



AGETIPA

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



REPUBLIKAN'I MADAGASIKARA

Fitiavana - Tanindrazana - Fandrosoana



AFD

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 2 : Thématique transversale

Érosion et sédimentologie



Juin 2018

**BRL**  
Ingénierie



**BRL**  
Madagascar



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



**URBA**  
consulting  
Développement  
URBAIN ET MUNICIPAL



	<b>BRL ingénierie</b>  <b>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001</b> <b>30001 NIMES CEDEX 5</b>
Cotraitants : <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;">    </div>	

<b>Date de création du document</b>	<b>01/02/2018</b>
<b>Contact</b>	<b>David FERNANDEZ</b>

<b>Titre du document</b>	<b>Tranche conditionnelle</b>  <b>Activité 6 : Diagnostic qualitatif et sectorisation thématique</b>  <b>Fascicule 2 : Activité transversale - Thématique Erosion et sédimentologie</b>
	<b>A00011_PIAA_rapport_A6_fascicule2</b>
<b>Référence du document :</b>	<b>V1</b>

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
01/02/2018	V0		VCA	DFE
25/06/2018	V1		VCA	DFE





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

## Tranche conditionnelle

### Activité 6 : Diagnostic qualitatif et sectorisation thématique

#### Fascicule 2 : Activité transversale - Thématique Erosion et sédimentologie

<b>1. ANALYSE DES ETUDES ET DONNEES EXISTANTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Pertes en sols	1
1.2 Les Lavakas	2
1.3 Érosion hydrique	3
1.4 En guise de synthèse	3
<b>2. APPROCHE METHODOLOGIQUE .....</b>	<b>4</b>
2.1 Les étapes de l'analyse	4
2.2 reconnaissances de terrain	6
<b>3. PRINCIPALES COMPOSANTES DU MILIEU PHYSIQUE.....</b>	<b>7</b>
3.1 Description morphologique de la zone d'étude	7
3.2 Géologie et pédologie	8
3.3 Occupation des sols	12
3.4 Hydrographie et agressivité des pluies	14
3.4.1 Définition du réseau hydrographique	14
3.4.2 Évaluation de l'agressivité des pluies	15
<b>4. DEFINITION DE LA SENSIBILITE A L'EROSION.....</b>	<b>17</b>
4.1 Éléments méthodologiques	17
4.2 Prise en compte du projet GRIMA	18
4.3 Résultats	19
<b>5. ELEMENTS DE QUANTIFICATION .....</b>	<b>25</b>
5.1 Sites de dépôts	25
5.1.1 Localisation des sites de dépôts	26
5.1.2 Volumes produits	26
5.2 Données issues des Chambres à Sables (CAS)	30

5.3	Profils en long et données sur les volumes curés	31
5.3.1	Analyse comparative de profils en long sur le canal GR	31
5.3.2	Analyse comparative de profils en long sur le canal C3	32
5.3.3	Volumes curés sur le canal Andriantany	33
5.4	Les apports en sédiments fins en provenance de l'Ikopa	36
<b>6.</b>	<b>APPORTS SOLIDES AU SEIN DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT .....</b>	<b>37</b>
6.1	Etat du réseau d'assainissement	37
6.2	Origine des apports solides	45
<b>7.</b>	<b>SYNTHESE .....</b>	<b>49</b>
7.1	Les conclusions principales de l'analyse	49
7.2	Premières orientations	51
<b>ANNEXE</b>	<b>.....</b>	<b>55</b>
	Annexe 1 : CR de mission érosion – sédimentologie. Mission du 7 au 15 novembre 2017	57

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Érosion et sédimentologie : Organigramme méthodologique .....	5
Figure 2 : Indices d'Arnoldus aux stations d'Ivato et d'Anosizato .....	16
Figure 3 : Relation entre les volumes produits et la sensibilité à l'érosion.....	29
Figure 4 : Evolution du profil en long du Canal GR entre 2000 et 2016 .....	31
Figure 5 : Quantités moyennes prélevées (ou estimées avant prélèvements, pour l'année 2001) en m <sup>3</sup> /km .....	35

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs des pertes en sols relevées dans les différentes études ou articles .....	2
Tableau 2 : Classes de l'indice d'Arnoldus (CEC, 1992) – Evaluation de l'importance de l'érosivité des pluies.....	15
Tableau 3 : Bilan annuel des volumes curés (en m <sup>3</sup> /Ha/an) .....	30
Tableau 4 : Apports annuels par tronçon (en m <sup>3</sup> /ml/an).....	33



# 1. ANALYSE DES ETUDES ET DONNEES EXISTANTES

Les données rassemblées regroupent à la fois des références bibliographiques issues d'articles et de rapports d'études ainsi que d'informations plus spécifiques collectées dans le cadre des enquêtes réalisées auprès de différents organismes. Ces informations plus spécifiques récoltées dans le cadre de la mission sont traitées dans la suite du rapport. Cette partie rédigée sous la forme d'une synthèse, ne concerne que des références bibliographiques plus générales qui traitent de l'érosion à Madagascar. Les principales références collectées sont listées ci-dessous :

- « Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana ». Evelyn Payet, Pascal Dumas, Gwenaëlle Pennober. Volume 11, numéro 3, décembre 2011.
- « Rapport sur l'état de l'environnement à Madagascar » 2012. Chapitre 4 : Sol.
- « L'érosion des sols à Madagascar ». M.P Segalen, pédologue de l'Office de la Recherche Scientifique Coloniale. Communication n°19, 2ème section groupe I. Conférence Africaine des sols, Goma, (Congo Belge) 8 – 16 novembre 1948.
- « L'érosion à Madagascar : l'importance des facteurs humains » (article). Les Cahiers d'Outre-Mer. Georges ROSSI. Année 1979, 32-128, pages 355-370.
- « Etude de la vulnérabilité du bassin versant du lac Ihotry a l'érosion en nappe ». M. Rabarimanana, R. Andriamasimanana, E. Rasolomanana, L. Robinson. In Madamines, ISSN 2220-0681, vol. 4, 2012. Pages 53 à 61.

L'évaluation de l'érosion des sols sur Madagascar a fait l'objet de plusieurs études et articles sur des bassins versants répartis essentiellement au sud-ouest de l'île (cas du Fiherenana, du lac Ihotry) ou dans le centre du pays (régions d'Itasy et d'Alaotra).

Les méthodes d'analyses sont basées sur des modèles empiriques dont le plus utilisé correspond au modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) inspiré de l'équation de Wischmeier et Smith.

Le développement des outils informatiques associé à l'acquisition de données satellites permettent une utilisation plus aisée de ce modèle. Il ne concerne cependant que les bassins versants pour lesquels les processus d'érosion en nappe sont dominants.

Or, d'après Segalen et d'autres auteurs, l'érosion des sols à Madagascar s'opère suivant trois principaux processus :

- L'érosion en nappe ;
- L'érosion en ravins ;
- L'érosion en Lavaka qui tient des deux précédentes selon l'auteur.

Il convient d'ajouter aussi l'érosion par les rivières.

## 1.1 PERTES EN SOLS

Les résultats issus de ces analyses présentent une très forte variabilité liée d'une part à la localisation géographique des bassins versants étudiés et d'autre part aux paramètres déterminants de l'érosion des sols : la structure géologique et pédologique, les pentes, l'occupation et l'usage des sols, les intensités pluviométriques (agressivité des pluies).

Tous les bassins étudiés correspondent à des milieux naturels, (soit un assemblage de forêts, savanes herbeuses, zones dénudées...) et des zones agricoles. On ne dispose d'aucune référence en zone urbanisée, semblable à ce que l'on rencontre sur Antananarivo.

**Tableau 1 : Valeurs des pertes en sols relevées dans les différentes études ou articles**

Site et localisation	Pertes en sols	
	En T/Ha/an	En m <sup>3</sup> /Ha/an (*)
Bassin versant de Fiherenana. Sud-ouest de Madagascar	Pertes en sols varient entre 0 et 1 631 T/Ha/an. Moyenne de 57 T/Ha/an ce qui est considéré comme élevé	102 m <sup>3</sup> /Ha/an pour la valeur moyenne, soit plus de 1 cm d'ablation par an.
Région d'Alaotra. Centre de Madagascar		pertes en terres sont globalement faibles, généralement comprises entre 1,8 et 5,4 m <sup>3</sup> /Ha/an localement entre 7,2 et 10,8 m <sup>3</sup> /Ha/an
Région d'Itasy. Centre de Madagascar	Valeurs comprises entre 246 et 625 T/Ha/an pour les valeurs les plus élevées.	442 m <sup>3</sup> et 1 125 m <sup>3</sup> /Ha/an. Entre 1,8 m <sup>3</sup> et 441 m <sup>3</sup> /Ha/an pour les valeurs plus faibles.
Bassin versant du lac Ihotry. Sud-ouest de Madagascar.	érosion potentielle maximale peut atteindre 13 T/Ha/an avec une moyenne de l'ensemble du bassin de 2,56 T/Ha/an	Entre 23,4 m <sup>3</sup> /Ha/an et 4,6 m <sup>3</sup> /Ha/an

(\*) Nota : estimé par BRLi, en prenant en compte un matériel érodé essentiellement sableux, soit 1800 kg/m<sup>3</sup>

De façon générale, l'importance de l'érosion sur l'île est rappelée dans l'introduction de Georges ROSSI « L'érosion à Madagascar : l'importance des facteurs humains » où l'auteur relève que Madagascar est l'une des régions du monde où l'érosion est actuellement la plus violente. La comparaison faite par J. Hervieu (1968) montre que l'érosion moyenne annuelle exprimée en épaisseur de terre enlevée sur l'ensemble d'un bassin versant est de :

- 0,5 mm/an pour l'Afrique ;
- 0,4 mm/an pour l'ensemble du monde.

Elle est estimée à 2,9 mm/an pour le versant ouest Malgache (soit 29 m<sup>3</sup>/Ha/an) et 6,04 mm/an (soit 60,4 m<sup>3</sup>/Ha/an) avec l'activité des formes d'érosions caractéristiques des Lavaka et Sakasaka.

La région ouest à laquelle on peut rattacher Tananarive présente une érosion moyenne annuelle de 3,64 mm/an (soit 36,4 m<sup>3</sup>/Ha/an) d'après le modèle de Fournier. Mais si l'on prend en compte l'érosion réelle (ou définit comme telle par l'auteur, c'est-à-dire en retirant les parties végétalisées qui assurent encore une protection efficace contre l'érosion), l'auteur conclut que la moyenne pour l'ensemble de l'île serait de 1,38 mm/an (soit 13,8 m<sup>3</sup>/Ha/an), ce qui reste cependant trois fois plus élevé que la moyenne mondiale.

L'érosion serait au final de 1,98 mm/an en moyenne (pour la région Ouest) et de 0,71 mm/an en moyenne, pour la région Est (soit entre 20 et 7 m<sup>3</sup>/Ha/an).

L'auteur insiste par ailleurs sur les incidences de l'érosion sur les perturbations hydrologiques des fleuves et de leur charge solide.

## 1.2 LES LAVAKAS

Les Lavakas correspondent à des formes d'érosions spécifiques susceptibles de fournir de façon importante (sinon massive), des apports en sédiments fins, généralement de type sableux. Dans la région d'Alaotra, il est noté que l'ensablement provient essentiellement des lavakas des reliefs dominant la cuvette.

L'analyse relative à la présence de ces formes d'érosions met en évidence un lien entre :

- La géologie et la formation des lavakas (formation sur les couches saprolitiques épaisses qui se sont développées sur le socle cristallin) ;
- L'abondance et la fréquence des événements sismiques : la plupart des lavakas se produit dans ou près des zones sismiques où les séismes (magnitude 0,5 à 5,6) sont les plus fréquentes.

De telles formes d'érosions sont aussi notées au sein de l'agglomération d'Antananarivo.

## 1.3 ÉROSION HYDRIQUE

En ce qui concerne l'érosion hydrique, (c'est-à-dire les sédiments charriés par les cours d'eau), il est précisé que les taux de dégradation spécifique sont absolument énormes ; compris entre 3 000 et 5 000 T/km<sup>2</sup>/an. Les pertes totales mesurées en millions de tonnes par an donnent les chiffres suivants : 142 pour la Tsiribihina, 11 pour la Morondava, 98 pour le Mangoky, neuf pour le Fiheranana et 17 pour l'Onilahy. Le plus fort tonnage est certainement celui de la Betsiboka, exutoire du plus grand fleuve de la Grande Île. Les pertes estimées sont de 35 km<sup>3</sup>/an sur l'ensemble du bassin versant, avec des érosions de 250 T à 400 T/ha/an, ce qui constitue l'un des records mondiaux d'érosion.

## 1.4 EN GUISE DE SYNTHÈSE

La plupart des études et articles font état d'estimations de pertes en sols basées sur un processus d'érosion dominant en nappe et faisant intervenir le modèle de Wischmeier et Smith. Dans la bibliographie consultée, il n'existe pas d'analyse de l'érosion dans un contexte urbain similaire à ce que l'on peut observer sur Antananarivo.

On notera par ailleurs la très forte variabilité des pertes en sols liées à des contextes très différents mais dont certaines estimations paraissent extrêmement importantes, même en présence de formes d'érosions particulières (cas des Lavakas).

De cette revue on peut retenir différents principes pour la suite de l'analyse :

- L'estimation des pertes en sols à partir de modèles tels que Wischmeier et Smith, n'est pas adaptée aux processus d'érosions particuliers en site urbain, qui associent en outre comme pour Antananarivo des formes d'érosions spécifiques (lavakas).
- La forte variabilité des pertes en sols peut s'expliquer à la fois par la diversité des contextes mais aussi (sinon pour l'essentiel) par un calage particulièrement difficile de l'équation d'un modèle tel que Wischmeier et Smith. Une mauvaise évaluation d'un des paramètres peut modifier de façon substantielle les résultats. En soit, ces résultats renseignent plus sur une capacité à éroder que sur des valeurs réelles de pertes en sols.
- Les résultats des modèles ne sont jamais confrontés à des estimations issues du terrain. Les zones de dépôts récurrents, les sites de stockages « naturels » ou artificiels - retenues de barrages -, les dépôts au sein de lacs, de zone basses... peuvent fournir des informations quantitatives intéressantes certainement plus proches de la réalité que celles issues d'un modèle empirique.

En l'espèce, dans le cas d'une zone urbaine comme Antananarivo, l'estimation de l'érosion ne peut pas se baser sur un modèle empirique, mais doit faire appel aux différentes données quantifiées disponibles, aux différentes métriques susceptibles de fournir une estimation la plus proche de la réalité.

## 2. APPROCHE METHODOLOGIQUE

### 2.1 LES ETAPES DE L'ANALYSE

Elle comprend trois principales étapes dont l'enchaînement est résumé par l'organigramme joint ci-dessous.

- **Etape 1 : Définition de la sensibilité à l'érosion au niveau de la zone d'étude.**

Cette première étape analyse les différents paramètres à l'origine de l'érosion des sols. Ces paramètres correspondent à la fois :

- A ceux identifiés dans le cadre de la synthèse bibliographiques présentée auparavant ;
- Aux paramètres considérés comme déterminants dans les processus responsables de l'érosion des sols et qui sont d'ailleurs retenus dans le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation).

Les données très précises issues d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) produit dans le cadre de cette étude ont permis d'identifier un réseau de drainage « haute densité », de délimiter des bassins versants associés d'une taille cohérente par rapport à la réalité de terrain et enfin, de calculer des pentes pour chacun de ces bassins versants.

L'interprétation de l'occupation des sols est issue d'une analyse spécifique réalisée dans le cadre de cette étude. L'information rassemblée est suffisamment précise pour disposer des surfaces réellement érodables inter-bâtiments, ce qui représente un point essentiel pour renforcer la pertinence de l'analyse.

L'analyse propose aussi une analyse de l'agressivité des pluies, dont l'apport est fonction des données disponibles.

La définition de la sensibilité des sols à l'érosion en conclusion de cette étape correspond à la synthèse entre ces différents paramètres. Elle inclut en outre, une confrontation avec les données issues de l'étude GRIMA qui ont fait l'objet d'une reclassification basée sur la seule prise en compte de l'érosion.

- **Etape 2 : Quantification des apports**

Considérant le contexte urbain et le type de processus érosifs à l'origine d'apports solides, l'analyse est basée sur la recherche de données quantifiées. Les enquêtes auprès des organismes gestionnaires de réseaux (CUA, SAMVA et APIPA) ont permis de disposer de données sur les dépôts récurrents au sein de la zone d'étude, les volumes prélevés dans les chambres à sables, les profils en long ou volumes curés sur les canaux (canal Andriantany, canal C3 et canal GR).

- **Etape 3 : Apports solides au sein du réseau d'assainissement**

A partir d'éléments issus du gestionnaire (SAMVA) et notamment des relevés effectués dans le cadre de l'enquête patrimoniale, l'analyse présente :

- une synthèse de l'appréciation du niveau de comblement des canaux liés à la présence de sédiments ;
- un exposé relatif à la dynamique de dépôt.

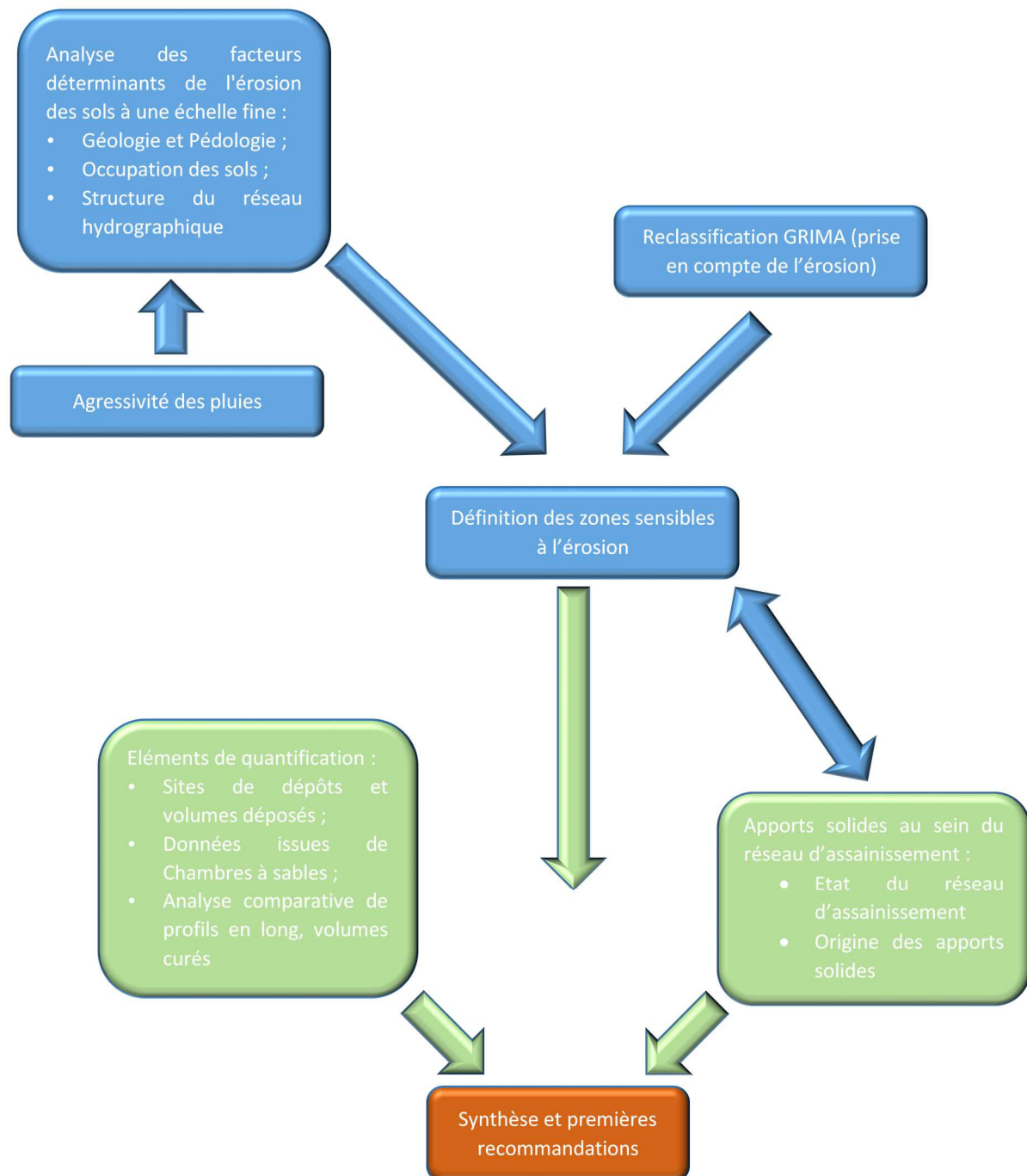
Une recherche des sources productives est effectuée en prenant en compte le réseau hydrographique, les sites d'apports solides identifiés (lavakas, glissements recensés dans le cadre de l'épisode de février 2015) ainsi que la sensibilité à l'érosion définie auparavant.

- **Etape 4 : Synthèse et premières recommandations**

La confrontation entre la définition des zones sensibles à l'érosion, les zones de production, les éléments de quantification et l'état du réseau, permettent d'établir une synthèse par rapport aux processus d'érosions / sédimentations et de formuler des premières recommandations.



Figure 1 : Érosion et sédimentologie : Organigramme méthodologique



## 2.2 RECONNAISSANCES DE TERRAIN

Les reconnaissances relatives à l'érosion des sols et aux apports solides ont fait l'objet de deux séries de reconnaissances complétées une interprétation de la photographie aérienne haute définition de 2016. Ces deux séries concernent :

- La reconnaissance des réseaux d'assainissement ;
- La reconnaissance relative à l'érosion et aux apports solides.

### RECONNAISSANCE DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT

Elle est décrite de façon détaillée dans le fascicule 1 qui traite des reconnaissances et enquêtes. Ces reconnaissances ont permis de procéder à la description la plus exhaustive possible des réseaux à ciel ouvert et couvert. En dehors des données spécifiques à l'assainissement, des informations sur le type et la nature des obstructions, notamment sédimentaires, permettent de disposer d'une bonne vision de l'état du réseau par rapport à la problématique sédimentaire. Ces relevés comprennent aussi la définition des caractéristiques géométriques des conduites, utiles aux calculs hydrauliques (notamment débit capable et type de matériaux transportables).

Pour le détail de ces reconnaissances, on renvoi au chapitre 2 « Etat des lieux global » du fascicule 1.

### RECONNAISSANCES RELATIVES A L'EROSION ET APPORTS SOLIDES

Elles ont été précédées d'une phase préparatoire basée notamment sur l'interprétation du MNT afin d'identifier les sites concernés par les apports solides / dépôts solides.

- Une phase d'enquête a été programmée en début de mission auprès des principaux organismes en charge des réseaux d'assainissement. Ces rencontres ont permis de vérifier la bonne cohérence entre les sites identifiés comme producteurs en sédiments et les points sur lesquels des entretiens réguliers liés aux apports solides sont effectués.
- Par la suite, une majorité de ces sites ont fait l'objet d'une reconnaissance sur le terrain afin d'apprécier le contexte globale, puis, pour les points considérés comme les plus producteurs d'après les organismes enquêtés, une reconnaissance plus exhaustive des réseaux a été effectuée afin d'identifier les sources potentiellement les plus productives.
- Des reconnaissances ponctuelles des linéaires des canaux Andriantany, GR et C3 ont aussi été réalisées afin de disposer d'une vision complémentaire à la problématique érosions de berges par rapport à celle effectuée dans le cadre de la tranche ferme.

Le CR de ces reconnaissances figure en annexe1 de ce document.

### L'ANALYSE DE LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE 2016

Elles vient en complément des reconnaissances de terrain. Ces dernières ont permis d'identifier les principaux types de situations qui peuvent soit participer à la production de sédiments, soit réduire la continuité amont/aval en matière de transport solide. La très haute définition de la photographie de 2016, permet de repérer ces sites producteurs d'une façon plus exhaustive que les reconnaissances de terrain.

## 3. PRINCIPALES COMPOSANTES DU MILIEU PHYSIQUE

### 3.1 DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Le modelé de la zone d'étude comprend trois formes caractéristiques telles que définies par J. et JM Hoeblich, 1983<sup>1</sup>, successivement :

- Les échines ;
- Les versants ;
- Les vallées ;
- La plaine d'inondation de l'Ikopa.

Les échines correspondent aux zones hautes du site d'étude et se distinguent par la présence de roches résistantes, affleurantes selon les lieux, ou recouvertes localement de roches altérées. Les pentes sont plutôt faibles, comprises en moyenne entre 1° et 3° et le sommet arrondi (« dos de baleine »). La butte du palais de la Reine (Rova), les collines de l'Observatoire et de Fort-Duchesne ainsi que la colline d'Ankatso, correspondent aux échines les plus significatives de la zone d'étude.

Les versants localisés en contre-bas des échines sont soumis à une érosion active accentuée par l'action anthropique. Les versants présentent des profils heurtés, formés de palier, séparés par des ruptures de pentes. Trois paliers peuvent-être distingués :

- Palier supérieur, localisé entre 1 360 et 1 350 m, situé directement en contre bas des sommets (échines) ;
- Le palier intermédiaire, caractérisé par un large replat situé à une altitude moyenne de 1 300 m. Ce palier domine la vallée d'une cinquantaine de mètre ;
- Le palier inférieur constitué d'un replat souvent bien marqué et situé entre 1 270 m et 1 265 m. il se présente sous la forme d'une terrasse localisée à 15 – 20 m au-dessus de la vallée actuelle.

Les vallées présentent majoritairement des directions NNO – SSE, parallèles à la direction des échines. De l'est vers l'ouest, on recense trois vallées principales, dont principalement deux au sein de la zone d'étude :

- La vallée la plus à l'est en limite de zone d'étude, comprise entre la colline d'Ankatso et celle d'Ambohibe ;
- La vallée située entre la colline d'Ankatso et l'échine de l'observatoire – Fort Duchesne ;
- La vallée qui sépare la colline de l'observatoire – Fort Duchesne de celle du Palais de la Reine.

Ces vallées présentent majoritairement un fond plat, voisin d'une altitude comprise entre 1 250 – 1 255 m. Elles se relient à une série de vallons secondaires de direction perpendiculaire qui entaillent les versants des échines en de longues lanières.

La plaine d'inondation de l'Ikopa, délimitée à l'ouest par le fleuve du même nom et le canal Andriantany qui « ceinture » le centre-ville et la colline du Palais de la Reine. Cette plaine culmine à une altitude moyenne comprise entre 1249 m et environ 1248 m au niveau de la station de pompage d'Ambodimita.

Ces descriptions morphologiques rendent compte d'une activité érosive plus intense sur les échines et versants ; les zones de replat localisées à la jonction avec les vallées, dont font aussi partie les bas-fonds, correspondant aux zones potentielles de dépôt.

<sup>1</sup> “L'organisation du relief dans les environs de Tananarive”, J. JM HOEBLICH, Maîtres-assistants à l'Université de Tananarive. Mad Rev. De Géo, N° 43, Juil. Déc. 1983. 39 pages.

Le canal Andriantany délimite les zones à reliefs de la plaine d'inondation de l'Ikopa. Il collecte à la fois une partie des réseaux d'assainissement en provenance de ces zones, ainsi qu'une partie des apports en eau et sédiments en provenance de l'Ikopa, auxquels il faut ajouter les apports en sédiments issus de l'érosion des berges et d'autres apports solides « anthropiques ». Ces sources d'apports sont identiques pour les canaux C3 et GR. Pour ces trois canaux les pentes très faibles favorisent le dépôt et la sédimentation.

Les dynamiques sédimentaires en termes de production / dépôt sont donc totalement différentes entre les reliefs et la plaine mais aussi relativement indépendantes en dehors peut-être du canal Andriantany qui assure en quelque sorte l'interface entre ces deux zones. Ces grands principes, corroborent les analyses présentées par le BNGRC lors des entretiens réalisés par le bureau d'études (voir compte-rendu des entretiens réalisés en Novembre 2017 avec les différents gestionnaires)

## 3.2 GEOLOGIE ET PEDOLOGIE

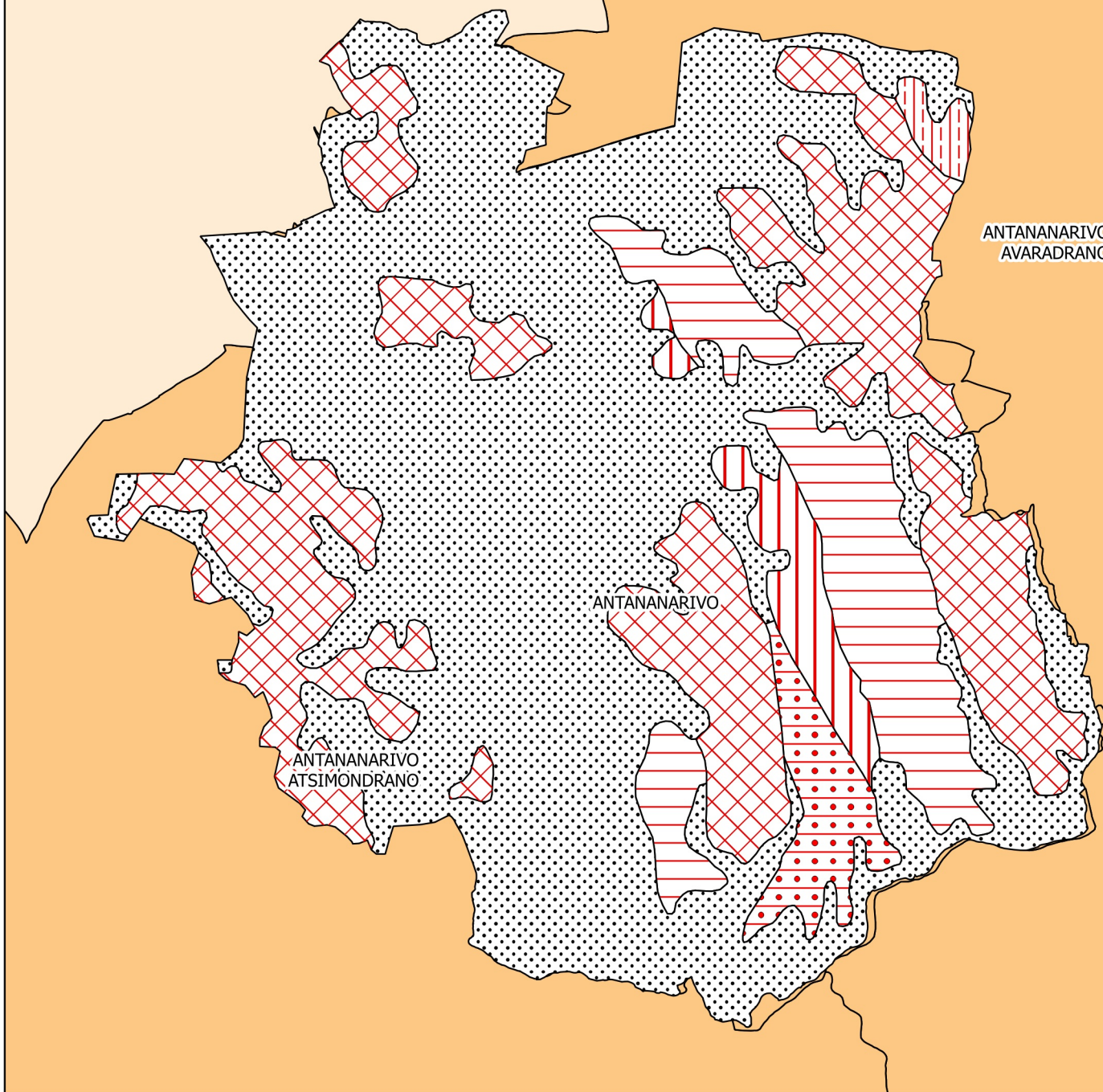
Les investigations auprès des différents organismes ont confirmé qu'il n'existait pas de données récentes qui traitent de la géologie ou même de la pédologie. Les données disponibles les plus précises sont issues de la carte géologique de Tananarive, à l'échelle du 1/100 000<sup>ème</sup>, de 1963 et de la carte pédologique établie par l'ORSTOM en 1968<sup>2</sup>. Ce dernier document est accompagné d'une notice très détaillée sur laquelle se base l'appréciation de la sensibilité à l'érosion. Elle apporte une information plus détaillée que la nature géologique des formations dont la seule description ne permet pas d'apprécier les niveaux d'altérations. Ce point est parfois évoqué dans la notice pédologique.

Même si elle a été peu exploitée dans le cadre de cette analyse, les principales limites des couches géologiques ont fait l'objet d'une retranscription au format SIG.

La zone d'étude regroupe différentes formations géologiques qu'il paraît intéressant de mettre en rapport de la description morphologique faite auparavant.

- Les formations géologiques récentes correspondent aux alluvions du Quaternaire. Elles se rencontrent au sein des zones les plus basses, en particulier toute la plaine d'inondation de l'Ikopa et plus localement, en aval au débouché des vallées comprises entre la vallée située entre la colline d'Ankatso et l'échine de l'observatoire – Fort Duchesne, puis la vallée qui sépare la colline de l'observatoire – Fort Duchesne de celle du Palais de la Reine.
- Les formations anciennes du socle et des faciès spéciaux qui correspondent aux échines et versants. C'est le cas des granites des collines d'Ankatsoa et du palais de la Reine, des gneiss et migmatites la colline de l'observatoire – Fort Duchesne.
- Les faciès spéciaux apparaissent de façon plus ponctuelle. La partie Sud-Est de la zone d'étude est fractionnée par des intrusions de Granite dits « d'Ambatomiranty ». C'est le cas notamment de l'échine de l'Observatoire – Fort Duchesne et de la colline d'Ankatso. Des intrusions de quartzites apparaissent aussi à l'intérieur du domaine granitique à plusieurs endroits de la zone d'étude. D'autres faciès, plus rares (graphite, grenat, etc.) peuvent apparaître ponctuellement.

<sup>2</sup>« Notice de la carte pédologique de Tananarive » au 1/100 000<sup>ème</sup>. BOURGEAT F., Maître de Recherches, ORSTOM Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre de Tananarive, 1968. 110 pages + annexes.





## Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA)



## Géologie

### Légende

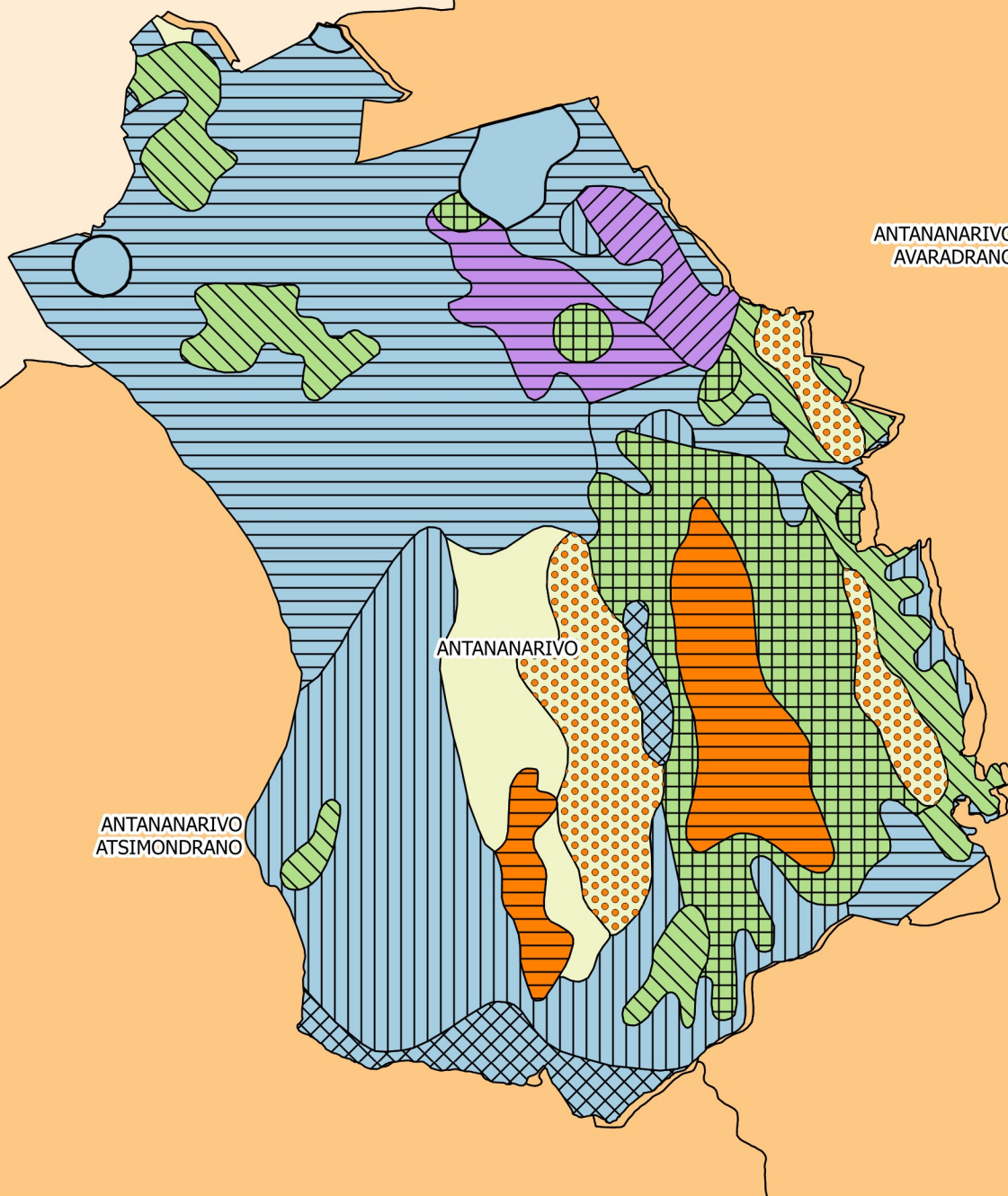
-  Alluvions
-  Charnockites
-  Gneiss
-  Gneiss à pyroxène
-  Granites migmatitiques et migmatiques granitoïdes
-  Migmatites

0 2 4 km

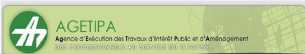
Réalisée en Janvier 2018  
Sources : Carte géologique modifiée  
de Tananarive au 1/100 000  
(G. DELUBAC, W. RAKOTOARISON,  
M. RANTOANINA, 1963), BRLI







## Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA)



## Pédologie

### Légende

- |   |   |
|---|---|
| Lithosols   | Sols à pseudogley   |
| Association avec sols rajeunés et pénévulés "beige rouge"                             | Sols beige-rouge sur roches + ou - acides profondément décomposés |
| Sols "beige rouge" sur roches profondément décomposées                                | Sols beige-rouge sur roches + ou - riches en quartz               |
| Sols "ocre beige à jaune sur rouge" sur roches + ou - acides profondément décomposées | Sols humides à gley   |
| Sols "ocre beige à jaune sur rouge" sur roches en quartz                              | Sols tourbeux oligotrophes  |
| Sols à gley à pseudogley indifférenciés   |   |

0 2 4 km

Réalisée en Janvier 2018  
Sources : Carte pédologique de reconnaissance au 1/100 000 (Campagnes 1964-1965), BRLI



En ce qui concerne la pédologie, les données issues du rapport GRIMA font état de la présence de deux principaux types de sols au sein de la zone d'étude, soit :

- les sols alluviaux que l'on retrouve dans les zones basses (fonds de vallées) et la plaine d'inondation de l'Ikopa ;
- les sols ferrallitiques issus de l'altération et de la décomposition très poussée des roches primaires (spécialement dans le domaine tropical).

Les données issues de la carte pédologique de 1968 et en particulier de sa notice, font état de la présence de 11 types de sols pour lesquels on estime la sensibilité à l'érosion.

Type de sol	Sensibilité à l'érosion
Lithosols. Sols bruts d'érosion. Horizon gris organique de 0 à 10 cm laisse la place à la roche en place résistante (migmatite granitoïde non morcelée, riche en quartz et en micas).	Nulle à très faible
Sols « beige rouge » sur roches profondément décomposées. Ces sols sont très répandus autour de la plaine de Tananarive. De 0 à 8 cm horizon humifère gris beige, grumeleux, degré de structuration élevé, très poreux, bon enracinement avec présence de quelques agrégats à structure polyédrique très fine avec une forte cohésion. De 8 à 40 cm Horizon ocre à beige rouge, argileux à argilo-sableux, compact, structure continue à éclats à tendance polyédrique grossière, porosité tubulaire moyenne.	Plutôt faible considérant la nature de la couche superficielle.
Sols « ocre beige à jaune sur rouge » sur roches plus ou moins acides profondément décomposées et sur roches riches en quartz. De 0 à 8 cm Horizon gris beige grumeleux grossier, cohésion moyenne, bon enracinement bonne porosité. De 8 à 80 cm, horizon beige ocre, argilo-sableux, structure continue à éclats à faible tendance polyédrique grossière, compact, porosité moyenne, en enracinement moyen à faible, riche en quartz brillants et émoussés. On rencontre ces mêmes sols sur des versants à pente peu accusée, surmontant des roches altérées en boules. De 0 à 8 cm horizon gris devenant blanchâtre en séchant, argilo-sableux, structure peu marquée à tendance grumeleuse en surface avec une faible cohésion, bon enracinement, forte porosité. 8 à 45 cm horizon jaune gris, argilo sableux, structure peu marquée continue secondairement, polyédrique moyenne, porosité tubulaire moyenne, on observe des remplissages d'horizons gris dans d'anciennes cavités.	Avérée par rapport à la structure des horizons superficiels
Sols « beige rouge » sur roches plus ou moins acides profondément décomposées. Ces sols sont développés sur des roches facilement décomposables : gneiss, migmatite, beaucoup plus rarement sur migmatite granitoïde. A l'intérieur même de la plaine de Tananarive, les basses collines sur gneiss ou roches très altérées qui forment des îlots portent ce type de sol plus ou moins remanié et colluvionné. La partie supérieure de l'horizon B de couleur beige rouge a une structure à tendance polyédrique moyenne, on n'observe pas de sous-structure, il est en général peu compact. Les traces de remaniements sont fréquentes : « stone-lines » discontinues, sols colluvionnés sur des anciennes terrasses alluviales Il est noté que dans le cadre d'une mise en valeur, ces sols doivent faire l'objet de mesures antiérosives.	Forte à très forte
Sols beige rouge sur roches plus ou moins riches en quartz. Ces sols présentent un horizon B généralement peu profond (1 m – 1,5 m), de couleur beige-rouge. La structure est plus ou moins marquée suivant la richesse en quartz. Le plus souvent on observe une structure polyédrique grossière avec des agrégats très poreux. Ces sols sont sujets à l'érosion.	Forte à très forte

Type de sol	Sensibilité à l'érosion
<p>Association avec sols rajeunis et pénévolués « beige rouge »</p> <p>Sols essentiellement limoneux, l'horizon B est de couleur beige rose plus ou moins brune. On trouve des minéraux très altérés à très faible profondeur (à 40 ou 50 cm au maximum). On note une variation très grande de la couleur à l'état sec et humide. La structure de l'horizon B est variable. Sur roches riches en quartz, la structure est polyédrique moyenne, les agrégats sont poreux. Sur roches riches en minéraux ferromagnésiens, la structure peut être polyédrique fine.</p> <p>Ces sols sont sujets à l'érosion</p>	Forte à très forte
<p>Sols tourbeux oligotrophes.</p> <p>Ces sols occupent des cuvettes de décantation à l'intérieur de la plaine de Tananarive. La matière organique qui atteint 30 à 50 % est du type peu fragmenté, avec une texture spongieuse : elle est le constituant principal du sol. L'épaisseur de l'horizon tourbeux atteint souvent 1 m ou plus. L'hydromorphie est totale et permanente.</p>	Très faible
<p>Sols humiques à gley. Ces sols se développent sur des terrasses, l'alluvionnement reste faible en raison de l'endiguement des rivières. La matière organique est en général comprise entre 8 à 20 %, elle est bien liée à la matière minérale. La teneur en argile varie le plus souvent entre 30 et 60 % au moins dans les horizons de surface</p>	Très faible
<p>Sols à gley, pseudo-gley indifférenciés. Ces sols occupent des terrasses où l'engorgement n'est que temporaire au cours de l'année. La matière organique totale est inférieure à 8 / 10 % en surface, le plus souvent elle est voisine de 5 %. On observe des taches de couleur grise ou rouille qui correspondent à des composés du fer réduits ou oxydés.</p> <p>Ils incluent aussi les sols localisés dans la partie amont de la plaine où les dépôts de crue sont les plus importants. Dans la plaine elle-même en raison de l'endiguement de l'Ikopa, les crues ne sont qu'exceptionnelles et les dépôts récents peu importants.</p>	Très faible

Par rapport à la pédologie, les zones les plus sensibles à l'érosion correspondent principalement aux échines et versants des collines d'Ankatso, de l'observatoire – Fort Duchesne et du Palais de la Reine. Sont aussi concernés les deux massifs granitiques migmatitiques d'Ambohimananariva et d'Ambohidroa, localisés au nord-ouest de la zone d'étude.

A l'inverse les zones les moins sensibles à l'érosion correspondent aux fonds de vallées alluvionnaires dont le vaste ensemble de la plaine d'inondation de l'Ikopa.

### 3.3 OCCUPATION DES SOLS

La carte d'occupation des sols a fait l'objet d'une prestation spécifique dans le cadre de l'activité 6, diagnostic urbain. Par souci de lisibilité, la synthèse présentée dans la cartographie jointe n'intègre pas la couche bâtie. Le contexte urbain impose en effet, de disposer d'une cartographie la plus précise possible de la couverture bâtie afin d'identifier la surface réellement érodable pour chaque bassin versant.





805 000

805 000

800 000

800 000

795 000

795 000

Sortie RN4  
(Vers Mahajanga)

Andranomaha

Ambosimampana

Avatobia

Ivandry

Sortie RN3 (Vers Anjozorobe)

Andranahitsy

Andranah

Ankondranahano

Manjakaray

Antanimena

Ampasampito

Sortie RN2  
(Vers Toamasina)

Manazo

67 ha

Andohatapenaka

Sortie vers Itaasy

Anapahely

Besarety

Anosy

Ankatso

Ambatomaro

Ampasipatrana

Anosibe

Ambanidia

Ambohipo

Sortie RN1  
(Vers Tsiroanimandidy)

Andranah

Androna

Mandroseza

Sortie RN7  
(Vers Fianarantsoa / Toliara)

## Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA)

## Carte de l'occupation du sol Année 2016

0,9 0,45 0 0,9  
Kilomètres

Réalisé le : 06 Novembre 2017

Sources : Îlots urbains / MNT 2016 BRL  
Bâti TaTom (COS) / Eau JIRAMA /  
Bornes fontaines BDA 2013



### Légende

Route nationale

Autre route

Limite de la CUA

Limite des fokontany

Zone constructible

Zone d'habitation

Zone administrative

Zone commerciale

Zone industrielle

Equipements divers

Zone non constructible

Rizières et zones inondées

En cours de remblai

Cimetière

Plan d'eau

Jardin / Parc / Espace vert etc.

Route / Parking etc.

Autre / Non défini



## 3.4 HYDROGRAPHIE ET AGRESSIVITE DES PLUIES

### 3.4.1 Définition du réseau hydrographique

La connaissance du réseau hydrographique principal n'est pas suffisante pour apprécier le potentiel en apports solides. De façon générale, le moindre thalweg en saison des pluies est susceptible de transporter des éléments solides. Certains de ces thalwegs sont bien visibles sur le terrain, mais beaucoup, pour ne pas dire la majorité ont été complètement modifiés par les interventions humaines. Ces interventions concernent le plus souvent : l'obstruction voire le remblaiement des réseaux, le dévoiement des réseaux, la présence de constructions et usages divers (cultures) au sein des thalwegs les plus importants.

La reconnaissance du réseau sur le terrain est donc particulièrement difficile, notamment lorsqu'il s'agit des réseaux secondaires au sein d'une zone urbaine particulièrement dense et très pentue comme Antananarivo.

Dans le cadre de la mission l'acquisition d'un MNT très précis a permis de tracer de façon automatique à partir du logiciel Global Mapper, les limites de bassins versants et les différents axes d'écoulements ou axes de ruissellements. Une taille de 5 ha pour la définition des bassins versants sur la partie la plus pentue de la zone d'étude a été retenue, car cette taille correspond le plus souvent à l'unité de base des principaux systèmes potentiellement producteurs en sédiments.

La suite du travail a consisté à valider les limites de bassins versants avec ceux identifiés dans le cadre de la tranche ferme et qui avaient fait l'objet d'ajustements en fonction des réalités de terrain.

Un dernier travail de toilettage a été réalisé afin de retirer les axes d'écoulement aberrants que l'on rencontre lorsque la topographie est très plane (cas des bas-fonds). Dans le cas de la plaine de l'Ikopa (entre le canal Andriantany et l'Ikopa), particulièrement plane, le réseau recensé correspond à celui des bases de données existantes car il s'agit ici d'un réseau essentiellement d'origine « anthropique ».

La pertinence de cette méthode d'analyse avait été vérifiée dans le cadre de la tranche ferme en comparant le réseau hydrographique généré automatiquement avec le réseau existant sur le terrain. Même si l'on observe parfois des écarts par rapport à l'interprétation du logicielle, cette méthode s'avère pertinente pour identifier les axes hydrographiques structurants ainsi que la majorité d'axes plus secondaires sur les parties les plus pentues du bassin versant (soit toute la partie Est / Sud-est de la zone d'étude).

Ce travail a permis d'établir une carte du réseau des axes d'écoulements afin de calculer une densité de drainage pour les différents bassins versants. L'histogramme des valeurs de densités de drainage classées a permis de repérer les principales ruptures dans la distribution et les trois classes suivantes (unités en mètre linéaire par hectare) : < à 250 ml/ha ;] 250 et 500] ml/ha ; > à 500 ml/ha.

Ces classes ont été utilisées par la suite pour évaluer la sensibilité à l'érosion des bassins versants en partant du postulat que la capacité à mobiliser et transporter des sédiments augmente avec la densité de drainage.

A l'échelle de la zone d'étude, les densités de drainage sont relativement homogènes. En dehors de quelques exceptions, la valeur médiane de 311 ml/h (pour une valeur moyenne de 363 ml/ha) paraît bien représentative de la distribution.

### 3.4.2 Évaluation de l'agressivité des pluies

L'évaluation de l'agressivité des pluies repose généralement sur le calcul du facteur « R » de l'équation RUSLE (d'après Wischmeier). Les données nécessaires pour réaliser ce calcul nécessitent de connaître l'énergie cinétique globale des gouttes de pluies et l'intensité maximale de pluie observée en 30 minutes. Cependant les données disponibles au sein de la zone d'étude ne permettent pas de disposer des précipitations maximales pour la période spécifique de 30 minutes.

Considérant les données disponibles, l'érosivité des pluies fait appel à l'indice donné par Arnoldus (1980) basé sur le rapport entre la somme carré de la pluviosité moyenne mensuelle de chaque mois de l'année et la pluviosité moyenne annuelle.

$$IA = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{P_i^2}{P} \right)$$

L'appréciation de cet indice est présentée suivant les classes proposées par la CEC (1992<sup>3</sup>) dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2 : Classes de l'indice d'Arnoldus (CEC, 1992) - Evaluation de l'importance de l'érosivité des pluies**

Classes	Description	Indice d'Arnoldus (1980)
1	Très faible	<60
2	Faible	60 – 90
3	Moyenne	90 – 120
4	Elevée	120 – 160
5	Très élevée	>160

Le calcul de l'indice dans le cadre de l'analyse, est basé sur les données pluviométriques journalières des stations d'Ivato et d'Anosizato avec des chroniques de respectivement 68 et 8 années de mesures.

Considérant notamment la chronique d'Ivato (68 ans), ces données sont suffisantes pour apporter un éclairage assez fin de l'agressivité des pluies.

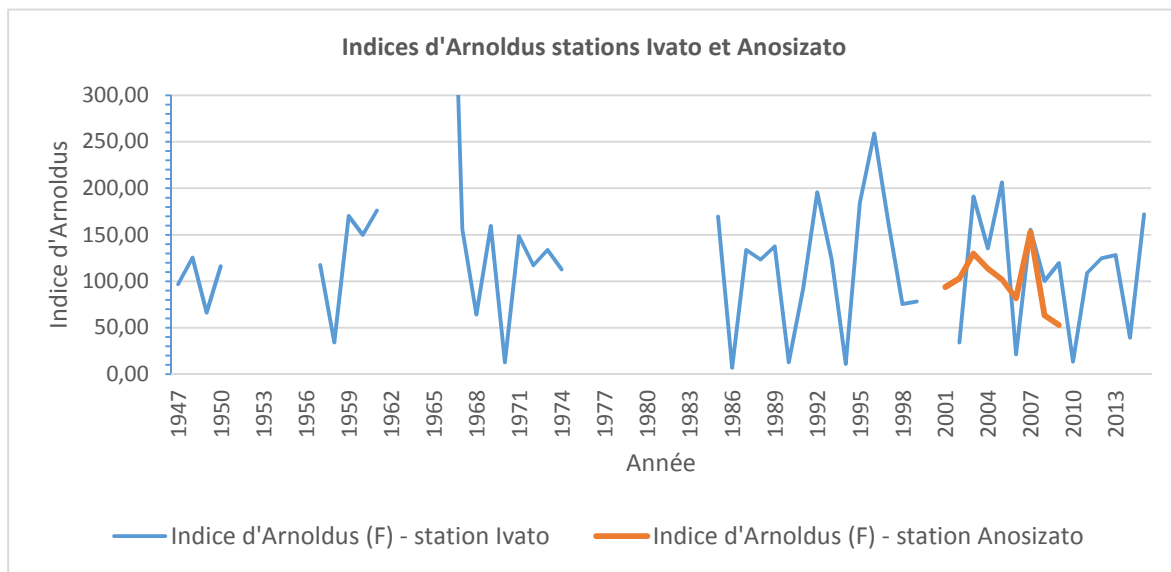
Par contre, les données entre les deux stations (Ivato et Anosizato) ne montrent pas d'écarts significatifs, autre que l'écart imputable aux relevés mêmes. En d'autres termes, l'analyse ne fait pas ressortir de gradient pluviométrique au sein de la zone d'étude, mais témoigne plutôt de son caractère relativement uniforme avec une bonne représentativité de la station d'Ivato.

Les résultats synthétisés dans le graphe ci-dessous, témoignent d'une forte variabilité d'une année à l'autre, sans dégager de tendance véritable (peut-être une légère diminution sur les dernières années, mais elle paraît trop faible pour être vraiment significative).

<sup>3</sup> CEC (Commission of European Communities), 1992. Corine soils erosion risk and important land resources in southern regions of the European Community. Brussels, Commission of the European Community EUR 13233 EN, Luxembourg. Office for official publications of the European community, 97 p.



Figure 2 : Indices d'Arnoldus aux stations d'Ivato et d'Anosizato



La moyenne des indices d'Arnold aux deux stations correspond à la classe d'érosivité « moyenne » pour la station d'Anosizato alors que pour la station d'Ivato qui dispose de la chronique la plus importante, la classe d'érosivité est élevée. Cette dernière classe est certainement la plus représentative considérant les phénomènes érosifs observés sur la zone d'étude. Sur 69 ans, les classes d'érosivité « élevée » et « très élevée » représentent plus de 37 % des années, avec seulement 19 % pour les classes « Très faible » à « Faible ». La classe « Moyenne » représente à elle seule environ 43 % des années.

Cette analyse confirme la capacité érosive des pluies sur la zone d'étude avec des indices qui peuvent être élevés en cas de cyclones (cas de Gafilo, années 2003 – 2004) ou de tempêtes tropicales (Chezda et Fundi en 2014 – 2015). Les données disponibles semblent plutôt montrer une absence de variabilité significative de l'indice d'agressivité au sein de la zone d'étude.

## 4. DEFINITION DE LA SENSIBILITE A L'EROSION

### 4.1 ÉLEMENTS METHODOLOGIQUES

La définition de la sensibilité repose sur la confrontation entre les données pédologiques, les pentes, l'occupation du sol et la densité de drainage. L'agressivité des pluies n'étant pas discriminante à l'échelle de la zone d'étude, elle n'a pas été intégrée.

Le résultat de cette confrontation correspond à la somme des indices de sensibilité à l'érosion appréciés pour chaque descripteur (pédologie, pente, occupation du sol et densité de drainage). Les indices retenus pour chaque descripteur sont synthétisés dans les grilles ci-dessous.

L'évaluation des indices est basée sur une échelle de variation comprise entre 1 et 3 avec pour le niveau 1 une sensibilité considérée comme nulle à très faible et pour le niveau 3 une sensibilité forte à très forte.

Pédologie	Coefficient
Association avec sols rajeunis et pénévulés « beige rouge »	2,5
Lithosols	1
Sols « beige rouge » sur roches profondément décomposées	1,5
Sols « ocre beige à jaune sur rouge » sur roches + ou - acides profondément décomposées	2
Sols « ocre beige à jaune sur rouge » sur roches en quartz	2
Sols à gley à pseudogley indifférenciés	1,5
Sols à pseudogley	1,5
Sols beige-rouge sur roches + ou - acides profondément décomposées	2,5
Sols beige-rouge sur roches + ou - riches en quartz	2,5
Sols humides à gley	1,5
Sols tourbeux oligotrophes	1

Type d'occupation des sols	Coefficient
Bâti	1
Cimetière	1,5
En cours de remblai	2,5
Equipements divers	1,7
Jardin / espaces verts	1,5
Plan d'eau	1
Route parking	1
Zone administrative	1,5
Zone commerciale	1,3
Zone de culture	2
Zone d'habitation	1,8
Zone industrielle	1

Pente	Coefficient
< 15°	1
15° à 35°	2
> 35°	3
Densité de drainage	Coefficient
< à 250 ml/ha	1
] 250 et 500] ml/ha	2
> à 500 ml/ha	3

L'expertise s'efforce d'être la plus objective possible. Ainsi, dans le cas de la pédologie, l'évaluation repose sur la description des horizons pédologiques en particulier sur la description des éléments de structures et de textures. Dans certains cas, l'appréciation est encore plus claire quand la nature érosive du sol est indiquée. Cette évaluation prend aussi en compte les éléments issus de l'étude GRIMA.

Dans le cas de la pente, de l'occupation du sol et de la densité de drainage, les évaluations prennent appui sur des éléments quantifiés :

- Pour l'occupation des sols : calcul d'un indice global pour chaque bassin versant, pondéré en fonction des types d'occupation du sol ;
- Pour les pentes : discrétisation (classes de sensibilités) analogue à celle utilisée dans l'étude GRIMA et que l'on retrouve ailleurs dans la littérature ;
- Pour la densité de drainage : discrétisation à partir de l'histogramme des valeurs classées.

## 4.2 PRISE EN COMPTE DU PROJET GRIMA

La carte de l'aléa mouvements de terrain, produite dans le cadre du projet GRIMA a été exploitée en interprétant à nouveau la nomenclature du point de vue des apports solides potentiels en éléments fins.

Les valeurs de l'indice sont issues d'un croisement entre le type d'événement et l'aléa proposé dans GRIMA. La capacité à produire des sédiments augmente avec celle de l'indice. Ainsi, en ce qui concerne les événements, les chutes de blocs libèrent moins de sédiments mobilisables que les glissements. Ces glissements sont généralement moins producteurs que les érosions.

Type d'événement	Niveau		
	faible à modéré (1)	moyen (2)	fort (3)
Chutes de blocs (1)	P1 (1)	P2 (2)	P3 (3)
Glissement (2)	G1 (2)	G2 (4)	G3 (6)
Erosions (3)	E1 (3)	E2 (6)	E3 (9)

D'après ce tableau, la résultante d'un événement associant à titre d'exemple un glissement d'aléa faible à modéré (G1), à une chute bloc affectée d'un aléa moyen (P2) et une érosion forte (E3), correspond à une valeur de  $G1 \times P2 \times E3$ , soit 36.

Cette interprétation aboutit à la grille ci-dessous.

Code	Valeur	Capacité potentielle en apports solides fins
Nul	0	Très Faible
E1	3	Faible
P3	3	Faible
G1 E1	6	Faible à Modéré
G1 P1 E1	6	Faible à Modéré
G2 P2	8	Faible
P2 E2	12	Faible à Modéré
G1 E2	12	Faible à Modéré
G2 P3	12	Faible
G3 P2	12	Faible à Modéré
G2 E2	24	Modéré à important

Code	Valeur	Capacité potentielle en apports solides fins
G2 P1 E2	24	Modéré à important
G2 P2 E1	24	Faible à Modéré
G2 P3 E1	36	Faible à Modéré
G3 E2	36	Important
G3 P1 E2	36	Important
G2 P2 E2	48	Modéré à important
G2 P3 E2	72	Modéré à important
G3 P2 E2	72	Important
G3 P3 E2	108	Important à très important

## 4.3 RESULTATS

### METHODE DEVELOPEE DANS LE CADRE DE CETTE ANALYSE

Sur l'ensemble des 708 bassins versants, la somme des indices varie entre 1 et 8,5 pour un écart-type de 1,64 et une moyenne de 5,49.

La représentation cartographique est basée sur une discrétisation en 12 classes d'égale amplitude (0,5). Le nombre de classes optimum a été déterminé à partir de la formule de Scott :

$$\text{Nombre de classe} = \frac{b - a}{3,5 \text{ Ecart type} \cdot N^{-1/3}}$$

Avec a et b respectivement valeurs minimum et maximum de l'effectif et N l'effectif total

La représentation cartographique fait clairement la distinction entre les bassins versant de la plaine inondable moins soumis à l'érosion et les reliefs largement plus exposés. Elle met notamment en évidence les échines et versants des collines d'Ankatso et du palais de la Reine, dans une moindre mesure la colline de l'observatoire – Fort Duchesne. L'analyse fait aussi ressortir tout le massif localisé au nord du marais Masay.

### CONFRONTATION AVEC L'EXPLOITATION DES DONNEES GRIMA

La carte issue de nouvelle interprétation de la légende est très proche de celle produite dans le cadre de cette analyse. Les principales différences concernent :

- Les apports potentiels issus de la vallée de l'est et des massifs localisés au nord du marais Masay. D'après GRIMA, ces apports présentent un niveau global « faible » alors que dans le cadre de cette analyse, les niveaux d'apports sont plus proches de ceux observés sur les échines et s'inscrivent assez bien dans la continuité de la colline d'Ankatso.
- Les apports au sein de la plaine de l'Ikopa. L'interprétation GRIMA conduit à retenir une capacité potentielle très faible, alors que les différences sont plus marquées dans le cadre de cette analyse. Elles sont essentiellement le fait de l'occupation et de la nature des sols.

## LES ENSEIGNEMENTS

De façon générale à l'échelle de la zone d'étude, ce sont les bassins versants implantés de part et d'autres des lignes de crêtes formées par les échines (donc les zones les plus pentues) qui présentent presque toujours le potentiel en apports solides le plus important. On peut considérer que c'est aussi le cas des versants localisés au nord du marais Masay.

On remarque par ailleurs une bonne relation entre les glissements observés suite à l'événement de février 2015 (14 février) et les bassins associés au potentiel de production en sédiments le plus important, soit les collines d'Ankatso et du palais de la Reine.





ANTANANARIVO  
AVARADRANO

ANTANANARIVO  
ATSIMONDRAVO

ANTANANARIVO

## Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA)



## Sensibilité à l'érosion

### Légende

- Événements (février 2015)
  - Lavakas
  - Dépôts solides
- |          |             |             |            |
|----------|-------------|-------------|------------|
| 1 - 1.62 | 1.62 - 2.25 | 4.75 - 5.38 | 7.88 - 8.5 |
|          | 2.25 - 2.88 | 5.38 - 6    |            |
|          | 2.88 - 3.5  | 6 - 6.62    |            |
|          | 3.5 - 4.12  | 6.62 - 7.25 |            |
|          | 4.12 - 4.75 | 7.25 - 7.88 |            |

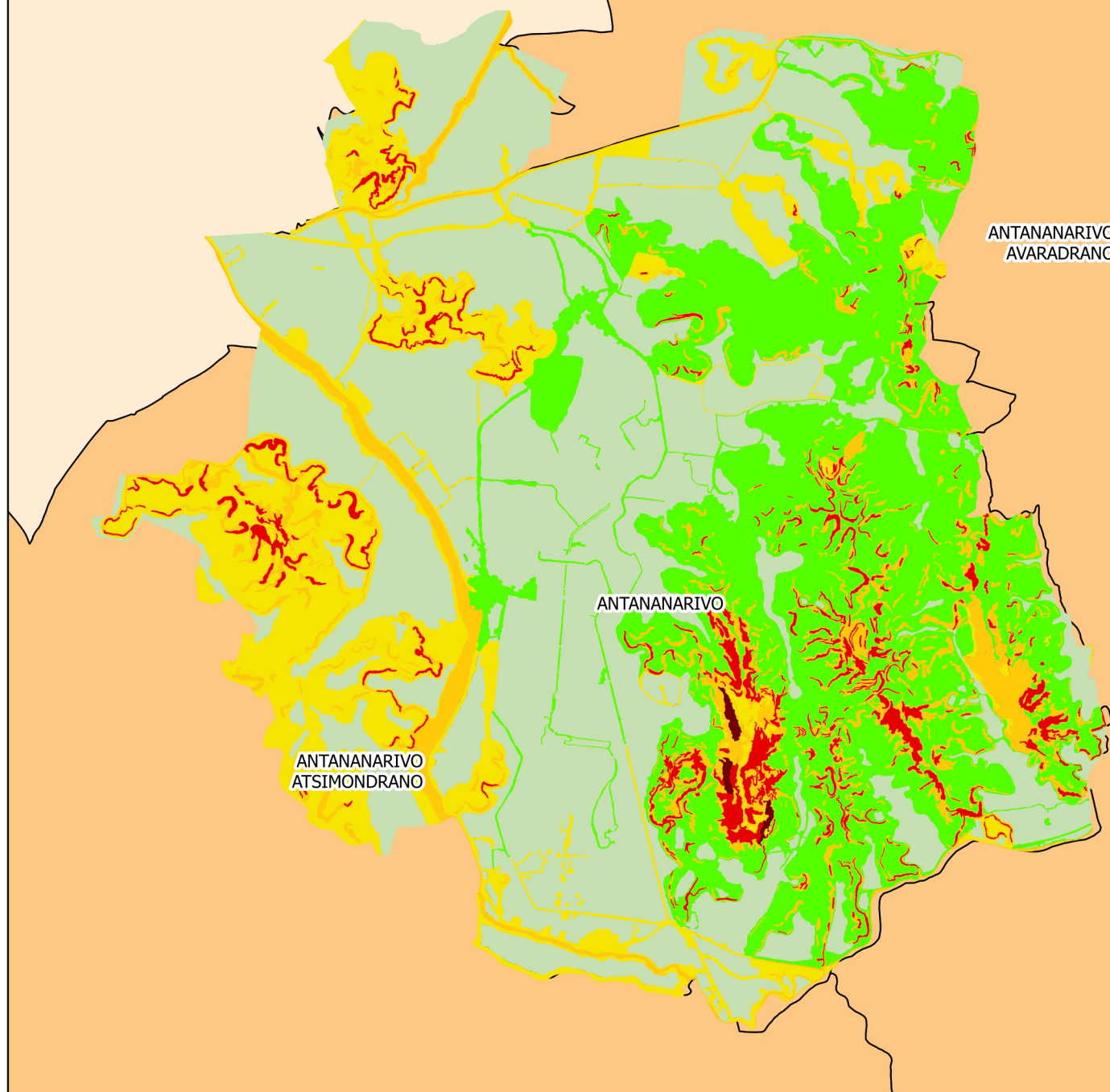
Réalisée en Janvier 2018  
Sources : GRIMA, SAMVA,  
BRLI

0 1 2 Km

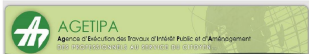








## Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA)



## Capacité potentielle en apports solides fins

### Légende

- |                 |                            |
|-----------------|----------------------------|
| Très faible     | Modéré à important         |
| Faible          | Important                  |
| Faible à Modéré | Important à très important |

0 2 4 km

Réalisée en Janvier 2018  
Sources : GRIMA (mars 2015), BRLi



Cette relation est un peu moins nette en ce qui concerne les lavakas, même si les bassins concernés présentent un bon potentiel. La présence de ces formes d'érosions caractéristiques semble plus liée à la nature géologique et surtout pédologique des terrains. Pratiquement tous les lavakas se rencontrent sur des sols de type « beige rouge, sur roches profondément décomposées » ou en association avec des sols rajeunis et pénévulés « beige rouge » ; la géologie associée correspondant essentiellement aux gneiss mais aussi aux granites migmatitiques et migmatites granitoïdes.

Ces mêmes sols et natures géologiques (auxquelles il convient d'ajouter les lithosols) concernent tous les glissements observés suite à l'événement de 2015 (février, mars 2015). Les pluies abondantes de la mi-février 2014 sont responsables de nombreux glissements de terrain. Dans un rapport de mars 2015, le BNGRC<sup>4</sup> note la *présence de menaces d'éboulements et de glissement de terrain au niveau des collines d'Antananarivo, notamment les versants Est, Ouest, Sud de la colline Manjakamiadana ainsi que sur la colline d'Ambatomaro surplombant les fonkontany d'Avaratrakatso centre et une partie du fonkontany d'Ambolokandrana.*

Par conséquent, (et en guise de synthèse) les glissements, les lavakas, les bassins potentiellement les plus producteurs en sédiments se rencontrent principalement sur les zones les plus pentues des versants et en association avec deux types de sols (beige rouge sur roches profondément décomposées, beige rouge en association avec des sols rajeunis ou pénévulés) et trois structures géologiques (lithosols, gneiss, granites migmatitiques et migmatites granitoïdes).

La plaine de l'Ikopa se distingue par un potentiel de production en éléments solides plus restreint, essentiellement contrôlé par la pente et l'occupation urbaine. L'approche développée dans le cadre de cette analyse met cependant en évidence des potentiels différents en fonction des bassins versants.

La notion de sensibilité à l'érosion traduit dans tous les cas la capacité pour un bassin versant à produire des sédiments. Cependant, de la production à la collecte au sein des réseaux, la dynamique est différente entre les zones de relief et la plaine.

- Sur les zones les plus pentues, on peut considérer que le lien est relativement direct. La présence de zones non revêtues (zones interstitielles aux bâtiments), ou encore de formes d'érosions particulières (Lavakas), alimentent un débit solide dont le volume augmente avec la capacité de drainage. Plus en aval, les sédiments empruntent les thalwegs préférentiels dont certains sont associés à des cheminements piétons ou des axes routiers. Toutefois, le développement urbain a souvent fait l'objet de modifications profondes du réseau hydrographique dans lequel se retrouvent aussi de très nombreux déchets. Les dépôts constatés sur le terrain sont généralement liés à la présence d'obstacles au transport solide (réseaux hydrographiques comblés, barrés, ou encore déviés, discontinuités de gabarits de sections) et/ou à la présence de ruptures de pentes (fonctionnement naturel).
- Au sein de la plaine, les apports solides au sein des canaux ont plutôt pour origine l'érosion des berges, les apports naturels de l'Ikopa, les déversements anthropiques (eaux usées et déchets) et pour une part certainement plus modeste, les apports des bassins versants tels que décrits par la sensibilité à l'érosion.

Ces différentes dynamiques sont essentielles pour tenter une approche quantitative des apports solides.

<sup>4</sup> Synthèse de la situation, Bulletin Spécial n°10, du lundi 2 mars 2015. « Bulletin d'Informations Quotidien, Glissement de terrain et éboulement dus aux pluies abondantes depuis le 14 février 2015 ».

## 5. ELEMENTS DE QUANTIFICATION

La quantification des apports solides est souvent estimée à partir de l'équation empirique du modèle RUSLE. En l'espèce et comme évoqué dans la revue bibliographique, cette équation n'est pas adaptée car elle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe, mais jamais à l'érosion linéaire ni à l'érosion en masse. Or, sur les zones les plus pentues, la production en sédiments correspond à des prélèvements ponctuels (cas des lavakas ou sites particuliers) ou des prélèvements assimilables à de l'érosion linéaire notamment lorsqu'il s'agit d'espaces non revêtus entre bâtiments, ce qui concerne la très grande majorité des bassins versants des reliefs (pour ne pas dire l'intégralité).

En plaine, comme évoqué dans le précédent paragraphe, l'essentiel des apports solides ne provient pas de la plaine, par conséquent la part de l'érosion en nappe est très faible et on peut d'ailleurs douter de son efficacité considérant l'occupation des sols (densité urbaine importante).

A ces arguments on peut aussi en ajouter d'autres qui justifient de ne pas retenir le modèle RUSLE<sup>5</sup> :

- L'inaptitude du modèle à estimer les pertes en terre sur une courte période (saison ou épisode pluvieux isolé) ;
- Le fait que ce modèle considère les facteurs de l'érosion comme indépendants, alors qu'il existe des nombreuses interactions entre ceux-ci. En effet, l'équation se présente sous la forme d'un produit et fait intervenir les facteurs par leur poids statistiques sans tenir compte de leur liaison causale, négligeant alors des relations complexes. Or, dans les régions peu accidentées, à climat peu agressif, les relations entre les facteurs sont sans doute plus déterminantes que les facteurs eux-mêmes. Ainsi, la dégradation progressive du sol sous l'action de la pluie permet à des pluies de plus en plus faibles de provoquer la formation d'un ruissellement et l'érosion. L'équation ne prend en compte les interactions entre facteurs que de manière sommaire puisqu'elle les suppose linéaires.

Considérant ces éléments, l'estimation des volumes produits est basée sur la prise en compte de différentes données quantifiées issues des enquêtes et reconnaissances de terrain. Les résultats sont certainement plus fiables que ceux donnés par le modèle RUSLE, en contrepartie, ces données ponctuelles ne permettent pas de retranscrire les apports solides à l'échelle de tous les bassins versants.

### 5.1 SITES DE DEPOTS

Les enquêtes auprès des différents organismes chargé de l'entretien des réseaux (en particulier CUA et SAMVA), ont permis d'évaluer les volumes de dépôts récurrents au sein de la zone d'étude (dépôts généralement grossiers, ou hétérométriques – sables, graviers, cailloux ou éléments parfois plus grossiers). Ces dépôts localisés au niveau des ruptures de pentes se retrouvent le plus souvent sur les axes routiers qu'il faut alors dégager après chaque pluie. Les sites et volumes prélevés sont assez bien connus et il s'avère assez facile de les rattacher aux principaux bassins versants producteurs.

<sup>5</sup> D'après <http://www.alismiri.com/uploads/courses1.pdf>

### 5.1.1 Localisation des sites de dépôts

Le travail préalable réalisé en amont des reconnaissances de terrain a consisté à identifier les sites concernés par les apports solides potentiels les plus importants en procédant à un croisement simple entre la structure du réseau hydrographique issue du traitement automatique et la carte issue de l'exploitation des données GRIMA. Les points ainsi identifiés correspondent à ceux pour lesquels on note une correspondance entre une capacité potentielle en apports solides fins importante à très importante et la présence d'un réseau hydrographique drainant dense, suivant appréciation de l'observateur.

Les enquêtes ont permis de constater que les sites concernés par des dépôts récurrents identifiés par les organismes en charge de l'entretien du réseau correspondaient pratiquement toujours à un point identifié dans le cadre de l'exploitation des données GRIMA.

Une douzaine de sites sont concernés par des dépôts récurrents. A l'échelle de la zone d'étude, ils se répartissent généralement en aval de bassins qui présentent une sensibilité à l'érosion au moins équivalente à 5 pour une valeur moyenne d'environ 6,5. C'est le cas :

- Des bassins versants des quartiers Soanierana, Fiadanana, Mananjara ou encore Ambohijanahary qui jouxtent le canal Andriantany ;
- Des bassins versants localisés sur le pourtour de l'échine du palais de la Reine, soit du stade Mahamasina en descendant sur Tsimbazaza, Tsarafaritra puis en remontant par Manakambahiny jusqu'à l'ONG Lalana.
- Des bassins versants localisés en amont du centre-ville : Amparibe, Faravohitra, Ambatonakanga ;
- De la partie aval des bassins versant des quartiers Andohanimamdroseza et Ambohipo Tanana ;
- Des bassins versants de l'Institut Pasteur, de la rue voltaire à Ratsimbazafy à Andrainarivo et du quartier Ambodimanga Besarety ;
- Des bassins versants qui débouchent sur Mahavoky et Anjanahary.

### 5.1.2 Volumes produits

Les volumes annuels produits, considérés comme fiables, sont synthétisés dans le tableau ci-dessous dans lequel sont reportées les informations suivantes :

- Le volume total produit, sur la base des éléments rassemblés lors des enquêtes ;
- Les indices des bassins versants contributeurs ;
- La superficie totale du bassin versant et la superficie dite « efficace » à laquelle est retranchée la part non productive en sédiments (superficies bâties) ;
- La production en  $m^3/ha/an$  ;
- La présence de formes d'érosions susceptibles d'alimenter le transport solide.

Site	Volume m³/an	Indice	Superficie totale (ha)	superficie BV « efficace » (en ha)	Taux d'érosion en m³/ha/an	Formes d'érosions
Palais des sports	210	7,60	15,93	12,04	6,48	Lavaka (1) + effondrement (1)
		7,57	9,24	7,33		effondrements (3)
		7,99	10,14	8,17		effondrements (5)
		6,75	5,96	4,86		Lavaka (1) + effondrement (1)
Jirama Soanierana	44	4,93	4,91	4,02	5,30	effondrements (2)
	30	6,04	13,45	9,95		effondrements (4)
ONG Lalana	245	6,85	22,86	17,44	6,44	
		8,18	13,77	11,67		Lavaka (1)
		7,50	11,52	8,92		Lavaka (1)
Tsarafaritra	35	5,49	8,44	6,96	5,03	Lavaka (2)
Tsimbazaza	50	7,77	10,66	8,81	1,68	Lavaka (1) + effondrement (3)
		7,75	5,28	4,37		Lavaka (1)
		7,65	9,79	8,48		Lavaka (1) + effondrement (6)
		5,62	6,32	4,72		effondrement (1)
		5,55	1,29	0,82		Néant
		5,99	3,32	2,58		Néant
Andohananalakely, Ambohitato	77	7,54	28,23	22,00	3,50	Néant
Descours	30	4,79	4,57	3,23	3,51	Néant
		4,78	7,63	5,31		Néant
Institut Pasteur	60	7,19	1,45	1,25	10,94	Néant
		6,00	2,07	1,30		Néant
		6,10	4,18	2,93		Néant
Fiadanana	20			-		glissement ponctuel

Site	Volume m <sup>3</sup> /an	Indice	Superficie totale (ha)	superficie BV « efficace » (en ha)	Taux d'érosion en m <sup>3</sup> /ha/an	Formes d'érosions
Gastro-pizza Soanierana	20	5,61	10,32	7,09	2,82	Néant
Ankadimbahoaka (CEMES Soanierana)	20	5,34	3,70	3,20	6,25	effondrements (2)
Ambodimanga - Besarety	20	6,61	4,95	3,01	6,64	
CEMES Betongolo	40	6,18	9,72	7,68	5,21	
Andohanimamdroseza	180	6,57	11,44	10,19	3,00	Lavaka (1)
		6,14	13,03	10,08		Lavakas (2)
		6,08	6,04	4,36		
		6,61	6,87	4,99		Lavaka (1)
		6,35	19,60	17,21		Lavakas (2)
		6,14	16,54	13,26		Lavaka (1) + effondrements (2)
Ambohipa Tanana	100	6,98	7,32	5,88	12,64	
		5,56	2,35	2,03		

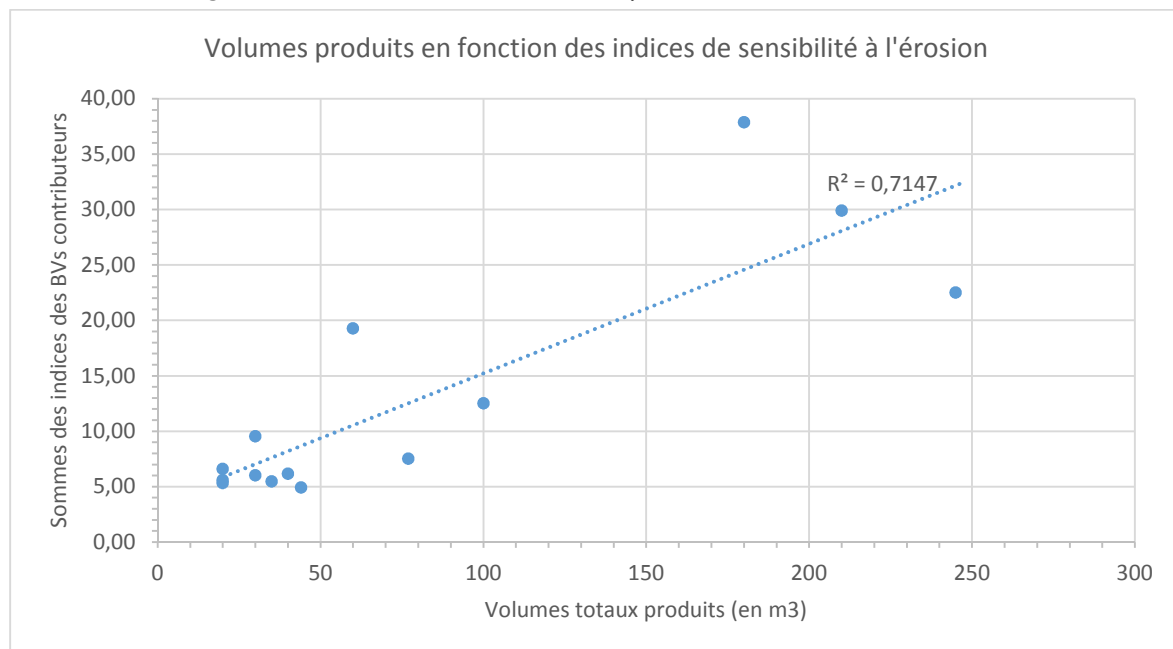


Ces chiffres rendent compte de la grande variabilité en matière de production sédimentaire d'un bassin à l'autre avec des valeurs qui peuvent aller de 2 à 13 m<sup>3</sup>/ha/an. Certaines données plus ponctuelles font état de valeurs pouvant pratiquement atteindre les 20 m<sup>3</sup>/ha/an<sup>6</sup>. La présence de formes d'érosions caractéristiques (notamment les lavakas) ne semble pas influencer de façon significative les taux de production (sauf peut-être en cas d'événement exceptionnel) car les plus importants ne sont pas toujours associés à de tels phénomènes (cas des sites de l'Institut Pasteur ou encore d'Ambohipa Tanana). On peut aussi supposer que certaines formes sont plus actives que d'autres.

Il n'en demeure pas moins que ces volumes correspondent à la résultante des sédiments produits à l'échelle des bassins, même s'ils ne prennent pas en compte la part potentiellement « stockée » entre les zones de production et l'exutoire, (part plus ou moins importante en fonction de la configuration des bassins versants) et celle qui rejoint le réseau.

La relation entre les volumes totaux produits (en m<sup>3</sup>) et la somme des indices de sensibilité à l'érosion des bassins versants contributeurs, fait état d'un lien plus représentatif pour de faibles valeurs d'indices, c'est-à-dire dans le cas de bassins considérés individuellement ou encore lorsque deux ou trois bassins sont agrégés. Au-delà, dans le cas de l'agrégat de 4 bassins et plus, on note une grande dispersion des volumes produits, très certainement liée à la prise en compte d'une plus grande variabilité des configurations des bassins versants que l'indice ne peut pas prendre en compte.

**Figure 3 : Relation entre les volumes produits et la sensibilité à l'érosion**



De façon plus pragmatique, on peut considérer que pour un ou deux bassins dont la somme des indices de sensibilité est comprise entre 5 et 10, le volume total de sédiments produits (ou plus exactement le volume total déposé en aval du bassin), est compris entre 20 et 40 m<sup>3</sup>/an.

Ce type de relation permet d'approcher un ordre de grandeur du volume de sédiments produit annuellement sur les bassins versants les plus pentus (soit ceux localisés à l'est du canal Andriantany).

<sup>6</sup> Cette valeur citée dans le cadre du compte-rendu de tranche ferme, concerne un bassin versant au pied de l'échine du palais de la Reine – Tsimbazaza. Les enquêtes effectuées dans le cadre de cette tranche et les reconnaissances de terrains, semblent montrer qu'une valeur de 20 m<sup>3</sup>/ha/an est plus proche d'un événement exceptionnel que d'un apport annuel régulier.

## 5.2 DONNEES ISSUES DES CHAMBRES A SABLES (CAS)

Il existe plusieurs chambres à sables au sein de la zone d'étude (12 chambres). Elles sont pour l'essentiel réparties au sein du cœur historique de la ville et sur la partie aval de la vallée de l'Est. Les données transmises par le SAMVA correspondent aux volumes mensuels prélevés pour les CAS 1 à 8 entre les années 2005 et 2009, puis 2016 et 2017 (il n'y a pas eu de prélèvement entre 2009 et 2017).

Ces chambres drainent des bassins versants de tailles variables, comprises entre quelques hectares (respectivement 1,65 et 2,46 Ha pour les CAS 7 et 8) jusqu'à plusieurs km<sup>2</sup> (CAS 1, plus de 303 Ha, soit 3 km<sup>2</sup>).

Les ratios interannuels moyens sont eux aussi fort différents et affichent des valeurs comprises entre moins de 1 m<sup>3</sup>/ha/an (CAS 1, 3 et 5) jusqu'à 8 m<sup>3</sup>/ha/an (CAS 7). Les chiffres disponibles sur 2017 pour cette dernière CAS affichent des ratios beaucoup plus élevés qui paraissent cependant disproportionnés (pratiquement 23 m<sup>3</sup>/Ha/an !).

Certaines de ces valeurs moyennes montrent une bonne cohérence avec les données acquises par ailleurs, dans le cadre des enquêtes et des reconnaissances de terrain (voir ci-dessus « volumes produits »). Les valeurs les plus faibles peuvent aussi signifier une plus faible efficacité de certaines CAS.

Les analyses plus approfondies ne montrent pas toujours de lien véritable entre les apports des bassins versants drainés par la CAS et les indices de sensibilité à l'érosion de ces mêmes bassins. Ce constat semble montrer que tous les apports en sédiments produits à l'échelle d'un bassin versant n'arrivent pas directement dans les CAS car il faut aussi compter avec la présence de dépôts intermédiaires. Ce constat a d'ailleurs été fait sur de nombreux bassins où la configuration d'implantation du bâti ainsi que les modifications de réseaux associées peuvent créer des points de blocages, des points de débordements particuliers qui favorisent le dépôt des sédiments.

Les relations entre les ratios en m<sup>3</sup>/ha/an et les moyennes annuelles des pluies constatées (à la station d'Ivato) apportent d'autres éléments. La CAS 2 mais aussi les CAS 4 et 8, (même si cette relation est moins nette pour ces deux dernières), permettent d'observer une augmentation des apports solides en même temps que celle des apports pluviaux. Pour les autres CAS ces relations n'existent pas.

**Tableau 3 : Bilan annuel des volumes curés (en m<sup>3</sup>/Ha/an)**

N° de CAS	CAS 1	CAS 2	CAS 3	CAS 4	CAS 5	CAS 6	CAS 7	CAS 8
Surface BV (Ha)	303,87	45,91	52,08	131,68	3,55	7,10	1,66	2,46
2005	0,07	7,99	0,12	2,79	-	0,09	-	-
2006	0,27	2,72	0,15	2,23	0,37	0,05	3,42	6,23
2007	0,35	6,22	0,45	1,76	0,22	0,27	5,55	3,35
2008	0,02	1,94	0,21	1,47	0,11	0,19	4,62	0,05
2009	0,03	5,48	0,15	1,40	0,44	0,18	8,16	0,54
2016	0,03	0,20	0,21	0,02	-	1,24	1,45	1,23
2017	0,25	0,51	2,45	0,28	1,20	4,66	Valeur non prise en compte	8,94
moyenne	<b>0,14</b>	<b>3,58</b>	<b>0,53</b>	<b>1,42</b>	<b>0,47</b>	<b>0,96</b>	<b>4,64</b>	<b>3,39</b>
minimum	<b>0,02</b>	<b>0,20</b>	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>	<b>0,11</b>	<b>0,05</b>	<b>1,45</b>	<b>0,05</b>
maximum	<b>0,35</b>	<b>7,99</b>	<b>2,45</b>	<b>2,79</b>	<b>1,20</b>	<b>4,66</b>	<b>8,16</b>	<b>8,94</b>

Les CAS que l'on peut considérer a priori comme les plus efficaces correspondent à celles dont les dépôts avoisinent les valeurs moyennes calculées dans les précédentes approches (voir chapitre 5.1.2) soit des valeurs supérieures à 6 m<sup>3</sup>/Ha/an (CAS 2, 7 et 8).

Les raisons que l'on peut évoquer pour ces CAS, concernent essentiellement l'implantation de la chambre au niveau du replat topographique, directement en aval d'un bassin versant productif (cas de la CAS 2, 8 et 7, même si pour cette dernière l'origine des apports semble plus complexe).

A l'inverse, les CAS les moins productives peuvent s'expliquer par une implantation trop en amont du bassin versant (CAS 5) ; une implantation en « bout de réseau » (CAS 3), ou en position trop basse sur le réseau, en deçà de la zone de dépôt (cas vraisemblable des CAS 4 et 1).

De façon générale, certains éléments semblent ressortir de ces analyses, en particulier les points suivants :

- La taille du bassin versant drainé ne présente pas de lien automatique avec le volume piégé. L'exemple de la CAS 1 est éloquent, avec un bassin versant drainé de plus de 3 km<sup>2</sup>, le volume déposé est toujours inférieur à 1 m<sup>3</sup>/Ha/an.
- Il semble plus efficace de rester au plus proche des zones productives afin de disposer d'une meilleure capacité de piégeage.

Il y a donc certainement des implantations à privilégier, en particulier celles qui regroupent toutes les conditions suivantes :

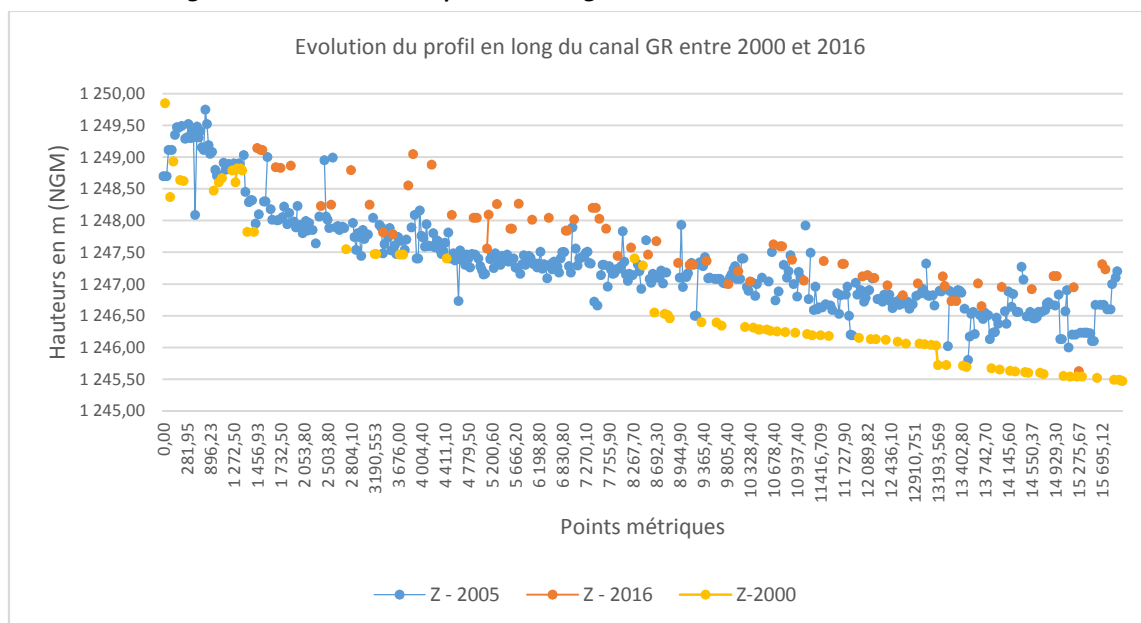
- une implantation sur les bassins versants qui présentent la plus forte capacité à éroder, soit ceux concernés par un indice de sensibilité à l'érosion élevé ;
- une implantation au niveau du replat topographique, directement en aval d'un réseau hydrographique bien développé (forte densité de drainage) et facilement contrôlable par une CAS (dans l'idéal absence de possibilité de dépôt intermédiaire).

## 5.3 PROFILS EN LONG ET DONNEES SUR LES VOLUMES CURES

### 5.3.1 Analyse comparative de profils en long sur le canal GR

A partir des données topographiques disponibles, il a été possible de réaliser un profil en long pour les années 2000, 2005 et 2016.

**Figure 4 : Evolution du profil en long du Canal GR entre 2000 et 2016**



La comparaison des profils rend compte d'évolutions plutôt faibles, avec un exhaussement moyen pour l'ensemble du linéaire de 0,5 m entre les années 2000 – 2005 et 0,4 m entre 2005 et 2016, soit respectivement des valeurs annuelles de + 5 cm à + 4 cm.

Une analyse un peu plus appuyée des tendances d'évolution permet de mettre en évidence deux principaux tronçons :

- Un tronçon amont localisé entre le canal Andriantany jusqu'au Pk 8, soit à proximité de la cité des 67 Ha Nord-Ouest. Sur ce linéaire, la tendance à l'exhaussement semble « s'accélérer » sur les dernières années avec le passage d'une augmentation moyenne de + 4 cm/an entre 2000 et 2005 à environ + 5,5 cm/an entre 2005 et 2016.
- Un tronçon en aval du Pk 8 qui se distingue par un exhaussement marqué du fond entre 2000 et 2005 (pratiquement + 16 cm/an) et une très faible évolution pour ne pas dire stabilité depuis (autour de 2,5 cm/an entre 2005 et 2016).

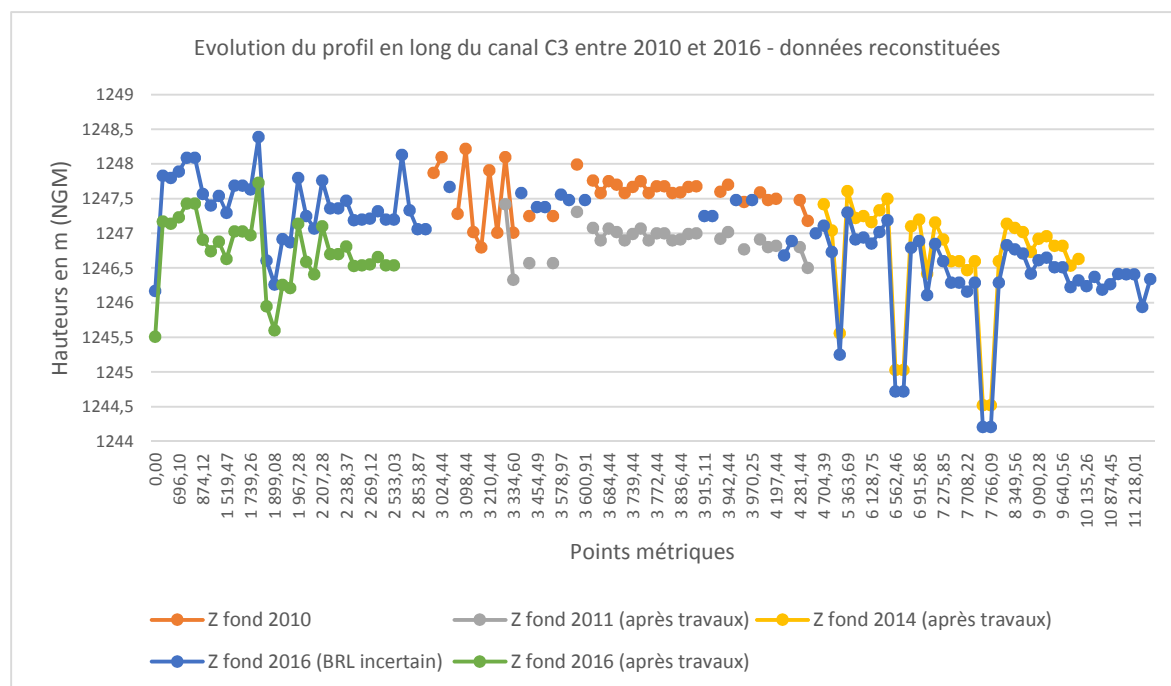
Si l'on écarte la possibilité d'une erreur de calage du levé de 2000 sur le second tronçon, l'origine de l'exhaussement est incertaine. Elle peut témoigner de la recherche d'un profil d'équilibre et d'un apport en sédiments plus important, notamment suite aux événements de 2005, mais cette explication est difficilement vérifiable.

### 5.3.2 Analyse comparative de profils en long sur le canal C3

Les données disponibles sont disparates en dehors du profil en long levé en 2016 et qui sert de référence sur l'ensemble du canal. Les autres données concernent les volumes prélevés sur 3 années et sur trois sections différentes :

- Curage de 31 200 m<sup>3</sup> entre les Pk 3 300 et 4 400, pour l'année 2011 ;
- Curage de 14 289 m<sup>3</sup> entre les Pk 4 800 et 9 900 pour l'année 2014 ;
- Curage de 7 900 m<sup>3</sup> entre les Pk 0 et 2 600.

L'évaluation des surfaces en eau concernées par les différentes opérations de curage permet de définir une hauteur moyenne curée sur ces sections et de reconstituer les profils en long.



L'incertitude du fond de 2016 ne concerne pas l'évolution globale du profil en long dont les plus fortes variations sont aussi liées à la présence d'ouvrages, mais dans le détail certaines évolutions semblent plutôt liées à un positionnement différent de la mire topographique aux différents points de mesures, avec un enfoncement plus ou moins important dans les sédiments.

L'estimation des apports moyens annuels ne peut se faire que par la comparaison du profil en long reconstitué après travaux en 2011 entre le Pk 3 330 et le Pk 4 403 et les côtes du fond levées en 2016 sur ce même linéaire. Les valeurs moyennes de comblement témoignent d'un exhaussement de +45 cm en 5 ans, soit +9 cm par an. Cette valeur observée sur le C3 (+9 cm) correspond à un rythme pratiquement deux fois supérieur à celui observé sur le canal GR (+4 à +5 cm). Le tronçon concerné par cette comparaison correspond à celui du 67 Ha qui est aussi le plus peuplé, donc sujet à apports solides potentiellement plus importants.

Les analyses de sédiments montrent que la teneur en matière organique la plus élevée concerne tout le linéaire dans la traversée du 67 Ha (teneur en matière organique de l'ordre de 41 % en moyenne pour cette traversée, alors qu'elle est de 30 à 31 % en moyenne sur le reste du linéaire).

Par conséquent la traversée du 67 Ha se caractérise par des apports solides pratiquement deux fois supérieurs à ceux constatés en moyenne sur le canal GR. Cette augmentation est pour partie imputable à l'augmentation des apports organiques sur ce tronçon et un apport en matière sèche qui reste élevé, imputable à l'érosion des berges, aux apports latéraux ou encore à l'Ikopa. La part importante liée aux apports organiques sur ce canal s'explique aussi par le fait que le réseau séparatif ne fonctionne plus et que l'ensemble des effluents qui devraient être rejetés dans l'Ikopa sont rejetés dans le canal.

### 5.3.3 Volumes curés sur le canal Andriantany

Le principe du curage vise à retrouver un profil favorable à l'écoulement (dans l'idéal proche de celui d'origine). Dans l'hypothèse de retrouver un profil pratiquement constant (ce qui est le cas du profil d'origine) les volumes à prélever doivent être assez semblables d'une section à l'autre sur ce canal.

Les données disponibles (ref. Tranche ferme – rapport de fin de mission sur la thématique « déchets solides », Octobre 2016) ont fait l'objet d'une retranscription sous forme graphique des volumes moyens exprimés en m<sup>3</sup> par km (voir Figure 5). L'analyse pluriannuelle, plus globale donne un ordre de grandeur des apports annuels moyens sur les différents tronçons curés. Ces ordres de grandeurs (Tableau 4, ci-dessous) correspondent à un peu plus de 3 m<sup>3</sup>/ml de canal/an sur les trois premiers tronçons, alors que pour le dernier tronçon l'apport annuel est estimé à environ 1,6 m<sup>3</sup>/ml de canal/an.

**Tableau 4 : Apports annuels par tronçon (en m<sup>3</sup>/ml/an)**

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 m <sup>3</sup> /ml/an)	3,0	3,8	3,3	2,3	1,6

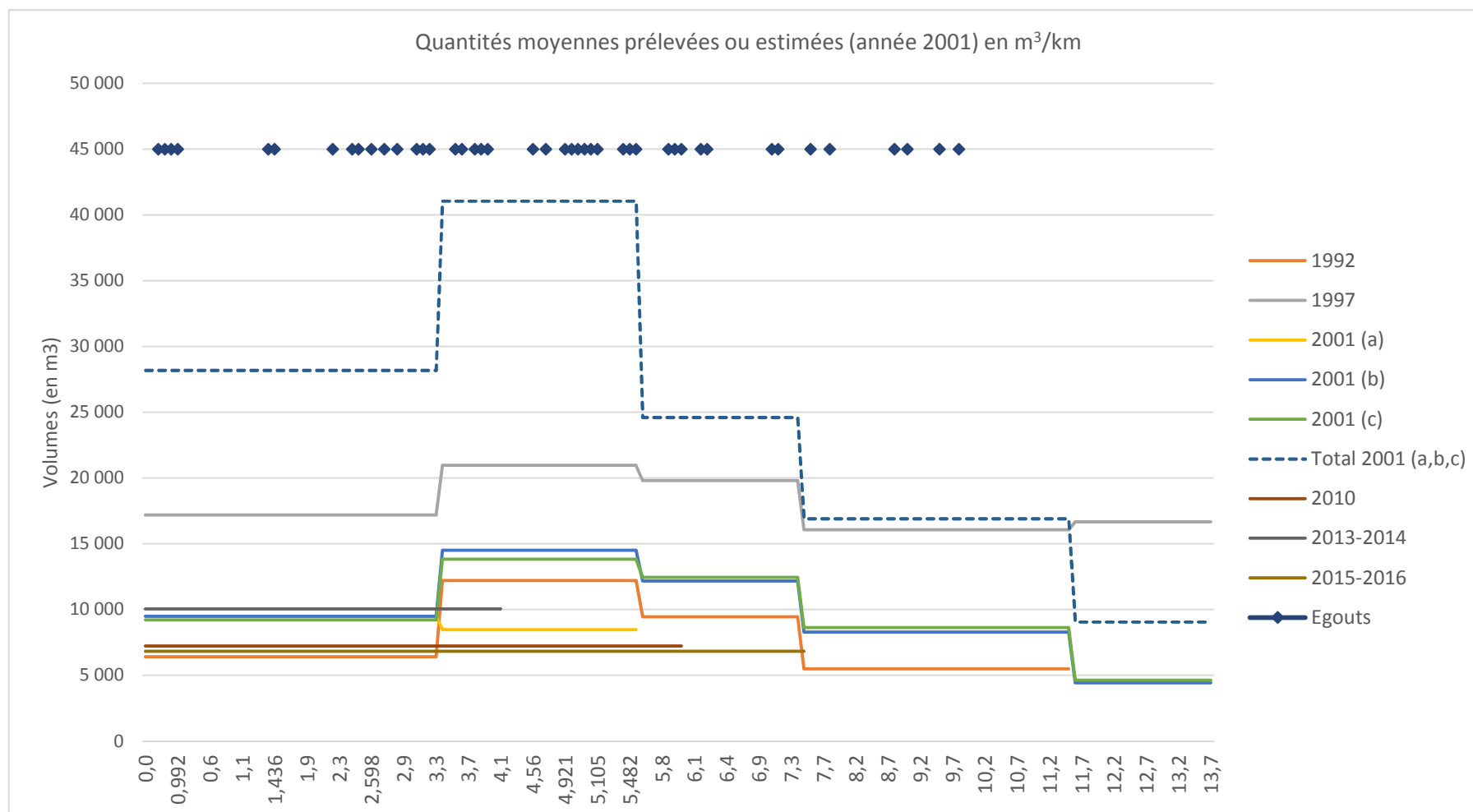
Les résultats présentés sous la forme de profils pluriannuels des volumes prélevés font état de variations importantes. De telles variations sont imputables à des apports en sédiments qui peuvent provenir ou encore des réseaux EU/EP ou encore des berges mais aussi de l'Ikopa. En ce qui concerne les apports des réseaux EU/EP, la Figure 5 montre une assez bonne correspondance avec le nombre d'apports en EU/EP par km pour une majorité de profils. Avec plus de 7 apports par km, le tronçon compris entre les Pk 3,4 et 5,6 est celui sur lequel les volumes extraits ou estimés sont les plus importants. En aval du pk 5,6 ces volumes diminuent progressivement jusqu'à atteindre un niveau « plancher » après le Pk 11,6 lorsque le canal ne reçoit plus aucun apport.

L'importance des apports des réseaux est aussi confirmée par l'absence de relation entre les bassins potentiellement les plus producteurs en sédiments (ceux dont la sensibilité à l'érosion est la plus élevée) et les quantités prélevées ou estimées. Ainsi, les bassins versants attenants au tronçon 2 et qui correspondent à ceux susceptibles d'alimenter le canal en sédiments, présentent les sensibilités à l'érosion parmi les plus faibles de tout le linéaire. Les bassins versants attenants au tronçon 1, notamment ceux de rive droite, figurent parmi les plus producteurs en sédiments, toutefois sur ce tronçon, les quantités de sédiments prélevées ou estimées sont toujours inférieures au tronçon 2.

On ajoutera pour le tronçon 1 que les dépôts récurrents en sédiments « grossiers » cités lors des enquêtes, ne franchissent pas l'axe routier et ne rejoignent donc pas le canal ou même uniquement la plaine qui le jouxte. De façon plus générale, cette observation pose la question relative à l'amélioration / restauration des continuités sédimentaires (et hydrauliques) entre les bassins versants et le canal.

On peut donc considérer que les relations entre le canal et les bassins versants attenants susceptibles de l'alimenter en apports solides sont très faibles. Ce constat confirme une origine des apports imputable en grande partie aux rejets issus des réseaux (EU/EP), auxquels il faut ajouter ceux en provenance de l'Ikopa et des berges dont les érosions sont pratiquement continues sur tout le tronçon 2 ainsi qu'une partie du tronçon 1.

Une autre information concerne l'importance des apports après une pluie intense. Ainsi, à la suite d'un curage de l'Andriantany en 2003, la hauteur du fond du canal s'est élevée de plus 5 cm au droit de Soanierana. Cet exemple témoigne d'une très forte capacité en apports solides divers (sables et excréta) des bassins versants drainés par les exutoires, dans le cadre d'un seul épisode pluvieux.

Figure 5 : Quantités moyennes prélevées (ou estimées avant prélèvements, pour l'année 2001) en m<sup>3</sup>/km

## 5.4 LES APPORTS EN SEDIMENTS FINS EN PROVENANCE DE L'IKOPA

Les mesures de concentrations en sédiments (MES, en mg/l) disponibles sur l'Ikopa concernent des prélèvements réalisés en 2008, 2009 et 2010 sur deux stations localisées en amont et en aval du barrage d'alimentation des canaux. Pour ces trois années, les concentrations mesurées affichent des moyennes de 58,33 mg/l en amont de l'ouvrage et de 76,67 mg/l sur la station aval ; cette plus forte concentration sur la station aval étant vraisemblablement liée au remous et à la remise en suspension d'une partie des sédiments.

En ce qui concerne les débits d'alimentation des canaux par l'Ikopa, les informations disponibles permettent de retenir les valeurs suivantes :

- Un débit d'alimentation du canal Andriantany de l'ordre de 2m<sup>3</sup>/s à partir du partiteur localisé en amont de Soanierana ;
- Une alimentation du C3 en saison sèche (soit pendant 6 mois seulement) à hauteur de 1m<sup>3</sup>/s via une prise d'eau localisée sur le GR au niveau de Namontana / Ankadimbahoaka ;
- Pour le GR une moyenne de 5m<sup>3</sup>/s sur 3 mois d'irrigation + 3 m<sup>3</sup>/s de débit sanitaire pendant 6 mois, soit environ 85 Mm<sup>3</sup> à l'entrée du GR (Tanjambato), les estimations en d'autres points étant à ajuster en fonction des prises d'eau.

En fonction des concentrations moyennes de l'Ikopa relevées en amont et en aval du barrage, le volume maximum de sédiments qui peuvent transiter au sein des canaux (en admettant donc que l'ouvrage de prise n'a pas d'incidence sur le piégeage des sédiments) est de l'ordre de :

- 2 044 m<sup>3</sup> d'apport annuel sur Andriantany ; soit pour une longueur totale de canal de 13 700 m et une largeur moyenne de 18 m, un apport de 0,8 cm /an ou encore 0,15 m<sup>3</sup>/ml/an ;
- 511 m<sup>3</sup> d'apports annuels pour le canal C3 ; soit pour une longueur totale de canal 11 200 ml et une largeur moyenne de 8 m, un apport 0,5 cm/an ;
- Autour de 2 750 m<sup>3</sup> pour le canal GR, soit pour une longueur d'environ 15 700 ml et une largeur moyenne de 8 m, un apport annuel d'environ 2 cm / an.

Ces chiffres sont à considérer avec grandes précautions (ordres de grandeurs) considérant les hypothèses retenues, ils témoignent *a priori* du faible impact des apports solides en provenance de l'Ikopa sur l'Andriantany et le C3, par rapport aux autres sources d'apports potentiels (érosions des berges, rejets effluents). Sur le GR ils peuvent représenter une part plus importante des apports solides (pratiquement la moitié des apports annuels).



## 6. APPORTS SOLIDES AU SEIN DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT

### 6.1 ETAT DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT

Les données rassemblées auprès du SAMVA témoignent de niveaux de comblements annuels compris en moyenne entre 35 % pour ce qui concerne les réseaux enterrés et entre 20 % et 75 % pour les canaux à ciel ouvert (moyenne de 48 %). Les linéaires traités (hors séparatifs) représentent un linéaire de plus de 32 km pour les canaux enterrés et plus de 12 km pour les canaux à ciel ouvert.

Ces encombrements nécessitent des interventions importantes généralement réalisées sur une période de 3 mois avant la saison des pluies.

On attire l'attention sur le fait que ces chiffres concernent l'ensemble des matières (excrétas compris) et non pas uniquement les sédiments.

Les reconnaissances effectuées dans le cadre de cette étude se sont efforcées d'apprécier les niveaux d'encombrement des réseaux du fait des seuls dépôts de sédiments. L'exploitation de ces données montre que les niveaux d'encombrements fort et moyen, concernent respectivement 43,5 km de réseau (niveau fort) et 66,6 km (niveau moyen) pour un total de 431 km comprenant des canaux du réseau primaire et des caniveaux à ciel ouvert et enterré, (hors réseau séparatif qui n'est pas concerné par cette problématique).

**Par conséquent, un peu plus de 25,5 % de la totalité du réseau est concerné par des encombrements de sédiments moyens à forts.**

Pour les réseaux sur lesquels on dispose de caractéristiques géométriques, un calcul des vitesses d'écoulement théorique à plein bord a été effectué afin de prendre en compte ce paramètre déterminant pour le transport solide. Afin de disposer d'un résultat exploitable pour l'étude, il a été choisi de présenter les types de matériaux transportables sur l'ensemble du réseau, en fonction des vitesses calculées pour un écoulement à plein bord (soit l'écoulement maximum pour la conduite ou le réseau aérien avant débordement).

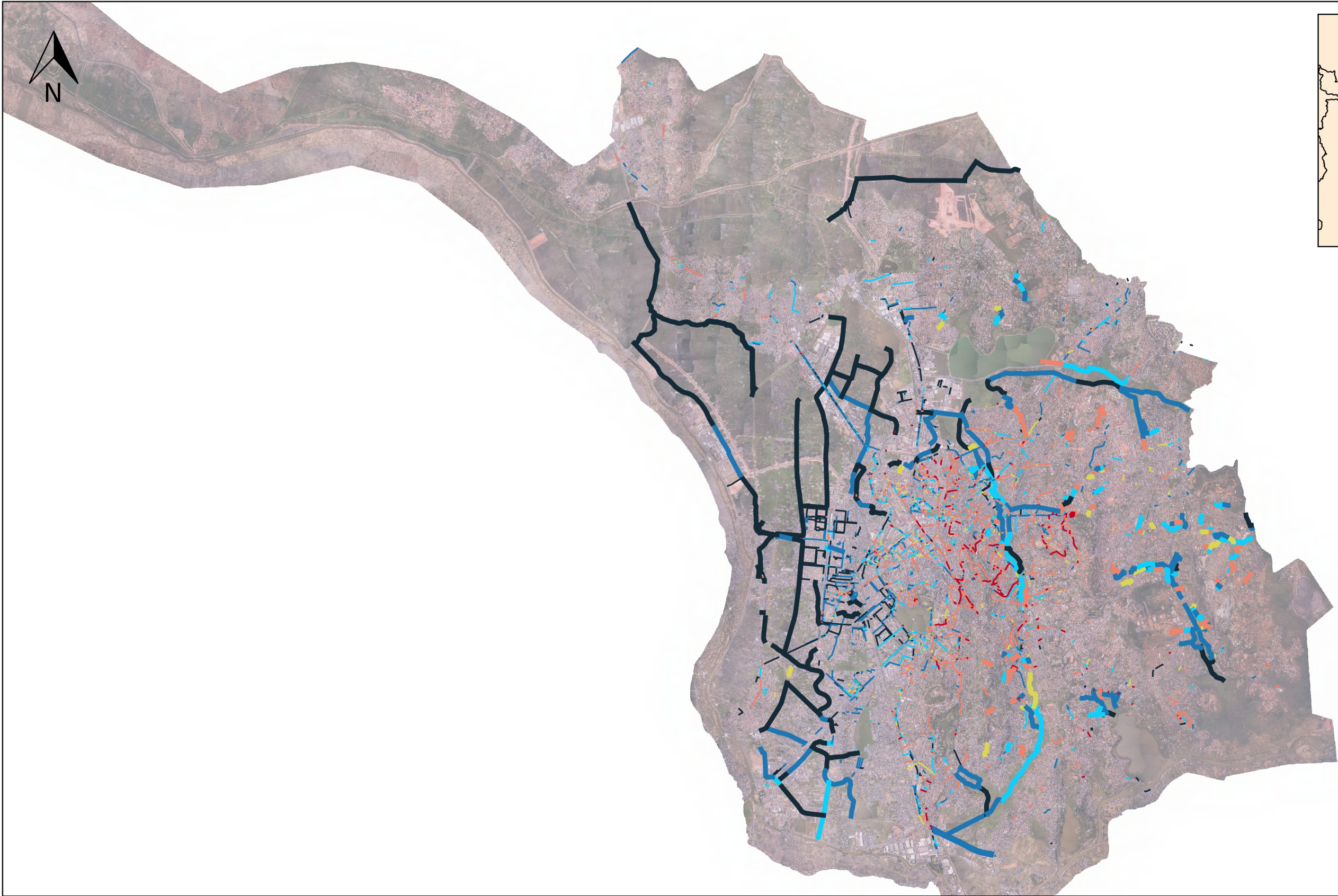
Cette appréciation se cale sur les classes suivantes, retenues par Lane<sup>7</sup>, pour des matériaux non cohérents.

Type de matériaux	Diamètre en mm	Gamme de vitesses en m/s
Vases	]0,005 à 0,050]	]0,15 – 0,20]
Sables (sables fins à sables grossiers)	]0,050 – 0,65]	]0,20 – 0,65]
Graviers (graviers fins à gros)	]0,65 – 15]	]0,65 – 1,20]
Cailloux fins à cailloux moyens	]15 – 25]	]1,20 – 1,40]
Gros cailloux	]25 – 150]	]1,40 – 3,90]
Sédiments très grossiers, supérieurs aux gros cailloux	> 150	> à 3,9

<sup>7</sup> Lane – Progress Report on Studies on the Design of Stables Channels by the Bureau of Reclamation. – Proceedings A.S.C.E.E Vol. 70. Separata 280. Setembre, 1953.

Le résultat de ce calcul fait l'objet de la carte jointe page suivante « Type de matériaux transportables pour les vitesses d'écoulements réelles calculées à plein bord ».





**Programme Intégré  
d'Assainissement  
d'Antananarivo (PIAA)**



**Type de matériaux transportables pour les vitesses d'écoulements réelles calculées à plein bord**

- | Reseau couvert   | Reseau ciel ouvert                                       |
|--|--|
| — vases  | — vases  |
| — sables fins à sable gros                               | — sables fins à sable gros                               |
| — graviers fins à gros                                   | — graviers fins à gros                                   |
| — cailloux fins à moyens                                 | — cailloux fins à moyens                                 |
| — gros cailloux  | — gros cailloux  |
| — sédiments très grossiers, supérieurs aux gros cailloux | — sédiments très grossiers, supérieurs aux gros cailloux |

Réalisée en Juin 2018  
Sources : BRLI

0 1 2 Km

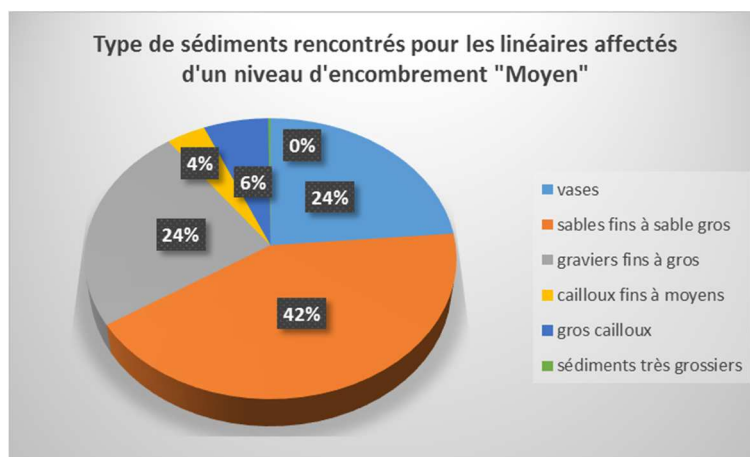
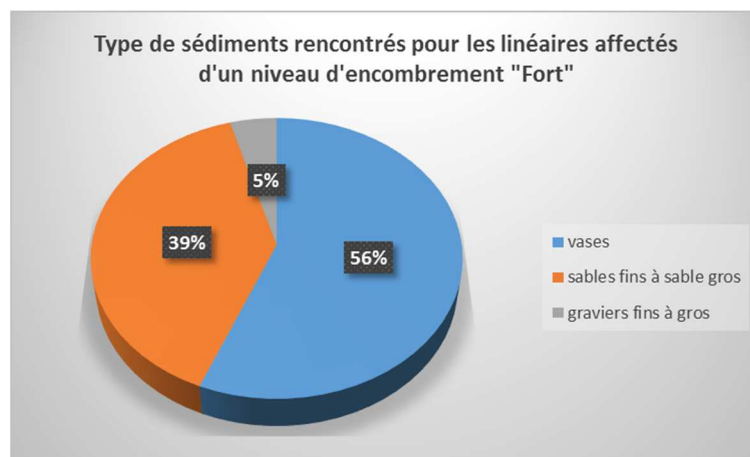






La confrontation entre les niveaux d'encombrements fort et moyen et les matériaux transportables, montrent que pratiquement tous les dépôts sont observés sur des tronçons où la capacité de transport correspond principalement à des sédiments fins de type, vases, sables ou encore graviers.

En dehors de quelques cas, les encombrements sédimentaires ne concernent pas les réseaux dont le débit de plein bord permet de transporter des tailles équivalentes ou supérieures aux gros cailloux. La vitesse à plein bord est donc logiquement déterminante pour expliquer la dynamique de dépôts.

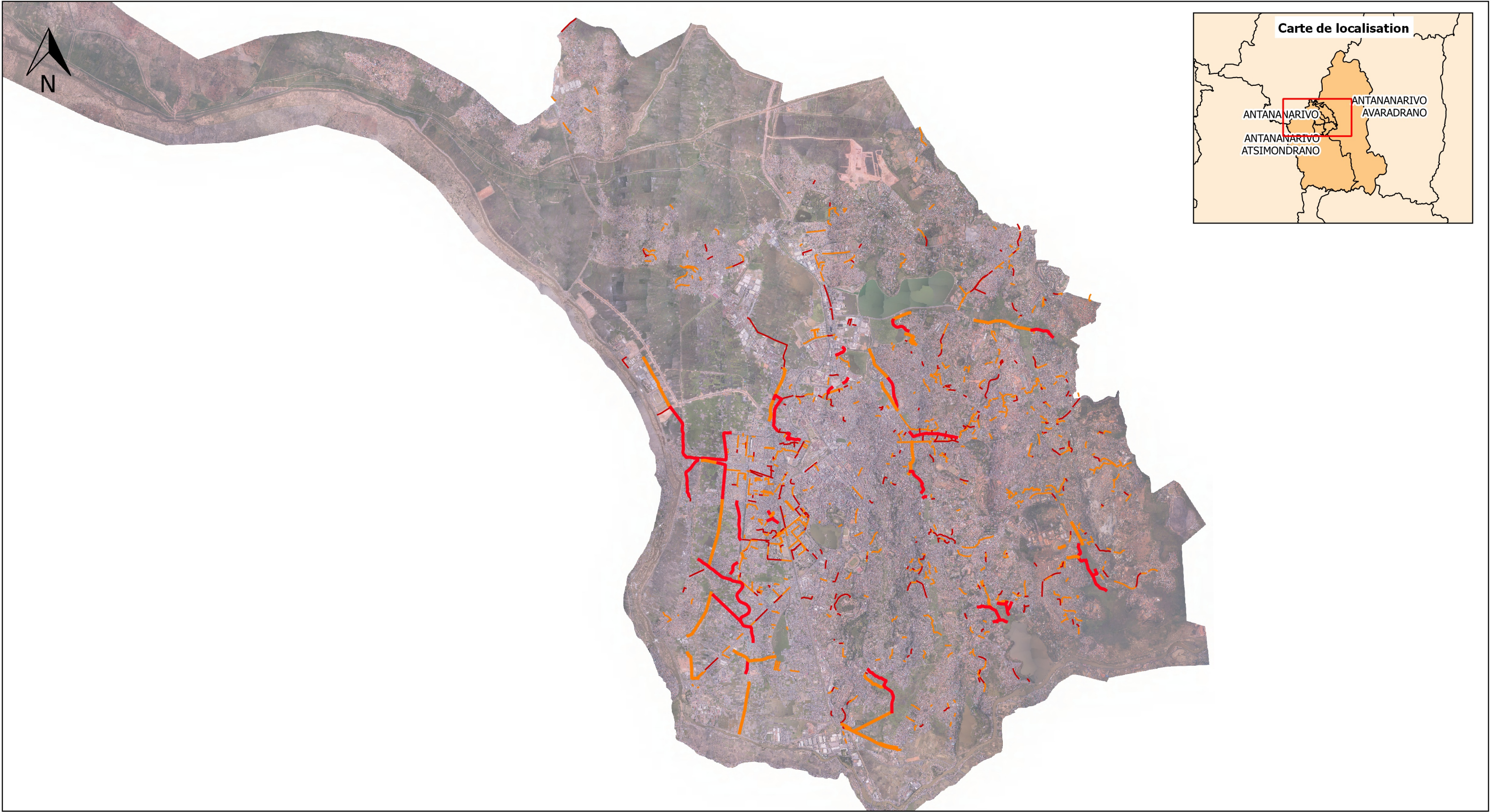


Sans surprise, les dépôts concernent en très grande majorité les réseaux à très faibles pentes, soit ceux localisés au sein de la plaine, dans les bas-fonds (rizières) ou plus ponctuellement, sur des zones de replats. L'analyse rend compte aussi de l'absence de points de blocage imputables à des discontinuités de sections, discontinuités hydrauliques ou discontinuités en ce qui concerne la compétence en matière de transport solide (cas par exemple du passage d'une section à gros cailloux à sables fins, sans transition). Même si on peut supposer que certaines de ces discontinuités peuvent exister, elles sont secondaires et très localisées.

Enfin, à l'échelle de la zone d'étude la part grossière paraît relativement faible, elle compose une partie des dépôts récurrents évoqués auparavant (chapitre 5.1). Cependant, l'essentiel de la charge solide correspond aux éléments fins (sables et graviers) qui représentent la part majoritairement érodée.







**Programme Intégré  
d'Assainissement  
d'Antananarivo (PIAA)**



**Réseaux principalement concernés par des dépôts sédimentaires**

- |   |   |
|---|---|
| Niveau d'encombrement du réseau primaire  | Niveau d'encombrement des caniveaux   |
|  Moyen |  Moyen |
|  Fort  |  Fort  |

Réalisée en Juin 2018  
Sources : BRLI









## 6.2 ORIGINE DES APPORTS SOLIDES

Le comblement peut provenir de différentes sources d'autant plus difficiles à identifier qu'elles sont éloignées. Les dépôts ne s'opèrent pas toujours dans la proximité immédiate des zones de production mais comme évoqué auparavant, au sein de tronçons où les vitesses d'écoulement ne permettent plus de transporter les sédiments.

La recherche de ces sources s'est opérée à partir de plusieurs informations :

- Le réseau hydrographique identifié dans le cadre de l'analyse du MNT. Il ne recoupe pas toujours la réalité considérant les modifications anthropiques opérées sur le réseau. Cette information est cependant déterminante pour apprécier la densité de drainage et « remonter » aux sources productives potentielles.
- Les lavakas et sites d'apports potentiellement importants (cas des glissements recensés dans le cadre de l'épisode de février 2015) ;
- La sensibilité à l'érosion, car elle permet de cibler les bassins versants les plus producteurs.

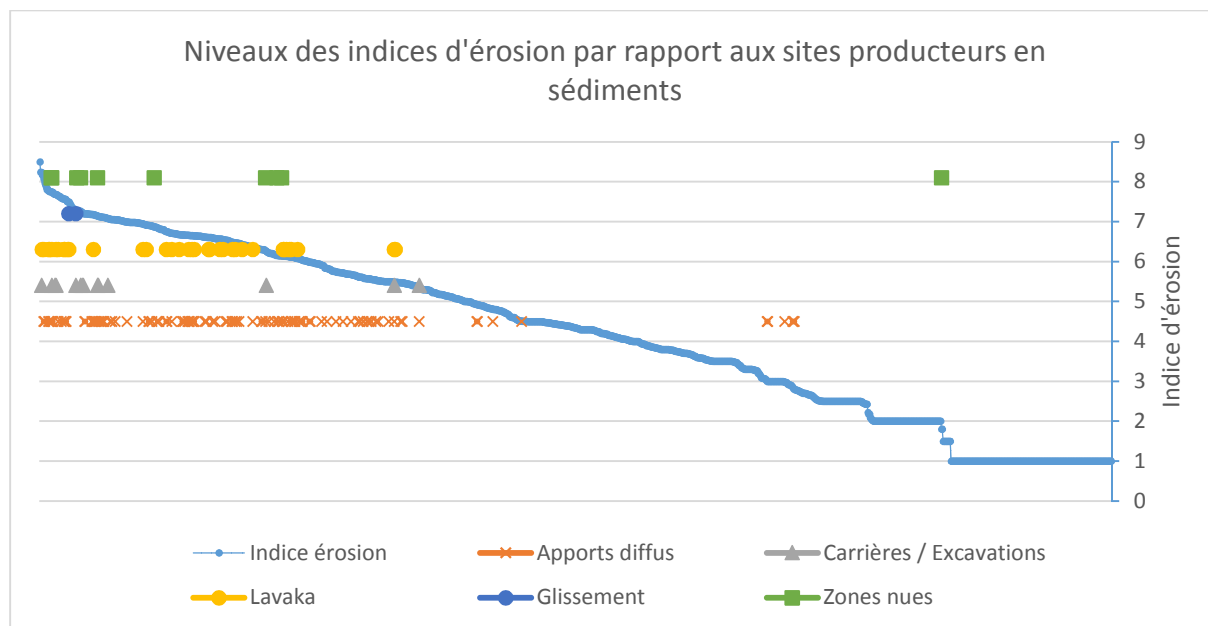
Cette recherche s'appuie sur les constats effectués lors des reconnaissances de terrain qui ont permis d'apprécier la diversité des sites potentiellement producteurs. Ces sources peuvent concerner des points particuliers comme les lavakas plus ou moins urbanisés et facilement identifiables. Il convient d'ajouter d'autres sources, plus diffuses et qui comprennent les zones urbaines non revêtues à habitats parfois précaires, les carrières / excavations, les zones plus largement dénudées (cas par exemple des terrains de sports)... Ces éléments sont généralement bien repérables sur la photographie de 2016.

Cette analyse a permis d'identifier 168 sites susceptibles de fournir des sédiments, du fait de la présence :

- d'apports diffus : 106 sites ;
- de carrières, excavations : 14 sites ;
- de Lavakas : 36 sites ;
- de glissements observés lors de l'épisode de février 2015 : 2 sites ;
- de zones nues ou pratiquement nues (absence ou faible couverture au sol) : 10 sites.

Sur l'ensemble des 168 sites, ceux qui présentent une faible couverture au sol (cas des zones d'apports diffus ou encore des zones nues), constituent les principales sources d'apports (presque 70 % de l'origine des apports sur les 168 bassins « producteurs »). Il convient d'ajouter les Lavakas qui représentent une source elle aussi importante (plus de 21 %).

La confrontation avec les indices d'érosions montre que ces sites correspondent préférentiellement à des niveaux d'indices compris entre 5 et 6. Ils sont dans tous les cas supérieurs à 4.



Dans une grande majorité des cas, les bassins « producteurs » délimitent de grands ensembles répartis principalement :

- En contrebas des versants et jusqu'au canal Andriantany des quartiers compris entre Ambohijanahary et Soanierana et au nord de Fort-Voyron ;
- Sur le versant ouest de l'échine du Palais de la Reine, du bassin versant au nord qui comprend la CAS 5 (chambre à sable), les bassins les plus productifs qui dominent le stade de Mahamsina ainsi que ceux localisés dans le secteur du Zoo et de Tsarafaritza-Tsimbazaza.
- En contrebas du versant Ouest du Palais de la Reine et sur une partie du versant Est ;
- Sur les versants Est de l'échine de l'observatoire – Fort Duchesne et un secteur étendu en amont de l'Institut Pasteur ;
- Sur pratiquement toute la colline d'Ankatso ;
- Plusieurs sites disséminés au nord de la zone d'étude et dont l'exutoire correspond au marais Masay. Sont notamment concernés des sites susceptibles d'alimenter les canaux du quartier Anjanahary.

Les bassins versants directement concernés sont localisés sur la carte jointe page suivante.

En ce qui concerne la plaine inondable de l'Ikopa, soit toute la partie localisée à l'ouest du canal Andriantany, il n'existe pas de structure hydrographique spécifique susceptible d'alimenter le réseau. Pour ces tronçons, l'origine des sédiments est essentiellement diffuse et provient d'apports latéraux de zones non revêtues, éventuellement d'apports en provenance de zones productives localisées plus en amont (zones nues), auxquels on peut certainement ajouter des apports d'origine anthropique. Dans tous les cas, les faibles pentes ne permettent pas de transporter les sédiments et les moindres apports forment rapidement des dépôts.



ANTANANARIVO  
AVARADRANO

ANTANANARIVO  
ATSIMONDRAVO

ANTANANARIVO

## Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA)



## Sites préférentiels de production sédimentaire et sensibilité à l'érosion

### Légende

- Événements (février 2015)
  - Lavakas
  - Dépôts solides
  - Sites préférentiels de production sédimentaire
- Sensibilité à l'érosion
- |          |             |             |            |
|----------|-------------|-------------|------------|
| 1 - 1.62 | 1.62 - 2.25 | 4.75 - 5.38 | 7.88 - 8.5 |
|          | 2.25 - 2.88 | 5.38 - 6    |            |
|          | 2.88 - 3.5  | 6 - 6.62    |            |
|          | 3.5 - 4.12  | 6.62 - 7.25 |            |
|          | 4.12 - 4.75 | 7.25 - 7.88 |            |

Réalisée en Juin 2018  
Sources : GRIMA, SAMVA,  
BRLI

0 1 2 Km





## 7. SYNTHESE

### 7.1 LES CONCLUSIONS PRINCIPALES DE L'ANALYSE

#### LA SENSIBILITE A L'EROSION

La zone d'étude présente des caractéristiques morphologiques très variées à l'origine de dynamiques sédimentaires en termes de production / dépôts totalement différentes. On distingue notamment deux grands ensembles morphologiques au fonctionnement distinct :

- La zone de reliefs à fortes pentes séparée par les vallées, qui représente la zone la plus productive du fait de l'érosion des échines et versants. Elle se distingue aussi par la présence de lavakas, formes d'érosions généralement très productives en sédiments fins ainsi que par la présence de glissements de terrain susceptibles d'apparaître lors de phénomènes pluviométriques exceptionnels.
- La plaine localisée entre le canal Andriantany et les digues de l'Ikopa correspond à la plaine d'inondation de l'Ikopa. Sa pente générale très faible favorise la sédimentation des trois principaux canaux qui la drainent, sédimentation accrue par les apports en effluents urbain, les érosions de berges ainsi que les apports de l'Ikopa.

La synthèse entre les paramètres responsables de l'érosion des sols (géologie et pédologie, occupation des sols, pente des versants, densité de drainage et agressivité des pluies) témoigne de la plus forte capacité érosive des versants par rapport à la plaine inondable. Dans le détail les résultats de la sensibilité à l'érosion déterminée sur la base de ces paramètres concordent assez bien avec les zones soumises à l'érosion identifiées dans le cadre de l'étude GRIMA.

Cette plus forte sensibilité se caractérise notamment par l'identification de bassins producteurs en sédiments au sein desquels des dépôts solides récurrents de nature hétérométrique (sédiments « grossiers à fins ») sont constatés, mais aussi des glissements de terrain en cas de pluies exceptionnelles.

#### LES ELEMENTS DE QUANTIFICATION

Ces éléments sont issus d'une synthèse des informations rassemblées auprès des organismes gestionnaires. Cette méthode a été privilégiée par rapport à une modélisation empirique considérant les phénomènes d'érosions particuliers en zone urbaine dense non pris en compte par ces modèles.

Les résultats font état de la grande variabilité en matière de production sédimentaire d'un bassin à l'autre avec des valeurs qui peuvent aller de 2 à 13 m<sup>3</sup>/ha/an voire même jusqu'à 20 m<sup>3</sup>/ha/an pour certains bassins. La relation entre les volumes produits et la sensibilité à l'érosion permet d'approcher un ordre de grandeur du volume de sédiments produit annuellement sur les bassins versants les plus pentus. On considère cependant que ces chiffres concernent plutôt la part la plus grossière des sédiments, car la partie la plus fine en partie « lavée » rejoint les réseaux d'assainissement. Dans le cadre d'un dimensionnement d'ouvrage et considérant les nombreuses incertitudes, il paraît plus prudent de retenir les valeurs hautes de ces estimations.

Les chiffres issus des CAS font eux aussi état d'une grande variabilité que l'on peut vraisemblablement imputer au positionnement et donc à l'efficacité du dispositif. Les chambres *a priori* les plus efficaces font état de ratios annuels (en m<sup>3</sup>/ha/an) proches de ceux estimés par ailleurs.

En ce qui concerne la plaine, les données relatives aux volumes curés dans les canaux ou, en fonction de données disponibles, la comparaison des profils en long, permettent de donner un ordre de grandeur des apports annuels en sédiments. Pour le canal GR, ces apports sont estimés en moyenne à +4 cm - +5 cm ; pour le C3 l'exhaussement annuel moyen est estimé à +9 cm, quant à l'Andriantany, les données disponibles sur les volumes curés font état d'apports annuels compris entre 3,8 et 1,6 m<sup>3</sup>/ml/an en fonction des tronçons, (soit entre +21 cm et +8,8 cm, avec une largeur moyenne de canal de 18 m).

La confrontation entre les ordres de grandeur des apports solides en provenance de l'Ikopa, la prise en compte des analyses des boues déposées (notamment pour le C3), l'analyse du nombre d'apports en réseaux EU/EP sur l'Andriantany, fait ressortir les éléments suivants :

- Les dépôts sur le canal Andriantany et le canal C3, proviennent pour l'essentiel des effluents d'eaux usées qui représentent entre 30 et 40 % des apports (au moins pour le C3). Les apports en éléments fins en provenance de l'Ikopa sont faibles et conduisent à penser que les apports minéraux proviennent pour l'essentiel de l'érosion des berges et pour partie du ruissellement des zones adjacentes.
- Concernant le GR, la part en éléments fins de l'Ikopa semble représenter pratiquement la moitié des dépôts annuels. La part restante est vraisemblablement imputable à l'érosion des berges et aux apports en effluents.

## LES LIENS AVEC LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT

En ce qui concerne le réseau d'assainissement, l'analyse montre clairement que les sites les plus encombrés correspondent majoritairement à ceux dont la capacité en matière de transports solides pour le débit de plein bord (ou la pleine capacité avant débordement), correspond aux graviers, sables et vases. Sans surprise les tronçons les plus encombrés (affectés d'un niveau moyen à fort) concernent en grande majorité les réseaux à très faibles pentes, soit ceux localisés au sein de la plaine, dans les bas-fonds (rizières) ou plus ponctuellement sur des zones de replats.

Ce constat montre aussi que la fraction produite à l'échelle du bassin versant est essentiellement fine, soit des granulométries majoritairement comprises entre les graviers et les vases, avec des origines différentes.

L'origine de ces encombrements est liée à la recherche des sites les plus « producteurs » en sédiments. Cette analyse résulte d'un croisement entre le réseau hydrographique identifié dans le cadre du MNT, la présence de sites d'apports comme les lavakas ou encore les glissements recensés dans le cadre de l'épisode de février 2015, mais aussi par la prise en compte de la sensibilité à l'érosion afin d'orienter la recherche. Le résultat a permis d'identifier 168 sites « producteurs » qui regroupent des zones d'apports diffus, des sites de carrières / excavations, des lavakas, des glissements (épisode de février 2015), des zones nues (ou à très faible couverture).

Cette analyse montre que si les apports solides correspondent souvent à des formes d'érosions remarquables (plus de 21% des 168 sites producteurs correspondent à des lavakas), elles n'expliquent pas à elles seules les volumes produits. Pratiquement 70 % des sites producteurs correspondent à des apports « diffus », imputables à des zones non revêtues (axes routiers, sentiers, terrains non occupés) ou à faible couverture.

Les constats faits sur le terrain conduisent à penser que cette productivité est certainement exacerbée par l'implantation du bâti, favorable à la concentration des écoulements pluviaux et à une érosion des sols qui peut s'apparenter à de l'érosion linéaire, entretenue dans certains cas par le passage répété des hommes.

Parmi les facteurs anthropiques, il faut aussi retenir les occupations à proximité immédiate des canaux qui génèrent toutes sortes d'apports solides, généralement fins à très fins (sables aux vases). Ce constat concerne particulièrement les principaux canaux au sein de la plaine (canal GR dans sa partie la plus densément peuplée, le canal C3, le canal Andriantany) ainsi que ceux qui débouchent dans le marais Masay.



La plaine d'inondation est nettement moins soumise à l'érosion, même si localement certains bassins paraissent a priori plus productifs d'après la sensibilité à l'érosion. L'état des réseaux témoigne de quelques encombrements localisés. De façon générale les faibles pentes de ces réseaux ne permettent certainement pas de transporter les sédiments et les moindres apports forment rapidement des dépôts.

## 7.2 PREMIERES ORIENTATIONS

De façon générale, les fortes densités du bâti ne permettent pas d'envisager de façon généralisée la mise en œuvre de mesures classiques « à la parcelle », telles qu'on peut les proposer sur des bassins versant « naturels » ou à dominante agricole. Ces mesures qui comprennent généralement la restauration d'une couverture végétale, la réalisation de boisements ou encore de merlons, de terrasses... ne sont pas vraiment adaptées à une configuration urbaine telle que Antananarivo ou alors de façon ponctuelle.

Les solutions envisageables sont bien évidemment à adapter au cas-par-cas, mais on peut d'ores et déjà retenir les orientations suivantes :

- La réduction des dépôts « grossiers » récurrents représente un enjeu important en matière d'entretien pour restaurer la fonctionnalité des voiries et réduire tout simplement les apports hétérométriques dont une partie (la plus fine) alimente aussi les réseaux localisés plus en aval. En fonction des situations, les dispositifs envisageables concernent principalement :
    - Le stockage des sédiments en amont de la zone de dépôt, éventuellement au droit même du site en fonction de la configuration du bassin. Ce stockage peut s'envisager par la construction de chambres à sables ou de préférence par l'aménagement d'une zone de décantation (plage de dépôt) si le site le permet.

Concernant les chambres à sables, il nous paraît plus pertinent de limiter ce type de dispositif sur la base des éléments cités dans ce rapport. On rappellera que l'efficacité d'un tel dispositif est étroitement liée au choix de son positionnement sur le réseau. En outre, si l'effet décanteur est réel, il semble souvent trop limité par rapport aux volumes de sédiments à piéger. Sans l'écarter totalement, il semble préférable de proposer des dispositifs décanteurs à ciel ouvert, dans des endroits accessibles pour des interventions aisées.

Ces solutions (ouvrages décanteurs) sont envisageables dans le secteur du Zoo et de Tsarafaritra-Tsimbazaza.

  - L'amélioration de la continuité amont / aval du transport solide. Certains dépôts sont provoqués par l'absence de débouchés ou sont liés à un sous-dimensionnement du réseau qui ne permet pas de transiter la charge solide. Ces dispositifs nécessitent le plus souvent une reprise des voiries suivant les situations pour intégrer l'ouvrage et/ou proposer un remodelage de la chaussée qui permette d'évacuer de façon plus satisfaisante la charge solide.
- Ces solutions sont envisageables dans les secteurs de Betongolo, de l'Institut Pasteur ou encore de Mandrozeza
- La protection de sols à faible couverture et habitats diffus. Ces situations représentent la majorité des sites « producteurs » de sédiments mais les solutions relèvent la plupart du temps du « sur mesure ». Les dispositifs génériques conduisent à s'orienter vers la réalisation d'enherbements, de plantations, éventuellement la réalisation de fascines voire des murets de protection. Dans les faits, il peut s'avérer vraiment pertinent d'envisager dans certaines configurations des opérations plus vastes de restauration urbaine pour avoir une réelle efficacité. La densité urbaine ne permet pas souvent d'envisager des plantations sur des espaces étroits, constamment piétinés. La restructuration urbaine doit donc s'envisager comme une opportunité. Si elle n'est pas possible, alors peut-être faut-il envisager la mise en œuvre de revêtements de sols non ou peu érodables.



Un exemple concerne le bassin versant en amont du tunnel Ambanidia (voir photographies ci-dessous) où l'aménagement mériterait de s'intégrer dans la cadre d'un aménagement urbain. En l'état il paraît difficile de composer avec les habitats précaires existants. L'aménagement peut associer une densification des plantations (herbacées, arbustives mais aussi arborescentes), avec la création de protections de type fascines, puis l'aménagement de sentiers / escaliers afin d'assurer la protection des zones piétinées. Cette réflexion plus globale peut aussi intéresser le parc et le parking de bus localisés en contrebas et qui participent aussi pour une part plus modeste, à la production en sédiments.



*Configuration des versants en amont du tunnel Ambanidia*

- L'entretien, l'amélioration de sites fortement productifs (Lavakas). Les reconnaissances ont permis d'identifier au moins deux sites sur lesquels des corrections ont été mises en œuvre pour limiter les érosions : un lavaka en amont du stade de Mahamasina et un autre dans le secteur de Mandroseza (voir photographies ci-dessous). les actions envisageables sur ces dispositifs peuvent concerner :
  - Le retrait des déchets y compris sur les réseaux en aval (ces zones sont souvent considérées comme des sites de dépôts de déchets) ;
  - L'amélioration de la stabilisation des versants, dont le recul participe activement à la fourniture en sédiments ;
  - Si possible, l'amélioration de la capacité de piégeage des sédiments.



*Lavaka en amont du stade Mahamsina*



*Erosion à l'abord du Lavaka qui nécessiterait un ouvrage de confortement*





*Protections existantes (lavaka dans le secteur de Mandroseza)*

Des dispositifs analogues sont à proposer sur les sites prioritaires concernés par des lavakas ou la présence de zones fortement productives : cas du versant « nord » de la colline du Fort-Voyron qui s'étend jusqu'au stade Mahamsina, cas d'autres lavakas dans le secteur de Mandroseza (voir pour ce secteur les photographies ci-dessous).



*Erosion de type lavaka dans le secteur de Mandroseza*

- La mise en œuvre de mesures à la parcelle. Ces mesures s'inscrivent au sein des parcelles privées qui disposent d'une étendue suffisante pour mettre en œuvre différents types de dispositifs tels que la réalisation de plantations / enherbements ou encore la construction de bassins de rétention pour l'écroulement des eaux.

En ce qui concerne les canaux (Andriantany, C3 et GR), le diagnostic souligne l'importance des apports en effluents responsables d'une grande partie, sinon de la majorité des dépôts. Ces effluents ne peuvent pas transiter par des canaux qui n'ont d'ailleurs jamais été prévus pour cet usage. En complément, la réduction des apports en sédiments implique une amélioration de la protection de berges ainsi qu'un contrôle de l'occupation et de l'usage des sols à proximité immédiate des berges avec constitution d'une zone tampon végétale (enherbement et plantations). Ces dispositions s'appliquent à ces trois principaux canaux mais elles concernent aussi les canaux les plus encombrés qui débouchent au sein du marais Masay (cas notamment du canal en aval de l'institut Pasteur).

Concernant les zones les plus planes au sein de la plaine alluviale de l'Ikopa, l'absence de pente n'incite pas à collecter les eaux pluviales au sein de fossés, car ces dispositifs sont très vite comblés par les sédiments fins et/ou les déchets. A terme, il n'assurent plus aucun rôle d'évacuation, comme c'est le cas actuellement sur une grande partie du réseau. La réalisation d'aménagements de type « cunette » peut s'avérer suffisante pour assurer un minimum de ressuyage. En outre, l'aménagement permet d'assurer un entretien aisé.



# ANNEXE



# **Annexe 1 : CR de mission érosion – sédimentologie. Mission du 7 au 15 novembre 2017**

**REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA**  
**Tanindrazana – Fahafahana – Fandrosoana**

**Ministère d'Etat en charge des Projets Présidentiels, de l'Aménagement du Territoire et de  
l'Équipement (MEPATE)**

**AGENCE D'EXECUTION DES TRAVAUX D'INTERET PUBLIC et d'AMENAGEMENT  
(AGETIPA)**

**Objet : Mission de maîtrise d'œuvre pour le programme intégré d'assainissement  
d'Antananarivo (PIAA)**

**COMPTE RENDU DE MISSION EROSION- SEDIMENTOLOGIE**

**Mission du 7 au 15 Novembre 2017**

Lieu : Antananarivo.

Objet principal de la mission : Rencontres des organismes susceptibles de disposer d'informations sur la thématique, notamment des données quantitatives. Reconnaissances de terrain sur la base des premières investigations réalisées par le bureau d'étude.



## Compte-Rendu de la mission

# 1. NOTA INTRODUCTIVE

Les numéros de points (point « XX ») cités dans la suite de ce compte-rendu font référence au travail préparatoire réalisé par BRLi en ce qui concerne l'identification des sites potentiellement concernés par des apports / dépôts solides. Ces points ont été reportés sur les minutes de terrain produites en amont des reconnaissances réalisées lors de cette mission. Un extrait de minute est joint en annexe à ce compte-rendu.

# 2. ORGANISMES RENCONTRES

## 2.1 RENCONTRE AVEC LA CUA

RdV CUA. 8 Novembre 2011. 10 à 12h00

- Rencontre Mr Elysé Razafimahefa, Directeur Technique. Razafimahefaelyse@gmail.com
- Mr Sylvestre : Chef division assainissement : curage d'assainissement du réseau ;
- Mr Fetra : Chef division de la voirie : réparation, extension de canaux et buses et retrait des sédiments.

La CUA fait état de 5 à 6 endroits concernés par des problèmes d'encombrements des réseaux d'assainissement.

De façon générale, le réseau a été dimensionné pour 100 000 habitants uniquement, or aujourd'hui, la population de Tana est d'environ 2,5 Millions d'habitants. Ce constat peut expliquer les discontinuités observées sur le réseau ainsi que les problèmes d'occupation par la population ou encore la présence de déchets.

Les points concernés par la présence de dépôts solides sont passés en revue avec le bureau d'études.

- Palais des sports : La CAS 6 est localisée au nord du palais et curée par le SAMVA. Ces curages concernent en moyenne 8 camions, soit un volume d'environ 40 m<sup>3</sup> à chaque pluie. A ce volume qui arrive sur la route, il convient d'ajouter celui qui est issu uniquement de la chambre, soit environ 20 m<sup>3</sup>.
- Tous ces volumes sont prélevés à chaque pluie. Les pluies « efficaces » peuvent revenir en moyenne entre 2 et 4 fois par an. (2 fois pour l'année 2016, mais une seule fois en 2017 : année exceptionnelle).
- Points 7 et 8 par rapport aux repères des minutes de reconnaissances de terrain. 15 à 10 m<sup>3</sup> à chaque forte pluie, soit plusieurs fois par an.
- Point 41 entre 60 et 80 m<sup>3</sup> à chaque forte pluie (soit en moyenne 3 à 4 fois par an). Un encombrement est noté sur la route. Ce volume particulièrement important nécessite de mobiliser des chargeurs pour retirer les sédiments.

Sur le flanc Est de la colline du Rova, on note la présence de nombreuses habitations illicites, à l'origine des dégradations des sols. Il faudrait interdire ces occupations.

Points 15, 16 et 17 : total de 15 m<sup>3</sup> à chaque pluie. Il faut revoir les gabarits des réseaux plus en aval + restaurer / construire un réseau d'assainissement pluvial.

- Point 14 : 10 m<sup>3</sup> / événement au minimum.
- Une solution consiste à arrêter les constructions sur la colline du Rova, sur les flancs est, ouest sud-ouest et nord.
- Vallée de l'est : accumulation au droit de la CAS 1, à chaque forte pluie et CAS complètement bouchée à chaque forte pluie. Le cours d'eau déborde par-dessus la rue et provoque des dégâts qui nécessitent des réparations.
- C'est le SAMVA qui s'occupe du curage de cette chambre et du prélèvement des matériaux au sein du lit.

Canal C3 : caractérisé par la présence de macro-déchets et de rétrécissement du canal par des constructions illicites.

## 2.2 RENCONTRE AVEC L'APIPA

**RdV APIPA. 8 Novembre 2011. 14 – 16h00.**

- Mme Mbolatiana Razafimanantsoa, Directeur Technique.
- Monsieur Iharinandriana Rinah, Ingénieur, responsable des travaux

APIPA en charge des canaux de la plaine : Andriantany, GR et C3.

### 2.2.1 Canal Andriantany

Le canal Andriantany bénéficie d'apports pluviaux et de ceux issus du réseau non séparatif. La zone de plus fort dépôt cumule à la fois les apports de nombreux collatéraux, une forte occupation des berges (parmi les plus élevée de tout le canal), y compris un étranglement au niveau d'Isotry (+ présence de méandres).

A l'époque, un dédoublement du canal avait été envisagé dans le cadre des études de 1991 (curage + rehaussement des berges) mais cette solution n'a pas été retenue considérant notamment le nombre de personnes à évacuer (nombre encore plus important aujourd'hui) et la suffisance de la solution par curage permettant d'atteindre les objectifs.

Ce dédoublement devait notamment permettre de recouper les méandres, donc d'augmenter la pente du canal.

Concernant les apports en dehors de la plaine, on note aussi de nombreux apports solides aux abords du lac Anosy (près de la CAS 4) ; ainsi que dans le bassin sud du Massay, notamment via le canal Manjakary.

Sur la différenciation des apports au sein d'Andriantany, on note une part en sables plus importante sur le premier tronçon et sur le tronçon 3 en aval d'Isotry (principaux rejets de la ville « basse »).

Concernant les apports toujours, il apparaît que certains Fokontany encouragent le rejet des eaux usées directement dans le canal ! (observation qui vient de certaines ONGs...)

Le canal présente une section qui n'est pas homogène avec 13 m en gueule sur la partie amont puis en aval d'Ampefilhoa et au niveau d'Isotry cette largeur n'est que de 6 m. Là encore la réalisation d'une section de 13 m en crête nécessiterait de nombreux déguerpissements.

De façon générale, les érosions de berges sont relativement homogènes sur Andriantany. Les plus importantes se rencontrent au niveau de la station aval (Ambodimita) du fait des prélèvements en eau (abaissement de la ligne d'eau et augmentation des vitesses).

Les curages ne sont pas effectués de manière régulière mais uniquement quand des financements sont obtenus (financements Malgaches ou auprès des bailleurs de fonds : cas de 2014 pour l'Europe, 2010 et 2016 pour l'Etat Malgache).

Dans les années 1990 le canal n'était pas sous la même tutelle qu'aujourd'hui et s'intégrait au sein du projet « Plaine de Tana ».

Attention en ce qui concerne les données rassemblées et sur la base du travail d'analyse déjà réalisé par BRLi :

- Les données de 2001 correspondent en fait à des travaux réalisés en 2002. Il ne s'agit pas de volumes prélevés, mais de volumes en place, mesurés sur l'ensemble du canal (soit sur 13 km) ;
- Pour les années 2014, 2016, il s'agit de quantités enlevées et transportées à la décharge.

Il y a donc nécessairement des différences entre ces données (volumes plus importants pour des volumes en place mesurés).

Dans les principes d'aménagement, si on fait déguerpir les gens, il faut occuper l'espace automatiquement, soit par des plantations, soit par la construction de voiries (goudron ou pavés) à côté du canal ou sur le canal même !

## 2.2.2 Cas du canal C3

Il s'agit d'un canal de drainage de la plaine.

Origine de la sédimentation du C3 : apports issus de l'érosion des berges (en partie) mais surtout des effluents et des apports de collatéraux.

On note par ailleurs un problème de remontée des sédiments du fond après curage ; problème récurrent. (Origine ? fond décompacté et remise en suspension).

De façon générale, les berges du C3 sont assez stables dans le 67 Ha. Plus en aval, il n'y a plus de berge, le canal est affleurant avec le TN.

Les bassins du C3 correspondent à des tampons au profit des casiers urbanisables, mais ce principe fonctionne mal car les zones habitées sont plus basses que le fond des bassins. En outre, ces derniers sont envahis par les jacinthes d'eau. Ces bassins n'ont jamais été curés du fait du manque de crédits ; en outre, ce curage nécessite de disposer d'un matériel spécifique.

## 2.2.3 GR : canal d'irrigation

Il est placé en position dominante par rapport à la plaine pour les besoins d'une irrigation gravitaire.

Il n'y a jamais eu de curage systématique, le canal est donc « bouché ».

Ce canal présente une pollution des eaux moins importante que les autres canaux, mais on note toujours la présence d'ordures. Les berges sont très érodées du fait de vitesses d'eau plus élevées et de la présence d'activités de riverains. On recense la présence d'environ 400 bâtiments localisés entre Anosipatrana et Andohatopenaka.

## 2.2.4 Autres points

### Essais de techniques végétales.

Des essais ont été réalisés avec le Vétiver aux abords du marais Masay. On note de bonnes reprises mais aussi des problèmes d'envahissements sur les zones atterries.

### Curage du marais Masay

Deux campagnes de curages ont été réalisées sur ce marais depuis sa création, campagnes de 2008 / 2009 et 2011. Il s'agit de volumes peu importants, les travaux se limitent à une ouverture du cône de déjection (ou faisant office de) pour faire un chemin jusqu'aux ouvrages busés qui permettent d'assurer la liaison avec le marais nord.

## 2.3 RENCONTRE AVEC LE BNGRC

### Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes. RdV 9 Novembre 15 – 16h30

- Directeur du CERVO : Centre d'Etude Réflexion, Veille et Orientation. Mr Razafaimandi mby John
- Chef de service réflexion orientation : Nianja Raovinelon (nraovinelon@gmail.com) 034 05 480 15
- Dr Lahah Christian andriamirado 034 05 480 06 (lahahchristian@gmail.com)
- Mahery Razafimahenina, géologie subsurface

Le Docteur Lahah fait une présentation de la problématique

Sur Tana, il convient de distinguer le fonctionnement de la plaine et la partie qui présente le plus de reliefs.

Dans la plaine, le contrôle aval par le seuil naturel de Farahantsana exerce une contrainte forte sur les écoulements en particulier des canaux et le ressuyage en temps de crue. Mr Lahah insiste sur le fait que les problèmes au sein de la plaine sont liés :

- A l'augmentation de l'urbanisation sur Tana et du coefficient de ruissellement (donc augmentation des débits qui arrivent sur la plaine) ;
- A l'augmentation croissante de la plaine associée à une diminution de l'espace inondable du fait des remblais (diminution de la zone tampon).

Le problème des dépôts constatés sur la plaine est plus le fait de ces conditions hydrauliques particulières (faibles écoulements), de l'occupation importante des berges des canaux (qui servent tous aujourd'hui de canaux de drainage) et des déchets (macro-déchets et eaux usées) rejetés dans ces canaux.

En ce qui concerne les érosions, il faut donc plus se concentrer sur les reliefs que la plaine. Mr Lahah estime en outre que ces apports sur les reliefs ne sont certainement pas si importants et ne suffisent pas à expliquer les inondations récurrentes observées sur certains quartiers.

Les travaux de curage des canaux au sein de la plaine ont très peu d'effet sur les écoulements (uniquement pour les événements les plus fréquents) car le fonctionnement hydraulique de la plaine (et les pratiques des habitants) conduisent à revenir rapidement à la situation avant curage. Sur cette plaine, la priorité est de stopper tous les remblais.

Concernant les données demandées (dépôts solides) le BNGRC ne dispose pas d'information, mais un rappel des zones les plus souvent inondées est fait.

Le BNGRC confirme qu'il n'existe pas de données géologiques récentes à leur connaissance. Il est demandé de se rapprocher du Bureau Géologique de Madagascar à Ampandrinomby

Une consultation du site de l'Université (Mada revue) est aussi conseillée.

## 2.4 RENCONTRE AVEC LE SAMVA

10 Novembre 2017, 9h00 – 12h30

- Mme Fanjarokoto, chef du service des ordures ménagères (fanjarokotofr@gmail.com)
- Mr Odon Rakotonirainy, responsable SIG, responsable suivi et évaluation (eulogeodon@gmail.com)

Le SAMVA dispose d'une bonne connaissance des sites de dépôts, sites sur lesquelles ils interviennent de façon régulière (dégagements de chaussées généralement concernées par des dépôts importants).

Une présentation est faite par BRLi de l'avancement de ses travaux et de ses choix relatifs aux points de reconnaissances issus d'un croisement entre le réseau hydrographique à partir de l'interprétation fine du MNT et du croisement de la couche réinterprétée du projet GRIMA.

Il s'avère que de nombreux points correspondent avec ceux sur lesquels le SAMVA intervient de façon fréquente. Ces points correspondent aussi assez bien avec les sites identifiés par la CUA.

### 2.4.1 Zones de dépôts récurrents recensées par le SAMVA

Mr Odon, présente les points recensés par ses soins et reportés sur une couche SIG remise le jour même au bureau d'études. Les détails relatifs à ces points sont discutés.

- Place MDRM, correspondant aux points 24 et 23 identifiés par BRLi. Le point 24 concerne aussi la place localisée en contrebas, lieu de dépôts. Les volumes produits à chaque événement sont de l'ordre de 6 m<sup>3</sup>, soit 60 m<sup>3</sup>/an en retenant une moyenne de 10 événements par an. Ces points témoignent de la dégradation du réseau d'assainissement pluvial au-dessus du tunnel.
- Stade de Mahamasino (points 20 – deux points - et 21). Les volumes sont estimés à environ 120 m<sup>3</sup>/an (soit 2 camions de 6 m<sup>3</sup> environ 10 fois par an).
- Quartier Manahambahiny correspond approximativement au point 41 BRLi. Il s'agit d'apports solides sur la route associés à des inondations (pas le seul fait des apports solides, mais éléments aggravants). Le volume annuel est estimé à 6 m<sup>3</sup> pour chaque événement, soit 60 m<sup>3</sup>/an.
- Tsimbazaza (points 17, 16 et 15) + Rond-point de Tsimbazaza. Le volume est estimé à 4 m<sup>3</sup> de sables et gravats par événement, soit un volume total annuel estimé à 15 m<sup>3</sup>/an.  
Il existerait un dessableur au sud-ouest du rond-point. Cet ouvrage n'a pas encore été identifié à ce jour.
- Sur RN 7 ; point 12 au niveau du dessableur proposé par BRLi. Volume de 4 m<sup>3</sup>/épisode, soit environ 30 m<sup>3</sup>/an si l'on ajoute aussi les sables compris dans les canalisations plus en aval.
- Institut Pasteur (nouveau point non identifié par BRLi). Quartier Avaradoha. Volume de 6m<sup>3</sup>/événement, soit 60 m<sup>3</sup>/an. Ces apports viennent de l'Institut Pasteur et du quartier en amont (Mahatazana).
- Aval du point 30 identifié par BRLi (Soavinandriana) : apports du BV. Une intervention est à faire sur le tout le réseau alimenté par ce BV avant chaque saison des pluies et après aussi. Il n'y a pas de ramassage donc pas d'information sur les volumes (canal de Soavinandriana est complètement obstrué).

A titre d'information, le volume d'entretien financé par l'UE en 2013 a été de l'ordre de 800 m<sup>3</sup> pour le curage de la totalité du canal.

- Nouveau point identifié par SAMVA (dénommé 24bis par BRLi) sortie du tunnel, dépôts de sables et de boues. Volume de 2 m<sup>3</sup>/événement, soit environ 15 à 20 m<sup>3</sup>/an. Ces dépôts proviennent du quartier Amparibe.
- Est du lac de Tsimbazaza (parc Zoologique). Nouveau point identifié par le SAMVA. En 2015 (ou 2010) un effondrement du talus a été observé (glissement). Le volume d'apports solides par événement est d'environ 2m<sup>3</sup>, soit 20 m<sup>3</sup>/an. Ces apports sont issus du quartier Fiadanana (en provenance de la colline Atsimo (Fort Voyron)).
- Sur RN7, en aval des points 10 et 9, il est noté de nombreux apports d'environ 3m<sup>3</sup>/épisode, soit environ 30 m<sup>3</sup>/an. Ces sédiments proviennent d'un caniveau de 1m X 1.5 m, mais les quantités apportées dépassent cette section.
- Sur RN7, au point 13bis (amont andriantany). Volume de 2m<sup>3</sup>/épisode, soit 20 m<sup>3</sup>/an.
- A proximité du point 13, dépôts au point bas au carrefour CEMES Soanierana. Volume d'environ 2m<sup>3</sup>/épisode, soit environ 20 m<sup>3</sup>/an (volume issu d'un petit sous-BV en contrebas du versant de la caserne militaire CAPSAT)
- Besarety. Nouveau point dit « CAS 1bis ». volume de 2m<sup>3</sup> par épisode, soit environ 20 m<sup>3</sup>/an. Pas d'accès à ce niveau pour entretenir les canaux. Les apports viennent des BVs du sud.
- Près de Betongolo, cercle MES, non loin du point 52. Les apports solides viennent de la partie Est, en provenance de fort Duchêne (sols plutôt à nus). Volume d'environ 4 m<sup>3</sup>/épisode, soit 40 m<sup>3</sup>/an.
- Point 39 quartier Mandroseza : toute la route est envahie par les sédiments, volumes importants de 2 à 3 camions par épisode, soit 18 m<sup>3</sup>/événement pour un total estimé à 180 m<sup>3</sup>/an. Ces apports proviennent de tous les BVs localisés au nord-est y compris le point 40. Un tronçon routier a été rehaussé en 2015 y compris redimensionnement des ouvrages de franchissement par le M2PATE (ministre d'état en charge projets présidentiels et de l'aménagement du territoire et de l'équipement). Cet aménagement n'a pas résolu tous les problèmes car il faut trouver des solutions à l'échelle des BVs.  
Attention, le plan d'eau Mandroseza correspond à la réserve AEP de la ville de Tana. Attention aux déversements d'eaux usées.
- Nouveau point : Ambohipo (hors carte). Gros apports en volume estimés à 10 m<sup>3</sup>/événement, soit 100 m<sup>3</sup>/an environ. Ces apports viennent de toutes les citées en amont.

## 2.4.2 Données en attente

- CAS, données de 2009 à 2016 / 17. Traitement à faire par Mr Diary (rdiaryhenintsoa@gmail.com)
- Détail sur les travaux de curage réalisés en 2013 dans le cadre des financements UE (projet qui concerne tous les canaux secondaires de Tana, soit environ 29 kms). On notera par ailleurs, que le comblement est revenu une année après, mais il est plus le fait du jet des ordures ménagères que du sable.
- Ordre de grandeur des volumes curés sur le canal Soavinandriana.

## 2.5 RENCONTRE AVEC L'IMV

**10 novembre 2017, 14h00-16h30**

Mission : préservation du patrimoine architectural, urbain et paysager. L'IMV est chargé de préparer le dossier de demande de classement à l'UNESCO.

Plusieurs études réalisées pour ce classement : en 2015 identification de la zone de classement (paysage et bâti), en 2016 étude socio-anthropologique, en 2017 mission d'experts consultants du patrimoine + expert mouvement de terrain, expert géotechnique issus de l'Université de Florence (Italie).

Considérant les études que réalisent actuellement ces experts, il est pertinent de prévoir un échange avec eux. Les contacts email de ces personnes seront envoyés par l'IMV à BRLi. Au niveau du calendrier, il est prévu un rendu en décembre, pour la première phase (modèle numérique 3D) de l'étude des experts de l'Université.

Il existerait par ailleurs un bureau de Gestion des Risques au sein de la CUA qui aurait produit un « Plan de contingence de la CUA relatif à la gestion des risques » Contact, colonel John Herimiamdry, Directeur de la gestion des risques et des catastrophes. Tel 033 05 480 76.

Documents à envoyer à l'IMV :

- Couche GRIMA réinterprétée par BRLi ;
- Réseau hydrographique identifié par BRLi (modèle numérique de terrain) ;
- Réseau hydrographique SAMVA (canaux primaires et secondaires) ;
- BD bibliographique de BRLi (format « \*.xls »).

Document remis par l'IMV :

- Liste bibliographique
- Présentation des experts de Florence
- Plaque UNESCO.

## 3. RECONNAISSANCES DE TERRAIN

Ces reconnaissances ont été effectuées les 11, 13 et 14 Novembre 2017 sur les points identifiés par le bureau d'études en amont de la préparation de sa mission.

Les rencontres avec les différents interlocuteurs ont permis de cibler les reconnaissances sur les points les plus intéressants en termes d'apports solides.

A partir de ces points, des reconnaissances plus étendues ont été effectuées sur les bassins versant afin d'identifier les zones susceptibles de fournir des sédiments.

La synthèse du programme de reconnaissances sur les trois jours est le suivant :

- 11 Novembre : reconnaissances des BVs qui alimentent les abords du palais des sports (dont la CAS 6). Reconnaissances des BVs en aval du Rova, aux abords du Zoo et de Tsimbazaza jusqu'au rond-point du même nom. Reconnaissance de la partie Est du Rova. Reconnaissances des BVs potentiellement les plus producteurs en sédiments aux abords de la RN 7. Reconnaissances en centre-ville, du tunnel jusqu'à Isotry.
- 13 Novembre : reconnaissances des BVs aux abords du campus Universitaire d'Antananarivo. Reconnaissances des BVs des quartiers de Mandrozeza ; reconnaissance rapide sur Ambohipo. Reconnaissance du BV correspondant à l'Institut Pasteur jusqu'à Besarety. Reconnaissances des BVs qui alimentent le canal « Soavinandriana » jusqu'à la CAS 7.



- 14 Novembre : reconnaissances ponctuelles sur l'ensemble des linéaires des canaux GR et C3. Ciblage de quelques points sur Andriantany.

Les photographies prises sur le terrain ont fait l'objet d'un fichier de géo référencé afin de localiser les sites de prises de vues.

## 4. PRINCIPAUX RESULTATS

Ils sont détaillés dans les comptes rendus des organismes rencontrés (voir ci-dessus). De façon générale, la mission a permis :

- De valider l'approche préalable consistant à procéder à un croisement entre le réseau hydrographique généré automatiquement à partir du MNT avec les zones potentiellement les plus productives issues de GRIMA (sur la base des couches réinterprétées en fonction de leur capacité à produire des sédiments) ;
- De récupérer des données quantifiées sur les zones concernées par des dépôts récurrents (objectif principal de la mission) ;
- De disposer d'une information plus précise sur les sources d'apports solides de certains bassins versants, en particulier les plus producteurs ;
- De disposer d'une information sur le niveau de comblement des réseaux (données issues du SAMVA) ; information qui viendra en complément des investigations réalisées par BRLi ;
- De confirmer l'absence d'information récente sur les données géologiques de la zone d'étude ;
- De récupérer les informations ci-dessous :
- **Données issues de la SAMVA :**
  - informations relatives aux opérations de curages : coûts de transports, sites de dépôts provisoires, états d'avancement, rapport narratif UE relatif aux travaux de curages ;
  - Des données supplémentaires sur les prélèvements de sables dans les CAS pour les années 2016 et 2017.
- **Données issues de l'IMV : (dans le cadre du dossier pour postuler à l'UNESCO) :**
  - Arrêté de ZPPAUP format pdf ; (zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager)
  - Dossier ZPPAUP format pdf ;
- **Données au format MAP Info issues du dossier ZPPAUP :**
  - Une couche bâtiment ;
  - Une couche canal ;
  - Plusieurs couches de courbes de niveaux ;
  - Une couche haies ;
  - Une couche limites de cultures ;
  - Une couche limite de secteurs ZPPAUP ;
  - Une couche « mur » ;
  - Une couche routes principales
  - Une couche routes secondaires
  - Différentes couches qui concernent plus directement les typologies architecturales, paysagères et urbaines dans le cadre de l'établissement du dossier UNESCO.

## 5. PROCHAINES ETAPES

Elles sont détaillées ci-dessous. Ces étapes concernent le traitement des données sur la base méthodologique présentée par le bureau d'études et les compléments apportés dans le cadre de la mission, considérant les données disponibles.

### 5.1 QUALIFICATION DE LA SENSIBILITE DES BASSINS VERSANTS A L'EROSION

#### 5.1.1 Données hydrographiques :

- Finalisation du traitement / « nettoyage » des axes d'écoulements identifiés sur la base de l'interprétation du MNT ;
- Identification des bassins versants en retenant une unité de base d'environ 5 Ha sur les parties les plus pentues de la zone d'étude et des bassins versants équivalents à ceux identifiés dans le cadre de la tranche ferme, sur la plaine. Vérification des incohérences potentielles et validation des limites par rapport aux bassins versants identifiés dans la tranche ferme.
- Calculs de paramètres sur chacun de ces bassins : pentes, angles, ordination (Strahler), densité de drainage.

#### 5.1.2 Données géologiques et pédologiques :

- Caractérisation des bassins versants et évaluation du potentiel érosif par rapport aux données disponibles.

#### 5.1.3 Occupation des sols :

- Analyse des données rassemblées sur l'occupation des sols dans le cadre de l'étude et interprétation en termes de potentiel érosif ;
- Analyse de la part effectivement érodable (retrait du bâti), pour les différents bassins versants.

### 5.2 DEFINITION DE LA SENSIBILITE A L'EROSION DES BASSINS VERSANTS

- Confrontation entre les données hydrographiques – géologiques et pédologiques – occupation des sols et établissement d'une carte de synthèse avec report des zones de dépôts préférentiels et d'apports exceptionnels (Lavakas).
- Etablissement d'un document cartographique de synthèse de l'état des réseaux ;
- Confrontation / discussion entre la sensibilité à l'érosion et l'état des réseaux.

## 5.3 ELEMENTS DE QUANTIFICATION

- Traitement des données issues du curage pluriannuel des CAS, avec intégration des données récentes ;
- Traitement des données relatives aux canaux :
  - Evolution des profils en long (GR et C3) ;
  - Historique des prélèvements sur Andriantany ;
  - Interprétations possibles à partir des prélèvements et analyses sédimentaires réalisés sur les canaux.
- Synthèse des données quantifiées rassemblées lors de la mission de Novembre (y compris données acquises dans le cadre de la tranche ferme) : zones de dépôts, volumes de comblement des réseaux.
- Analyse exploratoire : évaluation de l'intérêt d'une comparaison entre le MNT issu de l'étude GRIMA et du MNT Lidar levé dans le cadre de cette étude (voir si intérêt local notamment pour certaines zones productives).

La synthèse de cette phase s'efforcera de faire le lien entre :

- La sensibilité à l'érosion des bassins et la production en volumes de sédiments ;
- Les incidences sur les réseaux d'assainissement.