



AGETIPA
Agence d'Exécution des Travaux d'Intérêt Public et d'Aménagement



REPUBLIKAN'I MADAGASIKARA
Fitiavana - Tanindrazana - Fandrosoana



Ces rapports ont été réalisés
avec l'appui financier
de l'Agence Française
de Développement
et de l'Union Européenne

Mission de Maîtrise d'œuvre pour le programme intégré d'assainissement d'Antananarivo (PIAA)

Tranche conditionnelle

Activité 6 : Diagnostic qualitatif et sectorisation thématique

Fascicule 3.1 : Thématique transversale

Caractérisation des boues de curage



Juin 2018



HYDROCONSEIL
Ingénieur-conseil : eau potable,
environnement, services publics



URBA
consulting | DÉVELOPPEMENT
URBAIN ET MUNICIPAL

	Mandataire : BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5
Cotraitants : 	 

Date de création du document	22 février 2018
Contact	David Fernandez

Titre du document	Tranche conditionnelle Activité 6 : Diagnostic qualitatif et sectorisation thématique Fascicule 3 : Activité transversale – Caractérisation des boues de curage
Référence du document :	A00011_PIAA_rapport_A6_fascicule3_curage
Indice :	B

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
22/02/2018	A	Document à intégrer au volet diagnostic – activité 6	Quentin Le Cam Franck Olivier	David Fernandez
11/04/2018	B	Document à intégrer au volet diagnostic – activité 6	Quentin Le Cam Franck Olivier	David Fernandez

MISSION DE MAITRISE D'ŒUVRE POUR LE PROGRAMME INTEGRE D'ASSAINISSEMENT D'ANTANANARIVO (PIAA)

Tranche conditionnelle Activité 6 : Diagnostic qualitatif et sectorisation thématique

Fascicule 3 : Activité transversale – Caractérisation des boues de curage

PREAMBULE	1
1. PROTOCOLE DES INVESTIGATIONS DE TERRAIN.....	3
1.1 Prélèvements des échantillons de sédiments	4
1.1.1 Sélection et zonage des points de prélèvement de sédiments	4
1.1.2 Méthodologie de prélèvement des échantillons	6
1.1.3 Types d'analyses	9
1.1.4 Détermination des valeurs seuils de référence pour l'analyse chimique	13
1.1.5 Notions de risques d'effets probables	16
1.2 Caractérisation des macrodéchets dans les produits de curage	17
1.2.1 Sélection et zonage des prises d'échantillons	17
1.2.2 Méthodologie de prélèvement	19
1.2.3 Méthodologie de caractérisation des sédiments et déchets en mélange	23
2. ETAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT SEDIMENTAIRE DU C3.....	29
2.1 Caractéristiques physiques	29
2.2 Caractéristiques chimiques	33
2.2.1 Evaluation des éléments traces métalliques dans les sédiments	33
2.2.2 Evaluation de la présence d'hydrocarbures	35
2.2.3 Evaluation des autres paramètres analysés	36
2.3 Risque d'effets probables	39
2.4 Synthèse	39

3. ETAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT SEDIMENTAIRE DU CANAL ANDRIANTANY ET DES OUVRAGES AFFERENTS	41
3.1 Caractéristiques physiques	41
3.1.1 Aspect des sédiments et matière organique	41
3.1.2 Evaluation du Carbone Organique	43
3.2 Caractéristiques chimiques	46
3.2.1 Evaluation des éléments traces métalliques (ETM) dans les sédiments	46
3.2.2 Evaluation de la présence d'hydrocarbures	49
3.2.3 Evaluation des autres paramètres analysés	50
3.3 Risque d'effets probables	53
3.4 Synthèse	54
4. CONCLUSION SUR L'ANALYSE SEDIMENTAIRE.....	55
4.1 Matière organique	55
4.2 Eléments traces métalliques	55
4.3 Hydrocarbures	55
4.4 Présences singulières en toluène	56
4.5 Dioxines et Furanes	56
4.6 Pesticides et autres polluants analysés	56
5. CARACTERISTIQUES DES MACRODECHETS DANS LES BOUES DE CURAGES	57
5.1 Evaluation de la présence de macrodéchets	57
5.2 Composition des macrodéchets	58
5.3 Evaluation de l'impact de la typologie et du canal	60
5.3.1 Résultats par canaux	60
5.3.2 Résultats par typologie de présence de déchets	61
5.4 Extrapolation au linéaire total des canaux C3 et Andriantany	63
5.5 Évaluation de la composition des déchets flottants	65
5.6 Synthèse	67
6. ANALYSE DES ALTERNATIVES DE GESTION DES SEDIMENTS	69
6.1 Présentation des alternatives étudiées	69
6.2 Alternative « E1 » : Valorisation matière	69
6.3 Alternative « E2 » : Incinération	70
6.4 Alternative « E3 » : Stockage des déchets au sein de la décharge d'Andralanitra	70
6.5 Alternative « E4 » : Stockage sur un autre site	71

6.6	Alternative « E5 » : Stockage dans la plaine et gestion des lixiviats en circuit fermé avec retour dans le milieu originel	72
6.7	Alternative « E6 » : Prétraitement dans la plaine et traitement différencié des matières triées	73
6.8	Synthèse de l'analyse des alternatives	73

ANNEXES..... 75

ANNEXE 1.	Liste des analyses réalisées dans le cadre de projets analogues et/ou de projets de recherche	77
ANNEXE 2.	Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements du C3 – Octobre 2017	81
ANNEXE 3.	Résultats des analyses sur les sédiment du C3 – Octobre 2017	83
ANNEXE 4.	Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements de l'Andriantany-Canal de la Vallée de l'Est- marais Masay-Lac Anosy – Décembre 2017	91
ANNEXE 5.	Résultats des analyses sur les sédiment de l'Andriantany-Canal de la Vallée de l'Est- marais Masay-Lac Anosy – Octobre 2017	93
ANNEXE 6.	Planches photographie sur les échantillons de sédiments prélevés sur le C3 – Octobre 2017	103
ANNEXE 7.	Planches photographie sur les échantillons de sédiments prélevés sur l'Andriantany-Canal de la Vallée de l'Est-Marais Masay-Lac Anosy – Décembre 2017	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Exemples de points de rejets d'eaux usées au sein du canal C3 aux point 8A (a) et 11A (b)	4
Figure 2. Exemple de points d'arrivée d'eaux usées sur l'Adriantany pour les points 9B (a) et 16B (b)	4
Figure 3. Exemple d'accumulation de déchets ménagers au sein du canal C3 Point 9A (a) et point 12A (b)	5
Figure 4. Présence de déchets solides au niveau du point 3B sur l'Adriantany (a) et en amont du point 12B sur le canal de la Vallée de l'Est (b)	5
Figure 5. Illustration du mode de prélèvement des échantillons des sédiments lors de la campagne de prélèvement d'octobre 2017 (3A - 7A - 11A- 13A).....	7
Figure 6. Illustration du mode de prélèvement des échantillons de sédiments lors de la campagne de prélèvement de décembre 2017 (points 3B-8B-10B)	8
Figure 7. Cartographie des types d'analyses effectuées sur les échantillons issus du canal C3.....	10
Figure 8. Cartographie des types d'analyses effectuées sur les échantillons issus du canal Andriantany, du marais Masay et du lac Anosy	12
Figure 9. Répartition géographique et par typologie des échantillons de sédiments et déchets caractérisés	19
Figure 10. Prélèvement S1 au niveau de la Gare Soanierana le 12/12/17 à gauche et essai de prélèvement à la pelle mécanique (point S3 : Bacs Café- Mihaja) le soir du 13/12/2017	20
Figure 11. Fût et cordage utilisés pour réaliser les prélèvements de sédiments.....	21
Figure 12. Méthode d'échantillonnage mise en place pour les échantillons S4 à S14.....	22
Figure 13. Exemples d'encombrants présents dans les sédiments.....	23
Figure 14. Etapes de tri des macrodéchets en mélange avec les sédiments.....	24
Figure 15. Tri des échantillons de déchets flottants.....	24
Figure 16. Coupe longitudinale du canal Andriantany avec indication de la position des bouches d'égout.....	26
Figure 17. Teneur en eau et taux de MO moyenne par famille de prélèvement	29
Figure 18. Classification et distribution des échantillons selon leur aspect, teneur en eau et MO	30
Figure 19. Cartographie des analyses des ETM sur échantillon brut	34
Figure 20. Cartographie des analyses des ETM sur fraction solubilisée	34
Figure 21. Carte de répartition des hydrocarbures dans les sédiments analysés	35
Figure 22. Carte de répartition des BTEX dans les échantillons de sédiments analysés.....	37
Figure 23. Représentation du risque d'effets probables par échantillon de sédiments analysés.....	39
Figure 24. Teneur en eau et taux de MO moyenne pour chaque famille de prélèvement.....	41
Figure 25- Classification et distribution des échantillons selon leur aspect, teneur en eau et MO	42
Figure 26. Répartition des échantillons suivant leur teneur en COT	43
Figure 27. Sorties et conduites de rejets d'eaux provenant de l'atelier de feronnerie	47
Figure 28. Cartographie des analyses des ETM sur échantillon brut	47
Figure 29. Cartographie des analyses des ETM sur fraction solubilisée	48
Figure 30. Carte de répartition des hydrocarbures dans les sédiments analysés	50
Figure 31. Traces potentielles d'hydrocarbures en surface au niveau du canal Est	50

Figure 32. Carte de répartition des BTEX dans les échantillons de sédiments analysés.....	51
Figure 33. Représentation du risque d'effets probables par échantillon de sédiments analysés.....	53
Figure 34. Localisation des points de prélèvements autour du déversoir de Ramandraibe.....	55
Figure 35. Localisation des points de prélèvements autour du déversoir de Ramandraibe.....	56
Figure 36. Composition globale des produits de curage.....	57
Figure 37. Composition moyenne des déchets contenus dans les produits de curage et intervalles de confiance	58
Figure 38. Répartition des catégories de macrodéchets caractérisés	58
Figure 39. Exemples de déchets textiles	59
Figure 40. Exemples de déchets plastiques	59
Figure 41. Exemple de déchets combustibles	59
Figure 42. Composition des produits de curage caractérisés par canal.....	60
Figure 43. Composition moyenne des déchets contenus dans les produits de curage et intervalles de confiance	61
Figure 44. Composition des produits de curage caractérisés suivant la présence de déchets anthropiques	62
Figure 45. Composition moyenne des déchets contenus dans les sédiments et intervalles de confiance.....	62
Figure 46. Cartographie des tronçon et sous tronçon de l'Andriantany.....	63
Figure 47. Composition moyenne des déchets flottants caractérisées	65
Figure 48. Composition moyenne des déchets flottants caractérisés.....	66
Figure 49. Déchets flottants à Tsena Madera et au pont de Soeur Tsaramasay sur l'Andriantany	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Quantités effectuées dans cette mission par type de prestation	1
Tableau 2. Critères utilisés pour la sélection des prélèvements	5
Tableau 3. Grille d'analyse C3	9
Tableau 4. Grille d'analyse Andriantany.....	11
Tableau 5. Identification des valeurs seuils réglementaires	13
Tableau 6. Valeurs guides pour les dioxines dans quelques pays	14
Tableau 7. Valeurs guides pour la 2,3,7,8-TCDD aux Etats-Unis.....	14
Tableau 8. Valeurs des coefficients PEC proposés par McDonald et al. (2000) en mg/kg de matière sèche.	16
Tableau 9. Plan d'échantillonnage des caractérisations	18
Tableau 10. Grille de tri	25
Tableau 11. Apport annuels par tronçon (Extrait du rapport sur l'érosion des canaux).....	27
Tableau 12. Résultats des analyses matière sur les échantillons de sédiments du canal C3.....	32
Tableau 13. Résultats d'analyses des pesticides dans les sédiments	37
Tableau 14. Paramètres physiques des échantillons prélevés dans le canal Andriantany et secteurs afférents	45
Tableau 15. Répartition du linéaire par portion de tronçon de canal	64
Tableau 16. Estimations massiques et volumétriques des produits de curage de l'Andriantany	64
Tableau 17. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements du C3.....	81
Tableau 18. Résultats des analyses sur les ETM dans les échantillons bruts du C3.....	83
Tableau 19. Résultats des analyses sur les ETM après lixiviation du C3.....	84
Tableau 20. Résultats sur les analyses des hydrocarbures sur le C3.....	85
Tableau 21. Résultats des analyses des BTEX et aromatiques dans les échantillons de sédiments du C3.....	86
Tableau 22. Résultats des analyses des pesticides et dioxines-furanes sur le sédiments du C3.....	87
Tableau 23. Résultats des analyses des COHV, HAP, PCB sur les sédiments du C3	88
Tableau 24. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements de l'Andriantany- Canal Est-lac Masay-Lac Anosy.....	91
Tableau 25. Résultats des analyses sur les ETM dans les échantillons bruts de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	93
Tableau 26. Résultats des analyses sur les ETM après lixiviation des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	94
Tableau 27. Résultats sur les analyses des hydrocarbures des échantillons de l'Andriantany- Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	95
Tableau 28. Résultats des analyses des BTEX et aromatiques dans les échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	96
Tableau 29. Résultats des analyses des dioxines-furanes sur le sédiments de l'Andriantany- Canal Est-lac Masay-Lac Anosy.....	97
Tableau 30. Résultats des analyses des HAP sur les sédiments des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	98
Tableau 31. Résultats des analyses des COHV sur les sédiments des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	99
Tableau 32. Résultats des analyses des PCB sur les sédiments des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy.....	101

PREAMBULE

Dans le cadre de l'activité 6 de la tranche conditionnelle d'élaboration du schéma directeur d'assainissement d'Antananarivo, le diagnostic de la gestion des déchets solides au voisinage des principaux ouvrages hydrauliques (Andriantany, canal C3, Lac Masay et Lac Anosibe) est indispensable.

C'est pourquoi, l'étude de caractérisation des sédiments présents en fond d'ouvrage et limitant les écoulements hydrauliques est nécessaire, autant d'un point de vue physique que pour l'évaluation de leur potentiel polluant ainsi que de la part de macrodéchets présents.

Une campagne de prélèvements de 33 échantillons représentatifs des futurs matériaux de curage a été réalisée à l'occasion de deux campagnes d'investigation de terrain en octobre et décembre 2017, en vue de la détermination des caractéristiques physiques et chimiques des matériaux présents. Les analyses ont été interprétées à la lumière de référentiels de qualité s'appliquant selon les cas aux sédiments, aux déchets inertes, aux sols pollués et aux sols en général.

De plus, 14 échantillons de masses plus importantes ont été prélevés pour quantifier et qualifier la présence de macrodéchets au sein de ces matériaux. La caractérisation de 3 échantillons de déchets flottants est venue compléter la qualification des déchets solides présents au niveau des ouvrages d'assainissement.

L'ensemble de ces prélèvements ont été réalisés le long du canal C3 à partir du Lac Anosibe et de l'Andriantany depuis la Gare Soanierana jusqu'à leur jonction à l'aval (au niveau du pont Andrano Roasosona), le long du canal de la vallée de l'Est et enfin dans les lac Masay et Anosy.

L'objectif de ces analyses est d'évaluer quelles sont les alternatives envisageables pour la gestion de ces matériaux. La présente note s'attache à les présenter afin de faciliter la prise de décisions des acteurs du projet. Le Tableau 1 ci-après référence les quantités qui étaient prévus dans le cadre du projet PIAA et les quantités réellement effectuées.

Tableau 1. Quantités effectuées dans cette mission par type de prestation

Type d'analyse	Quantités	Prévu dans le PIAA	Réalisé
Caractérisation des déchets solides dans les sédiments	Nombre d'échantillons	10	14 (8 sur Andriantany, 4 sur C3 et 2 sur le canal Est à la demande de l'AGETIPA)
	Masse d'un échantillon	50 kg	109 kg [60 - 214 kg]
Caractérisation des déchets flottants	Nombre d'échantillons	0 (non prévu au marché)	3 échantillons
Evaluation de la qualité des sédiments	Nombre d'échantillons	3 échantillons par canaux	12 échantillons sur l'Andriantany, 5 sur les lacs et le canal Est + 15 sur le C3 (coûts supportés par le projet PRODUIR pour ce dernier canal)

1. PROTOCOLE DES INVESTIGATIONS DE TERRAIN

Dans le cadre du volet « déchets solides » du projet PIAA, il nous est apparu indispensable d'étudier conjointement l'état et la composition des sédiments de l'Andriantany et du canal C3, qui constituent les deux principaux ouvrages d'assainissement d'Antananarivo. En effet, le fait de traiter conjointement les résultats de l'ensemble des analyses réalisées nous a permis d'enrichir les conclusions du présent rapport.

Des prélèvements et des analyses physico chimique ayant déjà été effectués sur les sédiments et boues de curage du canal C3 en octobre 2017 dans le cadre du projet PRODUIR, les résultats de ces mesures ont été reprises dans le présent rapport.

Dans le texte qui suit, les points numérotés 1,2,...**A** font référence aux échantillons de sédiments du canal C3 prélevés en octobre 2017 dans le cadre du projet PRODUIR ; les points numérotés 1,2,...**B** font référence aux échantillons de sédiments du canal Andriantany, du Canal Est et du Lac Masay prélevés en décembre 2017.

Des références aux analyses faites dans le cadre du PRODUIR sont intégrées dans les sections suivantes :

- § 1.1.1. : la sélection des points de prélèvement des sédiments dans le cadre du PRODUIR et du PIAA suivant la même méthodologie, cette section reprend et complète celle déjà présentée dans le PRODUIR.
- § 1.1.2. : de même, la méthodologie de prélèvement des échantillons étant similaire pour les deux campagnes, elle est reprise du PRODUIR et complétée dans cette section
- § 1.1.3.1 : cette section précise les types d'analyses effectuées lors de la campagne d'octobre 2017 dans le cadre du PRODUIR.
- § 1.1.4. : dans le but de pouvoir comparer et analyser les résultats du PRODUIR et du PIAA, les mêmes valeurs seuil de référence ont été retenues dans les deux études : elles sont présentées dans cette section
- § 1. : cette section reprend et complète l'ensemble des résultats des analyses du PRODUIR faites sur les sédiments du C3. La notion de risque d'effet probable a été ajoutée.

1.1 PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS DE SEDIMENTS

1.1.1 Sélection et zonage des points de prélèvement de sédiments

Sur l'ensemble du linéaire de l'Andriantany depuis sa séparation avec le GR et du C3 depuis le lac Anosibe, jusqu'à leur jonction à l'aval (au niveau du pont Andrano Roasosona), dans le lac Anosy, ainsi qu'au niveau du canal Est et du Lac Masay, 33 échantillons au total ont été recueillis. Ces 33 échantillons, numérotés 1A-16A et 1B-17B, représentent une large diversité de situations, à la fois en termes de milieu et de sources potentielles de pollution. En dehors de l'accessibilité, les critères considérés pour la sélection des zones de prélèvement ont été les suivants :

- Type de milieu : urbain / semi-urbain / rural / lac / industriel
- Apports latéraux d'eaux usées (EU) issues de secteurs résidentiels, commerciaux et industriels ou encore mixte



Figure 1. Exemples de points de rejets d'eaux usées au sein du canal C3 aux point 8A (a) et 11A (b)

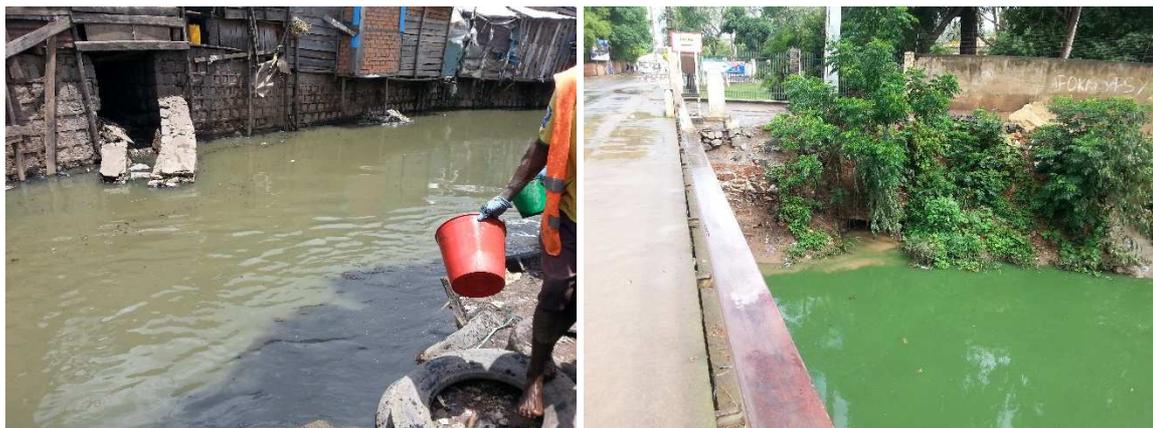


Figure 2. Exemple de points d'arrivée d'eaux usées sur l'Andriantany pour les points 9B (a) et 16B (b)

- Présence de dépôts de déchets solides en amont ou de dépôts limitant l'écoulement des eaux en aval



Figure 3. Exemple d'accumulation de déchets ménagers au sein du canal C3 Point 9A (a) et point 12A (b)



Figure 4. Présence de déchets solides au niveau du point 3B sur l'Andriantany (a) et en amont du point 12B sur le canal de la Vallée de l'Est (b)

- Présence de jacinthes d'eau en surface

Le Tableau 2 ci-après résume les critères étudiés (de manière individuelle ou croisée) par le biais des 33 prélèvements.

Tableau 2. Critères utilisés pour la sélection des prélèvements

Paramètres	Résultats de l'échantillonnage retenu	
Canal	C3	Andriantany et ouvrages voisins
Echantillons	1-16A	1-17B
Milieu	<ul style="list-style-type: none"> - 7 secteurs urbains - 5 secteurs semi-urbains - 2 secteurs ruraux-industriels - 2 secteurs « lac » - 1 secteur rural 	<ul style="list-style-type: none"> - 11 secteurs urbains - 2 secteurs semi-urbains - 3 secteurs ruraux

Paramètres	Résultats de l'échantillonnage retenu	
Vitesse d'écoulement de l'eau	Très majoritairement lente à cette saison Écoulement plus rapide au niveau du point de prélèvement 9B car la largeur du canal est plus étroite	Très majoritairement lente à cette saison Écoulement plus rapide au niveau du déversoir C3 et en aval proche
Apports latéraux d'eaux usées (EU)	7 zones de prélèvements en aval immédiat de réseaux d'eaux usées	7 zones de prélèvements en aval de réseaux d'eaux usées (dont 1 zone industrielle et commerciale)
Dépôts / accumulation de déchets solides	13 zones avec accumulation de déchets en amont/au niveau du point de prélèvement	10 zones avec accumulation de déchets en amont ou au niveau du point de prélèvement
Jacinthes d'eau (cresson)	7 zones concernées par la présence de jacinthes d'eau (surtout Maray Masay et aval de l'Andriantany)	4 zones concernées par la présence de jacinthes d'eau
Profondeur en eau	Globalement assez faible sur les bords (< 1 m) sauf en amont sur le tronçon en cours de curage par la CUA Plus profond au milieu du canal sur certains secteurs	Partout faible en octobre (< 80 cm)

Le ANNEXE 2. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements du C3 – Octobre 2017

Tableau 17 et le Tableau 24, en annexe détaillent les caractéristiques principales propres à chaque zone de prélèvement. En outre, des planches photographiques de chaque matériau prélevé sont jointes en Annexe.

1.1.2 Méthodologie de prélèvement des échantillons

Les prélèvements de sédiments ont été effectués de manière à récupérer des échantillons représentatifs des matières solides présentes en fond de canal. Pour cela, des prélèvements ont été effectués à l'aide de pelles à main et de seaux en 2 à 3 points le long du transect du canal (Figure 5 et Figure 6) puis ont été homogénéisés et quartés de manière à récupérer des échantillons le plus représentatif possible des canaux en un point donné.



Figure 5. Illustration du mode de prélèvement des échantillons des sédiments lors de la campagne de prélèvement d'octobre 2017 (3A - 7A - 11A- 13A)



Figure 6. Illustration du mode de prélèvement des échantillons de sédiments lors de la campagne de prélèvement de décembre 2017 (points 3B-8B-10B)

En termes de profondeur de prélèvement, la littérature scientifique indique notamment pour les métaux lourds une concentration maximum dans l'horizon de surface (sur 20 à 40 cm). A défaut de représenter la concentration moyenne en substances indésirables sur toute la profondeur du canal, le fait d'avoir prélevé des échantillons de sédiments (par des moyens légers) sur une profondeur de 20 à 30 cm garantit de ne pas sous-estimer la concentration en polluants. Certes, cela va dans le sens d'une évaluation légèrement majorée. Toutefois, les curages qui seront réalisés au sein des canaux vont cibler en priorité les horizons superficiels de matières solides, l'objectif n'étant pas de surcreuser artificiellement ces derniers. De plus, la méthodologie retenue assure de ne pas sous-estimer les risques (approche sécuritaire).

1.1.3 Types d'analyses

Les résultats des analyses réalisées en 2016 (sur des produits de curage issus du canal Andriantany) ont indiqué des dépassements en métaux (notamment pour le zinc et le plomb), qui peuvent résulter d'activités anthropiques (piles et batteries, entretien automobile, stations de carburant, ...). Un suivi systématique de ces substances a donc été retenu dans le cadre des campagnes de prélèvements de 2017, incluant des analyses à la fois sur matière brute et par essais de lixiviation.

1.1.3.1 Analyses réalisées sur le canal C3 et Lac Anosibe (Octobre 2017)

La grille d'analyse suivante a été retenue pour un total de 16 prélèvements, dont 8 soumis aux analyses de type 2 et 2 aux analyses de type 3 et 4 de type 4 :

Tableau 3. Grille d'analyse C3

Groupe d'analyses ¹	Analyses systématiques	Analyses non systématiques		
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
1. Analyses physiques / MOT	✓			
2. Métaux (analyses sur matrice brute)	✓			
2bis. Métaux (analyses par lixiviation)	✓			
3. PCB		✓		
4. Pesticides (POC, POP, POA) ²			✓	
5. HAP		✓		
6. BTEX		✓		
7. COHV		✓		
8. Hydrocarbures		✓		
9. Dioxines de furanes			✓	
10. Analyses géotechniques				✓
Nombre d'analyses proposées (à confirmer)	16	8	2	4
Fréquence proposée (rapportée à l'ensemble des prélèvements)	100 %	50 %	12,5 %	25 %
Laboratoires réalisant les analyses	Wessling	Wessling	Eurofins	Ginger CEBTP

¹ Cf. liste des analyses envisagées en Annexe

² Molécules les plus commercialisées incluses (pas la totalité des pesticides répertoriés en Annexe)

Les substances de type 2 (a priori moins présentes au vu des premiers résultats du PIAA) ont été analysées dans 50 % des analyses, avec une attention particulière sur les secteurs les plus urbanisés avec concentration de déchets solides et apports d'eaux usées en amont du canal.

Dans le cas des pesticides (POC, POP et POA) (analyses de type 3), une analyse exhaustive des substances du tableau joint en Annexe n'était pas envisageable compte tenu des coûts très élevés afférents à ce type d'analyses.

Aussi, l'analyse s'est concentrée (pour 2 échantillons issus de zones urbaine et rurale) sur les molécules actives des 3 insecticides les plus commercialisés à Antananarivo (cf. publication issue de la revue Vertigo : « Production de cresson à haut risque dans les bas-fonds d'Antananarivo ? », Dabat M-H et al., 2016), à savoir :

- l'endosulfan, principe actif de l'insecticide de nom commercial Flavilan ;
- la cyhalothrine (la lambda cyhalothrine), composant récurrent du pesticide Karaté (Syngenta) ;
- enfin le malathion, molécule active du produit éponyme (malathion 50EC).

Enfin, quelques essais d'identification géotechniques (granulométrie + valeur au bleu de méthylène VBS) ont été réalisés sur 4 échantillons de sédiments, sélectionnés a posteriori en fonction de leur localisation et de leur aspect global.

Pour plus d'informations sur les prélèvements effectués, la Figure 7 présente les 17 points de prélèvement et les types d'analyses chimiques effectuées.

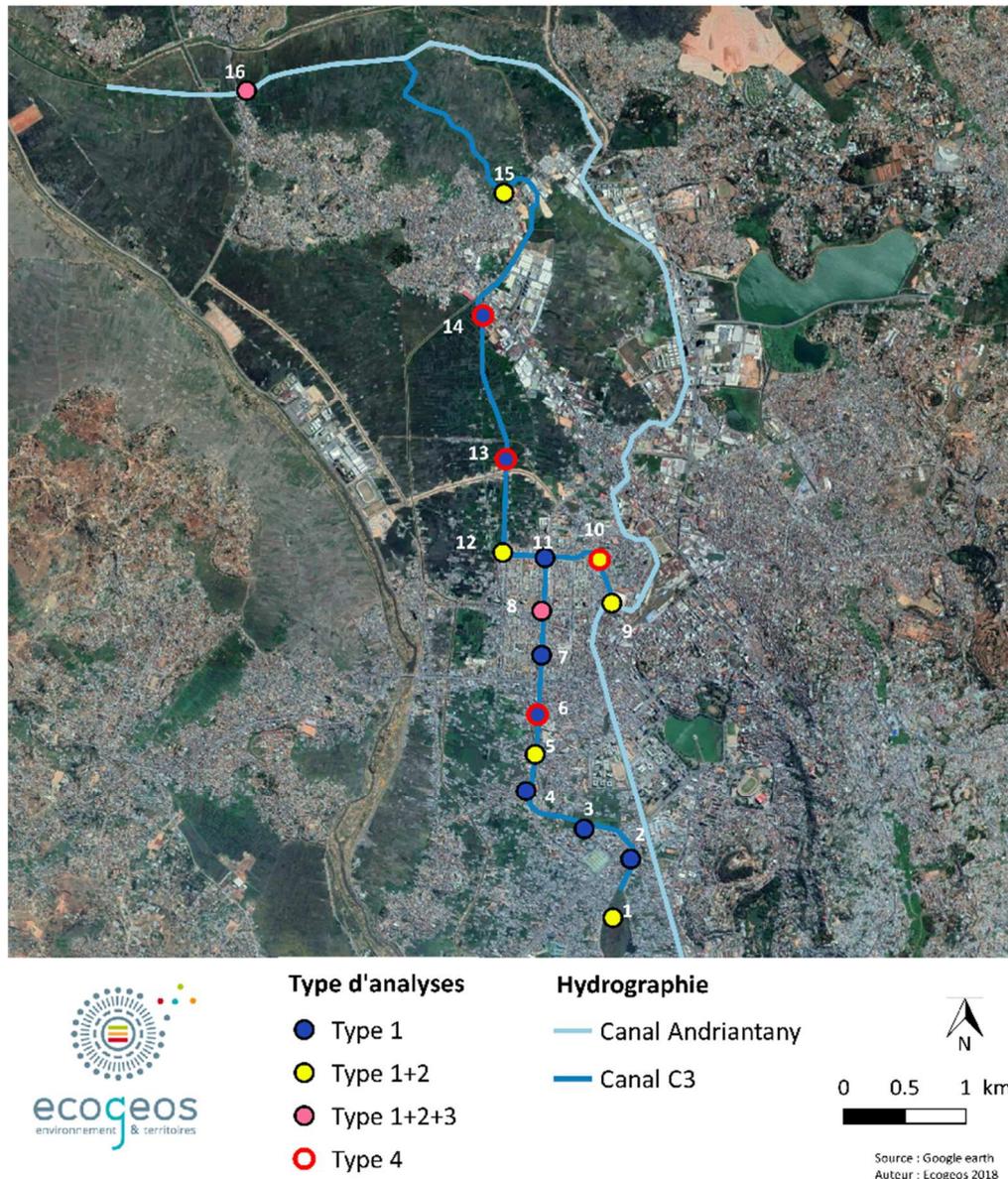


Figure 7. Cartographie des types d'analyses effectuées sur les échantillons issus du canal C3

1.1.3.2 Analyses réalisées sur l'Andriantany, le Marais Masay et le Lac Anosy (Décembre 2017)

La grille d'analyse suivante a été retenue pour un total de 17 prélèvements (analyse de type 1 systématique), dont 12 soumis aux analyses de type 2, 4 aux analyses de type 3 et 6 de type 4 :

Tableau 4. Grille d'analyse Andriantany

Groupe d'analyses ¹	Analyses systématiques	Analyses non systématiques		
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
1. Analyses physiques / MOT	✓			
2. Métaux (analyses sur matrice brute)	✓			
2bis. Métaux (analyses par lixiviation)	✓			
3. PCB		✓		
4. COT		✓		
5. HAP		✓		
6. BTEX		✓		
7. COHV		✓		
8. Hydrocarbures	✓			
9. Dioxines de furanes			✓	
10. Analyses géotechniques				✓
Nombre d'analyses proposées (à confirmer)	17	12	4	6
Fréquence proposée (rapportée à l'ensemble des prélèvements)	100 %	71 %	24 %	35 %
Laboratoires réalisant les analyses	Wessling	Wessling	Wessling	Ginger CEBTP

Les dépassements en hydrocarbures observés dans le cadre des analyses d'octobre 2017 sur le canal C3, nous ont amené à envisager une évaluation plus fine et systématique de ces produits sur le canal Andriantany.

Bien que peu présentes (au vu des premiers résultats d'analyse de sédiment), les substances de type 2 ont été analysées dans 71 % des cas. Certains des polluants recherchés peuvent être présents de façon très sporadique et refléter une activité spécifique.

Lors des analyses réalisées en octobre sur le canal C3, les 3 pesticides les plus utilisés dans l'agriculture locale ont été suivis sur deux prélèvements. Les résultats étaient assez proches des limites de détection du laboratoire et sans qu'un écart significatif entre les deux échantillons puisse être observé, ce qui a laissé penser que les concentrations observées relevaient du bruit de fond. Le choix a été fait de ne pas renouveler la recherche de ces molécules afin de privilégier la généralisation de l'analyse des hydrocarbures et l'augmentation du nombre d'analyse de type 2, 3 et 4.

L'ajout de la mesure du COT dans les analyses de type 2 devrait améliorer la caractérisation de la matière organique présente dans les sédiments.

Enfin, des essais d'identification géotechniques (granulométrie + valeur au bleu de méthylène VBS) ont été réalisés sur 6 échantillons de sédiments, sélectionnés a posteriori en fonction de leur localisation et de leur aspect global.

Pour plus d'informations sur les prélèvements effectués, la Figure 8 présente les 17 points de prélèvement et les types d'analyses chimiques effectuées.

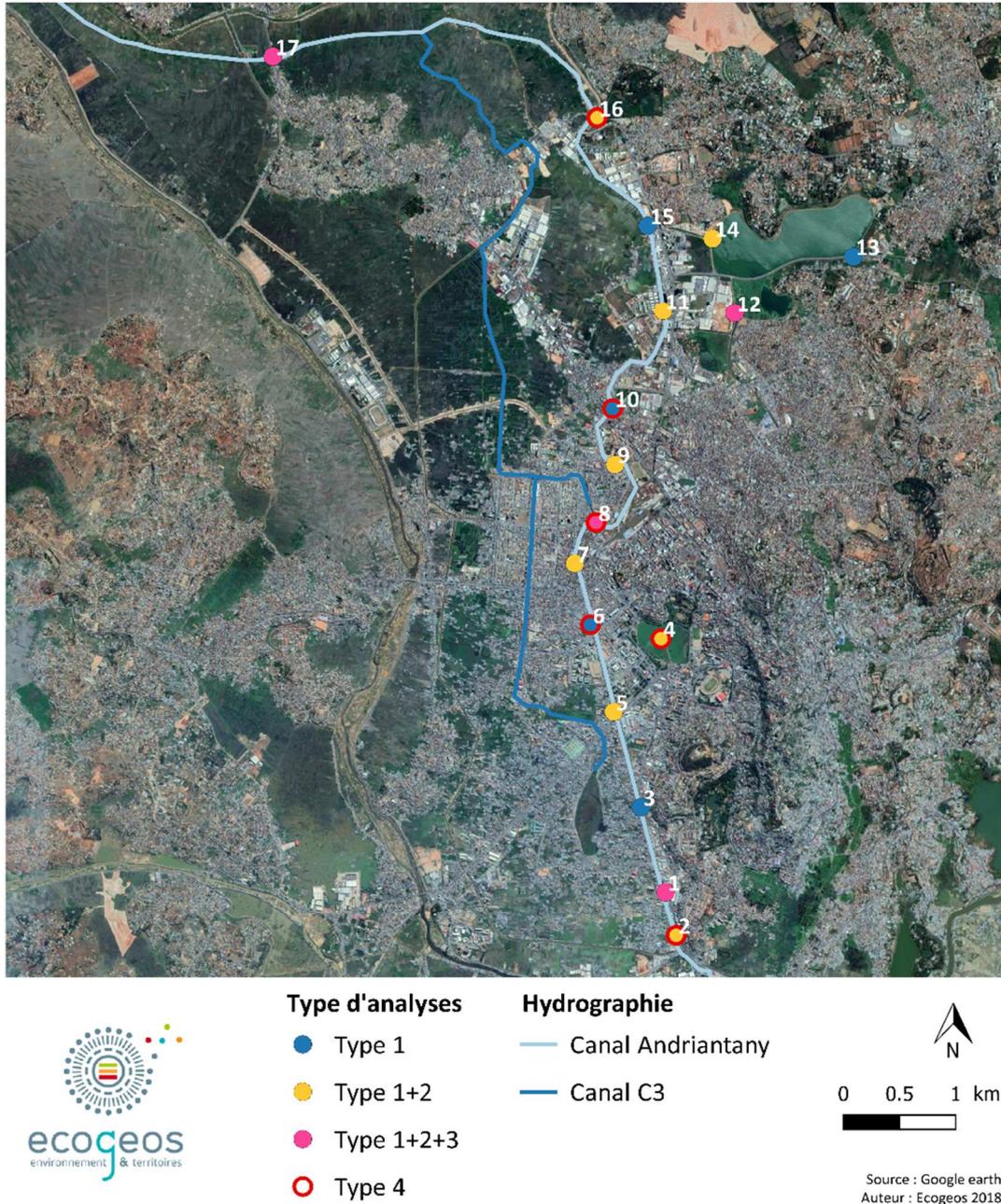


Figure 8. Cartographie des types d'analyses effectuées sur les échantillons issus du canal Andriantany, du marais Masay et du lac Anosy

1.1.4 Détermination des valeurs seuils de référence pour l'analyse chimique

Afin d'analyser les résultats obtenus pour les analyses chimiques, en l'absence de référentiel national spécifique à Madagascar, des valeurs seuils issues de la littérature ont été utilisées. Les valeurs de référence prises en compte dans ce document correspondent à une série de protocoles et textes réglementaires couramment considérés en France (Tableau 5) :

- En premier lieu, les valeurs seuils relatives au déclenchement du protocole H14 ont été considérées : il s'agit d'un protocole d'écotoxicologie pour l'évaluation du caractère éventuellement dangereux de sédiments destinés à une gestion à terre. Ce protocole a été mis au point en France par un groupe de travail piloté par la direction générale de la prévention des risques (DGPR) et coanimé par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM). Le critère dit « H14 » repose sur des seuils de contrôle dits seuils « S1 » relatifs à 9 substances (dont 7 métaux) identifiées comme celles les plus souvent retrouvées dans les sédiments, à savoir : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc, PCB totaux (7) et HAP totaux (6). Le dépassement d'un seuil ne signifie pas forcément que le matériau étudié présente un caractère dangereux dans un contexte donné. Toutefois, il implique la réalisation d'études approfondies, de manière à évaluer les risques réels en fonction des caractéristiques (nature des sols, présence ou non de nappes d'eau, fonds géochimique local, ...) de la zone cible d'épandage et/ou stockage.
- Par ailleurs, les valeurs seuils d'acceptation relatives aux installations de stockage de déchets inertes (ISDI) en France ont été utilisées en complément comme référentiel pour certains paramètres non considérés dans le cadre du protocole H14 : c'est le cas notamment des hydrocarbures, des composés aromatiques volatils (CAV) ou encore des métaux étudiés du point de vue de leur susceptibilité à être relargués dans le milieu naturel (essais de lixiviation). Ces valeurs correspondent aux seuils de qualité pour l'admission d'un matériau dit inerte, selon l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux ISDI.
- Enfin les valeurs seuils pour l'acceptabilité des sédiments dans les installations de stockage ne recevant que des sédiments ont été considérées en dernier lieu pour analyser les échantillons dont la concentration en éléments métalliques solubilisés dépasse les critères d'admissibilité en ISDI. Ces valeurs sont extraites de l'arrêté du 15 février 2016 relatif au ISDI de sédiments.

Tableau 5. Identification des valeurs seuils réglementaires

Paramètre analysé	Unité	Valeur seuil protocole H14	Valeur seuil ISDI France	Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets de sédiments
Carbone Organique Total				
COT	mg/kg MS		30 000	
Hydrocarbures				
Indice hydrocarbure C10-C40	mg/kg MS		500	
Eléments Traces Métalliques				
Chrome (Cr)	mg/kg MS	150		
Nickel (Ni)	mg/kg MS	50		
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	100		
Zinc (Zn)	mg/kg MS	300		
Arsenic (As)	mg/kg MS	30		

Paramètre analysé	Unité	Valeur seuil protocole H14	Valeur seuil ISDI France	Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets de sédiments
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	2		
Mercuré (Hg)	mg/kg MS	1		
Plomb (Pb)	mg/kg MS	100		
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)				
Somme des HAP	mg/kg MS	22,8	50	
Benzène et aromatiques (CAV - BTEX)				
Somme des CAV	mg/kg MS		6	
Polychlorobiphényles (PCB)				
Somme des 7 PCB	mg/kg MS	0,68	1	
Fraction solubilisée				
Eléments				
Mercuré (Hg)	mg/kg MS		0,01	0,2
Chrome (Cr)	mg/kg MS		0,5	10
Nickel (Ni)	mg/kg MS		0,4	10
Cuivre (Cu)	mg/kg MS		2	25
Zinc (Zn)	mg/kg MS		4	50
Arsenic (As)	mg/kg MS		0,5	2
Sélénium (Se)	mg/kg MS		0,1	0,5
Cadmium (Cd)	mg/kg MS		0,04	1
Baryum (Ba)	mg/kg MS		20	100
Plomb (Pb)	mg/kg MS		0,5	10
Molybdène (Mo)	mg/kg MS		0,5	10
Antimoine (Sb)	mg/kg MS		0,06	0,7

Pour les HAP et PCB, les valeurs seuils les plus basses ont été retenues.

Pour l'étude des dioxines et furanes, nous nous sommes basés sur les valeurs guides utilisées dans différents pays (Devenir des dioxines dans les sols – Analyse critique de données bibliographiques du BRGM, 2005).

Tableau 6. Valeurs guides pour les dioxines dans quelques pays

Pays	Valeur guide (ng I-TEQ/ kg)
Canada	4
Japon, Allemagne, France, US EPA	1 000
Nouvelle Zélande	1 500

De plus, aux Etats-Unis, des valeurs guides se réfèrent uniquement à la molécule la plus toxique, à savoir 2,3,7,8-TCDD.

Tableau 7. Valeurs guides pour la 2,3,7,8-TCDD aux Etats-Unis

Zone	Valeur guide (ng/ kg)
------	-----------------------

Secteur résidentiel	3,9 - 4,3
Secteur industriel	27 - 38

1.1.5 Notions de risques d'effets probables

Le guide technique de recommandations pratiques pour la gestion des produits de l'assainissement pluvial édité en 2006 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) propose pour évaluer la toxicité d'un produit de curage de se référer à la méthodologie d'évaluation des risques écotoxicologiques pour des sédiments de dragage (Sciences et Techniques, n°34, 2004).

Le niveau de risque individuel pour un polluant donnée est ainsi évalué par le rapport entre sa concentration brute dans les produits de curage et une concentration dite « d'effets probables ». Afin de représenter le risque global d'effets probables pour un sédiment contenant plusieurs substances polluantes, les quotients individuels peuvent être sommés et normalisés en fonction du nombre de contaminants considérés suivant la formule ci-dessous :

$$Q_{PEC} = \frac{\sum_i^n C_i / PEC_i}{n}$$

Où : Q_{PEC} est le risque d'effet probable, C_i la concentration mesurée du polluant i (mg/kg de MS) et PEC_i la concentration seuil d'effet probable (mg/kg de MS), et n le nombre de polluants mesurés.

Les PEC_i sont donnés par McDonald et al. (2000) et présentés dans le Tableau 8 ci-après.

Tableau 8. Valeurs des coefficients PEC proposés par McDonald et al. (2000) en mg/kg de matière sèche.

Arsenic	33
Cadmium (Cd)	4,98
Chrome (Cr)	111
Cuivre (Cu)	149
Mercure (Hg)	1,06
Nickel (Ni)	48,6
Plomb (Pb)	128
Zinc (Zn)	459
Fluoranthène	2,23
Benzo(a)pyrène	1,45
Somme des HAP	22,8

D'après le guide technique LCPC, si la valeur de Q_{PEC} est :

- Inférieure à 0,1 (sédiment non pollué), la probabilité que des effets toxiques soient observés est très faible.
- Comprise entre 0,1 et 0,5 (sédiment moyennement pollué), des essais de toxicité supplémentaires sont nécessaires pour juger pleinement du risque.
- Supérieure à 0,5 (sédiments très pollués), la probabilité d'observer des effets toxiques est forte et l'utilisation des sédiments doit être encadrée.

Enfin, en extrapolant les résultats pour un échantillon d'indice « i » jusqu'à la moitié de la distance le séparant des échantillons amont et aval le long du même canal, il est possible d'estimer approximativement le risque potentiel d'effets toxiques du tronçon concerné.

1.2 CARACTERISATION DES MACRODECHETS DANS LES PRODUITS DE CURAGE

1.2.1 Sélection et zonage des prises d'échantillons

Par analogies avec les campagnes de caractérisation de déchets classiques, il est établi que pour obtenir des résultats représentatifs, un minimum de 3 à 5 échantillons devait être prélevé par typologie/segment étudié.

Les typologies retenues sont les suivantes :

- Typologie 1 : bief de canal sans déchets anthropiques apparents depuis les berges



- Typologie 2 : bief de canal avec déchets anthropiques apparents des berges mais en proportion visiblement limitée (pas d'encombrants obstruant le canal notamment)



- Typologie 3 : bief de canal avec déchets anthropiques apparents des berges et en proportion importante (avec dans certains cas présence d'encombrants obstruant le canal). On retrouve cette typologie majoritairement à proximité d'un bac de collecte ou lorsque des objets/ouvrages limite l'écoulement (ponts, canalisations, bacs...)



Les 14 échantillons de produits de curage prélevés (10 prévus au démarrage de la campagne) ont été répartis sur tout le linéaire des canaux C3 et Andriantany. Sur demande de l'AGETIPA, des caractérisations supplémentaires ont été effectuées au niveau du canal de la Vallée de l'Est, au droit duquel il n'était pas prévu d'intervenir initialement. Les échantillons de déchets ont donc été sélectionnés de manière à être les plus représentatifs possible du territoire concerné.

Le Tableau 9 fait la synthèse du nombre de caractérisations par canal et par typologie.

Tableau 9. Plan d'échantillonnage des caractérisations

Nombre d'échantillons	T1	T2	T3	Total
Andriantany	3	1	4	8
C3	1	1	2	4
Canal Est	0	1	1	2
Total	4	3	7	14

En plus des caractérisations sur les sédiments évoquées ci-dessus, des prélèvements de déchets flottants ont été réalisés pour être triés et ainsi améliorer la connaissance de ce gisement. Leur composition a été comparée aux macrodéchets retrouvés en mélange dans les boues de curage.

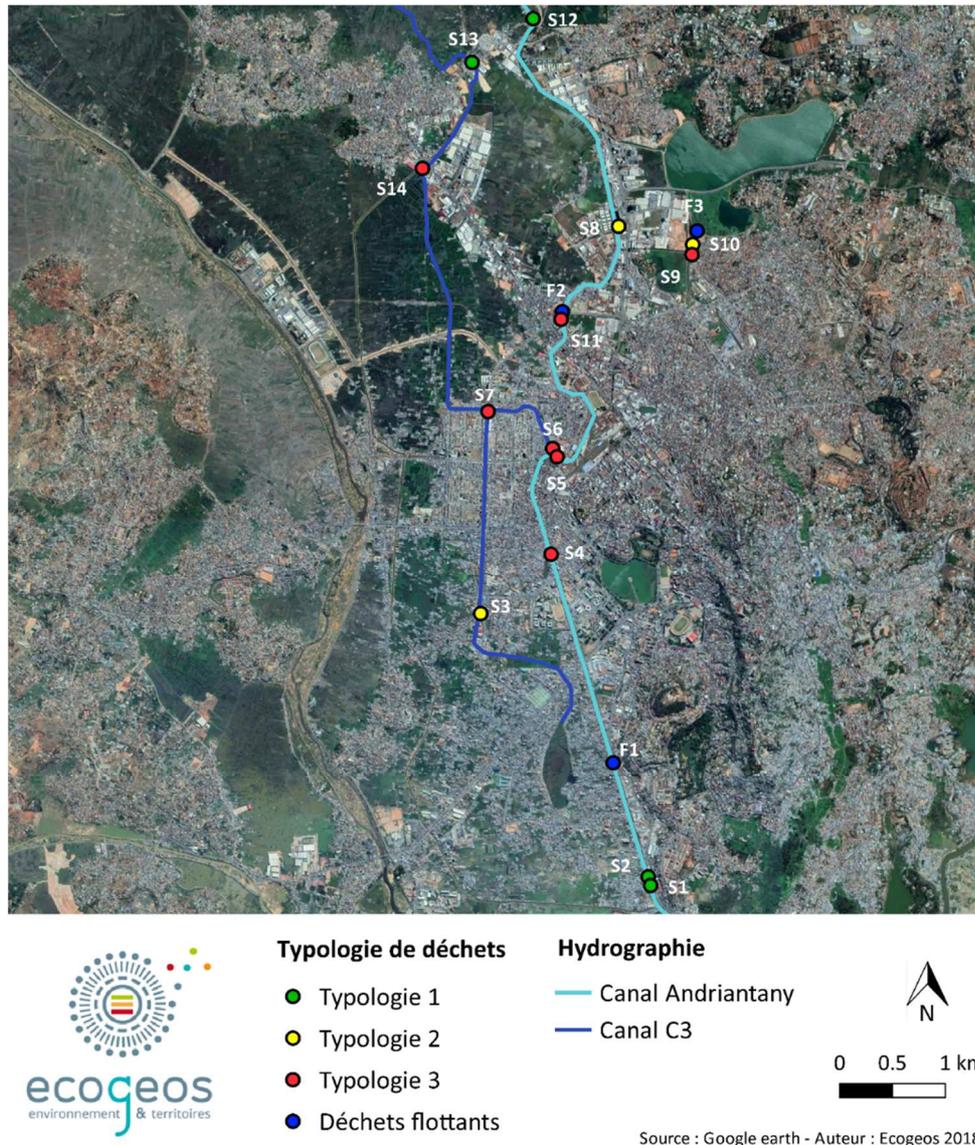


Figure 9. Répartition géographique et par typologie des échantillons de sédiments et déchets caractérisés

1.2.2 Méthodologie de prélèvement

1.2.2.1 Méthode d'échantillonnage initialement prévue

Les prélèvements élémentaires de sédiments étaient initialement censés être réalisés à la pelle mécanique. En effet, la longueur du bras de la pelle permet de réaliser des prises de sédiments jusqu'au milieu du canal. De plus, le volume d'un godet présente des dimensions adéquates pour la prise d'un échantillon.

Néanmoins pour diverses raisons techniques et logistiques, cette solution n'a pas pu être mise en œuvre durant la totalité de la campagne d'investigation :

- Le transport de la pelle mécanique devant se faire sur un porte-char, les prélèvements ne pouvaient avoir lieu que pendant les horaires autorisés à la circulation des poids-lourds, soit à partir de 21h,
- Les précipitations (principalement le soir et la nuit) de début décembre, ont rendu difficile la montée de la pelle sur le porte char, en raison de la perte d'adhérence au niveau de l'interface métal-métal entre la plateforme et les chenilles de l'engin.
- Les dimensions, à la fois du porte char et de la pelle mécanique, en hauteur comme en longueur, ne permettaient pas d'accéder à tous les points d'échantillonnage prévus.

Aussi, seuls les trois premiers échantillons ont été réalisés à la pelle mécanique. Les prélèvements S1 et S2, au niveau de la gare Soanierana, en amont de l'Andriantany ont été rendus possible par l'opération de curage de la CUA qui s'y déroulait. L'échantillon S3 résulte du seul essai fructueux de prélèvement à la pelle mécanique effectué de nuit le 13 décembre 2017.



Figure 10. Prélèvement S1 au niveau de la Gare Soanierana le 12/12/17 à gauche et essai de prélèvement à la pelle mécanique (point S3 : Bacs Café- Mihaja) le soir du 13/12/2017

1.2.2.2 Méthode d'échantillonnage de substitution

La méthode de prélèvement des onze échantillons suivants a été adaptée en fonction des contraintes opérationnelles décrites plus haut, tout en conservant le strict respect de la représentativité de l'échantillonnage. Le godet de la pelle a été remplacé par un demi fut de 500 L, relié à des cordes pour remonter le fut et les sédiments. Le fût a été percé afin de permettre le ressuyage des sédiments échantillonnés.



Figure 11. Fût et cordage utilisés pour réaliser les prélèvements de sédiments

La méthodologie suivante a ensuite été mise en place :

- Le fût est mis à l'eau par deux personnes et amené au milieu du canal.
- Les deux ouvriers dans l'eau font pression verticalement sur le fût afin de l'enfoncer et racler les sédiments comme le ferait une pelle mécanique.
- Quatre autres personnes tirent sur les cordes pour ramener le fût et son contenu vers le bord du canal.
- Le demi fût est soulevé hors de l'eau et reste suspendu le temps que les sédiments soient en partie ressuyés grâce à l'évacuation du surplus d'eau par les trous.
- Les sédiments sont ensuite vidés sur une bâche en plastique avant d'être triés selon les différentes catégories présentées plus loin.

Toutes ces étapes sont représentées dans le reportage photographique ci-dessous.





Figure 12. Méthode d'échantillonnage mise en place pour les échantillons S4 à S14

Afin de prélever des échantillons de déchets flottants, la même méthodologie a été appliquée, à la différence que le fût était maintenu en surface, au lieu de racler le fond du canal.

La masse moyenne des échantillons caractérisés est de 109 kg [60 - 214 kg]. Chaque échantillon a résulté de 2 à 3 prélèvements élémentaires de sédiments.

1.2.3 Méthodologie de caractérisation des sédiments et déchets en mélange

1.2.3.1 Tri des échantillons de boues de curage

L'échantillonnage et le tri des sédiments et déchets en mélange ont été réalisés en extérieur, sur les berges des canaux. Il n'a pas plu lors de ces étapes, pendant les 3 journées de caractérisation.

Une fois le contenu des échantillons déversés sur une bâche, les macrodéchets ont été triés par granulométrie et par catégorie. Les éléments particulièrement lourds ou volumineux (comme de grands films plastiques, pneus, planches et bouts de bois, etc.) ont été retirés. Ils ont ensuite été triés et pesés. La Figure 13 ci-dessous montre quelques exemples d'encombrants qui ont été observés durant la campagne.



Figure 13. Exemples d'encombrants présents dans les sédiments

Une fois les encombrants retirés, la totalité des macrodéchets restants, jusqu'à la taille de 3 cm, ont été triés par catégories dans les bacs disposés autour de la bâche. Afin de s'assurer qu'il ne reste plus de déchets enfouis, les échantillons ont été criblés avec un râteau. Les sédiments ont également été pesés en fin de tri pour reconstituer la totalité des prélèvements.





Figure 14. Etapes de tri des macrodéchets en mélange avec les sédiments

Pour les déchets flottants, la même méthodologie a été appliquée. Les déchets de taille réduite restants après le tri des déchets >3 cm ne sont pas des sédiments mais des fines résiduelles.



Figure 15. Tri des échantillons de déchets flottants

La grille de tri suivie lors de cette campagne de caractérisation des sédiments est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 10. Grille de tri

Catégories	Sous-Catégories
Déchets putrescibles	01.01 Déchets et produits alimentaires
	01.02 Autres putrescibles
	01.03 Déchets de jardin
Papiers/cartons	02 Papiers cartons
Composites	03.01 Emballages composites
	03.03 PAM et DEEE
Textiles	04.01 Textiles
Textiles sanitaires	05.01 Couches
	05.02 Autres fraction hygiénique
Plastiques	06.01 Sacs plastiques
	06.02 Autres plastiques souples
	06.03 Bouteilles et flacons
	06.04 Autres emballages plastiques
	06.05 Autres plastiques durs
Combustibles non classés	07.01 Chaussures
	07.02 Maroquinerie
	07.03 Bois + charbon
	07.04 Pneumatique
	07.05 Autres combustibles
Verre	08 Verre
Métaux	09.01 Emballages
	09.02 Autres métaux
Incombustibles non classés	10. Cailloux-gravats
Déchets dangereux	11.01 Déchets diffus spécifiques
	11.03 Piles et accumulateurs
	11.05 Autres déchets spéciaux

1.2.3.2 Méthodologie d'analyse des résultats

La composition des macrodéchets a été calculée pour chaque échantillon en intégrant les compositions des différentes granulométries : encombrants (>30 cm) et fraction 3-30 cm. La catégorie incombustible, exclusivement constituée de pierres et cailloux a été comptabilisée à part au même titre que les sédiments, et n'a pas été incluse dans les déchets.

Les résultats sont présentés à partir de calculs de compositions moyennes, définies dans un intervalle de confiance à 95 %. Le calcul des intervalles de confiance sur les résultats calculés permet de déterminer le niveau de fiabilité obtenu : un intervalle de confiance à 95 %, comme calculé ici, signifie que cet intervalle a 95 % de chances de contenir la valeur qu'aurait donnée une interrogation exhaustive des matériaux en place. Plus ces intervalles sont réduits, plus les résultats peuvent être considérés comme fiables et robustes.

Une moyenne simple a été calculée et exprimée en %. Des comparaisons par typologie de présence de déchets et par canal ont été effectuées et les résultats seront exprimés en %.

1.2.3.3 Extrapolation à l'ensemble des produits de curage de l'Andriantany

A partir des données disponibles (cf. référence Tranche ferme – rapport de fin de mission BRL sur la thématique déchets solides, Octobre 2016), les volumes curés dans l'Andriantany ont fait l'objet d'une retranscription sous forme graphique des volumes moyens exprimés en m³ par km.

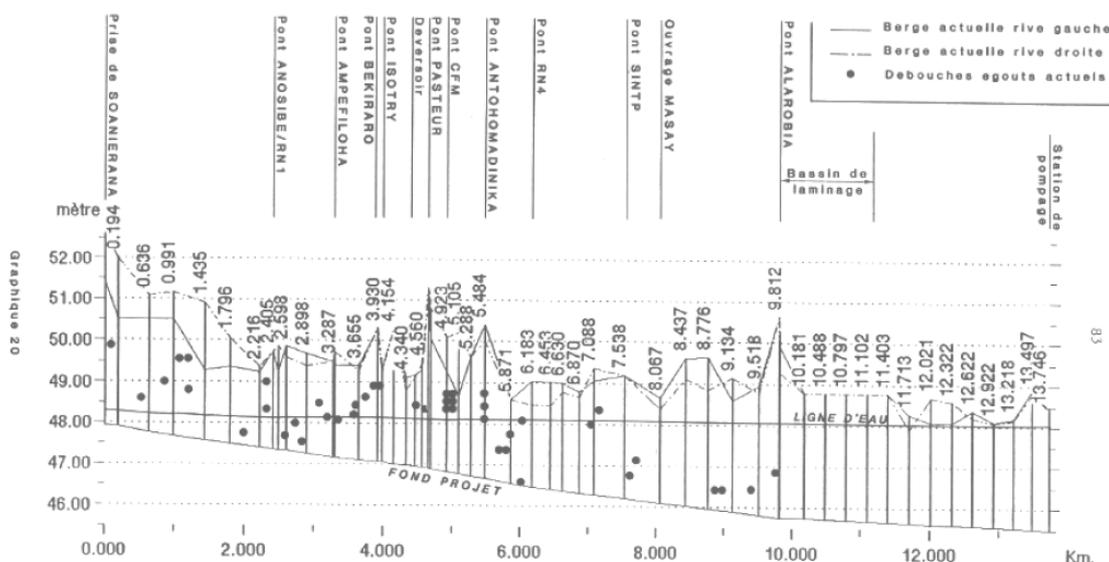


Figure 16. Coupe longitudinale du canal Andriantany avec indication de la position des bouches d'égout

L'analyse pluriannuelle, plus globale, intégrée au rapport sur l'érosion des canaux, donne un ordre de grandeur des apports annuels moyens sur les différents tronçons curés. Ces ordres de grandeurs (Tableau 11) correspondent à un peu plus de 3 m³/ml de canal/an sur les trois premiers tronçons, alors que pour le dernier tronçon l'apport annuel est estimé à environ 1,6 m³/ml de canal/an.

Tableau 11. Apport annuels par tronçon (Extrait du rapport sur l'érosion des canaux)

Apports sur la période	Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 3	Tronçon 4	Tronçon 5
Pk	0 – 3,3	3,3 – 5,6	5,6 – 7,4	7,4 – 11,6	11,6 – 13,7
1992 - 1997	3,4	4,2	4,0	3,2	3,3
1997 - 2001 a	2,4	2,1	0,0	0,0	0,0
1997 - 2001 b	2,4	3,6	3,0	2,1	1,1
1997 - 2001 c	2,3	3,5	3,1	2,2	1,2
1997 - 2001 Total	7,0	10,3	6,1	4,2	2,3
2001 - 2010	0,8				
2010 - 2013/2014	2,5				
2013/2014 - 2015/2016	3,4				
Moy./Tronçon (en m³/ml/an)	3,0	3,8	3,3	2,3	1,6

Le volume et la masse totale de macrodéchets ont été extrapolées sur la base de la répartition des typologies de présence de déchets de chaque tronçon du canal Andriantany.

2. ETAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT SEDIMENTAIRE DU C3

2.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Les échantillons prélevés présentent des granulométries et compositions en matière différentes, sans que cela soit lié à leur répartition géographique.

Trois familles de prélèvement ont pu être identifiées à partir des observations de terrain et des résultats d'analyse de MO (matière organique) et MS (matière sèche) :

- Aspect 1 : Echantillons d'aspect limono-sableux, présentant une faible teneur en eau (36 % en moyenne) et une faible teneur en matières organiques (30 % en moyenne) : 2A, 3A, 4A, 10A, 12A, 13A et 14A ;
- Aspect 2 : Echantillons correspondant à une matrice plus cohésive, avec une teneur en MO plus élevée (41 % en moyenne), mais une teneur en eau moyenne (proche de 50 %) : 1A, 6A, 7A, 8A, 11A et 15A ;
- Aspect 3 : Echantillons avec une matrice principalement organique (>50 % en moyenne) et une teneur en eau élevée (> 60 %) : 5A, 9A et 16A.

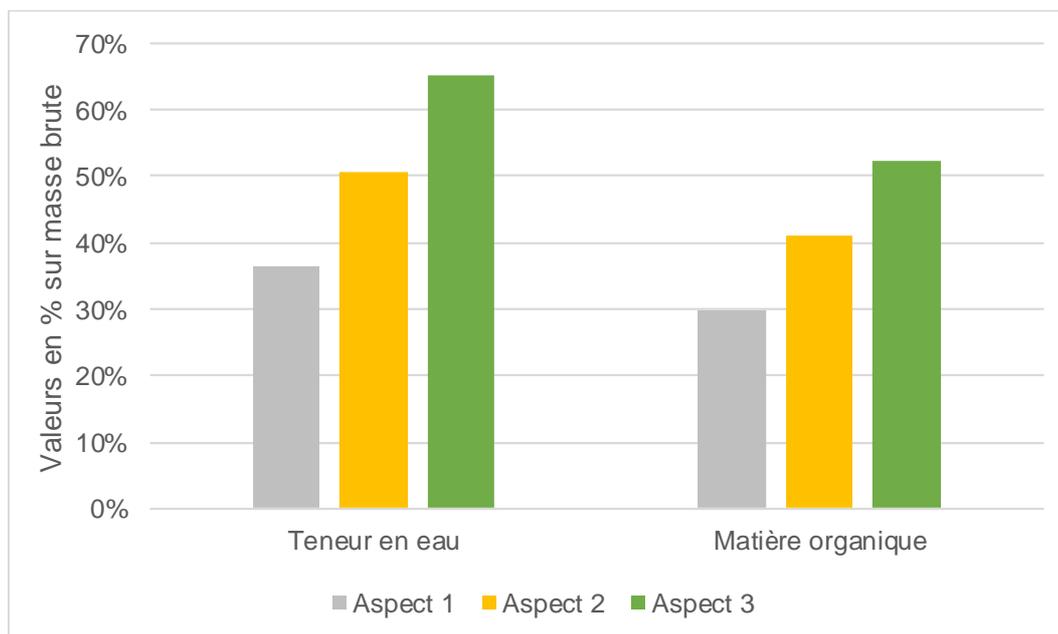


Figure 17. Teneur en eau et taux de MO moyenne par famille de prélèvement

En moyenne, le panel d'échantillons présente :

- Une teneur en eau de 52,8 % [min : 31,8, max : 76,7]
- Une teneur en matière organique (MO) de 38,3% [min : 23,6 ; max : 58,3]

Bien qu'une distribution géographique précise de la teneur en eau et en MO des sédiments le long du canal C3 n'est pas possible, on observe néanmoins 3 zones distinctes présentant des séquences continues :

- Au niveau des points de prélèvement 2A, 3A et 4A : les sédiments présentent une teneur en matière organique (MO) assez homogène, de l'ordre de 30 %.
- Du point 6A au point 11A, le taux de MO est plus élevé.
- Enfin, des points 12A à 14A, le taux de MO redevient à nouveau plus faible.

De manière générale, les concentrations en matières organiques apparaissent élevées voire très élevées, au-delà de ce qui aurait pu être supposé sur la base des observations visuelles faites en 2016 (pour rappel, sur remblai de sédiments issus du canal Andriantany, après plusieurs mois de dépôt à l'air libre).

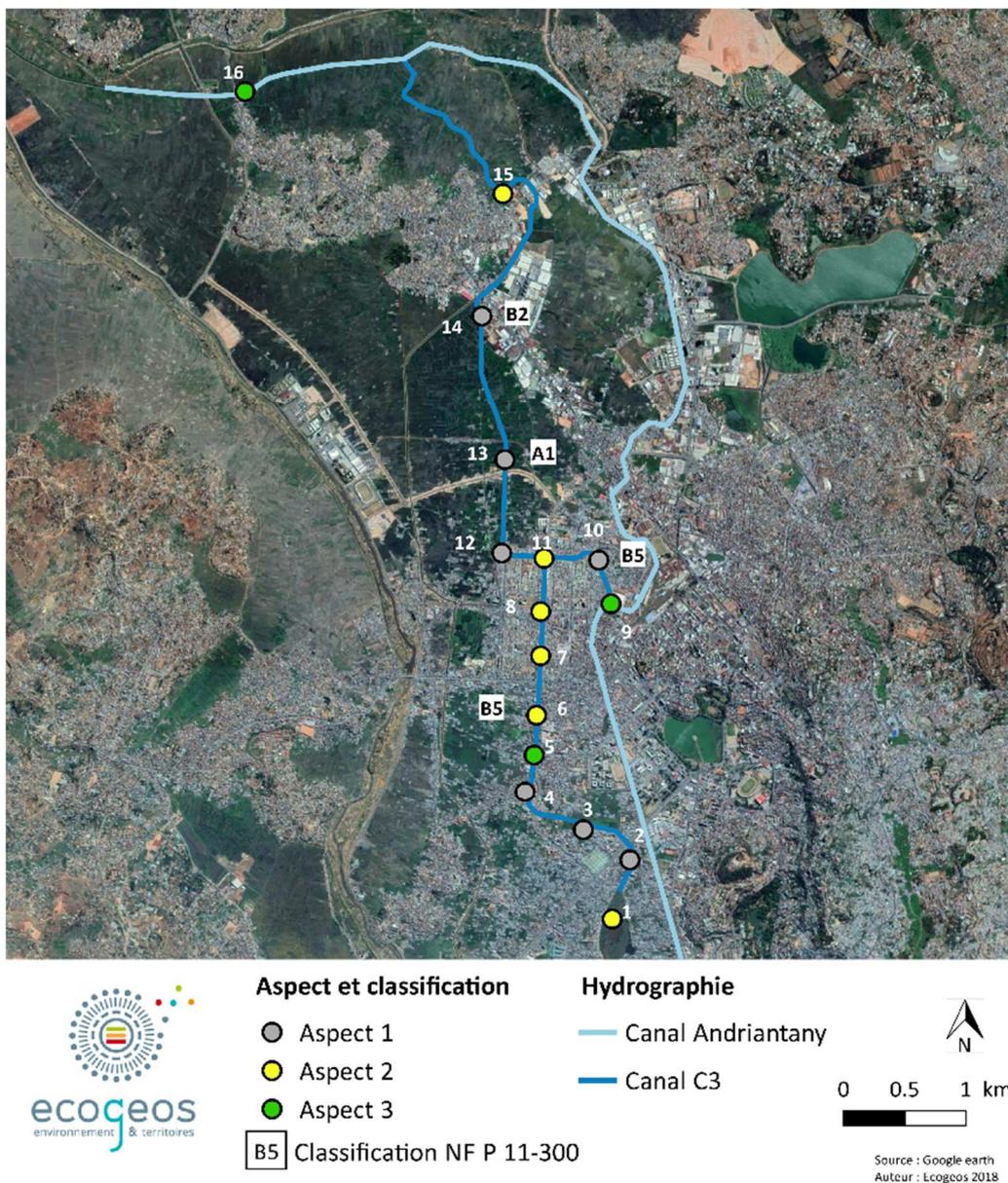


Figure 18. Classification et distribution des échantillons selon leur aspect, teneur en eau et MO

Quatre échantillons ont fait l'objet d'analyses géotechniques, dont les résultats permettent de classer les sédiments par type de sol suivant la norme NFP 11-300 :

- Les sédiments issus des échantillons 6A et 10A s'apparentent à des sables et/ou graves très silteux
- Les sédiments de l'échantillon 13A s'apparentent à des sols fins, de type limons peu plastiques et sables fins mêlés.
- Les sédiments de l'échantillon 14A s'apparentent à des sables argileux.

Par ailleurs, les analyses de type VBS (Valeur au Bleu de Méthylène) donnent des résultats compris entre 0,2 et 0,8, représentatifs de sols sablo-limoneux sensibles à l'eau (d'autant plus sensibles que la valeur de VBS est élevée). Notons toutefois que la valeur VBS de l'échantillon 14A (0,23) est assez proche du seuil de non-sensibilité à l'eau (0,1) : par conséquent, on pourra considérer dans ce cas qu'on est en présence d'un matériau en définitive peu sensible à l'eau, ce qui, nonobstant les autres critères étudiés, pourrait ouvrir la voie à une valorisation en remblai.

Les résultats des analyses sont précisés dans le Tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12. Résultats des analyses matière sur les échantillons de sédiments du canal C3

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	
Typologie d'habitat		Urbain	Urbain	Semi-urbain	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain	
Paramètre globaux										
Matière sèche	% mass MB	48,6	47,0	54,7	57,5	37,2	49,5	48,4	55,3	
Matière organique	% mass MS	42,3	31,3	31,9	27,0	49,0	36,0	42,2	49,9	
Essais granulométriques										
Classification de sol (NFP 11-300)							B5			
Teneur en eau	% mass MB						73,6 (valeur incohérente)			
Valeur au bleu VBS	g/100g						0,54			
Passant à 80 micromètres	%						16 %			
Paramètre analysé	Unité	9	10	11	12	13	14	15	16	
Typologie d'habitat		Urbain	Urbain	Urbain	Urbain	Rural	Rural	Semi-urbain	Rural	
Paramètre globaux										
Matière sèche	% mass MB	31,8	69,9	47,4	65,3	73,6	76,7	46,9	35,5	
Matière organique	% mass MS	58,3	28,6	38,2	42,9	23,8	23,6	38,2	49,6	
Essais granulométriques										
Classification de sol (NFP 11-300)				B5			A1	B2		
Teneur en eau	% mass MB			37,4			32,2	36,4		
Valeur au bleu VBS	g/100g			0,36			0,72	0,23		
Passant à 80 micromètres	%			12 %			36 %	7 %		

2.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

2.2.1 Evaluation des éléments traces métalliques dans les sédiments

Parmi les «éléments traces métalliques (ETM) présentant une valeur seuil pour le protocole H14 en termes de contenu global dans un sédiment, le Zinc et le Plomb dépassent la valeur seuil sur un quart des échantillons. Ce résultat conforte les observations de l'étude préliminaire de 2016. Les échantillons ainsi pollués sont principalement présents au niveau de la zone urbaine. Ces métaux pourraient résulter d'activités anthropiques (piles et batteries, entretien automobile, stations de carburant, ...).

Hormis le point de jonction avec l'Andriantany, on retrouve :

- Une zone de présence du Zinc, située au niveau des prélèvements 8A, 11A et 12A (facteur de dépassement compris inférieurs à 1,2 vis-à-vis des seuils S1 du protocole H14).
- Deux zones de présence du Plomb, au niveau des prélèvements 6A et 7A et en amont au niveau du point 2A (facteurs de dépassements compris entre 1,4 et 3,5 là encore vis-à-vis des seuils S1 du protocole H14).

Pour le cuivre, seul l'échantillon 9A, prélevé à l'embranchement avec le canal de l'Andriantany, et par ailleurs concerné par une accumulation des deux précédents métaux, présente une teneur supérieure à la valeur seuil S1 de déclenchement du protocole H14. Ce pic d'accumulation semble très localisé car on ne le retrouve pas spécifiquement dans les prélèvements situés en aval. Le facteur de dépassement est de 2,4 pour le Zinc, 1,6 pour le plomb et de 1,2 pour le cuivre.

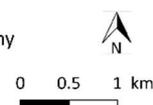


Dépassement valeur seuil pour H14

- Pb
- Zn
- Pb, Zn et Cu
- Aucune valeur seuil dépassée

Hydrographie

- Canal Andriantany
- Canal C3



Source : Google earth
Auteur : EcoGeos 2018

Figure 19. Cartographie des analyses des ETM sur échantillon brut

Concernant le potentiel de lixiviation de ces ETM, seul l'antimoine présente des valeurs dépassant les seuils autorisés pour une classification en déchet inerte, pour 4 échantillons sur les 16 prélevés (6A, 7A, 9A, et 11A) : là encore, les dépassements sont concentrés en zone urbaine. Cet ETM est en dessous des limites de détection au sein de la matrice, donc présent en quantités limitées, mais son potentiel de lixiviation apparait proportionnellement élevé puisqu'il dépasse les valeurs seuils des tests de lixiviation. Cet élément étant utilisé comme un élément durcissant dans les alliages, comme ceux à base de plomb et de cuivre, ainsi sa présence peut être liée à la présence de ces deux métaux retrouvés dans les sédiments.

Les autres ETM présentent des valeurs inférieures aux valeurs seuil dans la fraction solubilisée. Ceci signifie que les éléments tels que le Plomb, le Zinc ou encore le Cuivre, pourtant présents en quantités assez élevées dans certains échantillons, sont peu mobilisables.

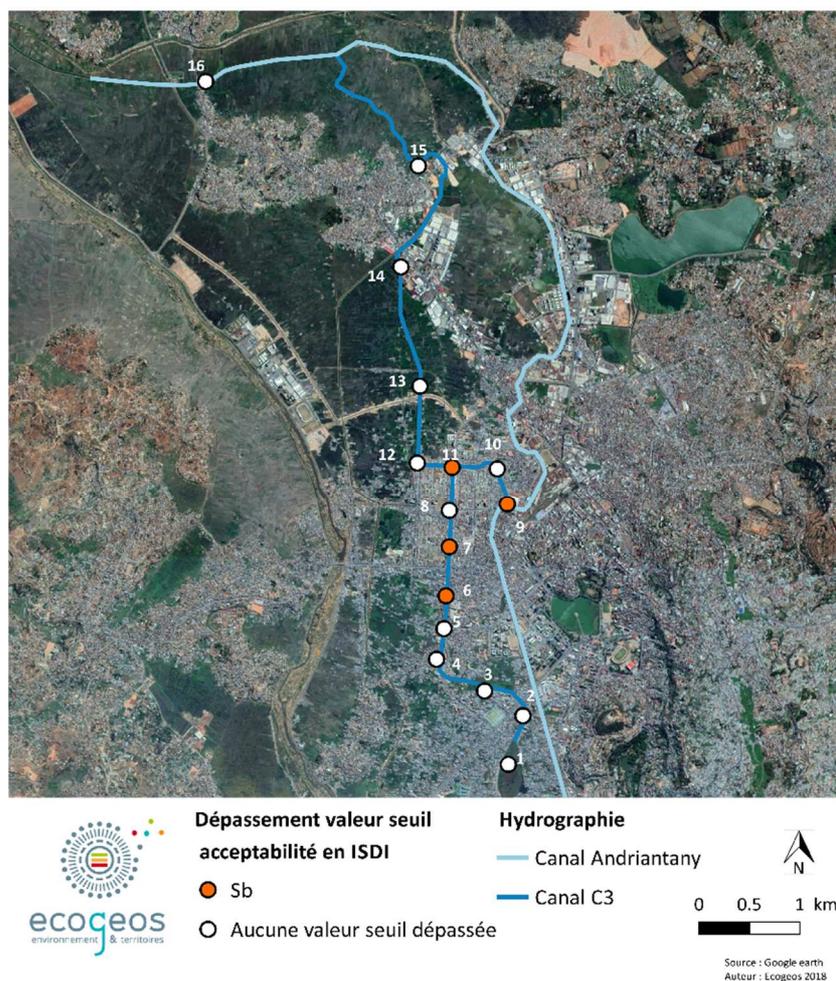


Figure 20. Cartographie des analyses des ETM sur fraction solubilisée

Le Tableau 18 présente les valeurs des différents ETM présents dans les échantillons analysés, le Tableau 19 présente quant à lui les valeurs des différents éléments traces après lixiviation des mêmes échantillons.

2.2.2 Evaluation de la présence d'hydrocarbures

L'analyse des hydrocarbures a été réalisée sur 8 échantillons (1A, 5A, 8A, 9A, 10A, 12A, 15A et 16A).

La valeur seuil de l'indice hydrocarbure C10-C40 est dépassée pour la majorité des échantillons testés (échantillons 5A, 8A, 9A, 12A, 15A et 16A). De plus, cet indice est proche de la valeur seuil pour l'échantillon 1A.

Pour l'ensemble des échantillons, les hydrocarbures les plus présents sont les hydrocarbures C16-C40 dits hydrocarbures « lourds ». Cela correspondrait donc à des Gasoils lourds ou des Goudrons (Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes, BRGM, 2001). Les faibles valeurs en hydrocarbures plus légers peuvent être dues à leur caractère plus volatil. Mis à part l'échantillon 1, seul l'échantillon 10A présente une valeur inférieure à la valeur seuil ; cet échantillon est pourtant relativement proche de l'échantillon 9A, qui présente un taux élevé d'hydrocarbures.

De manière générale, ce polluant est présent dans la quasi-totalité des échantillons prélevés, pourtant répartis sur une large zone géographique (à la fois en ville et dans les zones plus rurales), mais sa présence pourrait être liée à la teneur en argile des sédiments. En effet, les échantillons présentant les plus fortes concentrations en hydrocarbures sont justement ceux présentant un aspect pâteux.

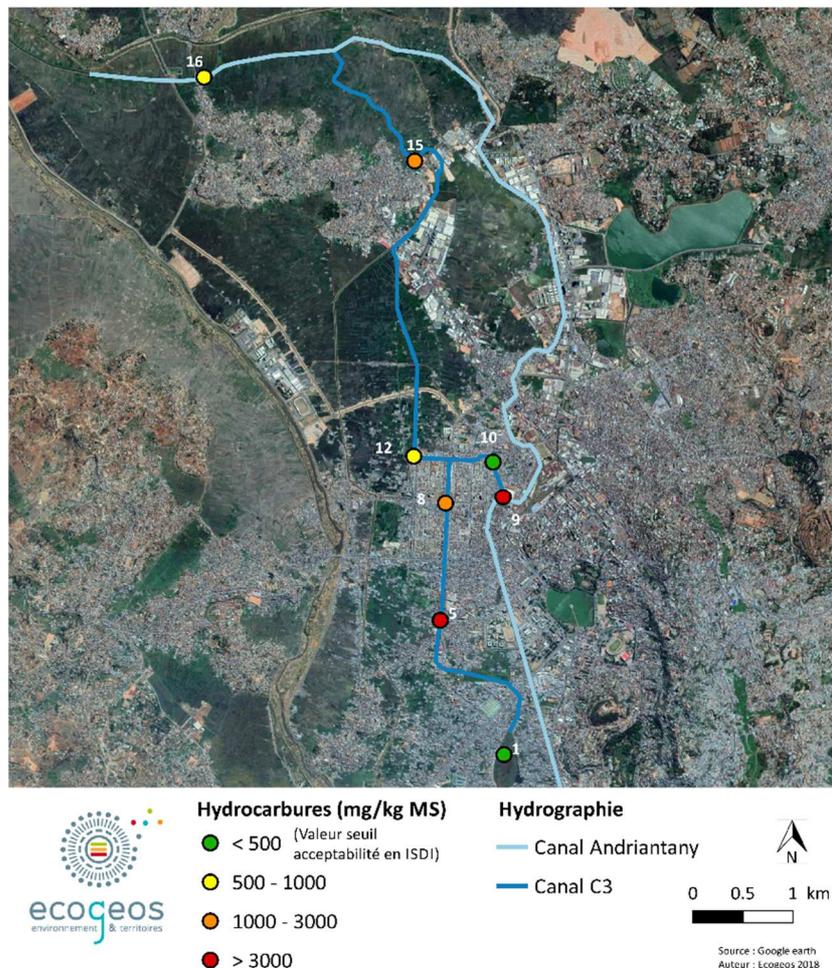


Figure 21. Carte de répartition des hydrocarbures dans les sédiments analysés

L'ensemble des résultats des analyses sur les hydrocarbures présents dans les échantillons analysés est présenté dans le Tableau 20 en Annexe.

2.2.3 Evaluation des autres paramètres analysés

2.2.3.1 Evaluation des BTEX

L'analyse des composés organiques BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes) a été réalisée sur 8 échantillons (cf Tableau 21). Seul le Toluène est présent en quantité supérieure à la limite de quantification du laboratoire et ce pour les échantillons 8A, 9A, 10A, 12A et 16A.

La présence de Toluène dépasse la valeur seuil pour l'échantillon 10A, seul échantillon à avoir présenté une odeur caractéristique, qui se trouve être étrangement l'échantillon avec la plus basse concentration en hydrocarbures. Il est également présent en quantité non négligeable dans l'échantillon 8A.

On peut retrouver le toluène dans plusieurs types d'industries, et avec des utilisations relativement variées :

- Industrie pétrolière : il est produit lors de la fabrication d'essence ou d'éthylène.
- Il est utilisé comme solvant dans l'industrie cosmétique et pharmaco-chimique, ou pour la fabrication des peintures, vernis, laques, encres, adhésifs...
- Il est enfin utilisé pour le tannage du cuir.

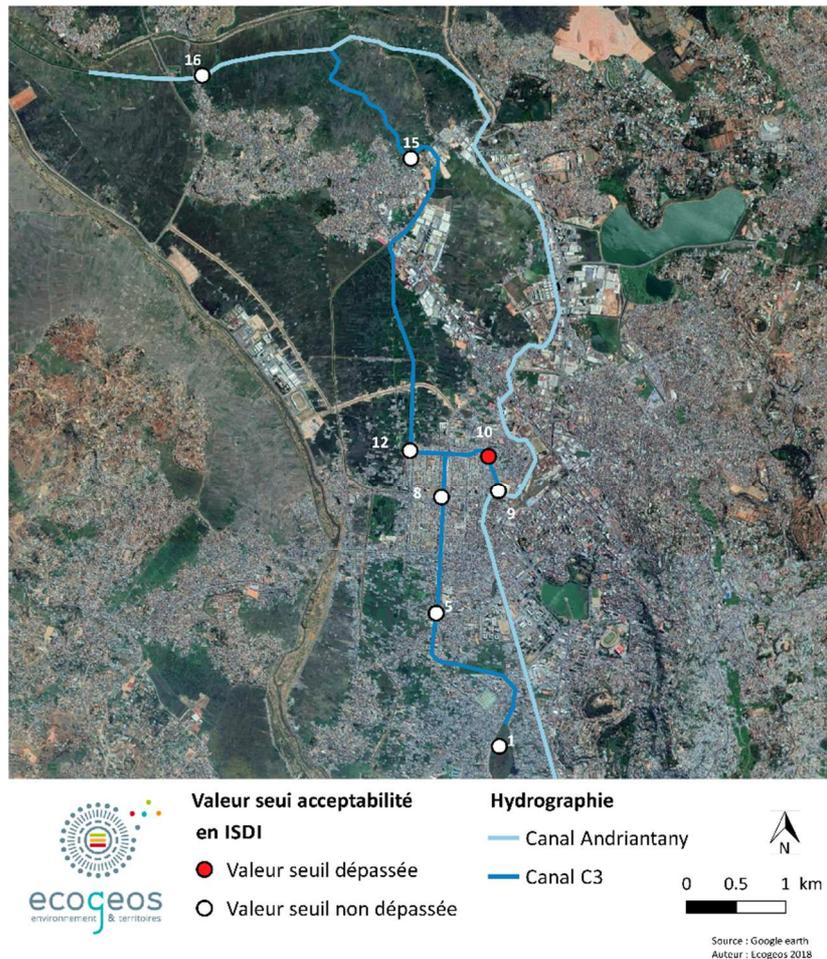


Figure 22. Carte de répartition des BTEX dans les échantillons de sédiments analysés

2.2.3.2 Evaluation des pesticides recherchés

Les molécules actives présentes dans les trois pesticides les plus utilisés dans l'agriculture locale (cf. publication issue de la revue Vertigo : « Production de cresson à haut risque dans les bas-fonds d'Antananarivo ? », Dabat M-H et al., 2016) ont été recherchés :

- l'endosulfan, principe actif de l'insecticide de nom commercial Flavilan ;
- le malathion, molécule active du produit éponyme (malathion 50EC) ;
- et enfin la cyhalothrine (la lambda cyhalothrine), composant récurrent du pesticide Karaté (Syngenta).

Deux échantillons ont été analysés : le premier localisé en secteur urbain (échantillon 8A) et le deuxième en secteur rural (échantillon 16A).

Tableau 13. Résultats d'analyses des pesticides dans les sédiments

Paramètre analysé	Unité	8	16	LQI Laboratoire
Malathion / LSA31	mg/kg MS	<0,13	<0,13	0,05
Endosulfan alpha et bêta / LSA43	mg/kg MS	<0,03	<0,03	0,01
Lambda cyhalothrine	mg/kg MS	<70	<71	70

Les pesticides analysés ont été identifiés et quantifiés légèrement au-delà des limites de détection du laboratoire dans chacun des deux échantillons. Néanmoins, on n'observe pas d'écart entre les deux résultats, ce qui laisse penser que les concentrations sont de l'ordre du bruit de fond et que l'utilisation de ces pesticides en activité agricole ne se retrouve pas dans les sédiments.

Le malathion est un organophosphoré classé cancérigène probable depuis 2015 par le Centre International de Recherche sur le Cancer et très écotoxique envers les organismes aquatiques, les insectes et les oiseaux. Il est peu persistant dans les sols selon l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), ce qui peut expliquer sa faible présence dans les sédiments.

2.2.3.3 Evaluation des dioxines et furanes

Les 17 congénères de dioxines et furanes présentant la plus grande toxicité ont été recherchés là encore dans les deux échantillons de sédiments 8A et 16A.

L'émission de dioxines dans l'air est principalement liée à des combustions incomplètes (de déchets), à l'industrie métallurgique et sidérurgique et à la pratique de l'écobuage (débroussaillage par le feu) des végétaux sur lesquels des produits phytosanitaires ont été utilisés.

Les dioxines et furanes sont généralement présentes dans des mélanges contenant plusieurs types de congénères, chacun ayant un degré de toxicité spécifique. Afin de pouvoir exprimer la toxicité globale du mélange, le concept d' "Equivalents Toxiques Internationaux " (ou I-TEQ pour International Toxic Equivalents) a été créé.

Aussi, les résultats des analyses réalisées traduisent les taux de dioxines suivants dans les échantillons de sédiments :

- Echantillon 8A : entre 17,2 et 17, ng I-TEQ/kg MS
- Echantillon 16A : 229 ng I-TEQ/kg MS

On observe une augmentation de la concentration en dioxines dans les sédiments de l'amont vers l'aval du canal C3. Bien que relativement élevée au niveau de l'échantillon 16A, la valeur ne dépasse pas les valeurs guide considérées (1 000 ng/kg) en France, en Allemagne et aux Etats Unis.

On note néanmoins que dans le cas de la dioxine la plus toxique étudiée fréquemment aux Etats-Unis, la concentration en 2,3,7,8-TCDD, mesurée à 220 ng/kg MS dans les sédiments de l'échantillon 16A, dépasse fortement les valeurs guides des zones industrielles (entre 27 et 38 ng/kg).

Si les dioxines ne sont pas très présentes dans les sédiments du prélèvement 8A, on les retrouve en quantité non négligeable à l'aval du canal C3 dans le prélèvement 16A, notamment la dioxine la plus toxique.

2.2.3.4 Evaluation des HAP, PCB, et COHV

D'autres paramètres ont été analysés sur les échantillons 1A, 5A, 8A, 9A, 10A, 12A, 15A et 16A. Ces paramètres sont les hydrocarbures halogénés volatils (HAP), les Polychlorobiphényles (PCB) et les COHV. Ces paramètres n'ont pas été détectés dans les échantillons à l'exception du phénanthrène, un HAP, dans l'échantillon 8A. Cette substance est présente à hauteur de 0,11 mg/kg MS. Une telle valeur reste cependant très faible comparée aux valeurs seuils du protocole H14 et des critères d'entrée en ISDI qui sont respectivement de 22,8 et 50 mg/kg MS.

Le Tableau 23 en annexe présente les résultats d'analyse pour ces polluants.

2.3 RISQUE D'EFFETS PROBABLES

Pour chaque échantillon, la valeur du risque global a été calculée comme définie dans la partie 1.1.5. et les résultats sont présentés sur la Figure 23. Les HAP n'ont pas été pris en considération dans le calcul pour les échantillons ayant seulement fait l'objet d'analyses de type 1.

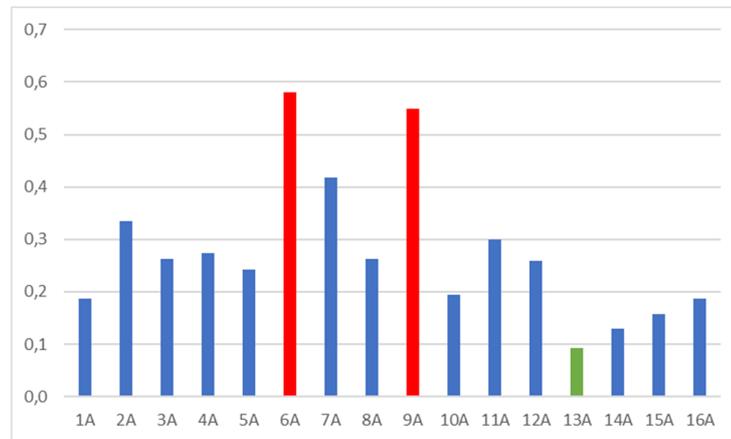


Figure 23. Représentation du risque d'effets probables par échantillon de sédiments analysés

La majorité des échantillons analysés sur le canal C3 (représentés en bleu sur la Figure précédente) présentent une valeur Q_{PEC} comprise entre 0,1 et 0,5 : ils peuvent être qualifiés de moyennement pollués et présentent un niveau de risque incertain qu'il conviendrait de réévaluer dans l'hypothèse d'un dépôt en remblai ou en casier de stockage en fonction du fond géochimique du site concerné et de la qualité de la barrière de sécurité de fond envisagée (le cas échéant). Les échantillons 6A et 9A (caractérisés un $Q_{PEC} > 0,5$) présentent quant à eux une toxicité avérée, alors que la probabilité d'observer des effets toxiques à partir des sédiments de l'échantillon 13A ($Q_{PEC} < 0,1$) est négligeable.

En extrapolant il est possible de considérer que les 5 % des sédiments du linéaire du canal C3 présentent un risque global de toxicité avéré et doivent être stockés dans un site de stockage contrôlé. Les risques étant négligeables pour 10% du canal, il serait possible d'envisager que les résidus de curage autour du point 13A soient gérés de façon moins stricte. Pour les 85% de linéaire restants, le risque d'effet toxique reste potentiel. Par mesure de précaution et afin de se prémunir de tout risque de pollution (qui concerne environ 90 % du canal), dans l'analyse des alternatives en partie 6, nous avons considéré que tous les sédiments présentent un risque et doivent être gérés de façon identique, quelle que soit la zone de curage.

2.4 SYNTHÈSE

A l'issue des analyses réalisées au sein de trois laboratoires français, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- **Du point de vue géotechnique**, les analyses effectuées ont permis de mettre en évidence des différences avec la présence de matériaux plus ou moins grossiers et sensibles à l'eau : sols à forte dominante sableuse au droit du point 14A, sols sablo-limoneux au droit des points 6A et 10A et sols plus fins (limoneux) au droit du point 13A.

- Concernant la matière organique, les échantillons de sédiments présentent une teneur en matière organique comprise entre 23 et 58 %, globalement élevée. Cette teneur en MO est directement corrélée avec la teneur en eau des matériaux. Bien qu'une distribution géographique précise de la teneur en eau et en MO des sédiments le long du canal C3 n'est pas possible, il a été identifié néanmoins 3 zones distinctes présentant des contrastes entre eux.
- Du point de leur composition chimique :
 - Eléments traces métalliques : les sédiments présentent au sein du secteur le plus urbanisé (quartier 67 ha et jonction avec le canal Andriantany) une accumulation en éléments trace métalliques (zinc, plomb et plus localement cuivre). Cependant, les tests de lixiviation réalisés tendent à montrer que ces substances restent assez peu mobilisables. Bien que présente en faible concentration au sein des sédiments, l'antimoine est la substance la plus sujette à la lixiviation.
 - Du point de vue des hydrocarbures, les valeurs de référence considérées pour l'acceptabilité en ISDI sont dépassées pour une majorité d'échantillons, avec des valeurs pics observées en aval du pont Rainidafi et à proximité de la jonction avec le canal Andriantany. On ajoutera également que l'IFP (l'Institut Français du Pétrole) considère qu'un sédiment est pollué s'il contient plus de 1000 mg d'hydrocarbures totaux par kg de matière sèche, ce qui est le cas des échantillons 5A, 8A, 9A et 15A.
 - S'agissant des autres polluants étudiés, ceux-ci ont été très peu observés. Toutefois, la présence de toluène a été identifiée très localement au niveau du point 10A, légèrement en aval de la jonction avec le canal Andriantany. La présence d'une dioxine spécifique (2,3, 7,8-TCDD) a aussi été repérée localement au niveau du point 16A (avant la jonction aval avec le canal Andriantany).

En définitive, la concentration en polluants chimiques dans les sédiments du canal C3 présente un niveau moyen, avec un assez fort contraste entre sections urbaine et rurale.

3. ETAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT SEDIMENTAIRE DU CANAL ANDRIANTANY ET DES OUVRAGES AFFERENTS

3.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

3.1.1 Aspect des sédiments et matière organique

Au sein des échantillons prélevés, une diversité granulométrique et d'aspect a été observée, sans que cela soit lié à leur répartition géographique.

Trois familles de prélèvement ont été identifiées à partir des observations terrains et des résultats d'analyse de MO (matière organique) et MS (matière sèche) :

- Aspect 1 : Echantillons d'aspect sableux, présentant une faible teneur en eau (23 % en moyenne) et une faible teneur en matières organiques (27 % en moyenne) : 3B, 6B, 7B, 8B, 10B, 13B, 14B et 15B ;
- Aspect 2 : Echantillons correspondant à une matrice plus cohésive, avec une teneur en MO (50 % en moyenne), et une teneur en eau (46 % en moyenne) moyenne : 2B, 4B, 5B, 11B et 17B ;
- Aspect 3 : Echantillons avec une matrice principalement organique (>60 % en moyenne) et une teneur en eau élevée (54 % en moyenne) : 1B, 9B, 12B et 16B.

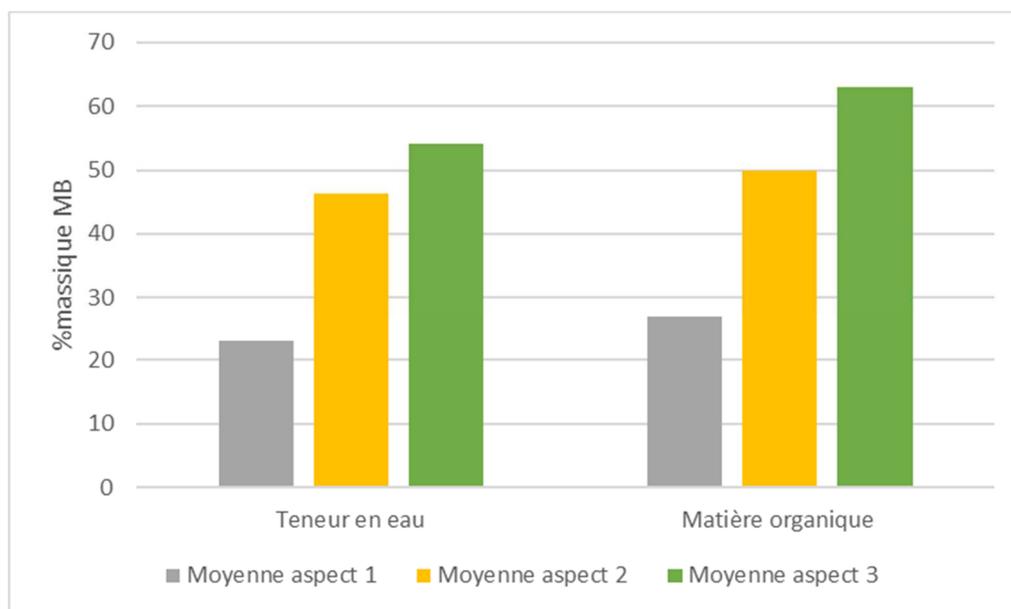


Figure 24. Teneur en eau et taux de MO moyenne pour chaque famille de prélèvement

En moyenne, le panel d'échantillons présente :

- Une teneur en eau de 37,2 % [min : 17, max : 58,1]
- Une teneur en matière organique (MO) de 42,1% [min : 20 ; max : 66]

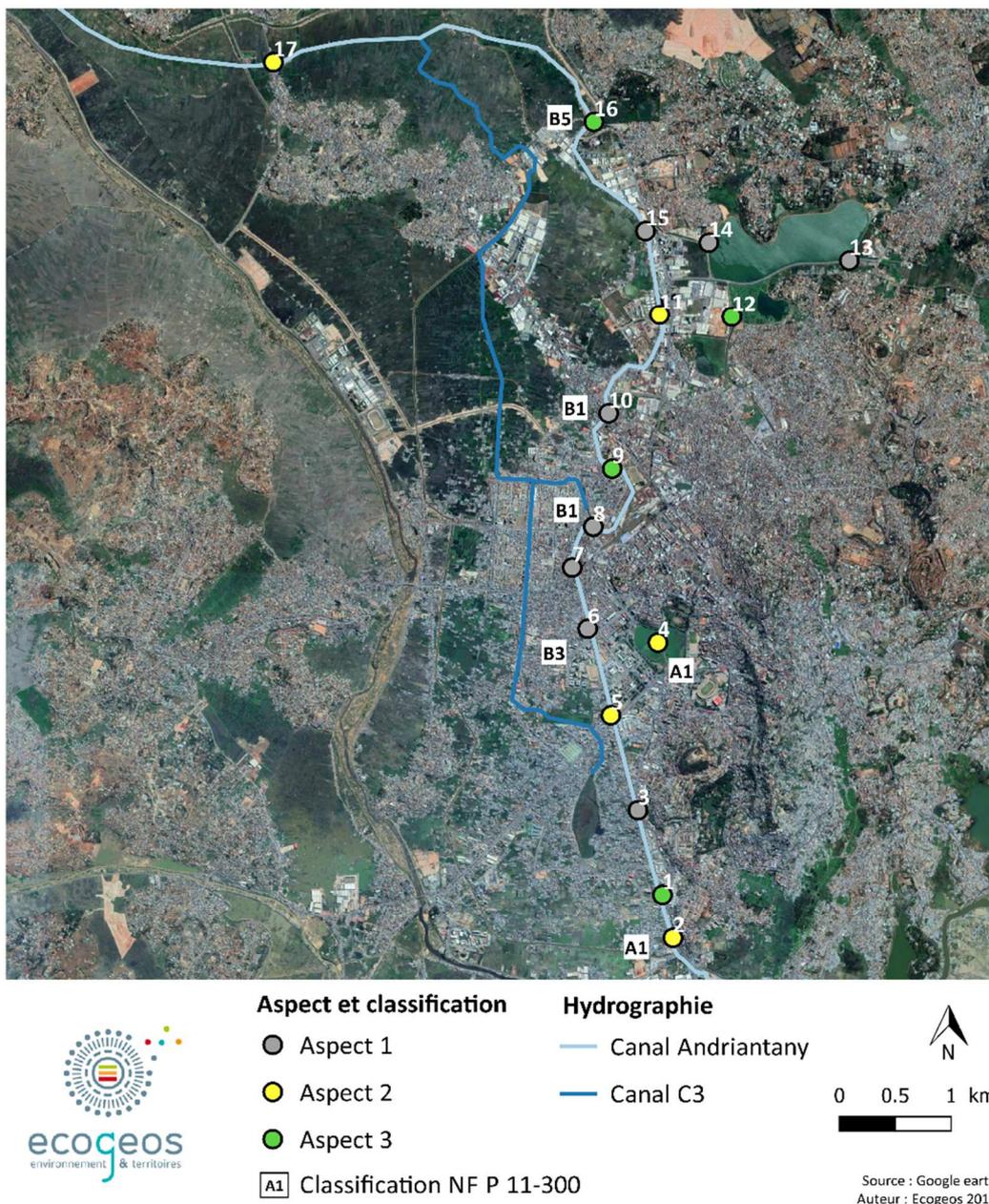


Figure 25- Classification et distribution des échantillons selon leur aspect, teneur en eau et MO

Six échantillons ont fait l'objet d'analyses géotechniques, dont les résultats permettent de classer les sédiments par type de sol suivant la norme NFP 11-300 :

- Les sédiments des échantillons 6B, 8B, et 10B sont assimilés à des sols grossiers, sableux et graveleux.
- Les sédiments de l'échantillon 16B sont des sables graveleux tourbeux.
- Les sédiments des échantillons 2B et 4B sont des limons sableux tourbeux.

Par ailleurs, les analyses de type VBS (Valeur au Bleu de Méthylène) donnent des résultats compris entre 0,1 et 0,55. La valeur VBS des échantillons 6, 8, et 10 sont très proche du seuil de non-sensibilité à l'eau (0,1) : par conséquent, on pourra considérer dans ce cas qu'on est en présence de matériaux en définitive peu sensible à l'eau.

3.1.2 Evaluation du Carbone Organique

Le Carbone Organique Total (COT) a été mesuré sur 12 échantillons (1B, 2B, 4B, 5B, 7B, 8B, 9B, 11B, 12B, 14B, 16B et 17B). Pour 10 d'entre eux, le COT est supérieur à la valeur seuil des déchets inertes des ISDI en France, avec des facteurs de dépassement de 2 au maximum.

Les sédiments échantillonnés présentent des taux de COT en pourcentage de la matière organique compris entre 5% pour l'échantillon 14 et 15% pour l'échantillon 5. Pour comparaison, dans la littérature scientifique (Howard, 1965 ; Dabin, 1970 ; Fitzpatrick, 1983 ; Sikora & Stott, 1996) il est d'usage de considérer que le Carbone Organique représente 58% de la matière organique d'un sol.

Bien que la teneur en matière organique dans les produits de curage se rapproche de celles observées dans les boues de STEP, ce n'est pas le cas du COT. En effet, le COT représente entre 1 et 6% de la matière sèche or dans des boues de station d'épuration, le taux de COT est d'environ 30-40% de la MS (Garcia et al., 1992 ; Diaz-Burgoset al.,1993 ; Ayusoet al.,1996 ; Berna et al.,1998a). La teneur en COT sur matière sèche est plus proche de ce que l'on peut observer dans un sol. Cela montre que les sédiments ne peuvent être considérés comme inertes, tout en restant beaucoup moins biodégradables dans le temps que des boues de STEP ou des déchets ménagers.

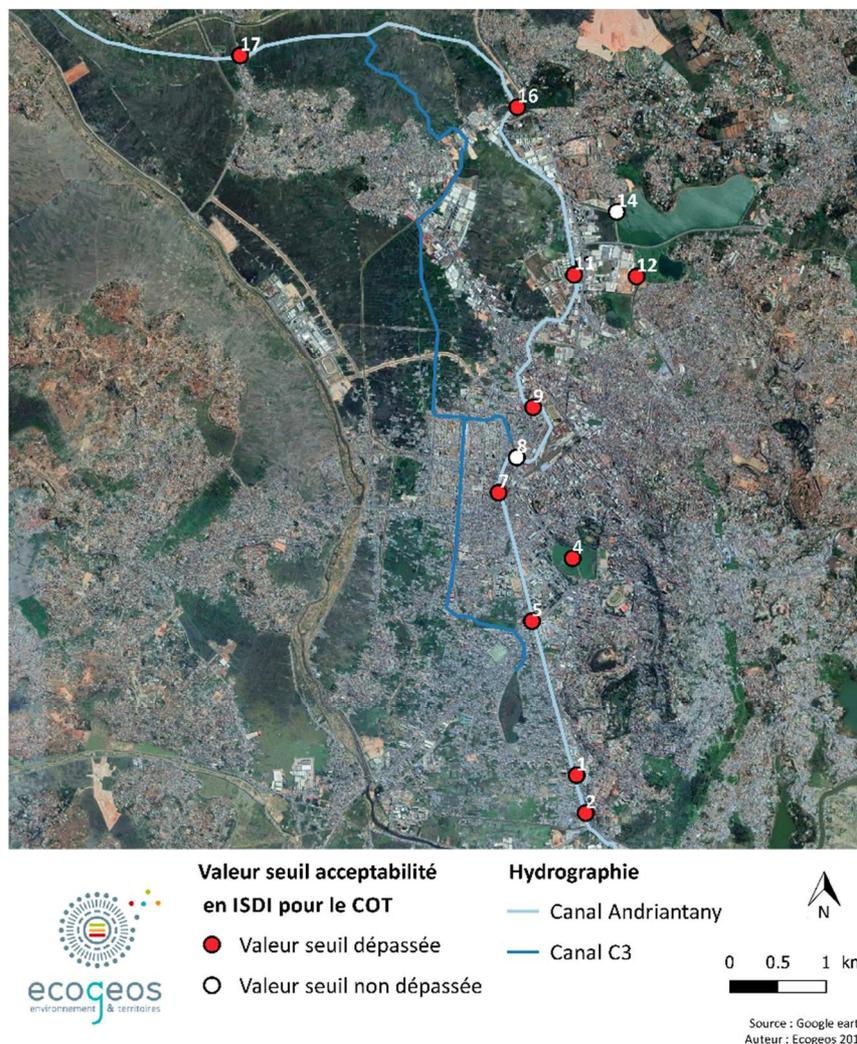


Figure 26. Répartition des échantillons suivant leur teneur en COT

Les résultats des analyses des paramètres physiques sont précisés dans le Tableau 14 ci-dessous.

Tableau 14. Paramètres physiques des échantillons prélevés dans le canal Andriantany et secteurs afférents

Paramètre analysé	Unité	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B
Designation		Pont bvd de l'Europe	Gare Soanierana	Pont Tsena Madera	Lac Anosy	Fokontany Madera	Pont Ex-superette	Pont Bekiraru	Déversoir Ramandraibe	Pont Atohom Adinka
Typographie d'habitat		Urbain-marché	Semi urbain	Semi urbain marché	Lac	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain
Aspect		3	2	1	2	2	1	1	1	3
Paramètres globaux										
Teneur en eau	% mass MB	56,6	47	27,5	49,2	55,1	22,1	32,5	24,1	49,4
Matière sèche	% mass MB	43,4	53	72,5	50,8	44,9	77,9	67,5	75,9	50,6
Matière organique	% mass MS	64	55	33	56	40	25	35	28	61
COT	mg/kg MS	33 000	37 000		35 000	60 000		39 000	21 000	57 000
Granulométrie										
VBS	g de bleu pour 100g		0,39		0,55		0,11		0,1	
Classification sol			A1		A1		B3		B1	
Passant à 80µm	%		54,3		59,8		10,5		9,5	
Paramètre analysé	Unité	10B	11B	12B	13B	14B	15B	16B	17B	
Designation		Pont Salem Antanimena	EPP Aire de Jeux	Marais Masay embouchure amont	Marais Masay Est	Marais Masay Embouchure aval	Fontaine Akouroundrano	Morarano	Amont Pompage C3	
Typographie d'habitat		Urbain	Semi-urbain	Semi urbain	Semi-urbain	Semi-urbain	Rural et Industriel	Rural et Industriel	Rural	
Aspect		1	2	3	1	1	1	3	2	
Paramètres globaux										
Teneur en eau	% mass MB	24,8	42,5	58,10	17,00	17,10	19,50	52,70	38	
Matière sèche	% mass MB	75,2	57,5	41,90	83,00	82,90	80,50	47,30	62	
Matière organique	% mass MS	29	53	66	20	20	24	61	46	
COT	mg/kg MS		37 000	52 000		10 000		39 000	37 000	
Granulométrie										
VBS	g de bleu pour 100g	0,12						0,38		
Classification sol		B1						B5		
Passant à 80µm	%	8,1						29,1		

3.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

3.2.1 Evaluation des éléments traces métalliques (ETM) dans les sédiments

Parmi les ETM présentant une valeur seuil dans le cadre du protocole H14 en termes de contenu global dans un sédiment, le Plomb dépasse la valeur seuil pour 10 échantillons sur 17, le Zinc pour 6 échantillons sur 17, le Cuivre pour deux échantillons sur 17 et le Nickel pour un seul échantillon.

Les échantillons pollués au plomb et au zinc sont présents sur tout le linéaire du canal et pour toutes les typologies d'habitat (rural comme urbain). En moyenne, les dépassements en plomb sont 4,5 fois supérieurs à la valeur seuil du protocole H14. On notera la très forte pollution au plomb du point 16B, avec un niveau 21 fois supérieur à la valeur seuil.

Le zinc a été observé en partie amont du canal, au niveau des prélèvements 1 et 3 mais également pour les prélèvements 8B, 9B, 12B et 16B.

Le point de prélèvement 12B, situé sur le canal Est en amont du marais Masay, est le seul à présenter un dépassement des seuils pour les 4 ETM cités. Il s'agit du seul échantillon avec des traces de nickel qui est utilisé dans les alliages, la fabrication d'aciers inoxydables ou dans les engrais phosphatés. Le facteur de dépassement est de 2,2 pour le Zinc, 2 pour le plomb et de 1,1 pour le cuivre et le Nickel. C'est également dans ce prélèvement que l'on retrouve les concentrations en métaux lourds les plus élevées de tous les échantillons pour l'Aluminium, le Fer, le Cobalt, (pas de valeur seuil), le Chrome et le Mercure (concentrations proches de la valeur seuil), le Nickel et le Zinc (dépassement de la valeur seuil), l'Arsenic (10 fois plus faible que la valeur seuil).

Ce pic d'accumulation semble très localisé car on ne le retrouve pas dans les autres prélèvements du Lac Masay. Il serait toutefois intéressant de réaliser des analyses spécifiques sur le riz produit à proximité du marais Masay, dans les rizières situées à l'aval du point 12B, pour vérifier que ces métaux lourds ne s'y retrouvent pas présents en trop forte concentration.

Au niveau du point 8B, juste à l'aval du déversoir vers le C3, les facteurs de dépassement sont de 5,3 pour le cuivre, et 3,4 pour le plomb. La présence d'un atelier de ferrailage avec des conduites débouchant directement dans l'Andriantany pourrait expliquer le dépassement de la valeur seuil S1 de déclenchement du protocole H14 pour le plomb, le cuivre. Néanmoins, les analyses faites dans le C3 en aval du déversoir présente les mêmes dépassements. Il n'est par conséquent pas exclu que la source de la pollution soit située en amont du déversoir.



Figure 27. Sorties et conduites de rejets d'eaux provenant de l'atelier de feronnerie

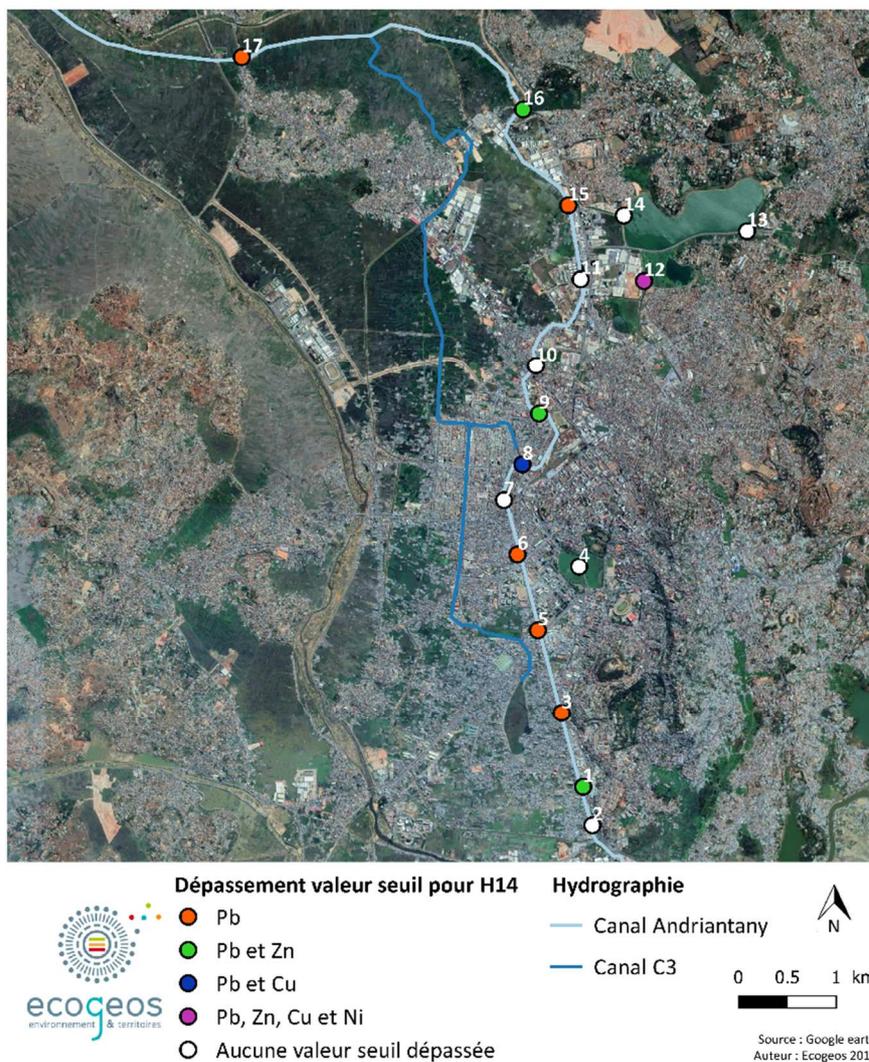


Figure 28. Cartographie des analyses des ETM sur échantillon brut

Concernant le potentiel de lixiviation de ces ETM, seuls l'antimoine et le nickel présentent des valeurs dépassant les seuils autorisés pour une classification en déchet inerte, pour 2 échantillons sur les 17 prélevés (5B et 17B). L'antimoine reste en dessous des limites de détection au sein de la matrice, donc présent en quantités limitées, mais son potentiel de lixiviation apparait proportionnellement élevé puisqu'il dépasse les valeurs seuils des tests de lixiviation. Les dépassements sont présents en zone urbaine (5B) et également en zone rurale (échantillon 17B). L'Antimoine est un élément utilisé comme durcissant dans les alliages, comme ceux à base de plomb et de cuivre, ainsi sa présence peut être liée à la présence de tels alliages retrouvés dans les sédiments.

Concernant les résultats des tests de lixiviation au droit du point 17B, en plus du dépassement vis-à-vis des seuils pour l'Antimoine, les particularités suivantes peuvent être remarquées :

- Il s'agit du seul point pour lequel un dépassement du nickel lixivié est observé alors que sa concentration en éléments traces est inférieure à la moyenne des échantillons.
- C'est le point qui présente les concentrations lixiviées les plus élevées pour presque tous les métaux.
- Les concentrations lixiviées sont proches des valeurs seuils pour le plomb (0,49 mg/kg MS pour une valeur seuil de 0,5 mg/kg MS) et le chrome (0,34 mg/kg MS pour une valeur seuil de 0,5 mg/kg MS).

Le potentiel de lixiviation des deux échantillons les plus pollués en ETM ne présentent aucun dépassement des valeurs seuils.

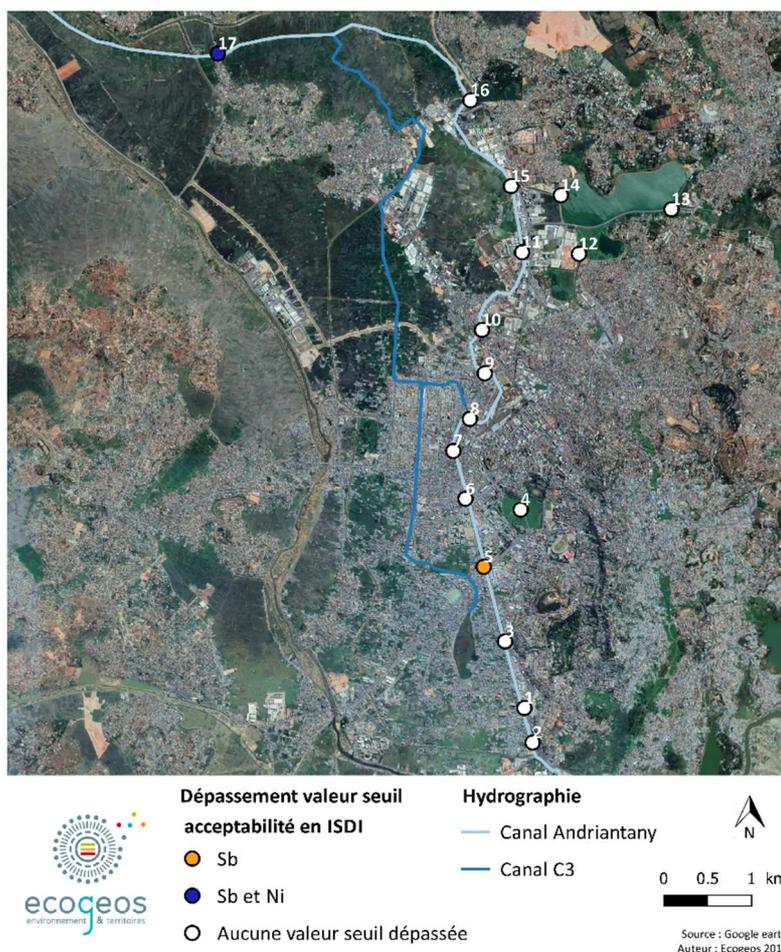


Figure 29. Cartographie des analyses des ETM sur fraction solubilisée

Les résultats de l'ensemble des analyses sur les métaux lourds sont présentés en annexes dans le Tableau 25 et le Tableau 26.

3.2.2 Evaluation de la présence d'hydrocarbures

Comme observé lors des analyses d'octobre 2017, la présence d'hydrocarbures dans les sédiments est importante et répartie tout le long du canal Andriantany. La valeur seuil est dépassée pour la majorité des échantillons. Les seuls échantillons dans lesquels des teneurs faibles en hydrocarbures ont été détectées sont ceux du marais Masay, échantillons « Est » et « embouchure aval ».

Pour l'ensemble des échantillons, les hydrocarbures les plus présents sont les hydrocarbures C16-C40 dits hydrocarbures « lourds ». Cela correspondrait donc cette fois encore à des Gasoils lourds ou des Goudrons (Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes, BRGM, 2001).

A elles seules, les concentrations en hydrocarbures C21-C35 dépassent la valeur seuil d'acceptabilité en ISDI en France pour 10 échantillons sur 17.

Les faibles valeurs des hydrocarbures plus légers peuvent être dues à leur caractère plus volatil.

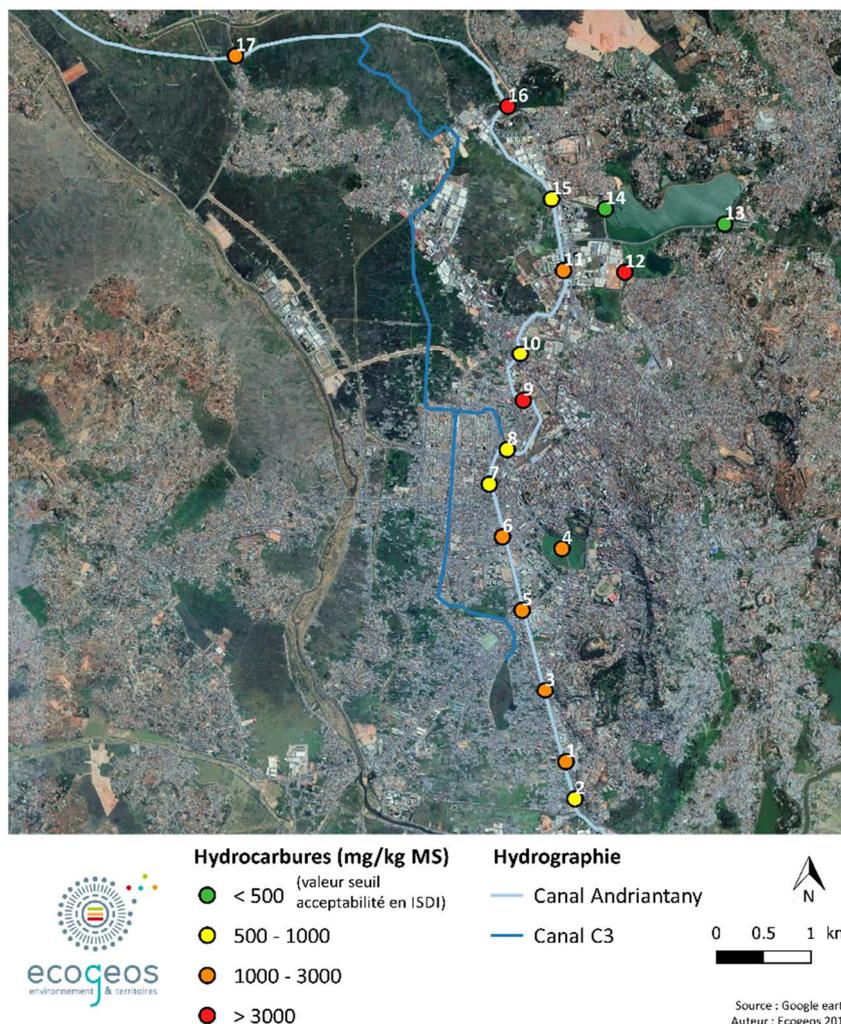


Figure 30. Carte de répartition des hydrocarbures dans les sédiments analysés

Au niveau des points 9B, 12B et 16B, on observe une quantité importante d'hydrocarbures. En effet, les valeurs sont relativement élevées, puisque respectivement 6.8, 15.2 et 6.8 fois supérieures à la valeur seuil pour les déchets inertes en ISDI. Ces données confortent les observations réalisées lors des prélèvements : l'échantillon 12B, qui présente la plus grande quantité observée, a été prélevé à l'aval d'une gare routière de bus et des hydrocarbures étaient visibles en surface.



Figure 31. Traces potentielles d'hydrocarbures en surface au niveau du canal Est

3.2.3 Evaluation des autres paramètres analysés

3.2.3.1 Evaluation de la présence des BTEX

L'analyse des composés organiques BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes) a été réalisée sur 12 échantillons. Seul le Toluène est présent en quantité supérieure à la limite de quantification du laboratoire.

La présence de Toluène dépasse la valeur seuil d'acceptabilité en ISDI uniquement pour l'échantillon 7B qui se situe en amont du déversoir vers le Canal C3.

Une odeur caractéristique avait été décelée lors du prélèvement des échantillons des points 5B, 7B, 10B, 12B, et 16B. Il s'agit des échantillons présentant les concentrations les plus importantes en Toluène (l'analyse du Toluène n'a pas faite pour l'échantillon 10B).

Aucun autre BTEX ou CAV n'a dépassé les seuils de détection du laboratoire.

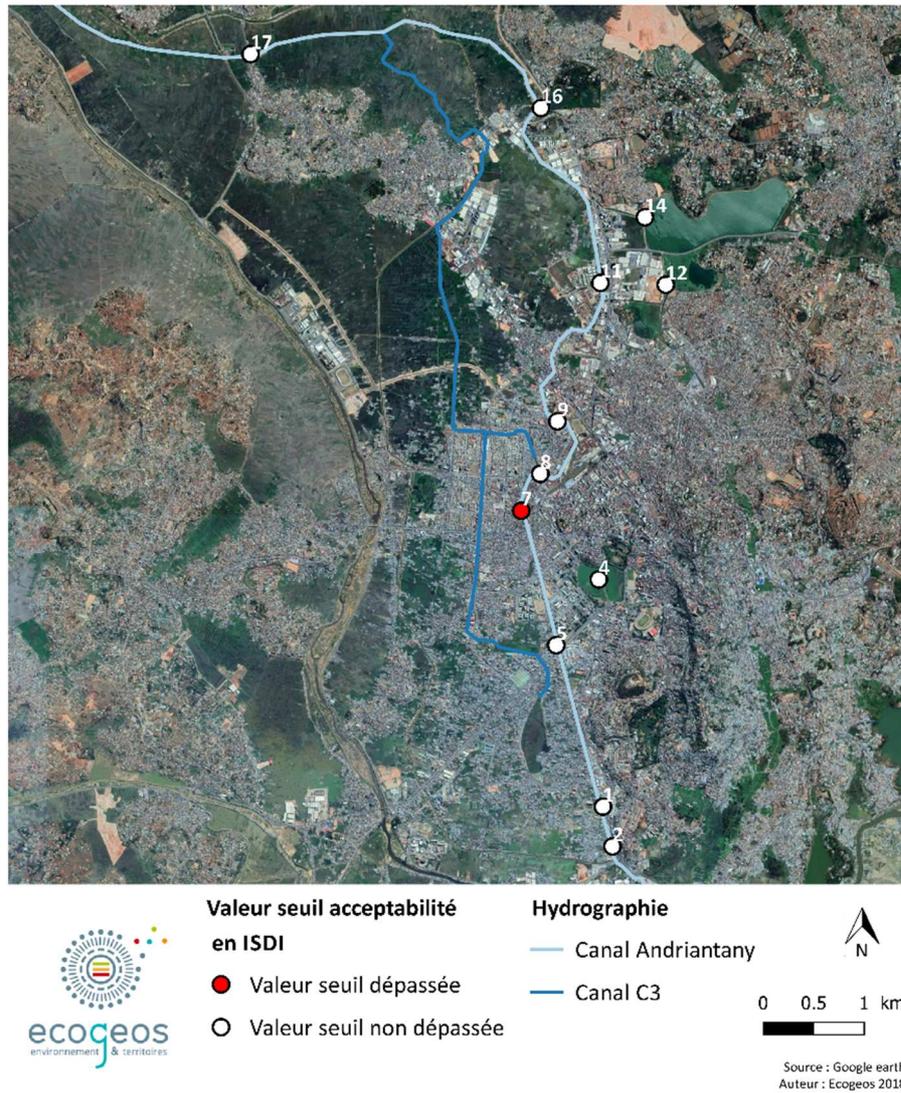


Figure 32. Carte de répartition des BTEX dans les échantillons de sédiments analysés

On peut retrouver le toluène dans plusieurs types d'industries, et avec des utilisations relativement variées (cf. paragraphe 2.2.3.1).

3.2.3.2 Evaluation des dioxines et furanes

Les 17 congénères de dioxines et furanes présentant la plus grande toxicité ont été recherchés dans les échantillons de sédiments 1B, 8B, 12B, et 17B.

L'émission de dioxines dans l'air est principalement liée à des combustions incomplètes (de déchets), à l'industrie métallurgique et sidérurgique et à la pratique de l'écobuage (débroussaillage par le feu) des végétaux sur lesquels des produits phytosanitaires ont été utilisés.

Les dioxines et furanes présents sont en réalité des mélanges contenant plusieurs types de dioxines, qui présentent chacun un degré de toxicité spécifique. Afin de pouvoir exprimer la toxicité globale du mélange, les résultats des analyses réalisées sont présentés en équivalents toxiques calculés à partir des facteurs d'équivalence toxique de l'OMS 2005 :

- Echantillon 1B : PCDD/F-TEQ (OMS 2005) compris entre 451 et 452 ng /kg MS
- Echantillon 8B : PCDD/F-TEQ (OMS 2005) compris entre 7,6 et 9,3 ng /kg MS
- Echantillon 12B : PCDD/F-TEQ (OMS 2005) compris entre 3 et 5 ng /kg MS
- Echantillon 17B : PCDD/F-TEQ (OMS 2005) compris entre 10,5 et 10,7 ng /kg MS

Hormis pour l'échantillon 1B en amont de l'Andriantany, les taux de dioxines et furanes sont relativement bas et aucune valeur ne dépasse les valeurs guide considérées (1 000 ng/kg) en France, en Allemagne et aux Etats Unis.

3.2.3.3 Evaluation des HAP, PCB, et COHV

D'autres paramètres ont été analysés sur les échantillons 1B, 2B, 4B, 5B, 7B, 8B, 9B, 11B, 12B, 14B, 16B et 17B. Ces paramètres sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les Polychlorobiphényles (PCB) et les Hydrocarbures halogénés volatils (COHV). Ces paramètres n'ont pas été détectés dans les échantillons à des quantités supérieures aux seuils de quantification du laboratoire.

3.3 RISQUE D'EFFETS PROBABLES

Pour chaque échantillon du canal Andriantany et des ouvrages connexes, la valeur du risque global a été calculée comme définie dans la partie 1.1.5. et les résultats présentés sur la Figure 33. Les HAP n'ont pas été pris en considération dans le calcul pour les échantillons concernés uniquement par les analyses de type 1.

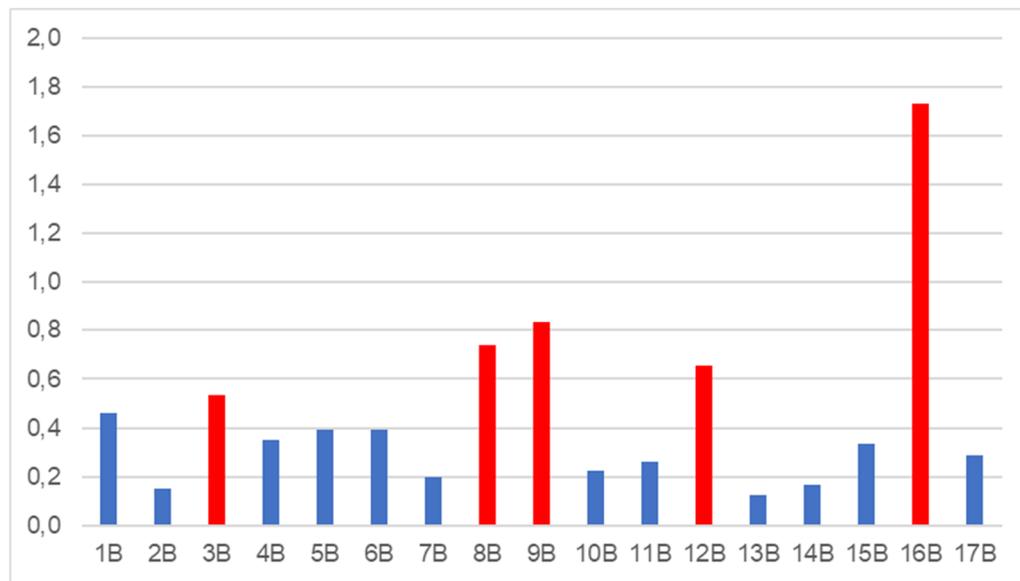


Figure 33. Représentation du risque d'effets probables par échantillon de sédiments analysés

La majorité des échantillons (représentés en bleu sur la Figure précédente) présentent une valeur Q_{PEC} comprise entre 0,1 et 0,5. Ils peuvent être qualifiés de moyennement pollués et présentent un niveau de risque incertain qu'il conviendrait de réévaluer dans l'hypothèse d'un dépôt en remblai ou en casier de stockage en fonction du fond géochimique du site concerné et de la qualité de la barrière de sécurité de fond envisagée (le cas échéant). Quant aux échantillons 3B, 8B, 9B, 12B et 16B ($Q_{PEC} > 0,5$) présentent une toxicité avérée, surtout l'échantillon 16B en raison de sa très forte concentration en plomb.

On peut également noter que seuls les échantillons 2B, 10B et 13B ne présentent aucun quotient de risque unitaire de toxicité supérieur à 0,5. D'une manière générale, les risques d'effets probables sont plus importants et plus probables pour les sédiments de l'Andriantany, du lac Anosy et du marais Masay que pour ceux du canal C3.

En extrapolant, il est possible de considérer que les sédiments de 14 % du linéaire du canal Andriantany présentent un risque global de toxicité avéré et doivent être stockés dans un site de stockage contrôlé. Cette valeur est sûrement sous-estimée car les calculs ont été faits en ne considérant que les points de prélèvement 3B, 8B et 9B. En effet, le point 12B sur le canal Est n'ayant pas de point de comparaison amont ou aval et le 16B étant très isolé, les extrapolations auraient été très hasardeuses. Pour les 86% de linéaire restant, le risque d'effet toxique reste potentiel. Par mesure de précaution et afin de se prémunir de toute pollution incontrôlée, dans l'analyse des alternatives en partie 6, nous avons considéré à ce stade que tous les sédiments présentent un risque et doivent être gérés de façon identique, quelle que soit la zone de curage.

3.4 SYNTHÈSE

A l'issue de ces analyses réalisées au sein de 2 laboratoires français et des caractérisations de déchets des sédiments, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- Du point de vue géotechnique, les analyses effectuées ont permis de mettre en évidence des différences avec la présence de matériaux plus ou moins grossiers et sensibles à l'eau : sols grossiers à forte dominante sableuse et graveleuse autour du déversoir vers le C3, sols avec présence de fines de type sablo-graveleux tourbeux en aval au droit du point 16B et sols plus fins (sablo limoneux tourbeux) sur la partie amont au droit du point 2B et dans le lac Anosy (point 4B).
- Concernant la matière organique, les échantillons de sédiments présentent une teneur en matière organique comprise entre 20 et 66 %, assez élevée. Cette teneur en MO est globalement corrélée avec la teneur en eau des matériaux. Les sédiments avec le taux le plus élevé de MO ont aussi les concentrations en hydrocarbures et COT les plus élevées (9B, et 12B) ou sont composés en partie de tourbes (1B et 16B).
- Concernant le carbone organique total, la teneur en COT est de 3,8 % de la MS, soit légèrement plus que la limite de classement comme déchets inerte (3 %). Cette valeur nous renseigne sur le fait que les sédiments sont certes moins inertes qu'un sol, mais restent bien moins biodégradables que des déchets ménagers ou boues d'épuration.
- Du point de vue de leur composition chimique :
 - Eléments traces métalliques : l'ensemble du linéaire du canal présente des concentrations élevées en Zinc et en Plomb. Deux zones d'accumulation de métaux sont observées avec la présence de cuivre, zinc et plomb au niveau de la jonction avec le canal C3, ETM que l'on retrouve également dans le canal de la Vallée de l'Est au niveau de l'embouchure amont du marais Masay avec en plus la présence de nickel. Cependant, les tests de lixiviation réalisés tendent à montrer que ces substances restent assez peu mobilisables. Bien que présente en faible concentration au sein des sédiments, l'antimoine est la substance la plus sujette à la lixiviation (présence avérée dans les tests de lixiviations issus de deux prélèvements).
 - Du point de vue des hydrocarbures, les valeurs de référence, pour l'acceptabilité en ISDI, sont dépassées pour 15 échantillons sur 17, avec des valeurs pics observées en aval du déversoir vers C3, au niveau de l'embouchure amont du marais Masay, et à l'aval du quartier Alarobia. On ajoutera également que l'IFP (l'Institut Français du Pétrole) considère qu'un produit est pollué s'il contient plus de 1000 mg d'hydrocarbures totaux par kg de matière sèche, ce qui est le cas des échantillons 1B, 3B, 4B, 5B, 6B, 9B, 11B, 12B, 16B et 17B.
 - S'agissant des autres polluants étudiés, ceux-ci ont été très peu observés. Toutefois, la présence de toluène a été identifiée très localement au niveau du point 7B, légèrement en amont de la jonction avec le canal Andriantany.

En définitive, la concentration en polluants chimiques et organiques dans les sédiments de l'Andriantany, du canal de la Vallée de l'Est (embouchure amont du marais Masay), et du lac Anosy présente un niveau moyen à important sur une zone très étendue avec des points localement très pollués en métaux lourds et en hydrocarbures.

4. CONCLUSION SUR L'ANALYSE SEDIMENTAIRE

4.1 MATIERE ORGANIQUE

De manière générale, les concentrations en matières organiques, pour le C3 et l'Andriantany, apparaissent élevées voire très élevées, au-delà de ce qui aurait pu être supposé sur la base des observations visuelles faites en 2016 (pour rappel, sur remblai de sédiments issus du canal Andriantany, après plusieurs mois de dépôt à l'air libre).

Le taux de matière organique retrouvée dans les sédiments (20-66% de MS) correspond plus à des teneurs de boues en sortie de station d'épuration (50-70% de MS), que dans un sol (1-5%). Toutefois, elle semble fortement azotée car la teneur en COT dans la matière sèche est, quant à elle, de l'ordre de ce que l'on peut retrouver dans un sol ou légèrement au-delà, et très basse par rapport aux valeurs classiques des boues de STEP.

4.2 ELEMENTS TRACES METALLIQUES

Les analyses réalisées ont montré que les métaux les plus présents dans les sédiments sont le plomb et le zinc, principalement en milieu urbain sur le C3, et de façon plus généralisée sur l'Andriantany.

Un dépassement des seuils pour le plomb et le cuivre a été observé en aval du déversoir de Ramandraibe dans les sédiments de l'Andriantany (point 8B) et pour le plomb, le cuivre et le zinc dans ceux du C3 (point 9A), néanmoins, le point 7B, situé en amont du déversoir ne montre aucun dépassement. Il semble donc que la source de cette pollution localisée se trouve à proximité du déversoir ou en amont très proche. La Figure 34 montre la localisation de ces points.

Figure 34. Localisation des points de prélèvements autour du déversoir de Ramandraibe



4.3 HYDROCARBURES

Les hydrocarbures sont globalement présents dans les sédiments des principaux ouvrages d'assainissement sur tout Antananarivo. Certains pics d'accumulation ont été identifiés de façon très localisée avec des concentrations en hydrocarbures totaux importantes.

La présence des hydrocarbures dans les sédiments entraîne le déclassement en déchets non dangereux des matériaux de curage. Leur teneur est amenée à diminuer naturellement au cours du temps du fait des phénomènes de biodégradation. Ces derniers restent néanmoins relativement lents, car ce sont les hydrocarbures lourds (nombre élevé d'atomes de carbone) qui ont été retrouvés en majorité. Un brassage et un retournement régulier des matériaux de dragage permettrait de les oxygéner, ce qui favoriserait toutefois le processus de biodégradation.

4.4 PRESENCES SINGULIERES EN TOLUENE

Les résultats des analyses faites sur les sédiments ne révèlent des concentrations en BTEX dépassant les seuils qu'en un point sur le C3 (10A) et en un point sur l'Andriantany (7B). Dans les deux cas, le polluant retrouvé est le Toluène. A l'inverse des résultats en ETM, le Toluène n'est pas présent au niveau du déversoir en lui-même (8B et 9A), mais en un amont sur l'Andriantany, et un peu plus à l'aval sur le C3.



Figure 35. Localisation des points de prélèvements autour du déversoir de Ramandraibe

4.5 DIOXINES ET FURANES

En comparant les résultats des analyses réalisées, on observe que la présence de dioxines et furanes est très localisée dans l'espace et dans le temps. En effet, les échantillons 17B et 16A présentent des résultats très sensiblement différents, bien qu'ils aient été prélevés dans la même zone.

Ainsi, la valeur de l'OMS 2005 PCDD/F- TEQ est de 229 ng/kg MS dans le C3 et de 10,5 à 10,7 ng/kg MS dans l'Andriantany. De même on retrouve la molécule 2,3,7,8-TCDD en quantité importante dans le C3 alors qu'elle n'a pas été détectée au sein des prélèvements réalisés dans l'Andriantany.

De manière générale, comparé aux résultats des échantillons du C3, la molécule 2,3,7,8 TCDD n'a pas été détectée dans les échantillons prélevés dans l'Andriantany sauf dans l'échantillon 17B au sein duquel elle est présente en quantité très faible.

4.6 PESTICIDES ET AUTRES POLLUANTS ANALYSES

Les trois molécules de pesticides recherchées, les COHV, les HAP et les PCB n'ont pas été détectées ou ont été retrouvées en quantités très légèrement supérieures aux seuils de détection du laboratoire.

Aucun dépassement du seuil de déclenchement du protocole H14 ni d'acceptabilité en ISDI n'a été relevé.

5. CARACTERISTIQUES DES MACRODECHETS DANS LES BOUES DE CURAGES

5.1 EVALUATION DE LA PRESENCE DE MACRODECHETS

Lors de la campagne de caractérisation des macrodéchets, les produits de curage ont été triés en quatre familles principales selon 3 séparations granulométriques (encombrants ; macrodéchets 3 cm-30cm ; sédiments et déchets < 3cm) et la fraction cailloux-gravats a été classée à part.

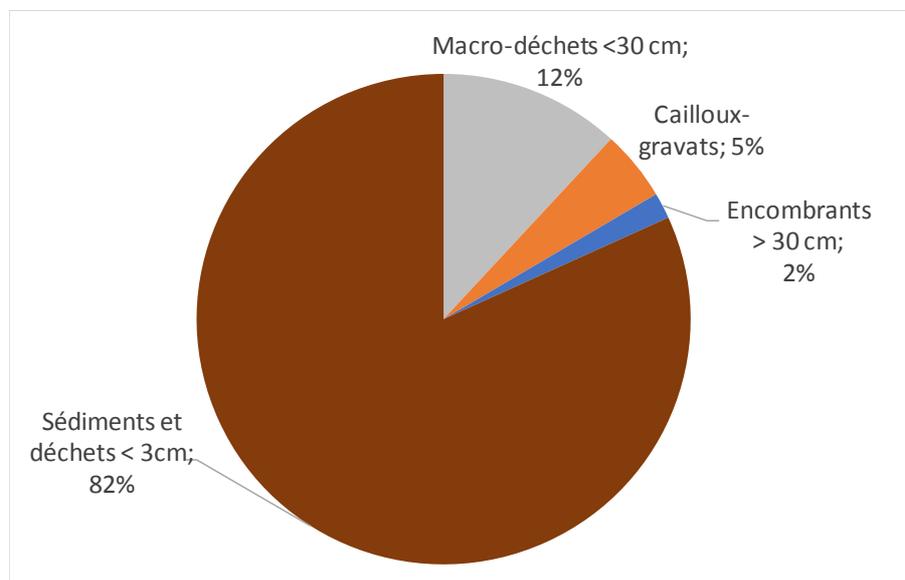


Figure 36. Composition globale des produits de curage

Les 14 échantillons caractérisés sont en moyenne constitués de 82 % de sédiments, de 5 % de cailloux et gravats, de 2 % d'encombrants et de 12% de macrodéchets.

Les sédiments et déchets de moins de 3 cm sont donc majoritaires dans les échantillons caractérisés, mais leur pourcentage varie fortement d'un échantillon à un autre. Ils représentent ainsi 99 % de l'échantillon S13 situé sur le C3 contre seulement 48 % dans l'échantillon S9 situé à proximité du dépôt de déchets du canal de la Vallée de l'Est. L'intervalle de confiance (IC 95%) est de 7,6% pour les sédiments.

Une hétérogénéité importante a également été observée quant à la présence de cailloux-gravats dans les échantillons, leur proportion allant de 0 % pour 5 échantillons à 31 % pour l'échantillons S3. Pour cette fraction, l'intervalle de confiance (IC 95%) est de 4,2%.

Les encombrants ont été rencontrés de façon sporadique lors des prélèvements : en effet, des encombrants ont été retrouvés dans moins de la moitié des échantillons. De plus gros échantillons sont présents très localement dans les canaux sans pouvoir être caractérisés (carcasse de voiture, bac métallique de collecte des déchets...).

5.2 COMPOSITION DES MACRODECHETS

La figure ci-dessous présente la répartition moyenne par catégorie de matériaux des macrodéchets ainsi que les intervalles de confiance à 95 %.

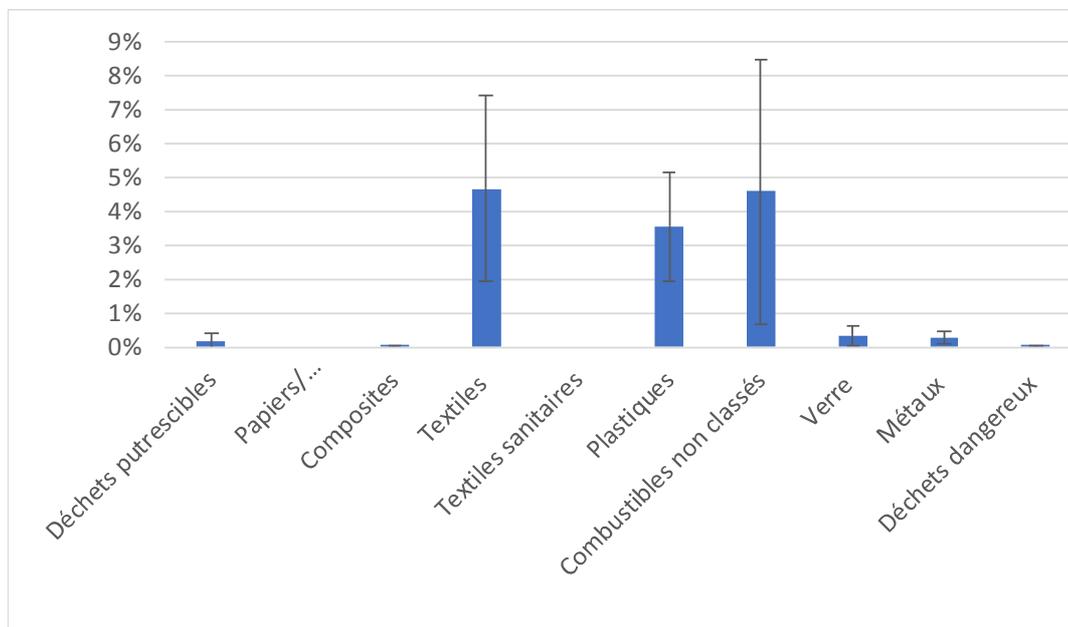


Figure 37. Composition moyenne des déchets contenus dans les produits de curage et intervalles de confiance

Les intervalles de confiance (IC 95%) obtenus lors de cette campagne sont relativement élevés, ce qui révèle une hétérogénéité très importante d'un échantillon à l'autre.

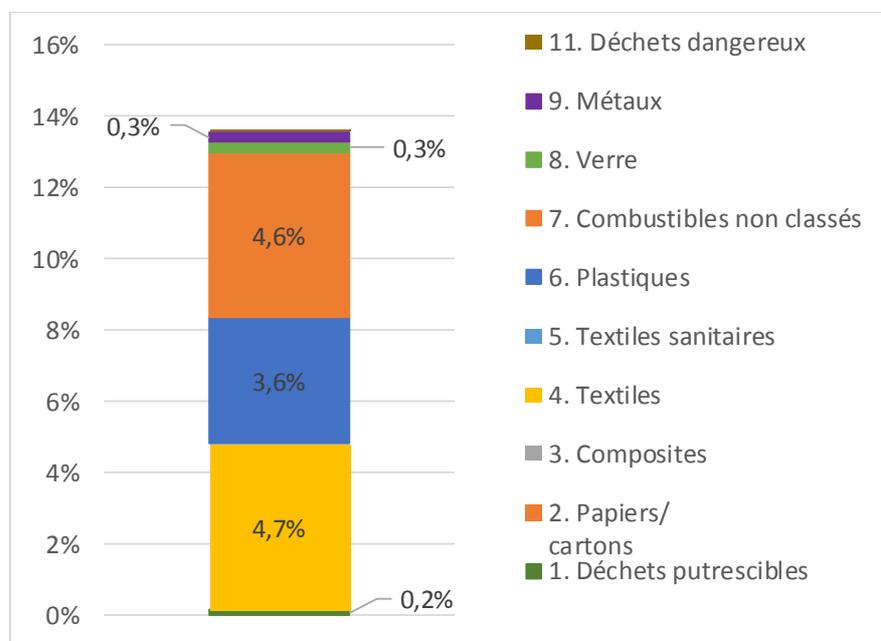


Figure 38. Répartition des catégories de macrodéchets caractérisés

Les déchets les plus présents dans les produits de curages sont :

- Les textiles qui représentent 4,7 % des produits de curages en moyenne avec des écarts allant 0 % pour l'échantillon S10 Canal de la Vallée de l'Est-Aval marais Masay à 13,3 % pour l'échantillon S4 Ex-Superette. Ces résultats peuvent être légèrement surestimés de par l'adhésion des éléments fins au textile.



Figure 39. Exemples de déchets textiles

- Les plastiques qui représentent en moyenne 3,6 % des sédiments, ils sont constitués à parts presque identiques de sacs plastiques (1,3 %), d'autres plastiques souples (0,9 %) et d'autres plastiques durs (1,1 %). Comme pour les textiles, ces résultats peuvent être légèrement surestimés de par l'adhésion des éléments fins.



Figure 40. Exemples de déchets plastiques

- Les combustibles non classés pour 4,6 % en moyenne. Ils sont constitués de bois et charbon (1,4 %) que l'on retrouve dans presque tous les échantillons, de pneumatiques (0,9 %) présents occasionnellement mais dont la masse unitaire est plus élevée et de chaussures (0,2 %) retrouvées dans près de la moitié des échantillons. Enfin, les autres combustibles, mélange d'objets combustibles non classables, représentent la majorité du flux (2,4 %), ce qui s'explique, par la grande quantité d'amas de fils, bouts de bois, textiles emmêlés (photo ci-dessous) dans l'échantillon S9, et qui augmente la part de cette catégorie assez peu présente dans les autres échantillons.



Figure 41. Exemple de déchets combustibles

Enfin, dans l'ensemble des échantillons caractérisés, on a retrouvé :

- Peu de déchets putrescibles (0,2 %) sous la forme de déchets verts présents uniquement dans 2 échantillons, surtout dans l'échantillon S9 où ils représentent 1,8 %
- Occasionnellement des métaux (0,3 %) et du verre (0,3 %)
- Une faible quantité de déchets composites et de déchets dangereux (<0,01 %). On notera toutefois que concernant les déchets dangereux, une pile a été retrouvée dans deux échantillons.
- Aucun textile sanitaire (couches, serviettes hygiénique, lingette) ni papiers-cartons dans les sédiments caractérisés.

5.3 EVALUATION DE L'IMPACT DE LA TYPOLOGIE ET DU CANAL

5.3.1 Résultats par canaux

Les caractérisations ont été réalisées sur les canaux C3, Andriantany et Vallée de l'Est en amont du marais Masay.

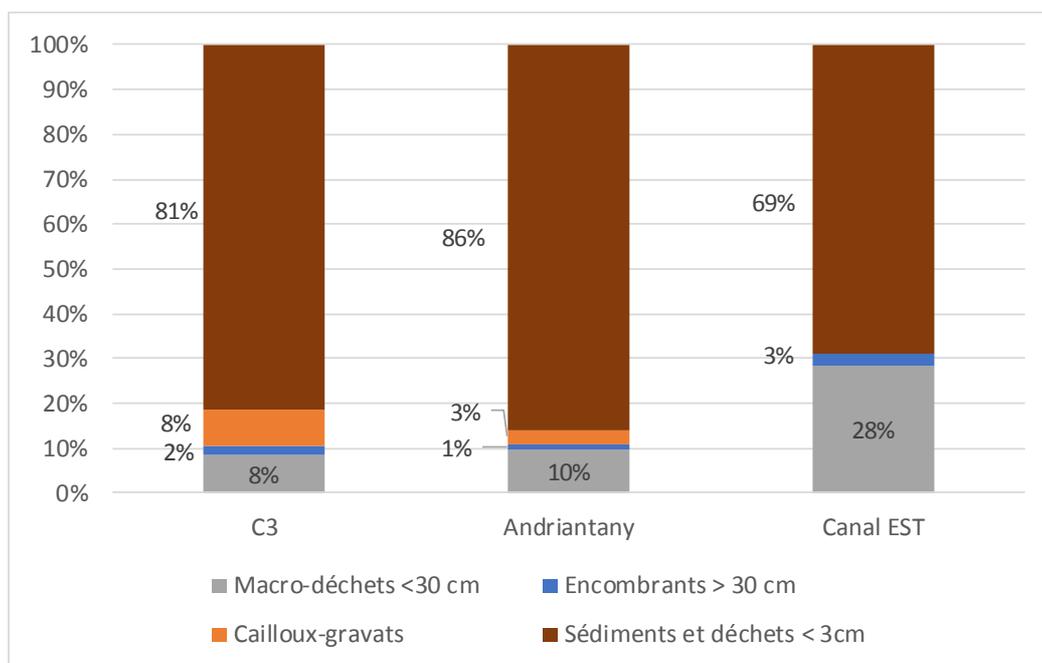


Figure 42. Composition des produits de curage caractérisés par canal

Le pourcentage de macrodéchets et d'encombrants est sensiblement identique entre le canal C3 et l'Andriantany. On note la présence un peu plus élevée de gravats-cailloux dans le C3, en raison de l'échantillon S3 qui présente un taux élevé de pierres.

A première vue, les produits de curage du canal de la Vallée de l'Est semblent être constitués de trois fois plus de déchets, encombrants et macrodéchets dans les boues de curages que les deux autres canaux. Néanmoins, la forte différence entre les deux échantillons prélevés dans ce canal et le nombre limité de caractérisations dans ce canal ne permettent pas de conclure à ce sujet (la moyenne du pourcentage de macrodéchets du canal Est présente un IC 95% de 34%). En effet, ce taux très élevé reflète plus l'échantillon 9 que l'état global du canal.

La Figure 43 ci-après présente la répartition des macrodéchets dans les produits de curages caractérisés par canal.

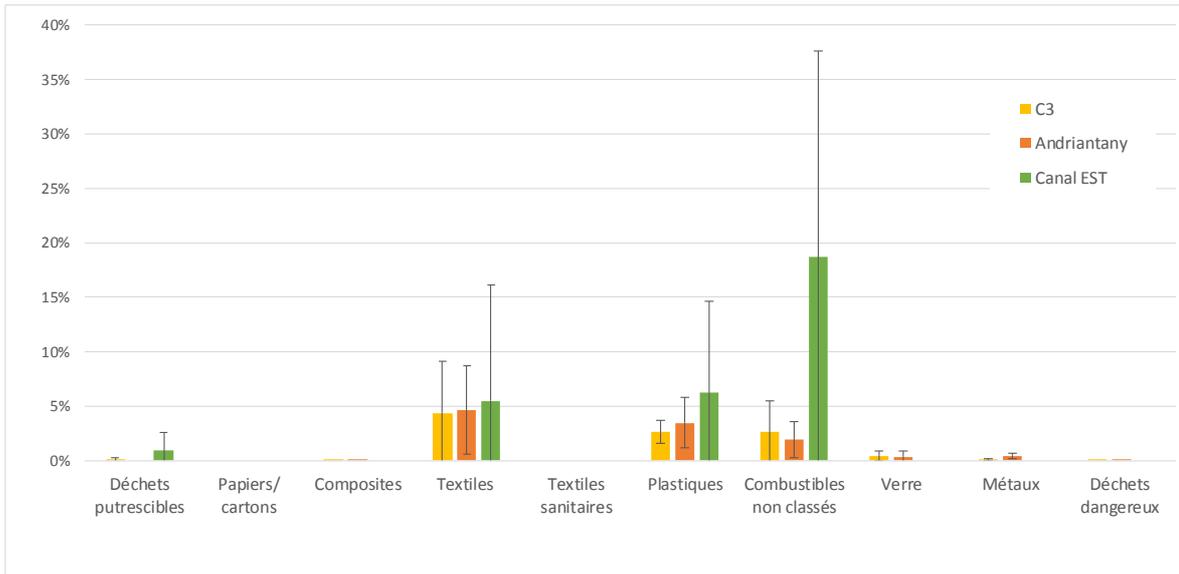


Figure 43. Composition moyenne des déchets contenus dans les produits de curage et intervalles de confiance

Pour les trois canaux, les catégories de déchets les plus présentes sont les textiles, le plastique et les combustibles non classés. L'hétérogénéité des échantillons du canal de la Vallée de l'Est est ici encore plus flagrante à la lecture des indices de confiances et semble valider l'hypothèse précédemment évoquée.

5.3.2 Résultats par typologie de présence de déchets

L'analyse faite dans ce chapitre cherche à identifier une corrélation entre la présence de déchets en surface et sur les berges (suivant les typologies définies précédemment au chapitre 1.2.1) avec la quantité de macrodéchets en mélange dans les sédiments.

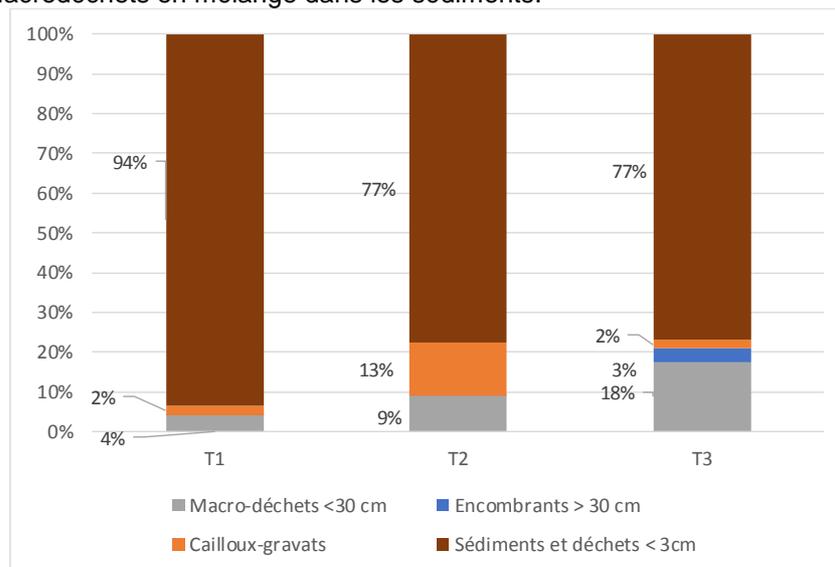


Figure 44. Composition des produits de curage caractérisés suivant la présence de déchets anthropiques

Il semble que la présence de déchets d'origine anthropique visibles depuis les berges soit en corrélation avec les déchets en mélange dans les sédiments. En effet, comme cela est visible sur la Figure 44 les encombrants ne se retrouvent que dans les échantillons prélevés dans des zones de typologie T3, et le pourcentage de déchets dans les sédiments augmente avec les observations de déchets en surface.

Bien que les indices de confiances (IC95 %) soient encore relativement élevés pour conclure catégoriquement, la tendance précisée plus haut est observée pour presque toutes les catégories de déchets. En effet, la Figure 45 montre très bien cette tendance, dont les différences les plus marquantes concernent :

- Les textiles qui représentent respectivement 1 % et 1,7 % des sédiments des typologie 1 et 2, alors qu'on en retrouve 7,8 % dans ceux provenant de la typologie 3,
- Les combustibles qui sont présents en quantités infimes dans les sédiments de la typologie 1 (0,3 %), et plus présents dans les typologies 2 (3,9 %) et dans la typologie 3 (7,3 %)

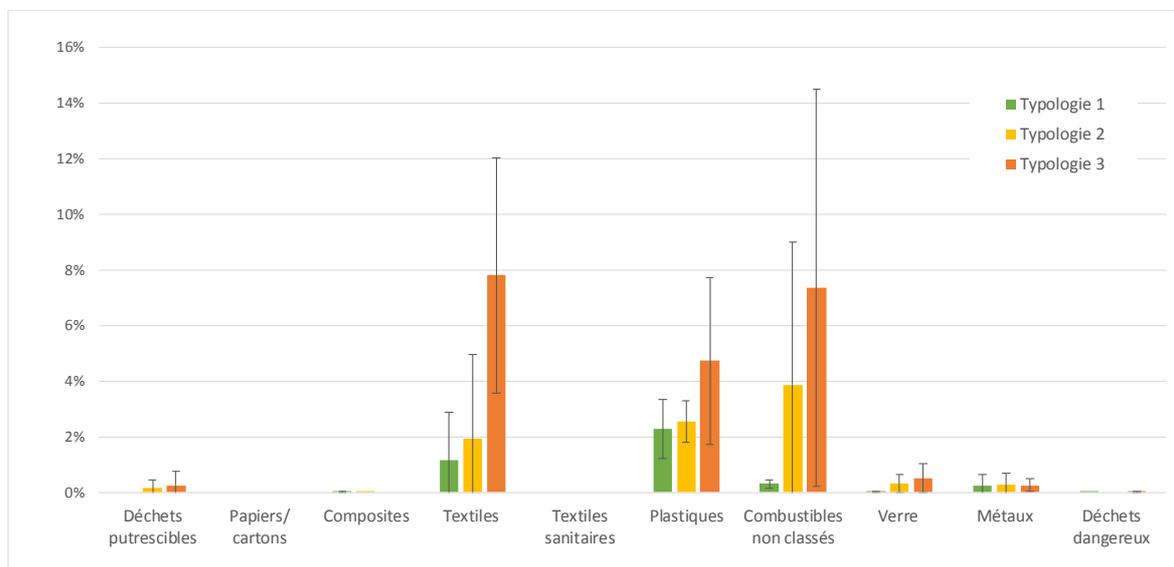


Figure 45. Composition moyenne des déchets contenus dans les sédiments et intervalles de confiance

A partir de la répartition massique en déchets (de densité supposée de 0,8), sédiments (de densité supposé de 1,6) et gravats-pierres (de densité voisine de 2), dans les matériaux de curage, il a été possible d'estimer leur densité moyenne pour chaque typologie observée (par calcul de moyennes pondérées).

Dans le chapitre qui suit, les densités suivantes ont été utilisées pour les matériaux de curage:

- Densité (Typologie 1) : $= 0,8 \times 4,0\% + 1,6 \times 93,6\% + 2 \times 2,4\% = 1,58$
- Densité (Typologie 2) : $= 0,8 \times 8,9\% + 1,6 \times 77,5\% + 2 \times 13,7\% = 1,58$
- Densité (Typologie 3) : $= 0,8 \times 20,9\% + 1,6 \times 76,9\% + 2 \times 2,1\% = 1,44$

5.4 EXTRAPOLATION AU LINEAIRE TOTAL DES CANAUX C3 ET ANDRIANTANY

Les 5 tronçons du canal Andriantany ont été répartis selon les 3 typologies prédéfinies après évaluation de la présence de déchets anthropiques visibles depuis les berges, comme cela a été fait précédemment.

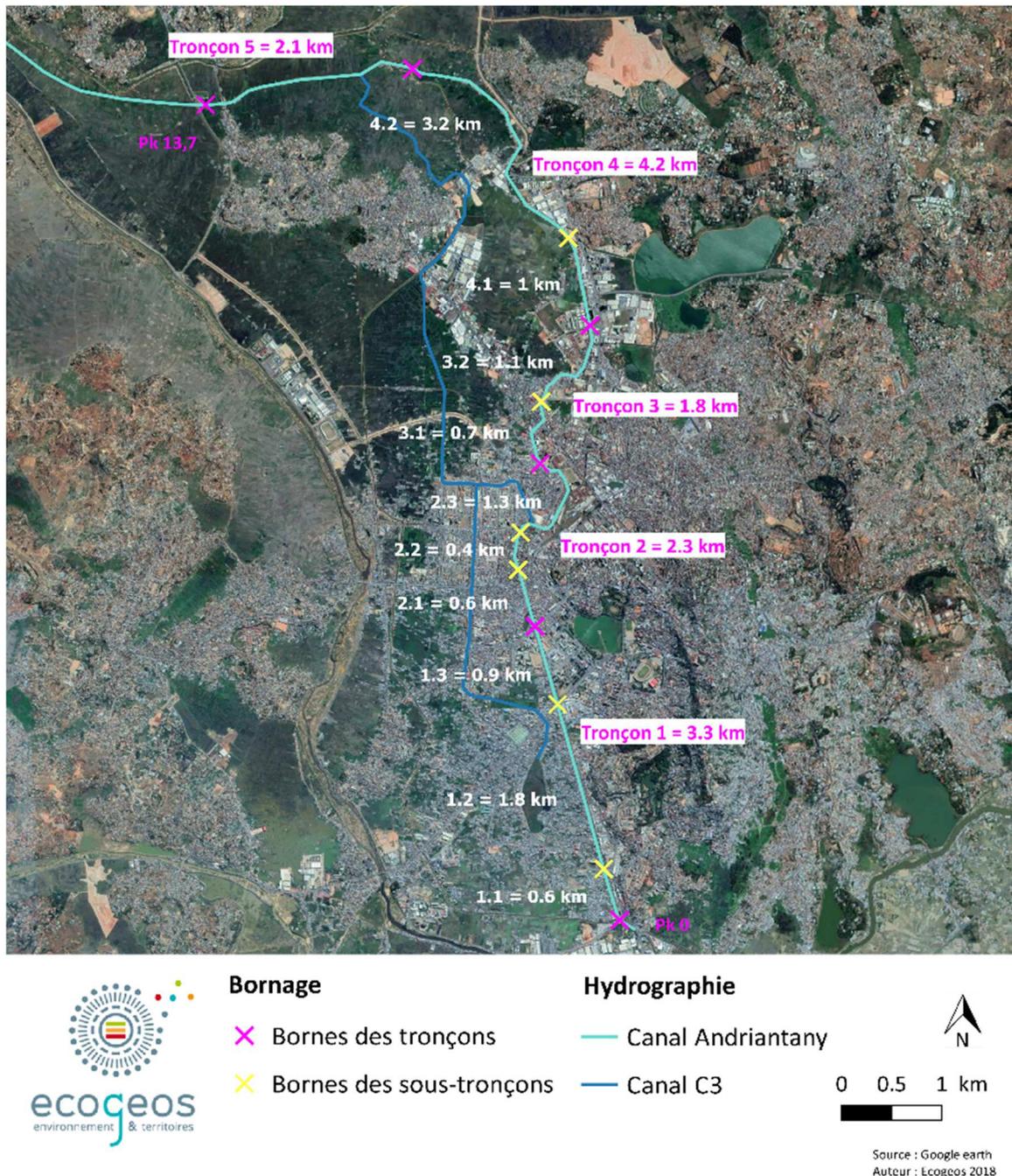


Figure 46. Cartographie des tronçons et sous-tronçons de l'Andriantany

Cette répartition est présentée dans le Tableau 15 et se base sur les observations réalisées lors de l'intervention de terrain de décembre 2017.

Tableau 15. Répartition du linéaire par portion de tronçon de canal

Portions de canal	Longueur (m)	Typologie T1 / T2 / T3 par portion de canal		
		% T1	% T2	% T3
Tronçon 1				
1.1	600	80%	10%	10%
1.2	1800	80%	10%	10%
1.3	900	0%	100%	0%
Tronçon 2				
2.1	600	50%	0%	50%
2.2	400	0%	100%	0%
2.3	1300	0%	0%	100%
Tronçon 3				
3.1	700	0%	0%	100%
3.2	1100	0%	20%	80%
Tronçon 4				
4.1	1000	0%	100%	0%
4.2	3200	100%	0%	0%
Tronçon 5				
5.1	2100	100%	0%	0%

Ainsi au total, la typologie 1 représente 7 500 ml de canal surtout à l'aval de l'Andriantany, en zone rurale, la typologie 2 et la typologie 3 représentent respectivement 2 800 ml et 3 400 ml principalement sur le secteur centre-amont.

Connaissant la composition, la densité et l'apport annuel moyen des matériaux de curage par tronçon et par typologie de déchets, il est possible d'extrapoler les résultats des caractérisations à l'ensemble de l'Andriantany, du PK0 au niveau de sa séparation avec le canal GR (Pont Ankadimbahoaka) jusqu'au PK 13,7 lorsqu'il rejoint le C3 à la station de pompage.

Chaque année, on peut estimer qu'environ 30 700 m³ de sédiments (49 000 tonnes), 1 400 m³ (2 700 tonnes) de pierres-gravats, et 7 400 m³ de déchets (5 900 tonnes) se retrouvent au fond du canal, modifiant fortement son écoulement. L'apport annuel des déchets dans les produits de curage de l'Andriantany est estimé principalement à 1 900 tonnes de textiles, 1 770 tonnes de plastiques et 1 850 tonnes de déchets combustibles. Le détail par tronçon est donné dans le Tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16. Estimations massiques et volumétriques des produits de curage de l'Andriantany

	Sédiments		Déchets		Pierres-gravats	
	Tonnage estimatif (T)	Volume estimatif (m ³)	Tonnage estimatif (T)	Volume estimatif (m ³)	Tonnage estimatif (T)	Volume estimatif (m ³)
Tronçon 1	13 487	8 429	1 077	1 346	965	483
Tronçon 2	10 286	6 429	2 125	2 656	552	276
Tronçon 3	6 671	4 169	1 677	2 096	314	157
Tronçon 4	13 677	8 548	801	1 001	766	383
Tronçon 5	4 958	3 099	214	268	127	64
Total	49 079	30 674	5 894	7 367	2 725	1 363

5.5 ÉVALUATION DE LA COMPOSITION DES DECHETS FLOTTANTS

Ce paragraphe s'intéresse aux résultats des caractérisations réalisées sur les 3 échantillons de déchets flottants.

Les déchets flottants caractérisés sont composés à part presque égale de macrodéchets de moins de 30 cm facilement identifiables (48 %) et de fines résiduelles (47 %) composées de déchets de moins de 3 cm en mélange avec d'autres déchets (ficelles, DV, fibres...) qui sont difficilement séparables.

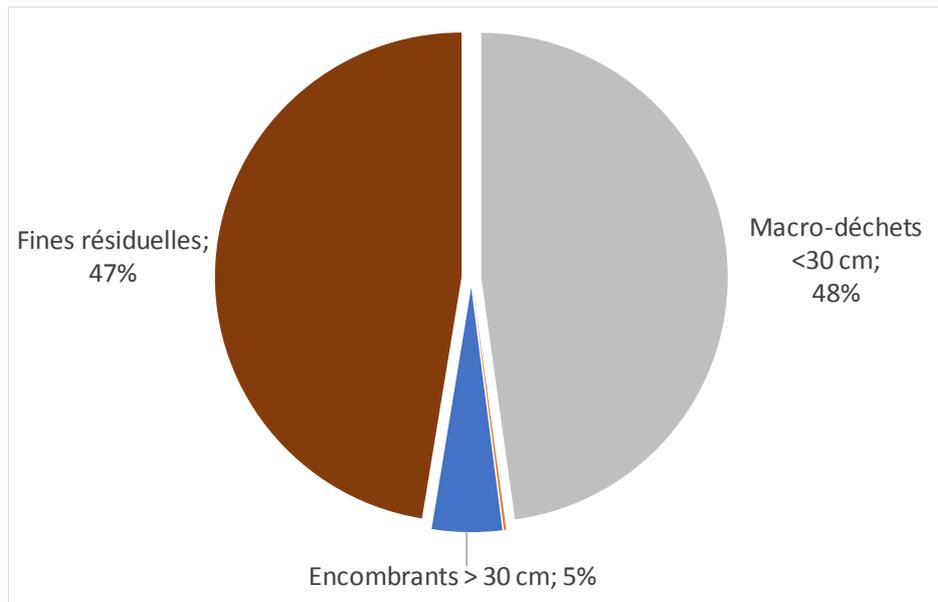


Figure 47. Composition moyenne des déchets flottants caractérisés

Quelques encombrants, (grands cartons et objets en bois) ont également été identifiés dans ces déchets (5 %).

Les IC95% sont encore une fois très élevés pour la caractérisation de ces 3 échantillons en raison de leur hétérogénéité, et du nombre limité de prélèvements. Seules quelques tendances sont données en analysant les résultats.

Comme dans le cas des sédiments, les déchets flottants les plus présents (cf Figure 48) sont :

- les combustibles non classés dans lesquels on retrouve encore des bouts de bois (10 %), des chaussures (4 %) et d'autres combustibles (6,5 %),
- les plastiques qui sont en majorité constitués de sacs plastiques (10 %), d'autres plastiques souples (4 %) et de bouteilles et flacons (3 %).

Des déchets qui n'étaient pas présents, ou en quantités très limitées dans les sédiments semblent faire partie des déchets flottants en surface. C'est le cas des :

- Déchets putrescibles, constitués de déchets de jardin (2,6 %) mais également de déchets et restes alimentaires (2,8 %)
- Papiers cartons (3 %), sous la forme par exemple d'un grand carton ondulé et gorgé d'eau, retrouvé dans l'échantillon F3,

- Textiles sanitaires (4 %), plusieurs couches culottes ont été identifiées dans les échantillons S2 et S3

Les textiles (1,1 %) sont retrouvés en quantités bien plus faibles que dans les sédiments. Hormis s'ils restent accrochés à des objets flottants, ils ont tendance à couler au fond des canaux.

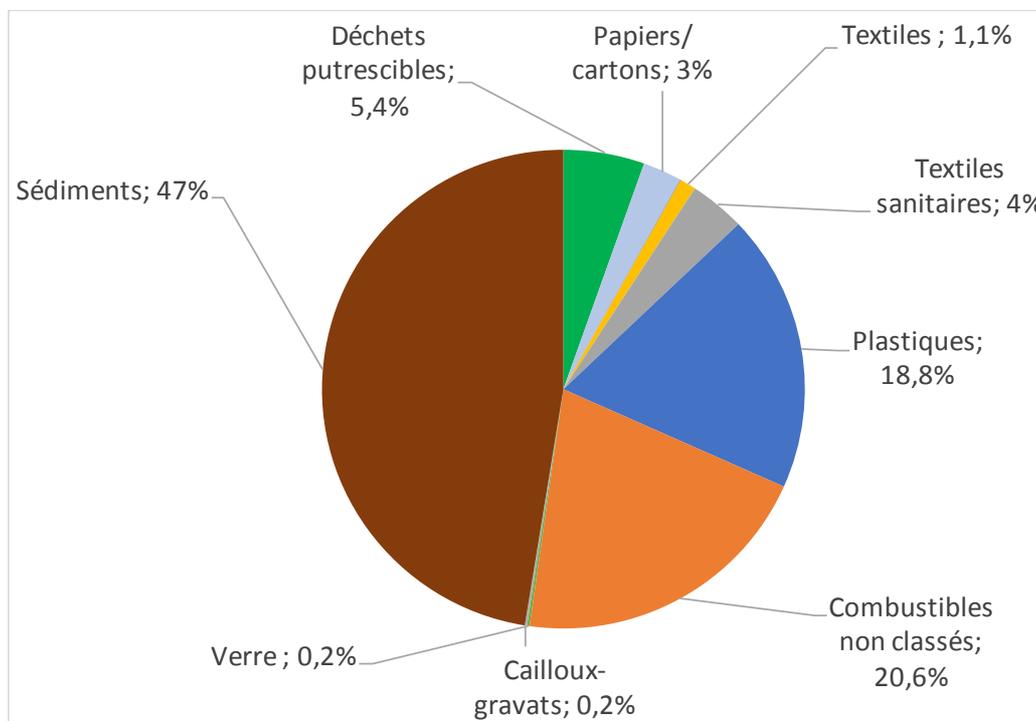


Figure 48. Composition moyenne des déchets flottants caractérisés

Comme attendu les déchets de densité plus élevée (verre, cailloux/gravats, et métaux) sont absents des déchets flottants ou présents de façon négligeable.

Bien que cela ne ressorte pas de manière flagrante dans les résultats (3 % en masse des déchets flottants), car il s'agit de déchets très légers, les bouteilles en plastiques représentent la grande majorité du volume comme le montrent les photos prises sur l'Andriantany, au niveau des points d'accumulation des déchets.



Figure 49. Déchets flottants à Tsena Madera et au pont de Soeur Tsaramasay sur l'Andriantany

5.6 SYNTHÈSE

Suites aux opérations de caractérisation des produits de curage, les points suivants, concernant la présence de déchets en mélanges avec les sédiments, peuvent être mis en avant :

- En moyenne, les boues de curage contiennent 13,6 % de déchets (encombrants et macrodéchets). Les déchets les plus présents sont les textiles, les plastiques et d'autres déchets combustibles.
- Il ne semble pas y avoir de différence notable en termes de quantité, ni de composition des déchets entre les canaux C3, Andriantany et Est.
- Bien que les déchets flottants soient différents des déchets qui coulent et s'accumulent au fond des canaux. La présence de déchets d'origine anthropique visibles des berges du canal est bien révélateur de la quantité moyenne de déchets présente en mélange avec les sédiments.

En extrapolant les résultats des caractérisations des produits de curage aux apports annuels qu'ils représentent, on estime qu'en plus des 30 000 m³ de sédiments qui se déposent chaque année au fond de l'Andriantany, on retrouve 6 800 m³ de macrodéchets (5 400 T). Cela correspond à près de 20 % en volume des boues de l'Andriantany.

6. ANALYSE DES ALTERNATIVES DE GESTION DES SEDIMENTS

6.1 PRESENTATION DES ALTERNATIVES ETUDIEES

Le devenir des produits de curage a donné lieu à une réflexion approfondie de manière à investiguer toutes les pistes possibles. Cinq grandes solutions ont été envisagées :

- Alternative « E1 » : Valorisation matière avec réutilisation des matériaux extraits en voirie, en remblayage de carrière ou en valorisation agricole (épandage ou compostage).
- Alternative « E2 » : Incinération.
- Alternative « E3 » : Stockage sur la décharge d'Andralanitra.
- Alternative « E4 » : Stockage sur un site alternatif (à identifier).
- Alternative « E5 » : Stockage dans la plaine et gestion des lixiviats en circuit fermé avec retour des lixiviats dans le milieu originel.
- Alternative « E6 » : Prétraitement dans la plaine et traitement différencié des matières triées.

L'analyse de ces alternatives avait pour but de mettre en avant les avantages et inconvénients de chacune avec pour objectif de valider leur faisabilité et viabilité au regard des critères environnementaux, sociaux et technico-économiques.

6.2 ALTERNATIVE « E1 » : VALORISATION MATIERE

Plusieurs solutions de valorisation ont été envisagées : le remblaiement routier, l'utilisation agricole en composante ou épandage. Du point de vue théorique, ces solutions présentent en effet potentiellement un intérêt environnemental et social en proposant des moyens de recycler localement les déchets émis par le projet.

Néanmoins dans le cadre des déblais de curage du C3 et de l'Andriantany, ces solutions de valorisation nous semblent fortement compromises au regard des analyses physico-chimiques réalisées :

- Les sédiments se caractérisent tout d'abord par des matières sableuses ou limoneuses présentant un taux de matière organique relativement élevé. Cela signifie que sous pression et sous l'effet du temps (dégradation), les matériaux vont être assez fortement compressibles et donc instables face aux contraintes. Cette caractéristique empêche par conséquent d'envisager leur réutilisation en remblai routier.

- Les sédiments sont ensuite altérés sur le plan physique. Les prélèvements ont mis en évidence une pollution physique, plus ou moins importante suivant les secteurs et la présence d'activité humaine. En effet, les sédiments sont recouverts régulièrement de macro-déchets ménagers de densité et taille hétérogène très souvent « mêlés » à la matrice boueuse (tissus, plastiques, etc.). Ces matériaux anthropiques en quantité importante bloque la possibilité de les utiliser en épandage à moins de mettre en place des outils de tri amont sur une plateforme dédiée (ex. : dégrilleurs), inexistante a priori à ce jour sur Antananarivo, et délicat à mettre en place sur ce type de matériau (pas de retour d'expérience équivalent localement).
- Enfin, compte de tenu de la charge polluante présente au sein des sédiments (à l'exception de quelques zones limitées), il semble difficile de les envoyer vers n'importe quel filière de valorisation matière.
- Quant aux macrodéchets, ils ne sont pas présents en quantités suffisantes et ne présentent pas un intérêt économique suffisant pour justifier la mise en place d'un tri mécanique afin de les extraire. De plus ces opérations pourraient entraîner un risque pour la santé des travailleur au vu des polluants présents dans les sédiments.

Au regard de ces caractéristiques physiques et chimiques, ils nous apparait donc irréaliste d'envisager une revalorisation matière des sédiments et boues de curage.

La seule solution envisageable consisterait à utiliser les sédiments pour le remblaiement de certaines zones basses qui ne sont pas de nature à recevoir des aménagements urbains, tout au moins à court terme. Cela pourrait toutefois être envisagé uniquement sur des zones dégradées sur le plan environnemental, c'est-à-dire ne présentant aucun enjeu concernant le milieu récepteur (ni fond géochimique de qualité, ni végétation ou habitats sensibles) ou le contexte socio-culturel (absence de sites patrimoniaux, absence de conflits fonciers, absence de constructions à venir).

6.3 ALTERNATIVE « E2 » : INCINERATION

Au vu des caractéristiques des produits de curage extraits des canaux étudiés (forte teneur en eau et donc faible PCI ne permettant pas une combustion adaptée) et de l'absence de prestataire local à même d'assurer l'entretien d'un incinérateur respectant des normes strictes de rejet dans l'atmosphère pour un coût acceptable, la solution d'un traitement thermique des sédiments et déchets en mélange apparait sans intérêt et doit être dès à présent rejetée.

6.4 ALTERNATIVE « E3 » : STOCKAGE DES DECHETS AU SEIN DE LA DECHARGE D'ANDRALANITRA

Comme mentionné précédemment, les sédiments du canal C3 présentent un niveau de pollution moyen, avec notamment la présence d'Eléments Trace Métalliques (ETM) et d'Hydrocarbures (HC). Les sédiments de l'Andriantany et du canal Est présentent une pollution plus importante et plus diffuse en ETM et HC. Leur dépôt en décharge pourrait donc être susceptible de générer des lixiviats de mauvaise qualité susceptibles d'altérer la qualité des sols et des eaux dans la zone de la décharge.

Rappelons néanmoins que des sédiments présentant des concentrations voisines en plomb et en zinc ont déjà été observés sur plusieurs lieux en Belgique et en France (affluent du Lot, Etang de Berre, ...). L'origine de ces deux substances métalliques est généralement anthropique : en l'occurrence dans le cas d'Antananarivo, elles peuvent provenir d'activités et/ou sources que l'on retrouve à proximité du canal : ateliers de réparation automobile (galvanisations au zinc), marchés de recyclage (batteries, piles), stations essence, eaux usées, etc.

Par ailleurs, les ETM mesurés au sein des sédiments ont un faible potentiel de lixiviation. Le principal risque de pollution additionnel concerne par conséquent la pollution aux hydrocarbures. Les HC concernés sont principalement des HC C10-C40, qui sont peu volatils, et le toluène (chaîne carbonée plus courte). Il faut également noter de possibles pollutions en dioxines et furanes, en raison de résidus de combustion non contrôlés tel les brulis de végétaux, qui sont très localisés.

Enfin, au regard de la circulation des eaux, du contexte hydrogéologique sur la décharge et de l'absence de confinement étanche en périphérie du site, il est vraisemblable qu'une fois au fond de la décharge, le transfert de ces polluants (dilués dans les lixiviats accumulés dans le fond du massif de déchets) s'effectuera selon un mode d'écoulement préférentiel de subsurface. Ce mécanisme est d'ores et déjà visible en aval immédiat de la décharge : des lixiviats rejoignent les champs (rizières, parcelles de maraichage) bordant le site formant même par endroits des petites résurgences. Cela permet d'émettre l'hypothèse que les eaux souterraines sous les alluvions au niveau de la plaine et des bas-fonds seront relativement protégées contre les pollutions bactériologiques et organiques car le niveau argilo-limoneux-tourbeux est imperméable et limite les infiltrations.

Mais la qualification de l'impact reste incertain en l'absence de données précises sur le milieu récepteur au droit de la décharge. Si le choix d'Andralanitra était confirmé sur le moyen / long terme, il conviendrait de (1) réaliser des analyses complémentaires afin d'évaluer l'impact précis sur la qualité des lixiviats et (2) de caractériser les options de gestion associées (collecte et traitement des lixiviats). Aussi, l'accès aux déchets se trouverait être réduit pour les chiffonniers compte tenu des surfaces de stockage accrues, des risques sanitaires encourus et de la nécessité de définir une zone de sécurité élargie face aux risques d'instabilité des talus du site.

6.5 ALTERNATIVE « E4 » : STOCKAGE SUR UN AUTRE SITE

Compte tenu des contraintes techniques liées à la décharge d'Andralanitra, une solution de stockage sur un site alternatif peut être envisagée. En effet, bien que les sédiments caractérisés ne satisfassent pas à la définition d'un déchet inerte selon l'arrêté français du 12 décembre 2014 relatif aux installations de stockage de déchets inertes (ISDI), des adaptations des valeurs seuils pour certains paramètres peuvent être envisagées. L'article 6 de l'arrêté en question stipule en effet que « concernant les ISDI ... après justification particulière et sur la base d'une étude visant à caractériser le comportement d'une quantité précise d'un déchet dans une installation de stockage donnée et son impact potentiel sur l'environnement et la santé, les valeurs limites à respecter par les déchets peuvent être adaptées par arrêté préfectoral. Cette adaptation pourra notamment être utilisée pour permettre le stockage de déchets dont la composition correspond au fond géochimique local ».

Ainsi, un site alternatif nous paraît pouvoir être recherché. Deux grands types de sites pourraient être envisagés :

- Un site déjà pollué ou exempt de ressources en eau où pourraient être entreposés les sédiments sans contraintes majeures ;
- Un site non pollué au droit duquel la solution consisterait à créer un casier étanche avec une barrière de sécurité de fond de type naturelle (couche d'argile) et/ou synthétique (géomembrane).

La deuxième solution nécessite la sélection d'un lieu de stockage qui reposerait sur l'évaluation de plusieurs critères de sélection, dont notamment l'existence d'une étanchéité naturelle, l'hydrogéologie du site, le fond géochimique local ou encore la valeur socio-économique et culturelle de la parcelle étudiée. Le principal risque de transfert de pollution étant lié à la production de lixiviats, le critère le plus contraignant concerne l'hydrogéologie du site. Il conviendrait de limiter au maximum les transferts vers d'éventuelles nappes captées ou des réseaux de surface. Par ailleurs, compte tenu que les seuils définis dans le cadre du protocole H14 l'ont été dans un contexte européen (sur la base de teneurs moyennes en polluants représentatifs de sols de l'Europe), il conviendrait de déterminer la nature du fond géochimique local. Ainsi, des mesures réalisées sur les sites candidats permettraient d'évaluer la charge polluante au regard du contexte local.

La faible teneur en COT dans les sédiments (plus faibles que pour des OMR), les nuisances les nuisances vis-à-vis des riverains seraient limitées (peu de dégagement d'odeurs et/ou de gaz), essentiellement liées au transfert des déchets (camions). Afin de limiter encore plus la biodégradabilité des boues, l'extraction des macrodéchets pourra être évaluée d'un point de vue technico-économique. En effet, cette action présenterait l'avantage de limiter les dégagements gazeux à partir de ces déchets moyennement biodégradables (textiles, bois, plastiques...) mais également de réduire de manière non négligeable le volume de matériaux de curages à enfouir.

Enfin la biodégradabilité des sédiments et déchets mêlés et l'évolution de leur matière organique (à l'état partiellement solide et liquide) étant difficilement prédictible, ce point devra être suivi avec attention.

D'autres critères environnementales et sociales sont à prendre en compte, notamment les effets potentiels associées à l'ouverture d'un ou plusieurs sites de dépôts de déchets :

- La destruction potentielle de végétation ou d'habitat sensibles.
- L'empiètement sur des terres ayant une valeur socio-culturelle (ex. : tombeaux).
- Les conflits d'usages ou des conflits fonciers avec la population locale lorsque que le terrain se trouve au droit ou à proximité de parcelles présentant une valeur économique (ex. : cultures).

La question du traitement des lixiviats collectés en fonction du foncier disponible et des caractéristiques des matières ressuyées (présence possible de métaux en faible concentration et présence d'hydrocarbures et de matières azotées en plus forte concentration) est également un point nécessitant une attention spécifique. Des essais pilotes pourraient être envisagés pour caractériser les meilleurs solutions.

6.6 ALTERNATIVE « E5 » : STOCKAGE DANS LA PLAINE ET GESTION DES LIXIVIATS EN CIRCUIT FERME AVEC RETOUR DANS LE MILIEU ORIGINEL

La dernière option consisterait à créer, moyennant l'existence de terrains disponibles à proximité des canaux curés (a priori envisageable pour les produits de curage du C3, moins évident en revanche pour le canal Andriantany), un mécanisme de gestion des boues en circuit fermé dans la plaine. Une zone de ressuyage serait créée en bordure du canal dont les boues seraient prélevées afin de permettre leur ressuyage in situ. Les lixiviats issues de ce ressuyage pourraient ensuite être renvoyées directement dans le canal adjacent.

Cette solution permet de limiter ainsi les contraintes liées à la gestion des jus du ressuyage. En revanche elle oblige à créer une emprise dans la plaine entraînant potentiellement :

- Une perturbation du fonctionnement hydraulique de la zone aval (réduction de la surface d'évacuation des crues et donc un impact sur les écoulements et le risque inondation) ;
- Une réduction des terres agricoles (rizières) ;
- L'attrait opportuniste de riverains qui verraient dans cette zone un site d'installation potentiel ;
- Une pollution potentiellement de la zone aval par des molécules encore faiblement présentes dans le milieu. Les résultats des analyses de sédiments ont en effet mis en évidence que les concentrations en éléments chimiques sont plus importantes au niveau des secteurs les plus urbanisés.

Il pourrait être envisagé que cette zone de dépôts soit réutilisée ensuite dans le cadre d'une planification urbaine cohérente. Les matériaux pourraient en effet être ressuyés en environ 6 à 12 mois (à confirmer) permettant ensuite d'envisager certains aménagements. Néanmoins comme évoqué précédemment, les matériaux curés étant de nature compressible, ils devraient faire l'objet d'une étude d'investigation géotechnique avant toute construction afin de déterminer le type de fondation nécessaire. De plus, ces matériaux devraient être recouverts par d'autres matériaux afin d'améliorer la portance du sol et assurer l'isolement des sédiments vis-à-vis des riverains.

Pour finir, des opérations de séparation granulométrique ou de retrait des macrodéchets pourraient éventuellement être mis en place, de façon semblable à ce qui était fait en amont de l'Andriantany lors des opérations de curage de la CUA menées en décembre 2017. Ceci aurait pour avantage de réduire les quantités de matériaux à stocker. Toutefois, en l'absence d'incitation économique (du fait de l'absence de valeur marchande des macrodéchets), cette option reste incertaine.

6.7 ALTERNATIVE « E6 » : PRETRAITEMENT DANS LA PLAINE ET TRAITEMENT DIFFÉRENTIÉ DES MATIÈRES TRIÉES

En dernier lieu, une solution mixte « E6 » associant un stockage provisoire des produits de curage (zone de ressuyage primaire) et un procédé de tri / séparation dans la plaine avec un traitement différencié des différentes fractions (confinement des fractions fines polluées en décharge contrôlée et valorisation en remblai des fractions intermédiaires) pourrait être envisagé. Plusieurs schémas de pré-traitement sont possibles, en fonction de la disponibilité ou non d'équipements de tri (dégrilleur, trommel, hydrocyclone) à confirmer. Cette alternative, qui pourrait être étudiée plus en détail dans le cadre du projet PRODUIR, présente toutefois des exigences élevées en termes organisationnelle, logistique et économique, susceptibles de freiner sa mise en œuvre.

6.8 SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DES ALTERNATIVES

Six solutions ont été étudiées au regard de la qualité physico-chimique des sédiments, boues et macro-déchets en mélange. L'analyse individuelle et comparative effectuée met en avant les éléments suivants :

- Au regard de critères techniques les **valorisations matière (E1) et thermique (E2)** ne semble pas opportunes et ne sont donc pas retenues comme des solutions pertinentes.

- **L'envoi des sédiments à la décharge d'Andralanitra (E3)** est envisageable car il s'agit d'un site déjà disponible. Mais la gestion appropriée des lixiviats sur le site nécessiterait, dans le cadre d'un stockage des produits de curage non seulement pour les travaux d'urgence mais aussi à moyen / long terme, des études complémentaires compte tenu de l'absence d'un diagnostic précis sur l'état du site et des risques de pollution avérés. En outre, elle nécessiterait probablement la mise en place de moyens de traitement a priori inexistants sur le grand Tana. Enfin, elle réduirait l'accès au site pour le stockage des déchets ménagers et pour les chiffonniers.
- La solution de **site alternatif (E4)** permet de partir sur un nouveau site davantage « maitrisable ». Si des sites fonciers sont identifiés, cette solution semble devoir être privilégiée.
- Deux dernières **alternatives (E5 et E6)** permettraient de réduire pour partie voire intégralement les contraintes techniques relatives à la collecte et au traitement des lixiviats. Ces deux alternatives présentent néanmoins des limitations liées à l'existence de terrains disponibles à proximité immédiate des canaux, aux impacts potentiels sur l'environnement en cas de gestion des lixiviats en circuit fermé ou encore à la faisabilité de la mise en place de process de pré-traitement en vue d'un traitement différencié des fractions fines, intermédiaire et grossière des produits de curage.

ANNEXES

ANNEXE 1. Liste des analyses réalisées dans le cadre de projets analogues et/ou de projets de recherche

Groupe	Cible	Paramètres analysés dans le cadre du programme PIAA (2016)	Paramètres complémentaires analysés dans le cadre d'autres projets traitant de sédiments
1	Analyses physiques	Humidité sur brut	
		Matière organique	
2	Métaux	Arsenic (As)	Argent (Ag) (3)
		Cadmium (Cd)	Etain (3)
		Chrome (Cr)	Baryum (Ba) (1)(3)
		Cuivre (Cu)	
		Plomb (Pb)	
		Mercure (Hg)	
		Nickel (Ni)	
		Cobalt (Co)	
		Sélénium (Se)	
		Zinc (Zn)	
		Aluminium (Al)	
		Manganèse (Mn)	
		Molybdène (Mo)	
		Fer (Fe)	
		Antimoine (Sb)	
		Arsenic (As)	
		Cadmium (Cd)	
		Chrome (Cr)	
Cuivre (Cu)			
3	Biphényles Polychlorés	PCB n°28	
		PCB n°52	
		PCB n°101	
		PCB n°138	
		PCB n°153	
		PCB n°180	
		PCB n°118	
Somme PCB			
4	Pesticides Organo-chlorés (POC)		DDTS (5)(1)(3)
			Chlordanes (3)
			Dieldrin (1)(3)
			Hexachlorobenzene (HCB) (5)(3)
			Hexachlorocyclohexane (HCH) (5)(3)
			Aldrin (1)(3)
4	Pesticides Organo-Phosphorés (POP)		Endrin (1)(3)
			Bromophos-ethyl (3)
			Bromophos-methyl (3)
			Chloropyrifos-ethyl (3)
			Chloropyrifos-méthyle (3)
			Diazinon (3)
			Dichlorvos (3)
			Ethion (3)
			Fénitrothion (3)
			Malathion (3)
			Ethyl parathion (3)
	Parathion-methyl (3)		

Groupe	Cible	Paramètres analysés dans le cadre du programme PIAA (2016)	Paramètres complémentaires analysés dans le cadre d'autres projets traitant de sédiments
5	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	1-Methylnaphtalene	Perylene (2)
		2-Methylnaphtalene	Benzo(e)pyrene (2)
		Acénaphthène	Benzo(b)fluorene (2)
		Acénaphthylène	Biphényl (2)
		Anthracene	1-Methylphenanthrene (2)
		Benzo(a)anthracene	2,3,5-Trimethylnaphtalene (2)
		Benzo(a)pyrene	2,6-Dimethylnaphtalène (2)
		Benzo(g,h,i)perylene	2-Methylnaphtalene (2)
		Benzo(b)fluoranthene	
		Benzo(k)fluoranthene	
		Chrysene	
		Dibenz(a,h)anthracene	
		Fluoranthene	
		Fluorene	
		Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	
		Naphtalene	
		Phenanthrene	
		Pyrene	
Somme PAHs			
6	Benzène Toluène Éthylbenzène Xylène (BTEX)	Benzene	
		Toluène	
		Ethylbenzène	
		o-Xylène	
		m-, p-Xylène	
		Cumène	
		Mésitylène	
		o-Ethyltoluène	
		m-, p-Ethyltoluène	
		Pseudocumène	
7	Composés Organiques Halogénés Volatils (COHV)	Bromodichlorométhane	1,1,1-Trichloroéthane (3)
		Dibromochlorométhane	1,1,2-Trichloroéthane (3)
		Hexachloroéthane	1,1-Dichloroéthane (3)
		Trans-1,3-dichloropropène	1,2-Dibromoéthane (3)
		Tribromométhane	1,1-Dichloroéthylène (3)
		1,1,2,2-Tetrachloroéthane	1,2-Dichloroéthane (3)
			1,2-Dichloropropane (3)
			1,3-Dichloropropane (3)
			Chloroforme (3)
			Cis 1,2-dichloroéthylène (Z) (3)
			Cis 1,3-dichloropropylène (Z) (3)
			Dichlorométhane (3)
			Tétrachloréthylène (3)
			Tétrachlorure de carbone (3)
			Trichloréthylène (3)
			Trans 1,2-dichloroéthylène (3)
			Trans 1,2-dichloropropylène (3)
	Bromoforme (3)		
	Bromochlorométhane (3)		
8	Hydrocarbures	Indice hydrocarbure C10-C40	
9	Dioxines – polychlorobenzodioxines et polychlorobenzofuranes (PCDD/F)		2,3,7,8-TCDD (1)(3)
			1,2,3,7,8-PeCDD (3)
			1,2,3,4,7,8-HxCDD (3)
			1,2,3,6,7,8-HxCDD (3)
			1,2,3,7,8,9-HxCDD (3)
			1,2,3,4,6,7,8-HpCDD (3)
	OCDD (3)		

Groupe	Cible	Paramètres analysés dans le cadre du programme PIAA (2016)	Paramètres complémentaires analysés dans le cadre d'autres projets traitant de sédiments
			2,3,7,8-TCDF (1)(3)
			1,2,3,7,8-PeCDF (3)
			1,2,3,4,7,8-HxCDF (3)
			1,2,3,6,7,8-HxCDF (3)
			1,2,3,7,8,9-HxCDF (3)
			1,2,3,4,6,7,8-HpCDF (3)
			2,3,4,7,8-PeCDF (3)
			2,3,4,6,7,8-HxCDF (3)
			1,2,3,4,6,7,8,9-HpCDF (3)

- (1) Minnesota Pollution Control Agency, 2017, *Managing Stormwater Sediment Best Management Practices Guidance*.
- (2) Gouvernement Haïtien, avec l'appui de la Banque mondiale (BM), 2016, *Projet de Développement Municipal et de Résilience Urbaine (DMRU) issu de San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board, 2000, Beneficial Reuse of Dredged Material*.
- (3) BRL, 2017, *projet en cours à Haïti*.
- (4) OPSAR commission, 2002, *JAMP Guidelines for Monitoring Contaminants in Sediments*.
- (5) Zhang et al. 2016, *Organochlorine Pesticides in Sediments around Chaohu Lake: Concentration Levels and Vertical Distribution*.

ANNEXE 2. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements du C3 – Octobre 2017

Tableau 17. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements du C3

N°	Désignation	Coordonnées		Situation urbaine	Caractéristiques du segment de canal étudié					Caractéristiques des sédiments					Analyses réalisées (type)			
		Lat.	Long.		Largeur	Vitesse	EU en amont	DS en amont	Jacinthes	Couleur	Odeur	Hétérogénéité	Aspect	Fibres, végétaux	1	2	3	4
1	Lac Anosibe	18°55'39"	47°30'53"	Urbain	> 50 m	Faible			✓	Noir		Assez homogène, qqes cailloux	Commun	+	✓	✓		
2	Pont Ambilanibe - bd Anosibe (station Shell)	18°55'26"	47°30'57"	Urbain	8 m	Faible		+		Noir		Assez homogène, petits cailloux	Commun	++	✓			
3	Dépression humide	18°55'20"	47°30'40"	Semi-urbain	4 m	Faible				Noir		Homogène	Organique	+++	✓			
4	Pont Rainidafi	18°55'07"	47°30'29"	Urbain	10 m	Faible	✓	+		Noir		Homogène	Assez pâteux	+	✓			
5	Tronçon de canal élargi	18°55'03"	47°30'32"	Urbain	30 m	Faible			✓	Noir		Homogène	Très pâteux		✓	✓		
6	Pont du rond-point Andavamamba	18°54'59"	47°30'53"	Urbain	8 m	Faible		+		Noir		Homogène	Assez pâteux		✓			✓
7	Pont RN + 5 (quartier 67 ha sud)	18°54'39"	47°30'32"	Urbain	10 m	Faible	✓	+		Noir		Hétérogène cailloux, verre	Commun	++	✓			
8	Pont 67 ha nord - station service Juvena	18°54'18"	47°30'34"	Urbain	6 m	Faible	✓	+		Noir		Assez hétérogène	Commun	++	✓	✓	✓	
9	Déversoir Andriantany / C3	18°54'16"	47°30'54"	Urbain	40 m	Modérée	✓	++		Noir		Qqes cailloux, pas de sable	Boueux		✓	✓		
10	Virage C3 Amont bd de l'Europe	18°54'13"	47°30'57"	Urbain	6 m	Modérée		++		Brun foncé	✓	Hétérogène, cailloux	Commun	++	✓	✓		✓

N°	Désignation	Coordonnées		Situation urbaine	Caractéristiques du segment de canal étudié					Caractéristiques des sédiments					Analyses réalisées (type)			
		Lat.	Long.		Largeur	Vitesse	EU en amont	DS en amont	Jacinthes	Couleur	Odeur	Hétérogénéité	Aspect	Fibres, végétaux	1	2	3	4
11	Division C3 Bd de l'Europe	18°54'03"	47°30'36"	Urbain	8 m	Faible	✓	++		Noir		Cailloux	Assez pâteux	+	✓			
12	Coude sortie urbaine	18°54'00"	47°30'22"	Urbain	8 m	Faible	✓	++	✓	Noir		Cailloux	Assez liquide	++	✓	✓		
13	Zone rurale (rizières)	18°53'39"	47°30'24"	Rural	7 m	Faible				Brun orangé		Homogène	Peu liquide, pâteux		✓			✓
14	Entrée zone mixte industrielle commerciale	18°52'58"	47°30'18"	Rural	6 m	Faible		++		Noir		Homogène	Sable grossier		✓			✓
15	Sortie zone mixte industrielle résidentielle	18°52'11"	47°30'37"	Semi-urbain	8 m	Faible	✓			Noir		Homogène	Très fin, pas ou peu de sable		✓	✓		
16	Pont Andrano Roasonona	18°51'48"	47°29'08"	Rural	8 m	Faible				Brun foncé		Homogène	Liquide pâteux	+	✓	✓	✓	

ANNEXE 3. Résultats des analyses sur les sédiments du C3 – Octobre 2017

Tableau 18. Résultats des analyses sur les ETM dans les échantillons bruts du C3

Paramètre analysé	Unité	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	Valeur Seuil protocole H14
Aluminium (Al)	mg/kg MS	37 000	24 000	27 000	24 000	50 000	23 000	18 000	18 000	
Chrome (Cr)	mg/kg MS	49	35	51	35	47	38	34	31	150
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	130	140	130	140	160	190	200	270	
Fer (Fe)	mg/kg MS	21 000	18 000	23 000	17 000	28 000	19 000	19 000	19 000	
Cobalt (Co)	mg/kg MS	5	5	5	5	6	6	6	6	
Nickel (Ni)	mg/kg MS	15	15	17	14	14	17	15	15	50
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	28	32	39	42	28	45	39	54	100
Zinc (Zn)	mg/kg MS	110	180	180	190	170	260	290	350	300
Arsenic (As)	mg/kg MS	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	30
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
Argent (Ag)	mg/kg MS	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,6	0,7	
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	<0,5	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	2
Étain (Sn)	mg/kg MS	4	3	2	3	3	4	3	6	
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
Baryum (Ba)	mg/kg MS	190	180	170	190	210	230	260	230	
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1
Plomb (Pb)	mg/kg MS	49	140	49	69	96	350	190	98	100
Paramètre analysé	Unité	9A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	Valeur Seuil protocole H14
Aluminium (Al)	mg/kg MS	21 000	11 000	13 000	12 000	18 000	7 200	15 000	30 000	
Chrome (Cr)	mg/kg MS	48	26	34	42	8	25	27	35	150
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	260	140	140	160	120	73	98	270	
Fer (Fe)	mg/kg MS	27 000	24 000	19 000	20 000	28 000	17 000	13 000	21 000	
Cobalt (Co)	mg/kg MS	9	5	5	5	4	3	4	6	
Nickel (Ni)	mg/kg MS	29	12	14	12	5	8	11	13	50
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	120	21	30	27	7	11	26	24	100
Zinc (Zn)	mg/kg MS	720	170	310	350	45	69	130	140	300
Arsenic (As)	mg/kg MS	2	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	30
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
Argent (Ag)	mg/kg MS	1,3	<0,5	0,7	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	

Cadmium (Cd)	mg/kg MS	1,2	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	2
Étain (Sn)	mg/kg MS	10	2	3	3	<2,0	<2,0	2	3	
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
Baryum (Ba)	mg/kg MS	370	150	180	170	120	64	150	440	
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,5	0,1	0,3	0,2	<0,1	<0,1	0,1	0,2	1
Plomb (Pb)	mg/kg MS	160	81	61	78	21	21	42	54	100

Tableau 19. Résultats des analyses sur les ETM après lixiviation du C3

Paramètre analysé	Unité	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	Valeur seuil ISDI France
Mercure (Hg)	mg/kg MS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Aluminium (Al)	mg/kg MS	0,91	0,92	0,48	0,82	1,6	1	1,2	0,74	
Chrome (Cr)	mg/kg MS	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,5
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	3,1	2,1	1,1	1,1	2	1,7	2,3	6,1	
Fer (Fe)	mg/kg MS	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	1,1	0,6	1	1	
Cobalt (Co)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Nickel (Ni)	mg/kg MS	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,4
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	2
Zinc (Zn)	mg/kg MS	0,56	0,55	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	4
Arsenic (As)	mg/kg MS	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,5
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Argent (Ag)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	0,04
Baryum (Ba)	mg/kg MS	1,1	1,9	1,3	0,98	1	0,78	1	1,4	20
Plomb (Pb)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<0,1	0,2	0,14	0,19	<0,1	0,22	0,2	0,16	0,5
Étain (Sn)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,09	0,07	<0,05	0,06
Paramètre analysé	Unité	9A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	Valeur seuil ISDI France
Mercure (Hg)	mg/kg MS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Aluminium (Al)	mg/kg MS	2,5	3	<0,9	0,72	27	7,2	2,6	2,4	
Chrome (Cr)	mg/kg MS	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,5
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	9,4	1,6	2,2	3,7	0,45	1,1	3,9	1,9	
Fer (Fe)	mg/kg MS	15	6,2	<1,0	0,5	6	4,3	1,1	1,4	
Cobalt (Co)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Nickel (Ni)	mg/kg MS	0,22	0,14	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,11	<0,05	<0,05	2
Zinc (Zn)	mg/kg MS	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	4
Arsenic (As)	mg/kg MS	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,5
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Argent (Ag)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	

Paramètre analysé	Unité	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	Valeur seuil ISDI France
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	0,04
Baryum (Ba)	mg/kg MS	1,1	0,38	1,2	1,2	0,24	0,57	1,1	1,5	20
Plomb (Pb)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	0,32	0,19	0,22	0,24	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Étain (Sn)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	0,11	0,06	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06

Tableau 20. Résultats sur les analyses des hydrocarbures sur le C3

Paramètre analysé	Unité	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	Valeur seuil ISDI France
Indice hydrocarbure C10-C40	mg/kg MS	450				3200			1600	500
Hydrocarbures > C10-C12	mg/kg MS	<40				<40			<40	
Hydrocarbures > C12-C16	mg/kg MS	<40				<40			<40	
Hydrocarbures > C16-C21	mg/kg MS	<40				400			240	
Hydrocarbures > C21-C35	mg/kg MS	370				2300			1200	
Hydrocarbures > C35-C40	mg/kg MS	<40				300			85	
Paramètre analysé	Unité	9A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	Valeur seuil ISDI France
Indice hydrocarbure C10-C40	mg/kg MS	3800	240		1000			1200	730	500
Hydrocarbures > C10-C12	mg/kg MS	<40	<20		<40			<40	<40	
Hydrocarbures > C12-C16	mg/kg MS	<40	<20		<40			<40	<40	
Hydrocarbures > C16-C21	mg/kg MS	530	<20		140			160	<40	
Hydrocarbures > C21-C35	mg/kg MS	2800	210		800			960	620	
Hydrocarbures > C35-C40	mg/kg MS	260	<20		69			<40	<40	

Tableau 21. Résultats des analyses des BTEX et aromatiques dans les échantillons de sédiments du C3

Paramètre analysé	Unité	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	Valeur seuil ISDI France
Benzène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	6
Toluène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			3,8	
Ethylbenzène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
m-, p-Xylène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
o-Xylène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
Cumène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
m-, p-Ethyltoluène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
Mésitylène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
o-Ethyltoluène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
Pseudocumène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	
Somme des CAV	mg/kg MS	-/-				-/-			3,8	
Paramètre analysé	Unité	9A	10A	11A	12A	13A	14A	15A	16A	
Benzène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	6
Toluène	mg/kg MS	0,94	9,4		0,77			<0,1	0,56	
Ethylbenzène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
m-, p-Xylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
o-Xylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
Cumène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
m-, p-Ethyltoluène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
Mésitylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
o-Ethyltoluène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
Pseudocumène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	
Somme des CAV	mg/kg MS	0,94	9,4		0,77			-/-	0,56	

Tableau 22. Résultats des analyses des pesticides et dioxines-furanes sur le sédiments du C3

Paramètres analysés	Unité	8A	16A
Pesticides			
Malathion / LSA31	mg/kg MS	< 0,13	< 0,13
Endosulfan alpha / LSA43	mg/kg MS	< 0,03	< 0,03
Béta-endosulfan / LSA43	mg/kg MS	< 0,03	< 0,03
Lambda cyhalothrine / LSG2C	µg/kg MS	< 70	< 71
Dioxines (17 PCDD/F)			
2,3,7,8-TCDD	ng/kg MS	0,486	220
1,2,3,7,8-PeCDD	ng/kg MS	2,25	3,71
1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	2,83	1,46
1,2,3,6,7,8-HxCDD	ng/kg MS	27	6,38
1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	4,42	2,8
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	ng/kg MS	207	112
OCDD	ng/kg MS	1 040	2 130
2,3,7,8-TCDF	ng/kg MS	3,02	8,77

Paramètres analysés	Unité	8A	16A
1,2,3,7,8-PeCDF	ng/kg MS	1,9	1,07
2,3,4,7,8-PeCDF	ng/kg MS	3,1	1,69
1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	5,93	3,1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	ng/kg MS	7,47	1,6
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	< 0,883	< 0,645
2,3,4,6,7,8-HxCDF	ng/kg MS	7,91	1,58
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	ng/kg MS	509	33,9
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	5,56	2,13
OCDF	ng/kg MS	302	137
Facteurs d'équivalences toxiques			
Dioxines et furanes (OMS 2005 PCDD/F- TEQ) sans LQ	ng/kg MS	17,2	229
Dioxines et furanes (OMS 2005 PCDD/F- TEQ) avec LQ	ng/kg MS	17,3	229
I-TEQ (NATO/CCMS) sans LQ	ng/kg MS	17,7	229
I-TEQ (NATO/CCMS) avec LQ	ng/kg MS	17,8	229

Tableau 23. Résultats des analyses des COHV, HAP, PCB sur les sédiments du C3

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Valeur seuil ISDI France	Valeur seuil protocole H14
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)																			
Naphtalène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,06	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05	50	22,8
1-Méthylnaphtalène	mg/kg MS	<0,05				<0,06			<0,06	<0,12	<0,06		<0,06			<0,06	<0,06		
2-Méthylnaphtalène	mg/kg MS	<0,05				<0,06			<0,06	<0,12	<0,06		<0,06			<0,06	<0,06		
Acénaphthylène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Acénaphène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Fluorène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Phénanthrène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			0,11	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Anthracène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Fluoranthène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Pyrène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,06	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Benzo(a)anthracène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Chrysène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Benzo(a)pyrène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Indéno(123-cd)pyrène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS	<0,05				<0,05			<0,05	<0,05	<0,05		<0,05			<0,05	<0,05		
Somme des HAP	mg/kg MS	-/-				-/-			0,11	-/-	-/-		-/-			-/-	-/-		
Hydrocarbures halogénés volatils (COHV)																			
1,1,2,2-Tetrachloroéthane	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1	50	22,8
Bromodichlorométhane	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1		
Dibromochlorométhane	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1		

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Valeur seuil ISDI France	Valeur seuil protocole H14
Hexachloroéthane	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1		
Tribromométhane	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1		
cis-1,3-Dichloropropène	mg/kg MS	<0,1				<0,1			<0,1	<0,1	<0,1		<0,1			<0,1	<0,1		
Polychlorobiphényles (PCB)																			
PCB n° 28	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01	1	0,68
PCB n° 52	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01		
PCB n° 101	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01		
PCB n° 118	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01		
PCB n° 138	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01		
PCB n° 153	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01		
PCB n° 180	mg/kg MS	<0,01				<0,01			<0,01	<0,01	<0,01		<0,01			<0,01	<0,01		
Somme des 7 PCB	mg/kg MS	-/-				-/-			-/-	-/-	-/-		-/-			-/-	-/-		

ANNEXE 4. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements de l'Andriantany-Canal de la Vallée de l'Est- marais Masay-Lac Anosy – Décembre 2017

Tableau 24. Caractéristiques des sédiments et des zones de prélèvements de l'Andriantany-Canal Est-lac Masay-Lac Anosy

n°	Désignation	Coordonnées		Typologie d'habitat	Caractéristiques du segment de canal étudié			Caractéristiques des sédiments					Analyses réalisées (type)		
		Lat.	Long.		EU en amont	DS en amont	Jacinthes	Couleur	Odeur	Hétérogénéité	Aspect	Fibres, végétaux	1	2	3
1	Pont bvd de l'Europe	18°56'18,4"	47°31'18,0"	Urbain-marché	non	+		Gris	non	Assez homogène, qqes cailloux	Pateux	+	✓	✓	✓
2	Gare Soanierana	18°56'31,6"	47°31'20,7"	Semi urbain	oui			Gris	non	Assez homogène, qqes cailloux	Pateux-argileux		✓		
3	Pont Tsena Madera	18°55'51,8"	47°31'10,3"	Semi urbain marché	non	+++		Gris foncé	non	Homogène	sableux	+	✓	✓	
4	Lac Anosy	18°54'57,2"	47°31'18,5"	Lac	non			Gris	non	Homogène	Pateux		✓		
5	Fokontany Madera	18°55'21,7"	47°31'01,8"	Urbain	non	+		Noir	oui	Assez homogène	Sédiments fins, assez liquide		✓		
6	Pont Ex-superette	18°54'52,5"	47°30'54,7"	Urbain	non	+		Gris avec trace rouille	non	Hétérogène avec cailloux	Sableux		✓	✓	
7	Pont Bekiraru	18°54'32,7"	47°30'49,1"	Urbain	oui	+		Noir	oui	Hétérogène cailloux	Sableux		✓		
8	Déversoir Ramandraibe	18°54'18,3"	47°30'57,7"	Urbain	Oui ?	++		Noir	non	Hétérogène des deux côtés du canal	Pateux -sableux		✓	✓	✓
9	Pont Atohom Adinka	18°53'59,1"	47°31'04,2"	Urbain	oui	+	+	Noir	non	Hétérogène avec cailloux	Pateux sableux	+	✓		
10	Pont Salem Antanimena	18°53'41,5"	47°31'00,1"	Urbain	oui	+		Noir	oui	Assez hétérogène	Sableux compact et peu liquide	+	✓	✓	

n°	Désignation	Coordonnées		Typologie d'habitat	Caractéristiques du segment de canal étudié			Caractéristiques des sédiments					Analyses réalisées (type)		
		Lat.	Long.		EU en amont	DS en amont	Jacinthes	Couleur	Odeur	Hétérogénéité	Aspect	Fibres, végétaux	1	2	3
11	EPP Aire de Jeux	18°53'08,8"	47°31'18,6"	Semi-urbain	oui	+		Noir	non	Assez hétérogène avec cailloux	Pateux sableux		✓		
12	Marais Masay embouchure amont	18°53'11,3"	47°31'43,7"	Semi-urbain	non	+	+	Gris foncé	Oui		Pateux-visqueux	+	✓	✓	✓
13	Marais Masay Est	18°52'51,8"	47°32'20,9"	Semi-urbain	non		+	Brun	non	Assez hétérogène avec cailloux	Sableux		✓	✓	
14	Marais Masay Embouchure aval	18°52'46,1"	47°31'35,2"	Semi-urbain	non		++	Marron foncé	non	Assez hétérogène avec cailloux	Sableux		✓		
15	Fontaine Akouroundrano	18°52'44,7"	47°31'14,4"	Rural et Industriel	non	+	+	Noir		Assez hétérogène avec cailloux	Sableux		✓	✓	
16	Morarano	18°52'06,7"	47°30'55,4"	Rural et Industriel	oui	+	+	Gris foncé	oui	Homogène	Pateux sableux		✓		
17	Amont Pompage C3	18°51'48,1"	47°29'07,8"	Rural	oui	+	+	Gris foncé	non	Homogène	Pateux		✓	✓	✓

ANNEXE 5. Résultats des analyses sur les sédiment de l'Andriantany-Canal de la Vallée de l'Est- marais Masay-Lac Anosy – Octobre 2017

Tableau 25. Résultats des analyses sur les ETM dans les échantillons bruts de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Valeur Seuil protocole H14
Aluminium (Al)	mg/kg MS	58 000	20 000	53000	50000	31000	18000	14000	13000	29000	
Chrome (Cr)	mg/kg MS	70	29	66	52	38	34	33	40	43	150
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	260	140	250	540	210	210	340	250	200	
Fer (Fe)	mg/kg MS	33 000	16 000	33000	32000	20000	23000	24000	29000	25000	
Cobalt (Co)	mg/kg MS	13	6	11	11	7	7	5	5	8	
Nickel (Ni)	mg/kg MS	37	15	31	27	20	19	15	21	22	50
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	82	14	45	44	86	50	51	530	90	100
Zinc (Zn)	mg/kg MS	390	130	300	290	290	200	230	300	570	300
Arsenic (As)	mg/kg MS	3	<2,0	3	2	<2,0	<2,0	2	3	3	30
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
Argent (Ag)	mg/kg MS	0,50	<0,5	<0,5	1,3	<0,5	<0,5	<0,5	0,5	5,5	
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	0,50	<0,5	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	<0,6	1	2
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	11	
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,30	<0,1	0,2	0,7	0,3	0,2	0,1	0,2	0,5	1
Plomb (Pb)	mg/kg MS	210	31	220	88	220	170	49	340	710	100
Paramètre analysé	Unité	10	11	12	13	14	15	16	17		Valeur Seuil protocole H14
Aluminium (Al)	mg/kg MS	11000	29000	65000	24000	21000	15000	31000	30000		
Chrome (Cr)	mg/kg MS	27	37	140	30	72	32	42	43		150
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	130	190	480	230	240	140	200	780		
Fer (Fe)	mg/kg MS	18000	25000	65000	27000	44000	21000	22000	25000		
Cobalt (Co)	mg/kg MS	4	7	17	6	10	5	6	10		
Nickel (Ni)	mg/kg MS	9	17	57	9	20	11	19	17		50
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	25	42	110	10	13	39	49	31		100
Zinc (Zn)	mg/kg MS	170	290	650	32	50	120	310	170		300
Arsenic (As)	mg/kg MS	<2,0	<2,0	3	<2,0	<2,0	<2,0	2	<2,0		30
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0		
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
Argent (Ag)	mg/kg MS	1,5	3,4	1,4	<0,5	<0,5	0,6	2,7	1		
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	<0,5	<0,5	0,8	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5		2
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,2	0,3	0,7	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	0,1		1
Plomb (Pb)	mg/kg MS	60	79	200	21	12	180	2100	190		100

Tableau 26. Résultats des analyses sur les ETM après lixiviation des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Valeur seuil ISDI France
Mercuré (Hg)	mg/kg MS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,005	<0,001	<0,001	0,01
Aluminium (Al)	mg/kg MS	11,00	23	4,1	3,4	4,1	2,2	1,2	0	11	
Chrome (Cr)	mg/kg MS	<0,05	<0,1	<0,05	0,08	0,08	<0,05	<0,05	<0,1	0,16	0,5
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	1,80	1	1	3,1	4	0,26	0,86	2,3	6,3	
Fer (Fe)	mg/kg MS	2,00	6	2,6	4,1	36	1,5	5,3	2,7	63	
Cobalt (Co)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Nickel (Ni)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,13	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	0,4
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	<0,05	<0,05	0,16	0,21	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,1	2
Zinc (Zn)	mg/kg MS	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	4
Arsenic (As)	mg/kg MS	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,5
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Argent (Ag)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	0,04
Plomb (Pb)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,29	<0,1	0,13	<0,1	0,23	0,5
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<0,05	0	<0,05	<0,05	0,13	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06
Paramètre analysé	Unité	10	11	12	13	14	15	16	17		Valeur seuil ISDI France
Mercuré (Hg)	mg/kg MS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,005	<0,001	-/-		0,01
Aluminium (Al)	mg/kg MS	0,93	3,7	2,4	18	11	6,4	17	22		
Chrome (Cr)	mg/kg MS	<0,05	0,1	0,2	<0,05	0,08	0,08	0,14	0,34		0,5
Manganèse (Mn)	mg/kg MS	3,6	5,2	4,2	0,32	0,36	1	7,9	10		
Fer (Fe)	mg/kg MS	3,7	25	30	11	9,4	<5,0	47	76		
Cobalt (Co)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Nickel (Ni)	mg/kg MS	<0,1	0,14	0,23	<0,1	<0,1	<0,15	0,14	0,47		0,4
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,12	<0,05	<0,05	0,17		2
Zinc (Zn)	mg/kg MS	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	2,4		4
Arsenic (As)	mg/kg MS	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,05		0,5
Sélénium (Se)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		0,1
Argent (Ag)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015		0,04
Plomb (Pb)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,49		0,5
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	<0,1	0,15	0,36	<0,1	<0,1	<0,1	0,13	0,14		0,5
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,49		0,06

Tableau 27. Résultats sur les analyses des hydrocarbures des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Valeur seuil ISDI France
Indice hydrocarbure C10-C40	mg/kg MS	1 900,00	680	1200	1200	2400	1100	610	670	3400	500
Hydrocarbures > C10-C12	mg/kg MS	<20	<20	<20	<20	<100	210	<20	<20	<100	
Hydrocarbures > C12-C16	mg/kg MS	74,00	<20	37	47	<100	210	<20	<20	<100	
Hydrocarbures > C16-C21	mg/kg MS	230,00	58	150	150	220	110	74	76	450	
Hydrocarbures > C21-C35	mg/kg MS	1 300,00	490	860	850	1 900	470	440	490	2 400	
Hydrocarbures > C35-C40	mg/kg MS	250,00	110	180	140	310	81	61	88	430	
Paramètre analysé	Unité	10	11	12	13	14	15	16	17		Valeur seuil ISDI France
Indice hydrocarbure C10-C40	mg/kg MS	800	2400	7600	70	120	760	3400	1500		500
Hydrocarbures > C10-C12	mg/kg MS	<100	<40	<100	<20	<20	<100	<100	<100		
Hydrocarbures > C12-C16	mg/kg MS	<100	<40	<100	<20	<20	<100	<100	<100		
Hydrocarbures > C16-C21	mg/kg MS	<100	240	570	<20	<20	<100	340	<100		
Hydrocarbures > C21-C35	mg/kg MS	570	1 900	6 000	54	99	480	2 300	1 100		
Hydrocarbures > C35-C40	mg/kg MS	<100	330	910	<20	<20	<100	470	210		

Tableau 28. Résultats des analyses des BTEX et aromatiques dans les échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Valeur seuil ISDI France
Benzène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	6
Toluène	mg/kg MS	0,92	0		<0,1	2,2		7,4	1,2	0,4	
Ethylbenzène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
m-, p-Xylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
o-Xylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
Cumène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
m-, p-Ethyltoluène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
Mésitylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
o-Ethyltoluène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
Pseudocumène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
Somme des CAV	mg/kg MS	0,92	0		-/	2,2		7,4	1,2	0,4	
Paramètre analysé	Unité	10	11	12	13	14	15	16	17	Valeur seuil ISDI France	
Benzène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1	6	
Toluène	mg/kg MS		0,35	2,1		<0,1		2,1	1,1		
Ethylbenzène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
m-, p-Xylène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
o-Xylène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
Cumène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
m-, p-Ethyltoluène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
Mésitylène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
o-Ethyltoluène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
Pseudocumène	mg/kg MS		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1		
Somme des CAV	mg/kg MS		0,35	2,1		-/		2,1	1,1		

Tableau 29. Résultats des analyses des dioxines-furanes sur le sédiments de l'Andriantany-Canal Est-lac Masay-Lac Anosy

Paramètres analysés	Unité	1	8	12	17
Dioxines (17 PCDD/F)					
2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	<0,5	<0,5	<0,5	0,57
1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	6,1	<1,0	<1,0	2,1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	28	<1,5	<1,5	2,0
1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MS	350	4,8	2,2	5,5
1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	69	2,9	1,7	4,5
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	22000	240	85	200
Octa CDD	ng/kg MS	510000	4200	1200	2600
2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	15	5,0	2,3	6,9
1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	13	3,3	1,6	4,6
2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	8,4	3,8	2,0	4,7
1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	60	4,7	2,4	5,1
1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MS	16	2,6	<1,5	3,9
2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	28	3,1	1,5	4,7
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	8,8	1,6	<1,5	<1,5
1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MS	800	20	9,7	23
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	72	<7,5	<7,5	<7,5
Octa CDF	ng/kg MS	7500	84	27	49
Facteurs d'équivalences toxiques					
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	451	7,60	2,96	10,5
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	452	9,33	4,98	10,7
I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	810	11	4,2	12
I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	810	13	5,7	13

Tableau 30. Résultats des analyses des HAP sur les sédiments des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Valeur seuil ISDI France	Valeur seuil protocole H14
Naphtalène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		<0,05	<0,05	50	22,8
1-Méthylnaphtalène	mg/kg MS	<0,06	<0,06		<0,06	<0,06		<0,06	<0,06	<0,06		<0,06	<0,06		<0,06		<0,06	<0,06		
2-Méthylnaphtalène	mg/kg MS	<0,06	<0,06		<0,06	<0,06		<0,06	<0,06	<0,06		<0,06	<0,06		<0,06		<0,06	<0,06		
Acénaphthylène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		<0,05	<0,05		
Acénaphthène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		<0,05	<0,05		
Fluorène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		<0,05	<0,05		
Phénanthrène	mg/kg MS	0,14	<0,05		<0,05	0,31		0,13	<0,05	0,16		0,19	0,12		<0,05		0,19	0,16		
Anthracène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	0,27		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		<0,05	<0,05		
Fluoranthène	mg/kg MS	0,18	<0,05		<0,05	0,22		0,1	0,066	0,2		0,31	0,14		<0,05		0,3	0,18		
Pyrène	mg/kg MS	0,18	<0,05		<0,05	0,18		0,089	0,066	0,22		0,35	0,19		<0,05		0,34	0,23		
Benzo(a)anthracène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		0,15	<0,05		
Chrysène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		0,1	<0,05		<0,05		0,13	<0,05		
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	0,12	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	0,099		0,12	<0,05		<0,05		0,38	<0,06		
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		0,13	<0,05		
Benzo(a)pyrène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		0,23	<0,05		
Indéno(123-cd)pyrène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		<0,05	<0,05		
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		0,15	<0,05		
Somme des HAP	mg/kg MS	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05		<0,05		0,15	<0,05		

Tableau 31. Résultats des analyses des COHV sur les sédiments des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1,1,1,2-Tetrachloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,2,2-Tetrachloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,2-Trichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1-Dichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dichloropropane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromodichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Chloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dibromochlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Hexachloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tétrachloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tribromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,1-Trichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tétrachlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Trichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Trichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Chlorure de vinyle	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
cis-1,3-Dichloropropène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
cis-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
trans-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromochlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dibromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dibromoéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dibromo-3-Chloropropane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,1,2-Tetrachloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,2,2-Tetrachloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,2-Trichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1-Dichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1,2-Dichloropropane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromodichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Chloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dibromochlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Hexachloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tétrachloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tribromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,1,1-Trichloroéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tétrachlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Trichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Trichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Chlorure de vinyle	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
cis-1,3-Dichloropropène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
cis-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
trans-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromochlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dibromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dibromoéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dibromo-3-Chloropropane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Tétrachlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Trichlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Trichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Chlorure de vinyle	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
cis-1,3-Dichloropropène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
cis-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
trans-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromochlorométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Dibromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dibromoéthane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
Bromométhane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1
1,2-Dibromo-3-Chloropropane	mg/kg MS	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1		<0,1		<0,1	<0,1

Tableau 32. Résultats des analyses des PCB sur les sédiments des échantillons de l'Andriantany-Canal Est- lac Masay-Lac Anosy

Paramètre analysé	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Valeur seuil ISDI France	Valeur seuil protocole H14
PCB n° 28	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	0,04	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01		<0,01	<0,01	1	0,68
PCB n° 52	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	0,026	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		
PCB n° 101	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	0,04	0,04		<0,01	<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		
PCB n° 118	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	0,026	0,02		<0,01	<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		
PCB n° 138	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	0,026	0,04		0,035	<0,01		<0,01		0,021	<0,02		
PCB n° 153	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	0,026	0,04		0,035	<0,01		<0,01		0,021	0,016		
PCB n° 180	mg/kg MS	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	<0,01	0,02		0,035	<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		
Somme des 7 PCB	mg/kg MS	-/-	-/-		-/-	-/-		-/-	0,18	0,16		0,1	-/-		-/-		0,042	0,016		

ANNEXE 6. Planches photographie sur les échantillons de sédiments prélevés sur le C3 – Octobre 2017

Echantillon 1A



Echantillon 2A



Echantillon 3A



Echantillon 4A



Echantillon 5A



Echantillon 6A



Echantillon 7A



Echantillon 8A



Echantillon 9A



Echantillon 10A



Echantillon 11A



Echantillon 12A



Echantillon 13A



Echantillon 14A



Echantillon 15A



Echantillon 16A

Photographie manquante

ANNEXE 7. Planches photographie sur les échantillons de sédiments prélevés sur l'Andriantany-Canal de la Vallée de l'Est-Marais Masay-Lac Anosy – Décembre 2017

Echantillon 1B	
Echantillon 2B	

<p>Echantillon 3B</p>	
<p>Echantillon 4B</p>	
<p>Echantillon 5B</p>	

Echantillon 6B	
Echantillon 7B	
Echantillon 8B	

<p>Echantillon 9B</p>	
<p>Echantillon 10B</p>	
<p>Echantillon 11B</p>	

<p>Echantillon 12B</p>	
<p>Echantillon 13B</p>	
<p>Echantillon 14B</p>	

<p>Echantillon 15B</p>	
<p>Echantillon 16B</p>	
<p>Echantillon 17B</p>	

