CREOCEAN
Services et Conseil en Environnement Littoral et Marin et Océanographie

ALTEO
Aluminium Pechiney Gardanne

REJETS DES RESIDUS INERTES DE L'USINE DE GARDANNE DANS LE CANYON DE CASSIDAIGNE

Campagne ALPEJAN 01

Caractérisation physico-chimique des sédiments
Rapport

La Seyne-sur-mer, mars 2014
Dossier 1-11300-E

CREOCEAN Agence PACA/CORSE
243, Avenue de Bruxelles
83 500 La Seyne sur mer - France
Tél : 04 98 00 25 80
Fax : 04 94 94 95 29

e-mail : pacacorse@creocean.fr
web : www.creocean.fr

RESJETS DES RESIDUS INERTES DE L'USINE DE GARDANNE

CREOCEAN Agence PACA/Corse

243, Avenue de Bruxelles
83 500 La Seyne sur mer - France

Tél : +33 4 98 00 25 80
Fax : +33 4 94 94 95 29

e-mail : pacacorse@creocean.fr

web : www.creocean.fr

Caractérisation physico-chimique des sédiments

ALTEO

Domaine : **Etudes environnementales Méditerranée**		***Préparé par :***	**Elina DELORD**
Notre référence : **1-11300-E**		***Vérifié par :***	**Sébastien THORIN**
Date : **Mars 2014**		***Approuvé par :***	

Objectifs : Depuis 1967, les boues rouges produites par une usine d'aluminium par le procédé d'extraction d'aluminium à partir de bauxite ont été déversées dans le canyon de Cassidaigne (Nord de la mer Méditerranée) à 320 m de profondeur. Aussi, l'article 5.1.1 de l'arrêté préfectoral du 24 mai 2004 impose à la société exploitante un suivi de ces déversements tous les cinq ans. Dans le cadre de ce suivi, les sédiments ont été prélevés en septembre 1991, 1997, 1999, 2002, 2007 et 2012 à partir de stations situées sur les deux côtés du canyon, entre 250 et 2000 m de profondeur.

Les objectifs de ces campagnes sont :

- le suivi de l'extension des dépôts ;
- le suivi de la granulométrie des sédiments et des teneurs en métaux lourds ;
- le suivi de l'évolution de la macrofaune benthique ;
- le suivi de l'évolution de l'écotoxicité des sédiments.

En 2012, la caractérisation de l'écologie des foraminifères benthiques, non réalisée jusqu'alors, a été ajoutée.

Le présent document expose les résultats obtenus dans le cadre de la caractérisation physico-chimique du sédiment.

TABLE DES MATIERES

1 - INTRODUCTION 1

2 - MATERIELS ET METHODES 2

2.1 - Localisation des stations de prélèvement 2

2.2 - Prélèvements et échantillonnage 4

2.2.1 - Séquençage des opérations 4

2.2.2 - Nombre d'échantillons 8

2.2.3 - Conservation des échantillons 11

2.2.4 - Analyses 11

2.3 - Traitement des données 15

2.3.1 - Recherche bibliographique 15

2.3.2 - Critique de matériels et méthodes 15

2.3.3 - Les 3 approches successives et complémentaires 16

3 - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DES RESIDUS INERTES 17

4 - RESULTATS 18

4.1 - Analyse comparée « matériel et méthode » 18

4.2 - Etude de la carte de l'extension des dépôts 20

4.2.1 - Etude de la répartition spatiale des boues rouges en 2012 23

4.2.2 - Etude de l'évolution temporelle de la répartition des boues rouges 24

4.3 - Granulométrie 25

4.3.1 - Evolution de la granulométrie dans la colonne sédimentaire 25

4.3.2 - Evolution spatiale de la granulométrie 29

4.3.3 - Evolution spatio-temporelle de la granulométrie 30

4.4 - Géochimie 31

4.4.1 - Aluminium 32

4.4.2 - Chrome total 34

4.4.3 - Cuivre 37

4.4.4 - Fer total 39
4.4.5 - Manganèse 41
4.4.6 - Plomb 43
4.4.7 - Titane 44
4.4.8 - Vanadium 47

5 - DISCUSSION 49

6 - LISTE DE REFERENCES 51

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des stations de prélèvements depuis 1991 _____ *3*
Figure 2 - Schéma de la méthodologie _____ *9*
Figure 3 - Carte des couleurs des sédiments superficiels _____ *22*
Figure 4 : ACP sur granulométrie < 4 µm _____ *26*
Figure 5 : ACP sur granulométrie < 4 µm - Cercle de corrélations _____ *26*
Figure 6 : Droites de corrélation des médianes de granulométrie par strate (et pente) _____ *28*
Figure 7 : Représentativité de la fraction < 4 µm _____ *31*
Figure 8 : ACP des données de concentration en chrome par strates et par station _____ *34*
Figure 9 : ACP des données de concentration en cuivre par strates et par station _____ *37*
Figure 10 : ACP des données de concentration en fer par strates et par station _____ *39*
Figure 11 : ACP des données de concentration en manganèse par strates et par station _____ *41*
Figure 12 : ACP des données de concentration en Plomb par strates et par station _____ *43*
Figure 13 : ACP des données de concentration en titane par strates et par station _____ *45*
Figure 14 – Représentation graphique de la concentration en titane normalisée par la fraction inférieure à 20 µm (Années 1997, 1999 et 2012) _____ *46*
Figure 15 : ACP des données de concentration en vanadium par strates et par station _____ *47*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – Récapitulatif des stations suivies depuis 1991 2
Tableau II – Caractérisation chimique des sédiments - Sous-échantillonnage des carottes 8
Tableau III – Paramètres recherchés dans le cadre du suivi du rejet de l'usine de Gardanne 12
Tableau IV – Récapitulatif des moyens mis en œuvre pour l'étude de la granulométrie depuis 1991 13
Tableau V – Fractions granulométriques sur lesquelles les analyses chimiques ont été réalisées 14
Tableau VI – Couleurs des sédiments superficiels 21
Tableau VII : Résultats des tests statistiques sur les métaux 32
Tableau VIII : Variances des concentrations entre strates 33
Tableau IX : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en chrome total dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 36
Tableau X : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en cuivre dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 38
Tableau XI : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en fer total dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 40
Tableau XII : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en manganèse dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 42
Tableau XIII : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en plomb dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 44
Tableau XIV : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en titane dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 46
Tableau XV : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en vanadium dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface 48

LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Planche photographie 1 - Photographies de la méthodologie _____ *6*

Planche photographie 2 - Photographies de la méthodologie _____ *7*

1 - INTRODUCTION

Depuis 1967, les boues rouges produites par une usine d'aluminium par le procédé d'extraction d'aluminium à partir de bauxite ont été déversées dans le canyon de Cassidaigne (Nord de la mer Méditerranée) à 320 m de profondeur.

Aussi, l'article 5.1.1 de l'arrêté préfectoral du 24 mai 2004 impose à la société exploitante un suivi de ces déversements tous les cinq ans. Dans le cadre de ce suivi, les sédiments ont été prélevés en septembre 1991, 1997, 1999, 2002, 2007 et 2012 à partir de stations situées sur les deux côtés du canyon, entre 250 et 2000 m de profondeur.

Les objectifs de ces campagnes sont :

- le suivi de l'extension des dépôts ;
- le suivi de la granulométrie des sédiments et des teneurs en métaux lourds ;
- le suivi de l'évolution de la macrofaune benthique ;
- le suivi de l'évolution de l'écotoxicité des sédiments.

En 2012, la caractérisation de l'écologie des foraminifères benthiques, non réalisée jusqu'alors, a été ajoutée.

Le présent document expose les résultats obtenus dans le cadre de la caractérisation physico-chimique du sédiment. L'ensemble des résultats cartographiques et graphiques est donné en annexe. Certaines de ces planches illustratives sont néanmoins intégrées au présent document.

2 - MATERIELS ET METHODES

La cinquième campagne de prélèvements en mer dans le canyon de Cassidaigne s'est déroulée du 3 au 9 septembre 2012 à partir du support de surface JANUS II de la COMEX dans de bonnes conditions techniques et météorologiques.

2.1 - Localisation des stations de prélèvement

Le suivi environnemental 2012 des rejets des résidus inertes de l'usine de Gardanne dans le canyon de Cassidaigne porte sur l'étude de 15 stations, dont certaines ont été étudiées par le passé (Tableau I et Annexe A1 – Localisation des stations de prélèvement).

Tableau I – Récapitulatif des stations suivies depuis 1991

Stations	Profondeur	Stations voisines	2012	2007	2002	1999	1997	1991
MT11	2115							X
MT01	2275							X
MT12	2213					X		
MT14	2280							X
U02	2104	MT02	X		X			
U03	288		X	X	X	X	X	X
U04	219	MT04	X	X	X		X	X
U05	745	MT05	X	X	X		X	X
U06	598	MT07	X	X	X		X	X
U07	1050	MT08	X	X	X		X	X
U08	1547	MT09	X	X	X		X	X
U09	1968	MT10	X		X		X	X
U10	2126		X		X	X	X	
U11	2222	MT13	X		X		X	X
U12	2290	MT14	X		X			X
U13	958		X	X	X		X	
U15	73						X	
U16	92						X	
U17	90						X	
U18	1245						X	
U19	1775						X	
U21	2200						X	
U22	2315						X	
U23	2290					X		
U24	2249					X		
U25								
U26	2432		X					
U27	2250		X					
U28	1758		X	X				
U29							X	

Créocéan, 2013

STATION	X UTM	Y UTM
MT12	236999.38	4745495.7
U02	213792.68	4746087.66
U03	209978.05	4780033.96
U04	219256.42	4778069.14
U05	217174.97	4765527.89
U06	202673.56	4771725.01
U07	200042.73	4767574.37
U08	192810.36	4762943.11
U09	192956.78	4751288.55
U10	202868.43	4741718.99
U11	228374.54	4740658.33
U12	236999.38	4745495.7
U13	235877.16	4767357.16
U15	218432.98	4787059.1
U16	211648.71	4787714.47
U17	192348.83	4784406.01
U18	175892.62	4750068.44
U19	186272.27	4740256.94
U20	172149.77	4729893.64
U21	219852.22	4729559.99
U22	233672.23	4728921.63
U23	254950.26	4750708.35
U24	276687.19	4751468.58
U26	250400.08	4719031.64
U27	212785.41	4720486.23
U28	178588.91	4721985.99
MT01	232018.04	4747244.98
MT02	212838.74	4746127.39
MT04	217853.47	4778312.5
MT05	217174.97	4765527.89
MT07	203121.63	4771705.52
MT08	199596.82	4767649.59
MT09	192810.36	4762943.11
MT10	192956.78	4751288.55
MT11	202908.05	4747272.07
MT13	228374.54	4740658.33

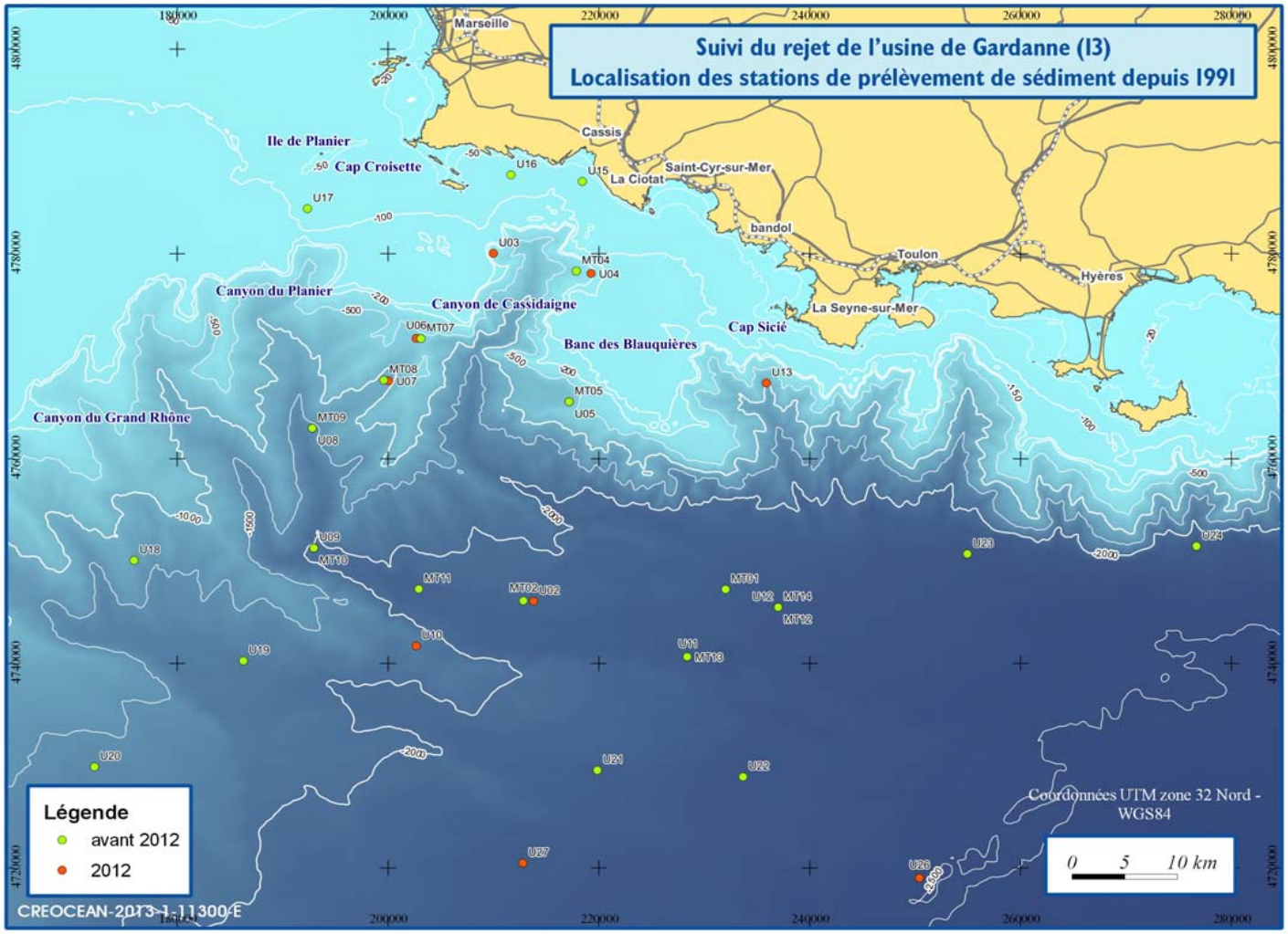


Figure 1 : Localisation des stations de prélèvements depuis 1991

2.2 - Prélèvements et échantillonnage

2.2.1 -Séquençage des opérations

Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une benne USNEL adaptée pour tous les prélèvements de sédiments meubles selon le mode opératoire suivant (Annexe A2 – Matériels et méthode) :

Etape 1 : Prélèvement à la benne USNEL

Etape 2 : Validation de l'intégrité du prélèvement à la benne avant traitement et/ou conditionnement (ex. : verticalité des tubes de polychètes)

Etape 3 : Récupération de l'eau contenue dans la benne USNEL après prélèvement (siphonage)

Etape 4 : Découpe de l'échantillon en deux parties égales

L'une des parties est consacrée au prélèvement réalisé en vue de la caractérisation des peuplements benthiques de substrat meuble, l'autre aux prélèvements nécessaires à la caractérisation physico-chimique et écotoxicologique du sédiment et à la caractérisation de la méiofaune.

Etape 6 : Mise en place des carottiers dans le sous-échantillon (demi-benne)

6.1 Mise en place des deux carottiers en vue des analyses chimiques

6.2 Mise en place du carottier en vue de l'étude de la méiofaune benthique

Etape 7 : Echantillonnage de la partie superficielle par raclage en vue de sa caractérisation physico-chimique

Etape 8 : Prélèvement pour les tests écotoxicologiques

Etape 9 : Retrait des carottiers ⇒ conditionnement

9.1 Retrait des carottiers en vue de l'étude de la méiofaune benthique

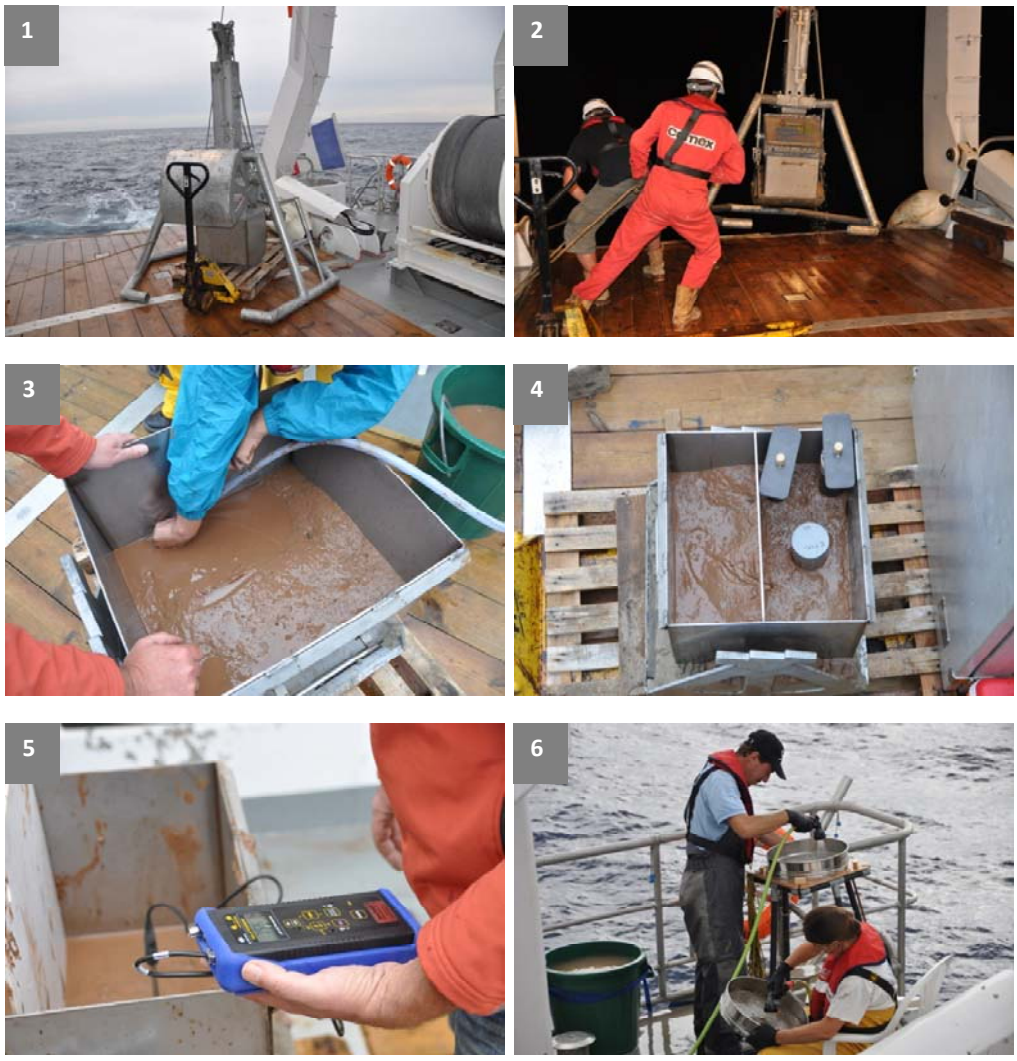
9.2 Retrait du carottier en vue des analyses chimiques

Etape 10 : Prélèvement de l'échantillon pour l'étude de la macrofaune benthique de substrat meuble sur les 15 premiers centimètres de la demi-benne réservée à cela

Etape 11 : Tamisage en vue de la caractérisation de la macrofaune benthique

Suivi du rejet de l'usine de Gardanne (13)

Matériels et méthode



1. Benne USNEL armée
2. Benne USNEL à la remontée
3. Siphonage
4. Segmentation du sédiment prélevé à la benne
5. Mesure de pH
6. Tamisage en vue de la caractérisation de la macrofaune benthique

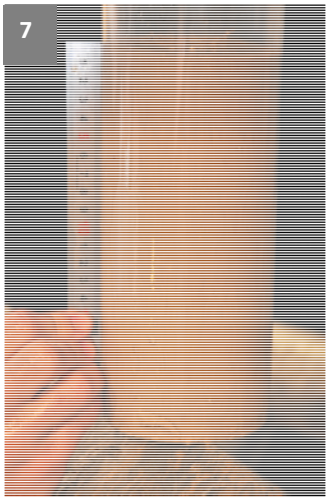
CREOCEAN-2013-1-11300-E

Planche photographie 1 - Photographies de la méthodologie

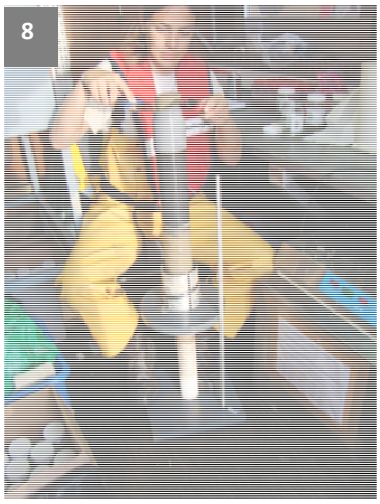
Suivi du rejet de l'usine de Gardanne (13)

Matériels et méthode

7



8



9



1. Carotte prélevée en vue de la caractérisation des foraminifères
2. Découpe de la carotte en strate en vue de la caractérisation physico-chimique
3. Equipe mobilisée pour la campagne Alpejan 01 (Malcom Puggioni, Eric Dombrovski, Emmanuelle Seguin, Mathieu Compère, Charly Terzian, Jonathan Morvan, Etienne Tanazacq, Géraldine Willem, Elina Delord, Claude Reveret, Daniel Ribera, Dominique Bravalt, Christophe Fontanier, Aline Federighi, Bertrand Langlois, Philippe Thibault, Michel Avon)

CREOCEAN-2013-1-11300-E

Planche photographie 2 - Photographies de la méthodologie

2.2.2 -Nombre d'échantillons

Deux prélèvements à la benne USNEL ont été réalisés (benne a et benne b) au niveau de chaque station, excepté aux stations U26, U27 et U28. L'administration des Affaires Maritimes ayant des exigences en délai d'accès à certains sites et le programme devant impérativement s'arrêter le dimanche 9 septembre au soir, il a été décidé de ne faire qu'un prélèvement sur les points U26, U27 et U28.

Sur le volume de sédiment prélevé à la benne USNEL, les prélèvements nécessaires à la caractérisation physico-chimique du sédiment ont été effectués dans un sous-échantillon de dimension 25cm x 10cm x 70 cm :

- deux carottes de diamètre 6cm et de 20cm de haut ont été insérées dans le sédiment une fois l'intégrité structurelle du sédiment validée (surface non lessivée). Chaque carotte a été récupérée et sous-échantillonnée en trois strates sur les 9 premiers centimètres (*Cf.* tableau suivant). Le sédiment restant des carottes a été remis à l'eau.

Tableau II – Caractérisation chimique des sédiments - Sous-échantillonnage des carottes

Nom	Couche prélevée	Hauteur du prélèvement	Volume prélevé
Strate 0	Interface eau-sédiment	< 1 cm	45 cm^3
Strate 1	0 cm → 3 cm	3 cm	85 cm^3
Strate 2	3 cm → 6 cm	3 cm	85 cm^3
Strate 3	6 cm → 9 cm	3 cm	85 cm^3

- au préalable, l'interface eau-sédiment (strate 0 d'une hauteur inférieure au centimètre) constituée quasi exclusivement par les boues rouges a été prélevée et conditionnée en vue des analyses.

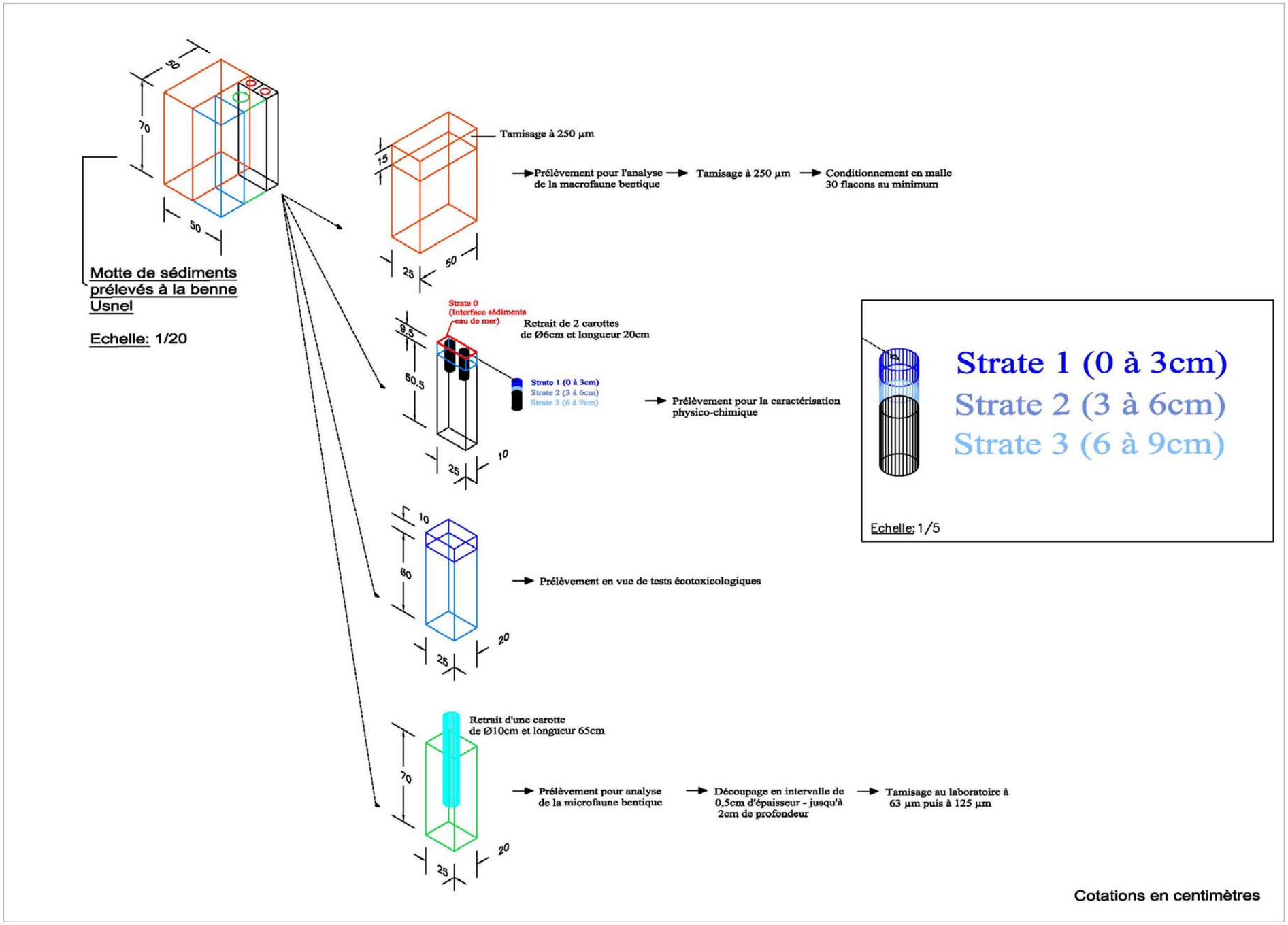


Figure 2 - Schéma de la méthodologie

Ainsi, un total de quatre carottes a été réalisé pour les stations U02 à U13 et un total de deux échantillons a été constitué pour les stations U26, U27 et U28. Malgré six essais, la benne USNEL n'a pas permis de récupérer un échantillon représentatif sur le point U04, (comme en 2007) constitué des sables coquillers grossiers et caillouteux. Il n'y a donc pas eu de bonne pénétration du préleveur ni d'étanchéité lors de la remontée. Des prélèvements ont néanmoins été réalisés à titre indicatif mais l'interprétation des données ne sera pas considérée pour cette station.

2.2.3 -Conservation des échantillons

Compte tenu des analyses à réaliser, les échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre de 375 ml puis stockés dans un congélateur. Leur conservation dans un réfrigérateur à 4°C aurait été satisfaisante mais le réfrigérateur disponible à bord n'était pas de taille suffisante pour accueillir l'ensemble des échantillons. Le laboratoire d'analyses n'a émis aucune contre indication au fait de congeler les échantillons.

Chaque flacon a été identifié tel qu'indiqué ci-dessous afin d'en permettre la traçabilité tout au long de sa prise en charge :

CREOCEAN	**– Canyon de Cassidaigne**	**- U02**	**- Strate 1**	**- a1**	**- XX/09/2012**
Identification du préleveur	Désignation du site	Station	Nom du la strate	benne et sous-échantillon	Date du prélèvement

2.2.4 -Analyses

Laboratoires

Les échantillons ont été analysés par l'ancienne plateforme IPL Nord, aujourd'hui Eurofins.

Eurofins IPL Nord
1, rue du Professeur Calmette
59046 Lille Cedex
LD : +33 (0)0 20 87 72 33

Paramètres recherchés

Les paramètres recherchés dans le cadre du suivi réalisé depuis 1991 sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau III – Paramètres recherchés dans le cadre du suivi du rejet de l'usine de Gardanne

Paramètres	2012	2007	2002	1999	1997	1991
Granulométrie	X	X	X	X	X	X
Aluminium	X	X	X	X	X	X
Arsenic	X					
Cadmium	X					
Carbone Organique Total	X					X
Chrome total	X	X	X	X	X	X
Cuivre	X	X	X	X	X	X
Fer total	X		X	X	X	X
Manganèse	X	X	X	X	X	X
Matière organique	X					
Matières calcinables						X
Matières sèches	X					
Mercure total	X					
Nickel	X					
Plomb	X	X	X	X	X	X
Titane	X	X	X	X	X	X
Vanadium	X	X	(X)*	X	X	
Zinc				X	X	X

** un seuil de détection trop élevée, attribuée à une perte de sensibilité du spectromètre d'émission utilisé pour le dosage du vanadium, conduit à l'absence quasi-totale de valeurs significatives, [..]" (Arnoux et Stora, 2003)*

Créocéan, 2013

Méthodes analytiques en vue de la caractérisation de la granulométrie

En 2012, la granulométrie par tamisage par voie humide a été utilisée pour la séparation des particules les plus grossières, de taille supérieure à celle prise en compte par la méthode optique, c'est-à-dire des particules supérieures à 2 mm. Seuls les prélèvements effectués à la station U04 ont permis de récolter du matériel supérieur à 2 mm ce que corroborent les observations effectuées sur le terrain.

Comme cela a été souligné dans les rapports de campagne précédents, les boues se caractérisent par la finesse des matériaux ce qui leur confère une fluidité leur permettant un écoulement le long de la pente du canyon et une aptitude à l'entraînement par les courants. Aussi, afin de distinguer les particules dues aux boues aux matériaux en place, il est nécessaire d'avoir recours à la microgranulométrie. Le professeur André Arnoux avait présenté l'intérêt de pratiquer celle-ci afin de mettre en évidence les particules les plus fines, et plus particulièrement celles inférieures à 20 µm, ou mieux à 2 µm, constituant les boues. Par ailleurs, il a été mis en évidence au cours des années précédentes que le calcul de la distribution des particules selon l'algorithme de Mie favorise la mise en évidence d'une fraction très fine, inférieure à 1 µm et que cette fraction est particulièrement occultée par l'algorithme de Fraunhofer (1999). Le travail effectué en 2002 avait permis d'établir les distributions microgranulométriques de 0,06 µm à 1000 µm et ainsi de mettre en évidence

que les stations U06, U12, et, dans une moindre mesure U02, U03 et U07, étaient sous l'influence du rejet. En conséquence, les granulométries ayant été réalisées en 2012 sur un appareil Beckman Coulter avec un modèle optique Fraunhofer, le classement granulométrique a été effectué jusqu'à la fraction 1 µm (Tableau IV).

Tableau IV – Récapitulatif des moyens mis en œuvre pour l'étude de la granulométrie depuis 1991

Campagne	Traitement préliminaire	Méthode analytique	
		Granulomètre	Algorithme de calcul
2012	Tamisage humide f > 2000 µm	Beckman Coulter	Fraunhofer
2007	Tamisage humide f > 500 µm	Malvern MS E F 300	Fraunhofer
2002	Tamisage humide f > 500 µm	Malvern MS 2000 F 300	Mie
1999	Tamisage humide f > 1 mm	Malvern MS 2000 F 300	Mie
1997	Tamisage humide f > 500 µm	Malvern MS 2000 F 300	Fraunhofer
1991	Non précisé	Cilas (fraction < 63 µm)	Non précisé

Méthodes analytiques en vue de la caractérisation chimique des sédiments

Comme indiqué plus haut, deux carottes ont été prélevées au niveau de chaque benne, en vue d'effectuer une double analyse. Celle-ci a été réalisée à partir de méthodologies de préparation de l'échantillon différentes mais qui se veulent proches de ce qui a été effectué de 1991 à 2002 (**digestion partielle par un mélange acide chlorhydrique / acide nitrique**) et 2007 (**digestion totale par attaque fluorhydrique / perchlorique**) (Annexe A3 – Méthodes analytiques). En effet, « jusqu'en 2007, le choix s'était porté sur des méthodes d'attaque « partielle » de la matrice assurant la mise en solution de la partie la plus labile des dérivés métalliques considérée comme représentative de la contamination du site par les boues résiduaires de l'industrie d'aluminium. […] Ces méthodes sélectives s'étaient avérées suffisantes (à l'exception de l'aluminium et du vanadium) pour assurer un suivi du milieu entre 1991 et 2002. » (Garcia *et al.,* ND). En 2007, l'utilisation de techniques d'attaques plus complètes, a permis la mise en solution de l'intégralité des métaux avec pour conséquence, une plus grande difficulté pour différencier la part du rejet usinier des apports géologiques contenu naturellement dans les sédiments. C'est en particulier le cas pour le titane (Garcia *et al.,* ND).

La double analyse effectuée sur les échantillons prélevés en 2012 a pour objectif le suivi spatio-temporel des concentrations depuis 2002.

Parallèlement à ce travail, les éléments majeurs (aluminium et titane) ont également été recherchés sur une matrice **fusion alcaline**.

Digestion partielle par un mélange acide chlorhydrique / acide nitrique (protocole Eurofins) :

La méthode de minéralisation selon la norme NF EN 13346 à l'eau régale est une méthode accréditée par le COFRAC, aussi Eurofins n'a pas pu mettre en œuvre à l'identique la méthodologie des années précédentes. La minéralisation à l'eau régale est composée de ¼ d'HNO3 et de ¾ d'HC à l'image de ce qui été fait précédemment, elle est cependant légèrement différente à celle effectuée par le LHMA : la température de minéralisation est plus faible (elle est aux alentours de 95°C) et la minéralisation a été effectuée sur digibloc. Par le passé, elle était faite soit au micro onde (2007, 2002) soit par reflux (1999, 1997, 1991). Les minéralisâts ont ensuite été analysés par Plasma à Couplage Inductif - Spectrométrie d'Emission Atomique ICP-AES. Le gaz vecteur est l'argon.

Digestion totale par attaque fluorhydrique / perchlorique (protocole Eurofins) :

La minéralisation par attaque fluoro-perchlorique mise en œuvre par Eurofins a été réalisée dans les proportions suivantes : 2/7 HF+5/7 HNO3 sur un digibloc. Les minéralisâts ont ensuite été analysés par Plasma à Couplage Inductif -Spectrométrie d'Emission Atomique ICP-AES. Le gaz vecteur est l'argon.

Digestion totale par fusion alcaline

La fusion alcaline est une technique permettant d'analyser les silicates de métaux lourds (roche). Le silicate est fondu avec du carbonate de sodium en excès. Cette opération le transforme en un mélange de silicate de sodium et d'autres métaux. On traite le résidu par une solution acide et le métal passe en solution.

Fraction granulométrique analysée

Les analyses chimiques ont été réalisées sur la fraction inférieure à 2 mm. A noter que lors des suivis précédents, les substances avaient également été recherchées sur la fraction inférieure à 20 µm car les particules inférieures à cette fraction considérées comme caractéristiques du rejet (Arnoux, 1999).

Tableau V – Fractions granulométriques sur lesquelles les analyses chimiques ont été réalisées

Fraction analysée	2012	2007	2002	1999	1997	1991
< 2 000 µm	X	X*	X	X	X	X
< 20 µm			X	X	X	

* par déduction

Créocéan, 2013

2.3 - Traitement des données

2.3.1 -Recherche bibliographique

Préalablement au traitement des données, l'ensemble des données acquises depuis 1991 a été recherché auprès des différents acteurs du projet (Altéo, F. Garcia (anciennement au Laboratoire d'Hydrologie et de Molysmologie Aquatique), Avon Marine Consultant, …).

Les données qui ont pu être recueillies sont reprises dans le tableau suivant.

	2012	2007	2002	1999	1997	1991
Données brutes						
Chimie	X	X	X	X	X	X
Granulométrie	X		X*	X	X	
Données traitées						
Chimie	X	X	X	X	X	X
Granulométrie	X	X	X	X	X	X

* Echelle de la classification granulométrique utilisée non définie. Par conséquent, les données ne seront pas utilisées dans la présente étude

Créocéan, 2013

Les données brutes de granulométrie ne sont pas disponibles pour l'ensemble des années du suivi. Or, comme il sera montré plus loin, la normalisation par la fraction fine des données de concentrations mesurées en 2012 parait nécessaire afin de comparer la répartition des teneurs en métaux entre les stations. Cependant, l'absence des données de granulométrie pour les années qui nous intéressent ne permet pas une comparaison normalisée entre les différentes années (1991 – début du suivi, 2002 – dernière année où les données ont été traitées par attaque à l'eau régale (fusion alcaline pour l'aluminium), 2007 – première et dernière année au cours de laquelle les données ont été traitées suite à une minéralisation fluoro-perchlorique).

2.3.2 -Critique de matériels et méthodes

Comme expliqué par André Arnoux et Georges Stora (2003), « avant d'aborder la discussion des données, il est nécessaire de s'assurer qu'aucun artefact méthodologique ne peut conduire à des conclusions erronées sur l'évolution de la qualité des sédiments. » Pour y parvenir la comparaison des méthodologies mises en œuvre en 2012 et les données acquises seront comparées. Concernant les données acquises antérieurement, nous nous appuierons sur l'analyse réalisée dans les études transmises.

2.3.3 -Les 3 approches successives et complémentaires

Les données validées seront traitées afin de permettre :

- l'étude de la répartition des concentrations au sein de la colonne sédimentaire en 2012 ;
- l'étude de la répartition spatiale des concentrations au sein de l'interface en 2012 ;
- l'étude de l'évolution spatio-temporelle des concentrations.

3 - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DES RESIDUS INERTES

« Les résidus inertes présentent des caractères bien définis dont la description a déjà été faite :

- une couleur rouge[1] ;
- une granulométrie extrêmement fine, inférieure à 20 µm, dont un peu moins de la moitié est représentée par des particules inférieures à 2 µm ;
- une composition chimique caractérisée par la présence dans l'ordre décroissant des concentrations de fer, aluminium, titane, chrome, vanadium, manganèse, plomb et cuivre. »

Les principales modifications apportées par les boues rouges concernent donc :

- une modification de la couleur de la partie superficielle du sédiment ;
- un enrichissement en particules fines de taille inférieure à 20 µm ;
- une contamination en métaux.

Compte tenu de l'apport de cette charge métallique par des particules inférieures à 20 µm il aurait été intéressant, à l'image des suivis antérieurs, d'isoler cette fraction granulométrique afin d'y pratiquer les analyses chimiques. Néanmoins, le maître d'ouvrage a privilégié, en 2012, l'analyse de la fraction granulométrique inférieure à 2000 µm. Afin de prendre en compte l'effet de la fraction fine sur les concentrations et ainsi de mettre en évidence d'éventuels gradients de contaminants, les teneurs ont été normalisées par la proportion de la fraction granulométrique inférieure à 20 µm dans le sédiment analysé. Pour rappel, les techniques de normalisation « […] mettent à profit les relations fortes existant entre la richesse en particules fines du sédiment et sa concentration en contaminants. Plus la granulométrie est fine plus la surface spécifique est grande, entraînant, pour une concentration en contaminant donnée dans l'eau, une concentration dans le sédiment plus forte. »

[1] La couleur peut constituer un bon indice de la présence de boues rouges, ou de la nature des phénomènes de dispersion, mais au-delà d'un certain taux de dispersion dans la colonne sédimentaire, ce seul critère physique devient insuffisant (Arnoux, 1999)

4 - RESULTATS

4.1 - Analyse comparée « matériel et méthode »

Les pré-traitements et méthodes analytiques mis en œuvre au cours du suivi du rejet usinier sont précisés dans l'annexe A3 – Méthodes analytiques. Le présent paragraphe a pour objectif d'indiquer s'il est possible d'établir une corrélation entre les diverses méthodes analytiques en 2012 et les données acquises en 2007 et 2002.

Différences avec les méthodologies anciennement mises en œuvre

Plusieurs différences méthodologiques sont à noter :

- modification de certains paramètres du protocole (température, équipements (reflux, micro-onde, digibloc), proportion des acides, présence/absence de solution tampon ionique). Par exemple, l'utilisation d'un digibloc permet la décomposition sous haute pression du sédiment et par conséquent donne lieu à une attaque plus complète que celle menée par reflux.
- modification de l'ensemble du protocole de minéralisation en 2007. Jusqu'en 2002, le choix s'était porté sur une méthode d'attaque « partielle » de la matrice assurant la mise en solution de la partie la plus labile des dérivés métalliques considérée comme représentative de la contamination du site par les boues résiduaires de l'industrie d'aluminium. En 2007, l'utilisation de techniques d'attaque plus complètes, permet la mise en solution de l'intégralité des métaux avec pour conséquence, une plus grande difficulté pour différencier la part du rejet usinier des apports géologiques contenu naturellement dans les sédiments.

En définitive, la conclusion reste identique aux années précédentes : la mise en œuvre de protocoles analytiques différents induit d'une part une perte non négligeable d'informations et d'autre part, une limitation de la comparaison avec les données acquises précédemment sur la qualité chimique du sédiment.

Afin de pallier à ce biais méthodologique, Arnoux et Garcia ont calculé et étudié des rapports intermétalliques grâce aux données acquises lors des campagnes de 2007 (Garcia *et al.*, ND), 2002 (Arnoux et Stora, 2003), 1999 (Arnoux et Stora, 2000), 1997 (Arnoux, 1999), 1991 (Arnoux, 1992). Or, il ressort de ces travaux que la prise en compte de ces rapports

intermétalliques ne peut être envisagée en raison des écarts différents de variations constatés pour chaque métal (Arnoux et Stora, 2003).

Par conséquent, compte tenu des différences méthodologiques et des écarts parfois très importants d'un jeu de données à un autre, l'évolution temporelle au sein des carottes et sur la zone d'étude est effectuée en comparant les pentes des droites de régression établies à partir des données de chaque année normalisée par la fraction inférieure à 20 µm.

Incohérence de certains résultats en 2012

Théoriquement, l'attaque des oxydes métalliques est croissante entre les différentes méthodes de minéralisation, dans l'ordre : digestion par eau régale, minéralisation par attaque fluoro-perchlorique, attaque par fusion alcaline. Les teneurs obtenues suite à une mise en solution par fusion alcaline provoque l'élimination complète de la silice et par conséquent permet de fournir des résultats proches de la réalité minéralogique (Annexe A4 – résultats de l'exploitation des données obtenues pour les échantillons de sédiments). Les valeurs obtenues de la sorte peuvent donc être utilisées pour une normalisation.

La minéralisation par attaque fluoro-perchlorique permet également d'appréhender correctement cette réalité minéralogique. Les teneurs mesurées par une telle méthode représentent entre 95% et 100% de la valeur obtenue par fusion alcaline.

Au contraire, la minéralisation par eau régale permet d'appréhender la contamination d'un milieu.

Autrement dit, les teneurs mesurées devraient être supérieures lorsque l'échantillon est traité par attaque fluoro-perchlorique par rapport au même échantillon traité par une digestion à l'eau régale.

Or, les données acquises en 2012 dans le cadre du suivi du rejet des résidus inertes de l'usine de Gardanne suite à une minéralisation par attaque fluoro-perchlorique sont très souvent inférieures à celles obtenues par eau régale. Cette incohérence s'explique par le choix d'une prise d'essai de 1 g pour la minéralisation par attaque fluoro-perchlorique alors qu'elle est de 0,5 g pour la minéralisation partielle. Par conséquent, les éléments métalliques n'ont pas été entièrement solubilisés. **Ces données brutes ne seront pas utilisées pour l'étude de l'évolution spatio-temporelle de l'impact du rejet des résidus inertes de l'usine de Gardanne.**

4.2 - Etude de la carte de l'extension des dépôts

La couleur rouge caractéristique des rejets de l'usine peut constituer un indice de la présence des boues rouges. Aussi, une attention particulière a été apportée à l'aspect de l'échantillon et plus particulièrement à celui de l'interface, dès l'arrivée de la benne sur le pont du bateau. L'essentiel de ces observations est présenté dans le tableau suivant pour les différentes années du suivi et sur la carte et la planche photographique annexées au rapport (Annexe A5 – Couleur des sédiments superficiels, Annexe A6 – Photographies des prélèvements).

L'effort d'échantillonnage a toujours été différent entre deux campagnes. Cependant, dans la mesure du possible, les stations proches du rejet ont été échantillonnées. Par ailleurs, le suivi étant réalisé depuis 1991, les données sont suffisantes pour mettre en évidence des observations récurrentes sur certaines localités. Les données d'observations sont disponibles pour l'ensemble des années du suivi, exception faite des photographies. Le fait de ne pouvoir s'appuyer sur des photographies ne permet donc pas de réunir aisément sous un même vocable les observations décrites par le passé compte tenu de leur subjectivité.

Tableau VI – Couleurs des sédiments superficiels

Stations	2012	2007	2002	1999	1997	1991
MT01	-	-	-	-	-	Tr.
U02	Tr.	-	BR	BR	-	BR
U03	BR	Tr.	Tr.	-	Ø	-
U04	Ø	Ø	Ø	-	Ø	BR
U05	Ø	Ø	Tr.	-	Ø	Ø
U06	Ø	Ø	Tr.	-	BR	-
U07	Ø	Tr.	BR	-	BR	Tr.
U08	BR	BR	BR	-	BR	Tr.
U09	BR	-	Tr.	-	Tr.	Tr.
U10	Tr.	-	BR	Tr.	Tr.	Tr.
U11	BR	-	BR	-	Tr.	Tr.
U12	Tr.	-	BR	BR	-	BR
U13	Ø	Ø	Ø	-	Ø	Tr.
U15	-	-	-	-	Ø	Ø
U16	-	-	-	-	Ø	-
U17	-	-	-	-	Ø	-
U18	-	-	-	-	Ø	-
U19	-	-	-	-	Ø	-
U20	-	-	-	-	Ø	-
U21	-	-	-	-	Tr.	-
U22	-	-	-	-	Tr.	-
U23	-	-	-	Ø	-	-
U24	-	-	-	Ø	-	-
U26	Tr.	-	-	-	-	-
U27	Ø	-	-	-	-	-
U28	Ø	-	-	-	-	-

Ø	Pas de traces de résidus rouges
Tr.	Traces de résidus rouges / Couche superficielle brunâtre ou rougeâtre
BR	Présence d'une couche de boues rouges

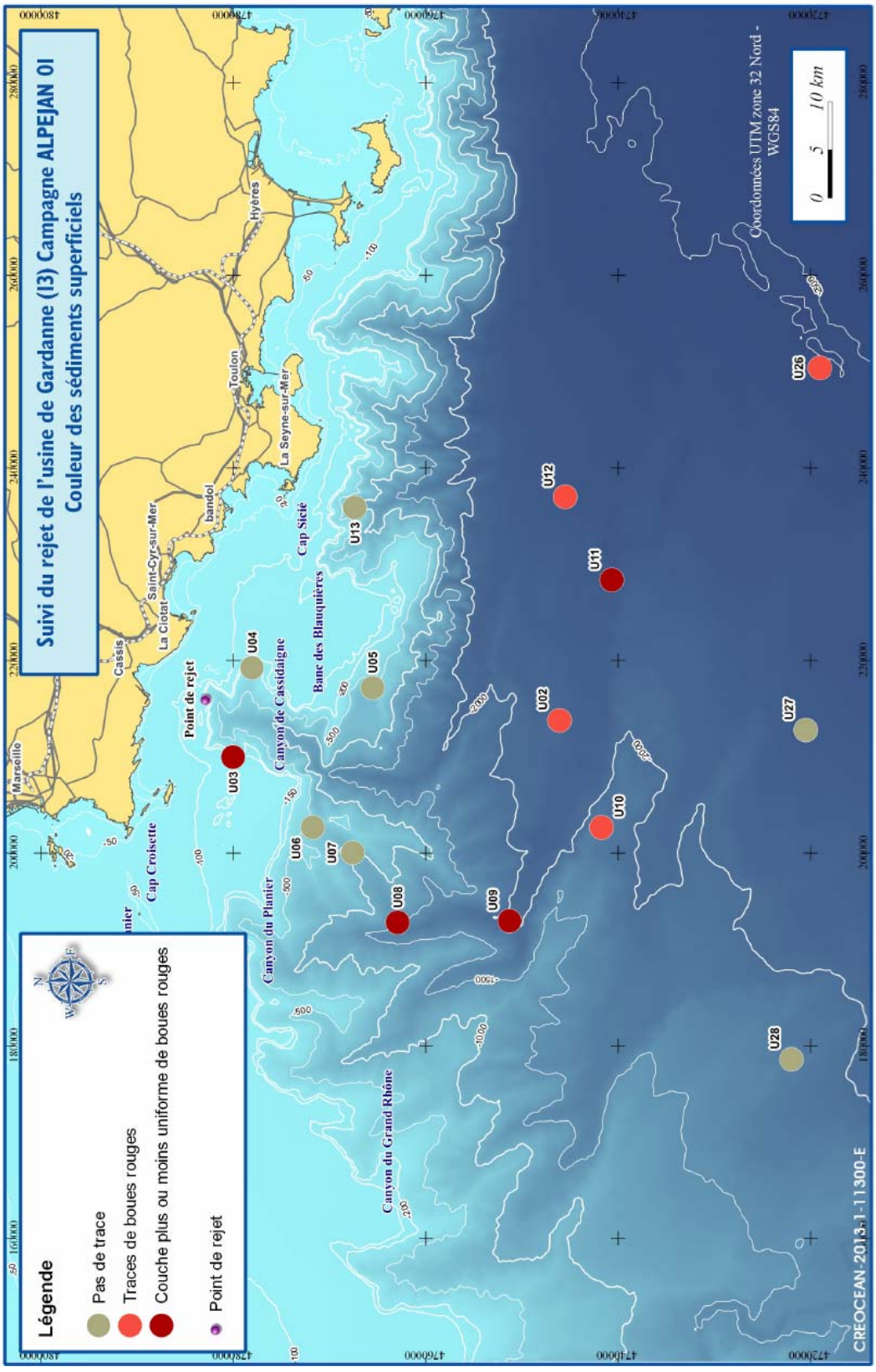


Figure 3 - Carte des couleurs des sédiments superficiels

4.2.1 -Etude de la répartition spatiale des boues rouges en 2012

Trois groupes de stations peuvent être distingués :

- les échantillons au niveau desquels aucune trace des boues rouges n'est perceptible. Il s'agit des échantillons prélevés :
  - ✓ à l'est de la tête (U04), à l'est du flan (U05) du canyon de Cassidaigne et au niveau de la branche est du canyon du Planier (U06 et U07) ;
  - ✓ à l'est du banc des bauquières – tête d'un canyon sans nom (U13 – station de référence) ;
  - ✓ dans la plaine bathyale (U27 et U28).
- les échantillons dans lesquels des traces de boues rouges sont perceptibles, soit à la surface du dépôt, soit sous forme de petits nodules inclus dans la partie superficielle du prélèvement. De tels échantillons ont été prélevés au niveau de l'exutoire profond des systèmes Marseille-Planier (U02, U10 et U12) et à la station U26 située dans la plaine bathyale et dans l'axe du Canyon de Cassidaigne.
- les échantillons au niveau desquels une couche uniforme, plus ou moins épaisse, recouvre toute la surface du prélèvement. Les échantillons présentant un dépôt de boues rouges ont été prélevés :
  - ✓ à l'ouest de la tête du canyon de Cassidaigne (U03) ;
  - ✓ dans l'axe du canyon du Planier (U08 et U09) ;
  - ✓ au niveau de l'exutoire profond des systèmes Marseille-Planier (U11) qui se trouve au-delà des stations U10 et U02 au niveau desquelles seules des traces avaient été observées. Au niveau de cette station U11, la couche de boue rouge est épaisse (plusieurs centimètres). Il est probable que cette accumulation soit liée à la localisation de la station U11 dans une dépression non visible sur la bathymétrie disponible (modèle numérique à 100 m établi en 2010 par l'association SHOM Ifremer à partir de données historiques).

Pour résumer, aucun dépôt rouge n'a été observé dans la partie est des canyons et dans les stations ouest de la plaine bathyale. En revanche, la présence de ces dépôts dans la zone des canyons jusqu'à la base du talus est avérée bien qu'il n'y ait pas d'uniformité entre les

stations relativement éloignées du point de rejet ou des couloirs d'étranglement dans lesquels s'accumulent les boues. Un constat similaire était formulé lors des précédents suivis. Arnoux (1999) indiquait que « cette absence d'uniformité […] pourrait témoigner, soit d'apports intermittents[2], soit, plus vraisemblablement, de phénomènes de transferts ou de remaniements se produisant aux dépens d'un film superficiel très fin. La remise en suspension peut être assurée par la circulation des masses d'eau transitant d'est en ouest dans cette zone, et, plus particulièrement, au pied du talus continental ». A noter que de rares dépôts ont été observés à l'est de la plaine bathyale.

Rq. : Les films vidéo recueillis au cours de la croisière avec l'équipe COMEX en 2009 (MARUM Croisière) dans le nord du canyon de Cassidaigne mettent en évidence la présence d'une épaisse couche continue de boue rouge en dessous de 350 m de profondeur (Fabri *et al.,* 2013 sous presse).

4.2.2 -Etude de l'évolution temporelle de la répartition des boues rouges

La présence des boues rouges au niveau de la station U03, située à proximité du rejet, est plus marquée qu'au cours des années précédentes. En effet, malgré la proximité de la station au rejet et les concentrations mesurées dans le sédiment collecté à ce niveau, les premières observations réalisées mettaient en évidence l'absence de dépôt visible.

En revanche, les observations s'accordent sur la présence de traces voire sur la présence d'une pellicule de boues rouges dans la zone des canyons jusqu'à la base du talus. L'absence d'uniformité sur la caractérisation de ce dépôt est à relier à la subjectivité de l'attribution du critère en l'absence des photographies des campagnes précédentes.

[2] Turbidites en milieu profond liées à des avalanches de matériel du plateau continental vers le bathyal

4.3 - Granulométrie

Le détail de la distribution granulométrique de la fraction inférieure à 2 mm de chaque station et de chaque niveau prélevé est représenté en annexe A7 sous forme de tableaux de données brutes, de courbes et de camemberts établis à partir des pourcentages des classes de particules détectées par microgranulomètre laser.

La similitude des résultats granulométriques de la benne a et de la benne b a été établie grâce à une étude statistique de la différence des valeurs de ces deux échantillons appariés. Le jeu de données ainsi formé, suivant une répartition normale avec un Kurtosis élevé, a ensuite été soumis à des tests de conformité à une moyenne (égale à zéro dans ce cas) :

- tests de Student (p-value = 0,8177, Hypothèse Ho : « *moyenne=0* » confirmée) ;
- test de Wilcoxon (p-value=0,7589, Hypothèse Ho : « *moyenne=0* » confirmée).

Il a donc été choisi de présenter uniquement les données de la première benne remontée sur le pont (benne a).

4.3.1 -Evolution de la granulométrie dans la colonne sédimentaire

Tout d'abord, la station U04 du plateau continental dont la répartition granulométrique est similaire entre les horizons est de type bimodal (mode de 517,20 µm et mode non déterminé mais supérieur à 2 000 µm). Cette station est écartée des interprétations en raison de son profil particulier et de la difficulté rencontrée pour l'échantillonner.

Par ailleurs, l'étude de la stratification des autres carottes sédimentaires (Annexe A7.1 et Annexe A7.2) permet de formuler une hypothèse sur la présence d'un critère discriminant entre les stations. Cette hypothèse est que la fraction granulométrique inférieure à 4 µm est plus représentée dans certaines stations. Une ACP permet de valider cette hypothèse (sur l'axe Cl1) en produisant une représentation graphique dont l'axe des ordonnées découpe l'ensemble des stations en deux groupes :

- les stations de la zone des canyons (U03, U06, U07, U08, U09) et les stations U13 et U05
- les stations de la base du talus (U10, U02, U11, U12, U26, U27 et U28).

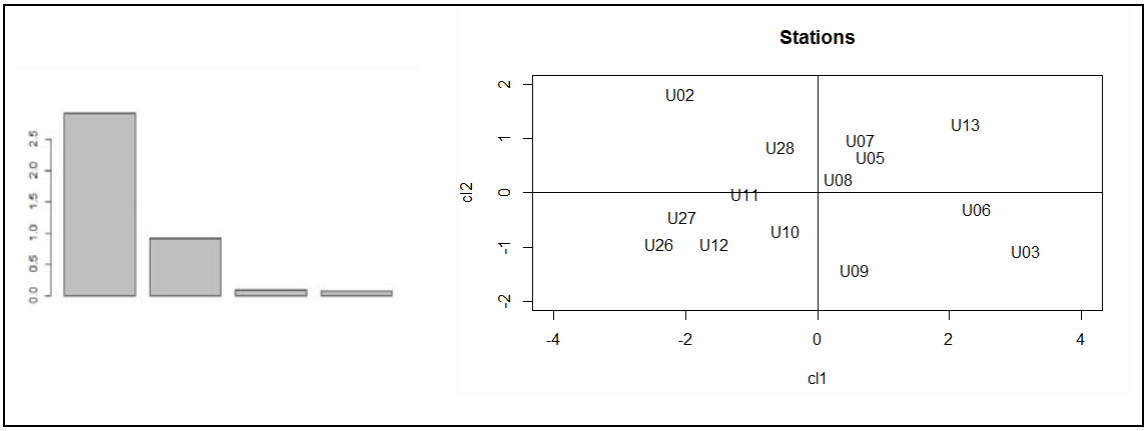


Figure 4 : ACP sur granulométrie < 4 µm

Ce deuxième groupe présente une proportion de particules < 4µm supérieure au premier, et dont la répartition dans la colonne sédimentaire est également étudiée à travers une ACP sur les données des 4 strates pour les stations concernées.

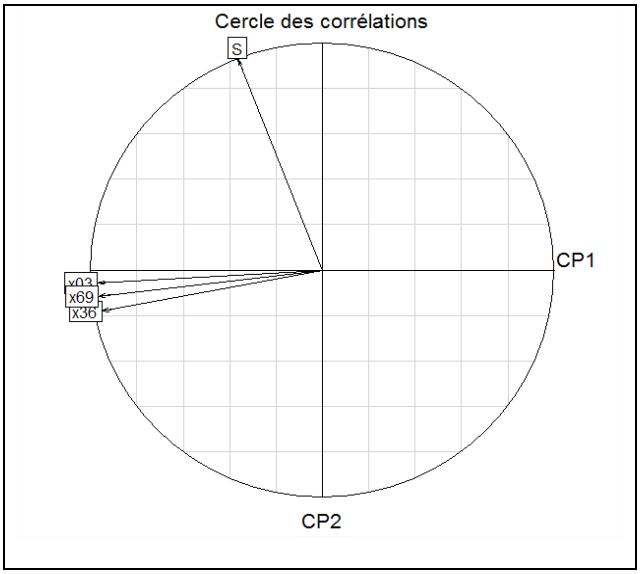


Figure 5 : ACP sur granulométrie < 4 µm - Cercle de corrélations

La représentation du cercle de corrélation sépare en outre clairement la strate de surface des autres, elle révèle le profil spécifique de ces stations (U10, U02, U11, U12, U26, U27 et U28), marqué par une proportion plus importante de particules très fines au niveau des strates inférieures.

Cette analyse se confirme par une analyse graphique des Annexes 7.2 et 7.3, où l'on remarque également une particularité de la station U11 : les particules comprises entre 4 et 10 µm sont largement dominantes à la surface.

Enfin, une analyse des droites de corrélation des médianes de granulométrie dans les différentes strates au sein de chaque station met en évidence que la granulométrie tend à s'épaissir depuis les horizons inférieurs vers l'interface (pentes des droites > 0).

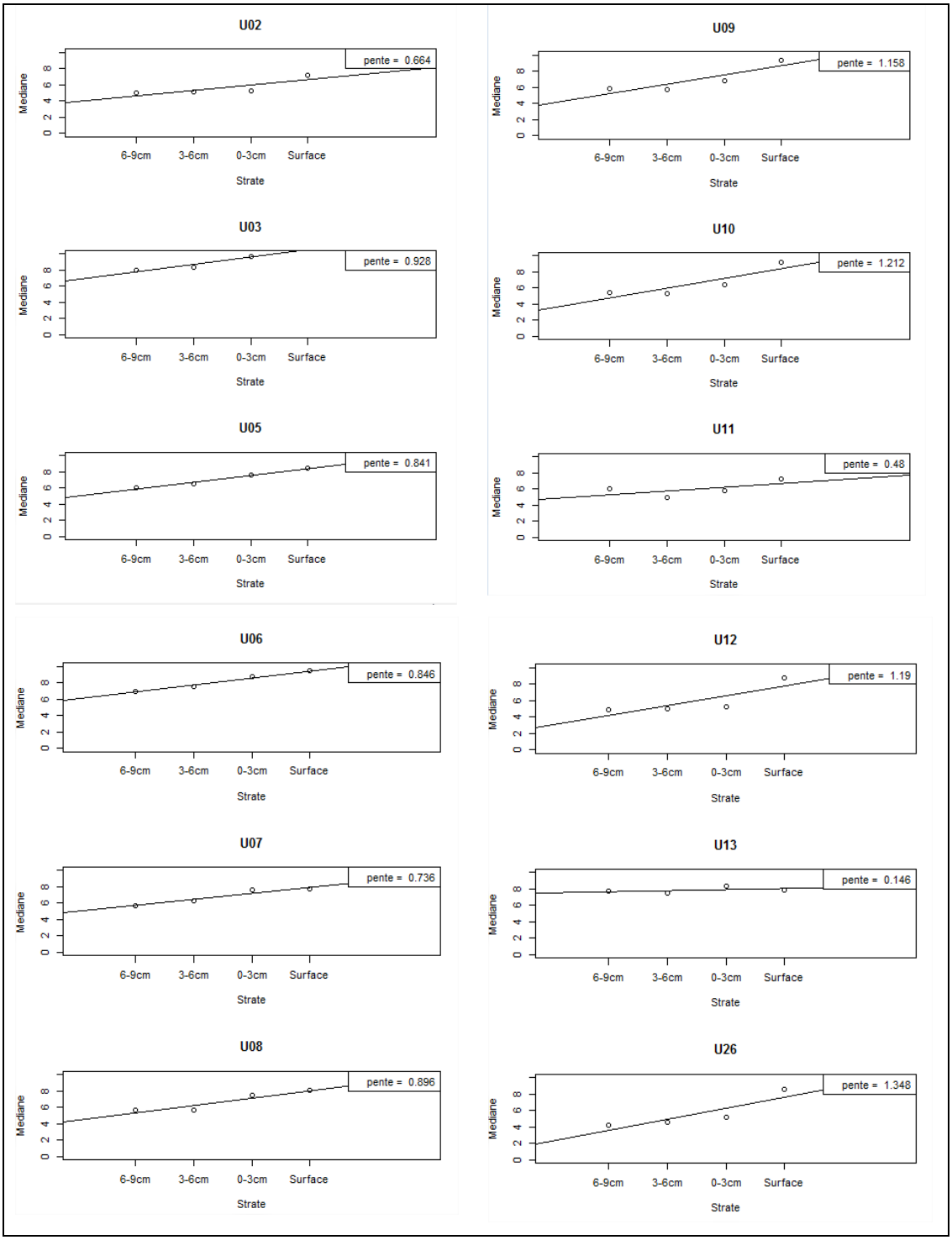


Figure 6 : Droites de corrélation des médianes de granulométrie par strate (et pente)

4.3.2 -Evolution spatiale de la granulométrie

Comme présenté précédemment (Cf. 2.2.4 -) les boues rouges contiennent de fortes proportions de particules très fines (< 1 µm). Un tel apport pourrait modifier de manière tangible la distribution granulométrique comme cela a été mis en évidence en 2002 aux stations U02, U03, U06, U07 et U12. Cependant, aucune station étudiée en 2012 ne présente de valeur remarquable de proportion inférieure à 1 µm, ni même 2 µm ou 4 µm, comme en témoignent les faibles valeurs d'écart-types calculés ci-dessous sur les données des différentes stations :

- la fraction inférieure à 1 µm constitue 3,9 % ± 0,5 % de la fraction inférieure à 2 mm ;
- la fraction inférieure à 2 µm représente, quant à elle, en moyenne 12,3 % ± 1,2 % de la fraction inférieure à 2 mm ;
- la fraction inférieure à 4 µm constitue en moyenne 25,7 % ± 2,4 % des particules constituant le sédiment en place et elle est maximale à la station U02 (31%).

On note toutefois, que dans le cadre du présent suivi, le laboratoire d'analyses n'a pas eu recours aux ultrasons. Il est donc possible que la fraction inférieure à 1 µm soit sous-estimée car les particules de cette taille sont agglomérées les unes aux autres. Ceci pourrait expliquer la dominance des particules comprises entre 4 et 10 µm notamment à la station U11 au niveau de laquelle s'accumulent les boues rouges sur plusieurs centimètres d'épaisseur.

En 2012, l'étude de la fraction inférieure à 10 µm permet en définitive la distinction de trois groupes de stations :

- U02 et U11 au niveau desquelles elle représente respectivement 61% et 64% ;
- U03, où elle constitue 48%. Cette plus faible valeur peut s'expliquer par la topographie (tête du canyon de Cassidaigne), non propice au dépôt des particules émanant du rejet, pourtant proche.
- les autres stations où elle constitue 54,9% ± 2,2%.

4.3.3 -Evolution spatio-temporelle de la granulométrie

Rappel sur le paysage sédimentaire en 1997

La paysage sédimentaire a été étudié en 1997 suite au traitement des sédiments prélevés par granulométrie laser et mise en œuvre de l'algorithme de calcul Fraunhofer. Pour rappel, l'utilisation de cet algorithme induit une sous-estimation des particules les plus-fines.

Il ressort néanmoins de cette analyse que :

- les sables grossiers (200 à 500 µm) sont abondants sur le plateau continental (U04, U15, U16 et U17) mais aussi au Sud-est de la zone d'étude (U11, U21 et U22).
- la présence des sables fins (50 à 200 µm) est marquée à la station U03 au Nord mais également aux stations situées au Sud-ouest de la zone d'étude (U09, U10, U19 et U20).
- les limons grossiers (20 à 50 µm) dominent les stations de bathymétrie intermédiaire dont la station de référence U13 (U13, U05, U06, U07, U08, U18) (Arnoux, 1991).

Rappel sur le paysage sédimentaire en 1999 et 2002

En 1999 et 2002, l'étude du paysage sédimentaire a été menée à partir de données granulométriques estimées par granulométrie laser et selon l'algorithme de calcul de Mie. Il s'avère que, sur l'ensemble des échantillons traités en 1999, la station 12, située dans le prolongement du canyon de Cassidaigne, est la plus révélatrice de l'impact des boues rouges et des modifications granulométriques qu'elles entraînent sur la distribution granulométrique dans la partie superficielle du dépôt (Arnoux et Stora, 2000). L'étude de 2002 révèle, à son tour, l'importance de la fraction très fine (0,4 µm) en surface à la station U06 et dans les 10 premiers centimètres de la station U12. Cette proportion de particules très fines est encore notable aux stations U02, U03 et U07 (Arnoux et Stora, 2003).

Paysage sédimentaire en 2012

L'étude la granulométrie en 2012 confirme que les stations situées en bordure immédiate du plateau continental ou à la tête du canyon de Cassidaigne (U03 et U04) sont caractérisées par un sédiment légèrement plus grossier qu'au niveau des autres stations (Annexes A7.4 et A7.5). A noter cependant, la disparition du matériel supérieur à 500 µm en U03 depuis 1997.

Plus largement, on observe une diminution notable et générale de la proportion des particules fines (< 4 µm) dans toutes les stations par rapport à 2002. Il s'agit là d'une observation visuelle (étude des courbes de granulométriques ci-dessous).

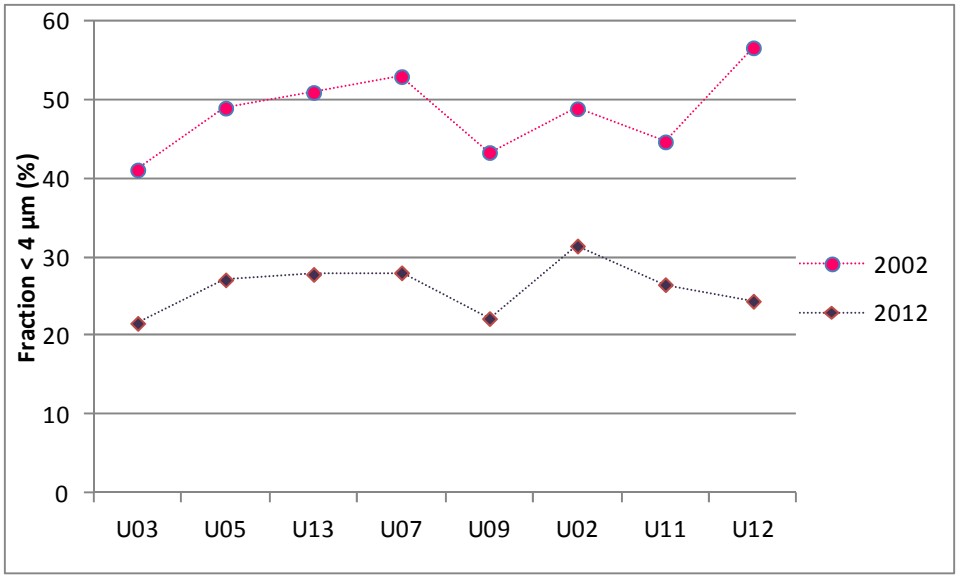


Figure 7 : Représentativité de la fraction < 4 µm

4.4 - Géochimie

Les données présentées en annexe (Annexe A8) ont été établies à partir des résultats des analyses des échantillons prélevés au sein des deux bennes et des échantillons représentant l'interface eau-sédiment, c'est-à-dire la partie devant faire apparaître logiquement l'influence éventuelle des boues rouges.

Une représentation graphique des données brutes des diverses substances métalliques recherchées dans la colonne sédimentaire est donnée en annexe (Annexes 8 - Profils de la répartition des concentrations sous forme de courbes empilées selon les deux méthodes d'analyses mise en œuvre, profils de la répartition des données brutes, profils de concentration mesurées en surface depuis 1997 par métal). Les données brutes mesurées en 2012 suite à une digestion partielle sont également représentées sur un fond cartographique. Concernant l'aluminium ce sont les données acquises suite à une attaque par fusion alcaline qui ont été cartographiées.

Enfin, tout comme pour la granulométrie, la similitude des concentrations en métaux mesurées dans la benne a et la benne b a été établie grâce à une étude statistique de la différence des valeurs des deux échantillons appariés, par substance. Les jeu de données ainsi formé, suivant une répartition normale avec un Kurtosis plus ou moins élevé, ont ensuite été soumis à des tests de conformité à une moyenne (égale à zéro dans ce cas) :

- tests de Student (Hypothèse Ho : « *moyenne=0* ») ;
- test de Wilcoxon (Hypothèse Ho : « *moyenne=0* »).

Le tableau ci-dessous présente les P-Value obtenues pour chaque élément étudié, et valide, compte tenu de leurs valeurs (P-Values > 0,05), l'Hypothèse Ho et donc la similitude des bennes.

Tableau VII : Résultats des tests statistiques sur les métaux

	Student p-value	Wilcoxon p-value
Aluminium	0,593722613	0,61091619
Chrome	0,172236631	0,098997139
Cuivre	0,192141608	0,249441108
Fer	0,558788822	0,316192738
Manganèse	0,245977225	0,534909475
Plomb	0,131212098	0,251428336
Titane	0,9013657	0,352040872
Vanadium	0,152998726	0,127056978

Il a, par conséquent, été choisi de présenter uniquement les données de la première benne remontée sur le pont (benne a).

4.4.1 -Aluminium

4.4.1.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

Les teneurs mesurées (fusion alcaline et eau régale) au niveau de la surface sont nettement supérieures à celles enregistrées dans les horizons inférieurs au sein des sédiments prélevés en U08 et U11. Cela se vérifie particulièrement avec la strate 0 – 3 cm qui possède un mode identique à la strate de surface en U08 et U11 (Annexe 8.2) et dont le profil est très proche de celui de la surface en U08. Cette observation sur U11 et U08 confirme l'interprétation des résultats de granulométrie et de colorimétrie concernant la forte présente de sédiments liés au rejet dans la zone.

Au niveau des autres stations, on ne peut établir un profil similaire de la répartition de l'aluminium.

4.4.1.2 - Répartition spatiale des concentrations

L'étude de la répartition spatiale des concentrations en aluminium suite à un mode de digestion partielle met en évidence trois groupes de stations :

- les stations de la zone bathyale (U26, U27 et U28) et dans une moindre mesure les stations de l'exutoire du système Marseille Planier (U11 et U12) au niveau desquelles les valeurs après normalisation par la fraction inférieure à 20 µm sont les plus faibles ;
- les stations situées à l'est de la zone des canyons (U05, U06, U13) qui se démarquent par des valeurs plus élevées.
- Les autres stations

4.4.1.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

Afin d'évaluer l'évolution spatio-temporelle des profils de concentrations, seules les données acquises par fusion alcaline en 2002 et 2012 seront étudiées car il s'agit des seules années pour lesquelles une même méthodologie de mise en solution a été utilisée.

Tableau VIII : Variances des concentrations entre strates

	2002	2012	évolution
U03	0,007	0,856	
U05	0,178	0,029	
U13	0,085	0,127	
U06	0,029	0,517	
U07	0,005	0,256	
U08	0,103	1,729	

La comparaison des profils de concentration permet de mettre en évidence ce qui suit :

- homogénéisation des concentrations entre les strates depuis 2002 en U05 (mise en évidence par le tableau d'évolution des variances des concentrations par strates ci-dessous entre 2002 et 2012). Les concentrations alors plus élevées dans les niveaux inférieurs sont en 2012 similaires à celle mesurée à la surface[3].
- conservation d'un même profil au niveau des stations U03, U06, U07 et U08.
- augmentation de la concentration à l'interface de la station U13.

Pour résumer, les profils de la répartition en aluminium (suite à une fusion alcaline) entre les strates ont peu évolué depuis 2002.

4.4.2 -Chrome total

4.4.2.1 - Evolution des concentrations dans la colonne sédimentaire

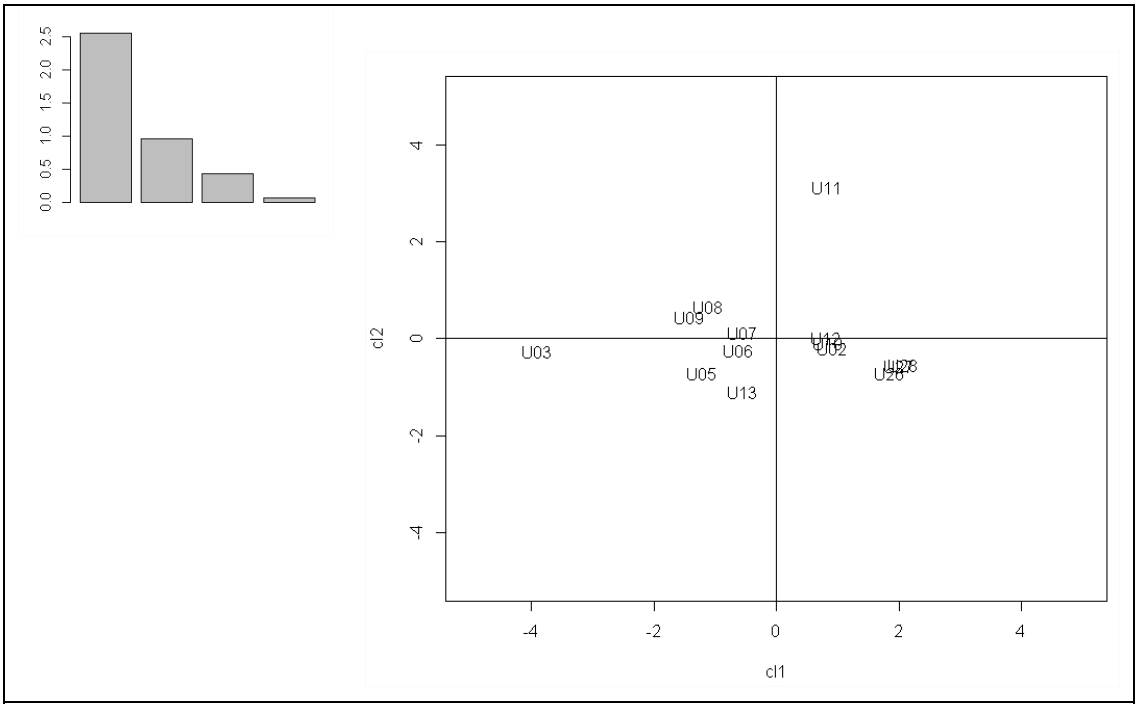


Figure 8 : ACP des données de concentration en chrome par strates et par station

[3] Il s'agit là d'une observation visuelle (étude des courbes de granulométriques) non appuyée de test statistique. Les données brutes de 2002 sont incomplètes, les classes granulométriques n'ont pas été définies avec précision (absence des tailles granulométriques).

Cette analyse permet de révéler plusieurs points :

- Le long de l'axe cl1 (horizontal), se distinguent, à l'opposé,
  - ✓ d'une part les stations U26, U27 et U28 ;
  - ✓ d'autre part la station U03, et dans une moindre mesure les stations U05, U08 et U09.

  Après analyse on attribue cette composante à la moyenne des valeurs des strates sous la surface, bien inférieure dans le premier groupe.

- Le long de l'axe cl2 (vertical), se distinguent, de part et d'autre de l'axe horizontal
  - ✓ la station U11 et dans une moindre mesure les stations U07, U08 et U09 ;
  - ✓ les autres stations.

  Après analyse des données, on attribue cette composante à l'homogénéité des valeurs dans la colonne sédimentaire. En effet, les stations du premier groupe se distinguent par des valeurs très élevées au sein de l'interface, en particulier au niveau de la station située à l'exutoire du canyon du Planier : U11.

4.4.2.2 - Evolution spatiale des concentrations

La répartition des concentrations normalisées par la fraction inférieure à 20 µm met en évidence ce qui suit :

- la valeur la plus importante et qui se distingue nettement des autres a été calculée pour la station U11 ;
- les valeurs sont croissantes depuis la tête de la branche Est du canyon du Planier (U06) vers l'aval (U09) (Annexe 8.2) ;
- les valeurs les plus faibles sont obtenues pour les stations de la zone bathyale (U26, U27 et U28).

4.4.2.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

Compte tenu de l'impossibilité de comparaison des valeurs de concentrations entre les différentes campagnes (présentée en 4.1 -Analyse comparée « matériel et méthode ») il a été choisi de comparer, entre les années, la pente des droites de régression formées par les valeurs de concentration par strate sur la fraction inférieure à 20 µm. Cette analyse porte principalement sur la comparaison des jeux de données de 1997 et de 2012, les données brutes de granulométrie n'étant pas disponibles pour 1991, 2002 et 2007.

Tableau IX : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en chrome total dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	8,98
U05	3,69	-	1,72
U13	17,52	-	-14,24
U06	2,49	-	8,53
U07	14,88	-	17,82
U08	34,28	-	36,35
U09	3,85	-	-4,02
U10	1,63	0,65	15,61
U02	-	107,05	13,28
U11	9,42	-	98,49

Bien que leur évolution au cours du temps ne soit pas linéaire, la comparaison des profils de concentration de chrome total (Tableau IX et Annexe 8.2) permet de mettre en évidence ce qui suit :

- la conservation d'un gradient de concentration dans la colonne similaire aux stations U05, U06, U07 et U08 entre 1997 et 2012.
- une distinction remarquable en 2012 de la valeur normalisée en chrome total à la surface de la station U11 et dans une moindre mesure aux stations U09 et U10. La concentration mesurée à la surface de la station U11 est devenue plus importante que celle mesurée dans les horizons inférieurs en 1997 et se caractérise par une valeur exceptionnellement plus élevée.
- une distinction de la valeur en U13 laquelle a baissée depuis 1997.

4.4.3 -Cuivre

4.4.3.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

La répartition du cuivre dans les différentes strates et les concentrations sont relativement homogènes. Une ACP permet de distinguer des groupes de stations :

- Le long de l'axe Cl1 on distingue les stations U08, U09 et U13 d'une part et les stations U06 et U26 d'autre part. On attribue cette composante aux différences entre les moyennes des valeurs dans les différentes strates.
- Le long de l'axe Cl2, on distingue principalement la station U11 dont le gradient de concentration vers la surface est le plus important.

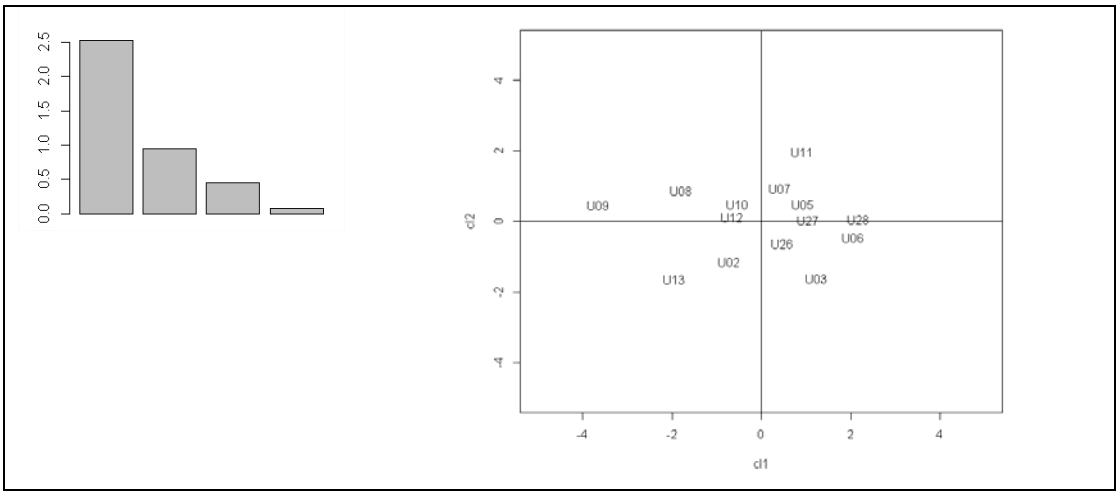


Figure 9 : ACP des données de concentration en cuivre par strates et par station

4.4.3.2 - Evolution spatiale des concentrations

La normalisation des données brutes de cuivre par la fraction inférieure à 20 µm met en évidence une contamination au cuivre plus importante au niveau du canyon du Planier et croissante des stations amont vers les stations aval (U07, U08 et U09). Les stations situées au nord de la plaine bathyale (U02, U11 et U12) se caractérisent par des données normalisées sensiblement identiques et plus élevées que celles obtenues au niveau des stations situées plus en retrait.

4.4.3.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

Tableau X : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en cuivre dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	-0,38
U05	1,62	-	2,17
U13	5,12	-	-0,57
U06	0,26	-	0,98
U07	1,26	-	2,22
U08	3,07	-	3,50
U09	1,41	-	1,36
U10	1,39	0,38	2,40
U02	-	2,98	0,29
U11	9,24	-	4,17

Bien que leur évolution au cours du temps ne soit pas linéaire, la comparaison des profils de concentration de cuivre, normalisée par la fraction inférieure à 20 µm, permet de mettre en évidence ce qui suit :

- la conservation d'un gradient de concentration dans la colonne similaire aux stations U05, U06, U07, U08, U09 et U10 entre 1997 et 2012.
- une distinction des stations U11 et U13 au niveau desquelles la pente de la concentration depuis la strate 6 – 9 cm vers l'interface a diminuée.

4.4.4 -Fer total

4.4.4.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

La répartition du fer total dans les différentes strates, étudiée à travers une ACP permet deux grandes observations :

Premièrement sur l'axe horizontal, se distinguent 3 groupes de stations fonction de la concentration moyenne sur la colonne sédimentaire, dans l'ordre décroissant :

- le canyon (U06, U07, U08 et U09) ;
- l'exutoire (U10, U02 et U12) ;
- la plaine bathyale (U26, U27 et U28).

Deuxièmement, sur l'axe vertical, se distinguent, selon l'écart de la concentration à l'interface avec le reste de la colonne sédimentaire :

- la station en bas du talus (U11) dont la valeur à l'interface est très supérieure au reste de la colonne ;
- la station de référence (U13) dont la valeur à l'interface est très inférieure au reste de la colonne.

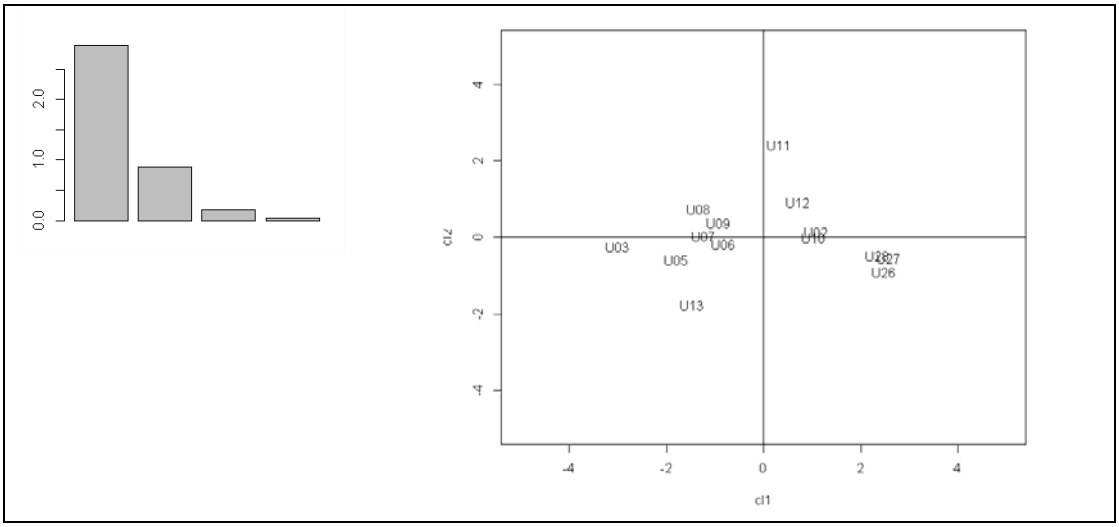


Figure 10 : ACP des données de concentration en fer par strates et par station

4.4.4.2 - Répartition spatiale des concentrations

La répartition spatiale des concentrations en fer total normalisées par la fraction inférieure à 20 µm met en évidence ce qui suit au niveau de l'interface:

- la valeur la plus importante et qui se distingue nettement des autres a été calculée pour la station U11 ;
- les valeurs sont homogènes au niveau des autres stations et les plus faibles teneurs sont obtenues pour les stations de la zone bathyale (U26, U27 et U28).

4.4.4.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

Compte tenu de l'impossibilité de comparaison des valeurs de concentrations entre les différentes campagnes (présentée en 4.1 -Analyse comparée « matériel et méthode ») il a été choisi de comparer, entre les années, la pente des droites de régression formées par les valeurs de concentration normalisée par la fraction inférieure à 20 µm par strate :

Tableau XI : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en fer total dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	0,24
U05	-0,31	-	-0,08
U13	0,26	-	-0,48
U06	0,12	-	0,21
U07	0,14	-	0,22
U08	0,69	-	0,65
U09	0,01	-	0,07
U10	0,01	-0,07	0,32
U02	-	0,28	0,38
U11	0,15	-	1,19

La comparaison des pentes normalisées de la concentration en fer total permet de mettre en évidence une nette augmentation du gradient de concentration vers la surface en U11. L'analyse graphique (Annexe 8.4) permet d'indiquer que la concentration en fer total mesurée à la surface de la station U11, normalisée par la fraction inférieure à 20 µm, est devenue se distingue nettement de celles mesurée dans les horizons inférieurs en 2012, comparativement à 1997, et se caractérise par une valeur exceptionnellement plus élevée. Dans une moindre mesure, la surface des stations U09 et U10 au bas du canyon du Planier semblent s'être enrichies au cours du temps.

4.4.5 -Manganèse

4.4.5.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

Les teneurs en manganèse dans les différentes strates sont plus homogènes que celles des autres substances recherchées. Certaines stations se distinguent cependant :

- U07 et U08 par ses valeurs élevées en particulier dans les strates intermédiaires et U03 par opposition avec des valeurs très faibles (axe horizontal) ;
- Et U05, comportant des valeurs plus élevées dans les 2 strates supérieures, par opposition à U08.

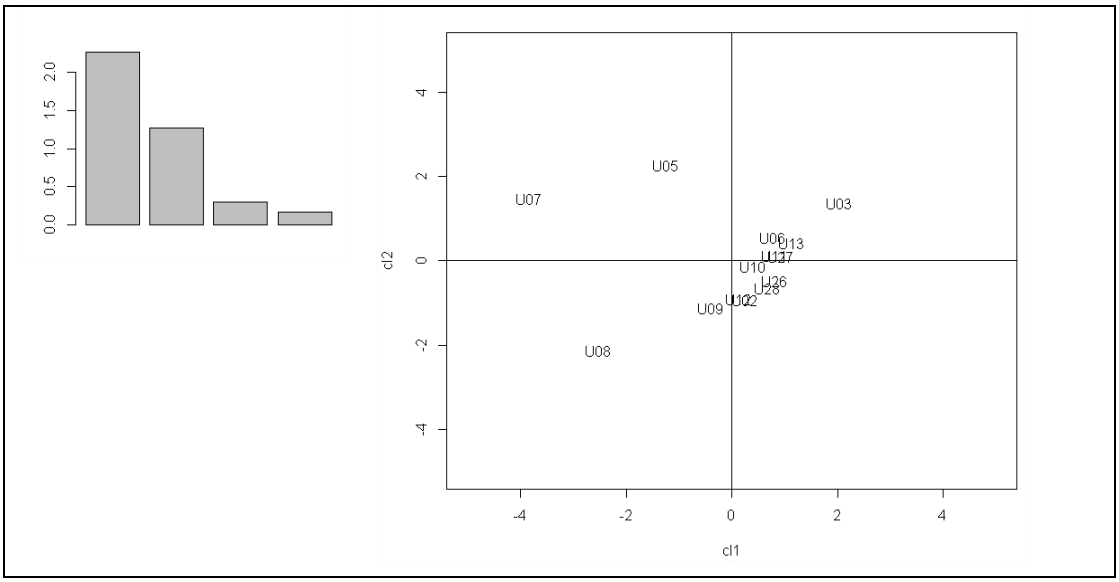


Figure 11 : ACP des données de concentration en manganèse par strates et par station

4.4.5.2 - Répartition spatiale des concentrations

Une normalisation des concentrations de manganèse de l'interface a été effectuée avec la fraction inférieure à 20 µm. Une représentation graphique des résultats de la normalisation est donnée en annexe (Annexe A8.5).

Les valeurs au sein de l'interface sont homogènes sur la zone d'étude avec toutefois des valeurs plus élevées en U05, U07 et U08.

4.4.5.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

Tableau XII : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en manganèse dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	159,98
U05	586,80	-	840,70
U13	1013,09	-	151,84
U06	226,18	-	194,11
U07	299,28	-	777,21
U08	-1418,15	-	-258,15
U09	-61,55	-	29,59
U10	-57,15	-136,00	100,18
U02	-	-27,64	14,72
U11	1060,59	-	128,86

La comparaison des pentes de concentration en manganèse permet de mettre en évidence ce qui suit :

- une diminution au cours du temps du gradient de concentration vers la surface en U11 et U13 ;
- une augmentation du gradient de concentration vers la surface en U05, U07 et U08 depuis 1997.

Pour résumer, les écarts de concentrations importants sur la colonne sédimentaire qui pouvaient être observés en 1997 tendent à diminuer. En revanche, les stations U08 et U07 se démarquent toujours par des profils atypiques avec des écarts de concentrations très importants sur la colonne sédimentaire. Les plus fortes teneurs ne sont pas mesurées au niveau de l'interface.

4.4.6 -Plomb

4.4.6.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

Les teneurs en plomb sont, le plus souvent, supérieures à la surface du sédiment par rapport aux strates inférieures en particulier à la station U08 où elle est deux fois plus élevée (Cf. Annexe 8.6).

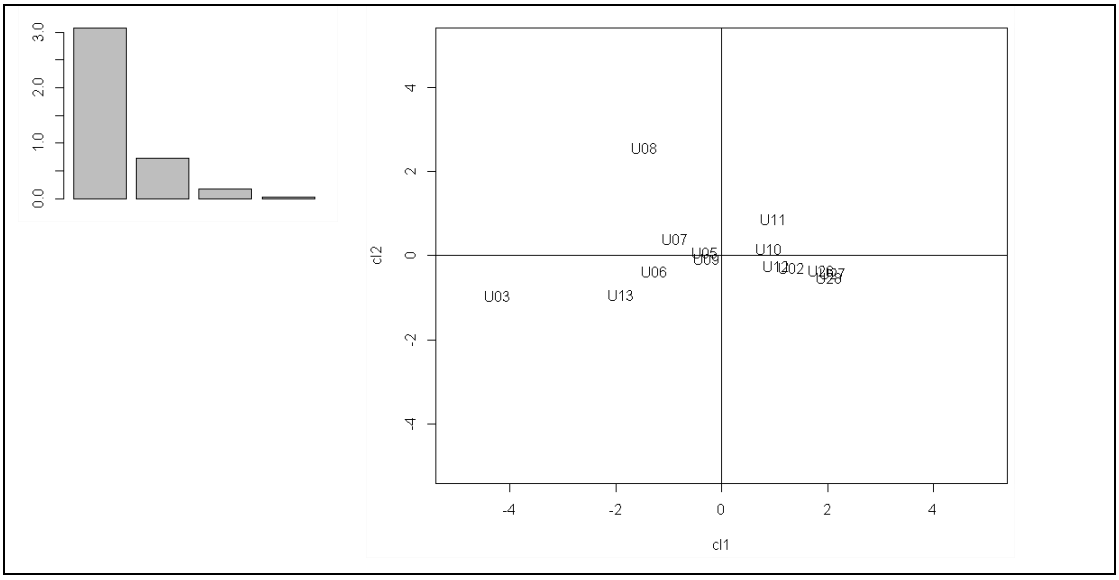


Figure 12 : ACP des données de concentration en Plomb par strates et par station

La répartition du Plomb dans les différentes strates et les concentrations normalisées par la fraction < 20 µm sont relativement homogènes. Une ACP permet de distinguer des groupes de stations :

- Le long de l'axe Cl1 on distingue principalement la station U03 dont la moyenne des concentrations dans la colonne est la plus importante.
- Le long de l'axe Cl2, on distingue principalement la station U08 dont le gradient de concentration vers la surface est le plus important.

4.4.6.2 - Répartition spatiale des concentrations

La répartition spatiale des concentrations de plomb normalisées par la fraction inférieure à 20 µm met en évidence que les valeurs les plus élevées sont obtenues pour les stations

U11, U08 et U07. Les valeurs sont homogènes au niveau des autres stations et les plus faibles aux stations de la zone bathyale (U26, U27 et U28).

4.4.6.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

La comparaison des pentes de concentration en plomb permet de mettre en évidence ce qui suit :

- une baisse du gradient de concentration vers la surface au niveau des stations U02, U06 et U13 depuis 1997 ;
- une augmentation du gradient de concentration vers la surface au niveau des stations U08 et U11.

Tableau XIII : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en plomb dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	-8,43
U05	8,98	-	10,13
U13	8,91	-	-1,79
U06	8,50	-	4,55
U07	13,26	-	11,68
U08	22,62	-	30,73
U09	6,58	-	2,00
U10	6,23	8,93	9,75
U02	-	13,53	5,51
U11	11,27	-	15,62

4.4.7 -Titane

4.4.7.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

L'ACP réalisée sur les concentrations en titane sur les différentes strates met en évidence ce qui suit :

- L'axe horizontal distingue les stations en fonction de leur teneur en titane dans les horizons inférieurs. La station U03 se distingue donc par la valeur moyenne la plus forte mais également pour chacune des valeurs prises individuellement.

- L'axe vertical distingue les stations en fonction de l'écart de la concentration à l'interface avec le reste de la colonne sédimentaire. La station en bas du talus (U11) se distingue des autres stations par une concentration à l'interface très supérieure au reste de la colonne.

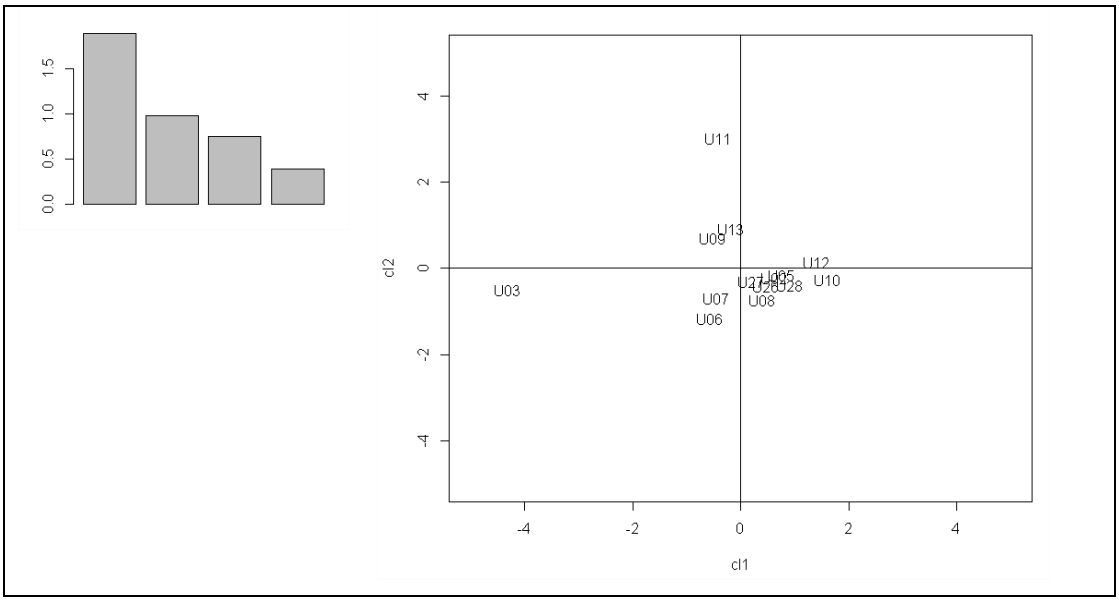


Figure 13 : ACP des données de concentration en titane par strates et par station

4.4.7.2 - Répartition spatiale des concentrations

Les valeurs de concentrations de titane normalisées par la fraction inférieure à 20 µm sont maximales à la station U11 et se distinguent, de nouveau, aux stations U13 (station de référence), U09 et U03.

4.4.7.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

La comparaison des profils de concentration en titane permet de mettre en évidence ce qui suit :

- une nette baisse du gradient de concentration vers la surface au niveau des stations U02, U06, U07 et U08 ;
- une augmentation du gradient de concentration vers la surface au niveau des stations U05, U09, U11 et U13.

Tableau XIV : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en titane dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	227,13
U05	24,69	-	77,96
U13	104,16	-	889,41
U06	73,07	-	3,99
U07	322,02	-	205,51
U08	1015,04	-	158,37
U09	37,38	-	383,32
U10	6,03	120,25	-86,29
U02	-	2160,33	127,27
U11	70,50	-	2428,75

Pour résumer, la concentration mesurée à la surface de la station U11 est devenue plus importante que celle mesurée dans les horizons inférieurs depuis 1997 et se caractérise par une valeur exceptionnellement plus élevée, apparaissant clairement sur le graphique ci-dessus. Par ailleurs, on remarque également l'enrichissement des stations U09 et U13 depuis 1997.

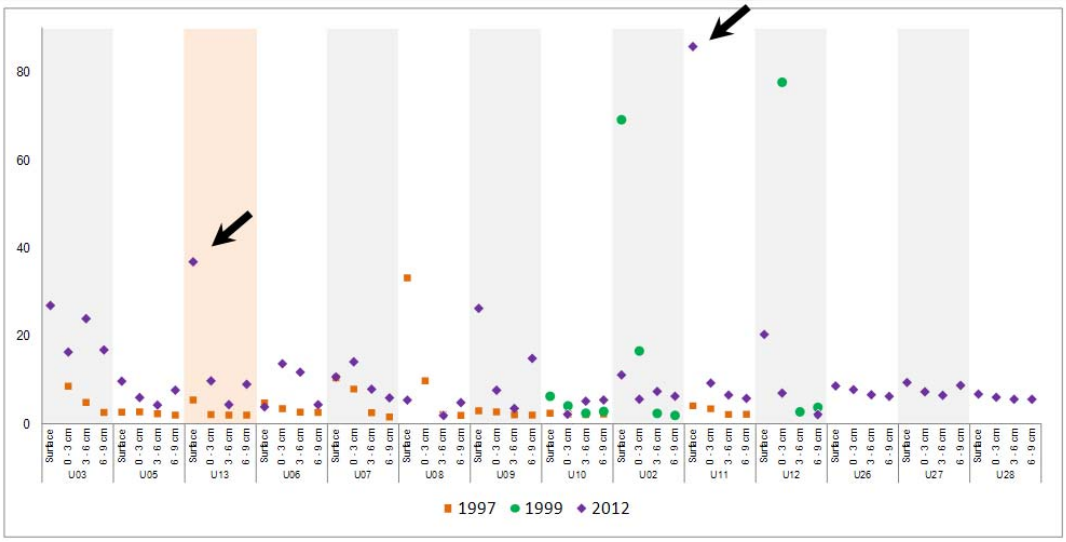


Figure 14 – Représentation graphique de la concentration en titane normalisée par la fraction inférieure à 20 µm (Années 1997, 1999 et 2012)

4.4.8 -Vanadium

4.4.8.1 - Evolution des concentrations au sein de la colonne sédimentaire

Les teneurs en vanadium sur la colonne sédimentaire d'une même station sont homogènes. Seule la station U11 se distingue par une concentration plus élevée dans la strate supérieure (axe vertical). L'axe horizontal met en évidence les stations de la plaine bathyale au sein desquelles les plus faibles concentrations en vanadium ont été mesurées dans les strates inférieures.

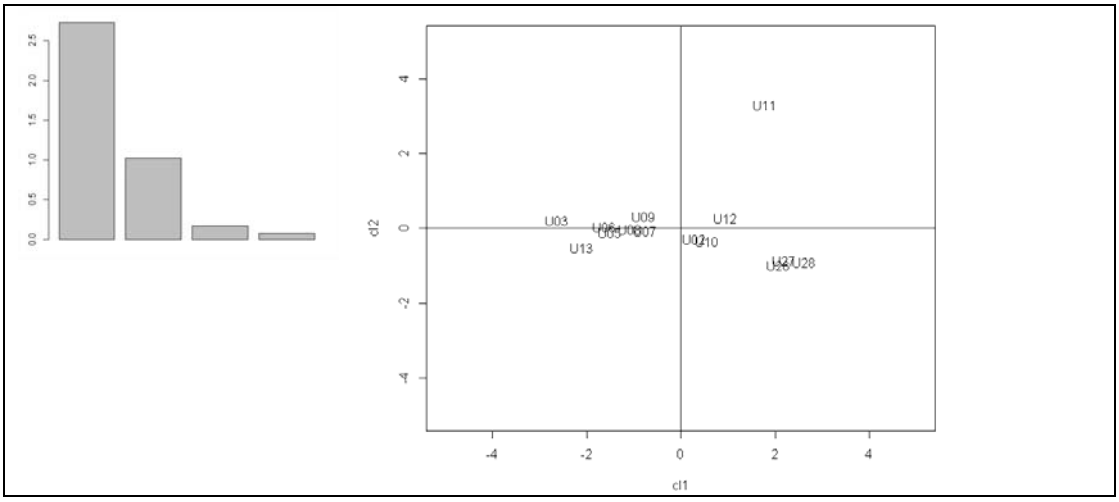


Figure 15 : ACP des données de concentration en vanadium par strates et par station

4.4.8.2 - Répartition spatiale des concentrations

Les valeurs de concentrations de vanadium normalisées par la fraction inférieure à 20 µm sont plus élevées à la station U11 et dans une moindre mesure aux stations U09 et U13.

4.4.8.3 - Evolution spatio-temporelle des concentrations

La comparaison des profils de concentration en vanadium permet de mettre en évidence ce qui suit :

- une baisse du gradient de concentration vers la surface à la station U02 ;
- une augmentation du gradient de concentration vers la surface à la station U11.

Tableau XV : Pentes normalisées de l'évolution de la concentration en vanadium dans la colonne sédimentaire depuis la strate 6 - 9 cm vers la surface

	1997	1999	2012
U03	-	-	4,14
U05	2,00	-	1,51
U13	8,89	-	-5,81
U06	0,73	-	2,93
U07	5,73	-	4,10
U08	14,94	-	4,72
U09	0,90	-	6,77
U10	0,10	5,78	3,49
U02	-	48,79	4,57
U11	5,57	-	55,78

En outre, l'analyse graphique (Annexe 8.8) révèle que la concentration mesurée à la surface de la station U11 est devenue plus importante que celle mesurée dans les horizons inférieurs depuis 1997 et se caractérise par une valeur exceptionnellement plus élevée.

5 - DISCUSSION

L'usine de Gardanne permet la fabrication d'alumine depuis 1893. Le procédé mis en œuvre génère une quantité importante d'effluent liquide rejeté en mer depuis 1966, dans le canyon de Cassidaigne. Les rejets en mer ont fortement diminué au cours du temps (diminution des rejets en 1990, 2000, 2012) et c'est donc sur un milieu ayant déjà reçu des apports massifs de résidus que le suivi de 2012 a été effectué.

Des études d'impact ont été effectuées à plusieurs reprises, et depuis la parution de l'arrêté d'autorisation de rejet en mer du 24 mai 1994, un suivi environnemental est réalisé tous les cinq ans afin de contrôler l'expansion et l'épaisseur des dépôts et résidus. Les divers suivis ont été réalisés en 1991, 1997, 1999, 2002, 2007 et 2012. Cependant, on déplore le manque de continuité dans les méthodes analytiques utilisées pour le dosage des métaux et pour la caractérisation de la granulométrie. Dans le cadre du présent suivi, le laboratoire d'analyses n'a pas eu recours aux ultrasons. Il est donc probable que la fraction inférieure à 1 µm soit sous-estimée car les particules de cette taille seraient agglomérées les unes aux autres. Par ailleurs, la comparaison des données brutes de métaux ne semble pas judicieuse dans le cas présent ; aussi, dans, le cadre de l'analyse spatio-temporelle, il a été préféré la comparaison des profils de la répartition des concentrations.

D'un point de vue général, les observations et analyses vont dans le sens de la diminution des indicateurs d'enrichissement métallique et de l'homogénéisation des valeurs au sein de la colonne sédimentaire et entre les stations.

Si les écarts observés en termes de granulométrie ou de géochimie sont moins francs entre les stations que lors des précédentes années, ils témoignent néanmoins des processus d'accumulation et de mobilisation des sédiments émanant du rejet. En effet, les analyses démontrent une présence accrue de boues rouges et de métaux associés non pas au niveau même du rejet mais au niveau des stations U07, U08, U09 et U11 principalement. Cela révèle non seulement une diminution des impacts directs des rejets au niveau des émissaires, où les analyses ne révèlent aucun écart, mais aussi un déplacement des matériaux émanant du rejet selon la morphologie du fond et la courantologie dans les canyons. On peut parler de glissement des matériels fluides déjà présent sur le fond, le long des parois des canyons. En effet, « les quantités énormes de résidus accumulés dans le site depuis la mise en service de l'émissaire peuvent faire l'objet de remaniements entrainant des effets sur l'ensemble du domaine concerné ». (Arnoux et Stora, 2003).

Ce constat est cependant contraire à celui formulé en 2002 par le Pr. Arnoux lequel mettait en évidence que « depuis la mise en application du programme de réduction du rejet des boues, le champ d'expansion des particules dans la zone du talus a été réduit, ce qui se traduit par une baisse des concentrations aux stations U07 et U08 et à un enrichissement des stations les plus proches du canyon U06 et U03. La station U11 située à l'exutoire du canyon de Cassidaigne se distingue en 2012 par une concentration en surface nettement supérieure au reste des stations pour plusieurs éléments : Titane, Vanadium, Fer et Chrome.

Enfin, la station U13, située à l'est du canyon de Cassidaigne se distingue quant à elle en 2012 par des concentrations de surface en titane supérieures voire très supérieures à celles mesurées dans les horizons inférieurs. Cette observation est singulière, car elle intervient au niveau de la station de référence, pourtant éloignée des rejets et des mobilisations de sédiments dans le canyon de Cassidaigne.

6 - LISTE DE REFERENCES

Arnoux A., 1992. Canyon de Cassidaigne – Etude de la composition chimique des sédiments – Campagne de prélèvements – 9-10 avril 1991. 12p. + Annexes

Arnoux A., 1999. Etude granulométrique et chimique des sédiments dans le secteur du canyon de Cassidaigne. Campagne ALPESUR 1997. 31p. + Annexes

Arnoux A., Stora G., 2000. Analyses granulométrique et chimique de 5 carottes de sédiments prélevées à la base du talus continental dans la zone de rejet des boues résiduaires de l'industrie de l'aluminium (Canyon de Cassidaigne). Campagne ALPECAST (Septembre – Novembre 1999). 19p. + Annexes

Arnoux A., Stora G., 2003. Analyses granulométrique et chimique de 5 carottes de sédiments prélevés à la base du talus continental dans la zone de rejet des boues résiduaires de l'industrie de l'aluminium (Canyon de Cassidaigne). Campagne ALPECAST 2 (Septembre – Octobre 2002). 25p. + Annexes

Fabri M.-C., Pedel L., Beuck L., Galgani F., Hebbeln D., Freiwald A., 2013. Megafauna of vulnerable marine ecosystems in French Mediterranean submarine canyons : Spatial distribution and anthropogenic impacts. *Sous presse.* 36 p.

Fontanier C., 2013. Rejets des résidus inertes de l'usine de Gardanne dans e canyon de Cassidaigne. Campagne de prélèvements « ALPEJAN 01 » 2012. Etude des communautés de foraminifères benthiques profonds. Rapport d'expertise – BIAF/LPGN/LUNAM. 21p. + Annexes

Garcia F., Arnoux A., Stora G., ND. Campagne ALCAN-PECHINEY 2007. Sédimentologie. 35p.

Ifremer, 2005. Surveillance du milieu marin. Travaux du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin. 48p.

Ifremer, Créocéan, 1992. Aluminium Pechiney. Rejets des boues rouges de l'usine de Gardanne dans le canyon de Cassidaigne (Bouches du Rhône). Rapport de travaux. Contrat n°91/121 1360. 18p. + annexes

Arnoux A., 1992. Canyon de Cassidaigne. Etude de la composition chimique des sédiments. Campagne de prélèvements 9 - 10 avril 1991.12p. + Annexes