

VERSION PROJET

EVALUATION DU POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE AU NIVEAU DES ZONES D'INTERVENTION DE L'ONG AVSF

PROJETS :

ZOLOKE, SOHAVELO ET FANANTENANA



Le Manambovo (Riv.) à Tsihombe © A.Charmoille

ACCES A L'EAU DANS LE « GRAND SUD » DE MADAGASCAR



Arnaud
CHARMOILLE

Novembre 2016

Sommaire

Résumé – synthèse	4
Contexte.....	7
Introduction	9
1. Contexte climatique	11
2. Contextes géographique hydrologique et géologique	13
2.1. Géographie, hydrographie.....	13
2.2. Topographie, morphologie.....	14
2.3. Contexte géologique.....	15
2.3.1. Généralités, description des terrains	16
2.3.2. Structure géologique des zones étudiées	17
3. Hydrologie et hydrogéologie	25
3.1. Rappels hydrogéologiques succincts	25
3.1.1. Porosité d'interstices	25
3.1.2. Porosité de fissure.....	25
3.2. Etat de l'art hydrogéologique du « Grand Sud »	26
3.2.1. Accès à l'eau.....	26
3.2.2. Diagnostic hydrogéologique	26
3.2.3. Aquifères en présence et méthodes d'exploitation.....	28
3.3. Investigations complémentaires réalisées, résultats et interprétations.....	33
3.3.1. Analyses en éléments majeurs.....	33
3.3.2. Les points de prélèvement.....	34
3.3.3. Paramètres physico-chimiques (Annexe 7).....	36
3.4. Faciès chimiques des eaux.....	37
3.5. Origine de la salinité, influence marine ou continentale	40
3.5.1. Concentration en sel des différents points d'eau visités.....	40
3.5.2. Evolution du rapport entre les ions chlorures et sodium suivant les échantillons considérés.....	40
3.5.3. Origine du sel dans les eaux souterraines.....	43
3.5.4. Origine des circulations d'eau : marine ou continentale.....	45
3.5.5. Synthèse.....	46
4. Potentiel hydrogéologique	50
4.1. Le projet ZOLOKE.....	50
4.1.1. Situation du projet (Figure 41)	50
4.1.2. Ressources en eaux identifiées	51
4.1.3. La problématique de l'alimentation en eau de Sampona	53
4.1.4. Synthèse.....	53
4.2. Le projet SOHAVELO :	55
4.2.1. Situation du projet.....	55
4.2.2. Ressources en eaux identifiées	56
4.2.3. Synthèse.....	59
4.3. Le projet FANANTENANA :	63
4.3.1. Situation du projet.....	63
4.3.2. Ressources en eaux identifiées	64
4.3.3. Synthèse.....	67
5. Améliorer les conditions d'accès à l'eau	72
5.1. Avantages et inconvénients des différents types de ressources	72

VERSION PROJET

5.2.	Bonnes pratiques de réalisation et d'entretien des puits ou forages	72
5.3.	Désalinisation par distillation solaire.....	75
Conclusions.....		78
Bibliographie		79

Résumé

Cette étude est basée sur des investigations géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Leurs interprétations sont restituées dans le document qui va suivre. Elles nous ont permis d'identifier les différentes ressources en eaux disponibles pour les zones d'intervention de l'ONG AVSF dans le Grand Sud de Madagascar et de proposer les moyens à mettre en œuvre pour les rendre disponibles. Ce résumé synthétise les principales recommandations opérationnelles issues des résultats obtenus.

- Le projet **ZOLOKE** :

Dans la région d'Amboasary l'exploitation de la nappe contenue dans les sédiments déposés par le Mandrare et ses affluents est à privilégier (nappes alluviale et sous-écoulement), pour les villages situés dans la vallée formée par le cours d'eau (Ankara, Behara, Tanandava etc ...). Cette exploitation se fera à partir de puits réalisés dans les règles de l'art afin de préserver la qualité de l'eau et pérenniser l'accès à la ressource. Ces travaux passeront par la rénovation/modernisation de puits déjà existants et la réalisation de nouveaux ouvrages. Leur implantation se fera à partir du retour d'expérience acquis par la population sur la localisation des zones à moins forte salinité.

Pour les villages situés sur le plateau Karimbolien (région de Sampona) la réalisation d'un forage, envisagée dans un premier temps, nous paraît très incertaine en termes de résultats. En effet, il est peu probable qu'une nappe d'eau existe à faible profondeur et l'exploitation par forage de la nappe principale localisée entre 150 et 200 mètres sera sans doute rendu très compliquée du fait d'une salinité très élevée. Dans ces conditions une modernisation des puits côtiers est conseillée ainsi qu'une exploitation des eaux de pluie au niveau du village bien que cette solution ne présente pas un rapport coût / bénéfice intéressant.

- Le projet **SOHAVELO** :

De la même manière que pour le projet Zoloke, pour les villages proches du Manambovo les nappes alluviales et le sous écoulement de la rivière sont à valoriser avec une exploitation réalisée à partir d'ouvrages conçus dans les règles de l'art permettant une protection de la ressource et un accès efficace à cette dernière.

Pour les villages localisés dans la bande côtière quand les grès néogènes sont présents en profondeur, une exploitation peut être envisagée par forage (Imongy). S'ils sont absents une exploitation de la nappe des sables superficiels peut être envisagée via des puits, mais les débits disponibles seront probablement limités.

Les puits côtiers sont une ressource intéressante à préserver tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif en faisant une exploitation raisonnée et en limitant leur utilisation aux populations les plus proches.

Dans les zones du socle cristallin, au nord, une exploitation par forage des zones drainantes situées dans les zones de dépression topographique constituera une ressource intéressante mais pouvant localement présenter une minéralisation qui pourra être gênante.

- Le projet **FANANTENANA** :

Au sud de la zone d'intervention (sud d'Ambatomainy) l'exploitation des eaux circulant dans le socle par forage est une ressource en eau intéressante à favoriser par rapport à la réalisation d'ouvrages plus superficiels dans les sables ou les zones d'altération du socle. Les grès néogènes moins profonds ont probablement un intérêt lorsqu'ils sont présents, leur exploitation se fera aussi par forage. L'exploitation du sous-écoulement des affluents de la Linta peut également être envisagée dans certaines zones (Analarotra).

Au nord l'exploitation par forage des grès de l'Isalo permettra d'accéder à une ressource intéressante. Les forages, par rapport aux puits, permettront d'obtenir des débits plus importants car atteignant une plus grande profondeur. Certaines zones des grès peuvent présenter des minéralisations rendant les eaux impropres à la consommation (Anjamena). Les alluvions de certains cours d'eau (oued) peuvent être exploitées lorsque les villages sont situés à proximité (Anjambalo, Ampasindava, Anontsy).

Au niveau des trois projets, il est très probable que les minéralisations de l'eau obtenues dépassent les valeurs conseillées par l'OMS. Des méthodes simples permettent d'envisager une désalinisation à l'échelle individuelle pour l'eau de boisson dans les cas les plus extrêmes.

Contexte

Désignée sous le nom de « Grand Sud » la région de Madagascar dont il va être question dans ce rapport se caractérise par un important isolement géographique. Comme le remarquait Guyot en 2002 : « Cette dénomination traduit bien la notion de « bout du monde » qui caractérise cette région ». A titre d'illustration, l'accès à la région d'Ambovombe par voie terrestre, via les Taxi-brousse, depuis la capitale Tananarive, nécessite une durée de 3 jours et 3 nuits de voyage en continu pour une distance parcourue d'environ 1000 km.

Ces derniers mois, plusieurs articles de la presse internationale se sont fait l'écho de la situation alimentaire critique dans le Grand Sud (*Barbière, 2016*), (*BBC, 2016*), (*RFI, 2016*). Cette, toute relative, visibilité internationale est révélatrice de la situation critique dans laquelle se trouve cette zone isolée de la Grande Île. Cette situation difficile s'explique en partie par :

- le climat semi-aride qui est régulièrement suspecté de s'assécher un peu plus chaque année du fait du réchauffement climatique mondial ;
- de grosses difficultés d'accès à l'eau tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif ;
- l'isolement géographique lié aux difficultés d'accès par voir terrestre ;
- le contexte social atypique, en effet le Sud a été surnommé « *le cimetière des projets de développement* ». On considère que la plupart des projets dans le Sud sont voués à l'échec » (*UNICEF 2011*). S'ajoute à ceci le contexte d'insécurité des dernières années induit par les vols de zébu menés par les Dalao (*UNICEF, 2011*).

C'est dans ce contexte difficile que l'ONG AVSF mène trois projets dans différentes régions du Grand Sud :

- le projet **ZOLOKE**, projet d'appui à l'Amélioration de la Sécurité Alimentaire et à l'Augmentation des Revenus Agricoles dans le District d'Amboasary sud ;
- le projet **SOHAVELO**, projet d'appui à l'Amélioration de la Sécurité Alimentaire et à l'Augmentation des Revenus Agricoles dans le District de Tsihombe ;
- le projet **FANANTENANA** sud-ouest, projet d'appui à la Réduction de l'insécurité alimentaire et de la pauvreté des ménages ruraux sur le plateau Mahafaly ;

Mon intervention dans certaines zones couvertes par ces trois projets s'est faite dans le cadre d'une volonté de l'ONG AVSF d'améliorer l'accès à l'eau des personnes bénéficiaires de ces trois projets afin :

- de sécuriser l'accès à l'eau pour la consommation humaine ;
- de permettre le développement du maraîchage dans des conditions optimales ;
- de libérer de l'argent et du temps pour le maraîchage et l'élevage sur les tâches très chronophages liées à l'approvisionnement en eau.

Cette étude n'a pas pour ambition de se substituer à la mise en place d'un vrai schéma directeur de gestion de l'eau à l'échelle des grands bassins versants

VERSION PROJET

régionaux, tel que cela devrait être fait par les autorités, pour gérer de manière durable l'accès à l'eau dans cette région. L'objectif du travail réalisé et restitué ici est d'identifier les ressources en eaux possiblement disponibles à l'échelle des différentes zones d'intervention de l'ONG AVSF.

Introduction

Le travail qui va être présenté ici a été réalisé à partir d'investigation menées lors d'une mission qui s'est déroulée du 10 au 24 avril 2016. Pendant cette courte période, le territoire des trois projets menés par AVSF dans le sud de Madagascar a été parcouru, dans l'objectif de se faire une idée la plus juste possible du contexte hydrogéologique local. Etant donné les temps de transport dans cette région de Madagascar l'ensemble du territoire des zones d'action d'AVSF n'a pu être parcouru. Il a donc été nécessaire de procéder à une sélection des sites visités de manière à ce que les zones investiguées correspondent aux attentes d'AVSF par rapport à la mission, mais permettent également d'apprécier le mieux possible le contexte hydrogéologique local. Il a donc été proposé de visiter un maximum de contextes géologiques et hydrologiques différents tout en ciblant les zones d'intérêt pour AVSF.

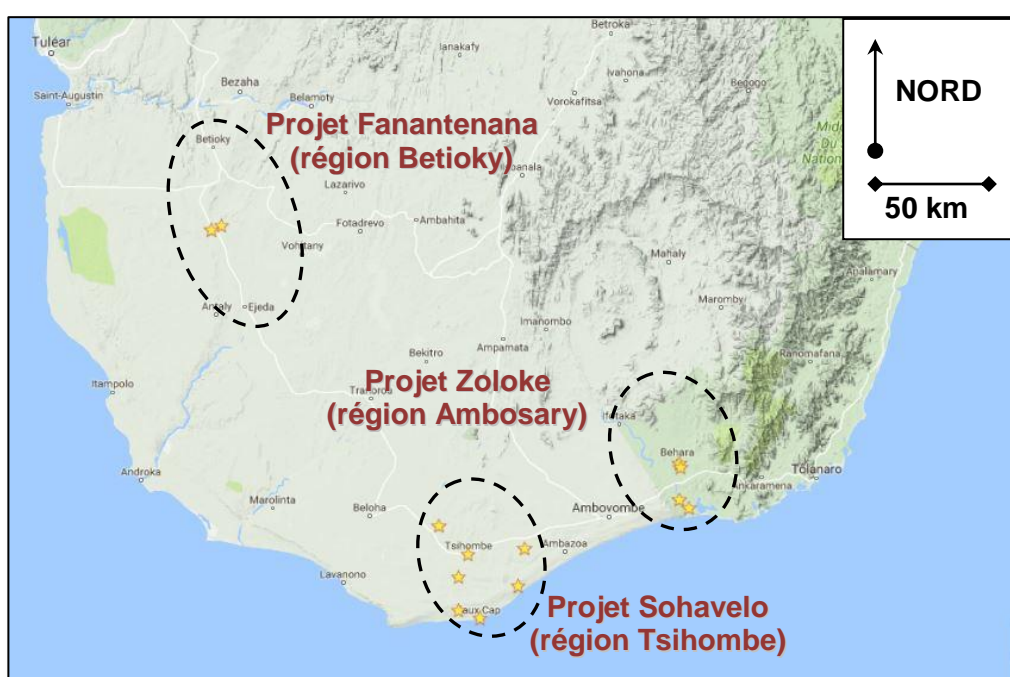


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des trois projets menés par AVSF dans le Grand Sud, les étoiles jaunes correspondent aux points d'eau visités.

Durant la mission, un certain nombre d'investigations de nature géologique, hydrologique et hydrogéologique ont été réalisées mais nous nous sommes également intéressés aux aspects organisationnels et sociaux de la gestion de l'eau. Un certain nombre de mesures ont également été réalisées ainsi que des prélèvements d'échantillons effectués sur certains points d'eau. De retour en France ces échantillons ont été analysés dans un laboratoire partenaire.

Dans les pages qui vont suivre, après une rapide description du contexte climatique, nous commencerons par dresser une esquisse de la structure géologique de la région étudiée. Ce travail a été réalisé à partir des cartes géologiques auxquelles nous avons pu avoir accès ainsi qu'aux ouvrages géologiques disponibles. Cette phase de l'étude a été très chronophage étant donné la rareté des documents recherchés. La plupart des documents consultés sont anciens et correspondent donc à différentes étapes et stades d'étude et de découverte de la géologie locale. Le résultat que nous allons présenter ici correspond donc à une synthèse de ces données que nous avons enrichi des observations effectuées sur le terrain et des interprétations auxquelles nous avons pu arriver sur le contexte géologique local.

Viendra ensuite une présentation du contexte hydrologique et hydrogéologique local tel qu'il est décrit par les auteurs ayant déjà travaillé sur le sujet. Cette présentation de l'état des connaissances sera suivie de l'analyse et l'interprétation des résultats de nos propres investigations. Ce travail servira de base à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique local et à l'identification des différentes ressources en eau. Nous aborderons notamment le problème de la salinité de l'eau en discutant de son origine et proposerons une classification des différentes ressources en eaux de cette région du Grand Sud de Madagascar.

Dans une quatrième partie, une présentation des ressources en eau disponibles pour chaque zone d'intervention sera effectuée avec un zoom sur les différentes communes visitées lors de la mission. Dans la mesure du possible différentes zones hydrogéologiques types seront identifiées, afin qu'AVSF soit en mesure d'implanter des structures d'alimentation en eau dans les communes non visitées à l'occasion de la mission.

Enfin, dans une dernière partie nous procéderons à quelques rappels succincts quant aux bonnes pratiques concernant l'aménagement des points d'eau. Ce chapitre abordera également les techniques de désalinisation de l'eau de mer existantes et qui pourraient être mises en place pour améliorer la qualité de l'eau de boisson des populations dans ces régions.

1. Contexte climatique

La région concernée par les projets d'AVSF dans le sud de Madagascar se localise en climat semi-aride chaud. On peut distinguer deux saisons ; un été austral qui correspond à la saison des pluies, chaude et humide d'octobre à mai qui précède, un hiver austral, saison sèche plus fraîche. Cependant concernant le Grand Sud, la durée de ces saisons n'est pas répartie de manière équitable durant l'année comme présenté en Figure 2. On observe que sur la bande côtière *Cornet en 1974* considère l'absence de saison des pluies proprement dite alors que dans l'arrière-pays, il évalue sa durée à 3 mois.

Ces zones sont parmi les moins arrosées de la Grande île, entre 400 mm et 600mm par an pour les zones concernées par les projets AVSF. La station la moins arrosée du Grand sud est Soalara sur la bande côtière en bordure de la Baie de Saint-Augustin avec 275 mm/an.

Ces apports hydriques sont répartis de manière très irrégulière dans l'année mais également d'une année à l'autre. En effet des variations de cumul d'un facteur 5 peuvent exister (*TMD, 2011*) ainsi qu'une grande variabilité dans le nombre de jours de pluie et leur répartition dans l'année.

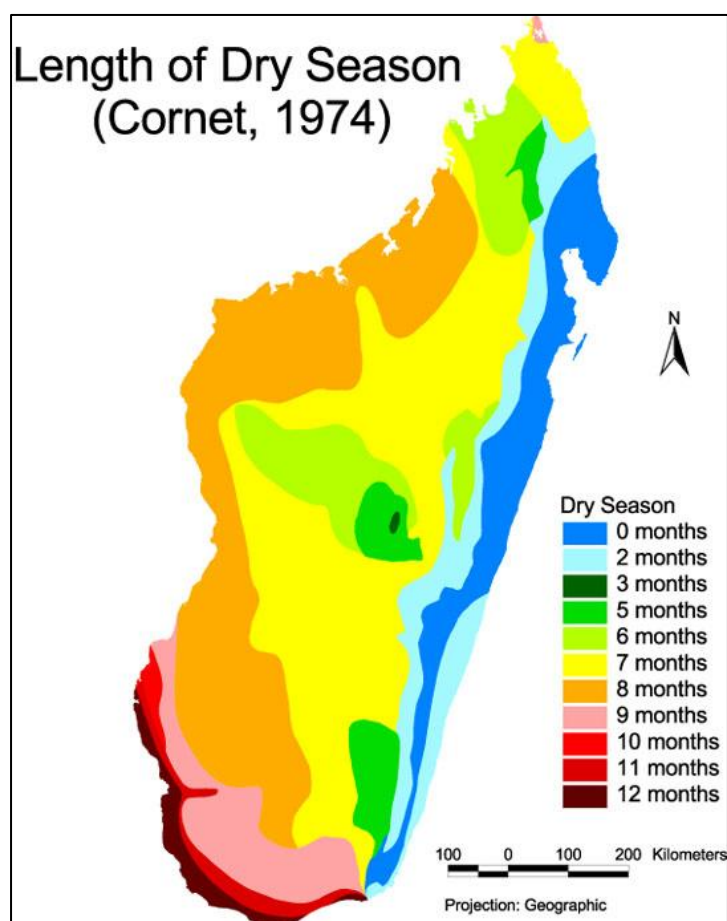


Figure 2 : Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar (*Antoine Cornet, laboratoire Orstom 1974*)

Ces faibles valeurs pluviométriques s'accompagnent de températures moyennes annuelles comprises entre 20°C et 25°C suivant l'altitude du lieu considéré (ANDEA, 2003). Cette faible pluviométrie est à comparer aux valeurs d'évapotranspiration qui sont comprises entre 1200 mm et 1400 mm par an, la valeur maximale étant atteinte à Betioky (Guyot, 2002). Plusieurs auteurs (Aurouze, 1959, Guyot, 2002 et TMD, 2011) discutent le fait qu'une approche globale à l'échelle annuelle amènerait à conclure qu'aucune recharge pluviométrique des nappes d'eau souterraine n'existe, l'évapotranspiration étant largement supérieure aux cumuls des précipitations. Or la présence d'écoulements souterrains est avérée.

Ceci met en évidence l'importance de considérer les modalités de précipitations lorsque l'on s'intéresse au bilan hydrique dans ce type de contexte climatique. Les approches habituellement développées ne sont pas adaptées. L'existence d'une recharge par les précipitations est à rechercher dans la distribution temporelle des pluies et la brutalité de certains épisodes. A plusieurs reprises lors de la mission, des témoignages de villageois (témoignage des notables à Imongy, Tsihombe) ont fait état d'épisodes cycloniques qui ont rechargé les nappes et les eaux de surface pour des durées de plusieurs mois.

On ne peut exclure également un rôle difficilement quantifiable et donc non comptabilisé des précipitations occultes, sous forme de brouillards matinaux et de rosée. Ces précipitations jouent un rôle important dans le maintien de l'humidité des sols et la recharge de certaines nappes superficielles. Nous avons peu observé ce type de précipitation lors de la mission de terrain notamment dans le secteur de Betioky au niveau du projet Fanantenana, zone d'intervention située la plus au NW. Au contraire dans l'extrême sud projet Zoloke et Sohavelo, nous n'avons pas observé l'occurrence de rosée. A Sampona (projet Zoloke), les villageois ont témoigné que la présence de rosée était rare.

La seule évaluation disponible de la recharge a été faite par le BRGM en 2005 dans sa nouvelle cartographie hydrogéologique de l'Afrique. Les auteurs estiment que la recharge annuelle des eaux souterraines dans le sud de Madagascar est comprise entre 20 et 100 mm.m⁻².

2. Contextes géographique hydrologique et géologique

2.1. Géographie, hydrographie

Le territoire du « Grand Sud » s'étend sur une surface de 15 000 km². On délimite habituellement cette région comme la zone drainée par les fleuves Mandrare, Manambovo, Menarandra et Linta (Figure 3). La limite ouest est matérialisée par l'Onilahy. Les trois projets menés par AVSF dans le Grand Sud se localisent dans les bassins versant de ces fleuves avec du sud au nord :

- Le projet ZOLOKE, dans le District d'Amboasary sud, Région ANOSY drainée par le Mandrare ;
- Le projet SOHAVELO, dans le District de Tsihombe, Région ANDROY drainée par le Manambovo ;
- Le projet FANANTENANA qui couvre une zone géographique drainée à la fois par La Linta au sud et l'Onilahy au nord.

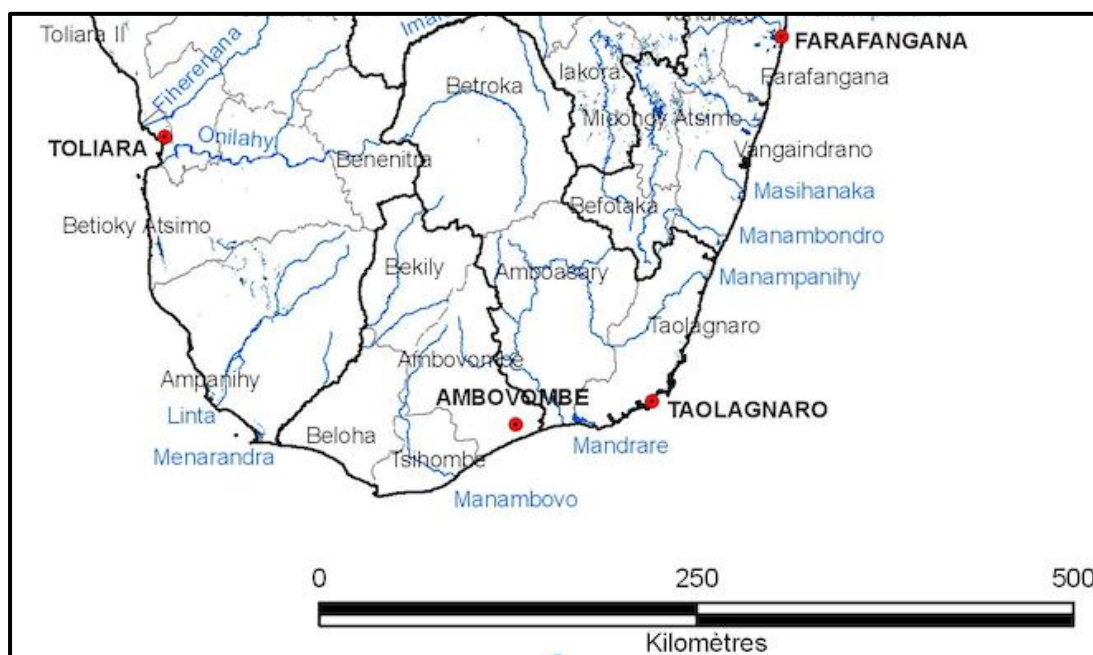


Figure 3 : Hydrographie du sud de Madagascar
(<http://www.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=1881>)

Ces cours d'eau ont pour la plupart un régime d'oued saharien avec une période où l'on n'observe aucun écoulement de surface pendant la saison sèche (ANDEA, 2003), l'Onilahy étant le seul cours d'eau pérenne de la région. Cette caractéristique est bien visible sur les photos des principaux fleuves présentées en Figure 4. Les mesures de débit présentées en Figure 5 montrent également une absence de débit en saison sèche pour les cours d'eau précités.



Figure 4 : De gauche à droite et de haut en bas : La Linta à Ejeda, Menarandroy à l'ouest de Betioky, le Mandrare à Amboasary et le Manambovo en amont de Tsihombe. © A.Charmoille

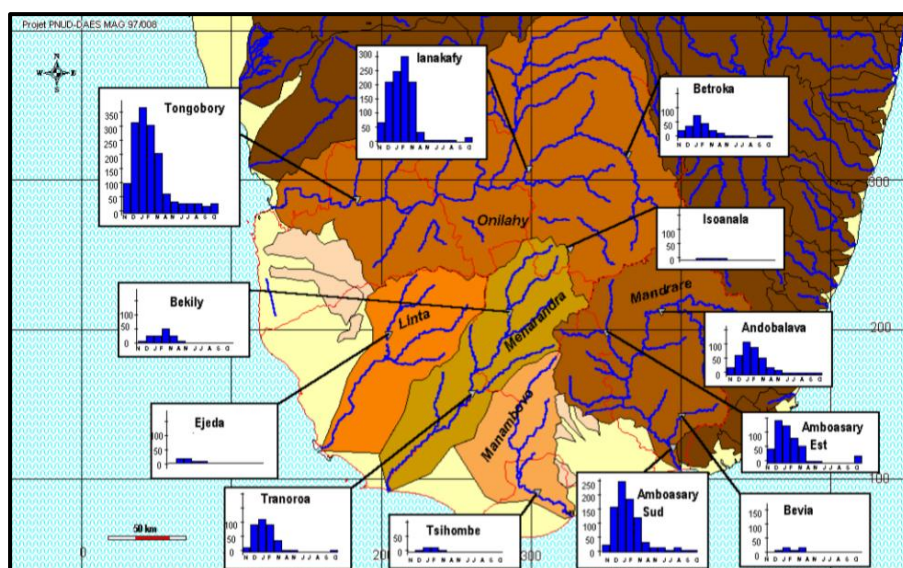


Figure 5 : Principaux bassins versants du sud de Madagascar et débits annuels des différents cours d'eau.

2.2. Topographie, morphologie

D'un point de vue géomorphologique on peut distinguer trois zones qui préfigurent déjà les grandes structures géologiques régionales :

- **La Bande Côtière** : Elle est constituée d'une zone de dépôts dunaires récents (consolidés) à très récents (non-consolidés) dont l'accumulation dans

certains secteurs a induit la formation de reliefs importants à proximité directe de la mer. Cette caractéristique est bien visible dans la région située entre le Manambovo et le Mandrare. Dans cette zone, on se trouve en présence d'un escarpement (qualifié de bourrelet par certains auteurs (Figure 6)) à proximité du rivage auquel fait suite un plateau dont l'altitude diminue lorsque l'on se dirige vers l'intérieur des terres.

A l'arrière de cette structure au niveau de la transition avec la pénéplaine intérieure se forment des dépressions où peuvent exister des bassins hydrographiques fermés pour lesquelles les écoulements de surface ou de subsurface n'atteignent pas la mer. Cette structure morphologique concerne les projets Zoloke et Sohavelo.



Figure 6 : Vue depuis le sud ouest de la dune grésifiée Karimbolienne de Antaritrika (arrière-plan) Au premier plan vallée du Manambovo. © A.Charmoille

- **La pénéplaine intérieure**, qui constitue l'arrière-pays de la zone étudiée. Elle constitue la surface d'érosion des terrains les plus anciens. Dans la zone étudiée son altitude varie de 200 à 400 mètres. A l'extrême sud de la zone d'intervention dans les districts de Tsihombe et Amboasary sud, cette entité morphologique est en contact direct avec les structures dunaires de la bande côtière.

Au contraire dans la région de Betioky le plateau Mahafaly fait la transition entre les deux structures morphologiques précédentes.

- **Le plateau Mahafaly**, il s'agit d'un vaste plateau calcaire (8000 km²) qui sépare la pénéplaine intérieure de la bande côtière dans la moitié ouest de la région du Grand Sud. Seuls quelques villages du Projet Fanantenana se localisent en bordure de cette structure.

2.3. Contexte géologique

Avant de s'intéresser aux différentes ressources en eau, du « Grand Sud » qu'il s'agisse d'eau souterraine ou d'eaux superficielles, il est indispensable de s'attarder sur la nature et la structuration géologique des zones couvertes par les projets d'AVSF. Ce travail va s'appuyer sur les observations réalisées durant les deux semaines de mission et surtout sur les travaux d'auteurs ayant étudié la géologie de l'île (entre autres Batistini, 1964, Besairie, 1922, 1946, 1965).

La description géologique qui va suivre a une finalité hydrogéologique, nous ne rentrerons donc pas dans une description rigoureuse des terrains constituant l'île ni dans le détail de la complexe histoire géologique malgache et nous nous attacherons plutôt à la structuration actuelle de terrains. Les aspects géologiques auront donc une forme simplifiée et vulgarisée de manière à rendre, autant que possible, leur lecture aisée et accessible aux non géologues.

2.3.1. Généralités, description des terrains

La carte géologique simplifiée de *Moat et Dupuis, (1997)* (Figure 7) inspirée de *Besairie en 1964* (Annexe 1) permet de visualiser la géologie de la zone du Grand Sud. Elle est constituée de deux grands types de formations géologiques :

- *Le socle cristallin ancien* : il est formé de roches dites métamorphiques qui correspondent à d'anciens dépôts sédimentaires mais qui ont subi au cours de leur histoire géologique d'importantes variations de pression et ont été soumis à des températures élevées lors de déformations de la croûte terrestre. Ils ont alors subi d'importantes modifications minéralogiques et structurales qui ont amené à la formation de gneiss, leptynites et de granites qui sont les principales roches que l'on y rencontre. Le socle est représenté en rose sur la carte géologique synthétique présentée Figure 7. Ces roches ont été datées entre -0,5 et -3 milliards d'années (Ga).
- *Les terrains de couverture sédimentaire* : ils sont venus se déposer sur le socle et correspondent au produit l'érosion du socle lui-même, ou à des apports extérieurs déposés par la mer ou le vent. On trouve des dépôts caractéristiques de milieu continental, marins et côtiers. Contrairement au socle ces dépôts ont été très peu déformés. Ils peuvent être classés en trois catégories différentes :
 - les dépôts sédimentaires anciens (en orange sur la Figure 7) : ils sont présents principalement dans la région de Betioky. Dans cette zone ils constituent ce que l'on désigne comme le « socle sédimentaire ancien » en opposition au socle cristallin absent de cette zone en surface. Il s'agit principalement de dépôts gréseux que l'on désigne sous le nom de grès de l'Isalo. Ces formations sont le résultat d'une première phase d'érosion du socle qui a précédé la séparation de Madagascar du reste de l'Afrique. Ces formations sont attribuées aux périodes du Trias et du Lias (-250 millions d'années (Ma)).
 - des dépôts sédimentaires gréseux et calcaires d'âge Crétacé (autour de -100 Ma) et jurassiques (entre -150 et -200 Ma) figurés en bleu foncé sur la Figure 7.
 - des dépôts gréseux récents d'époque Néogène (-5 Ma) et Quaternaire (entre -300 000 et -3000 ans) représentés en jaune sur la Figure 7.

L'ensemble de ces terrains ont été recoupés par des formations d'origine volcanique (en rouge sur la Figure 7) qui sont dans certaines zones à l'origine de la formation de reliefs conséquents comme ceux que l'on trouve dans le nord de l'Androy ou à

l'origine de « filons » de roches dures qui sont bien visibles lorsqu'ils viennent recouper les pistes.

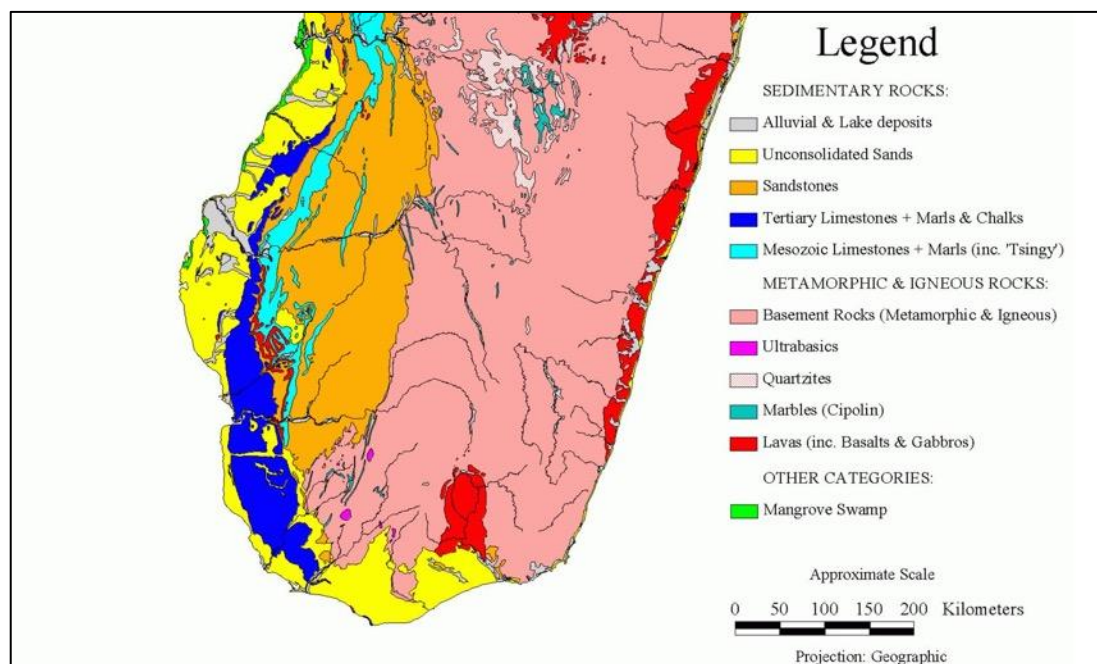


Figure 7 : Extrait de la carte géologique simplifiée de Moat et Dupuis (1997) d'après Besairie, (1964)

2.3.2. Structure géologique des zones étudiées.

2.3.2.1. Projet Zoloke et Sohavelo (Annexe 2, Annexe 3, Annexe 4)

Ces deux zones d'intervention de l'ONG AVSF sont situées à l'extrême sud de Madagascar. Les villages visités sont compris dans une zone située globalement à l'est du Cap Sainte-Marie, point le plus méridional de l'île, et à l'ouest de l'embouchure du Mandrare (Figure 1 et Figure 3). Cette zone est relativement « homogène » d'un point de vue géologique. On y trouve deux entités parmi celles décrites précédemment. Les terrains récents d'âge Néogène et Quaternaire et les terrains métamorphiques anciens du socle. Le socle affleure au nord des zones visitées et a pu être observé à Behara ainsi qu'à Tsihombe (Figure 8) et dans sa région (éperon de Tsihombe nom donné à l'apparence cartographique de la zone d'affleurement du socle dans cette région (Figure 9)). Les affleurements observés correspondaient principalement à des gneiss massifs où aux produits d'érosion de ces roches.



Figure 8 : Affleurements du socle cristallin, gneiss à Tsihombe à gauche et à Behara à droite. © A.Charmoille

Le socle est recouvert par les dépôts gréseux néogènes dont les propriétés intéressantes du point de vue de la ressource en eau sont citées de manière récurrente dans la bibliographie (*Besairie, H et Abadie, 1939 ; Batistini, 1964*).

Viennent ensuite les dépôts quaternaires dunaires qui sont généralement divisés en trois ensembles :

- une accumulation dunaire ancienne dite « Grande Dune » de l'Aepyornien ancien (période géologique caractérisée par la présence de nombreux fossiles d'Aepyornis, oiseaux géants de la famille des autruches aujourd'hui disparus dont on retrouve aujourd'hui fréquemment les restes d'œufs Figure 10) (figuré n°3 sur Figure 9) ;
- la dune dite Karimbolienne (figuré n°5 sur Figure 9) ;
- et enfin les dunes Flandriennes, les plus récentes, non fixées présentes à proximité directe du littoral (figuré n°4 sur Figure 9).

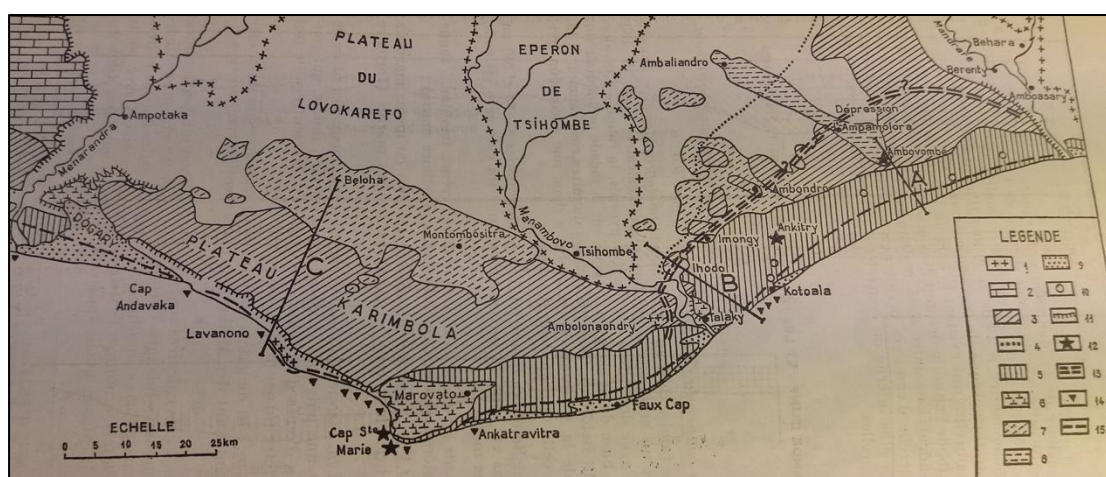


Figure 9 : Vue resserrée des dépôts géologiques récents du littoral Sud de Madagascar entre la vallée de la Menarandra et du Mandrara (*Batistini, 1964*).



Figure 10 : Œuf d'Aepyornis reconstitué, route de Faux Cap © A.Charmoille

L'ensemble est recouvert de sables roux remaniés, produits tantôt de l'érosion éolienne, tantôt fluviales ou les deux qui viennent masquer la plupart des contacts géologiques et terrains sous-jacents. On observe également ponctuellement des dépôts de sables blancs qui auraient, eux, une origine lacustre à Beloha et Ambovombe (Figuré 7 sur Figure 9).

La coupe géologique présentée en (Annexe 1) montre la structuration géologique de la région au sud d'Amboasary (dans la zone du projet Zoloke), le socle avec les grès néogènes reposant directement sur le socle eux mêmes recouverts par les sables roux.

En se dirigeant vers l'ouest à la hauteur des villages de Sampona, les terrains quaternaires prennent de l'épaisseur et forment les reliefs de bord de mer. Les dépôts sont principalement des sables consolidés avec des intercalations calcaires et gréseuses. Cette configuration se prolonge jusque dans la région de Tsihombe et correspond à la structure présentée en Figure 6. Le bourrelet de dépôts sableux accumulé par le vent peut atteindre plus de 200 m d'épaisseur. On y trouve des intercalaires calcaires (Figure 11) au niveau desquels lorsqu'ils sont à l'affleurement peuvent exister des citernes naturelles créées par l'action de dissolution des eaux de pluie. Ces structures appelées « ranovato » sont utilisées par la population comme source d'eaux potables depuis des générations.



Figure 11 : Ranovato (citernes naturelles) dans blanc calcaires (© Marion Rivera)

La coupe Figure 12 permet de distinguer les différentes dunes décrites précédemment (hachures verticales et obliques), qui se sont accumulées à différentes époques. Les plus récentes chevauchant les plus anciennes (Figure 9 et Figure 12).

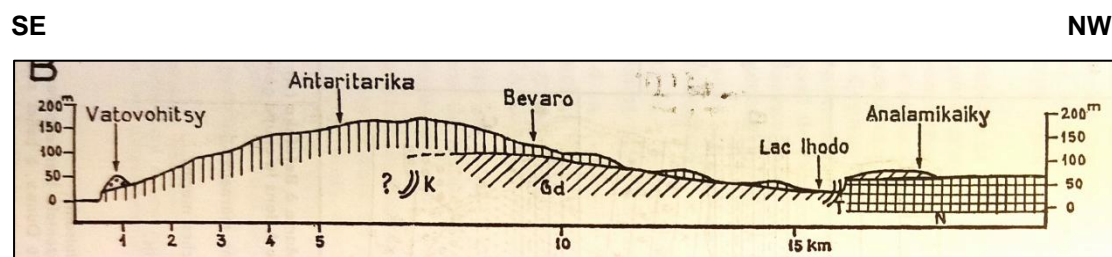


Figure 12 : Coupe B localisée sur (Figure 9) (Batistini, 1964)

La Figure 12 montre également le point maximal d'extension de la ligne du rivage qui a précédé le dépôt des dunes, actuel emplacement du lac salé Ihodo. On observe au NW l'extension de cette ancienne côte qui a correspondu à une phase d'érosion notamment des grès néogènes (figuré quadrillage sur Figure 12). Cette discontinuité géologique aura son importance lorsque nous nous intéresserons au fonctionnement hydrogéologique de ces secteurs. La dépression formée par cette ancienne zone de rivage correspond à la localisation actuelle du lac Ihodo au sud-est de Tsihombe. A la hauteur de Tsihombe, le Néogène est absent et les dunes viennent reposer directement sur le socle (Figure 9).

La coupe présentée Figure 13 réalisée selon la direction nord-sud montre la disposition de ces terrains au niveau d'Ambovombe. On retrouve le socle cristallin recouvert par les grès néogène (en violet) eux mêmes recouverts à proximité de la côte par les dunes consolidées (d1) qui forment un relief littoral (Figure 6). Cette configuration peut être transposée au village de Sampona qui est un des villages d'intervention du projet Zoloke. Sur le terrain lorsque l'on chemine de Sampona

VERSION PROJET

jusqu'à la côte (flèche rouge sur Figure 13), on traverse successivement les sables roux présents au niveau du village, les dunes anciennes fixées et les dunes récentes (voir succession des terrains à l'affleurement sur Figure 13). La transition entre ces deux dunes est bien visible sur la photo (A) de la Figure 14. A droite, peu végétalisées, on observe les dunes récentes et à gauche, colonisées par la végétation, on observe la dune fixée ancienne. Les fossiles présents et notamment la coquille de *Clavator* (photo B sur Figure 14) permettent d'identifier la dune karimbolienne fixée.

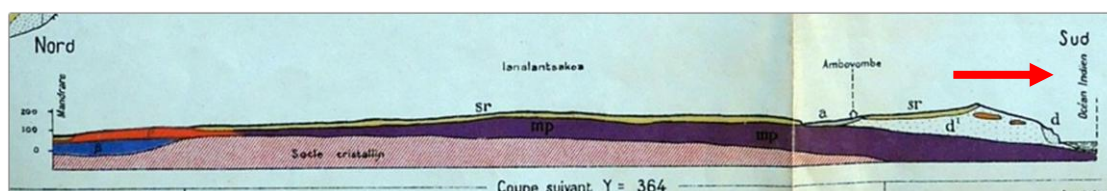


Figure 13 : Coupe géologique Nord-Sud réalisée au niveau d'Ambovobe (Baisairie et Abadie, 1939)



Figure 14 : A gauche transition entre les dunes vives et les dunes grésifiées (d et d1 sur Figure 13) / A droite fossile de *Clavator* © A. Charmoille

2.3.2.2. Projet Fanantenana (Annexe 5, Annexe 6)

La zone d'intervention du projet Fanantenana s'étend d'Ejeda à Betioky en passant par Beathiste. Les villages visités lors de la mission d'avril 2016 se localisent dans une zone de transition géologique qui rend l'identification du contexte des différents villages complexe. En se dirigeant vers le nord-ouest depuis l'extrême sud apparaissent progressivement les terrains d'âge crétacé et jurassique. Ils se sont déposés sur le socle cristallin. Les grès néogènes sont encore présents mais cette fois ils se sont déposés dans le bassin formé par la zone de transition entre le socle et les terrains sédimentaires. Ils forment une zone d'accumulation qui vient buter contre le plateau Mahafaly constitué par les calcaires éocènes. Cette caractéristique est bien visible au niveau de la Figure 15. On observe les calcaires éocènes à l'ouest qui pendent en direction de la mer, le socle cristallin à l'est et les terrains gréseux néogènes qui se sont déposés à la transition entre ces deux types de formation. Cette configuration se prolonge jusqu'au nord de Beahitse. Avec des dépôts néogène qui peuvent être absents ou plus ou moins épais suivants les secteurs considérés.

VERSION PROJET

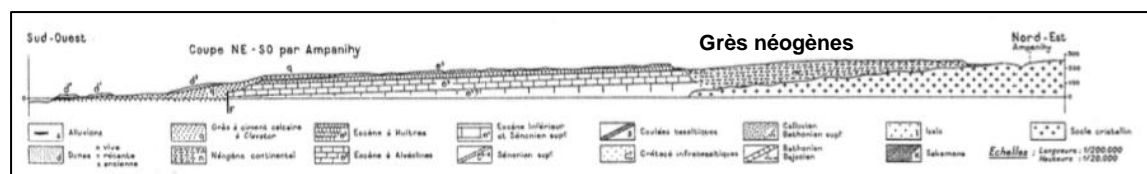


Figure 15 : Coupe géologique réalisée selon la direction SO-NE passant par Ampanihy (Guyot, 2002 d'après Aurouze 1957)

Au-delà et jusqu'à Betioky, le socle laisse place aux terrains sédimentaires de l'Isalo et à la formation de Sakamena (terrains situés à l'est et notés K sur la coupe Figure 16) qui sont en continuité avec les dépôts jurassiques, crétacés puis éocènes comme le montre la coupe réalisée à la latitude de Betioky en Figure 16.

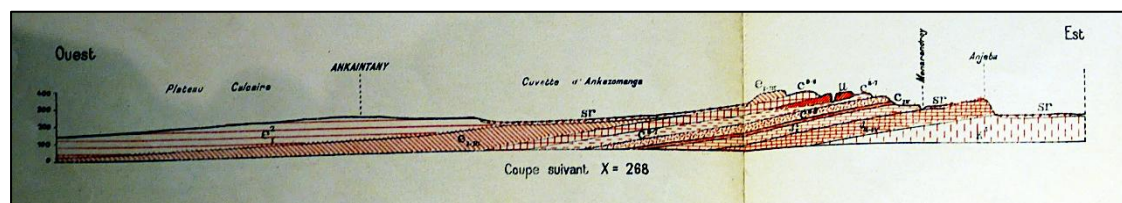


Figure 16 : Coupe géologique Est-Ouest à hauteur de Betioky (Extrait carte géologique Aurouze 1957)

Dans ce secteur et notamment à la hauteur des villages de Befaha, les terrains gréseux néogènes se retrouvent de nouveau dans la zone de transition et peuvent atteindre des épaisseurs importantes. Ils forment des buttes bien visibles dans le paysage (Figure 17).



Figure 17 : Butte témoin au Sud d'Ambatry constituée de grès néogènes reposant sur la formation de Sakamena © A.Charmoille

Leur sommet est constitué par une ancienne cuirasse ferrugineuse qui subsiste et marque le sommet des buttes témoins. Cette cuirasse est riche en minerais de fer et un repère lithologique intéressant pour se localiser géologiquement.



Figure 18 : Cuirasse ferrugineuse observable au niveau du village d'Ambatomainty © A.Charmoille.

Comme pour les districts de Tsihombe et Amboasary, l'ensemble est le plus souvent recouvert de sable roux qui masquent les terrains sous-jacents mais peuvent avoir un intérêt du point de vue de la ressource en eau. Cette formation est facilement cartographiable est bien délimitée sur les cartes géologiques du sud de Madagascar comme présenté Figure 19, où les terrains gréseux néogènes sont représentés en violet.

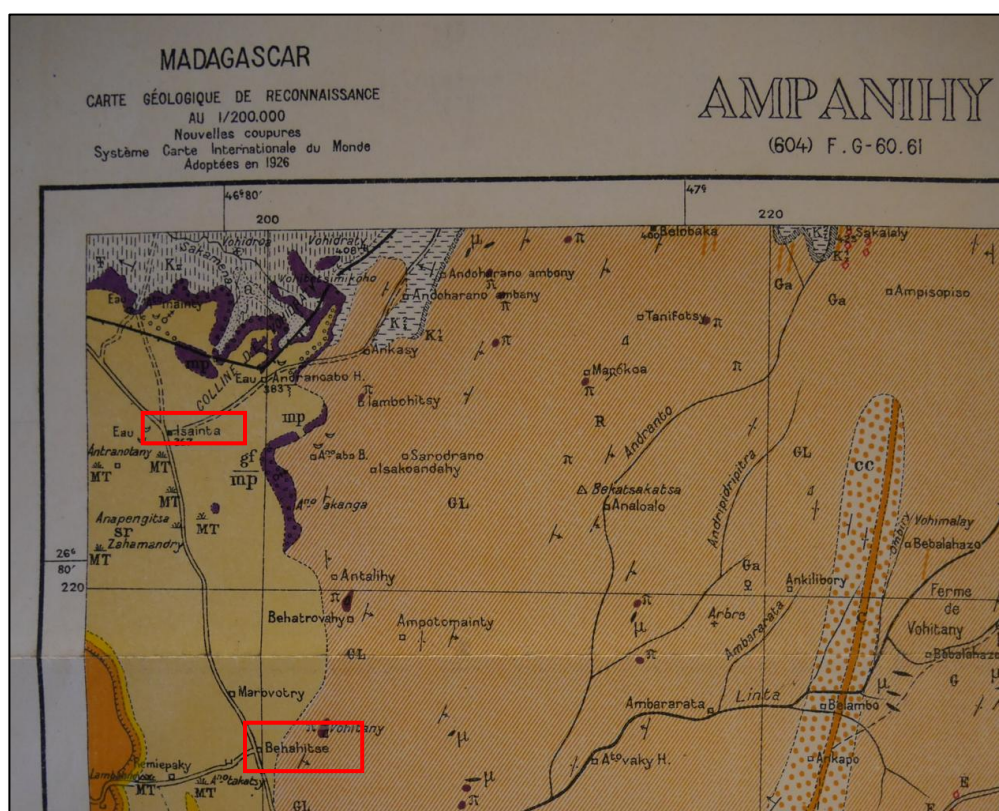


Figure 19 : Extrait de la carte géologique d'Ampanihiy dans la région de Beahitse. La bordure des terrains néogènes ferrugineux apparaît en violet. Il apparaît clairement que ces terrains reposent sur le socle au sud et sur les formations du Karoo au nord (Grès Isalo et Sakamena). Echelle : 20 km entre chaque ligne de quadrillage. (Baisairie et Abadie, 1938)

3. Hydrologie et hydrogéologie

3.1. Rappels hydrogéologiques succincts

Une roche va être en mesure de présenter des propriétés aquifères, c'est-à-dire d'accumuler de l'eau et d'être en mesure de la restituer si elle est dotée d'une perméabilité suffisante. La perméabilité d'une roche correspond à sa capacité à laisser circuler l'eau, lorsqu'elle est soumise à un gradient de pression. La perméabilité découle de la porosité du matériau, paramètre qui représente la somme des interstices de la roche pouvant contenir de l'eau. La porosité qui va le plus influencer sur la perméabilité de la roche correspond à celle des pores ou interstices qui vont être connectés entre eux de manière continue et permettre au fluide de circuler. La perméabilité d'une roche va donc être intimement liée aux caractéristiques de sa porosité : taille des pores, degré de connexion entre eux, remplissage des interstices par des matériaux étrangers. On distingue deux grands types de porosité (et donc de perméabilité) dont la nature va dépendre de la genèse des vides.

3.1.1. Porosité d'interstices

Elle est liée aux vides constitués par l'espace inter-granulaire, c'est-à-dire présent entre les grains constituant la roche. On retrouve ce type de perméabilité dans les roches constituées de galets, graviers, sables etc. Concernant la région du « Grand Sud » ce type de porosité concerne les sables roux et blanc, les dépôts d'origine fluviale et notamment les zones de dépôts alluvionnaires formées par les différents fleuves ainsi que les différents grès dont la valeur de porosité va dépendre de leur teneur en argiles.

3.1.2. Porosité de fissure

Au cours de l'histoire géologique, les déformations qui affectent la croûte terrestre (d'origine tectonique, thermique, etc.) induisent la création de nombreuses fissures et fractures au sein des matériaux rocheux. Ce sont ces espaces qui constituent la porosité dite de fissure. Ces fissures peuvent être élargies par des processus chimiques de dissolution lors de la circulation des eaux d'infiltration. Ce processus intervient notamment dans les roches calcaires et est à l'origine de la formation des grottes. Ce type de formations a pour effet d'accélérer fortement les circulations d'eau et de ne pas la maintenir à proximité de la surface. Dans la région étudiée, ce type de porosité va se retrouver dans les terrains du socle où l'eau va circuler exclusivement dans les fractures ou fissures et dans les terrains calcaires de l'Eocène constituant le plateau Mahafaly.

Il est important de noter que les deux types de porosité qui viennent d'être décrits peuvent affecter un même matériau rocheux. On parlera alors de milieu à double perméabilité qui se retrouve dans les formations gréseuses, d'où leur intérêt en terme de ressource en eau.

Enfin, suivant le mode de circulation majoritaire de l'eau au sein d'un même aquifère, on parlera alors respectivement d'aquifère à porosité d'interstices ou d'aquifères à porosité de fissures.

3.2. Etat de l'art hydrogéologique du « Grand Sud »

3.2.1. Accès à l'eau

L'eau étant une denrée rare dans le Grand Sud, les populations sont contraintes d'utiliser différentes variétés de ressources. L'alimentation en eau passe donc par l'utilisation :

- de l'eau de pluie, ressource la plus rare, elle est « *considérée comme une bénédiction divine donc elle est sacrée* » (UNICEF, 2011). Elle est l'eau préférée du fait de son caractère divin. Cette eau peut être captée à l'échelle de certaines habitations, dont les toitures sont connectées à des citernes de stockage, dans des mares naturelles qui se forment en surface à la saison des pluies et s'assèchent plus ou moins rapidement à la saison sèche ou en puisant des ranovatos (Figure 11).

Dans certains villages existent également des impluviums destinés à collecter l'eau de pluie sur des surfaces au sol imperméabilisées et connectées à des cuves de stockage. Il s'agit d'infrastructures assez lourdes difficiles à entretenir avec un rendement coût-bénéfice très faible.

- les vovos, trous profonds de quelques mètres permettant d'accéder à la nappe phréatique. Ces vovos sont des ouvrages temporaires recreusés régulièrement. Ce caractère temporaire a probablement été adopté pour s'adapter aux très fortes variations de minéralisation et de débit au cours du temps. Ainsi, si la salinité d'un puits augmente ou que son débit diminue on l'abandonne pour en creuser un autre. Dans les villages, les populations locales ne se lancent pas dans la réalisation de puits importants, investissement qui serait trop important par rapport à la durée de vie de l'ouvrage, mais se limitent à l'exploitation de quelques vovos, en plus des points d'eau naturels (sources, mares...).
- les installations datant de l'époque coloniale et celles construites plus récemment par les ONG. Il s'agit de puits et de forages. Certains très anciens sont toujours utilisés.

A noter que certains villages pouvant représenter une population totale de quelques milliers d'habitants ne possèdent pas d'accès à l'eau. Certaines populations parcourent chaque jour plusieurs dizaines de kilomètres pour s'approvisionner, ce qui ne laisse que peu de temps pour réaliser d'autres tâches. Si elles ne peuvent le faire elles achètent l'eau à des personnes qui transportent de grand volumes. Le plus souvent dans ces cas de figure les dépenses liées à l'eau ne permettent pas à une famille d'avoir un budget équilibré.

3.2.2. Diagnostic hydrogéologique

Les sécheresses sont un phénomène récurrent dans la région. Lorsqu'elles s'accumulent d'une année sur l'autre, elles ne permettent plus aux populations de passer les périodes de soudure en autonomie alimentaire, il en résulte des famines (Kere) récurrentes (5 fois entre 1968 et 1999) dans l'extrême sud. La plus dure de la période récente a eu lieu en 1990 et aurait fait au minimum 200 morts (ANDEA, 2003).

Avec toujours pour objectif d'améliorer cette situation d'insécurité alimentaire, un certain nombre d'auteurs ont travaillé sur l'hydrogéologie du Grand Sud à l'échelle régionale (Aurouze, 1959, Guyot 2002, ANDEA, 2003 ; Rabemanana et al., 2005). Des projets ont également été réalisés à une échelle plus locale pour l'alimentation

en eau potable (AEP) de villages ou fokontany¹. Tous ces travaux ont été principalement financés par le PNUD (Programme de Nations Unies pour le Développement) et la banque mondiale. Ils constituent une base de travail qui permet de se faire une idée du fonctionnement hydrogéologique local et régional des différentes régions du Grand Sud (JICA, 2006 ; TMD, 2011).

Il ressort de ces études que mis à part pour quelques aquifères d'échelle régionale (aquifère calcaire éocène, socle cristallin), la plupart des ressources en eaux identifiées sont seulement en mesure de fournir de faibles débits (ANDEA, 2003).

S'ajoute à cette faible disponibilité de la ressource des problèmes de qualité. Suite à la famine de 1990-1991, l'UNICEF a financé un vaste programme de forages. Sur les deux cents forages réalisés dans la zone couverte par le socle cristallin (partie nord de la région qui nous intéresse), 25% étaient trop salés pour la consommation humaine. Les conductivités électriques mesurées dans ces forages sont présentées Figure 20 (Rabemanana et al., 2005). En Europe, la limite de potabilité est fixée à $1000 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$. L'application de cette limite au sud de Madagascar rendrait la plupart des eaux non potables. La valeur recommandée par l'OMS est de $1000 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$. Comme le fait remarquer Guyot en 2002, aucun point d'eau de la plaine littorale ne fournit une eau respectant cette valeur limite. Dans certaines zones, les populations consomment des eaux avec une minéralisation qui dépasse de plus de 10 fois cette valeur. Lors de la mission nous avons pu mesurer à Benonoke dans le district de Tsihombe une conductivité électrique d'environ $37 \text{ ms}.\text{cm}^{-1}$ pour une mesure réalisée dans l'eau consommée par la population ce qui représente une salinité autour des $13 \text{ g}.\text{L}^{-1}$ de sel.

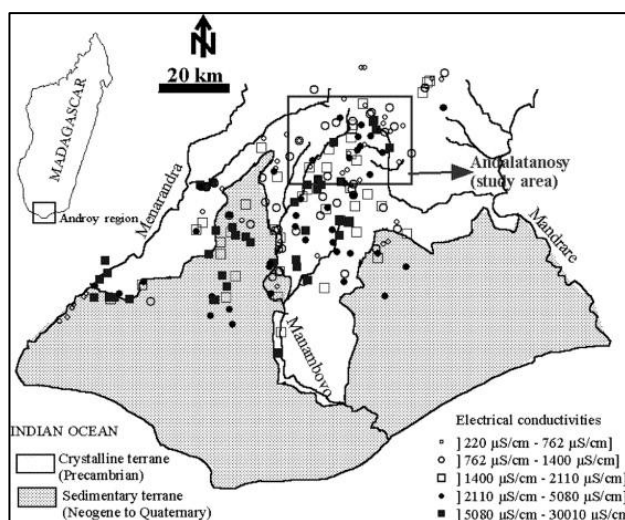


Figure 20 : Conductivités mesurées dans 217 forages à la surface des bassins versant de la Menarandra, du Manambovo et du Mandrare (Rabemanana et al., 2005)

Rabemanana (2005) a mis en évidence une corrélation assez forte entre les zones de faibles débits et la minéralisation pour les eaux drainant le socle cristallin. La situation décrite dans la bibliographie ne laisse donc pas présager un accès à l'eau potable aisé tant du point de vue de la qualité que de la quantité. S'ajoute à ces difficultés la faiblesse des voies de communication qui compliquent la réalisation de travaux importants tant en termes d'investigations que de travaux. Cependant si l'on considère la problématique de l'alimentation en eau à l'échelle de parcelles de

¹ Un fokontany, à l'origine, est un village traditionnel malgache. Il est aujourd'hui une subdivision administrative de base malgache. Il comprend soit des hameaux, des villages, des secteurs ou des quartiers (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fokontany>)

maraîchage ou d'alimentation en eau de petits groupes de populations, ce qui correspond aux besoins d'AVSF dans ses zones d'intervention, des ressources locales peuvent être envisagées si leur exploitation reste raisonnée. Ce sont ces ressources et leurs modalités d'accès que nous allons d'abord nous attacher à caractériser, décrire puis localiser.

3.2.3. Aquifères en présence et méthodes d'exploitation

3.2.3.1. La nappe générale et le socle

Les auteurs admettent que l'on peut considérer l'existence d'une nappe générale cohérente en termes de niveau piézométrique (surface de la nappe d'eau dans les terrains) dans toute la région sud de Madagascar. Cette nappe s'écoule vers le sud et traverse du nord au sud depuis l'intérieur des terres jusqu'à la côte :

- d'abord les terrains du socle cristallin ou du sédimentaire ancien (Grès de l'Isalo) ;
- les calcaires crétacés ;
- et enfin les dépôts quaternaires (Figure 9) de la bande côtière.

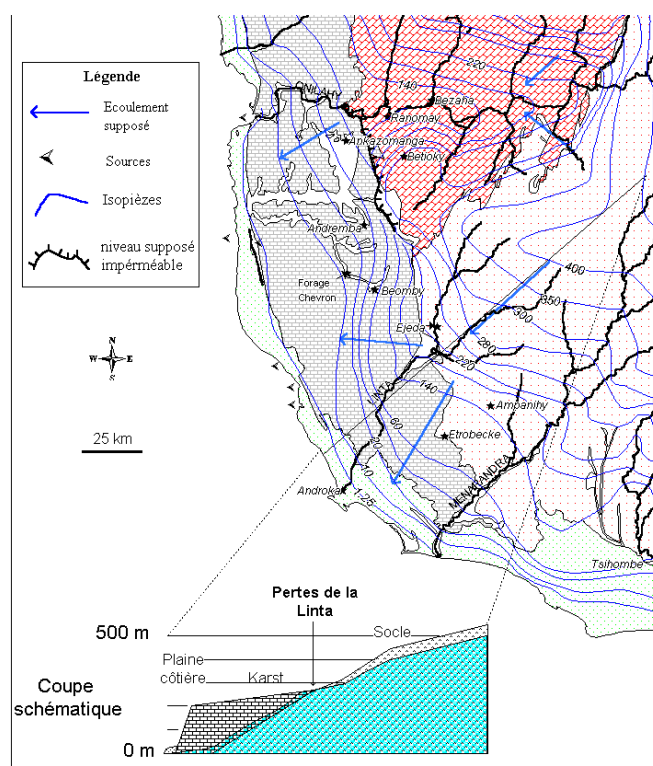


Figure 21 : Carte piézométrique schématique de la nappe générale (Guyot, 2002 après Bergeron)

La surface piézométrique passe d'une cote d'environ 400 à 500 m à l'amont du bassin versant de la Linta pour rejoindre le niveau de la mer sur le littoral. Dans la zone du socle l'écoulement de l'eau se fait à la faveur des fractures. On note, comme représenté sur la coupe présentée en Figure 22, une variation importante du gradient hydraulique (pente de la nappe) lors de la transition du socle cristallin aux terrains sédimentaires plus récents. Ceci est plus marqué au nord-ouest qu'au sud du fait de la forte perméabilité des dépôts calcaires crétacés du plateau Mahafaly en

comparaison de la perméabilité du socle. Il en résulte un abaissement important du niveau piézométrique, plus modéré dans les terrains néogènes et quaternaires. Cet abaissement de la surface piézométrique a pour conséquence un approfondissement de la surface de la nappe, ce qui signifie une difficulté d'accès accrue à la ressource en eau. La profondeur de la nappe principale a été cartographiée par ANDEA en 2003 comme représenté en Figure 22. Dans les régions aux couleurs chaudes l'accès à la nappe principale n'est pas aisé. On remarque que la région de Tsihombe (plateau Karimbola) et l'ouest de la région d'Amboasary (Sampona notamment) sont concernés par cet approfondissement de la nappe principale.

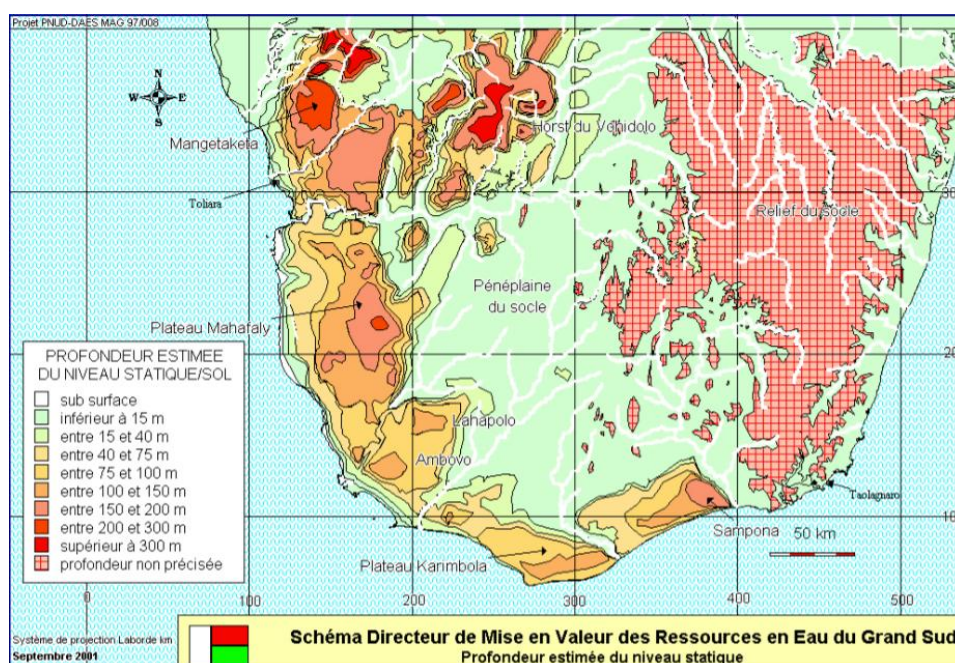


Figure 22 : Profondeur de la surface piézométrique par rapport à la surface du sol.

3.2.3.2. Les nappes alluviales et les sous-écoulements fluviaux

Les matériaux géologiques charriés par les cours d'eau sont à l'origine de la formation de dépôts alluvionnaires formés par des sables, galets, des matériaux argileux, qui se déposent au cours du temps aux abords de ces derniers au gré des déplacements des cours d'eau. Les rives des fleuves Mandrare, Manambovo et Linta sont donc le siège de nappes alluviales qui peuvent être des ressources en eaux intéressantes.

Ajouté à ces nappes alluviales, bien que la plupart des cours d'eau de la région aient un régime d'oued et ne présentent plus d'écoulement en surface en saison sèche, un écoulement sous-terrain se maintient à faible profondeur dans le lit des cours d'eau. Ce sous écoulement ainsi que les aquifères alluviaux sont fréquemment exploités comme ressource en eau potable. Cette exploitation se décline de deux manières différentes :

- des installations lourdes peu répandues :
 - à Amboasary en plus de forages dans la nappe alluviale, aujourd'hui semble-t-il abandonnés, une installation de captage équipée de pompes, de bassins de décantation et d'une centrale de traitement de

l'eau, capte par l'intermédiaire de drains le sous écoulement du Mandrare pour alimenter Amboasary en eau de consommation (Figure 23) ;



Figure 23 : Puits de captage du sous-écoulement du Mandrare (en arrière-plan) géré par la Jirama et alimentant Amboasary

- un dispositif similaire a été installé dans le sous-écoulement de la rivière Menarandra. Ce captage alimente une conduite qui achemine l'eau jusqu'à Tsihombe sur une distance de 120 km. A Tsihombe l'eau en provenance de ce captage est en vente 200 Ar/litre ;
- à Tsihombe, la Jirama exploite également un forage qui capte l'aquifère alluvial du Manambovo pour alimenter en eau la ville. Ce forage se situe en rive gauche de la rivière.
- *une exploitation de type traditionnelle (la plus répandue) :*
 - les aquifères alluviaux sont le plus souvent exploités par l'intermédiaire de vovo (puits traditionnels). Ces puits sont creusés à la main et le puisage se fait également la plupart du temps manuellement directement à la surface de l'eau. Pour les plus profonds, l'accès à la surface piézométrique se fait par l'intermédiaire d'une rampe (Figure 24). Lorsque la tenue des terrains n'est pas suffisante un système de puisage avec un seau et une corde peut être mis en place. Il n'est pas rare que le bétail ou la population marchent dans l'eau du puits en venant puiser l'eau. Ces vovo ne concernent pas que les nappes alluviales mais l'ensemble des nappes situées à faible profondeur.



Figure 24 : Vovos traditionnels proches d'Amboasary © A.Charmoille

- à la saison sèche le lit des rivières fait également l'objet d'une activité de puisage traditionnel intense. Les habitants viennent creuser des trous pour accéder au sous-écoulement des cours d'eau. Les trous qui sont recreusés chaque jour et s'approfondissent avec l'avancement de la saison sèche sont utilisés de manière indifférenciée pour laver le linge, abreuver le bétail, s'alimenter en eau de boisson et se laver (photo de couverture : Le Manambovo à Tsihombe). Cette pratique est particulièrement répandue dans le cours du Manambovo, et du Mandrare et du Menarandroy (ouest Tsihombe). L'ensemble de ces pratiques a probablement un impact important sur la qualité de l'eau, déjà médiocre du fait de sa minéralisation importante.

Ces réserves sont relativement sous-exploitées si l'on raisonne en termes de mise à disposition de la population. Elles pourraient constituer des ressources intéressantes, elles ne font actuellement pas l'objet d'une exploitation moderne, raisonnée et intégrée.

3.2.3.3. *Aquifères de la bande côtière*

Les principales ressources en eau de ces dépôts sont constituées par :

- la nappe des grès néogènes,
- quelques aquifères perchés liés à des dépôts argileux imperméables qui bloquent la circulation verticale des eaux d'infiltration, les nappes sont bien développées lorsque que l'on est en présence de sable surmontant les niveaux argileux, sables blancs et sables roux dans une moindre mesure ;
- le prolongement en profondeur de la nappe principale qui se rapproche de la surface à proximité du rivage.
- l'aquifère du cordon dunaire le plus récent, désigné sous le terme de dunes vives. Il s'agit d'une ressource non négligeable très utilisée dans les régions proches de la mer. *Guyot en 2002* a montré que l'infiltration était favorisée dans les dunes les plus récentes du fait de leur bonne perméabilité comparée aux dunes anciennes qui se sont progressivement imperméabilisées. Une couche d'eau douce vient surmonter l'eau salée en provenance de la mer qui

s'infiltre dans les terrains. Cette couche d'eau douce est maintenue en surface et ne s'écoule pas vers la mer du fait de sa faible densité comparée à l'eau salée et l'action conjugué de l'onde bi-journalière des marées qui la repousse sans cesse vers l'intérieur des terres. Un stock d'eau « douce » relativement important est donc disponible à proximité directe de la mer. Cette réserve constitue pour certains villages côtiers comme Faux Cap une ressource en eau de premier ordre.



Figure 25 : Puits réalisés dans les années 1940 captant l'aquifère d'eau « douce » des dunes vives à Faux cap. Les ouvrages regroupés dans une zone basse du cordon dunaire de dunes vives sont au nombre de 5 et localisés à 100 mètres de la mer. © A.Charmoille

L'eau extraite de ces puits n'est pas à proprement parler douce, étant donné sa proximité avec la mer. Cependant sa salinité comparable aux autres ressources et la facilité d'accès aux points d'eau fait de ces puits, des points d'accès à l'eau très prisés des habitants. A Faux Cap, 4000 à 5000 personnes s'alimentent en eau à partir du groupe de puits représenté en Figure 25. La principale difficulté dans la gestion de ces puits est liée à leur ensablement régulier par le vent.

3.2.3.4. Aquifères d'altérite.

Les roches constituant le socle s'altèrent sous l'action chimique et mécanique de l'eau et des autres agents d'altération atmosphérique. La zone micro fracturée qui constitue la surface du socle va progressivement produire une nouvelle formation géologique constituée principalement de sables et d'argiles. Ces formations peuvent contenir de l'eau (Figure 26). Le contraste de perméabilité entre les produits d'altération du socle (milieu à perméabilité d'interstices) et le socle à perméabilité de fracture, moins perméable, permet la formation d'une réserve d'eau souterraine proches de la surface facilement exploitables. Ces nappes d'eau souterraine sont alimentées par les précipitations et les arrivées d'eau provenant des fractures du socle qui dans le contexte du sud de Madagascar peuvent être la source de minéralisation de l'eau.

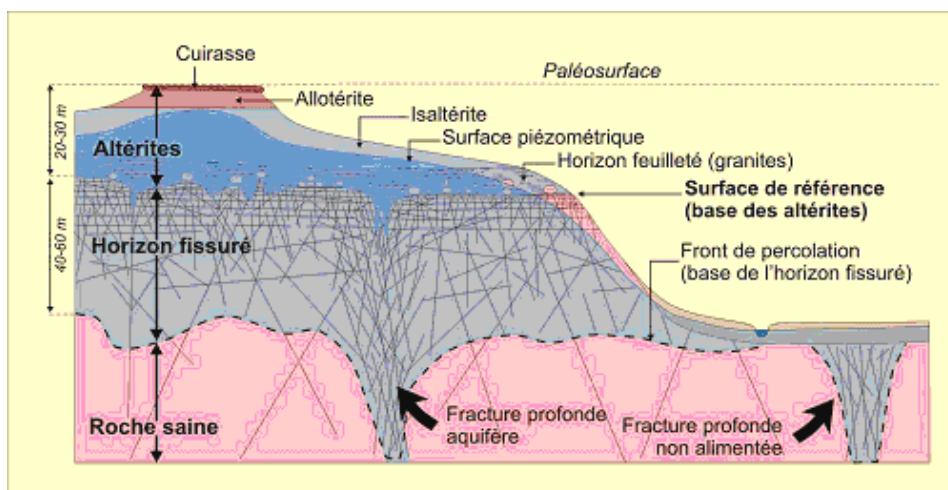


Figure 26 : Schéma conceptuel d'un système aquifère de socle (Lachassagne et Wyns, 2005)

3.3. Investigations complémentaires réalisées, résultats et interprétations

3.3.1. Analyses en éléments majeurs

Durant la mission de terrain d'avril 2016, un certain nombre de mesures ont été réalisées *in situ*, du 12/04/2016 au 21/04/2016. Pour chaque point d'eau visité (81 au total Annexe 7), il a été pris une mesure de la température, de la conductivité électrique de l'eau et du pH. Ces mesures ont été faites avec une sonde multi-paramètres Hanna 9828. Nous entendons par points d'eau, des ouvrages d'accès à l'eau : puits, vovo, trous d'eau, forages mais également des points d'eau naturels : cours d'eau, mares temporaires, rares sources utilisés par la population comme ressource en eau mais également des points d'eau non utilisés comme ressource mais nous permettant de caractériser les aquifères existants.

Pour certains des points mesurés, un échantillon d'eau a été prélevé. Au total 11 prélèvements ont été effectués sur l'ensemble des trois projets AVSF. Ces échantillons ont été analysés en France. Leur composition en ions majeurs (anions et cations) a été mesurée (Tableau 1), ainsi que celle de certains ions mineurs (Tableau 2), les éléments suivants ont été analysés : F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} et la silice.

La concentration en ions majeurs bicarbonates (HCO_3^-) n'a quant à elle pas été analysée. En effet, le dosage de cet ion nécessite d'être réalisé dans les 24 heures suivant le prélèvement. Si ce délai n'est pas respecté, la concentration obtenue n'est plus représentative de la concentration réelle de l'échantillon. Les teneurs des eaux en HCO_3^- ont cependant pu être recalculées à l'aide du logiciel PHREEQC en équilibrant la balance ionique de chaque échantillon. Il conviendra donc de manipuler les concentrations en HCO_3^- avec prudence.

Deux analyses d'eau viennent compléter les analyses faites sur les prélèvements effectués durant la mission, il s'agit d'analyses réalisées par la Jirama sur les captages d'alimentation en eau d'Amboasary et de Tsihombe. Ces analyses sont moins complètes que celles réalisées par nos soins et ne comprennent pas l'analyse des ions Sr^{2+} , Br^- ni d'analyse de la Silice. Les concentrations mesurées pour les différents éléments sont présentés dans le (Tableau 1 :)

VERSION PROJET

Tableau 1 : Paramètres physico chimiques mesurés et concentrations en éléments majeurs mesurées pour les 9 prélèvements effectués *in situ* et les deux analyses obtenues auprès de la Jirama

Nom échantillon	Temp (°C)	pH	Cond (us.cm-1)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg.L ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg.L ⁻¹)	K ⁺ (mg.L ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg.L ⁻¹)	Na ⁺ (mg.L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	Si (mg.L ⁻¹)
Captage Amboasary	21,1	7,6	2470,0	658,5	0,0	246,7	196,0	-	71,9	305,6	379,4	-
Captage Tsihombe	20,2	8,4	3519,0	984,1	2,9	144,1	134,0	-	137,3	392,5	295,2	-
F1 (Imongy)	26,6	7,7	1136,0	216,0	4,3	16,7	93,7	34,8	29,5	83,4	309,0	13,4
F2 (Ankasy)	29,2	7,3	2540,0	509,3	0,7	192,4	85,8	12,5	79,4	301,5	355,0	22,6
F3 (Beantake)	27,8	7,3	743,0	158,2	2,1	26,2	20,3	7,2	7,0	111,8	95,0	45,6
M1 (Behoake)	24,8	7,4	22550,0	7977,4	14,8	1076,2	822,6	62,0	1146,9	2741,7	491,0	43,1
Mer Faux Cap	-	-	-	20272,5	0,0	2714,8	399,0	399,2	1294,3	10354,8	0,0	0,0
P1 (Ankara)	27,3	7,3	1830,0	291,3	2,6	52,7	36,9	16,2	24,9	313,4	515,0	23,7
P2 (Behara)	28,4	-	935,0	81,8	0,0	15,2	75,1	2,7	38,8	72,7	455,0	12,6
P3 (Faux Cap)	26,9	8,2	4372,0	1182,2	52,2	174,5	49,1	56,3	81,2	623,5	0,0	4,8
P4 (Befaha)	27,5	8,3	811,0	75,2	13,0	20,7	48,4	5,3	15,6	119,0	377,0	35,0
R1 (Affluent)	26,5	7,4	23490,0	5603,0	0,0	866,7	452,3	39,8	673,3	2350,2	293,0	0,3

Tableau 2 : Composition en ions mineurs Bromures, Strontium et silices des échantillons prélevés en mg.L⁻¹

Nom échantillon	Br ⁻	Sr ²⁺	Si
P2 (Behara)	0,4	0,5	12,6
P4 (Befaha)	0,3	0,7	35,0
F3 (Beantake)	0,4	0,2	45,6
F1 (Imongy)	1,0	1,0	13,4
P1 (Ankara)	1,0	0,8	23,7
F2 (Ankasy)	1,2	1,2	22,6
P3 (Faux Cap)	4,1	1,1	4,8
M1 (Behoake)	27,0	5,1	43,1
R1 (Affluent)	19,2	5,0	0,3
Mer Faux Cap	71,9	7,3	0,0

L'interprétation de ces résultats d'analyses va nous permettre d'identifier les différentes ressources en présence, la composition chimique des différentes eaux va également nous renseigner sur l'origine de la salinité de certains points ainsi que sur l'origine de l'eau. Cette méthode d'expertise hydrochimique est désignée sous le terme de « traçage naturel » car elle permet de remonter en partie à l'origine de la circulation d'eau et d'identifier certains événements qui ont affecté son cheminement dans le sous-sol.

3.3.2. Les points de prélèvement

Avant d'aller plus loin dans la description et l'interprétation des résultats nous allons décrire brièvement les différents points de prélèvement. Il s'agit, parmi les 81 points d'eau visités durant la mission, de ceux choisis pour faire l'objet d'un prélèvement et d'une analyse chimique. Ces points n'ont pas fait l'objet d'un plan de prélèvement établi au préalable. Ils ont été choisis au cours de l'avancement de la mission en fonction des observations effectuées afin de disposer d'échantillons couvrant la plus grande variété possible de ressources en eaux à l'échelle du Grand Sud et d'être ainsi en mesure de dresser un schéma de fonctionnement hydrogéologique des différents secteurs.

VERSION PROJET

- Projet Zoloke :
 - les deux **captages à Ambosary et Tsihombe** ont déjà été évoqués ci-avant, il s'agit d'analyses réalisées par la Jirama sur les points de captage alimentant les deux villes. Le premier capte le sous écoulement du Mandrare à partir de drains souterrains le second est un forage situé en rive gauche du Manambovo juste en aval du pont qui traverse la rivière lorsque l'on sort de Tsihombe en direction du sud.
 - le **puits (P1)** : il se situe à Ankara en aval d'Amboasary en rive droite du Mandrare dans une zone de maraîchage appelée Andranolava. Le puits est équipé d'une pompe à pédale fonctionnelle qui puise l'eau à 26 mètres.
 - l'écoulement **Behoake (M1)**, se situe entre Amboasary et le lac Anony au milieu des plantations de Sisal en rive gauche du Mandrare. Il s'agit d'une zone de source diffuse qui forme un petit cours d'eau. Ce point est situé au centre d'une vallée délimitée par deux escarpements rocheux (Figure 27) et qui correspondent aux dépôts de grès néogènes reposant directement sur le socle en rive gauche du Mandrare.
 - le **puits maraîcher P2** est situé au sud de Behara en bordure de la route avant d'arriver au village. Il s'agit d'un simple trou (vovo) utilisé pour le maraîchage et l'eau de boisson. La qualité de l'eau y est très médiocre l'aspect général de ce puits évoquant plus une mare (présence de grenouilles).



Figure 27 : Ecoulement de Behoake avec les grès néogènes en arrière plan © A.Charmoille

- Projet Sohavelo :
 - le **puits côtier de Faux-Cap (P3)**, situé à une centaine de mètres de la mer dans les dunes vives, il appartient à un groupe de 5 puits de différentes époques. Nous avons prélevé dans celui datant de 1940 (Figure 25).

- un prélèvement effectué dans la mer à faux cap (**Mer**).
 - le **forage réalisé par l'Unicef à Imongy**. Il y a deux forages modernes dans ce village, réalisés en 2014, celui qui a été prélevé (**F1**) est celui situé le plus au sud. Ces forages sont situés à l'aval hydraulique d'une zone de puits (vovo) datant des années 40 à 50 et toujours utilisée actuellement.
 - le **ruisseau R1** est un affluent du Manambovo situé à l'ouest et à l'amont de Tsihombe sur la N10 en direction de Beloha. Il s'écoule sur les terrains de socle cristallin. Il a été prélevé du fait de sa forte minéralisation afin d'identifier la possible signature chimique de ces terrains.
- Le projet Fanantenana :
 - le **forage d'alimentation en eau réalisé par BushProof à Ankasy**. L'eau est captée dans les terrains du socle à une profondeur de 80 mètres (**F2**). L'installation en place est la plus moderne visitée pendant la mission.
 - le puits villageois de **Befaha (P4)** à 25 km au sud de Betioky. Le prélèvement a été effectué sur le puits le plus ancien, cet ouvrage est profond de 30 mètres.
 - le **forage réalisé par le PNUD en 2002 à Ankiliarito/Beantake (F3)** à 5 kilomètres au sud de Betioky. D'une profondeur de 41 mètres, le niveau d'eau est situé à 6 mètres.

3.3.3. Paramètres physico-chimiques (Annexe 7)

3.3.3.1. La température des eaux

La moyenne des températures mesurées est de 27°C, ce qui se situe dans la gamme de variation de la température atmosphérique. La température la plus faible (23,4°C) a été mesurée dans une mare à proximité de Beathiste au petit matin un jour particulièrement brumeux. La température la plus élevée (32,4°C) a été mesurée dans un écoulement d'eau au fond d'un canal connecté à la rivière Mananara dans une zone de maraîchage à proximité de Behara. Ces valeurs sont conformes aux mesures déjà effectuées notamment par *Guyot en 2002*.

Nous ne nous hasarderons pas dans une interprétation excessive des données de température. En effet, les conditions de mesures (heure de la journée principalement, conditions atmosphériques) ne sont pas uniformes pour toutes les mesures. Ajouté à ceci, la configuration de nombreux points d'eau investigués (vovo, cours d'eau, mare) fait que la variation de la température de l'eau qu'ils contiennent est fortement liée aux conditions de températures atmosphériques. Une analyse détaillée de ce paramètre serait donc fortement biaisée.

3.3.3.2. La conductivité électrique de l'eau

La conductivité électrique de l'eau est représentative de sa minéralisation, c'est à dire de la quantité de matières dissoutes contenue dans l'eau. Ce paramètre dépend surtout du temps de contact entre l'eau et la roche, ainsi que du degré de solubilité de cette dernière. La conductivité étant dépendante de la température, nous utiliserons ici la conductivité spécifique, qui représente la conductivité recalculée à 25°C. Ce calcul est fait automatiquement par la sonde utilisée pour les mesures.

Comme déjà évoqué (Figure 20), les conductivités électriques de l'eau mesurées dans le Grand Sud sont particulièrement élevées. La mer très chargée en matières dissoutes affiche une conductivité très élevée. Sa proximité va donc fortement

influencer la minéralisation des eaux de la zone côtière. La Figure 28 présente la distribution des fréquences de conductivité pour 12 classes de conductivités électriques différentes pour les 81 mesures réalisées au cours de la mission.

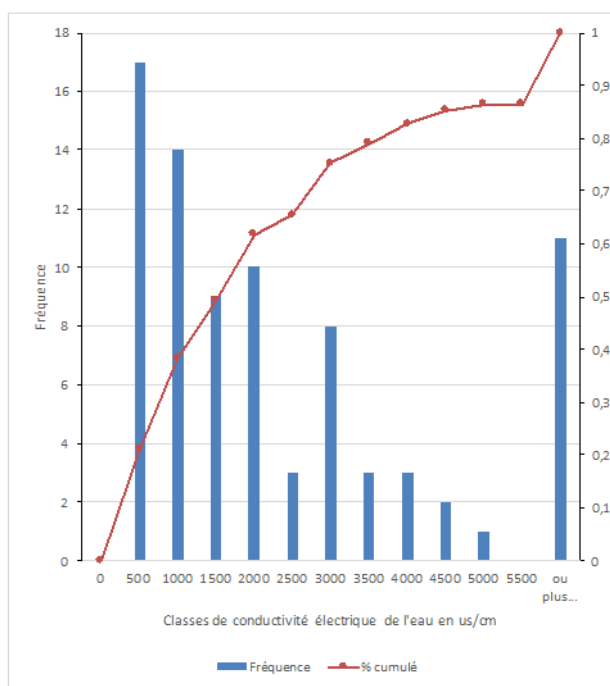


Figure 28 : Fréquences des différentes classes de conductivité électriques de l'eau

Il apparaît que les conductivités électriques les plus représentées se situent dans la gamme $500 \mu\text{s.cm}^{-1}$ à $3000 \mu\text{s.cm}^{-1}$ ce qui représente 70% des valeurs mesurées et que 10 % des valeurs sont supérieures à $5000 \mu\text{s.cm}^{-1}$. 40 % des points d'eau investigués respectent la norme de potabilité de l'OMS en termes de minéralisation de l'eau. La plupart de ces points d'eau sont répartis sur les projets Zoloké et Fanantenana. Dans la zone d'intervention du projet Sohavelo un seul point d'eau a été identifié avec une conductivité inférieure à $1000 \mu\text{s.cm}^{-1}$ (Annexe 7). Il s'agit d'une mesure réalisée dans un trou d'eau captant le sous écoulement du Manambovo au niveau du village de Behazomanga. La minéralisation mesurée était de $484 \mu\text{s.cm}^{-1}$. Ces observations donnent déjà une idée de la disponibilité de l'eau douce et de sa répartition à l'échelle des trois projets AVSF.

3.3.3.3. Le pH des eaux

Les pH mesurés sont conformes à ceux relevés dans la littérature, la moyenne mesurée est de 7,7 et les valeurs minimum et maximum sont respectivement de 6,37 et 9,49 ce qui correspond aux observations faites par Guyot en 2002.

3.4. Faciès chimiques des eaux

L'eau lorsqu'elle circule dans le milieu souterrain se charge en éléments constitutifs de la roche. La composition chimique de l'eau va donc être directement en lien avec la nature des roches qui constitue le sous-sol. Cette composition chimique est désignée sous le terme de « faciès chimique ». Ce faciès chimique peut être comparé à une carte d'identité de l'eau acquise au cours de son cheminement dans le sous-sol. En représentant les concentrations en ions majeurs dans un diagramme

dit de Piper² il est possible d'identifier les différents faciès chimiques des eaux en présence à partir des espèces chimiques dominantes. Cette identification de la signature chimique des eaux va permettre d'avoir une première idée des grandes circulations d'eau souterraine et des différentes entités hydrogéologiques en présence. Les prélèvements effectués lors de la mission de terrain ont été replacés dans le diagramme de piper présenté en Figure 29.

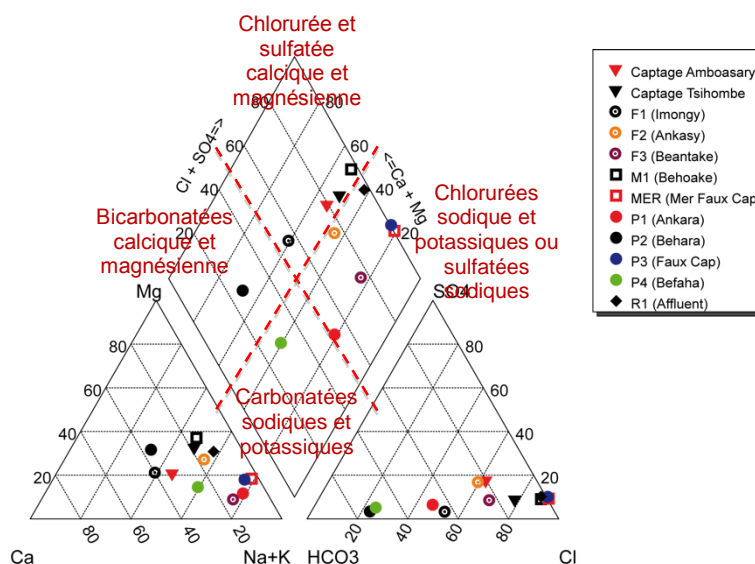


Figure 29 : Représentation dans un digramme de Piper des prélèvements d'eaux effectués dans la région du Grand Sud en fonction de leurs concentrations en éléments majeurs. Les concentrations en HCO_3^- ont été calculées.

On observe (Figure 29) que les échantillons se répartissent entre un pôle chloruré sodique (Na-Cl) et un pôle bicarbonaté magnésien (Mg-HCO_3) en étant dispersés dans trois domaines chimiques différents. Cette dispersion est également observée par Guyot en 2002 (Figure 30) pour les eaux échantillonnées à l'échelle du Grand-Sud tandis que les eaux de la bande côtière forment un groupe plus resserré. En comparant les deux diagrammes de Piper établis par guyot en 2002 et celui dressé par nos soins, nous pouvons affirmer que les échantillons prélevés dans le cadre de notre mission intègrent des points d'eau appartenant à ces deux familles.

² « Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau concernée, par exemple, eaux bicarbonatées calciques ou eaux carbonatées sodiques et potassiques. »
http://adour-garonne.eaufrance.fr/upload/DOC/SDAGE/EAUSOUT/QUALITE/Guide_de_lecture.pdf

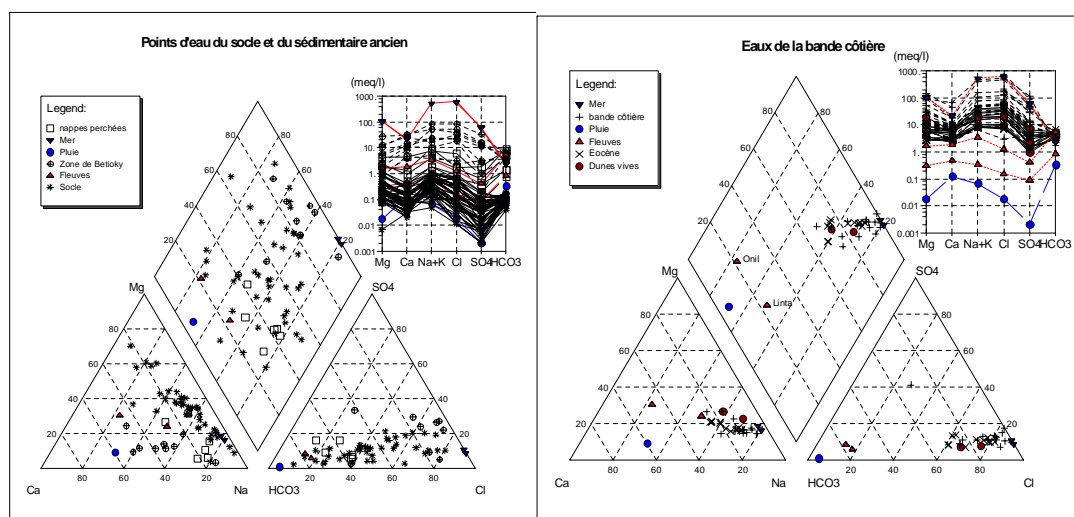


Figure 30 : A droite, diagramme de Piper d'échantillons d'eau prélevés dans le Grand Sud. A gauche diagramme de Piper d'échantillons prélevés exclusivement sur la bande côtière (Guyot, 2002).

On retrouve cette répartition des échantillons entre ces deux pôles sur le diagramme de Durov³ (Figure 31). A la différence de *Rabemana et al. en 2005*, on observe un déplacement du nuage de points vers la droite du carré ce qui semble marquer une influence accrue du pôle chloruré sodique (Na-Cl) et probablement une influence marine plus marquée.

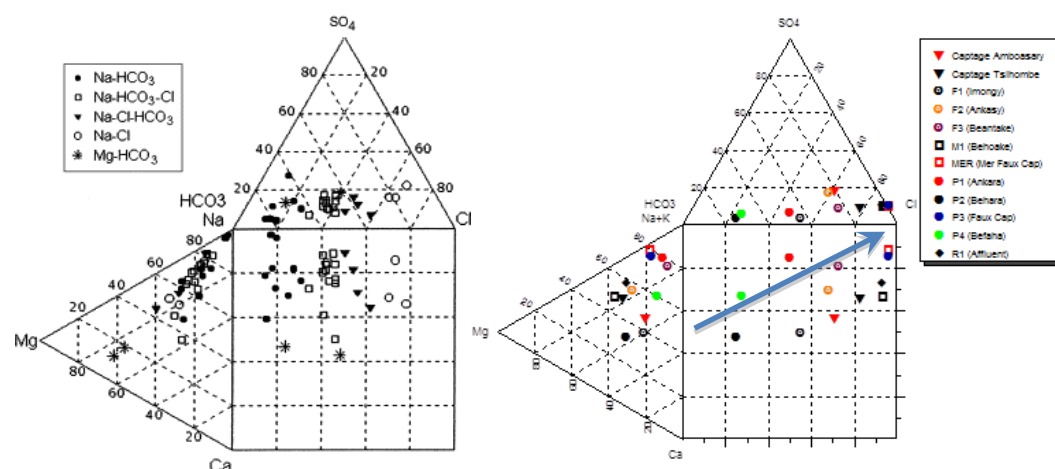


Figure 31 : A gauche, diagramme de Durov des eaux prélevés dans la zone de socle du Grand Sud de Madagascar (Rabemana et al., 2005). A droite diagramme de Durov des prélèvements effectués lors de la campagne d'avril 2016

Les faciès chimiques identifiés à partir des échantillons prélevés au niveau de certains points d'eau des zones d'intervention d'AVSF et leur comparaison avec les travaux réalisés antérieurement montrent que dans la zone d'intervention d'AVSF dans le Grand Sud nous sommes probablement en présence d'eaux drainées par le socle, les terrains sédimentaires anciens et la bande côtière.

³ Le diagramme de Durov est fondé sur les mêmes deux triangles que le diagramme de Piper et utilise également des valeurs en % meq.L-1. Ce diagramme remplace le losange du Piper par un carré.

3.5. Origine de la salinité, influence marine ou continentale

3.5.1. Concentration en sel des différents points d'eau visités

Pour la majorité des échantillons prélevés, la conductivité électrique de l'eau, est dépendante de la minéralisation totale. Elle s'explique principalement par les concentrations en Sodium (Na^+) et Chlorure (Cl^-) majoritaires d'où la prédominance des faciès sodiques et chlorurés décrits précédemment.

Afin d'évaluer la concentration en sel (chlorure de sodium, NaCl) dissout dans l'eau, il est donc possible d'établir une relation entre la conductivité électrique de l'eau et la concentration en sel analysée en laboratoire pour les points d'eau ayant fait l'objet d'un prélèvement. En appliquant ensuite cette relation aux points où seule la conductivité électrique de l'eau a été mesurée, il est possible d'évaluer approximativement la concentration en sel de l'ensemble des points d'eau visités. (Figure 32 + Annexe 7).

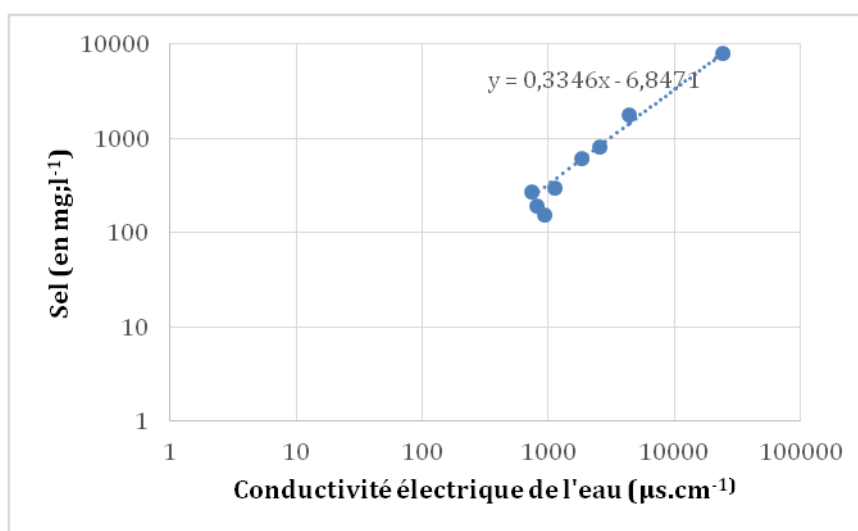


Figure 32 : Droite de corrélation entre la concentration en NaCl et la conductivité électrique de l'eau.

3.5.2. Evolution du rapport entre les ions chlorures et sodium suivant les échantillons considérés

Un travail sur les concentrations relatives de ces deux espèces dans les différents points d'eau peut nous aider à avancer dans la compréhension de l'origine de la salinité et l'identification ou la hiérarchisation des ressources en eau potentielles. Sur la Figure 33 ont été représentées :

- la droite de pente 1 :1 qui correspond aux concentrations en Na^+ et Cl^- obtenues dans le cas d'une dissolution de l'halite (espèce minérale du chlorure de sodium) ;
- la droite correspondant à la proportion de Na^+ et Cl^- présente dans l'eau de mer à partir de l'échantillon prélevée en mer à Faux Cap.

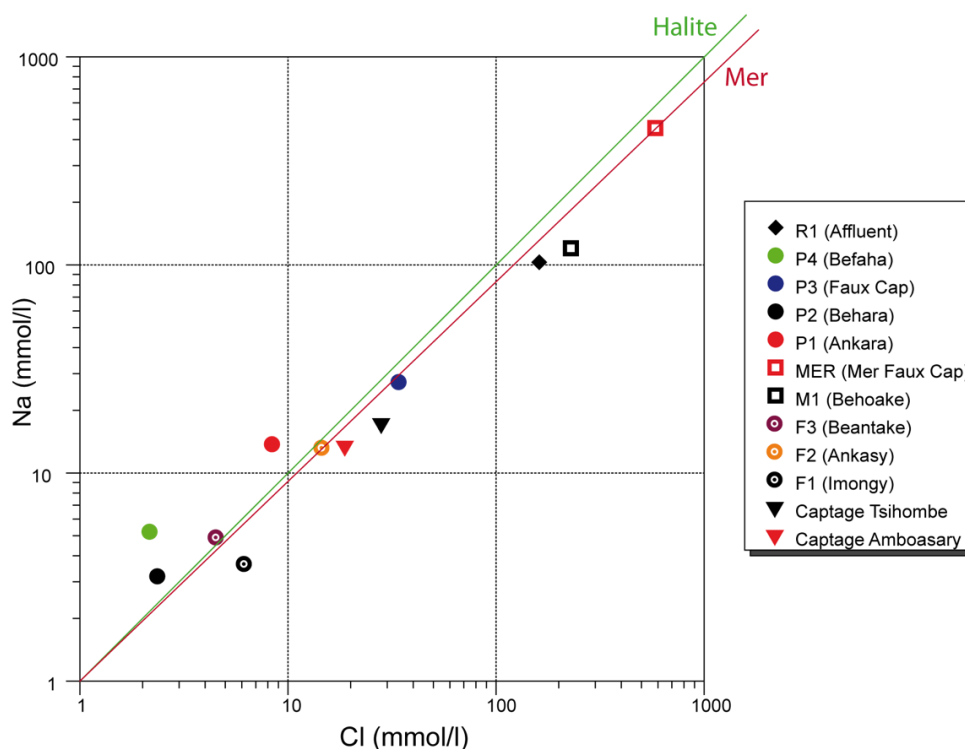


Figure 33 : Rapports des concentrations molaires entre les ions chlorures et sodium pour les différents échantillons par rapport aux droites du rapport marin et de dissolution de l'halite

Les points représentant les prélèvements effectués in situ se répartissent entre les deux droites et de part et d'autre des deux droites on peut donc imaginer qu'ils ont été plus ou moins influencés par l'une ou l'autre des deux origines (marine ou dissolution de l'halite) mais que d'autres processus sont à invoquer notamment pour les échantillons situés en dessous et au dessus des deux droites. La proximité des deux droites ainsi que l'utilisation nécessaire d'échelles log pour représenter la gamme très étendue des concentrations rend l'analyse graphique délicate à partir de la Figure 33. Afin de mieux appréhender les différences de proportion entre les chlorures et le sodium nous avons construit la Figure 34. Le graphique présente pour chaque échantillon analysé l'excès ou le déficit relatif (en % molaire) des concentrations en chlorures par rapport à la droite de dissolution de l'halite. On note qu'un déficit en chlorures sera représentatif d'un enrichissement en sodium.

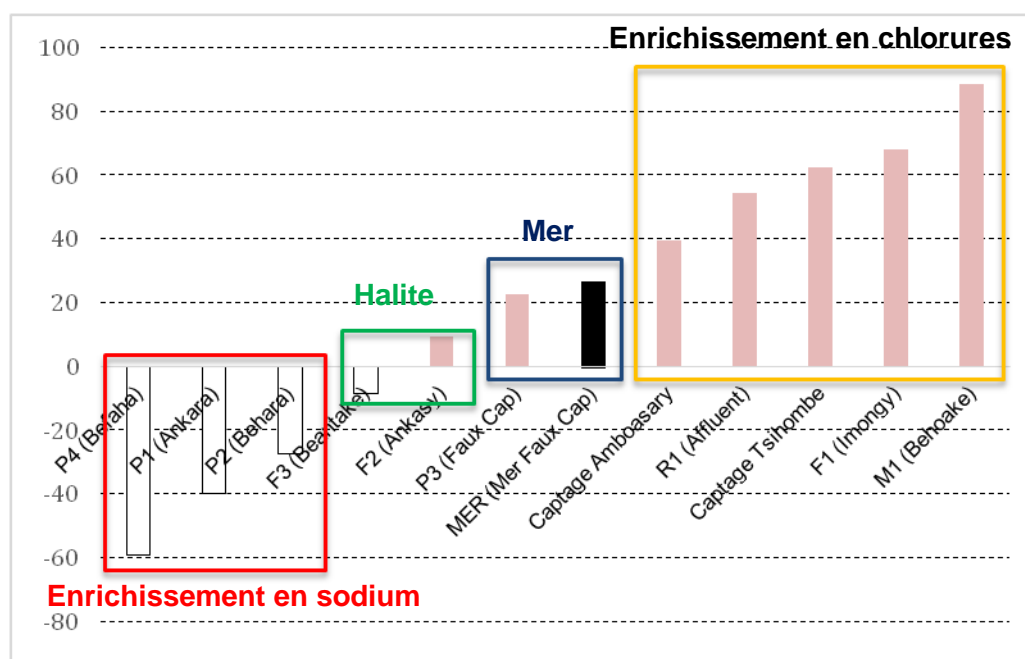


Figure 34 : Excès ou déficit en chlorures (en % molaire positif ou négatif) des différents échantillons par rapport à une proportion de 1/1 résultant de la dissolution de l'halite.

A partir de ces deux figures (Figure 33 et Figure 34), nous pouvons isoler quatre groupes d'eau :

- les points les plus proches de la droite de dissolution de l'halite et proches de l'axe des abscisses sur la Figure 34 ont été en contact avec du sel sous forme minérale lors de leur cheminement dans le sous-sol ; il s'agit des échantillons prélevés à Béantake et Ankasy dans deux forages ;
- l'échantillon prélevé à Faux-Cap est très proche de la valeur du rapport Na/Cl de l'eau de mer. Il apparaît donc que cet échantillon prélevé dans un puits en bord de mer (Figure 25) correspond à de l'eau de mer fortement diluée par de l'eau d'infiltration et n'ayant pas cheminé longtemps dans le milieu souterrain ;
- un certain nombre d'échantillons enrichis en chlorures (Figure 34) qui placent les points de prélèvement de Behoake, R1 ainsi que les captages d'Ambosary et Tsihombe et enfin Imongy, en position inférieure par rapports aux droites de dissolution de l'Halite et de l'eau de Mer (Figure 33).

En 2005, *Rabemanana* explique l'enrichissement en chlorures de certain points d'eau du socle du sud de Madagascar par un apport anthropique lié aux rejets de dépotoirs, latrines, aux déjections animales ainsi qu'aux fertilisants. Il s'appuie notamment sur des travaux de (*Travi et Mudry en 1997*), pour interpréter les résultats dans ce sens en contexte semi-aride ;

Concernant Behoake et R1, étant données les concentrations très importantes analysées, l'enrichissement en chlorures doivent avoir une autre origine. La situation est différente pour Imongy ; l'hypothèse d'une contamination de ce captage par des rejets anthropiques est très plausible étant donnée la forte densité de vovo observée en amont formant un « véritable champ de cratères » creusés au fils des ans en amont des captages et étant autant de points de contamination possibles de la nappe

d'eau souterraine. Pour les captages d'Amboasary et Tsihombe, il en est de même étant donnée l'anthropisation des cours d'eau en saison sèche les alluvions captés doivent être relativement pollués par des effluents de différentes origines, un enrichissement en chlorures d'origine anthropique est donc plausible.

- enfin, certaines eaux sont enrichies en Na^+ . Cet élément est habituellement acquis par l'eau lors de son passage sur les roches cristallines, ces échantillons auraient donc une composante importante d'eau ayant circulée sur le socle formé de roches silicatées et marquerait les eaux en provenance des terres appartenant à la nappe principale et s'étant infiltrées beaucoup plus au nord

3.5.3. Origine du sel dans les eaux souterraines

L'interprétation qui vient d'être réalisée montre que d'autres processus viennent influencer les concentrations en Na^+ et Cl^- tout en nous renseignant sur de nouvelles caractéristiques des points d'eau prélevés. Comme proposé par de nombreux auteurs, l'utilisation des ions bromures peut permettre de préciser l'origine du sel analysé au sein des différents groupes d'eaux identifiés précédemment.

De la même manière que les ions chlorures, les ions bromures sont des ions de petite taille au caractère très hydrophile. La principale conséquence de ces caractéristiques est que le rapport de concentration entre ces ions ne va pas être modifié par les processus de dilution d'évaporation et de mélange (*Alcala et Custodio, 2004*).

Suivant les auteurs soit le rapport Br/Cl (*Hissou et al ; 1999 ; Guyot, 2002*) est utilisé soit le rapport Cl/Br (*Alcala et Custodio, 2004*). Concernant cette étude, nous avons décidé d'utiliser le rapport Cl/Br , en effet les travaux de *Alcala et Custodio, en 2004* proposent des gammes de valeur de référence pour les différentes signatures du rapport Cl/Br . Ces gammes de variation du rapport Cl/Br devront être manipulées avec prudence étant donné que l'étude réalisée se situe en Espagne. Le contexte géographique est donc différent, notamment en termes de processus d'anthropisation.

Ainsi pour l'eau de mer ils indiquent un rCl/Br de 655 ± 5 . L'analyse réalisée sur l'échantillon d'eau de mer prélevé à Faux Cap donne un rapport rCl/Br égal à 640. On est donc très proche des valeurs présentes dans la bibliographie. Dans la même région, *Rabemanana (2005)* propose un rapport rCl/Br de 689 cohérent avec les valeurs fournies par *Hsissou et al. en 1999* au Maroc et proche de la valeur mesurée par nos soins à faux cap ($\text{rCl/Br} = 637$).

Les valeurs mesurées lors de la campagne sont donc cohérentes avec les valeurs des travaux antérieurs, ce qui valide notre démarche et la cohérence des résultats des analyses. Seules les valeurs proposées par *Guyot en 2002* sur la bande côtière indiquent de valeurs différentes, mais il est fait état de problèmes analytiques qui ne garantissent pas une valeur fiable du rapport Cl/Br .

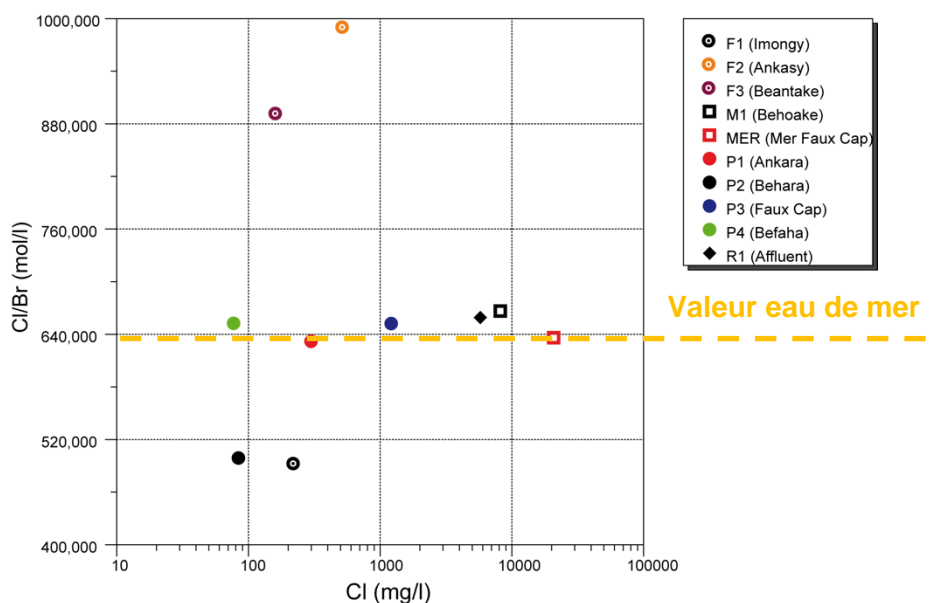


Figure 35 : Rapport molaire Cl/Br en fonction des concentrations en Chlorures pour les différents échantillons prélevés.

Sur la (Figure 35) on observe que :

- un certain nombre de points d'eau avec un rapport très proche de l'eau de mer dans la gamme 655 +/- 20 proposée par *Alcala et Custodio en 2004* comme correspondant au rapport de concentration de l'eau de mer. On trouve dans ce groupe le puits Maraicher de Befaha (P4), le puits de bord de mer de Faux Cap (P3), l'écoulement d'eau saumâtre de Behoake (M1) et l'affluent de du Manambovo à l'amont de Tsihombe (R1).

La forte composante marine de l'échantillon prélevé à Faux Cap est donc confirmée. Les puits de Behara et Ankara apparaissent subir une influence marine probablement d'origine atmosphérique. Le point d'eau de Behoake ainsi que le cours d'eau R1 lorsqu'on les superpose au canevas de *Alcala et Custodio en 2004* sont identifiés d'après leur rapport Cl/Br comme des intrusions marines (origine n°1 sur Figure 36). Pour Behoake il ne fait pas de doute et nous y reviendrons plus tard qu'il s'agit du phénomène en cause. Pour l'affluent du Manambovo, c'est plus difficile à expliquer. On peut imaginer une concentration d'apports marins atmosphériques par une intense évapotranspiration et une stagnation des eaux ce qui expliquerait également l'enrichissement relatif en chlorures pour ces deux échantillons.

Pour résumer, pour ce groupe de point au rapport Br/Cl proche de l'eau de mer, les prélèvements les plus concentrés en sel peuvent s'expliquer par l'intrusion plus ou moins directe d'eau de mer dans l'aquifère tandis que les échantillons les moins concentrés s'expliquent par des apports atmosphériques (Befaha et Ankara). Pour Ankara on ne peut exclure, l'existence d'une intrusion d'eau marine via les alluvions du Mandrare.

- les deux points qui se démarquaient déjà précédemment, Ankasy (F2) et Béantake (F3), ont des valeurs du rapport rCl/Br supérieures à la valeur de l'eau de mer, proche de 1000 pour le prélèvement effectué à Ankasy (F2) et proche de 900 pour le prélèvement effectué à Beantake ce qui le différencie

encore une fois du reste des échantillons. Comme représenté (Figure 36), cette gamme de valeurs les rapproche de l'origine 4 « volcanic contributions of halide ». Ce qui marque une importante contribution des terrains du socle.

- deux points affichent des valeurs de rCl/Br inférieures à 500 ; le puits de Behara et le forage d'Imongy. Ces valeurs confirment l'anthropisation déjà suspectée par les teneurs en Cl^- au niveau du forage d'Imongy et montre également l'existence d'une pression anthropique sur les puits maraîcher de Behara. Ceci n'était pas visible à partir des teneurs en chlorures, l'enrichissement en chlorures si il existe étant masqué par l'enrichissement en sodium acquis par les eaux plus au nord lors de son cheminement sur les roches cristallines.

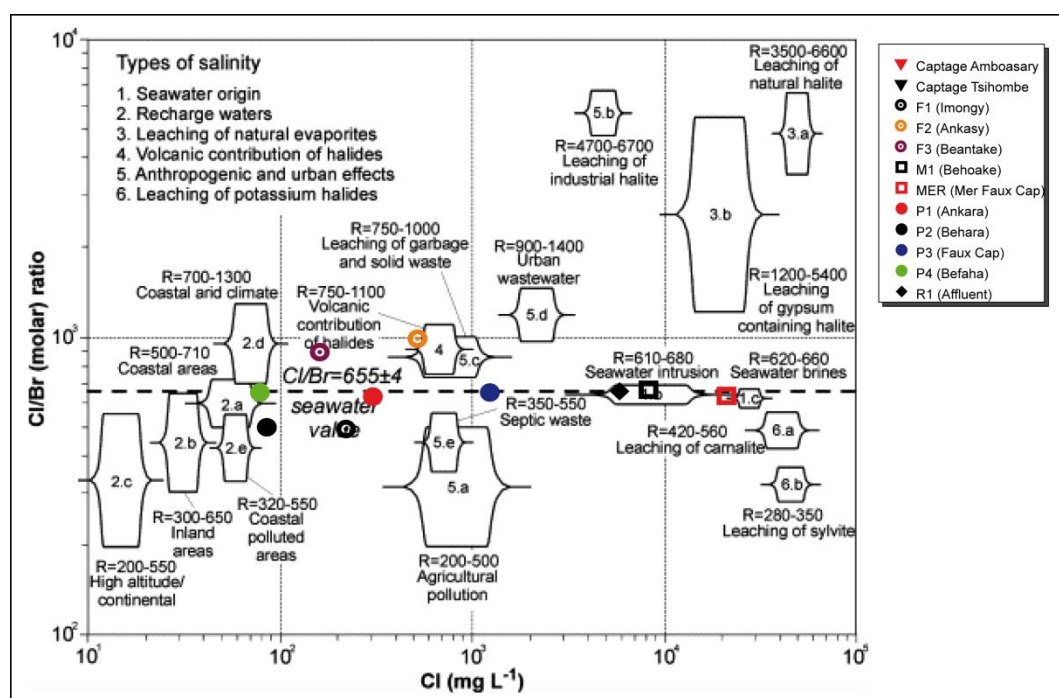


Figure 36 : Superposition des prélèvements effectués lors de la mission avec le canevas dressé par Alcalá et Custodio en 2004 et délimitant différents domaines correspondant à différentes origines de la salinité.

3.5.4. Origine des circulations d'eau : marine ou continentale

Afin de compléter notre analyse des différentes masses d'eau en présence, nous allons utiliser les concentrations en silice. Il s'agit d'un élément peu réactif dont la mise en solution est lente et nécessite un temps de séjour prolongé avec des roches cristallines du type de celles constituant le socle sédimentaire ancien et cristallin. Cet élément est quasiment absent de l'eau de mer. Il va donc nous permettre de préciser la prédominance des apports d'origine marine ou continentale dans les eaux échantillonnées (Figure 37). Trois groupes d'eau se distinguent :

- un groupe d'eau fortement marqué par le pôle marin et déjà identifié comme tel avec les prélèvements : M1, R1 et P3 ;
- un groupe intermédiaire subissant l'influence marine mais probablement d'origine continentale. Il s'agit des échantillons prélevés à Behara, Ankara, Imongy et Ankasy.

- un groupe dont l'origine continentale est très marquée, avec les échantillons prélevés à Befaha et Beantake.

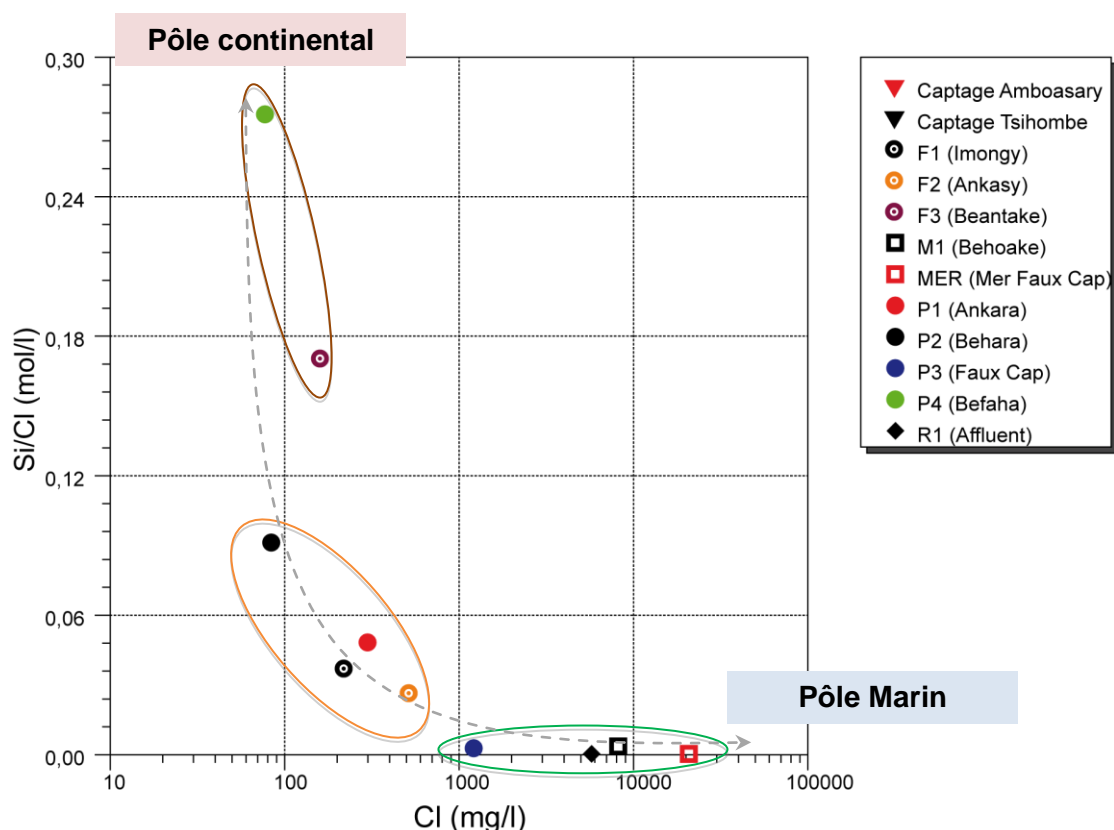


Figure 37 : Evolution du rapport molaire entre la silice dissoute et les chlorures en fonction des concentrations en chlorures.

3.5.5. Synthèse

En 2003, après une étude poussée des eaux du socle cristallin du sud de Madagascar, *Rabemanana et al* concluaient que l'apport salin par les précipitations ne suffisait pas à expliquer la minéralisation des eaux et proposait trois processus pour expliquer la minéralisation importante des eaux souterraines du Grand Sud :

1. l'altération des minéraux silicatés et carbonatés constituant la roche ;
2. les apports de sels marins par la recharge des aquifères liés aux précipitations ;
3. la dissolution d'évaporites secondaires dans la zone non-saturée liée à des processus d'évapotranspiration des sels précédents et notamment d'origine marine.

Cette situation a été décrite à l'intérieur des terrains dans la zone du socle cristallin donc plus au nord de la zone qui nous intéresse (Figure 20). L'analyse qui vient d'être menée à partir des analyses réalisées sur les prélèvements effectués en avril 2016 nous montre que sur les zones d'intervention des projets d'AVSF nous sommes confrontés à ces trois origines de la salinité et qu'il est nécessaire d'en ajouter deux supplémentaires qui sont :

4. l'intrusion d'eau salée ;
5. la contamination liée aux activités humaines (anthropisation).

Le travail d'interprétation hydrochimique réalisé ci-avant nous permet de différencier chimiquement trois groupes de ressources en eau qui sont soumis à différents processus de minéralisation et de salinisation :

Groupe 1 : (captages d'Ambosary et Tsihombe, puits d'Ankara, de Behara). Ce groupe correspond à des eaux en provenance du nord et drainées par l'intermédiaire des cours d'eau et qui s'écoulent au niveau des zones d'intervention des projets dans les sous écoulements ou les nappes alluviales. Ils sont marqués par l'altération des roches riches en minéraux silicatés avec un enrichissement en Si et Na^+ (processus n°1.). Ils sont souvent affectés par une salinisation liée aux apports marins par les précipitations (processus n°2.). Il n'est pas rare que l'on détecte des signes d'anthropisation et de contaminations liées à l'activité humaine dans ce groupe d'eaux (Captages, P4) (processus n°5).

Groupe 2 : (Ankasy et Beantake et Befaha). Les eaux de ces points d'eau circulent dans différents aquifères appartenant à la nappe dite principale. Les points d'eau de ce groupe concernent exclusivement des forages et un puits profond qui captent l'eau à des profondeurs plus importantes que les simples vovos. Ils sont localisés dans la zone de socle cristallin pour Ankasy et sédimentaire ancien pour Beantake et Befaha.

Ces eaux sont chargées en silice et ont pour certain une signature en Bromure typique d'eau en provenance du socle. Leurs concentrations en sel peuvent être importantes. Nous attribuons cette salinité au processus n°3. Des mécanismes de précipitation/recristallisation des minéraux de sub-surface se mettent en place. C'est-à-dire que de l'eau contenant déjà une certaine salinité, via les apports atmosphériques d'origine marine par exemple s'infiltre dans le sol. Du fait des températures élevées lors de la phase d'infiltration ou alors favorisé par l'évapotranspiration (action de la végétation), des cristaux de sel précipitent en sub-surface. Ces cristallisations vont être dissoutes lors de la prochaine phase d'infiltration ce qui va augmenter progressivement la minéralisation de la nappe. Des cristallisations salées résultant de ce processus ont été observées à Besatra dans un lit de ruisseau à sec à 10 km au sud de Betioky (Figure 38). On peut ajouter ici que l'irrigation pour le maraîchage, réalisée à partir d'eau initialement très minéralisée va encore accentuer ce mécanisme et aggraver ses conséquences sur la ressource en eau et la production maraîchère.



Figure 38 : Sel cristallisé, dépôts blancs dans le lit d'un cours d'eau à sec au sud-ouest de Betioky (environ 80 km de la mer) © A.Charmoille

Groupe 3 : (Imongy, Behoake, Faux Cap). Les eaux de la zone côtière se caractérisent par une forte influence marine et une ressource présente dans des nappes plus superficielles. Le forage d'Imongy a été placé dans ce groupe bien que nous interprétions la nappe qu'il capte comme appartenant à la nappe principale. Le forage se situe dans la configuration géologique décrite par la coupe représentée en Figure 12. De notre point de vue les eaux captées proviennent des grès néogènes. Cette formation géologique vient butter juste au sud d'Imongy contre les dépôts dunaires anciens (Figure 6). On se situe dans ce secteur dans la zone de dépression décrite au §2.3.2.1 à l'arrière du massif dunaire côtier. L'influence des activités de surface apparaît comme forte au niveau des captages d'Imongy comme le montre les concentrations en chlorures et en bromures (Processus n°5).

Nous attribuons les sources diffuses de Behoake à la même formation de grès néogènes. L'écoulement est en effet présent au pied d'un affleurement de ces grès. La très forte minéralisation des eaux de cette source ainsi que sa signature chimique nous amène à considérer que cet écoulement est une résurgence d'une intrusion d'eau de mer dans les terrains (Figure 39 et Figure 40). La proximité du lac salé Anony conforte cette hypothèse. Cette étendue d'eau salée (salinité estimée à 75 g.l⁻¹) au milieu des terres, en contact épisodiques avec la mer a probablement une zone d'influence importante dans le milieu souterrain. Il est très probable que dans ce secteur les grès néogènes soient donc contaminés par les saumures en provenance du lac Anony et de la mer (Figure 39 et Figure 40).



Figure 39 : Lac Anony, sud est d'Ambosary © A.Charmoille

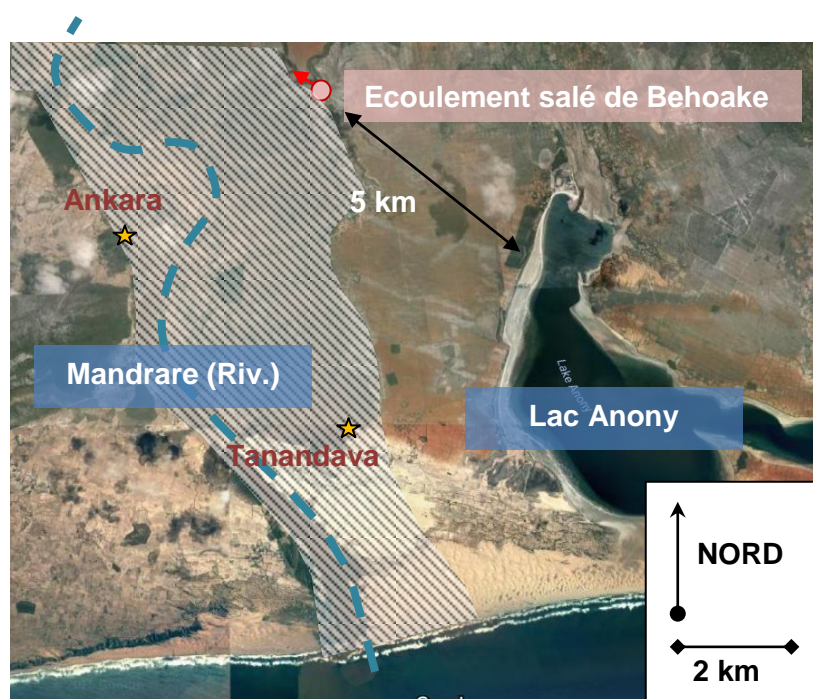


Figure 40 : Vue aérienne de l'embouchure du Mandrare et du lac salé Anony. Les hachures représentent les alluvions déposés par le Mandrare avec l'évolution de la trajectoire de son cours (Google Map®)

Les puits de Faux Cap sont les représentants les plus emblématiques des aquifères de la bande côtière, ces derniers captant la nappe d'eau douce formée sur l'eau salée d'origine marine et qui flotte en surface. Cette réserve d'eau est maintenue en place par le battement des marées qui empêche son drainage vers la mer.

Concernant l'affluent du Manambovo (R1) en amont de Tsihombe, il n'a été intégré à aucun groupe. L'interprétation de ses caractéristiques n'est pas aisée. Il est localisé sur des terrains du socle, cependant considérant plusieurs caractéristiques physico-chimiques il a une signature d'eau de mer (Br, Si). L'intrusion directe de saumures en provenance de la mer ne peut être envisagée étant donné la position altitudinale haute du cours d'eau par rapport à la mer (environ 200 mètres) ainsi que sa distance à la mer. Une des explications de la salinité très élevée (27 g.L^{-1}) de ce cours d'eau peut s'expliquer par l'évaporation intense d'apports marins atmosphériques couplés à un écoulement très faible et des apports minéralisés en provenance du socle qui ont été concentrés progressivement dans des zones à faible vitesse d'écoulement dans le lit de la rivière asséchée.

La classification ainsi établie et les différents processus de salinisation identifiés vont nous permettre de dresser l'inventaire des ressources en eaux disponibles pour chaque projet d'AVSF dans le sud malgache et d'identifier les ressources qui paraissent les plus appropriées pour les villages visités.

4. Potentiel hydrogéologique

Le travail réalisé ci-avant nous permet de mieux apprécier le contexte géologique et hydrogéologique des différents projets. Le travail bibliographique et les nouvelles investigations réalisées nous ont permis d'identifier et localiser différentes familles de ressources en eau souterraine et superficielles. Nous allons maintenant détailler pour chaque projet d'AVSF dans le Grand Sud quelles sont les ressources utilisables et pouvant être favorisées. Pour les différents villages visités, la ressource en eaux sera qualifiée et des solutions d'approvisionnement proposées. Un tableau synthétisera ces données pour chaque projet. Les informations suivantes y seront détaillées :

- la disponibilité actuelle de l'eau dans le contexte relatif au Grand Sud. Il ne s'agit pas d'une qualification de la disponibilité en valeur absolue mais dans le contexte du Grand Sud. Cette disponibilité sera classée en trois catégories :
 - **Bonne** : de l'eau est présente à faible profondeur en quantité (critère 1) et qualité suffisante (critère 2) pour alimenter un puits villageois traditionnel. Des infrastructures adaptées y donnent accès (critère 3) ;
 - **Moyenne** : Un des trois critères précédents est non existant ;
 - **Faible** : Deux des trois critères précédents sont non existants ;
 - **Nulle** : Aucun accès à l'eau n'existe localement, les habitants doivent transporter de l'eau depuis un point d'eau distant.
- les travaux et/ou investigations à réaliser pour améliorer la situation ;
- l'objectif des travaux et/ou investigations proposées ;
- l'investissement en termes de travaux à réaliser qui sera classé en trois catégories :
 - Faible : Tout est réalisable localement, seuls des travaux de maçonnerie sont nécessaires pour, par exemple, aménager de manière moderne des vovo déjà existants ;
 - Moyen : l'accès à la nappe d'eau n'existe pas, il est nécessaire de creuser le puits ou un forage peu profond et de l'aménager en surface
 - Important : Nécessité de réaliser des forages profonds, déplacement de machines lourdes sur place, coûts des travaux potentiellement importants.
- la probabilité de réussite des travaux échelonnée de 1 à 5, 1 étant une probabilité très faible d'amélioration de la situation et 5 étant une quasi-certitude d'un meilleur accès à l'eau suite aux travaux.

4.1. Le projet ZOLOKE

4.1.1. Situation du projet (Figure 41)

Comme déjà évoqué, la région d'Amboasary est drainée par le fleuve Mandrare. C'est un des cours d'eau du Grand Sud qui conserve un débit résiduel durant la

saison sèche. Son bassin versant se localise dans les terrains volcaniques situés au nord avec des zones présentant des altitudes élevées.

La zone d'intervention du projet Zoloke s'étend au sud et nord d'Amboasary. Etant donné le temps disponible durant la mission, la partie sud de la zone d'intervention a été investiguée et au nord les investigations n'ont été menées que jusqu'à Behara à quelques kilomètres au nord d'Amboasary. Nous ne traiterons donc pas ici des zones d'intervention situées plus au nord à proximité d'Ifotaka qui se localisent dans un contexte géologique et climatique totalement différent.



Figure 41 : Détail des points d'eau visités dans la région d'Amboasary (Google Map®)

4.1.2. Ressources en eaux identifiées

- Les cours d'eaux et leurs nappes d'accompagnement :

La ressource en eau la plus fréquemment exploitée sur le territoire du projet Zoloké est constituée par les nappes d'eau souterraine en lien avec le fleuve Mandrare. Cette rivière est le principal pourvoyeur d'eau douce de ce secteur géographique. Cette ressource est exploitée au niveau des nappes alluviales plus ou moins anciennes comme par exemple dans les villages d'Ankara et Tanandava. Une exploitation du sous écoulement existe à Amboasary. D'un point de vue quantitatif, le débit fourni par les puits semble très variable suivants les zones considérées, ce qui est probablement lié à la teneur en argiles de sédiments déposés par la rivière qui influence leur perméabilité. En termes de salinité, l'influence de la mer se fait sentir. Il existe probablement des apports salins par voie atmosphérique. Pour les villages

de Ankara et Tanandava, il est possible qu'une intrusion d'eau de mer existe dans le lit du Mandrare et qu'en saison sèche ce biseau salé avance à l'intérieur des terres en suivant le lit de la rivière et ses alluvions. Malgré tout, dans une zone correspondant à un ancien méandre du Mandrare au lieu dit Ankoba, de l'eau exempte de sel (conductivités électriques mesurées proches de $700 \mu\text{s.cm}^{-1}$) est présente dans plusieurs puits. Les puits les moins minéralisés captent probablement des zones d'alluvions avec de bonnes perméabilités qui permettent un renouvellement important de l'eau, pour les zones plus minéralisées les qualités aquifères des alluvions sont probablement moins bonnes et ne permettent pas la recharge rapide en eau douce provenant de la rivière.

Au nord d'Amboasary l'affluent du Mandrare, la Mananara crée à proximité de Behara une zone bien irriguée en eau. Avec la présence de nombreux canaux, des rizières ainsi que des nappes alluviales bien développées. A centre du village de Behara construit sur une colline correspondant à un affleurement de socle et dominant la plaine alluviale, d'anciens puits captant les eaux du socle ont été abandonnés du fait de minéralisations très élevées. Dans ce secteur, les nappes alluviales de la Mananara et du Mandrare devront donc être favorisées comme ressource en eau.

- Les grès néogènes :

A proximité de la côte les grès néogènes sont extrêmement minéralisés. Les mesures réalisées à Behoake montrent comme discuté au § 3.5.5 qu'ils sont probablement soumis à des intrusions d'eau marine. Cette ressource souvent décrite comme intéressante (*Besairie et Abadie 1939, ANDEA, 2003*) paraît donc difficilement exploitable dans la région d'Amboasary

- Les puits côtiers, nappe des dunes vives à Sampona :

La dernière zone visitée se situe sur la bande côtière au niveau des anciennes dunes fixées datant du Quaternaire (Figure 9, Figure 14, Figure 22). A Sampona, dès 1939, la zone est décrite comme dépourvue d'eau souterraine par *Besairie et Abadie*. Plus récemment, en 2005, le schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Grand Sud indique une profondeur de la surface de la nappe importante entre 150 et 200 mètres. Pour s'alimenter en eaux les habitants de ces villages se rendent sur la plage où des puits captent une eau contenant entre $1,5 \text{ g.l}^{-1}$ et 2 g.l^{-1} de sel. Ces puits captent la même nappe des dunes vives que les puits de Faux Cap situés plus à l'ouest et décrits au § 3.3 (Figure 25). Etant donné leur localisation, ils sont relativement peu salés. Ces puits sont la ressource en eau située le plus proche de Sampona (5 km en ligne droite). Si l'on exclut la difficulté d'accès aux puits et le temps de transport, ces puits constituent une ressource locale intéressante. Pour que l'eau douce soit présente en quantité suffisante il faut que le cordon dunaire récent soit bien développé, pour constituer un bassin versant suffisant.

4.1.3. La problématique de l'alimentation en eau de Sampona

Une étude hydrogéologique réalisée dans cette zone en 2006 commandée par le gouvernement Malagache à l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA) ainsi que l'ensemble des informations recueillies et interprétées laissent penser qu'il est peu probable que des nappes perchées atteignables par forage existent entre la nappe principale et la surface. En 2006, il a été envisagé d'alimenter le village et la zone des dunes quaternaires par une conduite d'eau en provenance du Mandrare (JICA, 2006). Atteindre par forage la nappe principale serait envisageable mais il est très probable que sa salinité dépasse celle des puits du bord de mer étant donné l'intrusion d'eau salée d'origine marine et les apports liés au socle. Si c'est le cas, les populations délaisseront vite le forage au profit des ressources initiales. Ajouté à ceci et pour cette gamme de profondeur, l'utilisation de pompes à main n'est plus possible. La réalisation d'un forage de ce type nécessiterait donc l'installation d'une pompe avec une source d'énergie additionnelle ce qui pose d'autres problèmes d'entretien et de maintenance.

Nous sommes donc contraints de reconsidérer notre projet initial ; il est peut être trop optimiste de proposer une ressource en eau exploitable à Sampona de minéralisation comparable à l'eau puisée en bord de mer (*Charmoille, 2016*).

4.1.4. Synthèse

Dans la région d'Ambosary, la ressource à privilégier est l'utilisation de l'eau douce drainée par le Mandrare, que l'on retrouve au niveau des nappes d'accompagnement du cours d'eau (sous-écoulement, nappes alluviales) (Figure 40). Un certain nombre de puits peuvent être modernisés en priorité et surtout sécurisés d'un point de vue sanitaire, la plupart des puits visités dans le secteur étant de simples trous, vovo. Si de nouveaux puits sont implantés, il faudra tenir compte du retour d'expérience de la population par rapport aux vovo déjà existants notamment pour implanter le futur puits dans une zone de moindre salinité.

L'utilisation des eaux en provenance du socle (accessibles par forage profond au sud d'Ambosary, présentes à l'affleurement dans la région de Behara) sera à éviter du fait de leur minéralisation importante. Il en est de même pour l'aquifère des grès néogènes.

Pour le village de Sampona, étant donné la difficulté d'accès aux eaux souterraines et superficielles, en dernier recours, la mise en place d'impluvium peut être envisagée, et ce bien que nous considérons cette technique d'approvisionnement en eau très peu efficace en terme de coût-bénéfice. Cette méthode de captage des précipitations permettra de fournir ponctuellement un accès à l'eau douce aux habitants.

Le Tableau 3 synthétise les actions proposées concernant l'accès à l'eau pour les secteurs visités au niveau du projet Zoloke.

Tableau 3 : Plan d'action d'amélioration de l'accès à l'eau au niveau du projet Zoloke

VILLAGE OU FOKONTANY	DISPONIBILITE ACTUELLE DE L'EAU (NULLE / FAIBLE / MOYENNE / BONNE)	OBJECTIFS DES TRAVAUX D'ACCES A L'EAU	INVESTISSEMENTS (IMPORTANTES / MOYENS / FAIBLES)	TRAVAUX A REALISER EN PRIORITE	PROBABILITE DE REUSSITE DES TRAVAUX
Ankara	Bonne	Sécurisation sanitaire de l'accès à l'eau.	Moyens	Réalisation de nouveaux puits dans les règles de l'art	5/5
Tanandava	Faible (Terrains peu perméables)	Sécurisation sanitaire de l'accès à l'eau. Positionner les puits en dehors des zones d'ensablement (Figure 42)	Moyens	Aménagement des puits dans la zone de maraichage	5/5
Sampona	Nulle	Donner accès à l'eau aux populations	Importants Sans garantie de résultats !	Forage à environ 200 mètres Impluvium en dernier recours	1/5
Behara	Bonne	Créer des points d'eau dans les zones de maraichage	Moyens	Planter et réaliser de nouveaux puits dans les règles de l'art	5/5
Ankiriky	Moyenne	Créer des points d'eau dans les zones de maraichage	Moyens	Planter et réaliser de nouveaux puits dans les règles de l'art	5/5



Figure 42 : Ensablement en cours des parcelles de maraîchage et des puits de Tanandava.

4.2. Le projet SOHAVELO :

4.2.1. Situation du projet

Il s'agit du projet pour lequel la situation vis-à-vis de l'eau est la plus critique. Lors de la mission d'avril 2016 alors que nous étions en début de saison sèche, quasiment aucune eau ne pouvant être considérée comme douce n'a été rencontrée. Plusieurs villages visités n'ont pas d'accès à l'eau avec des situations comparables à celle de Sampona, décrite ci-avant (§4.1.3). A la différence du projet Zoloke, le fleuve qui draine cette région, le Manambovo ne conserve pas un débit tout au long de l'année. Lors de la mission, il était à sec à la hauteur de Tsihombe (Photo de couverture) mais conservait encore un écoulement de surface à quelques centaines de mètres de son embouchure. Cette caractéristique hydrologique locale fait que les apports d'eau douce dans cette zone du Grand Sud, sont moins importants qu'au niveau du projet Zoloke. Dans cette région et, nous semble-t-il, de manière plus répandue qu'ailleurs dans le Grand Sud les mares temporaires qui apparaissent suite aux épisodes pluvieux sont utilisées comme source d'approvisionnement en eau (région de Nikoly par exemple). Ce type d'approvisionnement en eau ne constitue pas un mode d'approvisionnement durable et permettant un développement raisonné des projets menés par AVSF. Ce type d'usage doit être réservé au bétail et à l'irrigation des cultures, d'autres sources d'approvisionnement devant être trouvées pour les populations humaines. Cette séparation claire des usages est un gage de garantie d'un accès sécurisé à l'eau en termes sanitaires.

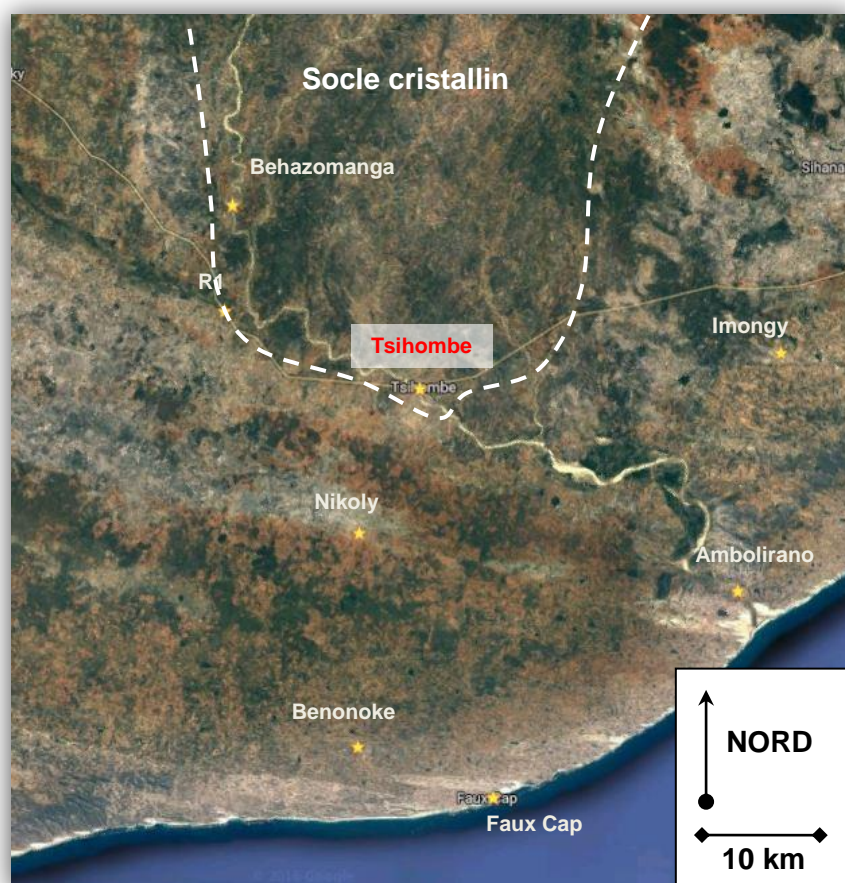


Figure 43 : Détail des points d'eau visités dans la région de Tsihombe (Google Map®)

4.2.2. Ressources en eaux identifiées

- Nappe de dunes vives (voir §3.2.3.3 et 4.1.2) ;

Il s'agit d'une ressource très exploitée à l'échelle de cette zone d'intervention. La salinité de cette nappe varie beaucoup. Elle est comprise entre 1,5 et 2,5 g.L⁻¹ à Faux Cap. Elle peut atteindre 12,5 g.L⁻¹ plus à l'ouest sur la plage (mesure effectuée à Benonoke sur un échantillon collecté par les villageois sur la plage). Les fortes salinités sont atteintes dans les zones où le cordon dunaire est très restreint en termes de surface. En effet, ce sont ces dunes qui collectent l'eau douce des pluies et permettent la formation de la nappe d'eau qui flotte sur l'eau salée plus dense. Lorsque par exemple une falaise proche de la ligne de rivage limite la formation des dunes, le bassin versant est donc réduit, la quantité d'eau douce plus faible et la salinité plus importante.

Cette nappe, au niveau des portions de la plage les plus favorables, est en mesure de constituer une ressource en eau intéressante pour les populations vivant à proximité directe. Cependant, elle ne peut constituer la seule et unique ressource de tout une partie de la région des dunes fixées (Plateau Karimbolien et Grand dune) tel que c'est parfois le cas actuellement. En effet, cette ressource est limitée et plus elle

est utilisée, plus elle va voir sa salinité augmenter. Afin de préserver sa qualité, une séparation des usages entre l'élevage et l'approvisionnement en eau de boisson doit être mise en place. La présence de bétail à proximité directe des puits dans ce contexte d'extrême vulnérabilité de la nappe (terrains très perméables, faible profondeur de la nappe) induit inévitablement une pollution de la ressource en eau.

- Grès néogènes :

Notre interprétation des données disponibles nous amène à penser que les forages réalisés à Imongy captent les grès néogènes juste avant leur disparition un peu plus au sud liée à une phase d'érosion ancienne (ancienne zone de rivage en Figure 12, marqué aujourd'hui par la présence du lac salé lhodo). Ces grès sont présents sur le socle de manière non continue. Plus au nord et plus au sud, ils ont été érodés. Contrairement à la région d'Amboasary leur salinité est faible (300 mg.l^{-1} de NaCl mesuré dans le forage réalisé récemment par l'UNICEF, prélèvement F1). Les forages ont une profondeur de 30 mètres. Le puits datant de 1940 situé lui plus au nord est moins profond ; sa salinité est plus élevée ($1,2 \text{ g.l}^{-1}$). Il est situé en bordure d'une zone très dense de vovo. Certains sont abandonnés et d'autres encore en activité. Cette zone « de cratères » (Figure 44) est sans doute en partie responsable de l'influence anthropique mise en évidence au § 3.5.2. En effet, ces trous béants atteignant la nappe peuvent être le vecteur direct de pollutions notamment en période de pluie lorsque la zone est inondée. Une première action de préservation de la qualité de l'eau des forages passerait par le rebouchage de cette zone de vovos, la qualité de l'eau étant bien meilleure au niveau des forages récents.

Les caractéristiques qui viennent d'être décrites font des grès néogènes une ressource intéressante et exploitable localement.



Figure 44 : Vue Google Map® de la zone de vovo de Imongy située en amont de la zone de captage est probablement un facteur aggravant de la qualité de l'eau.

VERSION PROJET

- Socle cristallin

Tsihombe est construit sur le socle cristallin (Figure 43). Sur les hauteurs au niveau d'une école, une pompe capte l'eau de l'aquifère principal dans cette zone. La minéralisation mesurée atteint $2,3 \text{ g.L}^{-1}$ de sel (NaCl) mais d'autres minéraux sont présents en quantité étant donné les mesures physico-chimiques mesurées sur ce point d'eau (conductivité électrique = $7,9 \text{ ms.cm}^{-1}$). Cette minéralisation est typique d'une eau en provenance du socle cristallin. (addition des processus 1 et 2 du §3.5.5). Cette ressource est uniquement atteignable par forages, étant donné la dureté des roches cristallines. Il est nécessaire que le forage intercepte une zone de fracture drainant de l'eau pour que le point d'eau fonctionne. Des puits peuvent être réalisés mais ils nécessitent la présence d'une zone d'altération du socle comme présenté en Figure 26 où l'eau s'accumule. Ces dépôts d'altération peuvent être creusés avec des moyens traditionnels.

- Manambovo sous écoulement et nappe alluviale

Sa salinité est moindre que celle du socle. Les mesures effectuées dans le sous écoulement à Behazomanga varient de 150 à 1000 mg.l^{-1} de NaCl , à Tsihombe elle est de $1,2 \text{ g.l}^{-1}$ et atteint 1 g dans le lit du cours d'eau proche de l'embouchure au niveau d'Ambolirano. A Tsihombe les indices d'anthropisation mis en évidence au §3.5.2 ne font aucun doute. En effet, à la sortie de la ville le lit asséché du Manambovo (photo couverture) est le lieu d'une somme de pratiques (abreuvement du bétail, lessive, toilette des populations, dépotoir, extraction de sable, rejet d'eaux usées, etc...) qui dégradent fortement la qualité de l'eau du sous écoulement capté à quelques mètres de là par la Jirama pour alimenter Tsihombe en eau.

Cette ressource est exploitable à Behazomanga et Ambolirano. Dans le premier village, un dispositif de captage du sous écoulement permettrait de disposer d'une ressource sécurisée.

A Ambolirano, la réalisation de puits dans la nappe alluviale du Manambovo en lieu et place des trous actuellement utilisés permettrait de sécuriser l'accès à l'eau dans les zones de maraîchage.

- Sables roux :

Cette formation qui est la plus superficielle recouvre l'ensemble des autres formations géologiques. Lorsque ses propriétés aquifères le permettent elles peuvent être le siège d'une nappe d'eau souterraine. Cette ressource est exploitée dans de nombreux villages mais les débits fournis sont faibles. C'est le cas des puits visités à Nikoly. Cette ressource nous paraît limitée et trop incertaine pour être conseillée. Pour la zone de Nikoly, une prospection par sondage pourrait être envisagée afin d'identifier la présence ou non des grès néogènes en profondeur ;

4.2.3. Synthèse

De la même manière que pour le projet Zoloke l'eau douce drainée par le Manambovo est à valoriser. Pour les villages distants du cours d'eau et se situant sur le socle, des forages captant les zones de fractures drainantes ou la nappe de l'arène d'altération sont envisageables. Une seule incertitude demeure concernant le degré de salinité qui d'après *Rabemanana (2005)* est directement lié au débit disponible. Les faibles débits étant associés aux minéralisations importantes et inversement.

Pour les villages situés dans la zone de présence des grès néogènes cette ressource doit être envisagée. Enfin, la nappe des dunes vive est une ressource intéressante mais qui ne doit pas être surexploitée et doit faire l'objet d'une protection accrue. Son intérêt n'en sera que plus fort pour les populations vivant à proximité directe.

Tableau 4 : Plan d'action d'amélioration de l'accès à l'eau au niveau du projet Sohavelo

VILLAGE OU FOKONTANY	DISPONIBILITE ACTUELLE DE L'EAU (NULLE / FAIBLE / MOYENNE / BONNE)	OBJECTIFS DES TRAVAUX D'ACCES A L'EAU	INVESTISSEMENTS (IMPORTANTES / MOYENS / FAIBLES)	TRAVAUX A REALISER EN PRIORITE	PROBABILITE DE REUSSITE DES TRAVAUX
Benonoke	Nulle	Rendre l'eau accessible même saumâtre	Importants	Réaliser un nouveau forage Cible : l'aquifère exploité précédemment (Néogène ?)	3/5
Faux Cap	Moyenne	Sécuriser la ressource et la rendre durable	Faibles	Rénover et protéger les puits existants Séparer le bétail de l'alimentation humaine	4/5
Ambolirano	Moyenne	Donner accès à l'eau de la plaine alluviale	Moyens	Convertir les trous d'eau (vovo) en puits	5/5
Nikoly	Faible	Substituer l'apport d'eau des mares temporaires	Importants	Forage (cible : Néogène) Si échec : Aménagement de puits à faible profondeur	3/5
Behazomanga	Faible	Sécuriser l'accès à l'eau	Importants	Mise en place d'un captage du sous- écoulement du Manambovo	5/5

4.3. Le projet FANANTENANA :

4.3.1. Situation du projet

Ce projet se localise dans une zone de transition d'un point de vue géologique. La zone d'intervention s'étend tout le long de la bordure est du Plateau Mahafaly dans la zone de transition entre le socle cristallin, le socle sédimentaire ancien et les terrains sédimentaires du Jurassique et du Crétacé. Les grès néogènes se sont déposés à la zone de contact entre ces terrains, les terrains de la bande côtière sont absents ici. L'ensemble est recouvert par les sables roux qui masquent les limites entre les différentes formations géologiques. Cette configuration particulière a rendu difficile l'identification claire des terrains constituant le sous-sol de certains villages. Certaines de nos interprétations pourront donc être teintées d'une forte incertitude la compréhension du contexte hydrogéologique étant rendu délicate.

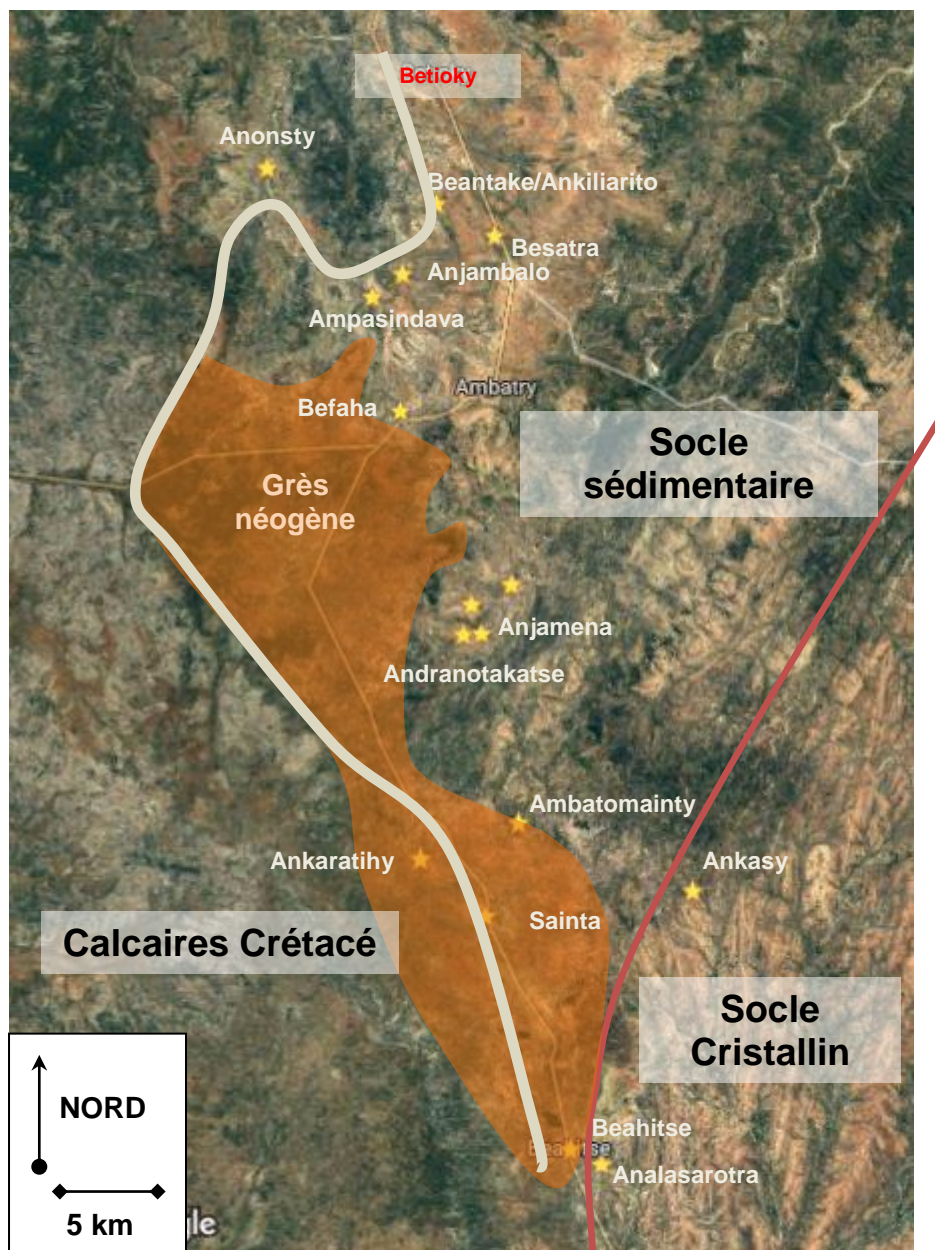


Figure 45 : Détail des points d'eau visités dans la région de Betioky et Beahitse (Google Map®) avec localisation des principales limites géologiques.

Il s'agit du projet étudié au cours de la mission où la disponibilité de l'eau est la meilleure. Pratiquement chaque village ou fokontany visité dispose de plusieurs puits. La position plus reculée à l'intérieur des terres, l'altitude et la proximité des reliefs peuvent être une explication à l'impression générale que la région donne d'être plus humide. A plusieurs reprises le matin des brumes et brouillards ont été observés ainsi que la présence de rosée. C'est la seule zone de projet du Grand Sud où ces phénomènes ont été observés. Ceci témoigne d'une humidité ambiante plus élevée et d'une chute des températures plus importante la nuit. Egalement, le mois de mars 2016 a été très pluvieux dans la région comparé aux autres régions du Grand sud.

4.3.2. Ressources en eaux identifiées

- Aquifère du socle ;

Il concerne la partie sud-est de la zone d'intervention du projet. Le socle est réellement exploité à Ankasy via deux forages de 58 et 84 mètres et probablement au niveau du forage de Beahitse (75 mètres). La minéralisation de ces forages est modérée environ 850 mg.l^{-1} de NaCl pour Ankasy et 470 mg.l^{-1} pour Beahitse. D'après nos investigations la minéralisation de ces eaux est liée aux interactions eau/roche lors de la circulation de l'eau dans les roches cristallines à laquelle s'ajoutent des processus de précipitation/recristallisation des apports marins en sub-surface. Nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour déterminer avec certitude l'horizon capté par le forage de Beahitse étant donné que ce village se localise au contact entre les grès néogènes et le socle et que l'ensemble est recouvert par les sables roux. Cependant étant donné la profondeur du forage, il est très probable qu'il atteigne le socle.

Cette ressource pourrait être également envisagée pour le village de Analasarotra (Figure 45). Dans ce village, le socle est à l'affleurement. L'alimentation en eaux se fait dans la rivière équipée de deux barrages successifs en plutôt bon état. La minéralisation à faible profondeur semble élevée. Un forage entre 50 et 100 mètres pourrait être réalisé comme Beahitse et donnerait probablement des résultats intéressants. Cette ressource pourra être complétée nous le verrons plus tard par le captage du sous-écoulement de la rivière.

Enfin, le socle pourrait constituer une ressource pour le village d'Ankaratihy, seul village dépourvu de point d'eau, visité dans la zone d'intervention du projet Fanantenana. Ce village est construit sur les calcaires de l'Eocène (Figure 47). Comme évoqué au §3.2.3.1., la présence de ces roches très perméables en surface a pour effet d'augmenter la profondeur de la nappe. Ces calcaires reposent ici directement sur le socle (Figure 45 et Figure 46). Nous sommes en bordure du plateau Mahafaly, l'épaisseur des calcaires doit donc être raisonnable. Il paraît donc possible de capter soit les écoulements du socle en traversant les calcaires par forages soit de capter l'écoulement d'eau qui est probablement présent à la base de ces roches perméables mais en quantité moindre que dans le socle. La réalisation d'un forage de 50 à 100 mètres devrait être suffisante (Figure 46).

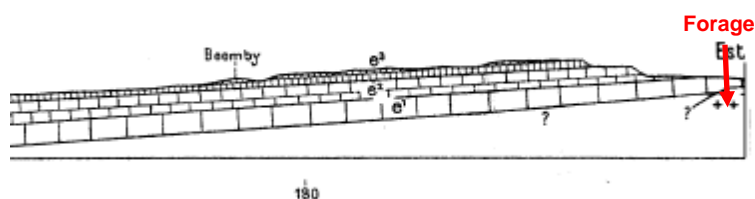


Figure 46 : Coupe géologique Est-Ouest passant à proximité d'Ankaratihy avec position possible d'un forage



Figure 47 : Affleurement de roche calcaire (Eocène) confirmé par son effervescence au vinaigre.
© A.Charmoille

- Sables roux :

Cette formation qui est la plus superficielle recouvre l'ensemble des autres formations géologiques mais de manière non homogène. Elle est présente en épaisseurs variables mais peut également être absente. Lorsque ses propriétés aquifères le permettent, elles peuvent être le siège d'une nappe d'eau souterraine. Le plus souvent, c'est la contraste de perméabilité entre les sables et la formation sous-jacente (ici socle ou grès néogène) qui permet la formation d'une nappe (Figure 45). Cette ressource est exploitée par des puits de faible profondeur à Beahitse et Santa. Cette formation permet également dans les zones où elle est la moins perméable la formation de mares temporaires, qui stockent l'eau de pluie. La salinité de ces puits est faible (entre 100 et 800 mg.l⁻¹) ce qui en fait un ressource de bonne qualité. La salinité présente provient de processus de concentration en sub-surface par la dissolution/précipitation.

Cette ressource ne permet cependant pas de capter des débits importants et les puits ont une capacité de production limitée (témoignage à Santa par exemple) ; il pourrait donc être intéressant de capter une ressource plus profonde comme le socle par exemple lorsqu'il est présent à des profondeurs accessibles (Beahitse). Pour Santa, il semblerait que les sables roux recouvrent les grès néogènes pour lesquels nous n'avons pas recueilli de données mais présentent potentiellement des qualités aquifères intéressantes.

- Aquifère des grès de Betioky (Grès de l'Isalo)

Nous sommes en présence ici d'un aquifère d'échelle régionale. Il intéresse l'ensemble des villages situés au nord d'Ambatomainy et toute la région au sud de Betioky. Ce village se situe au contact entre les grès de l'Isalo (au nord) et les grès néogènes au sud (Figure 48) (Figure 45).



Figure 48 : Contact entre les grès de l'Isalo (premier plan) et grès néogènes oxydés de la cuirasse ferrugineuse, rochers en arrière plan. © A.Charmoille

Bien que la formation des grès de l'Isalo soit très étendue à l'échelle de Madagascar, l'aquifère de Betioky dépend uniquement de la pluviométrie locale, c'est-à-dire que son bassin versant est local (ANDEA, 2010). Les grès de l'Isalo et leur altération en sable dans cette région donne de bon débits mais aussi par endroit des minéralisations importantes (ANDEA, 2010) comme à Anjamena (entre 7 et 10 g.l⁻¹) Ce sont les minéralisations les plus importantes mesurées à l'échelle du projet). Ces minéralisations importantes sont probablement le fait d'arrivées d'eaux profondes. Les ouvrages réalisés dans ces formations devront donc s'écarter au maximum des grandes failles régionales qui sont vectrices d'eaux minéralisées (Guyot, 2002). Les phénomènes de recristallisation/précipitations sont aussi présents en sub-surface comme mis en évidence au niveau du village de Besatra et Beantake (Figure 38).

Les forages doivent être privilégiés pour exploiter cette ressource (comme à Ankiliarivo) car le plus souvent les puits ne permettent de capter que des écoulements de sub-surface de qualité très variable (Andranotakatse et Anjamena ou encore Ampasidava)

- Les dépôts alluviaux

Comme pour les deux autres projets l'exploitation de cette ressource recèle un intérêt. Deux villages disposent déjà de retenues d'eau construites plus ou moins

VERSION PROJET

récemment, 1968 pour Anjambalo et 1995 et 2012 pour Analasarotra. Ces ouvrages permettent de maintenir un stock d'eau en surface et dans le sous-écoulement de la rivière. Des dispositifs de captage du sous-écoulement pourraient être installés en amont de ces ouvrages dans les zones connues par les villageois comme les moins minéralisées.

Le village d'Anonsty peut également faire l'objet d'une exploitation du sous-écoulement de la Menarandroy (Figure 50). Le village situé à l'ouest de Betioky est comme Ankaratihy localisé sur les terrains jurassiques et crétacés du plateau Mahafaly (Figure 49). Nous ne pensons pas que les ouvrages présents actuellement, peu profonds exploitent ces terrains. Ils captent probablement les alluvions déposés par la rivière qui se mélangent aux sables amenés par le vent qui recouvrent les terrains plus profonds et forment une nappe exploitable.

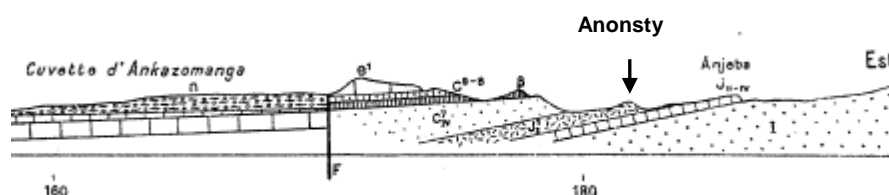


Figure 49 : Coupe géologique réalisée à l'ouest de Betioky et passant à proximité de Anonsty



Figure 50 : Trou creusé par les villageois pour capter le sous écoulement de la rivière (Anonsty)
© A.Charmoille

Un captage du sous écoulement de la rivière peut donc être proposé ici en complément des deux puits existant. A plus long terme, si la demande est importante un forage atteignant les grès de l'Isalo peut-être envisagé (Figure 49).

4.3.3. Synthèse

Bien que situé dans une zone plus riche en eau, les conditions d'accès à l'eau au niveau du projet Fanantenana restent difficiles principalement du fait du caractère peu adapté des infrastructures. Comme pour les autres projets, le captage du sous-écoulement de certains oueds s'avèrerait intéressant pour quelques villages. Le socle est également une ressource intéressante, à condition d'y accéder à l'aide de forages. Enfin l'aquifère des grès de l'Isalo rencontré uniquement dans la zone d'intervention de ce projet constitue une ressource régionale majeure. Comme pour

VERSION PROJET

le socle, l'accès par forage est à privilégier tout en ayant conscience que des zones à forte minéralisation peuvent être rencontrées.

Tableau 5 : Plan d'action d'amélioration de l'accès à l'eau au niveau du projet Sohavelo

VILLAGE OU FOKONTANY	DISPONIBILITE ACTUELLE DE L'EAU (NULLE / FAIBLE / MOYENNE / BONNE)	OBJECTIFS DES TRAVAUX D'ACCES A L'EAU	INVESTISSEMENTS (IMPORTANTES / MOYENS / FAIBLES)	TRAVAUX A REALISER EN PRIORITE	PROBABILITE DE REUSSITE DES TRAVAUX
Beahitse	Bonne	Pérenniser l'accès	Moyen à importants	Entretien des ouvrages + réalisation nouveaux forages	5/5
Analasarotse	Moyenne	Sécuriser la ressource et la rendre durable	Importants	Captage sous- écoulement Ou forage profond dans le socle	4/5
Ankasy	Bonne	Aucun	Aucun	-	-
Sainta	Moyenne	Sécuriser la ressource et la rendre durable	Moyen à importants	Réaliser de nouveaux puits ou forages	4/5
Ambatomainty	Moyenne	Pérenniser l'accès	Moyen	Améliorer les installations	5/5
Ankaratihy	Nulle	Donner accès à l'eau dans le village	Importants	Réalisation de 3 forages, objectif : le socle ou la base des calcaires	4/5
Befaha	Moyenne	Améliorer l'accès	Moyen	Améliorer les installations	5/5

VERSION PROJET

Andranotakatse	Faible	Créations puits ou forages	Moyens à importants	Réaliser de nouveaux puits ou forages plus profonds	3/5
Anjamena	Faible	Améliorer l'accès	fort	Nouveaux forages	4/5
Besatra	Bonne	Pérenniser l'accès	Faibles	Entretien et modernisation des ouvrages	5/5
Ankiliarivo/ Beantake	Bonne	Pérenniser l'accès	Faibles	Entretien des ouvrages	5/5
Anjambalo	Moyenne	Améliorer l'accès	Moyen à fort	Captage sous-écoulement	4/5
Ampasindava	Moyenne	Améliorer l'accès	fort	Nouveaux forages	4/5
Anontsy	Bonne	Pérenniser l'accès	fort	Captage sous-écoulement	5/5

5. Améliorer les conditions d'accès à l'eau

5.1. Avantages et inconvénients des différents types de ressources

Les puits traditionnels, les vovo ne permettent pas de puiser l'eau à une profondeur suffisante, la ressource atteinte voit donc sa salinité augmenter rapidement en même temps que le débit disponible décroît au fil de l'utilisation du puits. Ce type de d'exploitation ne permet pas une gestion sur le long terme de la ressource et l'absence totale d'aménagement de ces puits ne garanti pas une qualité de l'eau adaptée à la consommation humaine.

Dans le même ordre d'idée, l'utilisation des mares temporaires ou autre ranovato est à limiter autant que possible et à réserver à l'abreuvement du bétail. De notre point de vue, quand cela s'avère possible, l'utilisation de l'eau souterraine est à privilégier. La tendance naturelle des populations leur fera préférer les eaux de surface (ressenti plusieurs fois lors de la mission) en lien direct avec la pluie. Mais les eaux souterraines constituent la ressource la plus disponible et la mieux protégée des impacts humains, bien qu'elle ne soit pas exempte de pollution et sensible aux activités en surface. C'est pourquoi, cette ressource doit être exploitée par l'intermédiaire de puits ou forages réalisés dans les règles de l'art afin que ces derniers ne soient pas le vecteur de contaminations ou pollutions. Pour chaque projet les ressources en eaux disponibles ont été listées au § 4. Lorsque l'on se rapproche de 100 mètres de profondeur, la réalisation de travaux de forage devra faire l'objet d'une étude poussée en amont. En effet à cette profondeur, l'énergie humaine via les pompes à main ne suffit plus pour extraire l'eau et une énergie complémentaire doit être apportée sur le site. S'est le cas par exemple à Ankasy (Projet Fanantenana, Betioky) où une centrale solaire a été installée pour pomper l'eau des deux forages. Ce type d'installation nécessite un entretien régulier par des personnes qualifiées.

Enfin, la collecte des eaux de pluie doit être favorisée à l'échelle individuelle, via les toitures des habitations quant elles le permettent. En saison des pluies ce type d'installations peut constituer une ressource en eau douce non négligeable lorsqu'un stockage est organisé à partir de citernes. Cependant nous ne recommandons pas, sauf cas très exceptionnel (envisageable à Sampona) la réalisation d'impluviums à l'échelle de villages. En effet, ces ouvrages ne produisent une eau consommable qu'une partie de l'année. Si l'on considère l'investissement nécessaire, les coûts d'entretien en temps et en argent, il apparaît assez rapidement que ses installations ont un rendement coût-bénéfice très faible et ne constitue pas un investissement durable dans la gestion de la ressource en eau. Ajouté à ceci les installations qui ont pu être visitées laissent supposer des vitesses de dégradation importantes.

Enfin, dans certaines zones où seule de l'eau très minéralisée est disponible, la mise en place de distillateurs solaires peut être envisagée pour la consommation humaine.

5.2. Bonnes pratiques de réalisation et d'entretien des puits ou forages

Nous ne rentrerons pas ici dans une description technique détaillée de la réalisation, dans les règles de l'art, d'un puits villageois. AVSF Madagascar a déjà en sa possession un document réalisé par *Rejela en 2004* qui expose de manière très claire les bonnes pratiques dans ce domaine, même si les travaux réalisés plus tard sur le projet Fanantenana n'ont pas respecté ces règles. Le web regorge également

VERSION PROJET

de ressources sur ce sujet. Nous nous concentrerons donc sur les points sensibles qui ont put être observés lors de la mission de terrain et qui nous paraissent essentiels à respecter pour exploiter une nappe d'eau souterraine dans de bonnes conditions afin de garantir la qualité de l'eau exploitée et la durabilité de l'ouvrage.

Outre la qualité désastreuse des pompes (Figure 53) installées dans les villages d'intervention du projet Fanantenana, qui depuis ma visite ont été remplacées, et quelques problèmes de qualité des bétons ou des matériaux utilisés, trois points d'attention méritent d'être relevés quant aux problèmes identifiés lors de la mission :

- Les eaux stagnantes à proximité des ouvrages :

L'eau qui se répand au sol lors du puisage doit absolument être évacuée. Si ça n'est pas le cas comme sur la Figure 51, il peut se former un bourbier dont le filtrat va s'infiltrer directement le long de la colonne du puits à l'extrados et va s'introduire directement dans le puits à la faveur de la moindre faiblesse de l'ouvrage. On a ainsi contamination directe des eaux prélevées.



Figure 51 : Eaux stagnantes autour du puits réalisé dans les années 40 à Imongy (Projet Sohavelo) © A.Charmoille

- La tenue des terrains ;

Les parois des puits ne doivent pas être laissées nues. Un cuvelage doit être installé sur toute la hauteur, cimenté dans sa partie haute aux terrains et connecté à la dalle en surface. L'objectif de cette structure est double :

VERSION PROJET

- assurer la tenue mécanique des terrains qui influence directement la durée de vie du puits ;
- empêcher toute introduction d'eau contaminée depuis la surface.

Dans la zone d'arrivée d'eau principale, ce cuvelage sera crépiné c'est-à-dire troué et entouré de gravier afin de créer un massif filtrant autour de la zone de captage de l'eau.

- Présence de bétail à proximité des ouvrages d'alimentation en eau :

Au niveau de nombreux points d'eau visités, le bétail (Zébus, volaille, caprins) est présent à proximité directe des puits ou forages. Ce type de situation est à éviter et dans la mesure du possible les points destinés à la consommation humaine doivent être isolés de ceux destinés aux animaux. La présence de bétail couplée à l'existence d'eaux stagnantes est une situation critique en termes de contamination de la ressource. Les ouvrages tels que les puits ou les forages étant les vecteurs possibles de pollutions vers les nappes.

- Synthèse :

Il ressort des observations faites lors de la mission de terrain que les ouvrages les mieux conçus sont ceux réalisés par le PNUD (Figure 52). Une plaque indique sur chaque point d'eau les caractéristiques de l'ouvrage : profondeur, niveau statique de l'eau, date de réalisation, les pompes sont de qualité ainsi que les matériaux utilisés. Un entretien régulier est réalisé avec changement des pièces d'usure. Ces ouvrages sont un bon exemple de ce qu'il faut faire.

La conception des puits réalisés par AVSF est bonne mais c'est dans la réalisation des travaux que des problèmes sont intervenus, dans le choix des matériaux et des équipements notamment. Depuis ma visite certains de ces points ont été solutionnés, les pompes non fonctionnelles ont été remplacées (Figure 53)



Figure 52 : Forage réalisé par le PNUD à Anontsy avec plaque de marquage des informations principales du forages. © A.Charmoille



Figure 53 : A. Pompe non fonctionnelle de mauvaise conception B. et C. Mauvaise formulation du ciment le rendant friable induisant des problèmes d'étanchéité et de solidité des ouvrages D. Utilisation d'un goulot de bouteille de soda en guise de tuyau d'évacuation © A.Charmoille

5.3. Désalinisation par distillation solaire

Un des constats de l'étude qui est détaillé dans les pages ci-avant est l'impossibilité dans certaines zones de disposer d'eau douce raisonnablement consommable, c'est-à-dire respectant les normes de potabilité proposées par l'OMS du fait de la forte salinité qui est liée à la présence de chlorure de sodium mais également d'autres matières dissoutes issues de la dissolution des roches. Des installations de désalinisation de grands volumes d'eau ne sont pas envisageables dans le contexte du Grand Sud étant donné l'énergie nécessaire à leur fonctionnement.

Par contre des systèmes à petite échelle, utilisant l'énergie du soleil, existent. Ce type de système sera destiné uniquement à la consommation humaine. Certains sont commercialisés prêts à l'emploi, à titre d'exemple, la société Watercone® produit un système simple et adapté à un contexte rural tel que celui que l'on trouve dans le sud malgache (<http://www.watercone.com/product.html>). Ce type de système est capable de produire 1,5 litre d'eau douce par jour et par évaporateur à partir d'eau de mer. Il existe plusieurs systèmes de ce type dans le commerce.

Des dispositifs de distillation solaire artisanaux peuvent être construits en local. De nombreux modèles existent dont certains très rudimentaires et nécessitant peu de matériel, ces dispositifs sont temporaires et peuvent être utilisés en secours ou lorsque la population se déplace (Figure 54A). Ce système de puits solaire fonctionne en exploitant directement l'humidité du sol ou en évaporant un volume d'eau salée placé dans un récipient au fond du trou. D'autres modèles peuvent être construits à l'échelle d'une famille, d'un hameau ou d'un village (Figure 54B).

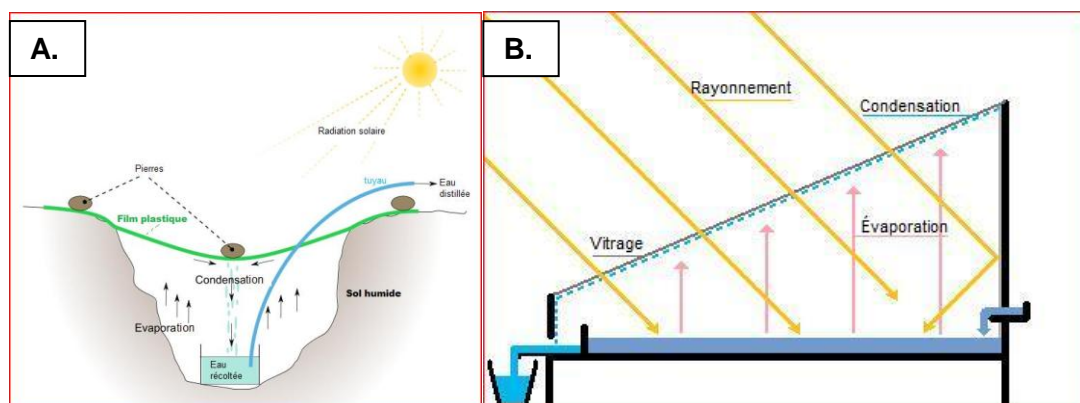


Figure 54 : Deux types de distillateurs solaires utilisables facilement dans le Grand Sud /A. Puits solaire /B. distillateur solaire http://fr.wikipedia.org/wiki/Distillateur_solaire

En effet, suivant leur dimensionnement, ils seront en mesure de fournir en eau douce journalière une personne ou un groupe de personnes. Afin de garantir l'efficacité de ces dispositifs il faut veiller aux points suivants :

- orienter correctement le dispositif et notamment veiller que l'angle du vitrage avec l'horizontale soit adapté à la latitude du lieu. Ce paramètre va directement influencer la capacité de distillation du dispositif ;
- le volume d'air entre le vitrage et le fluide à distiller doit également être le plus réduit possible. L'intérêt de réduire ce volume d'air et qu'il va se saturer plus vite en eau et la condensation sur la vitre va débuter plus tôt, le système va donc être plus productif ;
- veiller à peindre en noir le bac à eau salée, certains ajoutent même du charbon de bois dans l'eau pour améliorer l'augmentation de température ;

Un certain nombre de travaux scientifiques s'intéressent aux paramètres contrôlant l'efficacité des distillateurs solaires et notamment l'angle à donner au vitrage (*Hashim et al., 2010 ; Jabbar et Khalifa, 2011 ; Palak et al., 2014 ; El-Maghlany, 2015*). Ces auteurs proposent d'introduire deux pentes sur le vitrage et d'autres améliorations destinées à améliorer l'efficacité.

Nous ajouterons à ces recommandations très techniques qu'il serait préférable que les systèmes qui seront développés soient légers et mobiles et puissent être déplacés. En effet ceci les rendra plus efficace et plus durables. Le risque, pour un système fixe, est de se détériorer rapidement. Avec un système mobile du type de ceux en photo dans l'article de *Hashim, 2010* (Figure 55), le dispositif peut être déplacé en cas d'évènement climatique exceptionnel et surtout si un autre usage du lieu est décidé et qu'il est incompatible avec la production d'eau de boisson, il suffira de déplacer le distillateur.



Figure 55 : Différents modèles de distillateurs solaire en test pour comparer leur efficacité
(Hashim et al., 2010)

Conclusions

Le travail réalisé en 2016 a débuté par une mission de terrain réalisée en avril. Cette phase de prospection *in situ* a ensuite été suivie de recherches bibliographiques notamment cartographiques. Plusieurs visites ont été effectuées au printemps et au début de l'été à Paris à la cartothèque CADIST Géosciences et Environnement de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC). Une fois les échantillons prélevés durant mission analysés, l'interprétation des résultats et leurs confrontations aux données bibliographiques, cartographiques et aux observations effectuées sur le terrain a été entreprise durant l'été et au début de l'automne. Ce travail s'est terminé par la rédaction du présent document.

L'intégration de l'ensemble des données collectées a permis d'identifier les différentes ressources en eaux présentes au niveau des zones d'intervention de l'ONG AVSF dans le Grand Sud de Madagascar. Un travail a également été réalisé sur les mécanismes de salinisation qui affectent ces ressources. Il apparaît des situations contrastées suivant les projets considérés, qui sont directement liées aux apports en eau douce disponibles via les cours d'eau s'écoulant depuis les régions du nord.

D'une manière générale la situation est critique vis-à-vis de la disponibilité de l'eau. La situation de certaines zones de la bande côtière est particulièrement préoccupante, notamment au niveau du plateau Karambolien, étant donné que l'altitude élevée de ces zones ne permet pas un accès aisé à l'eau souterraine et que les ressources du bord de mer se trouvent sur-exploitées et tendent à se saliniser.

Pour d'autres zones, des solutions ont pu être proposées afin de diversifier l'accès à la ressource en eau et la pérenniser. Dans certains cas les travaux proposés sont simples et de faible ampleur et constitueraient une réelle amélioration dans la mise à disposition de l'eau pour le développement du maraîchage et l'utilisation pour la consommation humaine.

Les plans d'action proposés nécessiteront bien entendu, pour les plus lourds, des travaux préalables de reconnaissance, notre approche étant restée très descriptive et qualitative, afin de confirmer les hypothèses proposées dans ce rapport et concevoir les futures infrastructures.

Cependant les pistes exposées dans ce document constituent une première base dans la structuration de la gestion de l'eau à l'échelle locale en vue de rendre cette ressource vitale, plus disponible et dans de bonnes conditions.

On touche ici à un autre problème qui ne peut être le fait d'initiatives isolées ou ponctuelles. Seule une approche qui intègre la gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants permettrait d'améliorer de manière substantielle l'accès à l'eau dans le Grand Sud de Madagascar mais ce travail n'est pas la mission d'une ONG comme AVSF, elle est à la charge de l'état Malgache !

Actuellement, la situation de l'accès à l'eau constitue un réel frein au développement d'autres activités permettant aux populations d'améliorer leurs conditions de vie quotidiennes. Pour certains se sont leurs conditions même de subsistance qui sont en jeu !

Bibliographie

AGENCE JAPONAISE DE COOPERATION INTERNATIONALE (JICA) (2006) *Etude sur l'approvisionnement en eau potable, autonome et durable dans la région du sud de la république de Madagascar*

ANDEA, (2003) *Schema Directeur de Mise en Valeur des Ressources en Eau du Grand Sud de Madagascar, Rapport, Autorite Nationale de l'Eau et de l'Assainissement, République de Madagascar.*

Aurouze, J. (1959). *Hydrogéologie du Sud de Madagascar. Thèse de Doctorat, Université Paris.*

Barbière, C. (2016) *El Nino plonge le sud de Madagascar dans la famine*, Euractiv.fr, 27 juin 2016 - <http://www.euractiv.fr/section/aide-au-developpement/news/el-nino-plonge-le-sud-de-madagascar-dans-la-famine/>

BATTISTINI, R., (1964). - *L'extrême-sud de Madagascar, étude géomorphologique, thèse d'Etat, Ed. Cujas, Paris, 636 p.*

BESAIRIE, H (1946) *La géologie de Madagascar en 1946 – Annales géologiques du service des mines – fascicule N° XII*

BESAIRIE, H et ABADIE, CH (1939) *Carte géologique de reconnaissance Feuille Ambovombe (626) JK 62.63 Echelle 1 :200 000*

BESAIRIE, H et ABADIE, CH (1938) *Carte géologique de reconnaissance Feuille Ampanihy (604) J.G 60.61 Echelle 1 :200 000*

BESAIRIE, H (1965) *Carte géologique de Madagascar : feuille du Sud. Echelle : 1/1.000.000 Service géologique de Madagascar, Tananarive*

BBC (2016) *Madagascar : 665 000 personnes en insécurité alimentaire*, 30 août 2016 - www.bbc.com/afrique/region-3721770

Charmoille (2016) *Accès à l'eau dans le Grand Sud de Madagascar. Note préliminaire et actions prioritaires pour les zones d'intervention de l'ONG AVSF*

El-Maghlany, W.M., (2015) *An approach to optimization of double slope solar still geometry for maximum collected solar energy*, Alexandria Eng. J., <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.06.010>

Guyot, L (2002) *Reconnaissance hydrogéologique pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride : Sud-Ouest de Madagascar. Thèse doctorale mécanique, thermique et génie civil Université de Nantes.*

Hashim A.Y., Al-Asadi, J.M., Taha Alramdhan, W.A. (2010) *An attempt to solar still productivity optimization; solar still shape, glass cover inclination and inner surface area of a single basin solar still, optimization. Basrah Journal of Science Vol.28(1),39-48, 2010*

Hsissou, Y., Mudry, J., mania, J., Lhoussaine, B., Chauve, P. (1999) *utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eau souterraine : exemple de la plaine du Souss (Maroc) C.R. Acad. Sci. Paris, sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetray sciences 328, 381-386*

Jabbar, A, Khalifa, N. (2011) *On th effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes. Energy Conversion and Managemenet 52 (2011) 431-436*

VERSION PROJET

JICA (2006) *Étude sur l'approvisionnement en eau potable, autonome et durable dans la région sud de la république de Madagascar / rapport Final*

Lachassagne, P et Wyns, R., (2005) *Aquifères de socle : nouveaux concepts Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau*, BRGM.

Moat, J., Du Puy, D. (1997), *Simplified Geology of Madagascar* Royal Botanic Gardens, Kew. London.

Palak, P.; Ajayraj S S.; Umang R S.; Ashish R P. (2014) *Review to Increase the Performance of Solar Still: Make It Multi Layer Absorber* International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication ISSN: 2321-8169 Volume: 2 Issue: 2

Rabemanana, R S. Violette, G. de Marsily, H. Robain, B. Deffontaines, P. Andrieux, M. Bensimon, A. Parriaux, (2005) *Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar*, Journal of Hydrology, Volume 310, Issues 1–4, 1 Pages 143-156, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.025>.

RFI Afrique (2016) *Madagascar : le pays traverse une crise alimentaire critique*, 23/09/2016, <http://www.rfi.fr/afrique/20160923-madagascar-president-famine-alimentation-aide-humanitaire-onu-assemble-generale>

Rejela, A O. T. (2014) *Diagnostic technique et organisationnel des points d'alimentation en eau, dans les fokontany de quatre communes du Plateau Mahafaly – Agronomes et Vétérinaires Sans Frontière*

Seguin, J.J. (2005) *Projet Réseau SIG-Afrique carte géologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 million BRGM/RP – 54404 – FR décembre 2005*.

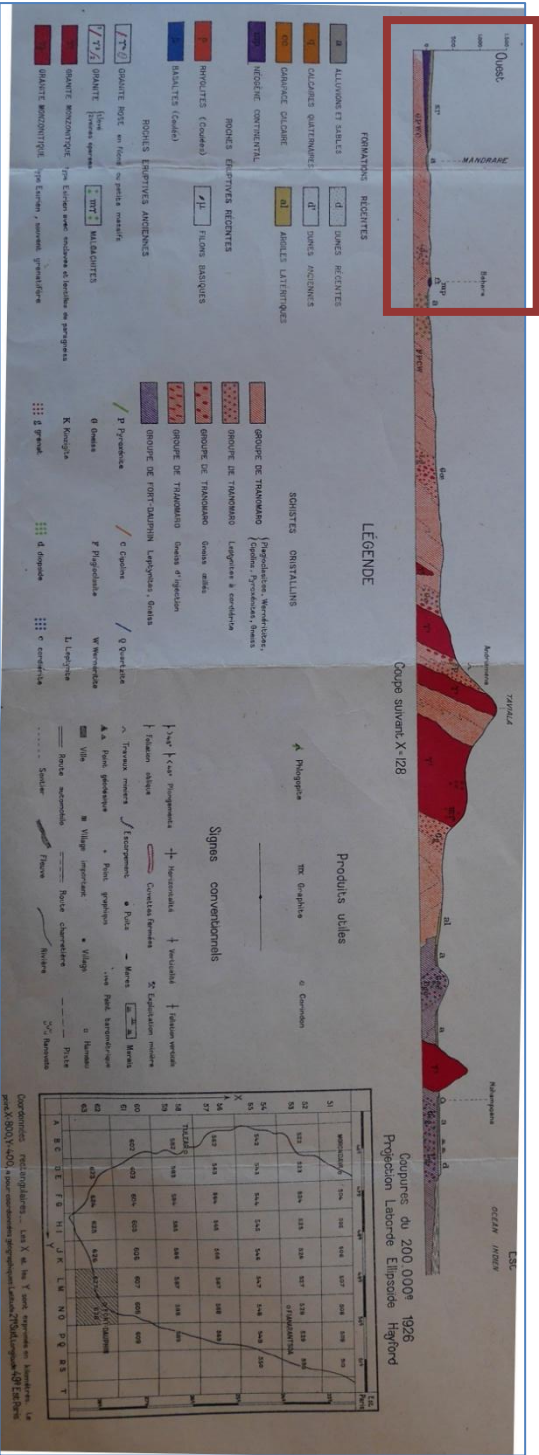
TMD (TRANS-MAD'DÉVELOPPEMENT), (2011) *Projet d'adduction d'eau d'eau potable et d'appui à la maîtrise d'ouvrage de la commune d'Itampolo pour la mise en place d'un service public de l'eau – Pré-étude technique et diagnostique – Programme hydraulique « Plein Sud »*.

UNICEF, (2011) *Le sud cimetière de projets ? - Document de synthèse préliminaire -* <http://www.hayzara.org>.

Annexe 1 : Carte géologique du Grand Sud de Madagascar (Besairie, 1964)



Annexe 2 : Coupe géologique nord/sud de la région d’Amboasary (Besairie, 1944)



Projet Zoloke

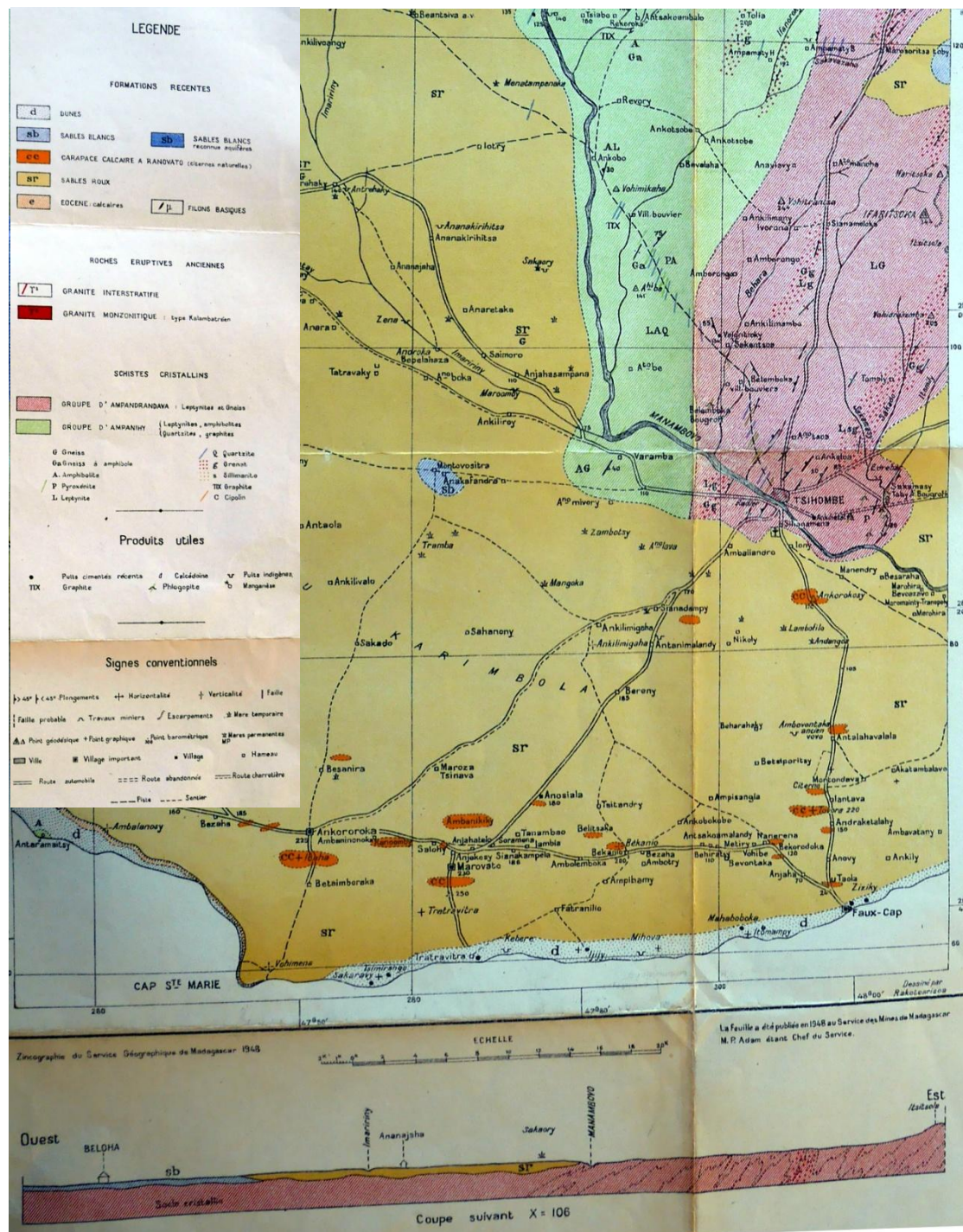
VERSION PROJET

Annexe 3 : Extrait carte géologique Behara-Fort Dauphin (Besairie, 1944) Légende Annexe 1

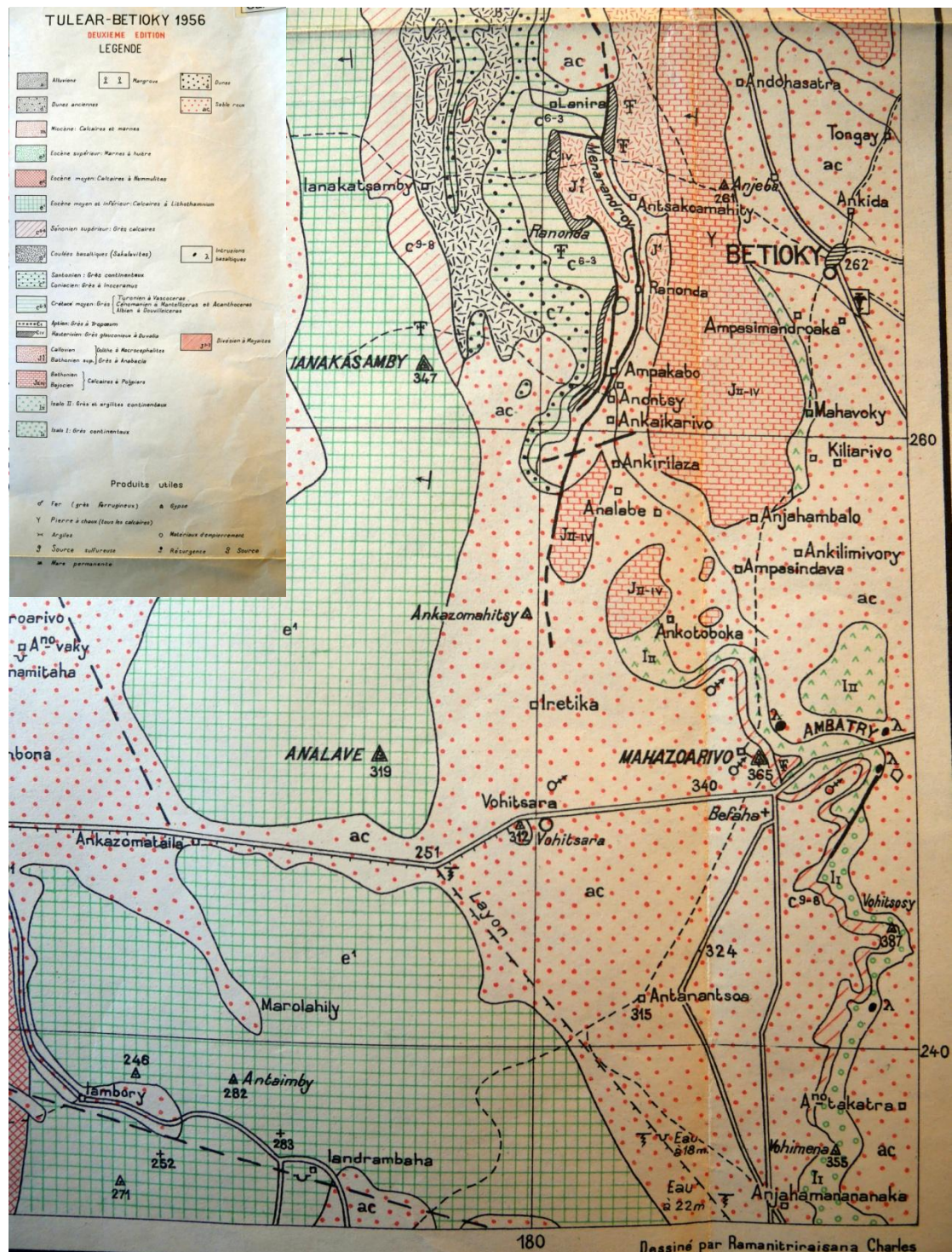


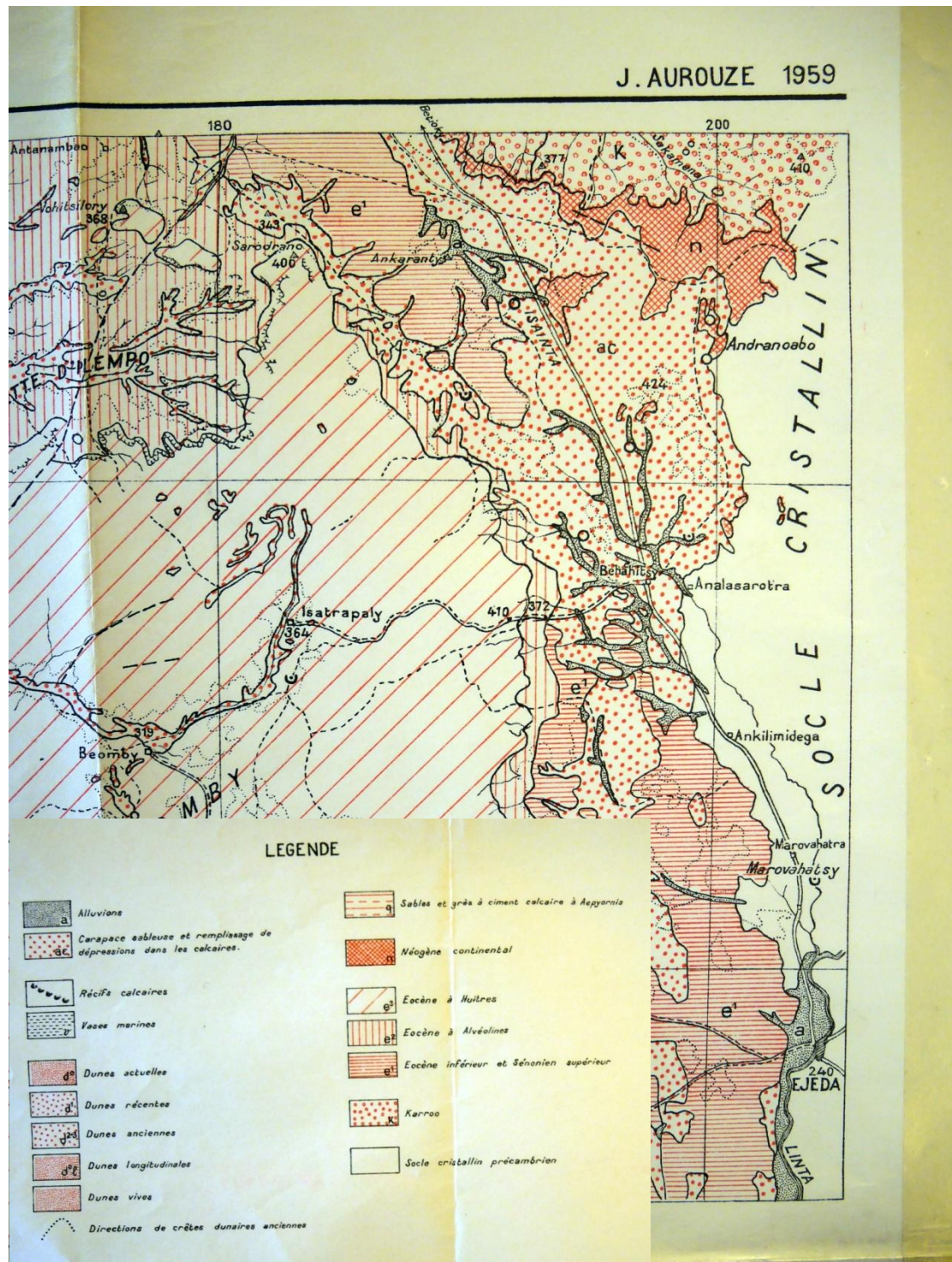
VERSION PROJET

Annexe 4 : Carte géologique Tsihombe (Besairie, 1944)



Annexe 5 : Projet Fanantenana, partie nord, carte géologique de Tulear-Betioky deuxième édition 1956





VERSION PROJET

Annexe 7 : Paramètres physico-chimiques mesurés pour l'ensemble des points d'eau visités. Conductivité en $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Concentration en sel calculée sauf pour les points ayant fait l'objet d'un prélèvement.

Nom projet	Lieu	T°C	pH	Conductivité 25°C	Conductivité	NaCl calculé en 'mg.L ⁻¹)
Projet Zoloke	Ankoba ankara	24,63	7,22	853	928	269
	Ankoba ankara 2	24,22	7,78	732	790	228
	Ankoba ankara 3	24,67	7,34	509	561	153
	Mandrarer	26,2	7,98	363	406	105
	Ankoba ankara 4 (P1)	27,33	7,33	1830	2087	595
	Ankoba ankara 5	27,01	7,65	1259	1428	404
	Tanandava Tanambe	26,01	7,89	2140	2385	699
	Tanandava Tanambe 2	26,39	7,5	1275	1430	410
	Tanandava Tanambe 3	24,74	7,92	1908	2084	622
	Tanandava Tanambe 4	26,49	7,76	1891	2123	616
	Lac Anony	24,12	8,15	68330	73550	22846
	Rivière Itarantsa	25,76	8,06	428	473	126
	Behoake (M1)	24,79	7,43	22550	24570	7528
	Prise d'eau Jirama	26,13	7,64	392	437	114
	Sampona	30,44	7,86	4686	5626	1551
	Sampona Zébu	26,82	7,51	4288	4844	1418
	Rivière Mananara	32,43	8,24	424	524	125
	Puits Behara (P2)	28,36		935	1083	296
	Ankiry Pépinière	27,7	7,23	635	729	196
	Ankiry fosses	26,8	7,82	1127	1273	360
	Parcelles Behara	32,43	8,24	424	524	125
	Anakafybe	24,71	7,65	3082	3360	1014
	Mare SPSM	29,56	9,49	9435	11190	3140
	Faux Cap ancien	26,87	8,18	4372	4926	1446
	Faux Cap 1991	27,1	8,54	6877	7808	2284
	Benonoke	27,88	7,75	37460	43000	12517
Projet Sohavelo	Nikoly	23,53	8,45	1528	1625	494
	Imongy 1940	25,83	7,73	3802	4225	1255
	Imongy UNICEF 1	26,83	7,81	1341	1515	432
	Imongy UNICEF 2 (F1)	26,61	7,71	1136	1281	363
	Lac Ihodo	28,81	7,03	200000	235000	66903
	Ambolarino	25,97	8,73	2606	2901	855
	Ambolarino 2	28,06	8,73	2836	3272	932
	Mananbovo	27,58		3287	3758	1083
	Behazomanga (anjatoka) 1	27,73	7,87	1965	2254	641
	Behazomanga (anjatoka) 2	27,17		484	550	145
	Behazomanga (anjatoka) 3	30,72	8,47	2985	3595	982
	Affluent Mananbovo (R1)	26,49	7,38	23940	26860	7993
	Mananbovo Tsihombe	28,6		3635	4305	1199
	Forage école Tsihombe	28,31	7,18	6862	7944	2279
	Beathiste 1	26,75	7,23	1447	1631	467
	Beathiste 2	25,17	7,96	1793	1633	583
	Bathiste mare	23,4	7,92	265	282	72
	Beathiste 3	25,12	8,07	487	534	146
	Analarotse Amont Baragge	24,77	8,01	183	200	44
	Analarotse Aval Baragge	24,21	8,76	1116	1208	357
Projet Fanantenana	Analarotse Aval retenue	24,79	8,29	165	180	38
	Ankasy 35m (F2)	28,74	7,4	2540	2963	833
	Ankasy 80m	29,24	7,31	2609	3069	856
	Sainta AVSF	28,91	7,84	421	486	124
	Sainta traditionnel	26,02	8,21	412	459	121
	Sainta traditionnel 2	26,45	7,1	2224	2497	727
	Ambatomainy	26,74	6,6	1045	1181	333
	Ambatomainy AVSF	27,98	5,4	291	336	81
	Beathiste village	27,14	6,37	1625	1846	527
	Befaha ancien (P4)	27,53		811	929	255
	Befaha AVSF	25,32	8,31	574	632	175
	Befaha salé 1	26,82	8,29	1969	2227	642
	Bafaha salé 2	28,17		1616	1866	524
	Andranotakatse	24,69	8	1288	1406	414
	Andranotakatse pompe	27,93	7	699	805	217
	Andranotakatse source	27,82	7,55	620	711	191
	Anjamena sud	30,04	7,73	1587	1892	514
	Anjamena nord	28,96		21500	25000	7177
	Anjamena Mahazoarivo	29,4	7,92	31200	36790	10423
	Besatra AVSF	29,08		6975	8149	2317
	Besatra source	25,11	7,43	164	179	38
	Besatra puits tardi	26,68	7,35	2980	3360	980
	Besatra puits 1973	28,89	7,45	2867	3365	942
	Besatra route	27,85	7,2	355	405	102
	Ankiliarito 1 (F3)	27,84	7,29	743	854	232
	Ankilirato 2	28,5	7,16	888	1031	280
	Ankilirato source	24,11		91	98	14
	Anjambalo AVSF	28,81	7,28	2168	2532	709
	Anjambalo Puits riv	25,71	7,25	532	590	161
	Anjambalo Puits Sorano	26,5	6,5	552	621	168
	Ampasindava	29,12		2800	3280	920
	Ampasindava 2	28,35		3030	3512	997
	Anontsy PNUD	28	7,14	3565	4105	1176
	Anontsy AVSF	27,62		593	680	182
	Anontsy Riv.	27,85	29,08	497	583	149