du diamètre de ces particules (Figure 1). Une lentille convergente restitue l'image du faisceau diffracté en forme d'anneaux sur un détecteur dans le plan focal. L'intensité de la lumière varie selon la nature des particules traversées, la lumière non diffractée (transmise) est toujours focalisée dans le foyer sur l'axe optique et peut être mesurée.

Un traitement mathématique complexe permet de calculer la distribution en tailles des particules à partir des intensités de la lumière diffractée aux différents endroits du motif de diffraction. Le résultat du calcul donne un diamètre de particule équivalent à celui d'une sphère qui diffracterait la lumière selon le même spectre. Le calcul donne un diamètre moyen et la distribution en tailles des particules est exprimée sous forme de distribution en volumes.

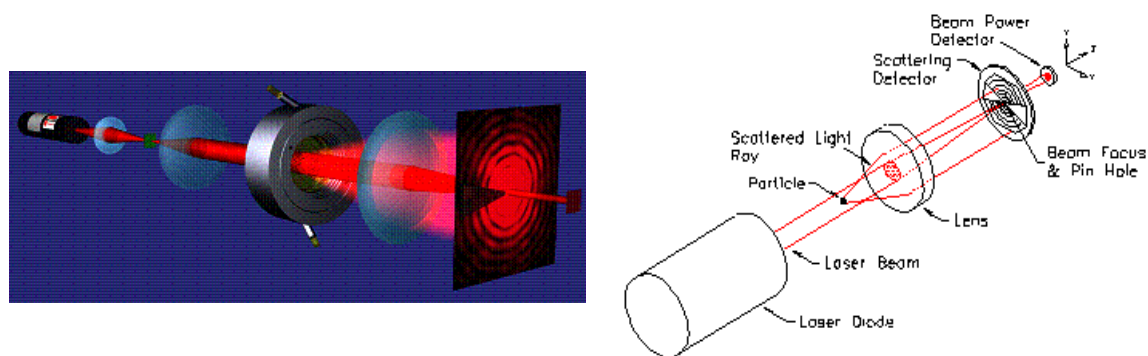


Figure 1 : Schémas du système interne du granulomètre laser.

L'appareil utilisé est un granulomètre de marque SEQUOIA (Model LISST 100X). Il se caractérise par un détecteur qui trie les signaux en 32 raies différentes correspondant à 32 classes granulométriques normalisées comme celles des tamis de granulométrie classique.

Protocole

Les sédiments secs sont émottés et une petite fraction, environ 100 mg, est placée dans la cuve à ultrasons du circuit pour dissociation des particules à l'aide d'un défloculant (Pyrophosphate-Na). L'acquisition des données granulométriques est alors lancée et les résultats sont fournis sous la forme de graphiques.

Minéralogie (DRX)

L'évolution des matériaux en fonction du temps et de l'espace a été estimée en fonction des espèces minérales déterminées. Les déterminations ont été effectuées par diffraction de rayons X (DRX) sur des échantillons modérément broyés. L'appareil utilisé est un Philips (PW1050/81) équipé d'une anticathode Cu.

Métaux dans les sédiments

Dosage de la concentration totale des métaux

L'analyse de la concentration totale des métaux contenus dans les horizons des carottes des stations St15, St13-3 et St06 fournira une information nécessaire pour l'évaluation des taux d'accumulation en apportant des précisions sur les termes sources et son évolution dans le temps.

Ces dosages ont été conduits par attaque totale des sédiments par fusion alcaline. Après mise en solution, les métaux Ca, Co, Cr, Fe, Mn et Ni ont été analysés 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. Cette méthodologie permet de mieux appréhender les effets de l'impact d'une contamination métallique dans le milieu. Les deux premières étapes du protocole permettent de mettre en évidence les conditions sédimentaires et les influences anthropiques, les deux dernières reflètent l'évolution géochimique naturelle.

Pour chaque échantillon, 2 g de pelites 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 ($\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 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 ($\text{NH}_2\text{OH}, \text{HCl}$) 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 Tefon®.

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 (Goldberg, 1963), 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. Cependant, certaines conditions du milieu sont nécessaires pour obtenir une bonne datation (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 l'équation suivante :

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

Avec

$$\lambda = 3,11.10^{-2} \text{ an}^{-1} ;$$

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

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

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

La radioactivité du ^{210}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

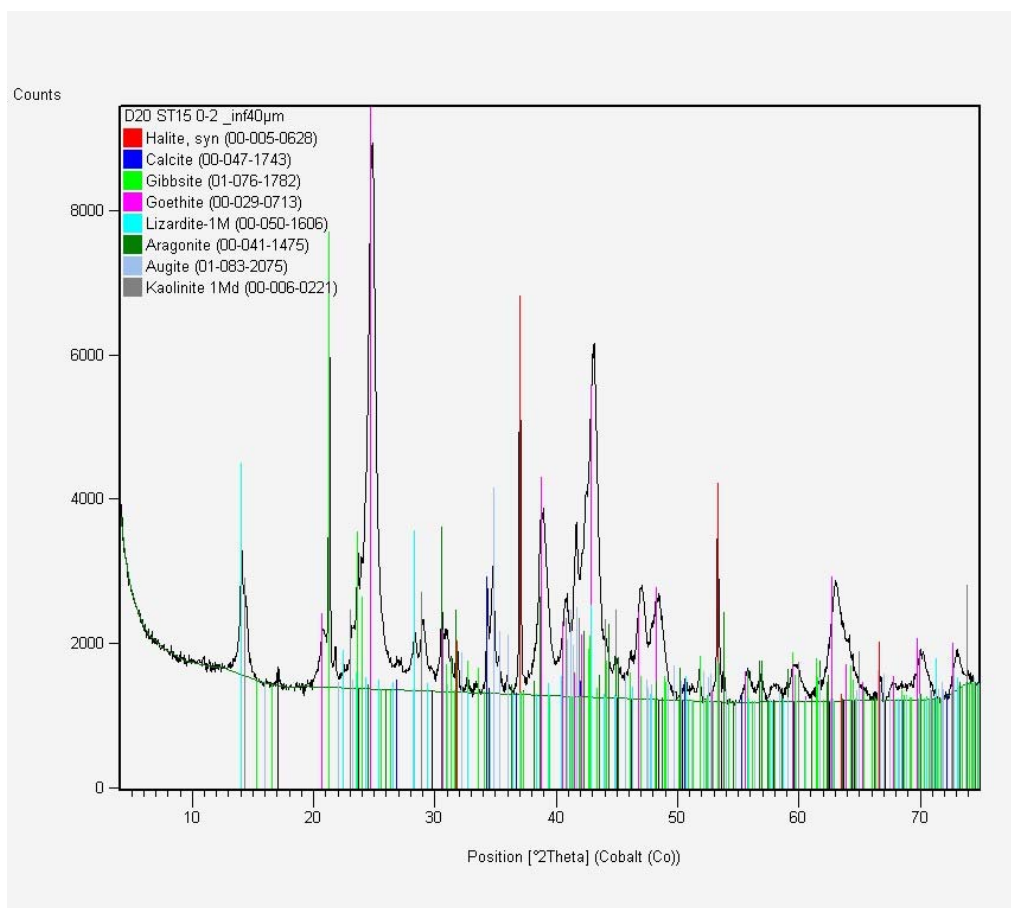
Carotte St16. Concentrations de Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn et Ca dans les quatre phases géochimiques des pélites constitutives de chacun des cinq premiers horizons

Métal	Horizons	Matières Organiques (µg/g)	Carbonates (µg/g)	Oxydes (µg/g)	Résidus (µg/g)	Total des phases
Co	0-1	0,28	7,0	9,5	39	56
	1-2	0,29	6,1	6,7	58	71
	2-3	0,65	6,3	7,7	47	62
	3-4	1,09	5,7	6,3	52	65
	5-5	0,94	5,9	6,0	43	56
Cr	0-1	25,4	12,4	9,1	1731	1778
	1-2	32,4	12,7	7,1	2279	2331
	2-3	39,4	12,9	8,1	1780	1840
	3-4	43,4	12,9	6,6	2139	2202
	4-5	43,9	12,2	6,0	1848	1910
Cu	0-1	0,26	1,1	0,6	5,7	8
	1-2	0,25	1,3	0,7	8,5	11
	2-3	0,33	1,6	0,8	7,1	10
	3-4	0,33	1,4	0,6	7,2	10
	5-5	0,31	1,4	0,6	6,3	9
Fe	0-1	8,1	142	321	29745	30216
	1-2	7,2	154	163	35143	35467
	2-3	4,9	169	215	33097	33486
	3-4	7,1	138	169	33598	33912
	4-5	4,4	136	157	31859	32156
Mn	0-1	21,1	406	88	192	707
	1-2	10,2	337	69	284	700
	2-3	9,7	330	68	226	634
	3-4	8,9	325	62	253	649
	5-5	7,2	311	61	207	586
Ni	0-1	0,55	9,3	9,8	593	613
	1-2	0,47	8,8	7,5	896	913
	2-3	0,51	10,2	8,4	736	755
	3-4	0,76	9,7	7,5	794	812
	4-5	0,62	9,5	7,0	649	666
Zn	0-1	<LD	1,5	1,3	39,2	42
	1-2	<LD	2,2	1,2	50,9	54
	2-3	<LD	2,0	1,2	41,5	45
	3-4	<LD	1,3	1,0	44,1	46
	5-5	<LD	1,3	0,8	37,3	39
Ca	0-1	9968	201020	7209	267	218463
	1-2	10426	181260	10066	346	202098
	2-3	11376	176076	9801	239	197492
	3-4	12032	190463	7974	307	210776
	4-5	10996	186894	8680	260	206830

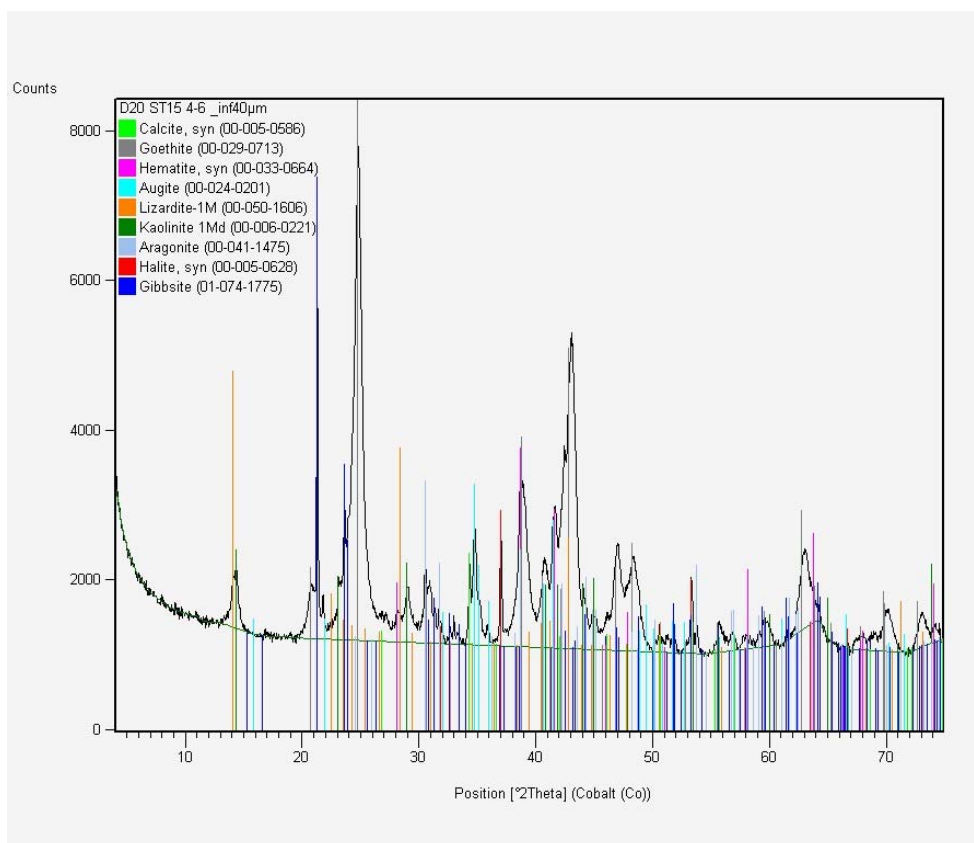
ANNEXE 3

Diffractogrammes de rayons X des sédiments choisis pour l'analyse minéralogique

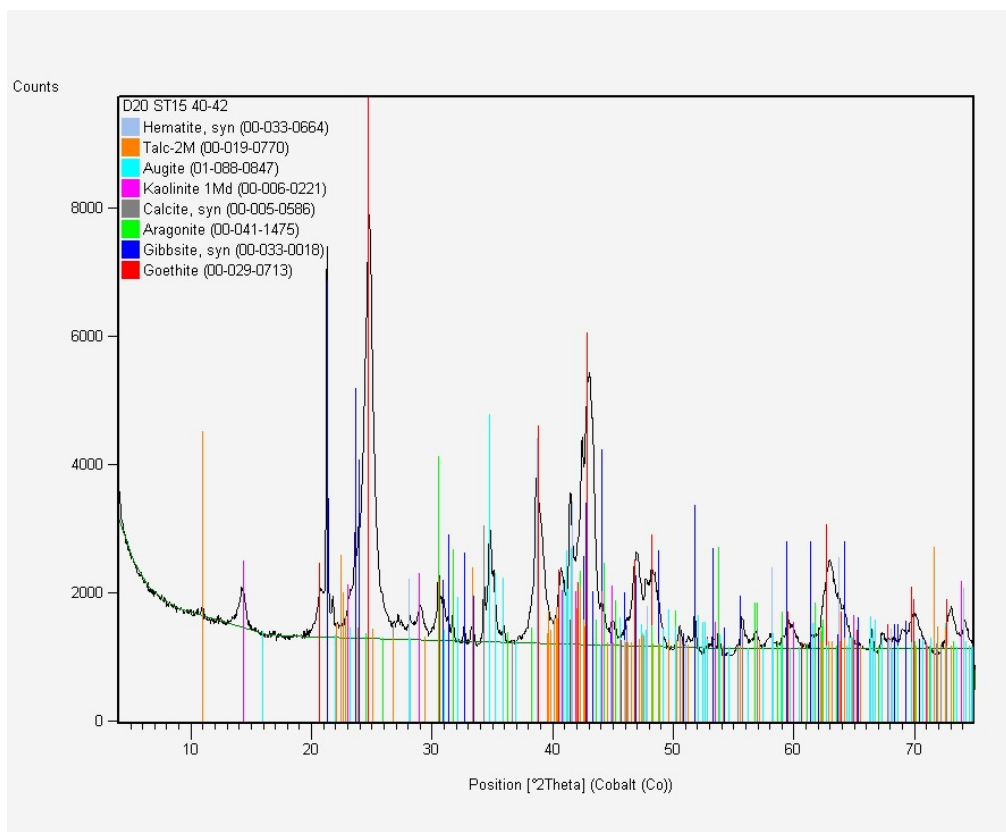
St15, 0-2 cm



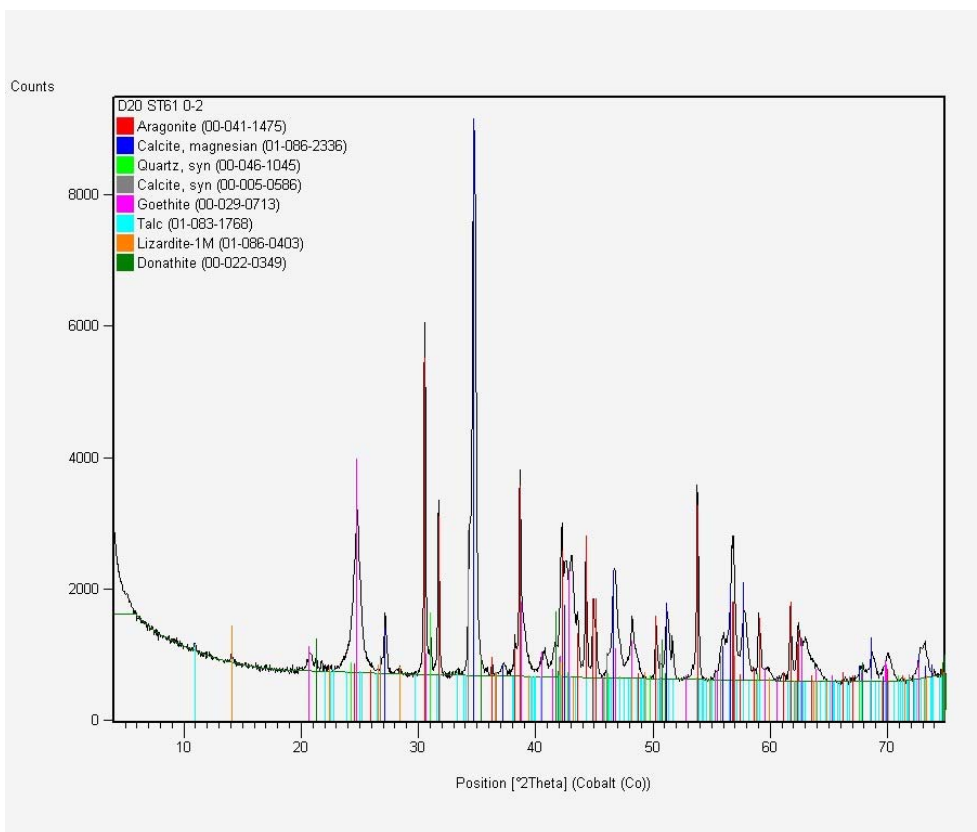
St15, 4-6 cm



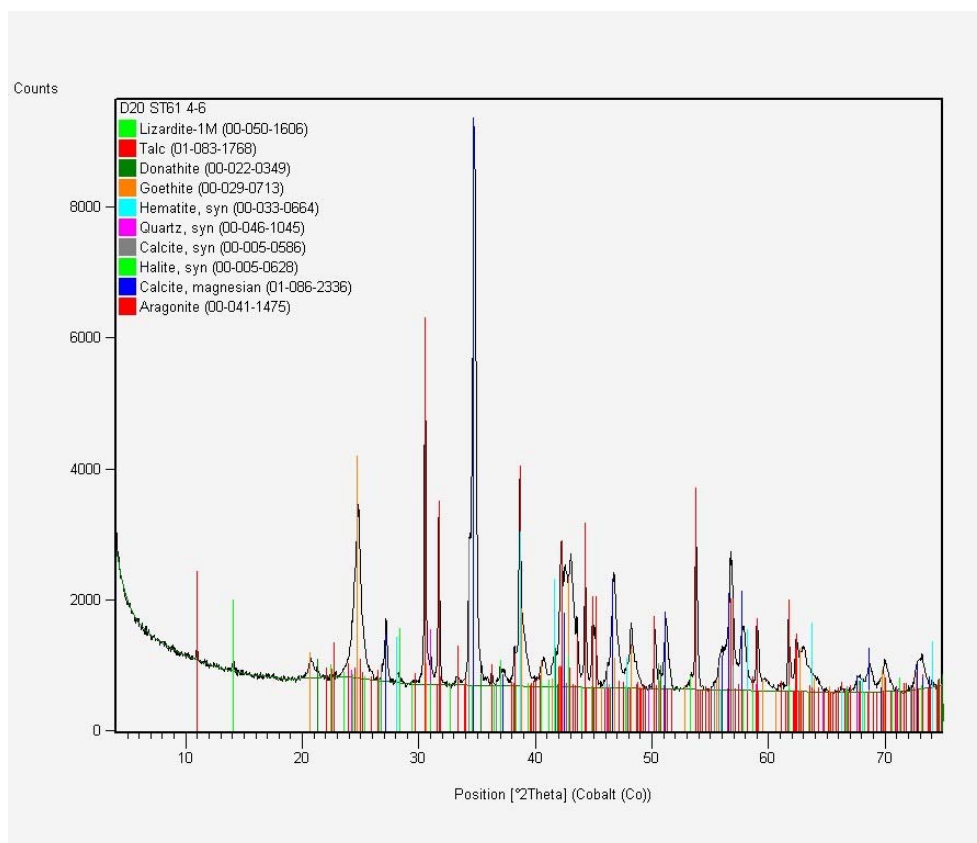
~St15, 40-42 cm



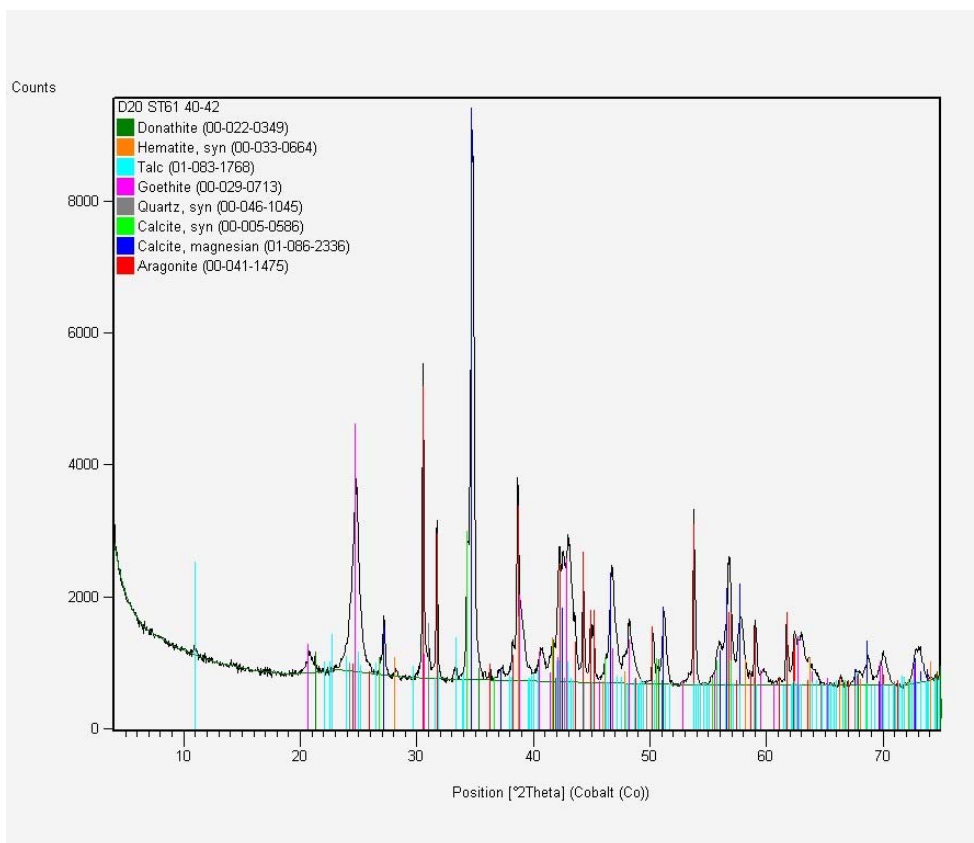
St06-1, 0-2 cm



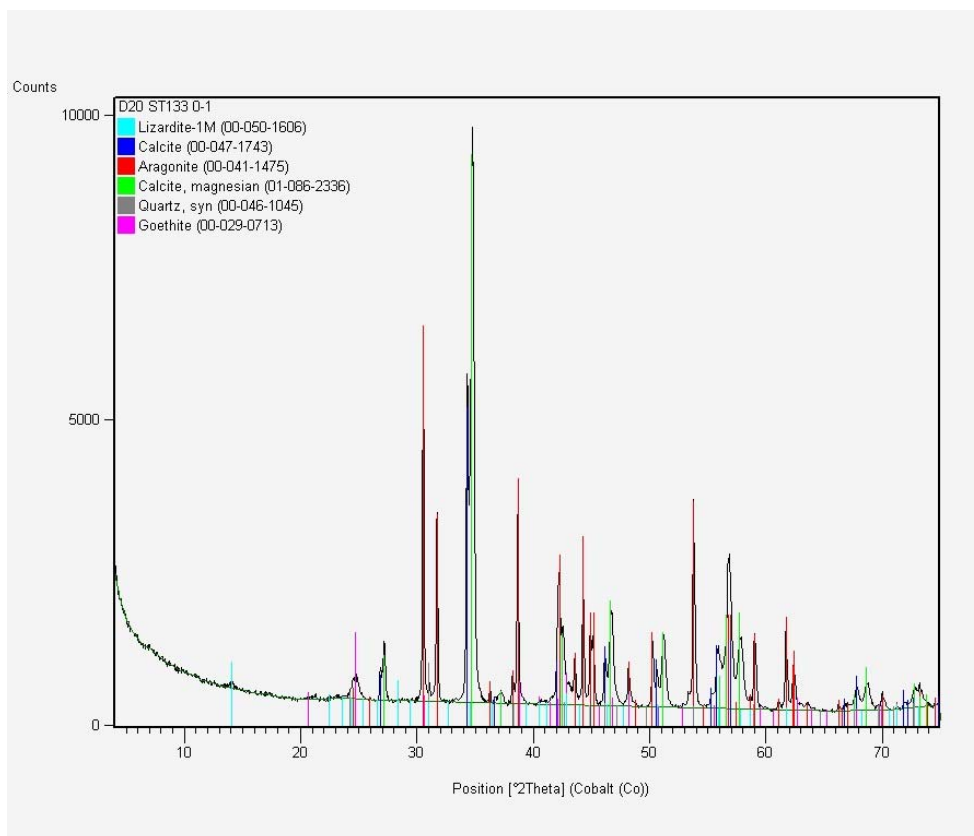
St06-1, 4-6 cm



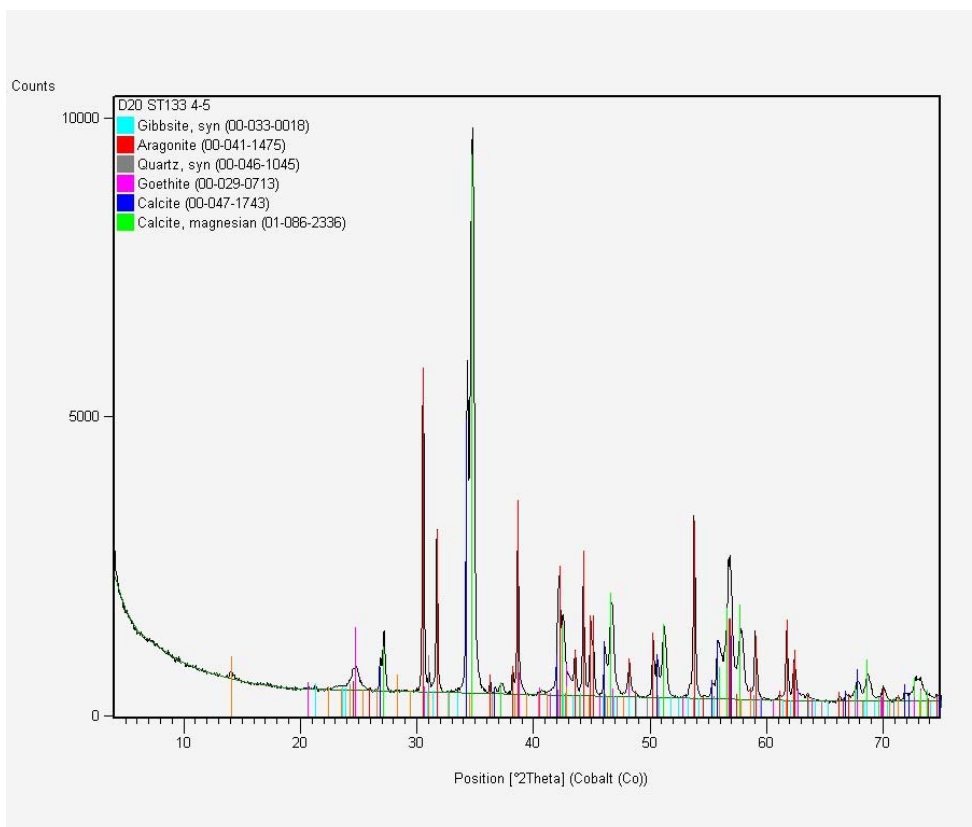
St06-1, 40-42 cm



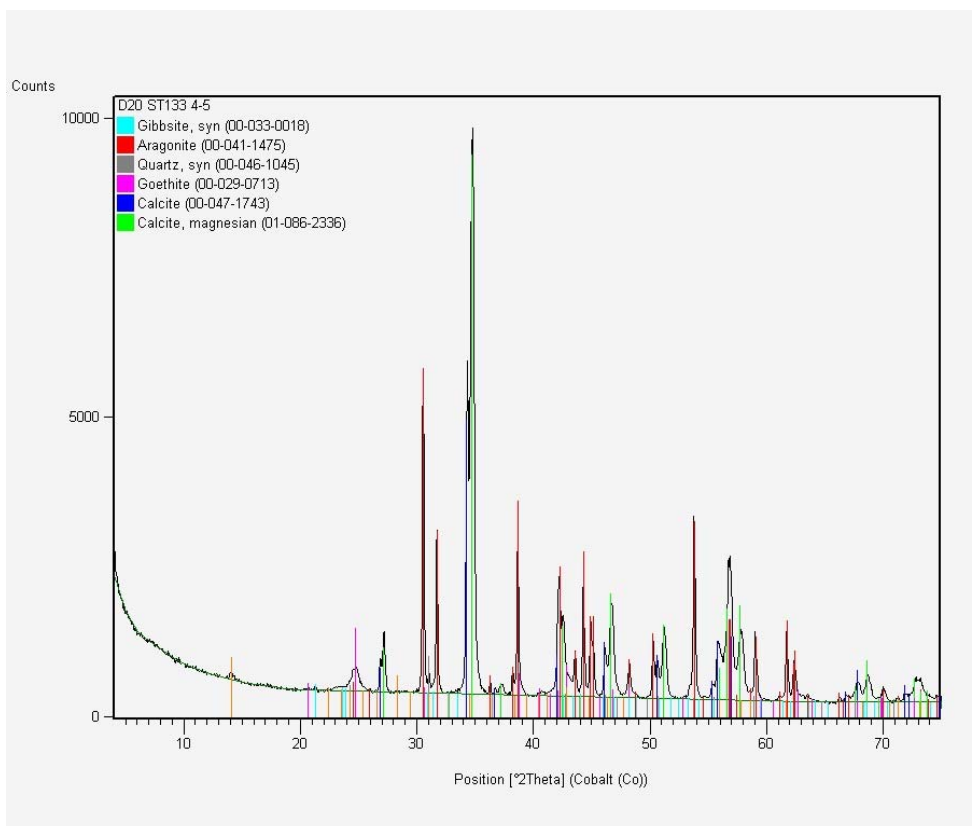
St13-3, 0-1 cm



St13-3, 4-5 cm



St13-3, 15-16 cm



ANNEXE 4

Spectrométrie gamma des niveaux sédimentaires de la carotte St13-3

Echantillon	Cs-137 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)
0-1 cm	< 1.3	150 ± 16	2.61 ± 0.78	< 6.1
1-2 cm	< 1.0	138 ± 14	2.54 ± 0.64	< 4.9
2-3 cm	< 0.73	131 ± 16	2.06 ± 0.43	< 3.1
3-4 cm	< 0.69	134 ± 16	1.97 ± 0.46	< 3.1
4-5 cm	< 0.64	130 ± 15	1.95 ± 0.39	< 2.8
5-6 cm	< 0.64	130 ± 16	1.99 ± 0.40	< 3.0
6-7 cm	< 0.63	114 ± 14	2.08 ± 0.40	< 2.9
7-8 cm	< 0.60	98.3 ± 9.9	1.96 ± 0.40	< 3.0
8-9 cm	< 0.65	94.1 ± 9.7	2.14 ± 0.44	< 2.9
9-10 cm	< 0.60	106 ± 10	1.85 ± 0.39	< 2.7
10-11 cm	< 0.59	104 ± 10	2.26 ± 0.43	< 2.7
11-12 cm	< 0.69	99 ± 10	2.22 ± 0.45	< 3.0
12-13 cm	< 0.66	81 ± 10	2.20 ± 0.44	< 3.0
13-14 cm	< 0.65	79.1 ± 8.5	1.96 ± 0.45	< 3.0
14-15 cm	< 0.63	65.5 ± 7.2	2.05 ± 0.41	< 2.7
15-16 cm	< 0.62	49.2 ± 5.9	2.14 ± 0.44	< 3.3

Spectrométrie gamma des niveaux sédimentaires de la carotte St06-1

Echantillon	Cs-137 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)
0-2 cm	< 0.79	114 ± 11	2.33 ± 0.47	< 3.3
2-4 cm	< 0.73	107 ± 11	1.93 ± 0.43	< 3.2
4-6 cm	< 0.71	106 ± 10	2.15 ± 0.33	< 3.0
6-8 cm	< 0.74	109 ± 11	1.80 ± 0.45	< 3.3
8-10 cm	0.33 ± 0.18	108 ± 10	2.04 ± 0.33	< 2.0
10-12 cm	< 0.71	110 ± 11	1.86 ± 0.41	< 3.1
12-14 cm	< 0.77	115 ± 11	1.94 ± 0.54	< 3.3
14-16 cm	0.42 ± 0.25	103 ± 10	2.10 ± 0.43	< 3.1
16-18 cm	0.49 ± 0.27	108 ± 13	1.81 ± 0.40	< 3.2
18-20 cm	0.41 ± 0.25	103 ± 11	2.11 ± 0.42	< 3.1
20-22 cm	0.51 ± 0.26	102 ± 12	2.01 ± 0.44	< 2.9
22-24 cm	0.34 ± 0.18	100.3 ± 9.6	1.93 ± 0.32	< 2.0
24-26 cm	0.33 ± 0.11	95 ± 12	2.21 ± 0.43	< 2.9
26-28 cm	0.51 ± 0.19	97.9 ± 9.4	2.15 ± 0.33	< 2.1
28-30 cm	0.37 ± 0.16	91.6 ± 8.5	1.78 ± 0.29	< 1.8
30-32 cm	0.41 ± 0.24	85.5 ± 9.2	2.02 ± 0.42	< 2.6
32-34 cm	0.41 ± 0.18	94.5 ± 8.9	1.91 ± 0.32	< 2.1
34-36 cm	0.65 ± 0.26	82.2 ± 8.7	1.88 ± 0.41	< 2.9
36-38 cm	0.47 ± 0.24	80.8 ± 8.5	2.01 ± 0.42	< 2.6
38-40 cm	0.36 ± 0.16	88.5 ± 8.2	1.77 ± 0.37	< 1.8
40-42 cm	0.28 ± 0.18	82.6 ± 8.1	2.05 ± 0.34	< 2.0
42-44 cm	< 0.80	64.8 ± 7.3	2.03 ± 0.45	< 3.2

Spectrométrie gamma des niveaux sédimentaires de la carotte St06-1

Echantillon	Cs-137 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)
0-2 cm	0.75 ± 0.38	40.9 ± 5.1	3.34 ± 0.64	< 4.5
2-4 cm	0.44 ± 0.25	24.2 ± 3.9	2.70 ± 0.48	< 3.1
4-6 cm	1.06 ± 0.50	22.4 ± 5.1	3.12 ± 0.78	< 5.7
6-8 cm	0.69 ± 0.29	24.5 ± 3.8	2.15 ± 0.42	< 3.1
8-10 cm	< 0.74	32.1 ± 5.5	2.65 ± 0.49	< 3.5
10-12 cm	< 0.76	37.2 ± 5.9	2.69 ± 0.47	1.4 ± 1.1
12-14 cm	0.74 ± 0.33	45.3 ± 7.1	2.27 ± .50	< 3.6
14-16 cm	0.65 ± 0.21	33.0 ± 4.0	2.30 ± 0.34	1.30 ± 0.51
16-18 cm	0.70 ± 0.29	34.6 ± 5.6	2.48 ± 0.46	1.5 ± 1.1
18-20 cm	1.02 ± 0.31	30.9 ± 5.2	2.15 ± 0.50	< 3.2
20-22 cm	0.71 ± 0.29	22.4 ± 3.6	2.12 ± 0.43	< 3.1
22-24 cm	0.43 ± 0.27	20.6 ± 3.5	2.61 ± 0.51	2.28 ± 0.90
24-26 cm	0.63 ± 0.28	14.2 ± 2.8	2.17 ± 0.42	< 3.1
26-28 cm	0.78 ± 0.29	15.5 ± 2.9	2.16 ± 0.53	< 3.1
28-30 cm	0.64 ± 0.30	15.8 ± 3.0	2.25 ± 0.45	< 3.2
30-32 cm	0.89 ± 0.23	12.7 ± 2.2	2.22 ± 0.33	1.76 ± 0.75
32-34 cm	0.87 ± 0.31	10.1 ± 2.5	2.29 ± 0.43	< 3.3
34-36 cm	0.50 ± 0.27	9.3 ± 2.4	2.42 ± 0.46	< 3.5
36-38 cm	0.62 ± 0.28	5.9 ± 2.0	2.83 ± 0.37	< 3.4
38-40 cm	0.93 ± 0.32	9.5 ± 2.4	2.63 ± 0.47	1.9 ± 1.2
40-42 cm	1.12 ± 0.34	11.6 ± 2.5	2.04 ± 0.54	1.55 ± 0.91

ANNEXE 5

Caractéristiques physiques (densité humide et pourcentage de pélites) des trois carottes prélevées

St 133			St 15			St 61		
Profondeur (cm)	Densité humide	Pélites (%)	Profondeur	Densité humide	Pélites (%)	Profondeur	Densité humide	Pélites (%)
0,5	1,56	65,8	1	1,50	93,1	1	1,44	82,4
1,5	1,67	63,9	3	1,50	84,0	3	1,48	78,9
2,5	1,78	63,9	5	1,62	80,9	5	1,47	77,0
3,5	1,83	62,5	7	1,57	88,8	7	1,59	80,5
4,5	1,79	66,0	9	1,56	91,6	9	1,54	79,8
5,5	1,86	69,0	11	1,55	91,0	11	1,59	78,4
6,5	1,88	65,6	13	1,55	85,7	13	1,57	78,6
7,5	1,91	61,8	15	1,72	88,3	15	1,60	78,3
8,5	1,90	61,1	17	1,78	85,6	17	1,58	78,0
9,5	2,01	63,3	19	1,68	85,4	19	1,57	74,3
10,5	1,95	65,3	21	1,67	79,2	21	1,62	79,0
11,5	2,04	58,7	23	1,69	80,7	23	1,63	75,1
12,5	1,90	62,4	25	1,66	87,4	25	1,65	75,7
13,5	1,88	63,9	27	1,66	85,4	27	1,70	76,5
14,5	1,96	62,6	29	1,64	74,7	29	1,66	76,0
15,5	1,96	62,4	31	1,88	80,2	31	1,64	76,2
			33	1,94	71,1	33	1,67	80,1
			35	1,87	70,3	35	1,74	81,9
			37	1,81	73,4	37	1,66	76,0
			39	1,73	74,9	39	1,67	81,1
			41	1,75	80,9	41	1,63	74,6

ANNEXE 6

Concentrations totales en métaux dans les trois carottes

Carotte St 15

Profondeur (cm)	[Co] en µg/g	[Ca] en mg/g	[Cu] en µg/g	[Cr] en mg/g	[Fe] en mg/g	[Mn] en mg/g	[Ni] en mg/g	[Zn] en µg/g
1	358,8	30,4	21,7	17,9	312,6	2,8	4,2	189,5
3	232,9	24,8	15,6	13,5	224,5	2,0	2,8	139,0
5	280,5	40,4	13,8	18,3	260,2	2,3	3,5	173,1
7	256,1	29,6	14,3	12,7	244,4	2,1	3,0	169,9
9	282,2	37,0	14,3	15,1	319,6	2,3	3,5	193,9
11	286,4	41,9	15,6	17,1	282,8	2,5	3,8	180,2
13	303,4	28,5	15,3	15,2	261,9	2,3	3,3	117,9
15	280,9	41,2	13,6	13,7	308,3	2,3	3,6	166,7
17	334,4	42,4	17,3	16,3	276,1	2,7	4,0	155,3
19	340,9	42,8	18,9	15,3	276,3	2,8	4,1	158,0
21	367,3	38,1	17,2	14,5	349,7	3,0	4,5	179,3
23	357,6	32,0	17,7	14,8	351,3		4,7	165,1
25	375,6	28,9	18,0	12,9	351,6	3,1	5,1	177,9
27	393,4	31,4	17,8	13,4	349,4	3,1	5,0	174,3
29	513,6	23,3	19,7	16,0	377,3	2,9	4,8	173,2
31	497,2	22,9	18,4	16,8	350,7	3,0	4,8	175,2
33	454,5	26,4	18,6	19,9	356,9	3,0	4,7	191,7
35	475,0	27,4	19,5	16,8	345,9	3,2	4,8	186,6
37	432,6	31,6	18,2	16,8	353,0	3,3	4,6	184,9
39	447,0	35,8	18,3	16,7	345,7	3,4	4,8	180,9
41	468,9	39,3	20,2	17,4	369,7	3,9	5,2	194,5

Carotte St 61

Profondeur (cm)	[Co] en µg/g	[Ca] en mg/g	[Cu] en µg/g	[Cr] en mg/g	[Fe] en mg/g	[Mn] en mg/g	[Ni] en mg/g	[Zn] en µg/g
1	113,0	214,1	9,7		117,7	1,27	2,23	87,0
3	137,0	241,7	6,9	7,32	147,70	1,13	2,60	73,80
5	127,6	232,3	6,6	7,30	139,93	1,06	2,43	78,4
7	136,0	231,3	7,5	7,29	146,11	1,14	2,56	90,4
9	143,1	229,9	7,5	7,81	151,01	1,16	2,65	76,7
11	156,4	236,5	6,5	7,73	161,04	1,25	3,00	87,4
13	136,9	230,0	5,5	6,96	148,75	1,16	2,75	68,9
15	143,7	231,1	6,5	7,42	151,75	1,18	2,71	82,9
17	145,2	216,2	7,3	7,23	157,95	1,22	2,86	107,2
19	150,5	221,2	8,1	7,12	163,46	1,26	3,00	95,5
21	161,3	213,0	8,6	7,78	172,57	1,30	3,15	89,2
23	156,5	215,5	7,3	7,67	166,61	1,26	3,04	96,4
25	148,8	223,6	12,3	7,65	156,89	1,24	2,84	104,1
27	150,7	226,7	8,6	7,23	158,18	1,25	2,96	113,3
29	138,8	231,3	7,5	7,30	151,90	1,20	2,74	114,9
31	146,7	227,5	15,8	7,28	159,93	1,27	2,92	89,2
33	150,2	231,5	12,2	7,41	160,10	1,26	3,16	100,6
35	145,5	230,1	15,7	6,84	152,63	1,22	3,02	129,5
37	158,0	214,4	15,6	7,17	168,97	1,32	3,24	170,3
39	138,4	230,3	11,2	7,06	149,97	1,21	2,75	120,4
41	157,4	217,1	16,3	7,23	170,51	1,36	3,15	141,5

Carotte St 133

Profondeur (cm)	[Co] en µg/g	[Ca] en mg/g	[Cu] en µg/g	[Cr] en mg/g	[Fe] en mg/g	[Mn] en mg/g	[Ni] en mg/g	[Zn] en µg/g
0,5	33,6	334,7	2,5	1,29	40,6	0,34	0,52	< DL
1,5	33,1	347,8	6,9	1,45	40,6	0,37	0,42	76,6
2,5	36,7	326,5	6,2	1,33	49,0	0,43	0,65	121,0
3,5	31,8	329,8	8,1	1,40	45,8	0,38	0,38	55,3
4,5	32,8	328,8	0,6	1,25	49,1	0,32	0,57	6,6
5,5	33,0	342,4	1,4	1,30	44,9	0,30	0,31	7,0
6,5	33,5	338,9	0,6	1,29	46,9	0,31	0,33	55,9
7,5	30,5	319,8	1,4	1,21	42,6	0,28	0,31	59,1
8,5	31,8	327,7	3,4	1,23	44,5	0,30	0,33	127,7
9,5	33,7	334,3	2,5	1,28	45,6	0,30	0,37	45,1
10,5	31,1	334,6	0,6	1,23	43,5	0,29	0,46	50,8
11,5	30,5	316,6	2,6	1,19	41,5	0,28	0,35	38,9
12,5	29,0	319,2	2,5	1,17	42,9	0,28	0,43	62,5
13,5	34,8	360,5	0,6	1,35	49,3	0,33	0,35	68,6
14,5	26,9	315,2	1,5	1,18	39,4	0,26	0,36	26,7
15,5	29,8	342,4	4,6	1,25	43,3		0,48	< DL

ANNEXE 7

Tableau des concentrations en soufre lixiviable et en soufre échangeable.

Horizon (cm)	Soufre lixiviable (mg/L)	Soufre échangeable (mg/L)
0-1	1,37	1,37
1-2	1,14	1,81
2-3	1,12	1,43
3-4	1,00	1,13
4-5	1,01	1,33