



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT MINES**



**Intitulé : Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur des Mines**

# **MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION MELAKY (NORD-OUEST DE MADAGASCAR)**

**Présenté par :**

**AinaNdrianjara ANDRIAMANANTENA**

*Décembre 2014*



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**  
**DEPARTEMENT MINES**



**Intitulé : Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur des Mines**

# **MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION MELAKY (NORD-UEST DE MADAGASCAR)**

**Présenté par :**

**AinaNdrianjara ANDRIAMANANTENA**

**Président du jury : M<sup>r</sup> Leon Felix RANAIVOSON**

**Directeur de mémoire : M<sup>r</sup> Boni Gauthier RAZAFINDRAKOTO**

**Membres du jury :**

∞ M<sup>r</sup> Joseph RALAIMARO

∞ M<sup>r</sup> Mamy Rija ANDRIAMBOAVONJY

**13 Décembre 2014**

# REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à témoigner ma plus profonde reconnaissance et gratitude envers le « Seigneur tout-puissant » pour sa présence permanente à nos côtés durant toutes les étapes de la réalisation de ce présent mémoire. Je tiens ensuite à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce présent mémoire, plus particulièrement à :

- ✚ **Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine**, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo [ESPA], qui a veillé au bon déroulement de ma scolarité au sein de cet établissement.
- ✚ **Monsieur RANAIVOSON Léon Félix**, Chef du Département Mines à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo [ESPA], qui a su nous montrer à nous tous, étudiants du Département Mines, la valeur de la solidarité et du respect, le sens des responsabilités et de l'engagement dans tout travail ; mais aussi et surtout ma profonde gratitude pour sa bonne humeur quotidienne, son aide précieuse et sa rigueur, tout cela toujours accompagné de son sourire bienveillant et ce, durant les cinq dernières années qu'a duré ma formation au sein de son département.
- ✚ **Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier**, Maître de Conférences et Enseignant-Chercheur au sein du Département Mines de l'ESPA, mon encadreur pédagogique, pour avoir bien voulu me prendre sous son aile, à encadrer ce présent mémoire, mais surtout pour avoir pris le temps de me transmettre son savoir et ces connaissances par le biais de nombreuses descentes sur terrain qui m'ont permis d'acquérir le nécessaire pour pouvoir aujourd'hui soutenir ce mémoire ; et tout cela avec sourire, bonne humeur qui m'ont permis d'être en confiance et d'être à l'aise durant tout le temps qu'a pris la collecte des données et la rédaction de ce travail.
- ✚ **Monsieur RALAIMARO Joseph**, Maître de Conférences et Enseignant-Chercheur au sein du Département Mines de l'ESPA, pour avoir bien voulu me consacrer de son temps et de nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire.
- ✚ **Monsieur ANDRIAMBOAVONJY Mamy Rija**, Chercheur-Enseignant au sein du Département Mines de l'ESPA, pour son soutien sans faille, le temps précieux qu'il m'a consacré, ses encouragements quotidiens et ses conseils ; mais surtout pour son aide irremplaçable dans l'apprentissage de tous les logiciels ayant servi pour ce

mémoire (Rockworks 15, Oasis Montaj 7.5, Arcgis 10.2) et sans qui, il aurait été difficile de terminer ce travail.

✚ **Tous les Enseignants de l'ESPA, en particulier ceux du Département Mines**, qui n'ont pas lésiné sur les moyens et les efforts pour nous transmettre leurs connaissances nous permettant aujourd'hui d'être apte à affronter notre future vie professionnelle.

Et enfin une pensée, pour tous ceux qui m'ont aidé durant mes années d'études et à l'élaboration de ce mémoire, je remercie donc :

- ✚ mes parents et ma famille qui m'ont toujours soutenu et aidé de toutes les manières possibles, et qui ont cru en moi.
- ✚ mes amis d'enfance : Rico RATSIMANDRESY, Andriantsoa RASOLOMANANA, et Sitraka RATEFIHARIVONY qui ont grandi avec moi, et malgré la distance ont toujours été là avec leurs encouragements et leurs amitiés sans faille.
- ✚ mes camarades de classe qui m'ont beaucoup aidé et se sont comportés comme des frères durant mes études universitaires.

Merci à tous !!

# SOMMAIRE

**REMERCIEMENTS**

**LISTE DES ACRONYMES**

**LISTE DES CARTES**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES ANNEXES**

**INTRODUCTION**

**PREMIERE PARTIE : NOTIONS GENERALES SUR L'HYDROGEOLOGIE**

- I. Cycle de l'eau*
- II. Généralités sur les aquifères*
- III. Nappes*
- IV. Niveau piézométrique*
- V. Forage d'eau*

**DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

- I. Situation géographique de la Région Melaky*
- II. Contexte hydrogéologique*
- III. Fonctions de l'eau dans la Région Melaky*
- IV. Pressions sur l'eau dans la Région Melaky*

**TROISIEME PARTIE : METHODOLOGIE APPLIQUEE A LA MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE**

- I. Etapes de conception d'un modèle 3D hydrogéologique*
- II. Logiciel ROCKWORKS 15*
- III. Logiciel Geosoft Oasis Montaj 7.5*

**QUATRIEME PARTIE : MODELISATIONS ET INTERPRETATIONS**

- I. Présentation générale des résultats*
- II. Modélisation 2D par District*
- III. Caractéristiques de l'eau souterraine de la Région Melaky*

**CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**WEBOGRAPHIE**

**ANNEXES**

**TABLE DES MATIERES**

# LISTE DES ACRONYMES

<b>2D</b>	: Deux dimensions
<b>3D</b>	: Trois dimensions
<b>4D</b>	: Quatre dimensions
<b>BRGM</b>	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
<b>CGC</b>	: China Geo Engineering Cooperation
<b>cm</b>	: Centimètre
<b>Km</b>	: Kilomètre
<b>L</b>	: Longueur
<b>m</b>	: Mètre
<b>m<sup>3</sup></b>	: Mètre cube
<b>MFT</b>	: Marteau Fond de Trou
<b>mm</b>	: Millimètre
<b>NGF</b>	: Nivellement général français
<b>PAEAR</b>	: Programme d’Alimentation en Eau potable et d’Assainissement en milieu Rural
<b>PVC</b>	: Polychlorure de vinyle
<b>SGDM</b>	: Société Géosciences pour le Développement de Madagascar
<b>USA</b>	: United States of America
<b>Z</b>	: Profondeur de forage

# LISTE DES CARTES

Carte 1 : Localisation des points de forage dans la Région Melaky .....	25
Carte 2 : Localisation du Melaky .....	33
Carte 3 : Géologie du Melaky .....	38
Carte 4 : Grands cours d'eau permanents.....	40
Carte 5 : Emplacements des points de forages dans la Région Melaky .....	56
Carte 6 : Profondeur de la première nappe.....	72
Carte 7 : Profondeur de la seconde nappe .....	73
Carte 8 : Carte de conductivité électrique de l'eau dans la Région Melaky .....	74

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cycle de l'eau .....	5
Figure 2 : Cycle de l'eau (simplifié) .....	5
Figure 3 : Aquifère .....	7
Figure 4 : Représentation schématique d'un aquifère karstique .....	8
Figure 5 : Nappe libre.....	10
Figure 6 : Nappe captive .....	10
Figure 7 : Nappe semi-captive .....	11
Figure 8 : Différentes nappes d'eau dans le sous-sol.....	11
Figure 9 : Exemple d'un piézomètre .....	13
Figure 10 : Exemple de sonde piézométrique .....	15
Figure 11 : Lecture de la mesure .....	15
Figure 12 : Machine de havage .....	20
Figure 13 : Marteau fond de trou.....	21
Figure 14 : Tête de forage rotary.....	22
Figure 15 : Foreuse rotary .....	22
Figure 16 : Tiges de forage et tubes pour tubage .....	26
Figure 17 : Marteau fond de trou et une tri-lame .....	26
Figure 18 : Tubes aveugles et crépines .....	27
Figure 19 : Tubes décompteurs .....	28
Figure 20 : Chapeau .....	28
Figure 21 : Compresseur Ingersoll .....	29
Figure 22 : Foreuse sur camion .....	29
Figure 23 : Kelly .....	30
Figure 24 : Positionnement de la foreuse et du camion matériel .....	30
Figure 25 : Pluviométrie moyenne mensuelle de 1992 à 2001 – Station de Maintirano .....	35
Figure 26 : Les étapes du processus de modélisation hydrogéologique .....	46
Figure 27 : Exemples de représentations : A) par frontières, B) par voxels .....	49
Figure 28 : Les logs simplifiés de forages de la Région Melaky .....	58



Figure 29 : Localisation des aquifères sur les logs de forages .....	59
Figure 30 : Modélisation de l’aquifère par algorithme cumulatif .....	59
Figure 31 : Aquifère modélisé par l’algorithme des points proches .....	60
Figure 32 : Aquifère modélisé par l’algorithme des points proches vus de 3/4.....	60
Figure 33 : Modélisation par bloc de la lithologie de la Région Melaky .....	61
Figure 34 : Modélisation par tranche .....	62
Figure 35 : Coupe lithologique E-O d’Ambatomainty avec Rockworks .....	63
Figure 36 : Coupe lithologique d’Ambatomainty de direction E-O avec Oasis montaj 7.5 ....	64
Figure 37 : Coupe lithologique Morafenobe avec Rockworks 15 .....	65
Figure 38 : Coupe lithologique Morafenobe avec Oasis Montaj 7.5 .....	65
Figure 39 : Coupe lithologique N-S Antsalova avec Rockworks 15 .....	67
Figure 40 : Coupe lithologique Antsalova de direction N-S avec Oasis Montaj 7.5 .....	67
Figure 41 : Coupe lithologique Antsalova de direction O-E avec Rockworks 15 .....	68
Figure 42 : Coupe lithologique Antsalova de direction O-E avec Oasis Montaj 7.5.....	68
Figure 43 : Coupe lithologique Maintirano de direction N-S avec Rockworks 15.....	69
Figure 44 : Coupe lithologique Maintirano de direction N-S avec Oasis Montaj 7.5.....	70
Figure 45 : Coupe lithologique Maintirano de direction E-O avec Rockworks 15.....	70
Figure 46 : Coupe lithologique Maintirano de direction E-O avec Oasis Montaj 7.5 .....	71

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification des forages selon leurs finalités.....	16
Tableau 2 : Comparaison des méthodes de forage .....	19
Tableau 3 : Répartition de la superficie par District .....	34
Tableau 4 : Répartition des pluies mensuelles en mm de 1992 à 2001 (Station de Maintirano) .....	35
Tableau 5 : Répartition spatiale de la population .....	44
Tableau 6 : Classification des nappes .....	76

# LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Les points de forage .....	82
Annexe 2 : Conductivité Melaky triées .....	86
Annexe 3 : 100 forages Melaky 2014 .....	88
Annexe 4 : Belitsaka .....	92
Annexe 5 : Norme internationale de la qualité des eaux imposée par l'OMS .....	95
Annexe 6 : Planche photos .....	97

# INTRODUCTION

L'eau se présente sous différents aspects, que ce soit l'eau de surface, l'eau souterraine ou l'eau de pluie, elle est considérée comme une denrée indispensable à l'être vivant et la vie sur terre. De nos jours pourtant, elle se fait de plus en plus rare et sa répartition est très inégale. Elle peut être abondante et donc source de développement mais elle peut aussi être absente dans certaines zones causant de graves problèmes de sécheresse et de migrations humaines.

La partie Ouest de Madagascar, et plus précisément la Région Melaky n'échappe pas à ce problème de raréfaction de l'eau. Le problème est tel que la population locale doit parfois parcourir des kilomètres avant de trouver un point d'eau qui a pour la plupart du temps, une qualité moindre.

Dans le cadre du développement durable et pour promouvoir une meilleure accessibilité à l'eau potable, de nombreux projets et recherches ont vu le jour pour l'adduction d'eau potable effectuée dans le cadre du PAEAR qui consiste à équiper chaque village et surtout les villages les plus vulnérables d'une ou plusieurs pompes à motricité humaine (nombre de pompe étant déterminé par le nombre de villageois). Ces recherches par le biais des forages d'eau nous ont fourni les données lithologiques et hydrogéologiques qui nous sont nécessaires pour faire la modélisation du sous-sol de la Région Melaky.

Pour cette modélisation, nous avons choisi d'utiliser les logiciels ROCKWORK 15 et Oasis Montaj 7.5 qui sont tous les deux des logiciels complets en matière de traitement des données géologiques, géophysiques, hydrochimiques et hydrogéologiques. Les deux logiciels ont été utilisés simultanément pour avoir des résultats beaucoup plus satisfaisants. L'utilisation de ces logiciels nous permet de traiter le thème de ce mémoire qui s'intitule : « **MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION MELAKY** », et qui a pour but de traiter les données hydrogéologiques afin de représenter différents modèles des couches stratigraphiques et lithologiques en 2D ou 3D.

Pour pouvoir mener à bien ce travail, cet ouvrage sera divisé en quatre grandes parties :

- la première partie traitera de notions générales sur hydrogéologie et qui nous montre non seulement l'eau mais aussi les forages d'eau souterraine,
- la deuxième partie parlera le contexte général de la zone d'étude,
- la troisième partie abordera les grandes lignes de la modélisation hydrogéologique, suivi d'une brève présentation des logiciels de traitement des données plus précisément, les logiciels ROCKWORKS 15 et Oasis Montaj 7.5.
- et enfin la quatrième partie qui exprimera les résultats modélisés ainsi que les différentes interprétations.

# **PREMIERE PARTIE : NOTIONS GENERALES SUR L'HYDROGEOLOGIE**

Le Cycle d'eau est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la Terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le Cycle de l'eau ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais, sont concomitants. Donc, il s'agit d'un phénomène cyclique, composé de plusieurs facteurs, qui n'a ni commencement, ni fin.

## **I. Cycle de l'eau<sup>[7] [20] [21] [25] [27]</sup>**

L'eau peut se trouver sous différentes formes dans la nature comme : Océans, Rivières, Lacs, Glaciers, Eaux souterraines etc. L'Eau se présente donc dans la nature sous trois états:

- solide : neige et glace ;
- liquide : eau pure ou chargée en solutés ;
- gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.

### **1. Généralités sur l'eau**

Tout d'abord, rappelons que l'eau douce ne représente que 3% des ressources en eau mondiale dont l'eau salée constitue 97%. En outre, l'eau souterraine représente 30% de ces réserves mondiales d'eau douce.

### **2. Différents types d'eau**

Une roche contient de l'eau sous différentes formes :

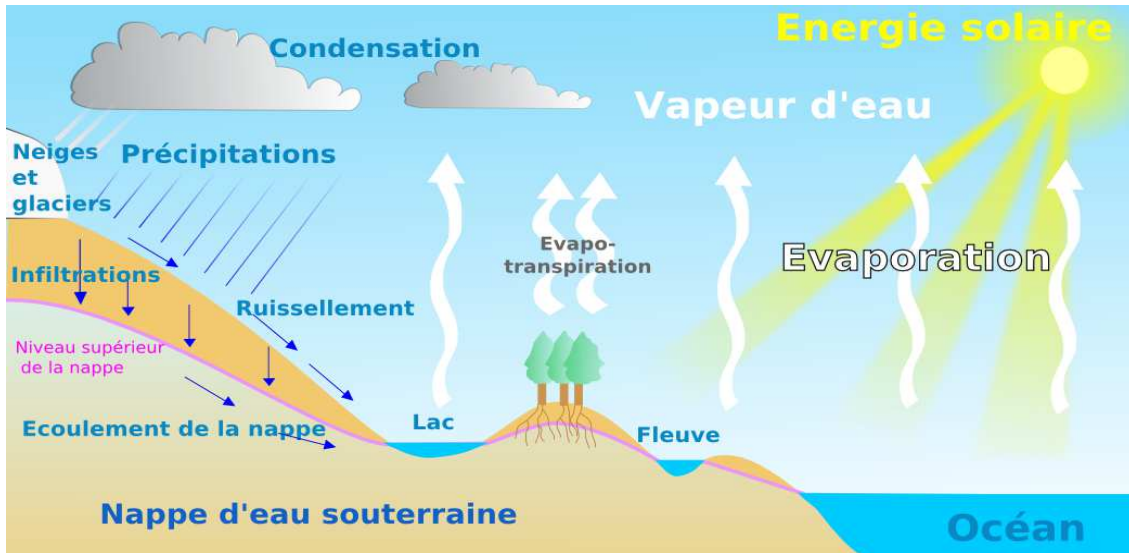
- eau de constitution entrant dans la structure cristalline des minéraux
- eau adsorbée à la surface des minéraux par des interactions électrostatiques
- eau non-libre située dans les pores fermés et inclusions fluides
- eau libre circulant dans les pores et fissures

### **3. Origines des eaux souterraines**

- **Eaux météoriques** : la plupart des eaux souterraines ont une origine météorique, c'est-à-dire provenant de précipitations (pluie, neige) et de leur infiltration dans le sous-sol.
- **Eaux connées** : ce sont les eaux (souvent salées) que l'on trouve en profondeur dans la croûte terrestre (à partir de 1 à 2 Km). Elles sont dérivées de réservoirs d'eau météoriques qui ont réagi avec les roches environnantes.
- **Eaux juvéniles** : ce sont des eaux libérées directement par des processus magmatiques en profondeur, elles sont difficilement distinguables des eaux situées en profondeur.

#### 4. Composants du cycle de l'eau.

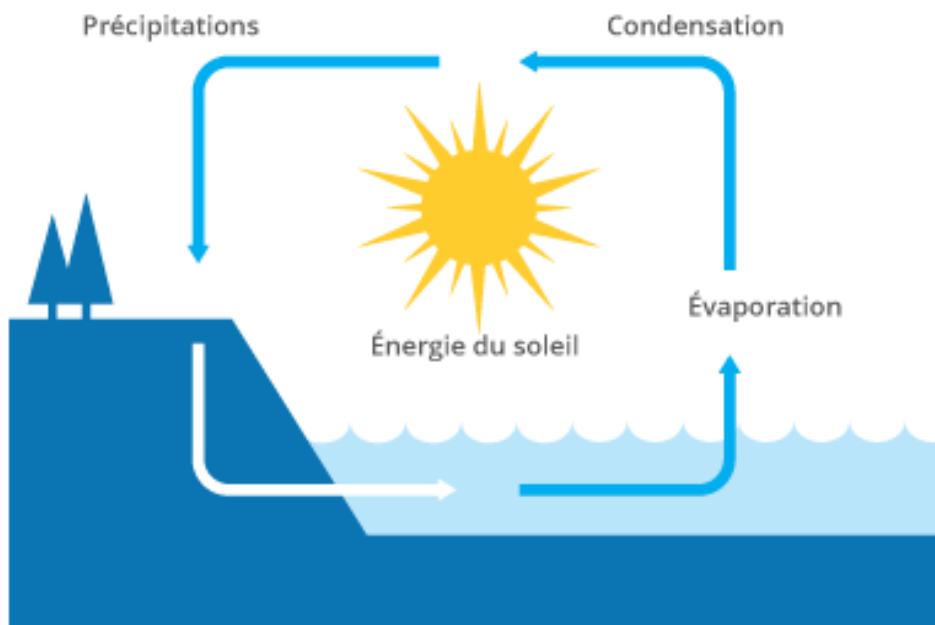
Le cycle de l'eau est composé de processus complexes et variés dont on peut citer : l'évapotranspiration (évaporation et transpiration des plantes), les précipitations, le ruissellement, l'infiltration, l'écoulement souterrain. L'ensemble de ces divers mécanismes est régi par un moteur essentiel qui n'est autre que le Soleil.



Source : De Marsily (2004)

**Figure 1 : Cycle de l'eau**

Néanmoins, on peut simplifier ce cycle par la représentation suivante :



Source : De Marsily (2004)

**Figure 2 : Cycle de l'eau (simplifié)**



## 5. Moteurs essentiels du cycle de l'eau

L'énergie solaire est la source d'énergie du cycle permettant une évaporation intense à la surface des océans et à moindre niveau à la surface des continents.

La gravité complète le cycle en ramenant les précipitations à la surface puis dans les ruissellements.

## II. Généralités sur les aquifères<sup>[3]</sup> <sup>[19]</sup> <sup>[24]</sup>

L'hydrogéologie est la science de l'eau souterraine. C'est une discipline des sciences de la terre ayant pour objectif l'étude des matériaux constituant le sous-sol qui influencent la circulation et la qualité des eaux souterraines et les structures hydrogéologiques appelées aquifères ; son but étant la planification des captages, l'exploitation et la gestion des eaux souterraines pour en faire un usage domestique ou industriel.

### 1. Quelques définitions

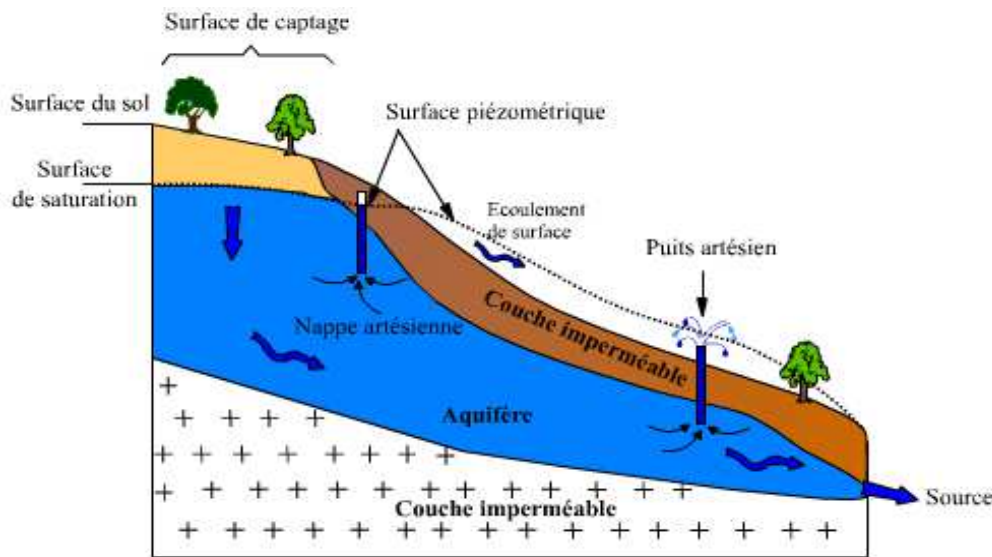
Avant de réellement aborder la généralité sur les aquifères, il est important de distinguer les termes : aquifère, aquiclude, aquitard et aquifuge qui sont souvent mal compris. Ainsi on les définit comme :

- ✓ aquifères : c'est une formation géologique susceptible de stocker et de transmettre des quantités d'eau telles que l'on peut retirer un débit appréciable par captage.
- ✓ aquiclude : formation qui contient de l'eau, mais qui, vu sa très faible conductivité hydraulique, ne peut transmettre des quantités d'eau appréciables.
- ✓ aquitard : couche de faible condition hydraulique mais qui peut tout de même transmettre de faibles flux d'eau verticalement d'un aquifère à un autre.
- ✓ aquifuge : formation qui ne peut ni contenir ni transmettre de l'eau.

### 2. Aquifère

Un aquifère (*acque*= eau ; *fera*= je porte) est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables, par des moyens économiques. C'est un système hydrologique, hydrodynamique qui est identifié par cinq ensembles:

- un réservoir
- des processus internes ou mécanismes hydrodynamiques, hydrochimiques et hydrogéologiques
- une séquence du cycle de l'eau,
- la variabilité des caractéristiques dans l'espace (contexte géologique)
- des conditions de temps ; l'aquifère est comparable à un gisement minier dont le minéral « eau » est plus ou moins renouvelable.



Source : BEAUCHAMP (2003)

**Figure 3 : Aquifère**

### 3. Différents types d'aquifères

On distingue deux types d'aquifères :

#### 3.1. Aquifères fluviaux

L'eau s'écoule dans les matériaux déposés par un cours d'eau ancien ou actuel (généralement alluvions). Le substratum imperméable en dessous de ces matériaux est formé soit par de la roche compacte en dessous de la formation alluviale perméable, soit par des dépôts d'argiles dans les alluvions sous forme de lentilles. Il y a possibilité d'étagement de lentilles, sans échange d'eau entre les compartiments. Dans ce cas, on aura plusieurs aquifères superposés avec des caractéristiques physiques et chimiques différentes.

Les types de sources que l'on peut rencontrer en milieu fluviaux sont :

- Les sources de débordement ou sources de trop plein

La nappe libre affleure aux endroits où sa surface atteint le niveau du sol.

- Sources artésiennes

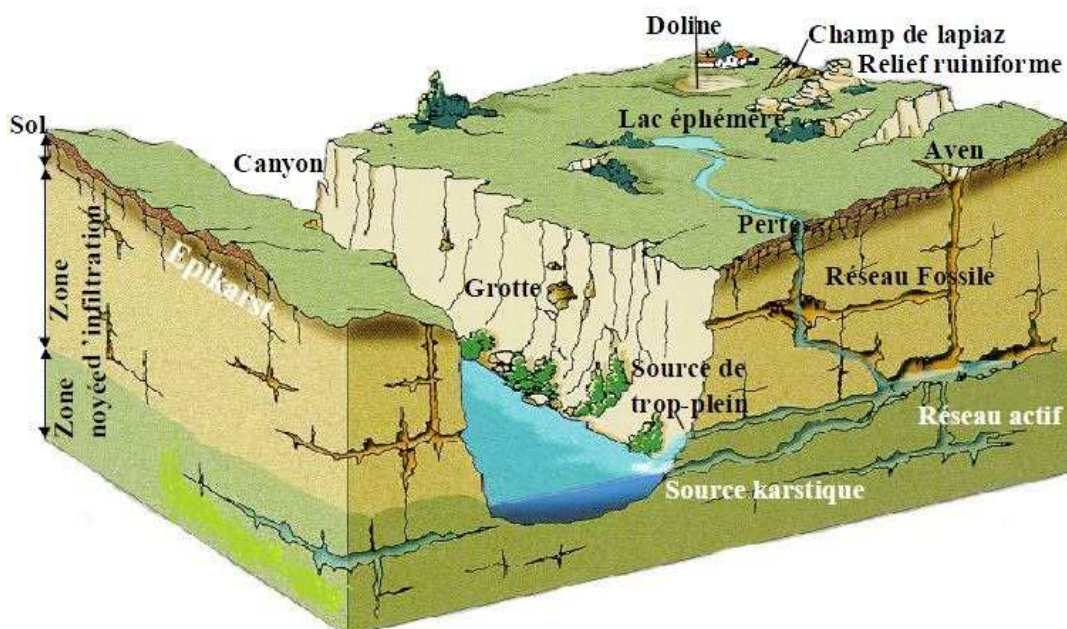
Elles existent uniquement en cas de nappes captives ou en charge, la surface piézométrique se situe au-dessus du sol, l'eau est contrainte de circuler en sous-sol vu la présence d'un toit imperméable de limons argileux ou d'argile par exemple. Une conduite traversant la couche imperméable implique donc une source jaillissante.

Dans les aquifères fluviaux, on distingue facilement les zones de ruissellement, les zones d'accumulation (infiltration), et les zones de captivité ainsi que les zones sous charge.

### 3.2. Aquifères karstiques

Le terme « karst » ayant pour origine étymologique le mot germanique « *karst* » réside dans le mot indoeuropéen « *kar* » signifiant rocher et du mot slovène « *kras* », nom d'une région de la Yougoslavie où ces phénomènes karstiques sont particulièrement spectaculaires.

Les régions karstiques possèdent une géomorphologie caractéristique : rareté ou faible épaisseur des sols : présence de gorges, de dolines, grottes, gouffres, pertes, résurgences et surtout d'un réseau de vides souterrains plus ou moins développé. Le drainage des eaux est géré en majeure partie par ces derniers, ce qui explique souvent la quasi-absence du réseau de drainage superficiel : ruisseau, rivière etc.



Source : BEAUCHAMP (2003)

Figure 4: Représentation schématique d'un aquifère karstique

Les types de sources en milieu karstique sont des eaux circulant dans le massif et pouvant émerger par des sources forts (résurgences) ou faibles (sources) débit, à n'importe quelle hauteur par rapport au niveau géographique. Des cuves à hauteur modérées, des alimentations souterraines (invisible) des nappes alluviales s'écoulant au fond des vallées parfois profondément entaillées (canions) sont possibles.

### **3.3. Les milieux fissurés**

L'aquifère est formé par des roches compactées fracturées. On peut distinguer deux types d'écoulement dans ces milieux fissurés :

- *Dans les systèmes à fissures courtes (courtes par rapports à l'échelle d'intérêt)*

Ils sont interconnectés avec un grand nombre statistiquement important de fissures à grande ouverture. Dans ce cas, les systèmes sont dits « homogènes » et répondent donc tels les aquifères fluviatiles.

- *Dans les systèmes à fissures longues*

Il s'agit de fissures longues par rapport à l'échelle d'intérêt qui sont que partiellement interconnectées et/ou présence de rares grands canaux. Ce genre de milieu fissuré est plus complexe et des moins prévisibles, les écoulements ne peuvent être prédits que très difficilement car on ne connaît généralement pas les chenaux principaux ou passe la majorité de l'eau. Elle peut s'écouler sur plusieurs niveaux dans des directions différentes.

## **III. Nappes<sup>[28]</sup>**

Au sens large et originel, une nappe est une collection d'eau souterraine, ensemble de l'eau saturant une couche aquifère définie dans laquelle elle circule avec une composante horizontale prédominante. Au sens indéfini, la nappe est l'ensemble des eaux gravitaires de la zone de saturation, par opposition aux eaux de la zone de rétention et d'infiltration.

Au sens restreint, c'est une masse d'eau contenue et s'écoulant dans une roche aquifère perméable en petit, poreuse, par opposition à celles contenues dans des roches perméables en grand par des fissures ou diaclases. Dans ce sens le terme de nappe implique une continuité, une liaison continue des eaux dans toutes ces parties.

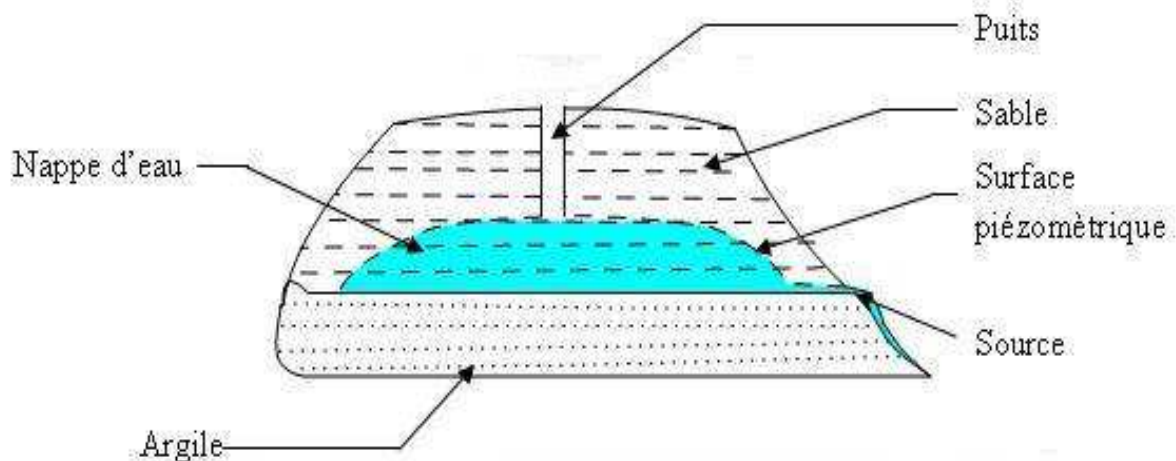
Au sens ancien impropre, c'est le synonyme de niveau ou couche aquifère.

## 1. Différents types de nappes

Il existe 3 types de nappes :

### 1.1. Nappe libre

C'est un aquifère saturé en eau et non surmonté d'une couche imperméable. Lorsqu'il pleut, une partie de l'eau s'évapore rapidement, une autre partie est absorbée par les plantes puis transpirée, une autre ruisselle. Le reste s'infiltre dans le sol et le sous-sol.

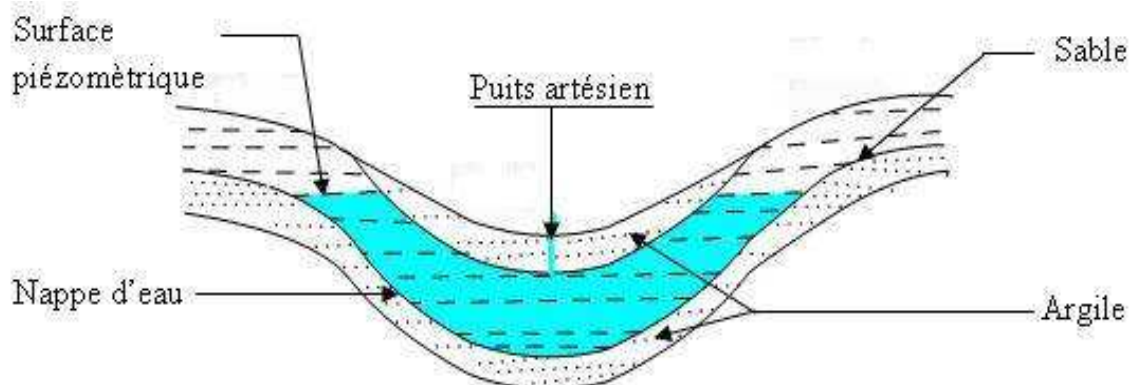


Source : RENARD (2002)

**Figure 5 : Nappe libre**

### 1.2. Nappe captive

L'aquifère saturé est prisonnier entre deux couches imperméables (aquifuge ou aquiclude), l'eau est habituellement sous pression. La nappe est dite captive ou e échange.

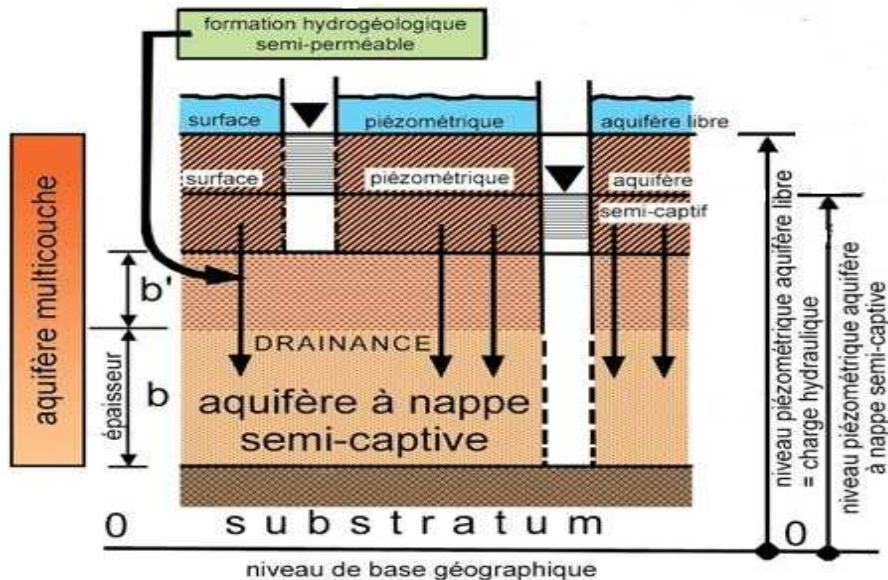


Source : RENARD (2002)

**Figure 6 : Nappe captive**

### 1.3. Nappe semi captive

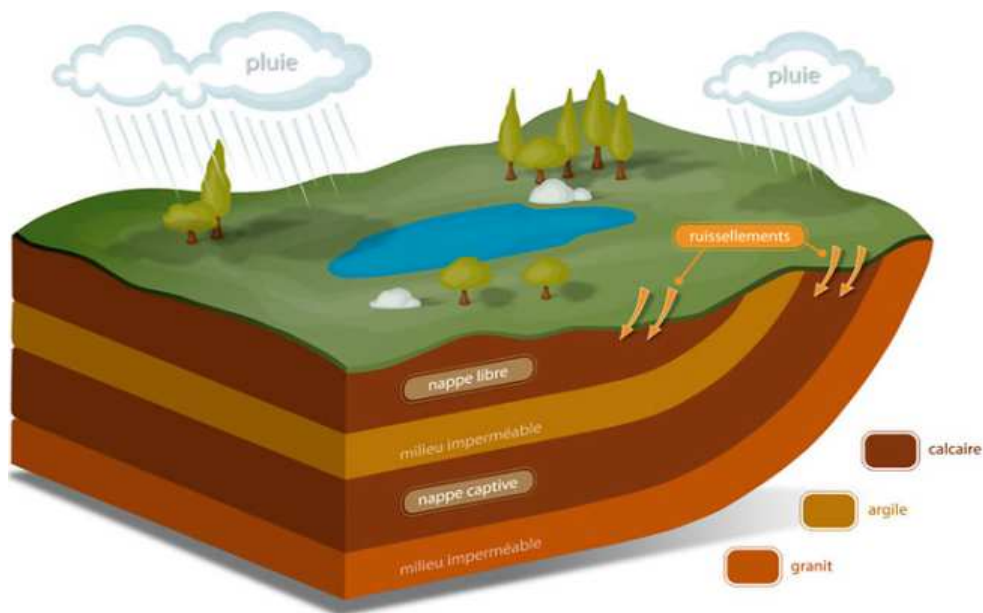
Lorsque l'aquifère est limité par un ou deux aquitards, C'est-à-dire qu'on est en présence d'un aquifère confiné dont l'une ou les deux couches qui la limitent sont semi-perméables. Il peut y avoir un échange d'eau avec l'aquifère superposé ou sous-jacent par phénomène de drainance ascendante et/ou descendante.



Source : RENARD (2002)

**Figure 7 : Nappe semi-captive**

Voici donc une figure des différentes nappes d'eau se trouvant dans le sous-sol :



Source : RENARD (2002)

**Figure 8 : Différentes nappes d'eau dans le sous-sol**



## **IV. Niveau piézométrique<sup>[2] [5] [6]</sup>**

La piézométrie est la mesure de profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine. Elle est exprimée soit par rapport au sol en m, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en m NGM (Nivellement Général Malgache).

### **1. Niveau piézométrique**

La mesure du niveau d'eau de la nappe souterraine correspond à la mesure du niveau piézométrique, qui est le niveau atteint par l'eau en un point et à un instant donné dans un piézomètre. Cette mesure du niveau de la nappe ne doit pas être assimilée à une mesure des réserves en eau car les caractéristiques techniques de l'ouvrage, le secteur géographique, le contexte géologique, la pluviométrie, etc... doivent être pris en compte dans son interprétation. Ce niveau correspond à la pression de la nappe, il est généralement donné par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer. Quand ce niveau dépasse le niveau du sol, la nappe est dite artésienne : l'eau est jaillissante.

### **2. Piézomètre**

Un piézomètre est un forage non exploité qui permet la mesure du niveau de l'eau souterraine en un point donné de la nappe. Au sens strict, un piézomètre est un dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un système aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression. Le concept de piézomètre a été étendu à l'ensemble des ouvrages artificiels (puits, forages, gravières,...) ou naturels (avens, grottes,...) qui permettent l'accès aux eaux souterraines.



*Source : BRGM (2013)*

**Figure 9 : Exemple d'un piézomètre**

### **3. Type des piézomètres**

Il est utile de distinguer quelques types de piézomètres :

#### **3.1. Puits ouvert (*Open well*)**

La technique la plus commune à enregistrer le niveau de l'eau consiste à mesurer ce dernier dans le trou du forage. Cette technique est utile uniquement pour les dépôts homogènes car son inconvénient majeure réside dans le fait que cette technique est que les différentes couches de sol peuvent avoir différentes pressions hydrostatiques et par conséquent le niveau mesuré sera inexacte et non représentatif du site.

#### **3.2. Piézomètre à élément poreux (*PorousElementPiezometer*)**

Un élément poreux est connecté à un tube de mesure de faible diamètre afin de diminuer le temps de réponse de l'instrument. En fait, il s'agit du piézomètre Casagrande dont l'élément poreux est une pierre en céramique ou tout autre matériau de mêmes dimensions. Les pores de l'élément ont une dimension de 0,050 mm de telle sorte que l'on peut l'utiliser en contact direct avec les sols fins. Notons qu'un piézomètre Casagrande est un piézomètre à tube ouvert avec un élément filtrant inséré dans une lanterne de sable et des bouchons de part et d'autre de la lanterne.



### 3.3. Autres types de piézomètres

Les autres types de piézomètres qui sont pneumatiques à air, pneumatique à l'huile ou hydrauliques. Dans ce cas, on distingue deux types de piézomètre :

- *piézomètres ouverts*

Les piézomètres ouverts qui peuvent être réalisés soit par forage, soit par battage. Ces piézomètres ne nécessitent pas d'appareillage et composantes compliquées mais ont pour inconvénients un temps de réponse long. La tubulure doit être verticale et peut être sujette au gel.

- *piézomètres à volume constant*

Ce type est conçu pour diminuer le volume d'eau nécessaire pour l'équilibre des pressions. Il existe différents types de ce piézomètre.

- *piézomètres hydrauliques*

Ce sont des piézomètres du type ouvert dans lesquels on a placé un manomètre à l'extrémité des tubulures. Les tubulures sont remplies d'un liquide incompressible.

- *piézomètres pneumatiques*

Ce sont des piézomètres constitués d'un élément déformable (membrane flexible), la pression de l'eau contenue dans le sol applique la membrane sur les deux orifices de la chambre de pression. Par l'un de ces orifices, on envoie un gaz comprimé (air, azote ou CO<sub>2</sub>).

- *Piézo-mètres à corde vibrante*

Ils sont basés sur la déformation d'une membrane solidaire d'un fil tendu (corde vibrante), la pression interstitielle agissant sur la membrane fait varier la tension dans la corde.

## 4. Mesure piézométrique

La mesure du niveau piézométrique peut être réalisée ponctuellement par une sonde manuelle, la « sonde piézométrique », ou régulièrement à l'aide d'un enregistreur automatique, avec données télétransmises pour le plus perfectionné. Le point de repère de la mesure doit être clairement identifié (le sommet du tube du piézomètre est généralement choisi), et préférentiellement géoréférencé et nivelé.

## 5. Sonde piézométrique

La sonde piézométrique est le moyen le plus simple et fiable de mesurer un niveau d'eau dans un piézomètre. Elle est constituée d'un ruban gradué relié à deux électrodes, qui est descendu dans le piézomètre et qui émet un « bip » lorsque les électrodes atteignent la surface de l'eau (le contact électrique s'établit entre les deux électrodes). C'est un appareil fiable et robuste, d'un coût peu élevé (quelques centaines euros). Cependant, le niveau, mesuré visuellement par un opérateur, est donc peu précis (de l'ordre du demi-cm en règle générale), et peut être sujet à erreur de la part de l'opérateur. Il faut garder en mémoire que la sonde peut perdre de sa précision si le ruban gradué est distendu (vieillesse, etc...), et que le ruban gradué peut se coincer dans le piézomètre si d'autres appareils sont présents dans le tube.



*Source : BRGM (2013)*

**Figure 10 :Exemple de sonde piézométrique**



*Source : BRGM (2013)*

**Figure 11 : Lecture de la mesure**

## V. Foraged'eau<sup>[9]</sup> [23]

La population mondiale ne cessant de s'accroître, l'eau de surface n'a plus été en mesure de satisfaire les besoins en eau de l'humanité. L'homme a donc cherché à exploiter les ressources en eau souterraine et ce, par l'aide des forages. De nos jours, le forage d'eau est devenu incontournable dans la vie quotidienne car 62% des adductions en eau potable, eau thermale, eau de source ; 39% de l'eau à usage industriel ; 27% des eaux pour l'irrigation proviennent toutes du sous-sol.

### 1. Définition du forage en général

Le terme forage selon le dictionnaire est l'ensemble des infrastructures ou des procédés mis en œuvre pour creuser un puits ou un tunnel, il est aussi défini comme le creusement (d'un trou ou d'une cavité) à l'aide d'une machine ou encore le percement de trous (dans quelque chose) à l'aide d'un outil ou d'une machine.

Pour mieux comprendre ce qu'est un forage en général et en tirer son application directe, nous permettons de proposer le tableau suivant :

**Tableau 1 : Classification des forages selon leurs finalités**

Forage	Applications
Un ouvrage d'exploitation d'une ressource	Puits pétroliers, puits d'eau, forages géothermiques
Un outil de reconnaissance, d'exploration et d'échantillonnage	Forage géotechnique, recherche d'extension de gisement, exploration minière, reconnaissance géologique profonde
Un moyen de contrôle de l'évolution d'un paramètre dans le temps	Piézomètres, extensomètres, tassomètres, inclinomètres
Un laboratoire de test in-situ permettant de quantifier un paramètre géotechnique, hydrogéologique, etc.	Diagraphie électrique, géophysique en forage, pressiomètre, dilatomètre
Une voie d'accès aux sols, sous-sol et à la nappe aquifère	Remédiation <i>in-situ</i> (forages environnementaux)

## 2. Définitions du forage d'eau

Quand on parle de forage d'eau, il est nécessaire de définir les termes suivants :

- *le puits traditionnel, creusé à main d'homme*

Ce forage donne accès à la nappe superficielle, dont le renouvellement est aléatoire. L'eau y est rapidement souillée.

- *le puits à grand diamètre, ou puits cuvelé*

C'est un trou de petite profondeur (30 m.) et de grand diamètre (1,80 m), qui accède également à la nappe superficielle. Sa paroi est cimentée par cuvelage ou busage. C'est un ouvrage de génie civil qui nécessite un forage de reconnaissance et de gros moyens (compresseur, dynamite, ciment, eau). Sa réalisation est longue et coûteuse. Son avantage est que plusieurs personnes peuvent tirer en même temps, et qu'il convient bien à l'alimentation du bétail. Mais là encore l'eau est rapidement souillée.

- *le forage*

C'est un trou de grande profondeur (70 m en moyenne) et de petit diamètre (18 à 30 cm), qui donne accès à la nappe phréatique. Cette eau est une eau potable, non souillée, dont la présence est pérenne. Il nécessite un dispositif d'exhaure plus particulier.

## 3. Méthodes de forages courants

Une foreuse consiste essentiellement en un mat conduisant, dans la plupart des cas, les composants du train de tiges (outils et tiges ou câble de forage) qui y sont suspendus. Les systèmes modernes sont électriques, utilisant le système rotary, mais il vaut probablement la peine de faire une brève digression pour décrire quelques méthodes de forage manuel.

Les méthodes simples comprennent :

- forage à la tarière manuelle
- forage au jet
- « *sludging* »
- forage par battage ou forage à percussion
- forage rotary et marteau fond de trou

### **3.1.Forage à la tarière manuelle**

Les tarières manuelles s'opèrent à la force des bras. Elles s'enfoncent dans le sol par mouvement rotatif de l'outil et font remonter les matériaux le long d'une vis sans fin ou dans un « godet » (tarière a godet). Les matériaux doivent être excavés et le forage poursuivi jusqu'à la profondeur voulue. Le forage à la tarière manuelle est lent et limite à une profondeur d'environ 10 m (au maximum 20 m) dans des dépôts non consolidés (pas plus grossiers que le sable).

### **3.2.Forage au jet**

Le forage au jet est une méthode consistant à injecter de l'eau dans un train de tiges d'où elle émerge en un jet qui fend la formation. Les déblais sont évacués hors du forage par l'eau qui circule. Cette méthode, elle aussi, n'est utile que dans les formations non consolidées et seulement pour des profondeurs relativement faibles. Le forage doit être interrompu s'il rencontre un bloc rocheux.

### **3.3.« Sludging »**

Cette méthode, qui peut être décrite comme l'inverse du forage au jet, requiert un tuyau qu'on introduit dans le trou et qu'on bouge de haut en bas, éventuellement à l'aide d'un bras de levier. Une valve anti-retour (on peut obtenir le même effet en obturant l'extrémité supérieure du tuyau avec la main) assure le pompage tandis que de l'eau est versée dans le trou et remonte (avec les débris) dans le tuyau. L'extrémité du tuyau peut être munie de simples dents métalliques, et un petit réservoir situé en haut du trou permet de remettre l'eau en circulation. Les limites de cette technique sont semblables à celles des deux autres méthodes,

Ces techniques manuelles de forage à faible profondeur peuvent être utilisées comme options bon marché lors de la recherche d'eaux souterraines pour des puits ordinaires, en particulier si les études géophysiques sont inefficaces, indisponibles ou impraticables en raison des conditions du sol. Lorsque le forage est réalisé uniquement à des fins de prospection, de petits trous forés rapidement suffisent.

### **3.4.Forage par battage ou forage à percussion**

Le forage par battage consiste simplement à faire tomber un outil coupant d'au moins 50 kg de façon répétée dans le trou. Les outils de forage sont normalement suspendus par une corde ou un câble. Elles requièrent un trépied d'acier solide (chèvre), un câble et son treuil, une

masse de battage et un outil de battage et de curage (cuillère). Cette technique est nettement moins efficace quand le sol est dur et que le matériel risque de dévier accidentellement vers les zones plus meubles.

### 3.5. Forage rotary et marteau fond de trou

Pour la plupart des forages sur le terrain, il faudra utiliser le forage rotary. Les techniques de forage rotary proprement dites permettent de réaliser des forages beaucoup plus profonds et utilisent des fluides de forage pour refroidir et lubrifier les outils de coupe et évacuer les débris du trou. Les fluides se présentent généralement sous forme d'air comprimé ou d'eau. Le marteau fond de trou (MFT) est un développement ultérieur de la technique rotary.

Ayant vu la plupart des méthodes de forage, il est nécessaire de les classer selon leurs avantages et désavantages.

**Tableau 2 : Comparaison des méthodes de forage**

Forage	Avantages	Désavantages
<b>Construction manuelle (Puits ordinaires et forage manuel)</b>	Technique simple utilisant de la main d'œuvre bon marché	Faibles profondeurs seulement
<b>Forage par battage</b>	Foreuses simples, fonctionnement bon marché	Lent, faibles profondeurs seulement
<b>Forage rotary, à la boue</b>	Forage rapide, pas de limite de profondeur, pas besoin de tubage provisoire	Fonctionnement coûteux, peut nécessiter beaucoup de place pour la foreuse et les fosses à boue et utiliser beaucoup d'eau, le « <i>mud cake</i> » peut entraver le développement du forage.
<b>Rotary/marteau fond de trou (MFT), circulation d'air</b>	Très rapide dans les formations dures, n'a pas besoin d'eau, pas de pollution de l'aquifère	Généralement pas utilisé dans les formations instables et meubles. Le forage en dessous du niveau de la nappe phréatique est limité par la pression hydraulique
<b>Rotary, circulation inverse</b>	Pas de formation de « <i>mud cake</i> », forage rapide dans les formations grossières non consolidées à des diamètres larges	Foreuses grosses et coûteuses. Peut nécessiter de grandes quantités d'eau.

## 4. Méthodes de forages d'eau

Après avoir vu en général quelques méthodes de forage, nous nous intéresserons maintenant aux méthodes appliquées aux forages d'eau. Il y a différentes méthodes pour le forage d'eau :

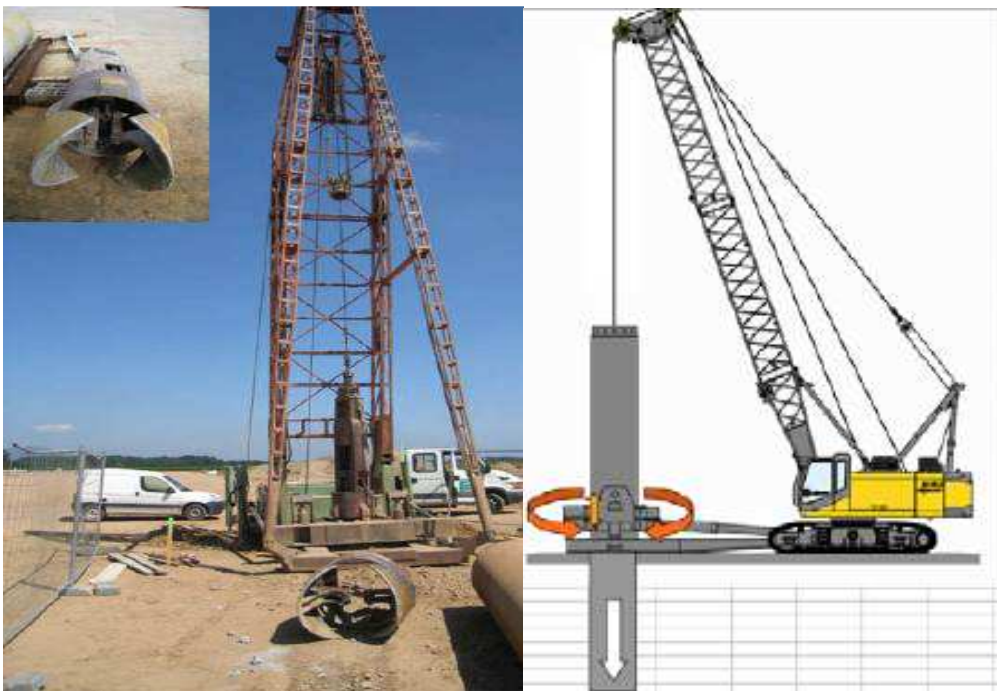
- Forage par havage
- Forage rotary et marteau fond du trou

### 4.1. Havage

Le havage consiste à :

- creuser le terrain à la base du tubage en position verticale
- mettre le tubage qui s'enfonce sous l'effet de son poids à l'aide d'une louvoyeuse
- utiliser des tubes en acier : soudés ou clavetés

Le havage utilise un tubage de travail pour protéger les parois du terrain et éviter les éboulements, le havage s'utilise surtout sur les terrains alluvionnaires.



Source : BRGM (2011)

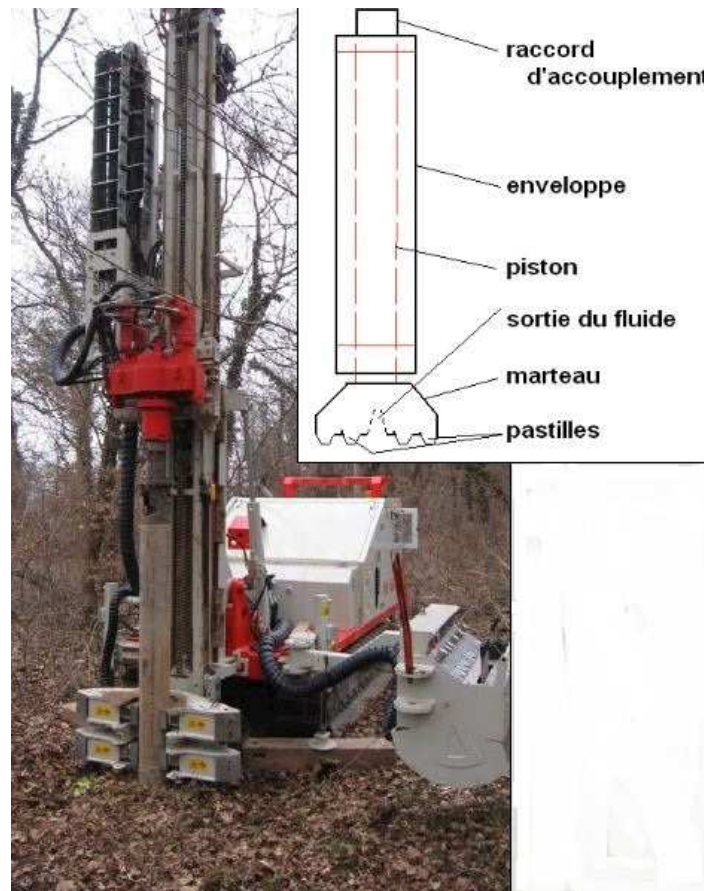
**Figure 12 : Machine de havage**

### 4.2. Marteau fond de trou

Le marteau fond de trou est utilisé pour briser la roche en laissant régulièrement tomber un outil (un trépan), il fonctionne à l'air comprimé et utilise un tubage à l'avancement servant de



coffrage. Le marteau fond de trou est requis lorsqu'on est en présence de formations dures :calcaires et dolomies.



Source : BRGM (2011)

**Figure 13 : Marteau fond de trou**

#### **4.3. Rotary**

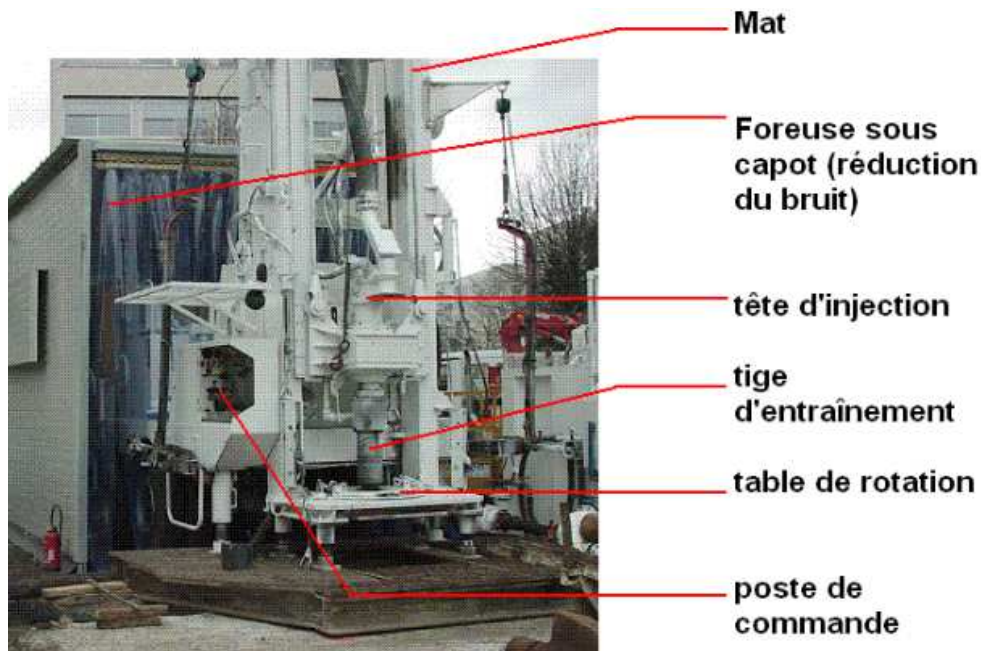
Le rotary est une méthode de rotation et de broyage dont les déblais sont entraînés vers la surface par la circulation d'un fluide de forage (boue de forage), on remarquera que cette boue de forage sera adaptée au terrain traversé (densité, viscosité).

Le rotary est une technique utilisée pour des terrains qui ne «se tiennent pas» (argile, sable, gravier) et formations dures (calcaire).





Source : BRGM (2014)  
**Figure 14: Tête de forage rotary**



Source : BRGM (2014)  
**Figure 15 : Foreuse rotary**

## **5. Matériels de forage d'eau**

Après avoir choisi une méthode de forage, il est nécessaire de déterminer quel est le type de matériel de forage ou de foreuse le mieux adapté à la situation. Puisque notre étude concerne l'eau et plus précisément la caractérisation aquifère, nous nous orienterons surtout donc vers les matériels de forages d'eau.

### 5.1. Choix d'une foreuse

Le choix de la foreuse peut dépendre de la géologie du site, ainsi que de la profondeur et du diamètre prévus des forages. L'accès est un facteur important. Toutes les foreuses, à l'exception des unités les plus petites, qui peuvent être démontées et assemblées sur place, doivent être transportées. Il faudra donc peut-être percer une route à travers les broussailles pour atteindre un site de forage.

On distingue donc des :

- *machines de forage automotrices* : ce sont des appareils du type « lourd » conçus pour la foration et équipés d'un système autonome de translation (montés sur châssis ou à pneumatiques).
- *machines sur porteurs mobiles* : ces machines sont le plus souvent montées sur le plateau d'un camion et quelques fois sur un engin de travaux publics.
- *machines sur remorques*, châssis ou traineau.
- *machines suspendues* : ces machines constituent un équipement de forage adapté à des engins de levages classiques capables de recevoir d'autres équipements.

### 5.2. Machines de forage rotary et marteau fond de trou (MFT)

Le forage rotary et marteau fond de trou sont les forages que l'on rencontre le plus souvent dans les forages d'eau. Les machines de forage industrielles sont montées sur camion ou remorque, mais il en existe petites et extrêmement puissantes. Souvent d'un bon rapport coût-efficacité, la machine peut être transportée en camionnette en pièces détachées et assemblée sur place.

On distingue comme composants de la foreuse :

- *le trépan et tricône*:

Aucun type de trépan n'est adapté à toutes les conditions de forage et formations possibles. Les trépan consistent en trois ou quatre lames crantées qui coupent la formation quand ils sont mis en rotation. Ils peuvent pénétrer rapidement les formations plus meubles comme l'argile peu consolidée ou dure et le « *mudstone* ». Les tricônes, qui peuvent être utilisés avec un

système d'injection d'air ou de liquide, sont couramment employés dans l'industrie pétrolière. Ils peuvent pénétrer tant les formations meubles que des formations relativement dures.

- *le marteau fond de trou (MFT) :*

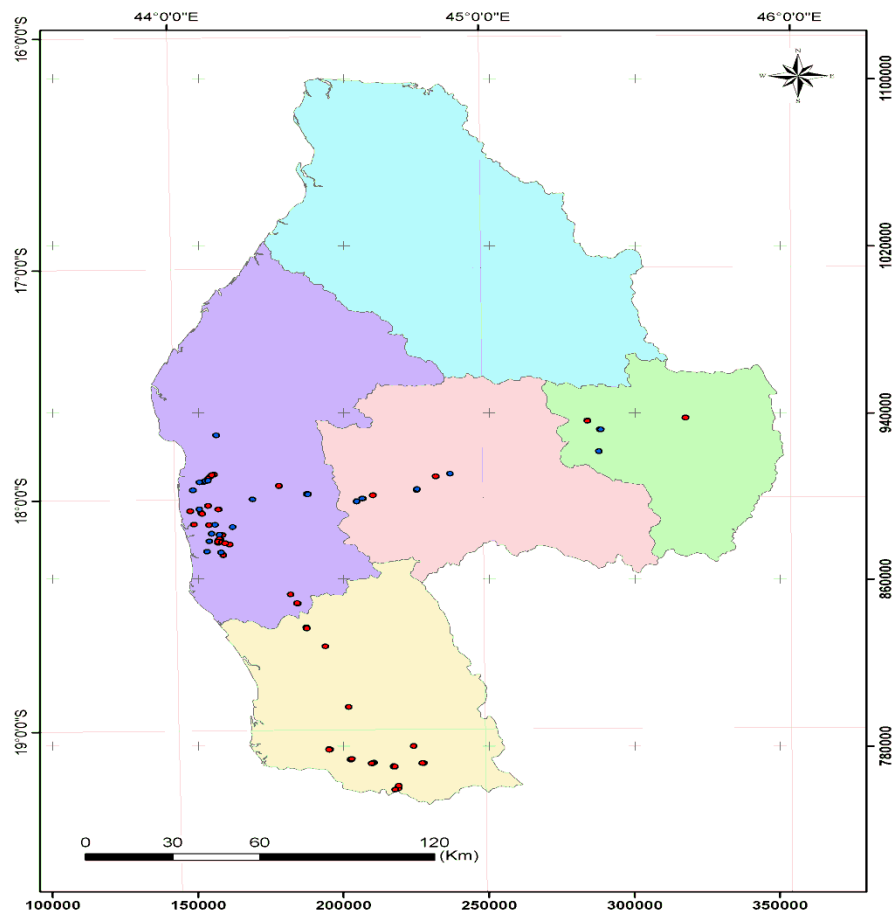
Comme alternative au forage rotatif, si une formation est trop dure pour être pénétrée par un trépan, un marteau fond de trou (MFT) est généralement utilisé. Cet outil a été mis au point pour l'industrie minière et l'exploitation de carrières. L'extrémité mobile – le taillant à boutons – est munie de « pastilles » de carbure de tungstène hémisphériques et comprend des rainures qui permettent à l'air comprimé de s'évacuer. Lorsque le marteau est pressé contre le sol, l'air comprimé injecté dans les tiges force l'outil à entamer un mouvement pneumatique (semblable à celui d'un marteau piqueur).

## **6. Cas des forages dans MELAKY**

Les forages réalisés dans la Région Melaky font partie d'un volet du projet 1250 forages de PAEAR répartis dans huit Régions de Madagascar. Les entreprises exécutantes étant REVAH FORAGE et CGC.

Les travaux de forage ont été réalisés entre 2009 et 2010. 93 points des forages ont été réalisés dans la Région Melaky et qui constituent les données de base de modélisation de ce mémoire. La campagne de 1250 forages s'ajoute à un autre volet de 100 forages additionnels dont 40 sont répartis dans notre Région d'étude. La campagne de 40 forages ayant été entreprise au cours de l'année 2014 par le bureau d'étude SGDM chargé de l'étude et contrôle et la société CGC chargée de la réalisation des forages.

La carte montrant l'emplacement des points de forage étant donnée dans la figure 16 ci-après.



**Carte 1 : Localisation des points de forage dans la Région Melaky**

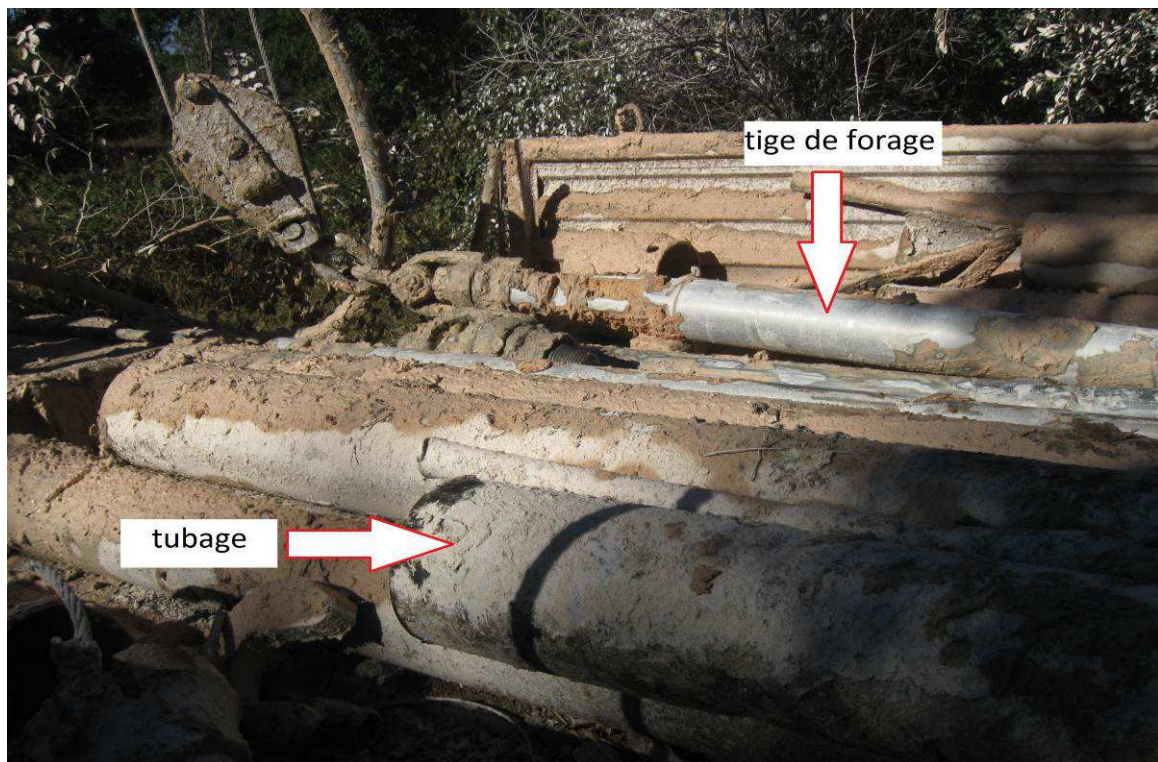
### **6.1. Matériels de forage**

L'ensemble des matériels utilisé pour le forage d'un puits comprend, pour une équipe donnée :

- un camion matériel,
- un camion d'approvisionnement, et
- un camion supportant la foreuse.

Le camion matériel est un camion de marque « Dong Feng » d'un poids de 18 tonnes, servant notamment au transport des matériels utilisés lors de l'exécution du forage tels les différents tubes utilisés pour le tubage ainsi que les tiges de forage,

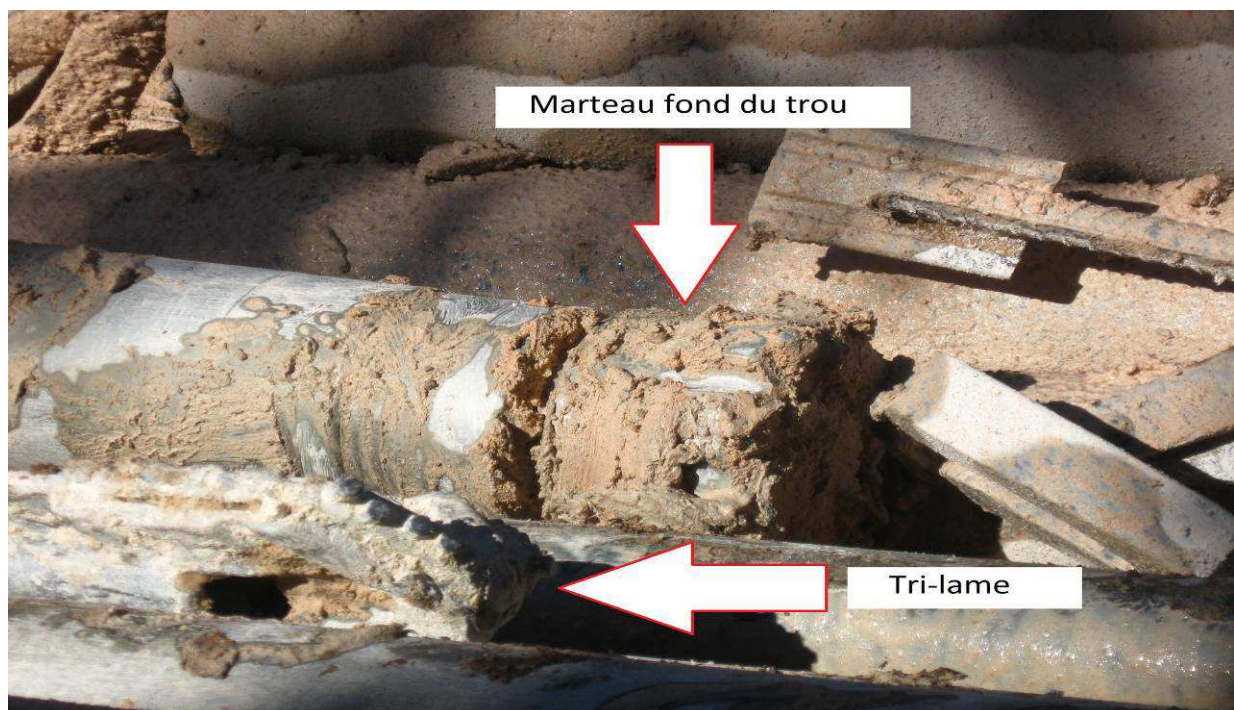




*Source : BRGM (2014)*

**Figure 16 : Tiges de forage et tubes pour tubage**

Les trépanes qui sont de deux sortes : Marteau fond du trou et une tri-lame



*Source : BRGM (2014)*

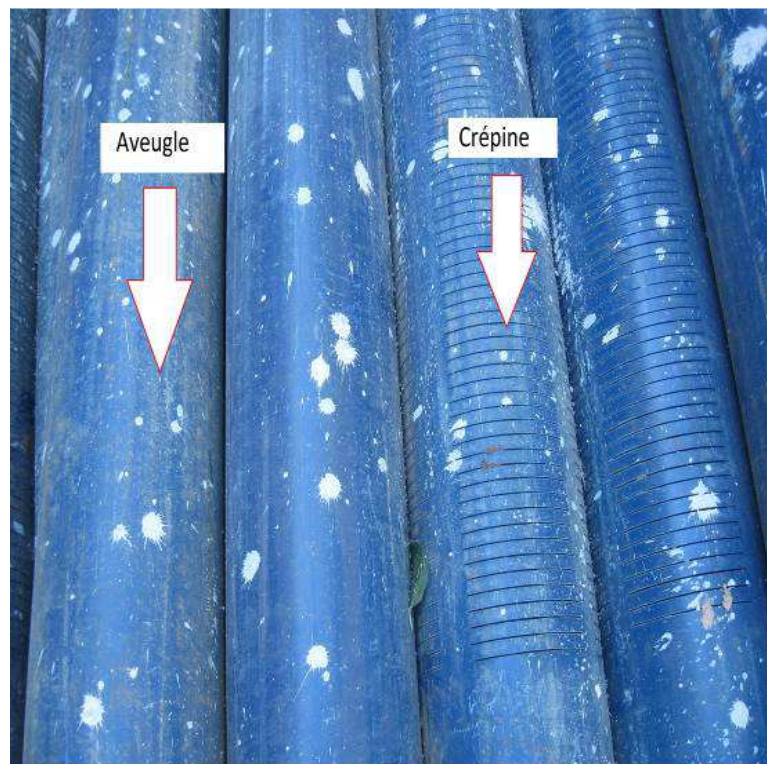
**Figure 17: Marteau fond de trou et une tri-lame**

Et enfin, les tubes en PVC utilisés pour équipés le puits foré dans le cas où celui-ci s'avère positif, les tubes en PVC se distingue en 3 sortes :

- des tubes appelés « crépines » utilisés pour faire entrer l'eau dans le puits et de longueur 2,83 m.
- des tubes appelés « aveugles » utilisés pour empêcher toute infiltration dans le puits, de longueur 2,83 m.
- des tubes appelés « décompteurs » ou « sabot » à mettre au fond du puits, de longueur 1 m

Notons que le diamètre de tous ces tubes est de 12 cm.

Des tubes appelés « chapeaux » pour recouvrir l'installation avant la pose de la pompe.



*Source : BRGM (2014)*

**Figure 18 : Tubes aveugles et crépines**





Source : BRGM (2014)  
**Figure 19 : Tubes décompteurs**



Source : BRGM (2014)  
**Figure 20 : Chapeau**

Le camion d'approvisionnement ou compresseur est un camion « Dong Feng » sur lequel est placé un compresseur de 8 tonne. Le compresseur est de marque chinoise de référence : IR Ingersoll Rand Doosan RHP 750 et comporte 4 vannes de diamètres différents servant selon

les besoins et délivrant une pression de 21 bar, utilisé pour le forage à air, ainsi que le soufflage.



*Source : BRGM (2014)*  
**Figure 21 : Compresseur Ingersoll**

Le camion supportant la foreuse SPC-100 GQ



*Source : BRGM (2014)*  
**Figure 22 : Foreuse sur camion**





*Source : BRGM (2014)*

**Figure 23 : Kelly**

## **6.2. Déroulement des opérations**

Une fois le point de forage repéré, les trois camions se mettent en place de manière à se positionner le plus efficacement possible. Le compresseur se mettant à distance de la foreuse et du camion matériel. La foreuse se place donc sur le point indiqué et le camion matériel se met le plus près possible pour optimiser le temps dépensé aux ajouts des tiges, pour le tubage et le placement des tubes en PVC (voir figure ci-après).



*Source : BRGM (2014)*

**Figure 24 : Positionnement de la foreuse et du camion matériel**

Une fois les camions en position, les foreurs commencent par chauffer le compresseur avant le début du forage, cette étape étant terminée, le forage peut ainsi commencer. Selon la nature du sol le responsable du forage peut opter pour l'emploi de trois trépan de différentes sortes qui peuvent être une tri-lame, un tricône ou encore un rotary. Dans le cas général, tous les forages commencent par la foration de ce qu'on appelle l'avant trou à l'aide d'une tri-lame de 10'' et de longueur  $L = 0.48$  m, et ce, pour voir la formation géologique en question. Cette étape est essentielle car elle permet de savoir quelle sorte de trépan il faut utiliser. Ainsi, si la formation est dite « dure », on privilégiera le marteau fond de trou pour la suite des opérations. Dans le cas où la formation s'avère tendre, on optera plutôt pour une tri-lame.

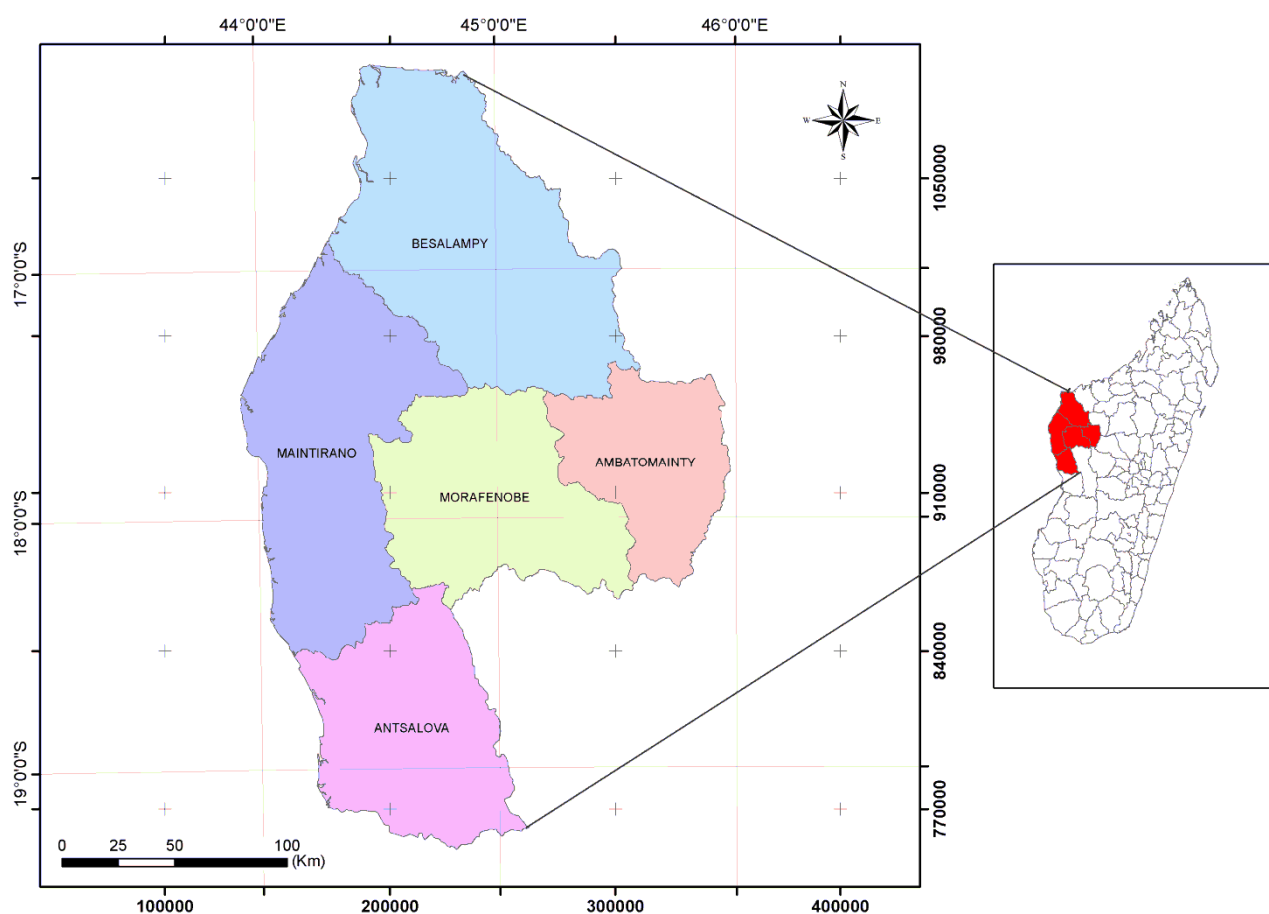
L'avant trou une fois creusé, on procède à un tubage provisoire pour éviter tout éboulement, le reste des opérations dépend ensuite de la formation rencontrée et des éventuels problèmes qui peuvent subvenir. L'ensemble des opérations sont supervisées par deux contrôleurs dits : contrôleurs de forage; l'un travaillant pour la société en charge du forage et l'autre pour le bureau d'étude ayant indiqué les points à forer et qui sont généralement des hydrogéologues, des ingénieurs des mines, des géologues etc.

Ainsi donc avons-nous pu définir d'une manière générale les notions principales en matière d'hydrogéologie dans cette première partie. Nous allons donc présenter dans la partie qui suit la zone d'étude qui fait l'objet de ce mémoire.

## **DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

## I. Situation géographique de la Région Melaky<sup>[26]</sup>

Madagascar compte vingt-deux (22) Régions dont celle du MELAKY se trouvant dans le centre ouest de la Grande Île, plus précisément dans l'ex-Province de Mahajanga. Elle se situe entre 19°32' et 16°18' comme latitude sud, et entre 43°93' et 45°96' comme longitude Est. La Région MELAKY est administrativement limitée au nord par les Districts de Soalala et d'Ambato-Boeni, au sud par les Districts de Belo-sur-Tsiribihina et Morondava, à l'est par les Districts de Fenoarivobe et d'Ankazobe et à l'ouest par le Canal de Mozambique. Elle s'étend sur une superficie de 43382 km<sup>2</sup> soit environ 25,5% de l'ex-Province de Mahajanga.



**Carte 2 : Localisation du Melaky**

## 1. Structure administrative

La Région MELAKY est constituée par cinq (5) Districts : Ambatomainy, Antsalova, Morafenobe, Maintirano et Besalampy, dans laquelle 37 Communes dont 1 Urbaine, et 239 Fokontany. La Capitale Régionale étant Maintirano. Les Districts de Maintirano et de Besalampy occupent plus de la moitié de la Région.

Le tableau ci-dessous montre la répartition de chaque District.

**Tableau 3: Répartition de la superficie par District**

<b>District</b>	<b>Nombre de Communes</b>	<b>Nombre de Fokontany</b>
Maintirano	17	83
Antsalova	5	44
Morafenobe	3	23
Ambatomainy	4	22
Besalampy	8	67
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>	<b>239</b>

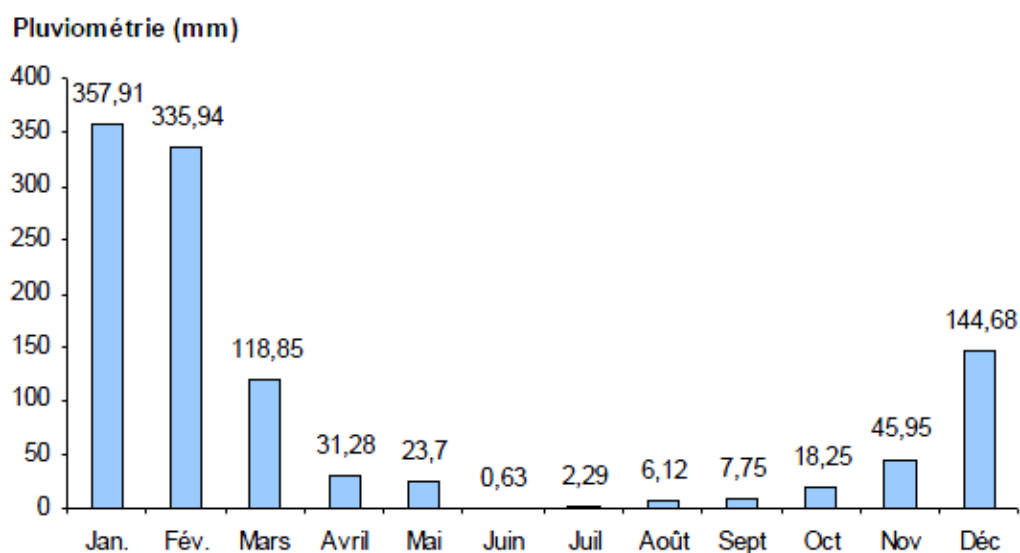
## 2. Contexte climatique

La région Melaky appartient au domaine tropical sub-humide chaud de basse et moyenne altitude dont les moyennes de précipitations annuelles se situent entre 600mm et 1200mm. En général, ces précipitations décroissent du Nord au Sud et la répartition annuelle des pluies est très irrégulière : la saison de pluie est concentrée sur environ cinq mois, de novembre à mars et l'essentiel des pluies recueillies se trouve concentré dans les trois premiers mois (Janvier à mars) soit environ 90 %, ce sont des pluies de mousson estivales. A partir du mois de juin, une baisse significative de la pluviométrie est constatée : le minimum se situe au mois d'août avec une quantité de 0,9 mm.

**Tableau 4 : Répartition des pluies mensuelles en mm de 1992 à 2001 (Station de Maintirano)**

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
1992	289,4	192,5	60,8	33,9	2		0,9	10,5	0,8	0,5	31	121,8	744,1
1993	178,1	270,5	178	3,9						38,6		65,8	734,9
1994	295,8	747,3	52	41,8	1,3	0,5	13,7	0,7		27,1	4,4	151,7	1336
1995	339,4	234,4	123,3	6,9	86,5	0,1	0,9	0,5	2,5	37,8	63,7	127,3	1024,8
1996	200,7	382,7	168,4	8,7	9,2	1,2			49,6	7,5	16	213	1057
1997	839,9	160,1	65,2	116,3	17,5			18,9	8	26,5	13	90,7	1356,1
1998	323,1	703,4	78,3	13,2				0,1	10	9	74	151,7	1360,8
1999	323,3	351	184,2	31,1	60,7	4,5	1,4		1,7	10,8	78	177,9	1224,7
2000	416,1	214,5	159,4	9,3	55,1		6	28,9	4,9		122,1	267,5	1279,8
2001	373,3	103	118,9	47,7	4,7			1,6		24,7	57,3	79,4	810,6
Valeur moyenne	357,91	335,94	118,9	31,3	23,7	0,63	2,29	6,12	7,75	18,25	45,95	144,68	1093,42

La pluviométrie moyenne mensuelle entre 1992 et 2001 est présentée par la figure ci-après :



*Source : Ministères des eaux et des forêts (2005)*

**Figure 25 : Pluviométrie moyenne mensuelle de 1992 à 2001 – Station de Maintirano**

Des phénomènes d'inondation et de sécheresse peuvent se produire dans la zone d'étude.

- *Concernant l'inondation,*

sur dix-huit (18) Communes, douze (12) sont victimes d'inondations fréquentes. Ces phénomènes entraînent la destruction des rizières et des habitations, l'ensablement des terrains de cultures et l'anéantissement des cultures, mais cette période assure l'alimentation en souterraine. Pendant les saisons pluvieuses, les crues entraînent des inondations des plaines. L'inexistence d'infrastructures adéquates pour endiguer et canaliser l'eau est le véritable problème face aux crues annuelles systématiques.

- *Pour la sécheresse,*

Sur quinze (15) Communes, onze (11) sont fréquemment frappées par la sécheresse. Ce qui entraîne une diminution des zones de pâturage, des maladies chez le cheptel bovin et une pénurie d'eau.

### **3. Contexte géologique**

Les reliefs de la région Melaky s'organisent en bandes parallèles orientées conformément à la direction générale NW-SE des accidents tectoniques appelés « direction Bongolava ». La constitution géologique de la région est largement dominée par les terrains sédimentaires d'origine continentale et marine. Mais des affleurements cristallins du précambrien constituent le soubassement lithologique d'une bonne partie de la région à l'Ouest.

La partie sédimentaire fait partie du grand bassin de l'Ouest descendant en pente douce vers l'Ouest avec des paysages de cuesta dans les massifs gréseux et volcaniques du crétacé, les plateaux calcaires du jurassique et de l'Ouest, et des plaines argileuses et sableuses.

Les principales formations sont de bas en haut, de l'Est à l'Ouest à partir du contact discordant avec le socle.

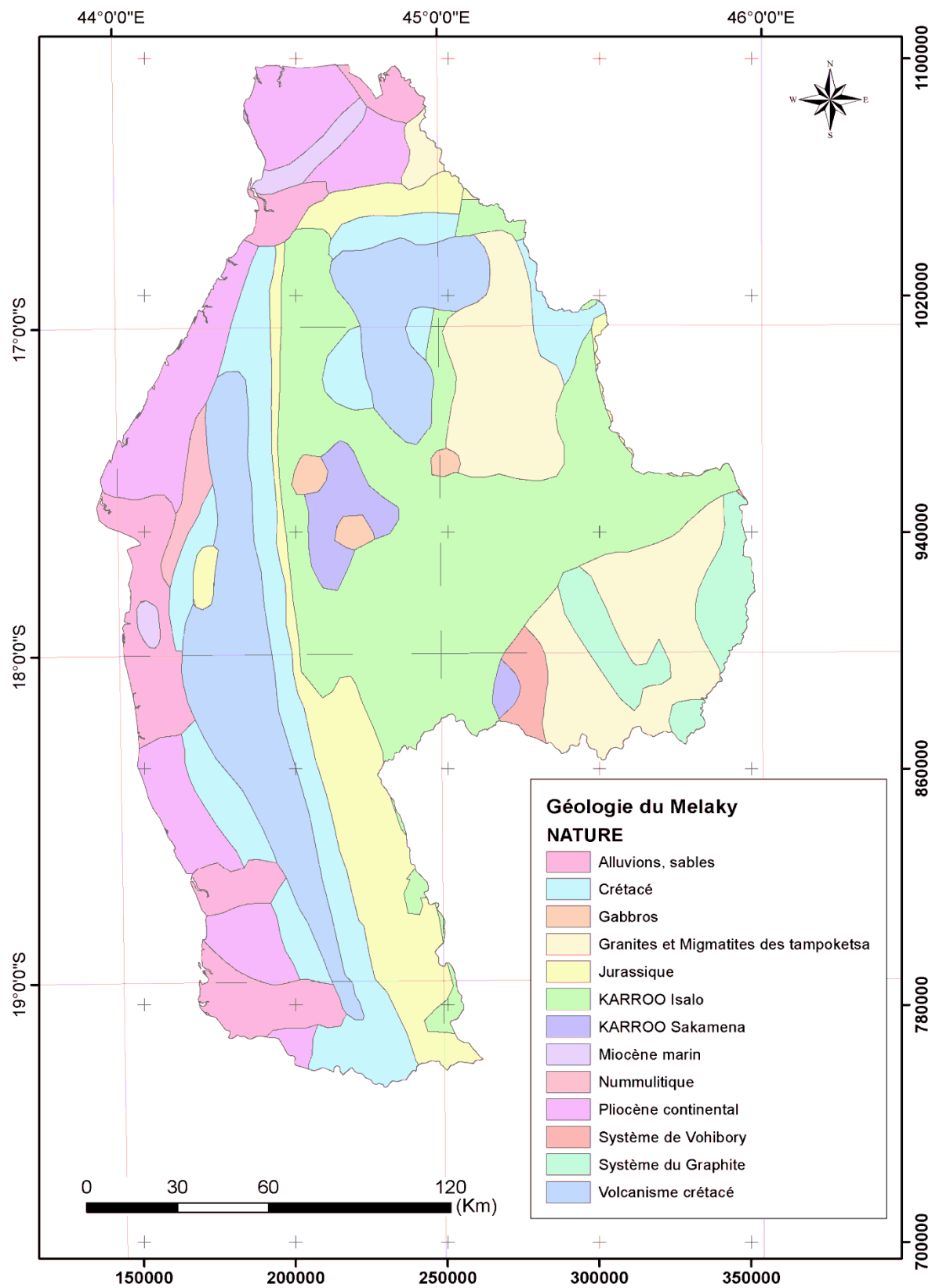
Le **système du Karroo**, qui constitue de formations continentales, allant du carbonifère supérieur à la fin du jurassique. Il comporte 3 groupes :

- ✓ la *Sakoa* (Carbonifère supérieur), localisée dans le Sud-Ouest de l'île, composée de tillites, de schistes noirs, de grès à charbon, d'argile, une petite couche de calcaire.

- ✓ la *Sakamena*(Permien) en grande partie continentale mais avec des intercalations marines, formée de schistes et grès micacés, argiles grises à nodules, grès et argiles rouges.
- ✓ l'*Isalo* divisé en Isalo I, Isalo II, Isalo III (du Trias au jurassique moyen)
  - L'Isalo I (Trias) continental est constitué de grès blancs grossiers, mal cimentés, souvent conglomératiques avec stratification entrecroisées. Son épaisseur atteint plusieurs milliers de mètres.
  - L'Isalo II (Jurassique inférieur- lias supérieur) est formé d'une alternance de grès plus ou moins grossiers à stratification entrecroisée, jaunâtre ou rougeâtres et d'argiles rouges, parfois bariolées. Il renferme d'importantes intercalations marines constituées de marnes, et calcaires. Son épaisseur va de plusieurs centaines de mètres.
  - L'Isalo III (Jurassique moyen) est constitué d'une alternance de grès à stratification entrecroisée et d'argiles. Les intercalations marines y sont plus abondantes. L'épaisseur est de plusieurs centaines de mètres.

Le ***Jurassique moyen marin*** est l'équivalent marin de l'Isalo II et III. Les formations marines de ce jurassique moyen sont représentées par de grands plateaux calcaires karstifiés (plateaux de l'Ankara, du Kelifelyet de Bemaraha).





**Carte 3 : Géologie du Melaky**

## **II. Contexte hydrogéologique<sup>[30]</sup>**

Le potentiel hydrographique est caractérisé par un important réseau d'eau douce (rivières, lacs, marécages) qui se mêle au système marin (lagunes, estuaires). Les apports et débits en eau des rivières considérables pendant la saison des pluies (décembre à mars) conduit une fréquence des crues et une ouverture occasionnelle du littoral des lagunes sur l'océan.

### **1. Grands cours d'eau**

La Région Melaky est traversée par un réseau dense de cours d'eau avec un régime hydrologique bien alimenté toute l'année d'où des ressources en eau inestimables susceptibles de dynamiser de nombreuses activités économiques telles que le transport fluvial et maritime, l'alimentation en eau, la pêche et l'agriculture. 31 cours d'eau ont été inventoriés. Les débits de crue varient de 100 à 560 m<sup>3</sup>/s et les débits d'étiage de 0,05 à 2 m<sup>3</sup>/s.

#### **1.1. Lacs**

Quatre-vingt-quinze (95) lacs ont été inventoriés dans la Région Melaky. De nombreux lacs et étangs offrent de potentiels économiques (pêche, tourisme...) et écologiques non négligeables :

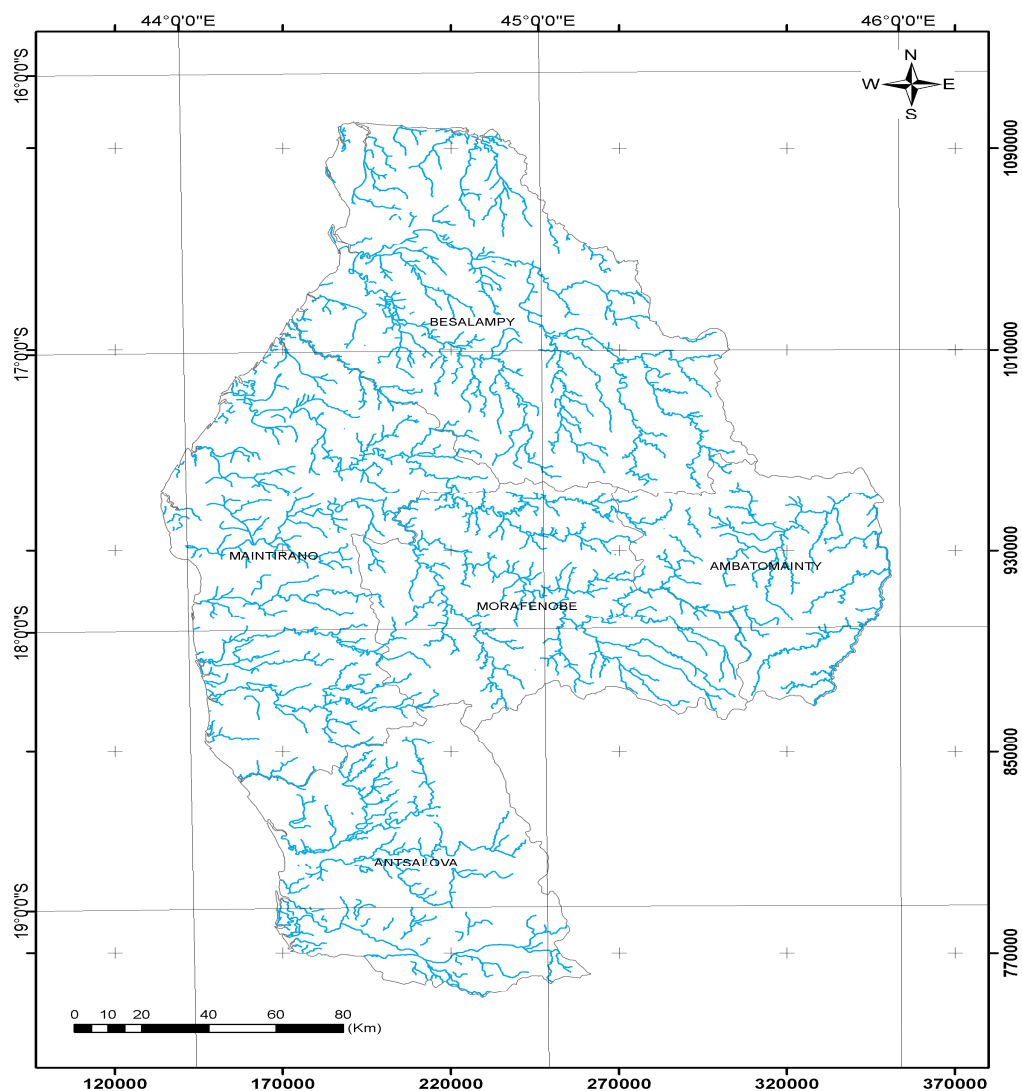
- lacs Masamà (860 ha), Antsoha (190 ha) et Antsohale
- le complexe lacustre de la Manambolomaty désigné site Ramsar le 29 septembre 1998

#### **1.2. Mer**

La Région Melaky a accès au Canal de Mozambique. Son rivage côtier s'étend à 350 km environ.

#### **1.3. Sources thermominérales et chutes d'eau**

10 chutes d'eau et 12 sources minéralisées ont été inventoriées dont la source thermique d'Ampoza (Commune d'AntsaidohaBebao) dont son aménagement figure parmi les pôles de développement de Maintirano.



**Carte 4 : Grands cours d'eau permanents**

## **2. Classification des nappes rencontrées dans la zone**

Une étude antérieure montre l'existence possible de différents types de nappes dans notre zone d'étude. Classées suivant la nature géologique de l'aquifère, on a :

- les nappes d'alluvions, constituées essentiellement par sables argileux;
- les nappes des sables de dune, composées essentiellement par des sables fins;
- les nappes des sables argileux supérieurs, formées essentiellement par sables argileux;
- les nappes du Néogène, constituées essentiellement par des grès sableux;
- les nappes de l'Eocène, avec essentiellement du calcaire;
- les nappes du Jurassique, composées essentiellement par du calcaire karstifié ;
- et Nappes de l'Isalo, formées essentiellement par des sables – gréseux.

### **III. Fonctions de l'eau dans la Région Melaky<sup>[30]</sup>**

L'eau tient une place très importante dans tous les aspects de la biodiversité de la région du Melaky, il y tient une place essentielle dans la survie de la faune et de la flore et tient aussi de nombreuses fonctions.

#### **1. Fonction biologique**

L'eau constitue :

- l'élément nécessaire et indispensable à toute vie sur notre planète Terre.
- le principal constituant des organismes vivants (teneur moyenne dans la matière vivante : 60-75%).
- un élément métabolique chez les êtres vivants (solvant, véhicule des éléments minéraux, régulation de la température interne, etc.).

#### **2. Fonction écologique**

Elle joue un rôle de :

- un milieu naturel (biotope) de la biodiversité végétale aquatique (ex : plantes vertes ou chlorophylliennes, algues)
- d'habitats de nombreuses espèces animales et de divers micro-organismes inféodés aux modes de vie aquatique et marin et qui permet à ceux-ci d'assurer leur fonction d'alimentation et de reproduction, ainsi que leur développement et croissance.

Elle a comme fonctions :

- l'alimentation : mise à disposition de ressources alimentaires pour de nombreuses espèces animales locales et à distance par exportation de matière organique;
- la reproduction : la présence de ressources alimentaires variées et la diversité des habitats constituent des éléments essentiels conditionnant la reproduction des organismes vivants, notamment les poissons, les batraciens, certains mammifères, de nombreux insectes, mollusques et crustacés;
- l'abri, de refuge et de repos pour diverses espèces animales (ex : Oiseaux : Flamants roses, Sternes, Hérons) dans les lacs et lagunes. Toutes ces fonctions confèrent aux milieux aquatiques et marins et aux zones humides une extraordinaire capacité à produire de la

matière vivante; ils se caractérisent ainsi par une productivité biologique nettement plus élevée que les autres milieux.

### **3. Fonctions climatiques**

L'eau intervient dans :

- la régulation du climat en liaison avec la présence de forêts et autre couverture végétale (microclimats, ambiance thermique, précipitations).
- les précipitations et la température atmosphérique peuvent être influencées localement par les phénomènes d'évaporation intense subis par les milieux renfermant de l'eau et la végétation (évapotranspiration). Ils peuvent ainsi tamponner les effets des sécheresses au bénéfice de certaines activités agricoles.

### **4. Fonction sociale et économique**

L'eau assure la satisfaction des besoins en eau potable (points et prises d'eau : sources, puits, réseau de production et de distribution de l'eau) et pour divers usages domestiques (hygiène, toilette, lessive, etc.).

L'eau conditionne l'exercice d'activités économiques des secteurs *primaire* (agriculture, élevage, production et distribution d'eau), *secondaire* (consommation d'eau dans l'industrie, fourniture d'énergie pour barrage hydroélectrique, exploitation et lavage de produits miniers et halieutiques) ou *tertiaire* centré sur les loisirs et le tourisme.

L'eau contribue pour une grande part dans les productions agricole (pâturage, élevage, rizières, maraîchage, exploitation forestière...), halieutique (pêches : poissons, langoustes, crevettes, holothuries...) et aquacole (piscicultures, aquaculture de crevette, culture d'algues...). Elle procure des avantages économiques et financiers difficiles à chiffrer précisément mais qui se révèlent néanmoins considérables.

### **5. Autres fonctions**

Les réseaux hydrographiques sont utilisés pour naviguer. La rivière de Maningoza dans le District de Besalamy est navigable toute l'année.

La navigation maritime est aussi très fréquente. Le trafic maritime est relativement développé dans la Région. Les principaux ports sont : Maintirano; Tambohorano et Besalamy.

## **IV. Pressions sur l'eau dans la Région Melaky**

Les pressions sur l'eau étant différentes dans tout Madagascar, il est nécessaire d'en parler pour la région d'étude.

### **1. Facteurs d'origine anthropique**

Selon les saisons, catastrophes naturelles (crues et inondations) ou insuffisance des ressources en eau accentuées par les effets des pressions humaines : déforestation, feux de brousse, pratique traditionnelle inadéquate des cultures (*tavy*, feux d'agriculture) et de l'élevage (feux de pâturage), utilisation inappropriée des terres, d'où érosion des sols non protégés des effets des eaux de ruissellement par une couverture végétale conséquente.

### **2. Pollution de l'eau**

En matière d'accès en eau potable, la Région Melaky est moyennement lotie. Ce sont surtout les eaux des puits que les gens utilisent quotidiennement, ensuite il y a ceux qui s'approvisionnent directement aux différents cours d'eau. Seulement moins de 3% des ménages qui vivent dans les chefs-lieux de District sont abonnés à l'eau courante de la JIRAMA.

Le risque de maladies est ainsi probable. L'eau peut être salie à la source par :

- les hommes ou les animaux quand ils font leurs besoins ou leur lessive dans ou près d'un point d'eau
- les bords de sources ou de rivières qui ne sont pas nettoyés (exemple : bords de rivière sur lesquels on a jeté des ordures)
- les puits ou sources non protégés
- les eaux usées domestiques
- les rejets industriels et hospitaliers
- les insecticides et herbicides utilisés en agriculture ou autres produits chimiques.

Dans la vie quotidienne, la pollution peut venir :

- des manques de soin et d'hygiène (exemple : en prenant de l'eau avec des mains sales)
- des récipients d'eau non couverts ou sales
- des animaux qui boivent dans les récipients d'eau (chat, chien, volaille ...)

Plus de la moitié de toutes les maladies et de tous les décès parmi les jeunes enfants sont dus à la pollution de l'eau par les microbes. Beaucoup de ces microbes proviennent des excréments animaux ou humains. Un grand nombre de ces maladies, en particulier la diarrhée, peuvent être évitées en adoptant de bonnes pratiques d'hygiène.

### 3. Milieu humain

Melaky est une région sous-peuplée. La population est estimée à 257 790 environ. La densité moyenne est de 5,9 habitants/ km<sup>2</sup>. En général, la densité de la population est très faible à cause de l'enclavement de la Région et l'influence des « *dahalo* ». On constate néanmoins que le District de Maintirano apparaît la plus peuplée avec 12,38 habitants/km<sup>2</sup>.

Le tableau ci-après montre la densité de la population par District.

**Tableau 5 : Répartition spatiale de la population**

<b>Districts</b>	<b>Population résidente</b>	<b>Superficie /km<sup>2</sup></b>	<b>Densité habitant/km<sup>2</sup></b>
Maintirano	117 023	9 456	12,38
Antsalova	29 008	6 156	4,71
Ambatomainy	28 100	6 980	4,03
Morafenobe	37 419	8 215	4,55
Besalampy	46 240	12 575	3,68
<b>Région</b>	<b>257 790</b>	<b>43 382</b>	<b>5,94</b>

Nous avons vu dans cette deuxième partie une présentation de la Région Melaky, incluant sa situation géographique, son contexte hydrogéologique et les différentes pressions d'eau dans la Région. Nous allons à présent parler de la méthodologie appliquée pour la modélisation hydrogéologique de la Région dans la partie suivante.

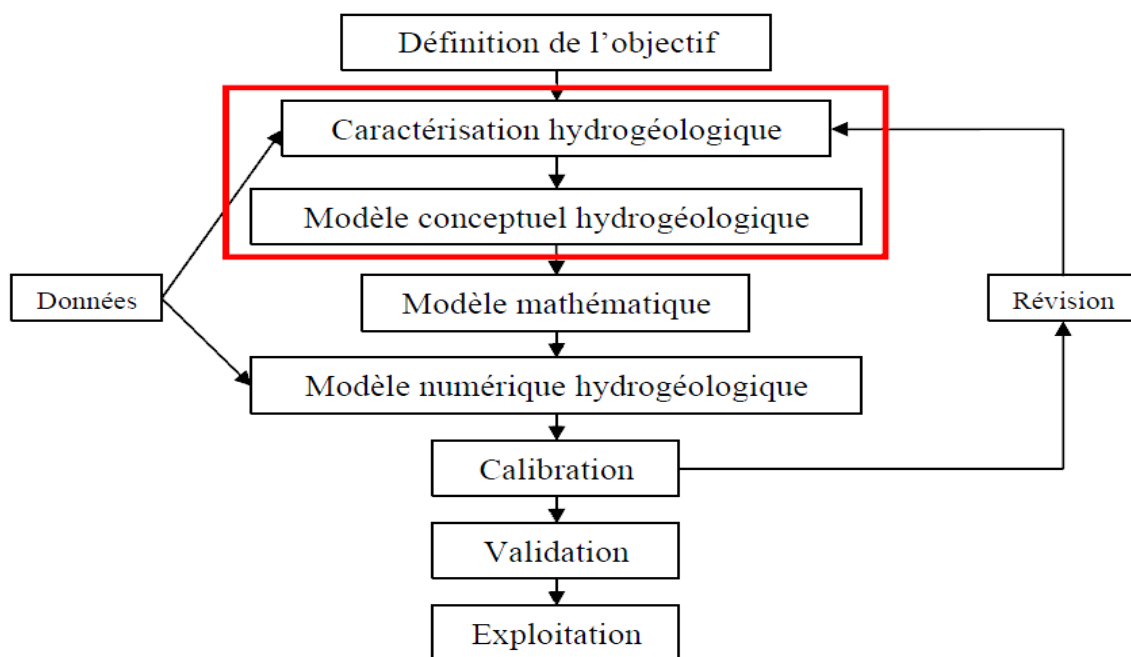
**TROISIEME PARTIE : METHODOLOGIE  
APPLIQUEE A LA MODELISATION  
HYDROGEOLOGIQUE**



Les modèles hydrogéologiques sont des représentations théoriques simplifiées d'un système aquifère. Ils comportent la définition d'une structure (le sous-sol), la formulation de lois (relations déterministes ou probabilistes) reliant les entrées du système (par exemple des mesures de débits) à ses sorties (par exemple diagrammes des flux des eaux souterraines), et la définition des paramètres (constantes ou variables pouvant prendre des valeurs numériques comme les coefficients de perméabilité des roches) entrant dans ces relations (Castany, 1997). Ils cherchent à représenter l'écoulement de l'eau dans le sous-sol. Ce sont donc des modèles à quatre dimensions (4D) incluant les trois dimensions de l'espace et le temps. Toutefois, on s'intéressera plus particulièrement à l'aspect 3D de ces modèles mais tout en gardant à l'esprit qu'il doit s'intégrer dans un modèle 4D.

## I. Etapes de conception d'un modèle 3D hydrogéologique<sup>[1]</sup> [4] [31]

Il existe de nombreuses méthodologies pour la conception d'un modèle hydrogéologique mais toutes suivent le même schéma général, décrit dans la figure suivante.



Source :AMBROISE (2012)

**Figure 26 : Les étapes du processus de modélisation hydrogéologique**

Le rectangle rouge précise les étapes auxquelles on s'intéressera plus particulièrement.

## **1. Définition de l'objectif**

L'hydrogéologue identifie la (les) question(s) auxquelles le modèle doit permettre de répondre.

## **2. Caractérisation hydrogéologique**

C'est une étape particulièrement complexe car elle a pour objectif d'analyser et de compiler les données et informations nécessaires au modèle conceptuel hydrogéologique. Ces informations sont issues de l'intégration et de l'analyse des données hydrogéologiques (perméabilité des roches, piézométrie, etc.) et géologiques (stratigraphie, minéralogie, etc.) acquises selon différentes techniques (cartographie, forages, sismologie, piézométrie, etc.).

## **3. Analyse des données géologiques**

L'analyse des données géologiques est une étape délicate car les objets géologiques ne sont pas observables directement ce qui représente un sérieux handicap. On ne peut les étudier que par des techniques d'exploration géologiques et géophysiques : cartographie de terrain, sismologie, forages, etc. qui demandent de vastes connaissances.

Cette étape a pour but d'extraire les informations sur la structure spatiale et les propriétés physiques des objets géologiques. Ces objets étant issus de successions de phénomènes géologiques naturels tels que les processus de sédimentation océanique ou la tectonique des plaques, leurs formes et structures spatiales sont généralement complexes. Elles ont une grande influence sur l'hydrogéologie. Ainsi, une structure où une couche de grès qui repose et est entouré par une couche d'argile imperméable constitue par exemple un excellent aquifère à la différence d'un grès reposant sur un calcaire fortement fissuré.

Les multiples propriétés physiques des objets géologiques sont également déterminantes et doivent être analysées avec soin. Par exemple, leur composition minérale et leur granulométrie déterminent leur capacité de contenir et conduire l'eau. Ainsi, un grès poreux ou un calcaire fortement fissuré peuvent être des roches aquifères, tandis qu'un calcaire compact ou un basalte qui ont une porosité et une perméabilité quasiment nulles ne contiennent pas d'eau.

#### **4. Modèle conceptuel géologique**

Le modèle conceptuel géologique est une représentation mentale tridimensionnelle de la structure géologique du sous-sol issue de l'étape précédente. Le géologue l'obtient en déterminant la chronologie relative des objets géologiques, leur type de roche, leur âge, leurs relations spatiales, etc. Il doit ensuite intégrer toutes ces informations de façon logique et cohérente dans un même modèle ce qui est une difficulté majeure de la modélisation géologique 3D.

#### **5. Modèle conceptuel hydrogéologique**

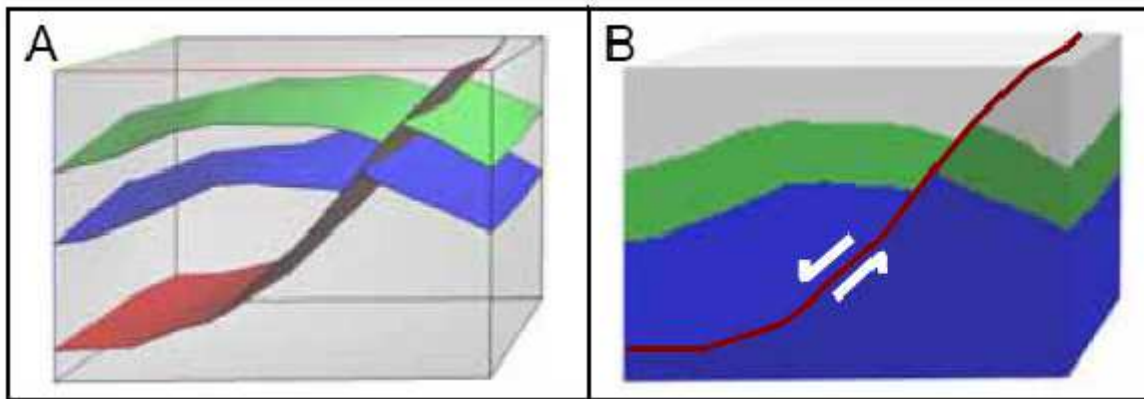
Le modèle conceptuel hydrogéologique est l'étape où l'hydrogéologue exploite l'analyse des données hydrogéologiques effectuée dans l'étape de caractérisation et les intègre au modèle géologique 3D avec l'aide du géologue et du géomaticien. C'est donc à cette étape que l'hydrogéologue associe la composante dynamique au modèle géologique statique à l'aide en particulier des lois d'écoulement. Il émet alors des hypothèses de modélisation et identifie les paramètres qui seront nécessaires à leur évaluation. Il définit en particulier :

- les limites spatiales et conceptuelles (conditions aux limites, etc.) de la zone ;
- les caractéristiques hydrogéologiques des objets du modèle jugées pertinentes (propriétés physiques comme la perméabilité par exemple) ;
- le modèle de milieu adapté à la zone (poreux, réseaux de failles, karstique) ;
- le type d'écoulement prédominant d'après la structure de l'aquifère, laminaire (le long de surfaces comme les failles ou limites de couches), volumique, etc.

#### **6. Modèle géométrique 3D**

Le modèle géométrique 3D est construit à partir du modèle conceptuel à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D. Il représente les objets géologiques sous forme de volumes et leurs relations géométriques et topologiques. À cette étape, le géologue collabore étroitement avec le géomaticien qui maîtrise les différentes méthodes de construction des modèles géométriques. En effet, ce modèle doit répondre aux contraintes identifiées par le géologue mais aussi tenir compte des contraintes de modélisation liées aux types de données exploitées, au type d'environnement à modéliser (par exemple milieu fortement faillé d'une chaîne de montagnes, milieu marin à structures en couches régulières) et à l'objectif de modélisation.

Parmi les méthodes de modélisation géométriques les plus couramment utilisées en géosciences on trouve les représentations par frontières et les voxels (Bédard, 2006). La première consiste à identifier les volumes par leurs surfaces frontières et en les laissant creux tandis que la seconde construit les volumes par l'assemblage de cubes élémentaires, les voxels, comme le font les pixels dans une image en 2D (figure suivante).



*Source : Bédard (2006)*

**Figure 27 : Exemples de représentations : A) par frontières, B) par voxels**

Ces deux méthodes sont bien adaptées au contexte de la modélisation hydrogéologique car elles permettront par la suite d'appliquer rapidement les méthodes de résolution des lois d'écoulement du modèle hydrogéologique.

## **7. Modèle géologique 3D**

Le modèle géologique 3D enfin est le modèle auquel sont attachées des informations descriptives identifiées dans les étapes précédentes comme l'âge et type de roche, etc., le tout formant les objets géologiques qui seront nécessaires au modèle hydrogéologique pour identifier les conditions aux limites des objets et les propriétés physiques indispensables.

On peut constater que ce processus de modélisation géologique conduit à un modèle géologique uniquement 3D. Le temps n'intervient pas sauf en ce qui concerne l'établissement de la chronologie. Ceci est dû au fait que les échelles de temps en géologie et en hydrogéologie sont totalement différentes. Les structures géologiques se forment généralement au cours de processus qui s'étendent sur des millions d'années, tandis que l'eau peut parcourir plusieurs dizaines de kilomètres par an au sein des aquifères (Harter, 2003). À cette échelle de temps, on peut donc considérer que les objets géologiques sont invariants. À ce titre on peut dire qu'il représente la composante statique du modèle hydrogéologique tandis

que les lois régissant l'écoulement de l'eau à travers ces volumes constitueront sa composante dynamique.

## **II. Logiciel ROCKWORKS 15**

Il existe bon nombre de logiciel servant à la modélisation 3D. Les étapes ont été abordées d'une manière très générale dans les grandes lignes ci-dessus. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi d'utiliser en parti le logiciel de modélisation ROCKWORKS 15 car on peut facilement se le procurer d'un côté via internet mais surtout parce que c'est le logiciel de modélisation le plus utilisé dans le secteur minier.

### **1. Présentation du ROCKWORKS 15**

Le logiciel ROCKWORKS 15 est un produit de l'entreprise Rockware, situé aux U.S.A .Il est l'un des logiciels utilisé en Hydrogéologie, en Hydrochimie et en hydrologie. Il est très utile aussi dans le secteur pétrolier et gazier car il facilite la création de sections transversales et la modélisation de réservoirs.

RockWorks est un outil complet qui permet de visualiser, d'interpréter et de présenter les données extérieures et sous-sols. Il contient de nombreuses options pour traiter les données géologiques y compris la stratigraphie, la lithologie, les données géophysiques et les données de forage. Il permet d'estimer facilement et rapidement la quantité d'une réserve ou d'un gisement minier surtout la surcharge volumétrique.

Et, si vous êtes un Ingénieur pétrolier, un Chercheur environnemental, un Hydrologiste, un Géologue ou un Hydrogéologue, RockWorks contient des outils qui vous permettent d'économiser vos temps et vos argent, d'augmenter votre rentabilité et de vous fournir un avantage concurrentiel par ses graphiques, ses modèles et ses parcelles de terrain de haute qualité.

### **2. Champs de travail inclus dans RockWorks15**

Les données de forage ou non-forage recueillies sont traitées dans les deux sous-programmes de RockWorks qui sont aussi ses deux fenêtres principales :

- gestion des données de forages ou « *Borehole Manager* »;
- utilités géologiques ou « *RockWorks Utilities* ».

### **2.1. Le Borehole Manager**

Le *Borehole Manager* ou « Gestion des données de forage » est employé pour l'entrée et la gestion faciles des données du sous-sol (les données de localisation, géophysiques et géochimiques, les données lithologiques et /ou stratigraphiques, etc...). Il est aussi l'une de deux fenêtres principales des données inclus dans le programme RockWorks15. C'est dans cette fenêtre qu'on effectue la majeure partie de la modélisation et de visualisation du sous-sol.

### **2.2. LeRockWorks Utilities**

C'est l'autre sous-programme du RockWorks qui comprend : le maillage, le contournage, la modélisation des solides, et des outils en général (n'inclut pas le Gestionnaire de base de données de forage).

En plus, cette fenêtre est l'autre interface du logiciel. On traite avec ce sous-programme « *Utilities* » les données de forage et non-forage. Il contient également des différents menus comme le *Grid*, *Solid*, *Volumetrics*, *Hydrology*, *Hydrochemistry*, *Linears*, *Planes*, *Statistics*, *Survey*, *Coords*, et *Widgets*.

*RockWorks Utilities* est disponible comme un programme autonome et est vendu indépendamment avec ses outils de service. Il facilite alors:

- les conversions des coordonnées avant de les utiliser ;
- l'analyse statistique ;
- le traçage des cartes de linéation ;
- l'analyse des images en 2D ou 3D ;
- l'étude hydrologique (diagramme et histogramme) et hydrochimique (diagramme de Piper,...).

### **2.3. Outils graphiques**

Il y a deux fenêtres d'affichage graphique dans le programme RockWorks15. Cet affichage permet de présenter en 2D ou 3D les modèles solides notamment les modèles du sous-sol.

## **2.4. L'affichage en 2D ou « RockPlot 2D »**

Le *RockPlot2D* est l'une des fenêtres de tracé et d'exposition des résultats pour RockWorks. Il est utilisé pour afficher et éditer les cartes en 2D basées sur des couches et des diagrammes. De plus, il contient son propre jeu de commandes de menu et barre d'outils.

Les caractéristiques qui différencient cet outil sont :

- l'exportation des images ou des graphes en (*DFX, PNG, JPG, BMP et KMZ*) ;
- la puissance du dessin, ainsi que les outils d'annotation et la numérisation ;
- la possibilité d'ajouter une exagération verticale ;
- la possibilité d'ajouter plusieurs fichiers 2D en un seul ;
- les couches d'affichage sur et en dehors.

## **2.5. L'affichage en 3D avec RockPlot 3D**

Le *RockPlot3D* est une fenêtre interactive d'affichage graphique qui utilise « *OpenGL* » pour la visualisation facile des images en 3D telles que les notations, les diagrammes de barrière, les modèles solides et les surfaces 3D. Il fournit la rotation interactive, panoramique, bourdonnant, et posant de différentes images.

De plus, on pourra ajuster aussi l'éclairage, le filtre et les gouttes des couleurs pour améliorer la netteté des images afin de regarder les volumes sur l'écran. Ainsi, l'exportation des images vers une résolution de haute définition sera facile « *3D Shape files* ».

Les atouts particuliers de cette fenêtre sont :

- la visualisation des images en 3D RockWorks-solides, les surfaces, les diagrammes de clôture, les images d'*OpenGL* ;
- la rotation autour d'un axe continu ;
- la capture de vue rotatif comme film en format « *.avi* » ;
- le réglage facile de l'éclairage, étirement, angle de vision, de la transparence, la couleur de fond ;
- l'ajout de plusieurs vues 3D en un seul ;
- et l'affichage sur et en dehors des images.

## 2.6. La mise en page ou « ReportWorks »

Le *ReportWorks* est un outil de disposition de page pour des images, des cartes binaires, des légendes, de forme, et du texte. C'est le nouvel outil graphique de cette dernière version du logiciel RockWorks, utilisé pour bien présenter toutes les images dans une même page afin de les publier ou imprimer. Le lancement du *ReportWorks* est effectué après avoir terminé le traitement des cartes et des modèles obtenus dans la fenêtre 2D ou 3D.

Dans cette nouvelle interface, on peut faire tous les travaux d'amélioration de la présentation des images comme :

- l'inclusion de toutes les images RockPlot 2D : cartes, coupes, logs, graphiques, diagrammes ;
- l'échelle de l'image en utilisant des unités de meilleur ajustement ou spécifié par l'utilisateur même (*pouce, cm, feet*) ;
- l'insertion des images raster (BMP, JPG, TIF), y compris des images géo-référencées;
- l'ajout des étiquettes du texte et des paragraphes ;
- l'insertion des étiquettes des coordonnées et des barres d'échelle ;
- l'ajout des légendes « pattern » ;
- l'insertion des symboles, lignes, rectangles, polygones et des polylignes.

## III. Logiciel Geosoft Oasis Montaj 7.5<sup>[10][11][12][13][14][15][16]</sup>

Le logiciel Oasis Montaj 7.5, tout comme le logiciel rockworks 15 est un logiciel de modélisation essentiellement utilisé par les ingénieurs des Mines et les géologues. Oasis Montaj ne diffère d'ailleurs du rockworks que de par la manière d'affichage de ses résultats.

Nous avons choisi ici d'employer les deux logiciels en simultané pour montrer les résultats d'un même travail sur les deux logiciels et d'ainsi marquer la complémentarité de ces deux outils mais aussi le contraste de l'affichage des résultats.



## **1. Champs de travail inclus dans Oasis Montaj 7.5**

Oasis montaj est un logiciel de “*Mapping and Processing System*” (MAPS), un logiciel de Geosoft, qui est une plateforme utilisée pour travailler avec un large volume de données spatiales en donnant les fonctionnalités nécessaires pour localiser, visualiser, manipuler, afficher et partager des données.

## **2. *Drillhole data***

Le *Drillhole data* est comme le *borehole manager*, l’outil qui permet d’importer facilement des données dans l’Oasis Montaj. Etant l’une des fenêtres les plus utilisées, la majorité des manipulations de base se font à l’aide de ce DH-data, notamment pour créer un nouveau projet, importer les données, éditer les systèmes de coordonnées ou encore les différents codes nécessaires à une modélisation lithologique comme notre cas dans ce présent mémoire.

## **3. *Drillhole plot***

Le *Drillhole plot* regroupe l’essentiel des outils graphiques dans Oasis Montaj ; mis à part la fenêtre 3D et la fenêtre « *surface mapping* », le DH-plot est sans aucun doute l’onglet qui est la plus utilisée. Munie d’une palette riche mais facile à manipuler, le DH-plot permet de faire toutes les manipulations de données nécessaires pour afficher les résultats souhaitées.

Ainsi, nous avons vu quelle était la méthodologie appliquée dans la modélisation hydrogéologique de la région Melaky. Dans la dernière partie qui suit, il nous paraît logique de parler des modèles que nous avons conçus et de les interpréter afin de compléter notre étude.

## **QUATRIEME PARTIE : MODELISATIONS ET INTERPRETATIONS**

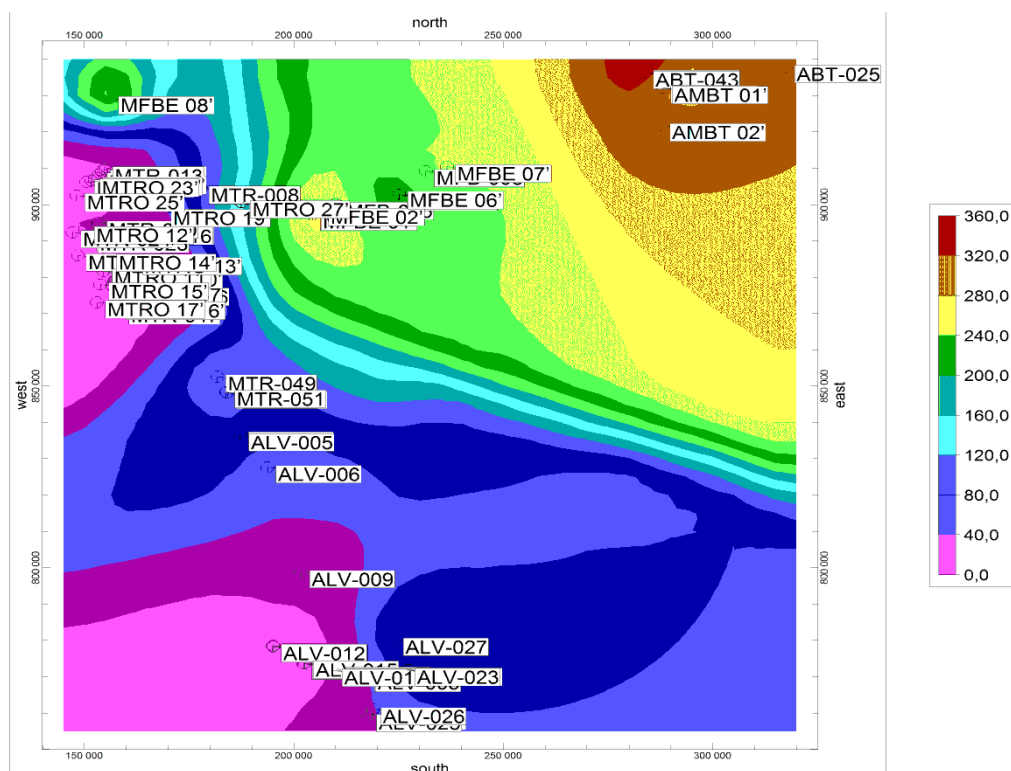
Les données de ces différents forages nous ont permis de réaliser la modélisation hydrogéologique de la Région Melaky.

## I. Présentation générale des résultats

Dans le cadre d'un Projet PAEAR qui concerne à la réalisation de 1250 forages dans les huit Régions dont 100 forages dans la Région Melaky en 2009 -2010 et 100 forages dans trois Régions avec 40 forages dans la Région Melaky en 2014. Ces forages sont effectués dans les quatre District de la Région Melaky à savoir, Maintirano, Antsalova, Befandriana et Ambatomainity. Après avoir recueilli les différentes données de forage sur terrain et après les avoir traité, nous allons montrer les différents modèles de sous-sols obtenus, afin de faire sortir la répartition spatiale des différentes nappes rencontrées dans la Région Melaky.

### 1. Topographie et emplacement des points de forages

L'ensemble de nos données sont des données lithologiques ayant été récupérées à partir des forages effectués dans la région Melaky. La répartition spatiale des différents points de forages est présentée par la figure ci-dessous, elle est présentée sous fond d'une carte topographique de la zone.



**Carte 5 : Emplacements des points de forages dans la Région Melaky**

Les élévations dans la Région varient beaucoup suivant le District. Cela est dû principalement à son emplacement. Cette région est côtière, d'où la faible altitude du côté Ouest (0 à 120m), mais la partie Est (120 à 360m) fait partie de la haute terre, c'est la partie qui constitue le District d'Ambatomainty.

## **2. Modélisation 3D des données de forages et de l'aquifère**

La modélisation en trois dimensions des forages a néanmoins posée un problème du fait du rapport entre les profondeurs des forages qui ne dépassent pas quatre-vingt mètres et la répartition spatiale des forages qui ne couvre pas d'une façon homogène la Région.

Pour pouvoir modéliser les données prélevées et obtenues sur terrain, et pour avoir une meilleure visualisation, une exagération verticale est requise et indispensable afin de distinguer les différentes couches lithologiques.

C'est ainsi que dans le Rockworks 15, une exagération de l'altitude Z est obligatoire, afin de faire sortir les différentes profondeurs des diverses formations géologiques rencontrées dans les points de forages et les interpolées. Une exagération de mille sera donc prise en compte dans le cas du logiciel Rockworks 15 et une exagération verticale comprise entre cent cinquante et deux cent cinquante sera prise pour le logiciel Oasis Montaj. Cette différence d'exagération étant justifiée par une meilleure appréciation des résultats en fonction de l'affichage souhaité.

Ci-après, une série de cartes 3D montrant les forages dans un premier temps, puis l'aquifère obtenu à partir de la modélisation. Nous constatons une différence entre ces diverses cartes montrant le même aquifère, qui est principalement due au choix des algorithmes utilisés pour affiner le modèle.

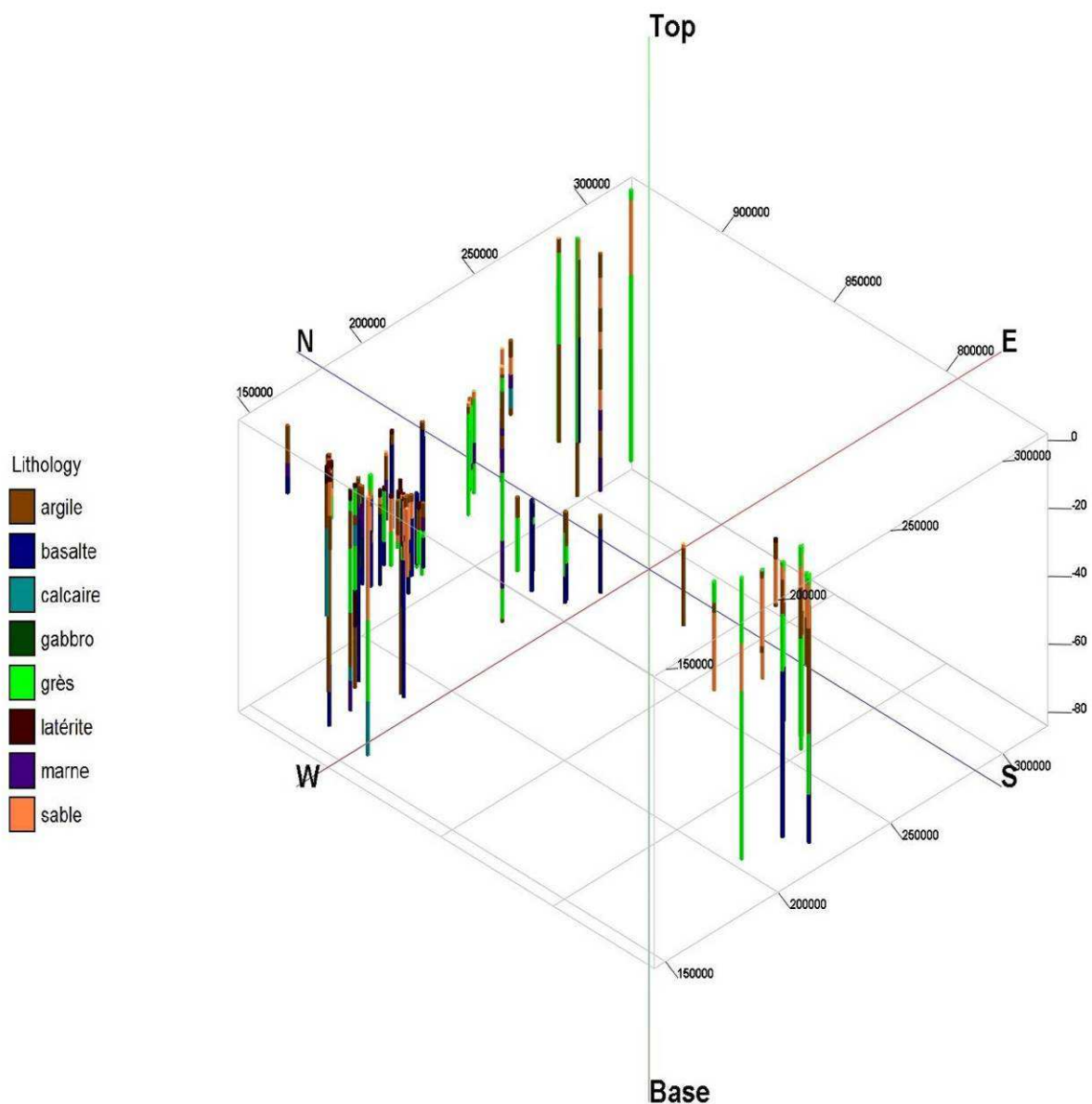
Les cartes ci-après ont été obtenues grâce au logiciel Rockworks 15, et pour plus de commodité, et pour mieux mettre en évidence le logiciel employé, sur chaque figure nous indiquerons le logiciel ayant aidé à la construction de la figure.

Notons aussi que l'unité employée sur toutes les cartes est le « mètre ».

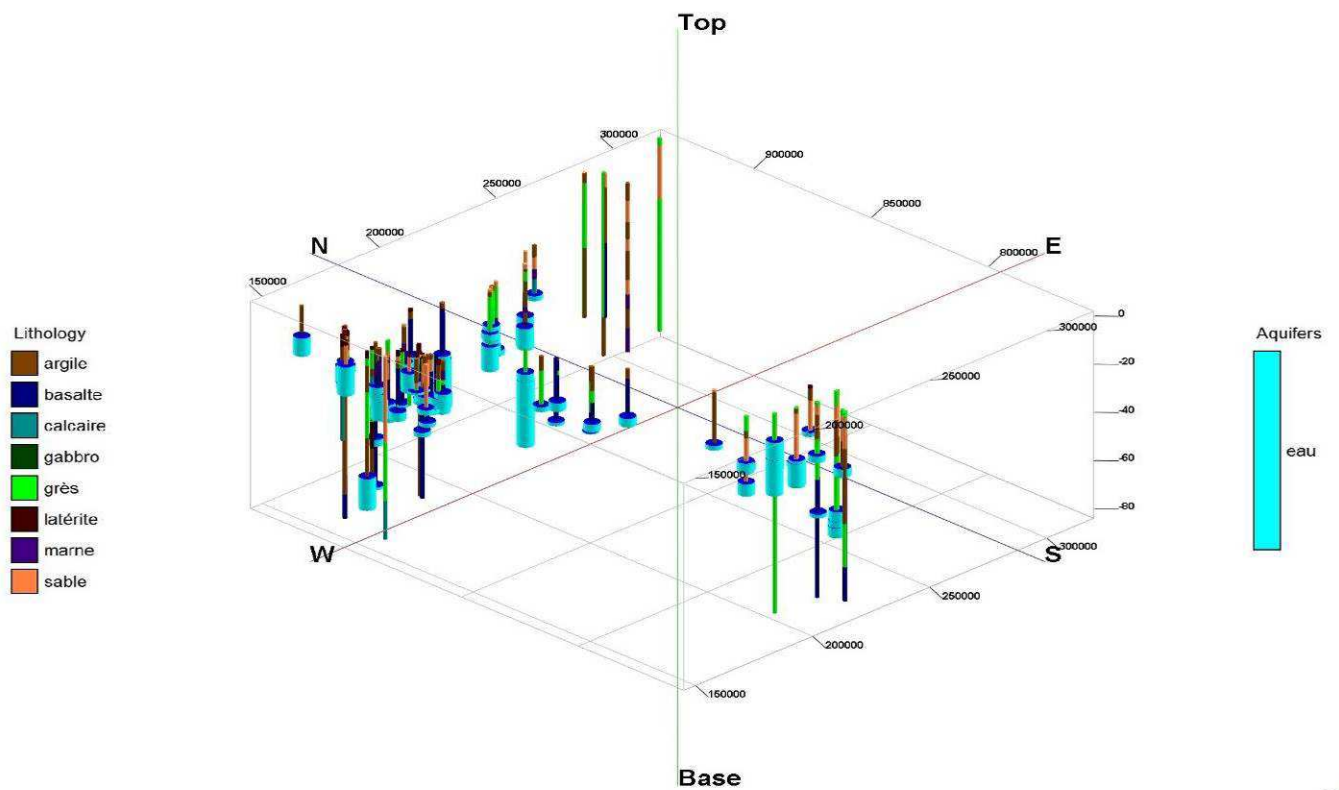
Ainsi :

- la figure 28 nous donne la répartition spatiale des différents points de forages en 3d et en présentant en même temps leurs logs.

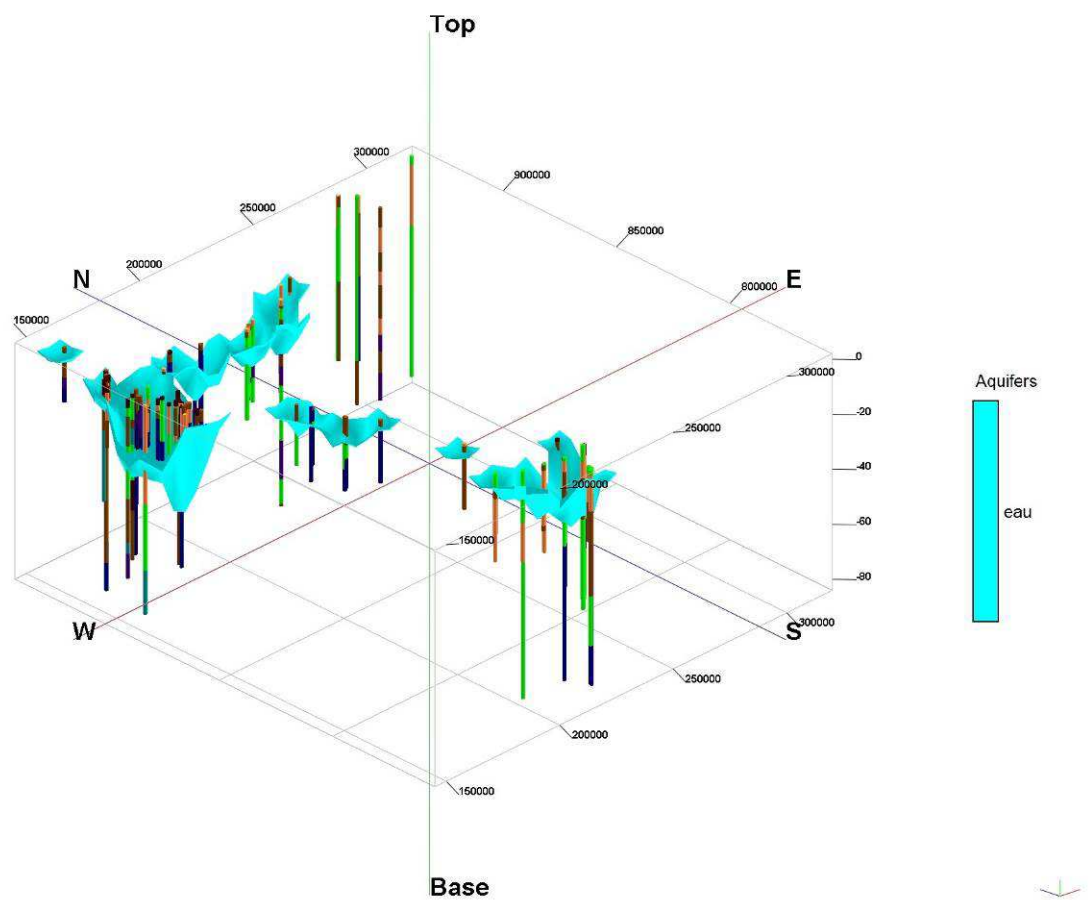
- la figure 29 montre l'aquifère obtenu à partir des points de forages positifs (dans le sens où la nappe d'eau existe). notons que le diamètre des aquifères étant juste un peu exagéré pour les rendre plus visibles.
- la figure 30 nous présente l'aquifère modélisé par un algorithme cumulatif, c'est une mode d'interpolation des données en se basant sur la distance minimum curviligne et moyenne à partir des logs de forages ;
- les figures 31 et 32 nous montrent l'aquifère obtenu à partir de l'algorithme des points de forages positifs et modélisé automatiquement pour montrer la continuité des différentes profondeurs où l'eau a été rencontré



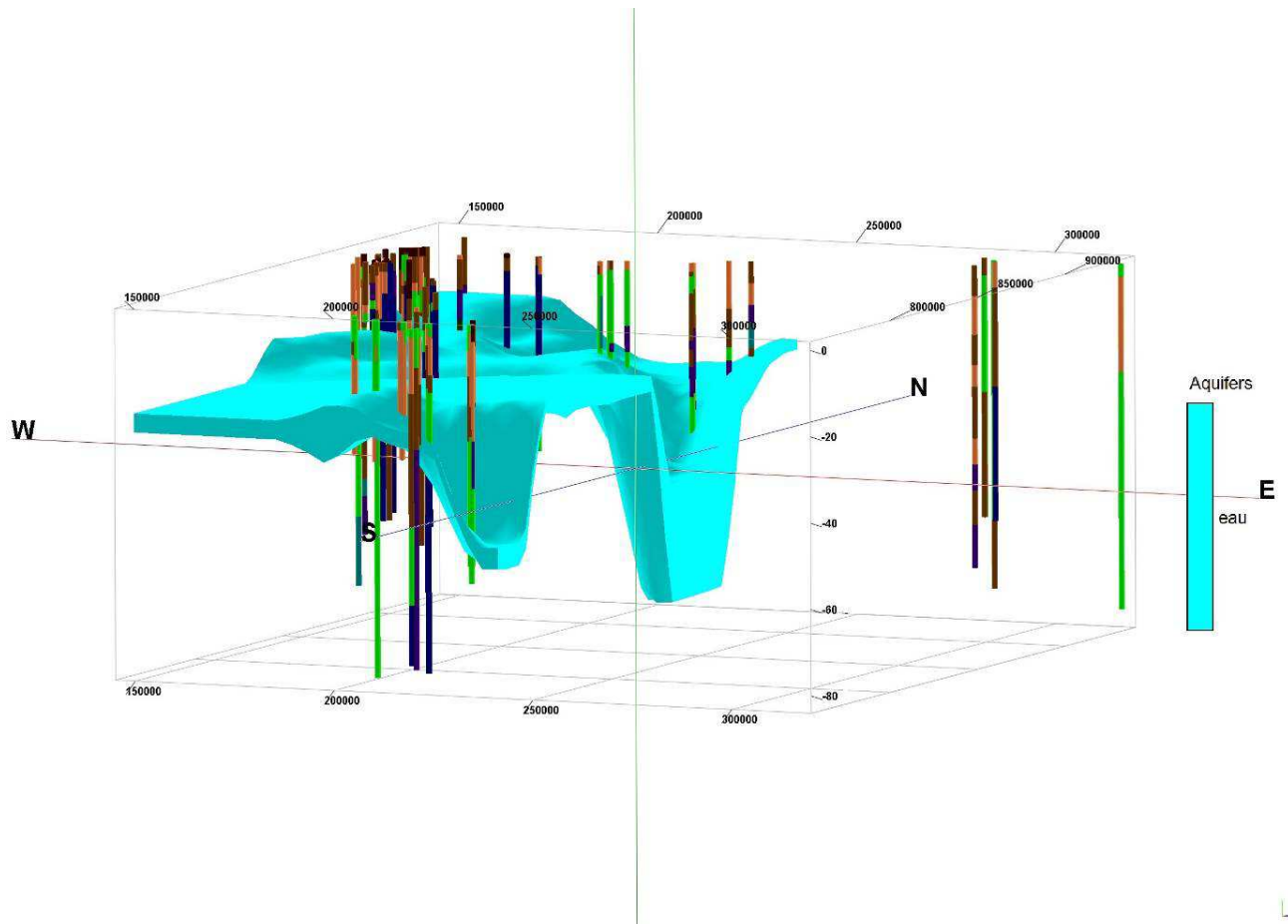
**Figure 28: Les logs simplifiés de forages de la Région Melaky**



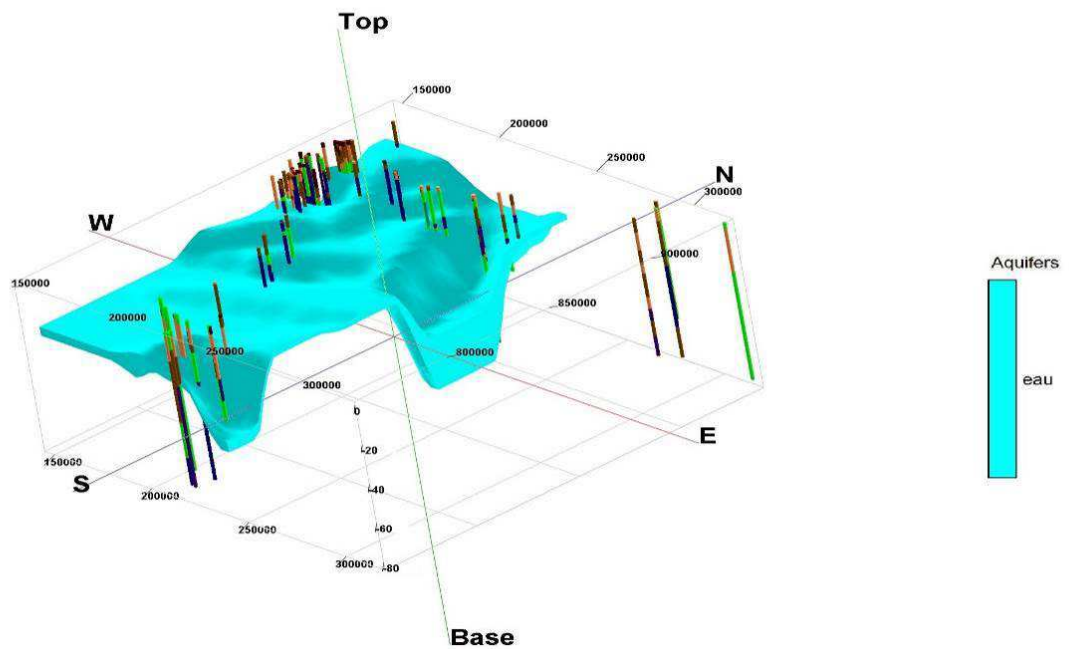
**Figure 29: Localisation des aquifères sur les logs de forages**



**Figure 30 : Modélisation de l'aquifère par algorithme cumulatif**



**Figure 31 : Aquifère modélisé par l'algorithme des points proches**



**Figure 32 : Aquifère modélisé par l'algorithme des points proches vus de 3/4**

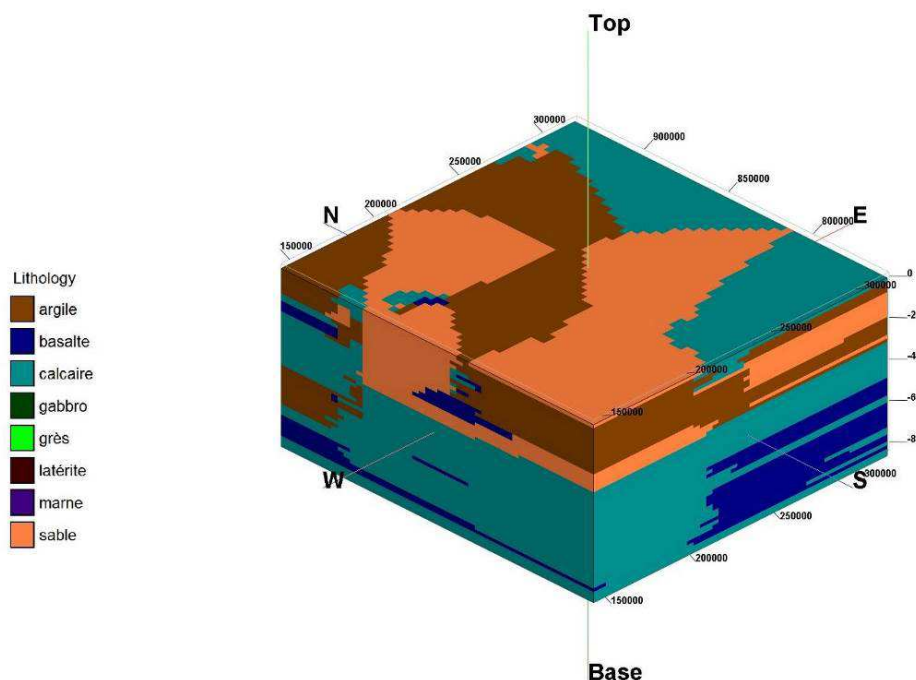
Pour conclure, sur la partie littorale (Maintirano et ses alentours), le niveau de l'aquifère est presque la même. Dans la partie dite intermédiaire (Antsalova et Morafenobe), l'aquifère s'incline légèrement vers l'Ouest. On note également que dans la partie centrale de la zone d'étude, la profondeur de l'aquifère est fortement variable (de 5 à 50m). Pour le District d'Ambatomainty, le forage n'a pas rencontrée de nappes importantes.

### 3. Modélisation lithologique de la Région Melaky

La modélisation des aquifères nous permet non seulement, de voir une appréciation globale de la nappe aquifère de la région Melaky, mais aussi de distinguer la nature des différentes couches de roche rencontrer dans le sous-sol.

Les forages nous permettent de tirer deux informations : la première étant la nature des roches et la seconde l'aquifère qui est une formation géologique susceptible de rencontrer l'eau dans la région Melaky.

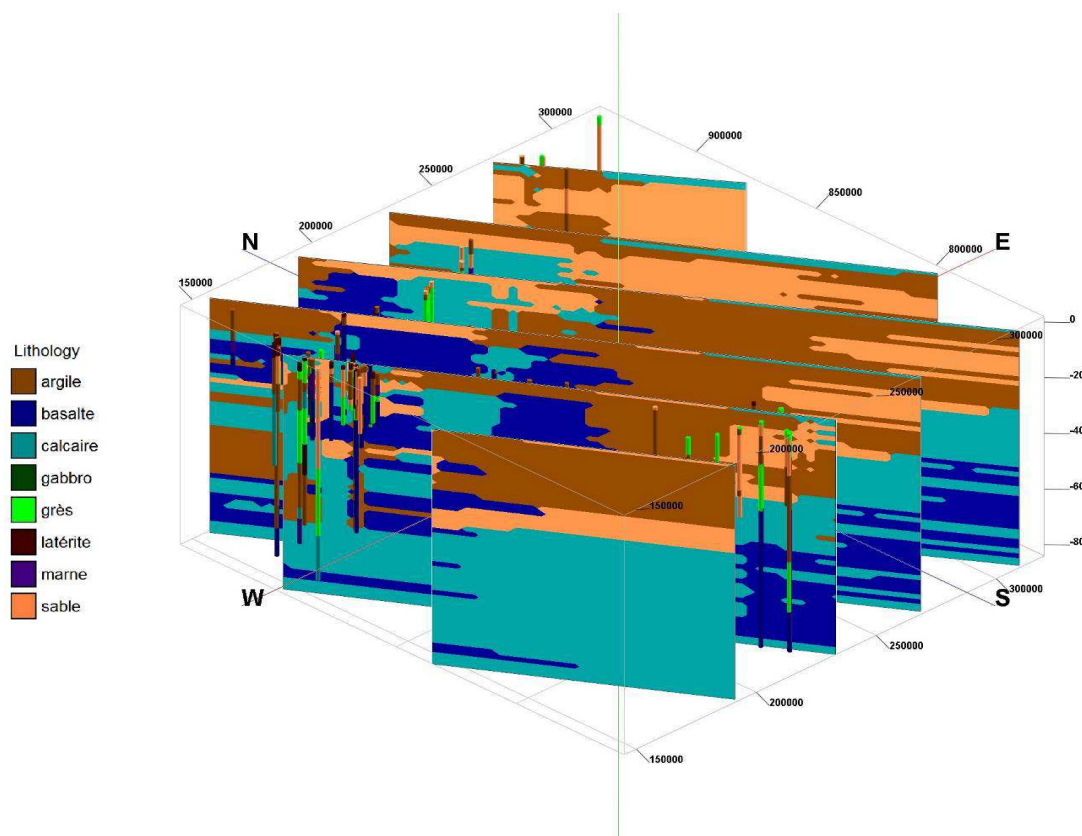
Outre la modélisation en 3D de l'aquifère, nous pouvons, d'après les données obtenues à partir des forages faire une modélisation des successions de couches rencontrées jusqu'à une profondeur moyenne de 80m.





littorale et sa partie intérieure et de latérite par la partie intermédiaires et de calcaire a l'intérieure. En profondeur, on peut rencontrer de gabbro et de basalte qui constitue l'aquifère bien évidemment s'il est fracturé et de marne qui constitue le substratum supportant la première nappe. On rencontre également le calcaire karstifié en profondeur et qui constitue la nappe d'eau plus ou moins de nature basique, cette mode de formation est localisée surtout dans la partie dite « intermédiaire ». Soulignons que les points de forages ne couvrent pas totalement la région mais surtout dans les zones habitées où se trouvent les villages populeux et les Chefs lieu de Communes, on peut aisément se rendre compte que ce bloc n'est pas parfaitement fidèle à la lithologie de la région toute entière.

La modélisation par bloc se base sur la continuité de la lithologie des forages, Il faut donc remettre en question la partie qui se trouve l'absence des points de forages, comme celle de la partie Sud-Est de la zone d'étude. Pour avoir une visualisation plus locale, on avance une modélisation par tranche de ce bloc (figure 39).



**Figure 34 : Modélisation par tranche**

La figure 39 nous montre une fidélité assez proche de ce que pourrait être réellement la continuité des couches à cette profondeur. La modélisation par bloc est donc satisfaisante au vu des données à disposition.

## II. Modélisation 2D par District

Comme nous l'avons vu dans la description de la zone d'étude, la Région Melaky est divisée en cinq (5) Districts qui sont : Morafenobe, Antsalova, Maintirano, Besalampy et Ambatomainy. La région a une superficie très importante, la présentation des données d'un point de vue générale s'avère assez floue. Dans l'idée d'apporter une précision significative des résultats, nous allons les prendre les uns après les autres par District. Pour avoir une meilleure visualisation, nous proposons deux modes de présentation des résultats pour chaque District, coupe lithologique en profondeur utilisant comme logiciel de traitement le Rockworks 15, et coupe lithologique portée en altitude qui est traité sous logiciel Oasis Montaj 7.5.

### 1. Coupe lithologique d'Ambatomainy

Le District d'Ambatomainy est la seule zone d'étude où l'altitude est supérieure à 250m. Le nombre de forages réalisés dans cette zone est très limité, ils sont au nombre de six (6), mais nous ne considérerons que trois points de forage vu leur répartition spatiale (ABT-025, ABT-043 et AMBT-02). Ainsi, en faisant une coupe en 2D on obtient les modèles suivants :

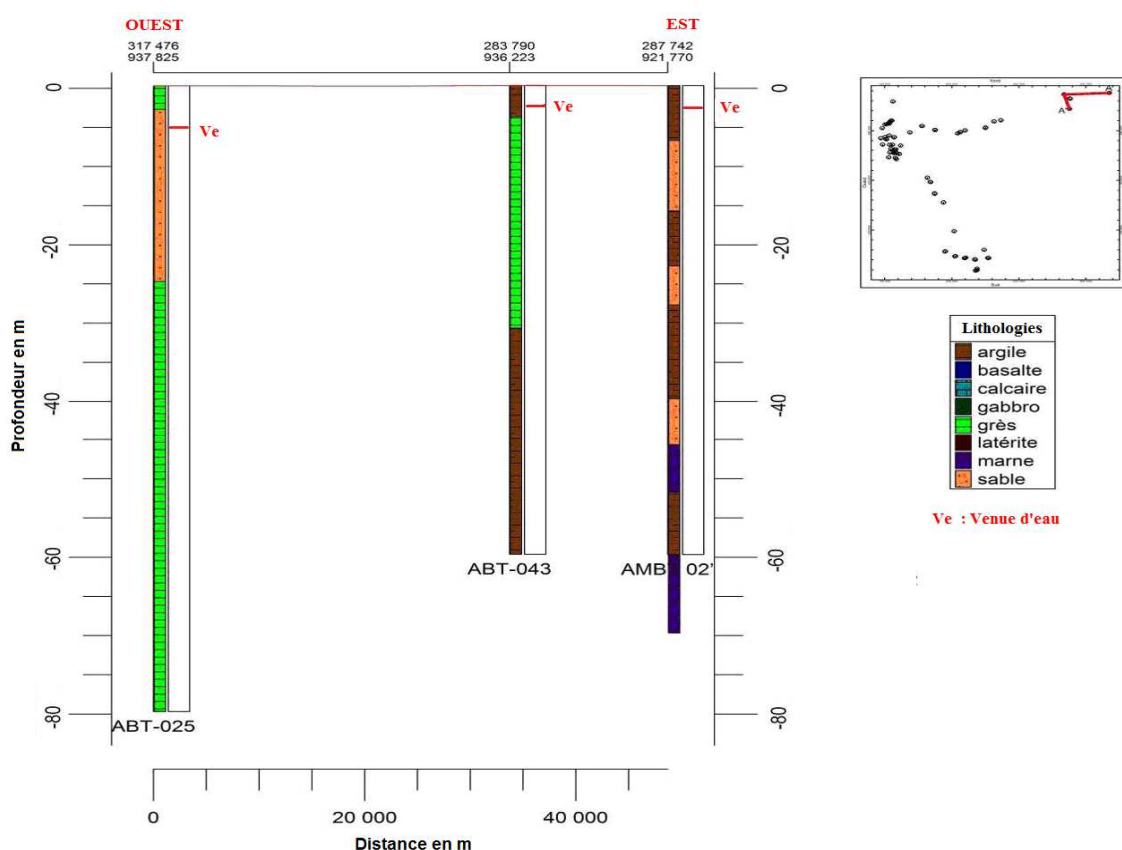
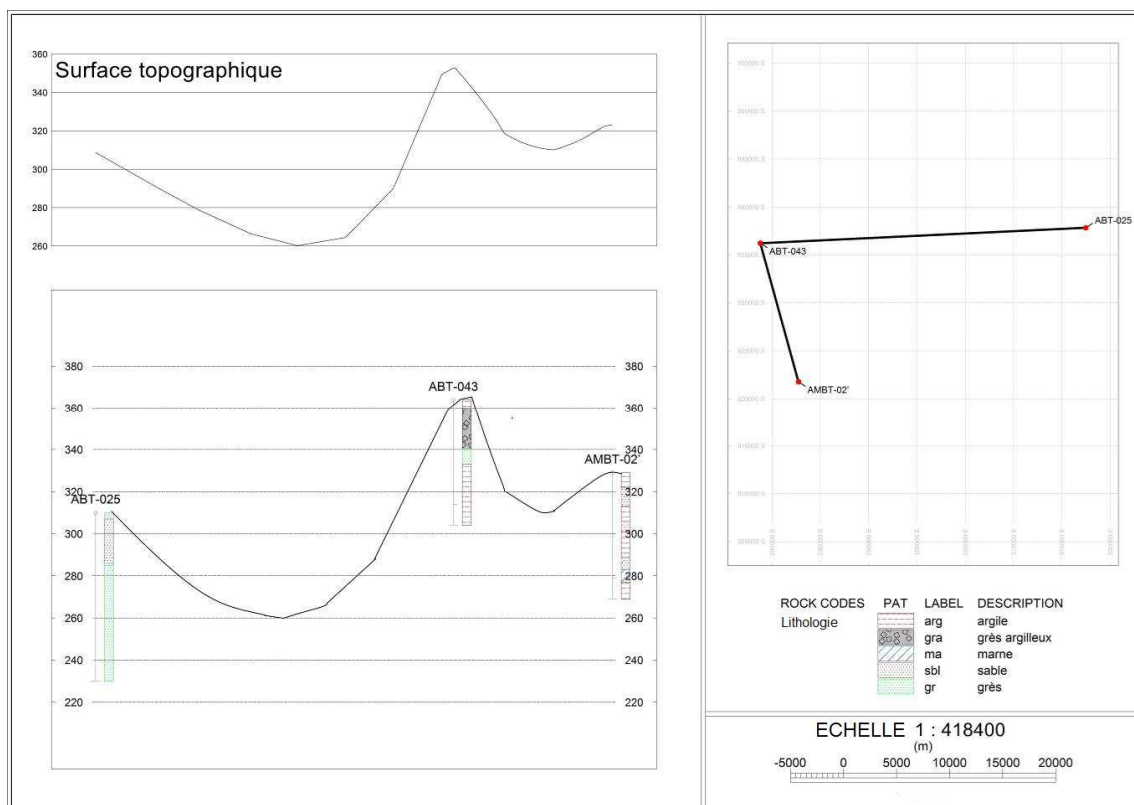


Figure 35 : Coupe lithologique E-O d'Ambatomainy avec Rockworks



**Figure 36 : Coupe lithologique d'Ambatomainty de direction E-O avec Oasis montaj 7.5**

Nous constatons par cette coupe que la formation lithologique du substratum est très épaisse, plus d'une cinquantaine de mètres (50m) pour le grès dans le côté Ouest, une trentaine de mètres (30m) pour l'argile du côté Est.

Les forages effectués dans cette zone sont tous négatifs (débit de venue d'eau insignifiant, c'est à dire moins de 600l/h) jusqu'à une profondeur de 80m environ. Signalons que sous le forage AMBT02, on rencontre des formations sableuses qui peuvent ressembler à une aquifère, mais vu que son caractère est plus argileux, la présence d'eau reste insuffisant pour assurer l'approvisionnement en eau de la population. Nous pouvons donc conclure que la nappe productive est une nappe profonde et cette nappe est évaluée à 150m de profondeur suivant le contexte hydrogéologique et des travaux géophysiques. Il faut noter que dans le projet, la profondeur maximale est fixée à 80m pour la recherche de l'eau.

## 2. Coupe lithologique de Morafenobe

Le district de Morafenobe est la zone intermédiaire entre la zone de basse altitude dans le côté Ouest et de haute altitude dans le côté Est. Nous avons treize (13) forages dans ce district mais nous n'en prendrons que quatre pour voir l'évolution des couches lithologiques dans la direction Est – Ouest.

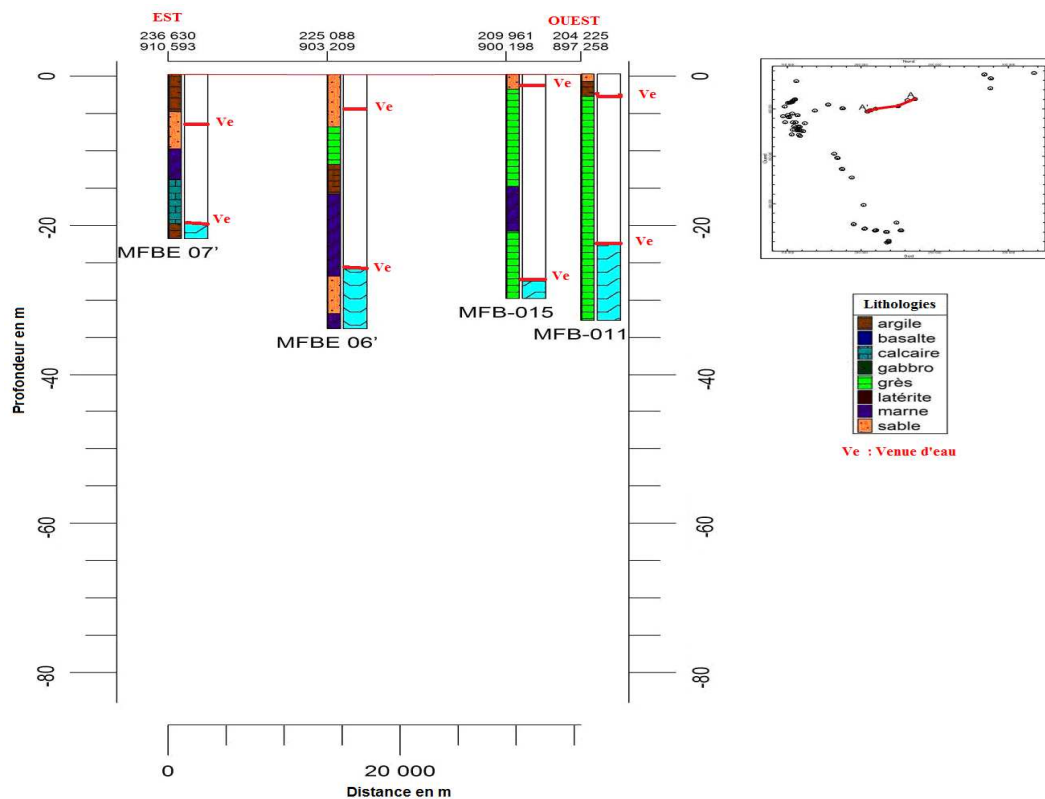


Figure 37 : Coupe lithologique Morafenobe avec Rockworks 15

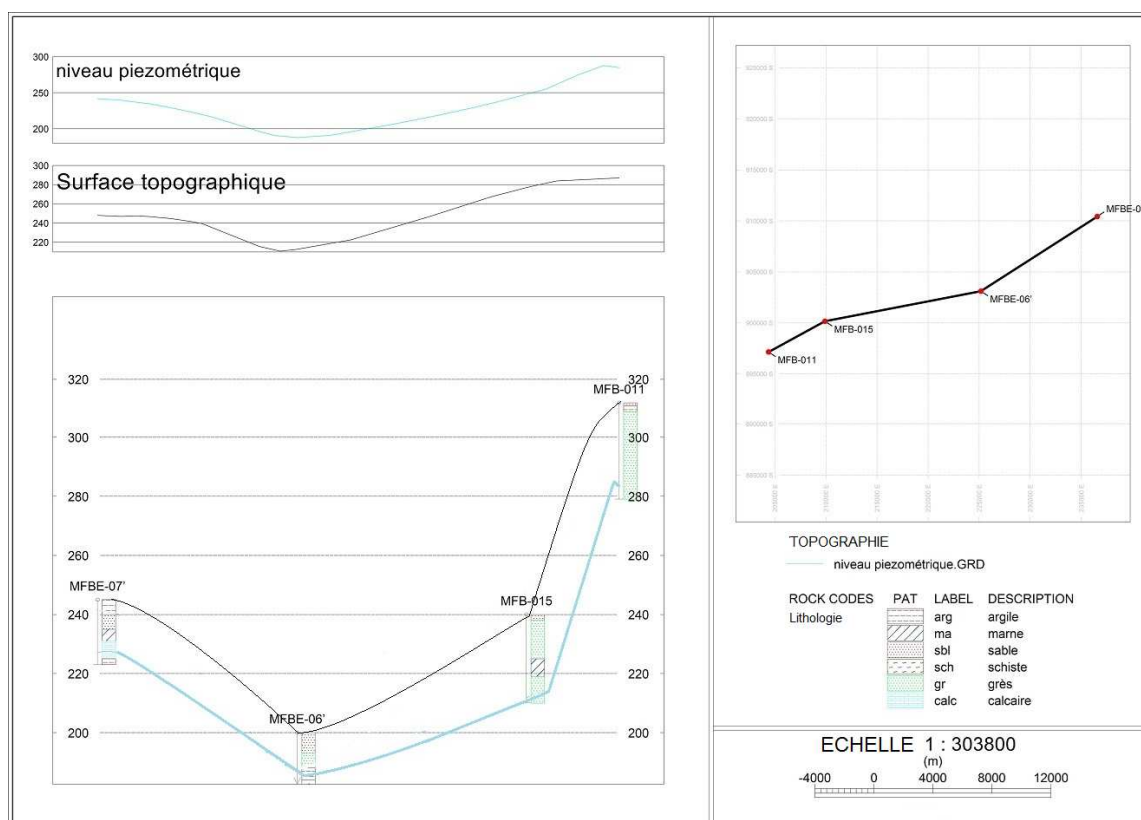


Figure 38 : Coupe lithologique Morafenobe avec Oasis Montaj 7.5

Les forages dans le district de Morafenobe sont à une grande majorité positive, comme nous pouvons le voir sur les figures ci-dessus. La venue d'eau commence à une vingtaine de mètre et le niveau statique à quelque mètre, on en déduit donc que la majorité de la nappe est captive. L'eau y est donc abondante et est proche de la surface.

Le niveau piézométrique quant à lui est compris entre 175 et 275m.

Les types de nappes rencontrées dans ce District sont des nappes d'alluvions et des nappes de sables argileux supérieurs pour la première nappe superficielle et des nappes de Néogène de l'Eocène constituent essentiellement par des grès sableux pour la nappe peu profonde. Elles sont de type nappe libre et captive. La formation marneuse constitue le substratum qui soutient la première nappe.

### **3. Coupe lithologique de Besalampy**

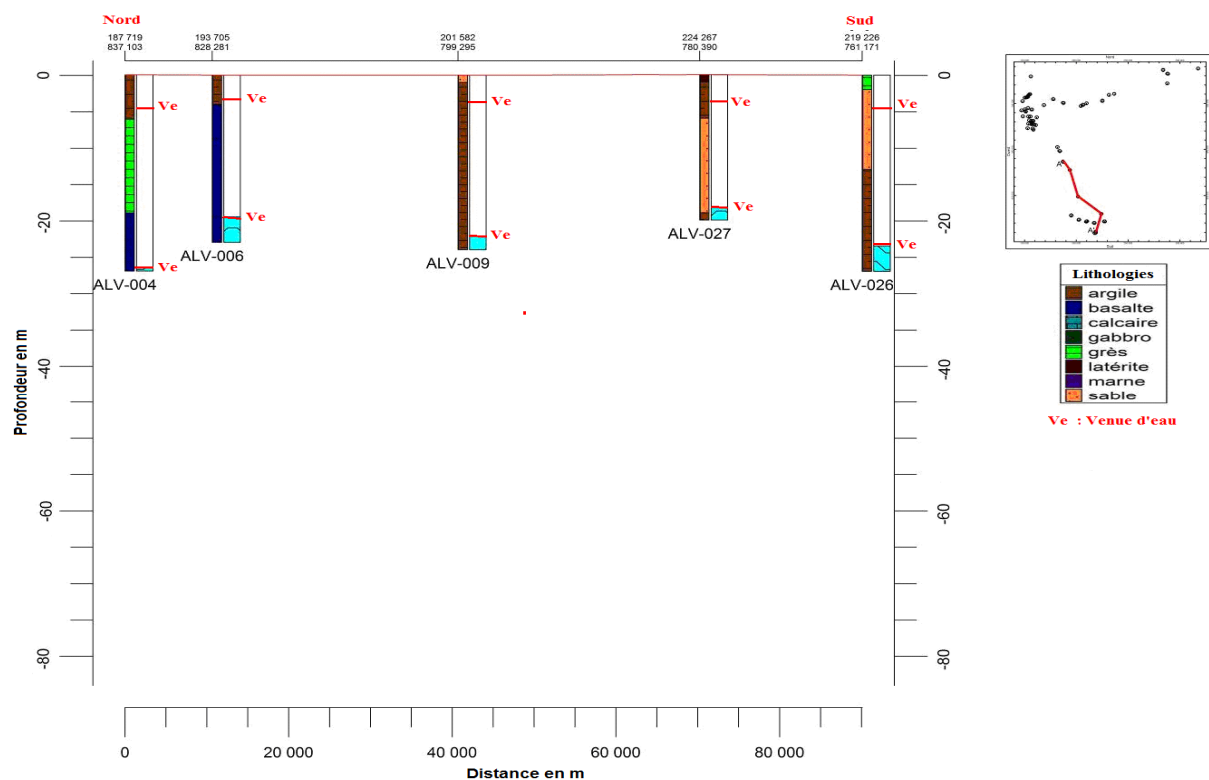
Le district de Besalampy est le district le plus au Nord de la région Melaky. Pour des raisons d'accessibilités et surtout de mauvais états des routes, des ponts et les montées fréquentes des eaux, l'accès à ce district de l'atelier de forage s'est avéré impossible. Ce qui justifie l'absence de forage dans ce district qui fait pourtant parti de la région Melaky.

Par conséquent, pour ce travail, on ne peut pas avancer des coupes lithologiques de ce District.

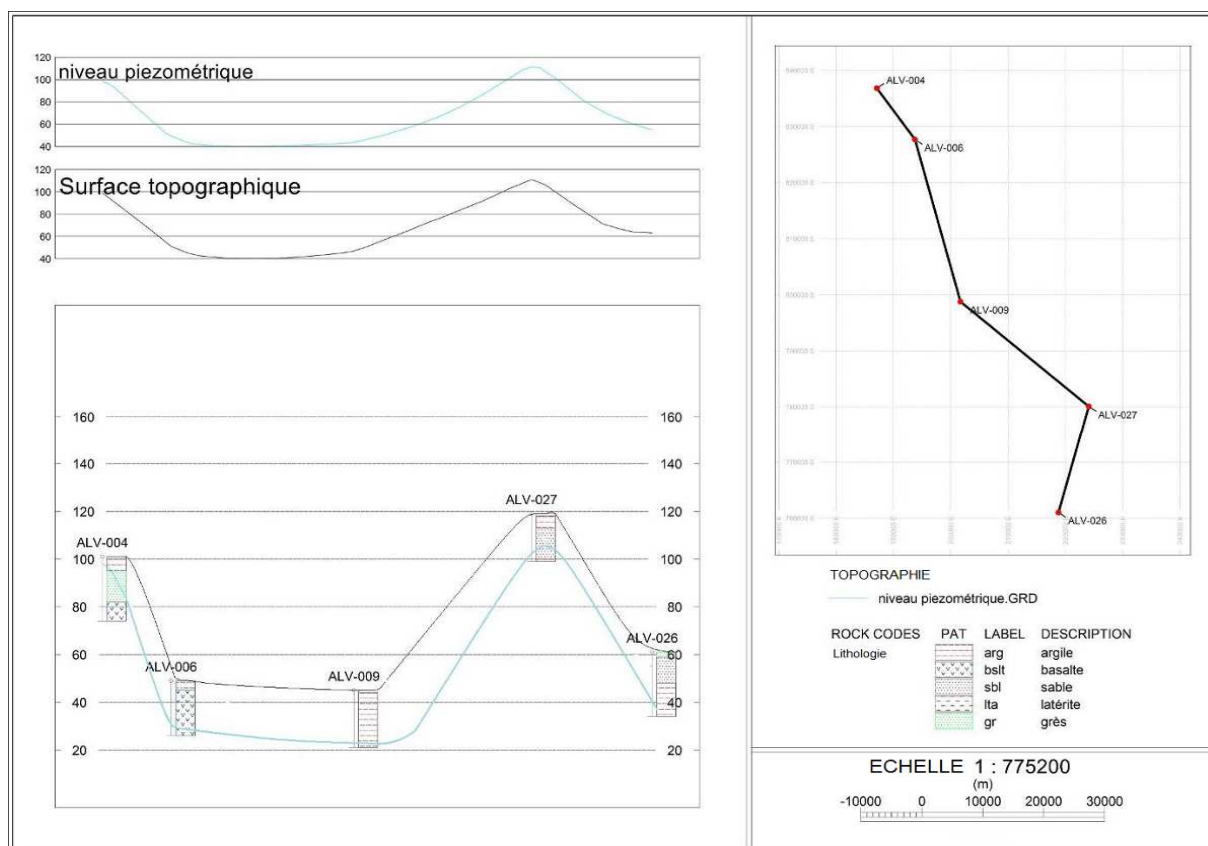
### **4. Coupes lithologiques d'Antsalova**

Le district d'Antsalova est l'un des cinq districts où le nombre de forage est le plus élevé soit vingt-trois (23) forages. L'altitude de la zone varie entre 20 et 120m. On considère ce district comme une zone côtière, avec une accessibilité relativement simple.

De ce fait, deux séries de coupes ont été faites, pour suivre l'évolution de chaque formation dans deux directions qui sont: Nord au Sud (figures 39 et 40) et Ouest en Est (figures 41 et 42).



**Figure 39 : Coupe lithologique N-S Antsalova avec Rockworks 15**



**Figure 40 : Coupe lithologique Antsalovade direction N-Savec Oasis Montaj 7.5**

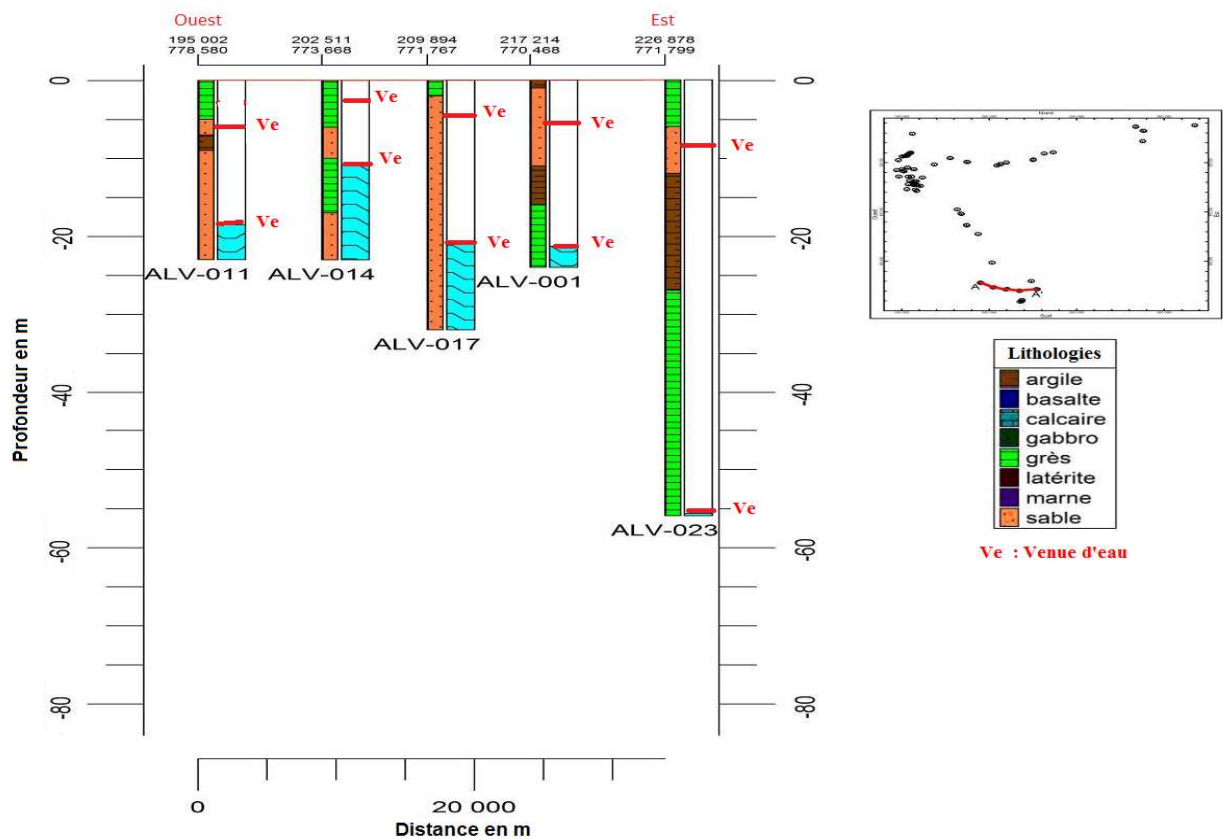


Figure 41 : Coupe lithologiqueAntsalovade direction O-Eavec Rockworks 15

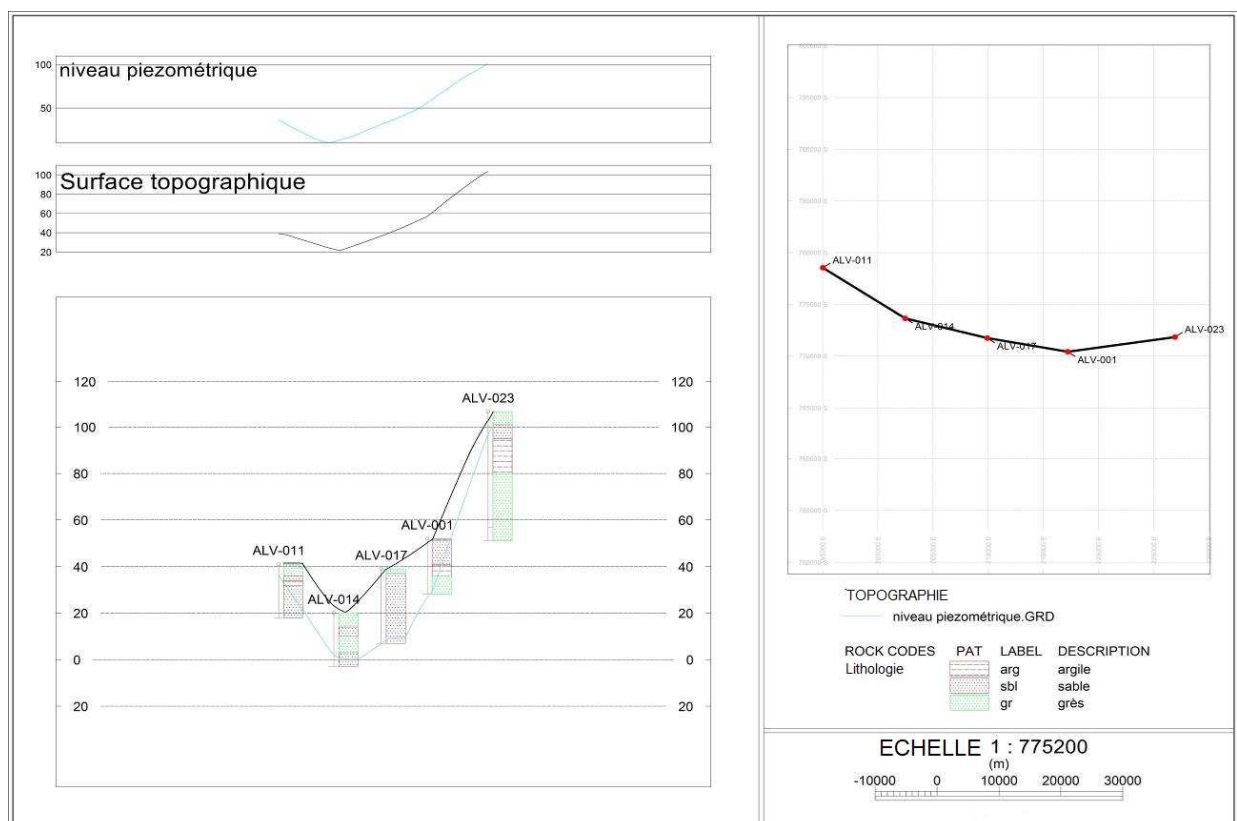


Figure 42 : Coupe lithologiqueAntsalovade direction O-Eavec Oasis Montaj 7.5



On constate que dans les deux premières figures de section Nord-Sud ci-dessus (figures 39 et 40), le niveau statique se trouve dans les vingt premiers mètres de forage, le niveau piézométrique est compris entre 40 et 110m. La coupe lithologique de direction Ouest-Est montre globalement le pendage des couches vers l'Ouest (figures 41 et 42), l'eau souterraine est assez près de la surface, on rencontre l'aquifère dès le 16m ; le niveau piézométrique de l'Ouest à l'Est varie quant à lui de 0 à 100m d'altitude. Le district d'Antsalova est donc une zone où on rencontre de l'eau à une profondeur qui est assez faible, rappelons que la profondeur moyenne de forage dans cette zone est de 30m. Les types de nappes rencontrées dans le District d'Antsalova sont : des nappes d'alluvions constituées par des sables argileux pour la première nappe très superficielle et des nappes de Néogène de l'Isalo constituées essentiellement par des grès sableux ou de sables – gréseux pour la nappe peu profonde. Elles sont de type de nappe libre et captive.

## 5. Coupes lithologiques de Maintirano

Le district de Maintirano est un district côtier avec une faible élévation, 20m d'altitude en moyenne. C'est dans ce district que la moitié du nombre de forages ont été réalisés. Vu le nombre de forage assez important que compte ce district, une série de deux sections seront faites pour mieux comprendre le comportement et l'évolution des nappes d'aquifère dans deux directions : Ouest – Est et Nord – Sud, dans ce district.

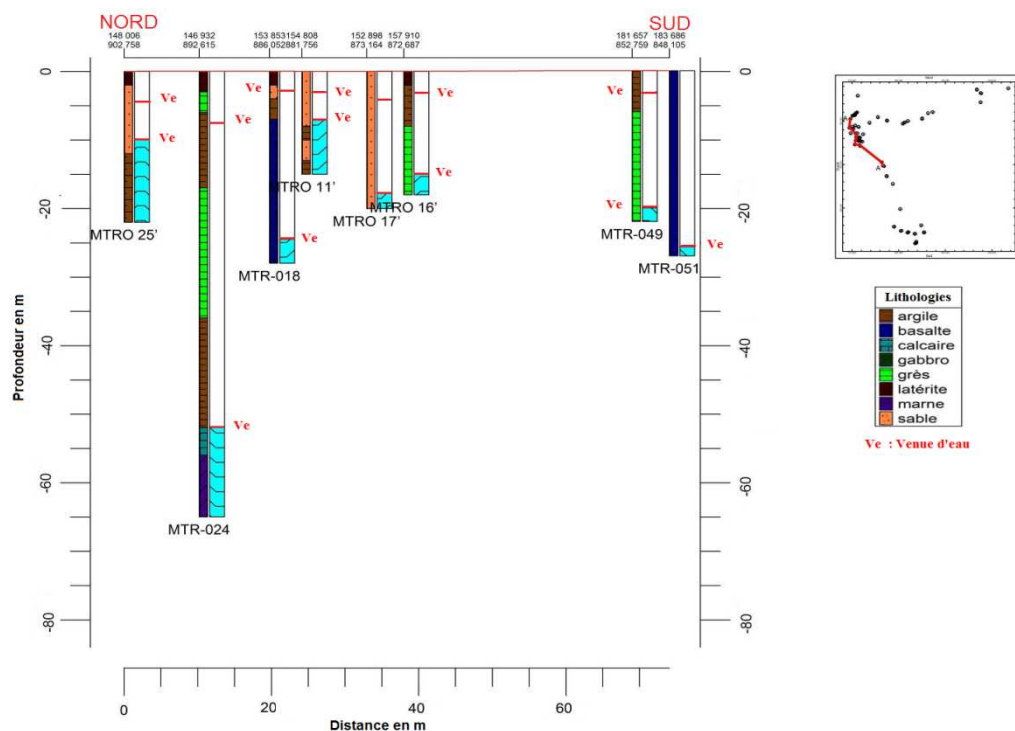


Figure 43 : Coupe lithologique Maintirano direction N-S avec Rockworks 15



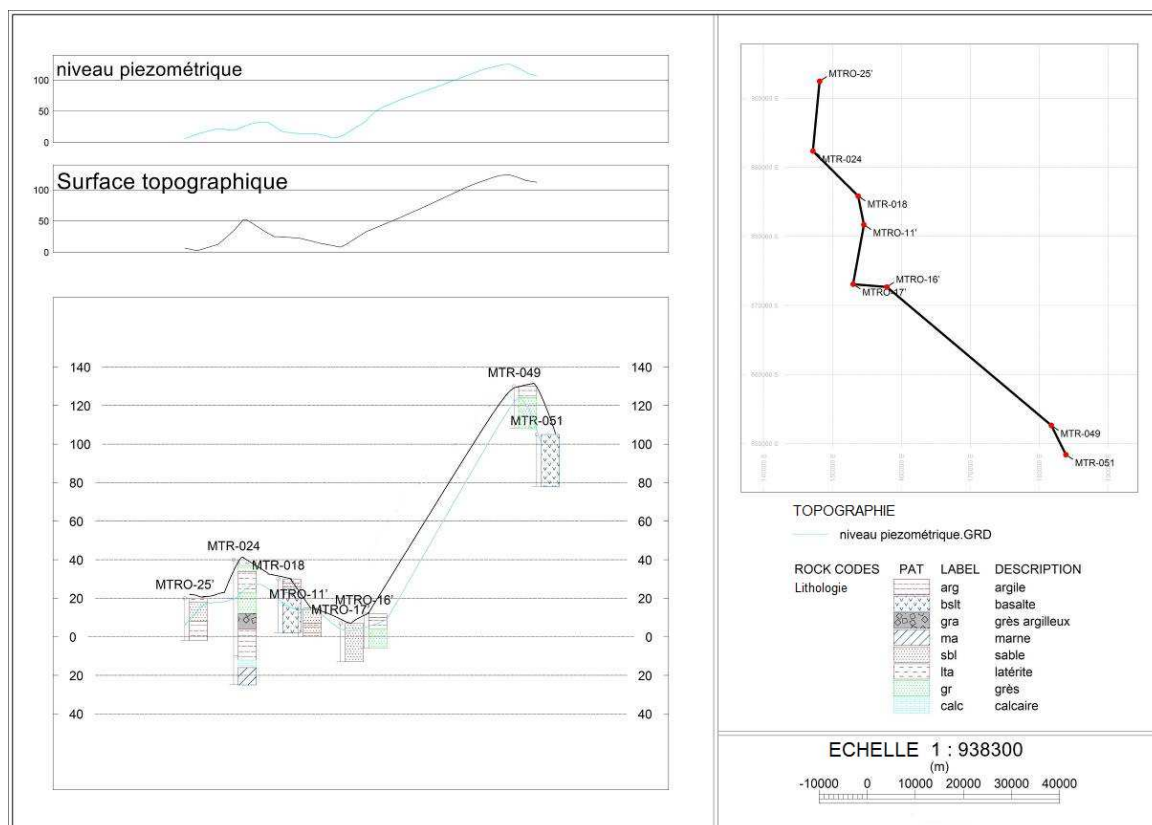


Figure 44 : Coupe lithologiqueMaintiranode direction N-S avec Oasis Montaj 7.5

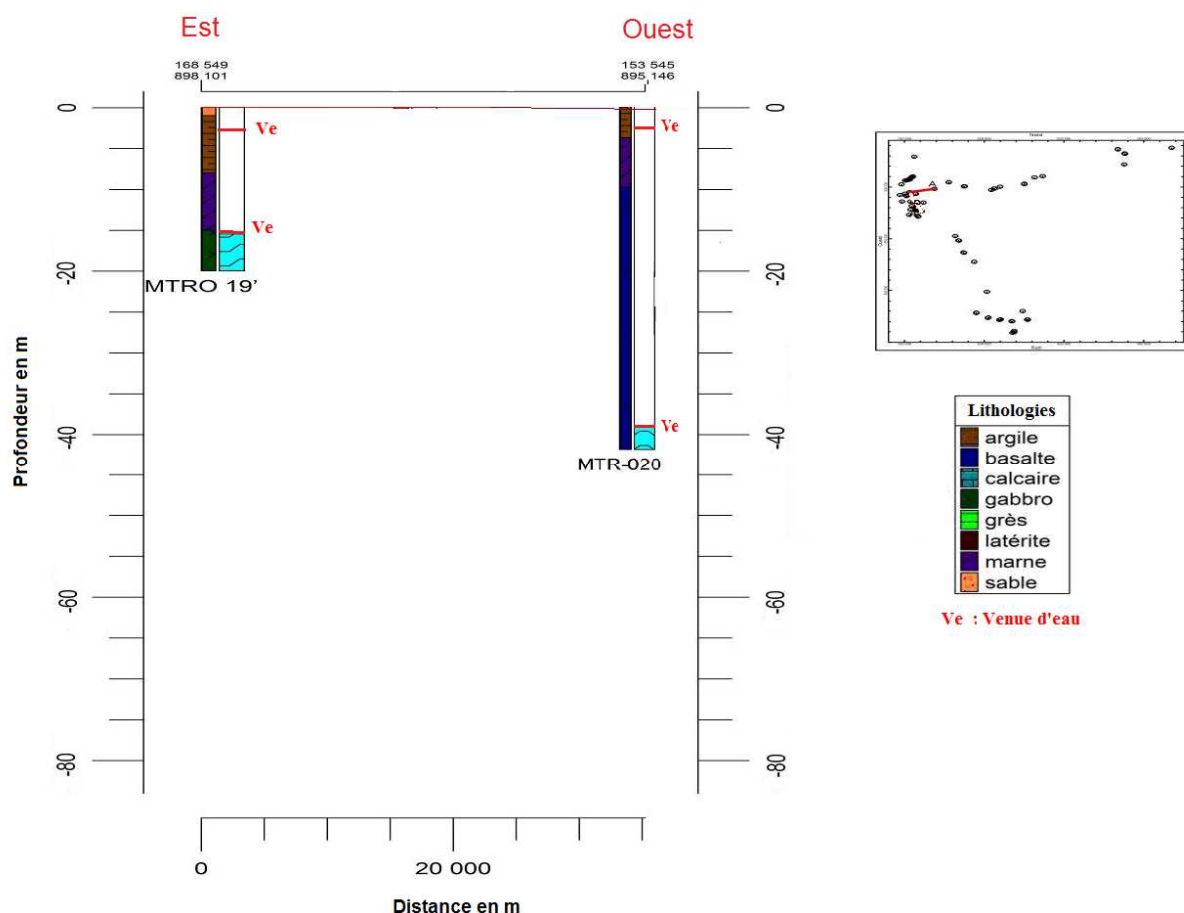
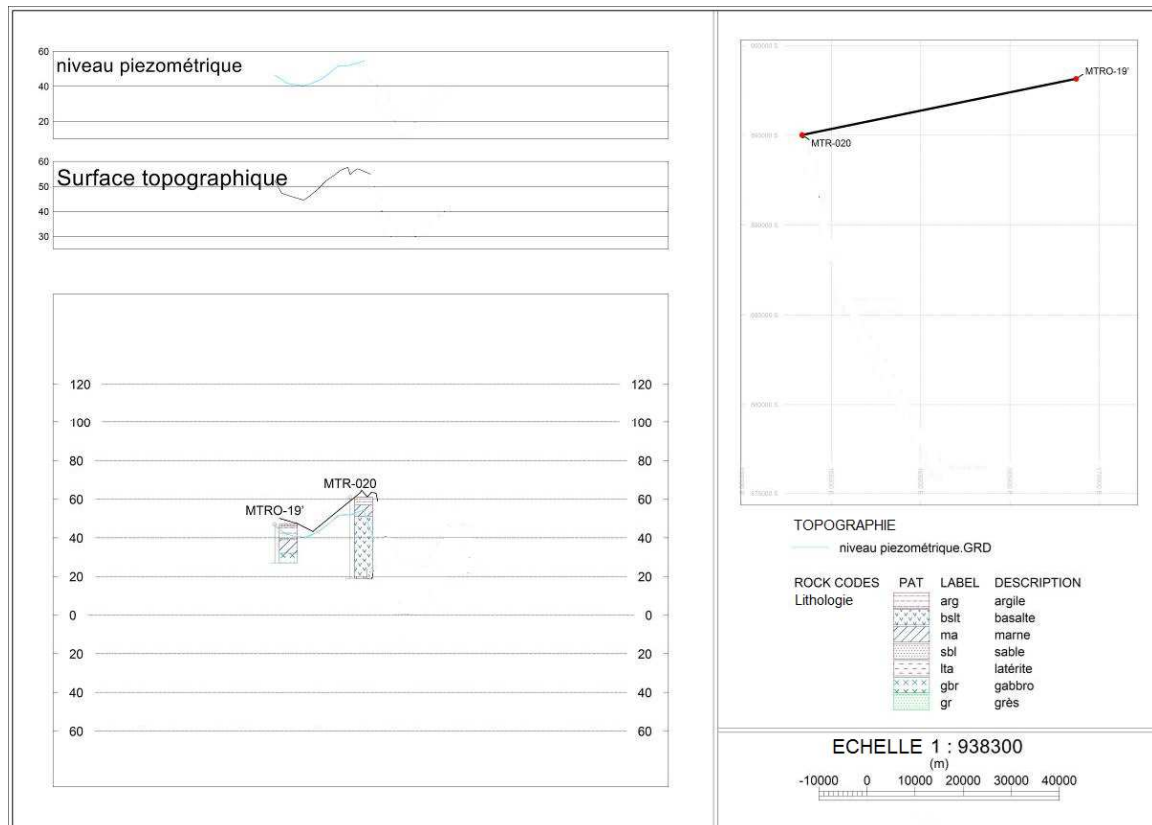


Figure 45 : Coupe lithologiqueMaintiranode direction E-O avec Rockworks 15



**Figure 46 : Coupe lithologique Maintirano direction E-O avec Oasis Montaj 7.5**

La profondeur moyenne dans le District de Maintirano est de l'ordre de 25m excepter pour le point MTRO24 dans lequel la deuxième nappe exploitée se trouve à 46m de profondeur, c'est une nappe peu profonde de type Eocène (Calcaire) et soutenue par un substratum marneux. Pour les autres points, les points de forage exploitent la nappe superficielle caractérisée par des nappes d'alluvions, nappes de sables de dune ancienne ou encore nappe de Néogène (grès sableux). Elles sont de type nappe libre (Figure 43 et 44, de direction Nord Sud).

La coupe lithologique de direction Ouest – Est montre bien évidemment un pendage léger vers l'Ouest (Figure 45 et 46), il est évident que le sens d'écoulement d'eau souterraine suit cette direction.

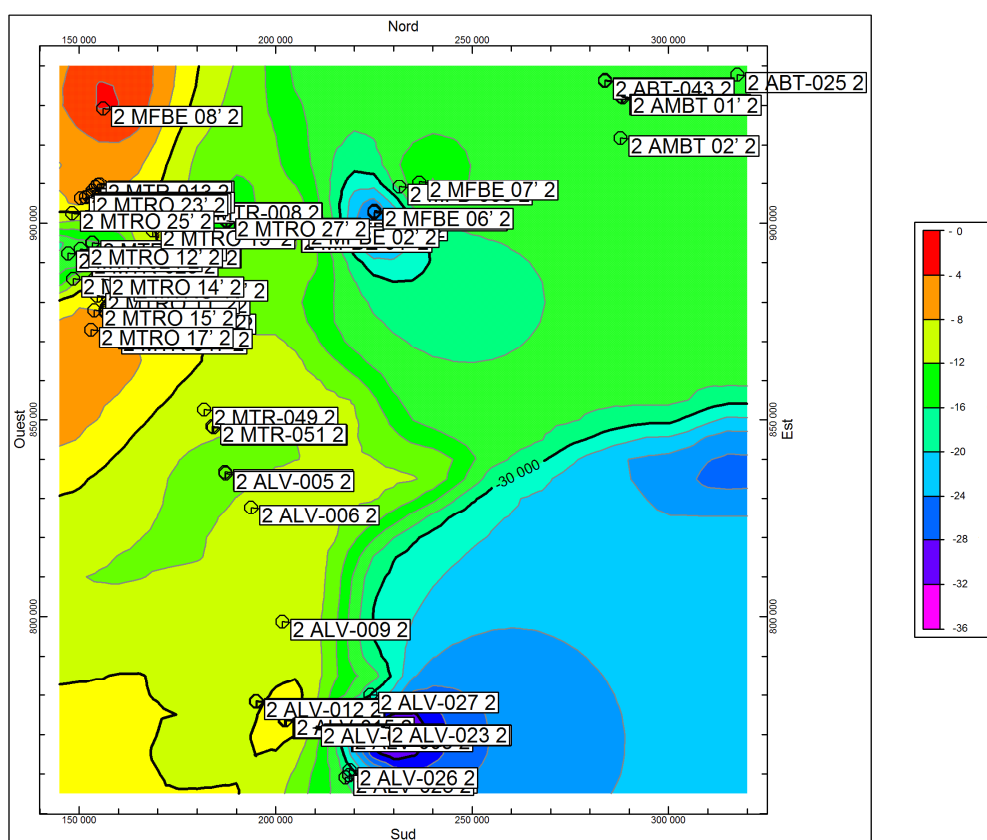
Le niveau piézométrique de cette zone est comprise entre 0 et 50m pour les forages qui se rapprochent le plus de la mer et peut atteindre jusqu'à 120m d'altitude pour les points les plus éloignés.

Les types de nappes rencontrées dans ce district de Manitirano sont : une nappe d'alluvions constituées de Sables argileux formant une nappe superficielle et une nappe constituée de basalte.

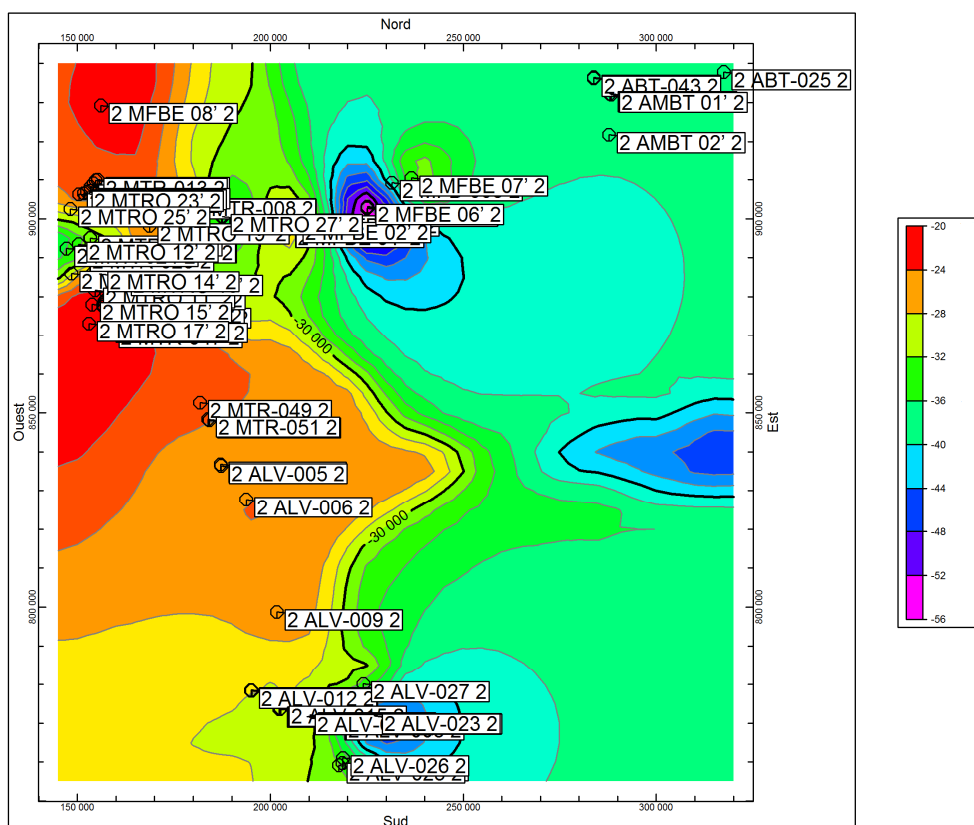
### III. Caractéristiques de l'eau souterraine de la Région Melaky

Après la présentation des modèles que se soient en 2D ou 3D, cette section nous décrit la caractéristique des eaux souterraines rencontrées par les forages, ou bien dans les points d'eau déjà existant lors de notre descente sur terrain au mois de juillet 2014. Et à la fin de cette section nous allons essayer de dresser un tableau récapitulatif de la classification des nappes rencontrées dans notre zone d'Etude.

Les différents points de forage montrent l'existence d'au moins une superposition des deux nappes. Les deux figures ci-après nous montrent la variation de la profondeur où se trouvent la première nappe et la profondeur du toit de la seconde nappe. La première se situe de 0 à 28m de profondeur et la seconde se localise entre 20 et 56m de profondeur. Pour le cas du District d'Ambatomainty, même si la première nappe existe, elle a un débit largement insuffisant, moins de 200 l/h, et reste inexploitable pour un projet d'alimentation en eau potable villageoise.



Carte 6 : Profondeur de la première nappe

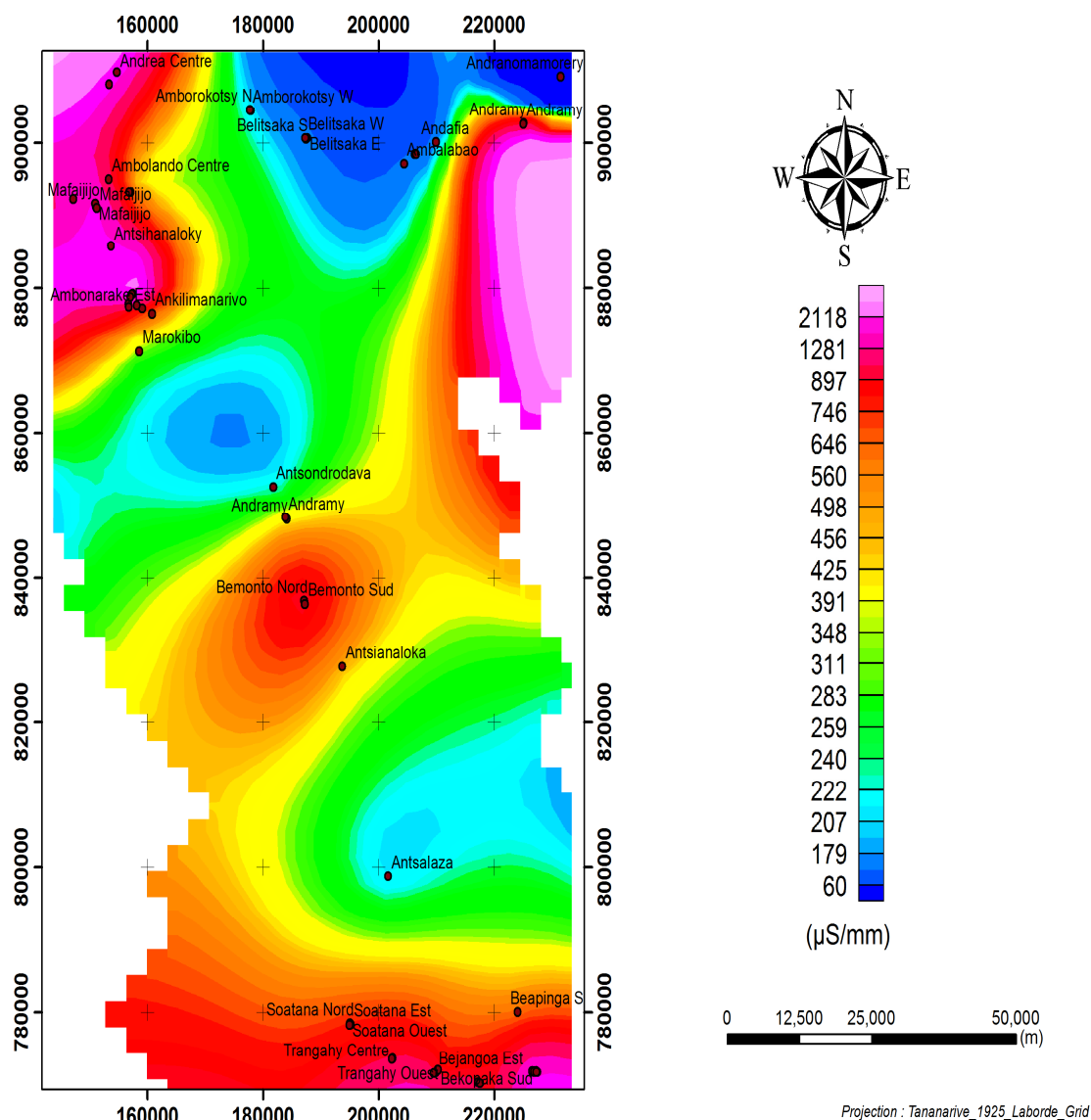


**Carte 7 : Profondeur de la seconde nappe**

Dans ce projet, un forage est dit positif si:

- la nappe peut fournir un débit supérieur à 600 l/h,
- la conductivité électrique de l'eau captée est inférieure à 3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , conductivité jugé sans risque pour l'utilisation humaine
- pour la qualité de l'eau, elle doit respecter la norme internationale imposée par l'OMS [annexe 5] et aussi le code de l'eau malgache.

Pour voir la qualité de l'eau rencontré dans le sous-sol de la Région Melaky, nous allons choisir la conductivité électrique de l'eau pour définir rapidement la potabilité de l'eau. Les données de forage, et les acquisitions des données recueillies sur les différents points d'eau nous permettent d'élaborer une carte de conductivité électrique (Carte 8).



**Carte 8 : Carte de conductivité électrique de l'eau dans la Région Melaky**

Cette carte nous montre que sur le littoral, la valeur de la conductivité électrique des eaux est très élevée (supérieure à  $800\mu\text{S}/\text{cm}$  et peut atteindre  $2500\mu\text{S}/\text{cm}$  dans certaines zones), ceci étant due à l'évasion marine. De même, autour du district d'Ambatomainty, la valeur de la conductivité électrique est élevée, ceci est causé par le fait que la nappe superficielle identifiée sur terrain est de type grés marneux. La qualité des eaux rencontrée dans les districts d'Antsalova et de Morafenobe, ainsi que la partie centre Ouest de la zone d'étude, l'eau est de bonne qualité du point de vue Conductivité électrique (moins de  $200\mu\text{S}/\text{cm}$ ), ceux sont des nappes peu profondes et globalement caractérisées par une aquifère de type sable gréseux ou de sable argileuse.

## 1. Salinité des nappes

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Ce phénomène très répandu s'avère particulièrement problématique dans le district de Maintirano qui longe le canal de Mozambique.

Les effets des sels de la mer dans la façade Ouest et Nord-Ouest ont un grand impact sur la qualité des eaux des nappes de la zone littorale car ils augmentent rapidement la conductivité électrique des eaux. Ce phénomène s'appelle l' « intrusion marine ». C'est le cas du district de Maintirano.

L'altération chimique des roches traversées ou encaissantes est l'un des mécanismes à l'origine de la saleté et de la salinité d'un système aquifère. Ce phénomène entraîne une forte minéralisation de la nappe donc il y aura variation de la conductivité électrique de l'eau souterraine, c'est le cas du Nord-Est de la région Melaky.

## 2. Quantité et qualité

### 2.1. Quantité

La région Melaky est une région très diversifiée de par sa proximité avec les hautes terres mais aussi car elle est reliée à la mer par le district de Maintirano. Le contraste y est aberrant car le district de Maintirano par exemple possède une nappe exploitable importante tandis que les autres districts n'ont qu'une nappe à débit assez faible. Ceci est principalement dû à la mauvaise répartition très marquée des pluies dans l'année, la plus grande partie de la région souffre d'une sécheresse accrue durant une partie de l'année pour ensuite subir des montées d'eau spectaculaires durant la période des pluies. Le captage de l'eau nécessite donc des infrastructures spécifiques comme : les impluviums, les forages, les citernes, les barrages souterrains et les barrages fluviaux (**les pipelines**). Dans notre cas, ce sont les forages qui ont été utilisés. Ils sont très efficaces pour capter les nappes aquifères de profondeur élevée (zone littorale). Mais ils peuvent rencontrer des problèmes comme le coût élevé et une perte importante dans le cas où le forage s'avère négatif.

### 2.2. Qualité

La qualité des eaux prélevées est très variée dans la région Melaky. En effet, l'eau peut avoir une forte conductivité dans le district de Maintirano à cause de l'intrusion marine, mais elle peut être excellente et bonne dans les districts se rapprochant des hautes terres. Le dépôt des

sédiments. Dans la zone littorale, qui est au bord de la mer, les sels de mer ont des effets sur la qualité de l'eau.

On peut classer les eaux trouvées à partir des forages effectués dans la région Melaky et plus précisément dans les quatre districts (Maintirano, Antsalova, Morafenobe, Ambatomainty) en trois qualités :

- excellente : pour l'eau avec une conductivité comprise entre 60 et 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- bonne : pour l'eau avec une conductivité comprise entre 500 et 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- mauvaise : pour l'eau avec une conductivité supérieur à 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$

### 3. Synthèse des caractéristiques des eaux souterraines de Melaky

Pour cette étude, nous allons tenter de classer le type de nappe rencontré dans la région de Melaky en spécifiant les caractéristiques de la nappe.

Le tableau ci-après montre la synthèse de la classification des nappes.

**Tableau 6 : Classification des nappes**

Classes de nappes	Lithologie	Type de porosité	Type de nappe	Toit de la nappe	Qualité de l'eau
<b>Nappes d'alluvions</b>	Sables argileux	Poreux	Captive	2 à 20m	Eau douce
<b>Nappes des sables de dune</b>	Sables fins	Poreux	Libre	1 à 3m	Douce à saumâtre, parfois salée
<b>Nappes des sables argileux supérieurs</b>	Sables argileux	Poreux	Libre	1 à 10m	Douce à saumâtre, parfois salée
<b>Nappes de grès marneux</b>	Grès Marneux	Moins poreux	Libre	1 à 10m	Douce à saumâtre
<b>Nappes du Néogène</b>	Grès sableux	Poreux	Libre	4 à 30m	Saumâtre à salée
<b>Nappes de l'Eocène</b>	Calcaire	Karstique	Libre	20 à 60m	Douce à saumâtre
<b>Nappes de l'Isalo</b>	Sables - gréseux	Poreux	Libre; peut-être captive	20 à 50	Douce

# CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Grace aux données de forages d'eau disponible dans la Région Melaky, l'utilisation des logiciels Rock Work 15 et Oasis Montaj 7,5 nous permet d'avancer des modèles de sous-sol afin d'en tirer quelques aspects hydrogéologique de la zone.

On rencontre au moins deux niveaux de nappes d'eau: nappe d'eau superficielle localisée entre 0 et 20m et une autre nappe d'eau peu profonde entre 30 et 60m. La première nappe produit de l'eau douce à saumâtre et parfois même salée, et la deuxième de caractère d'eau douce à saumâtre.

Sept types de nappe ont donc été identifiés par cette étude :

- nappes d'alluvions
- nappes des sables de dune
- nappes des sables argileux supérieurs
- nappes de grès marneux
- nappes du Néogène
- nappes de l'Eocène
- nappes de l'Isalo

Les travaux de terrain dans lesquels nous avons eu l'opportunité de participer activement nous ont permis, non seulement de réaliser ce travail de modélisation, mais surtout de connaître et de maîtriser les différentes étapes à suivre pour un projet d'alimentation en eau potable, et ceci, tant sur l'étude et technique d'implantation des points d'exploitation d'eau souterraine mais aussi sur la réalisation des travaux de forage d'eau.

Pour la suite de cette étude, une étude hydrochimique mérite d'être approfondie afin de faire ressortir les faciès des eaux rencontrées au moins sur les deux nappes sus-mentionnées, et une étude isotopique pour pouvoir mieux expliquer l'origine de salinité des eaux souterraines. Grace aux données des essais de pompage, il est possible également de connaître les caractéristiques hydrauliques de chaque aquifère comme la perméabilité et la transmissivité. On suggère également de faire des forages d'eau profonde pour s'assurer l'approvisionnement en eau des villages du District d'Ambatomainy et de mieux comprendre la caractéristique des eaux profondes.



# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROISE Bruno (2012). **Quelques problèmes (et solutions) en modélisation hydrogéologique**. 16p. [1]
- BERARD P., BAKALOWICZ M., MARCHAL J.P (1999). **Avis sur le suivi piézométrique de l'aquifère karstique dii Lez – Eléments de réflexion en vue d'une optimisation du réseau de surveillance**. Rap. BRGM. 20 p. [2]
- BEAUCHAMP Jacques (2003). **Les systèmes aquifères**. 43p. [3]
- BONNET Emmanuel. **Support de cours ARGIS 9.xx**. 35p. [4]
- BRGM. **Fiche moyen d'investigation – mesure du niveau d'eau**. 4p. [5]
- COSENTINO Philippe. **Exploiter des relevés piézométriques avec INFOTERRE**. 2008. 4p. [6]
- DE MARSILY G. (2004). **Cours d'hydrogéologie**. Paris. [7]
- DUNNICLIFF John. **Geotechnical Instrumentation for monitoring field performance**. [8]
- FIQUET Vincent. **Introduction aux techniques de forage**. Industries OREX. [9]
- Geosoft Incorporated (2013). **Drill hole – Tutorial and technical note – Oasis montage 5.1.7**. 30p. [10]
- Geosoft Incorporated (2013). **Applying Fast-Fourier Transform in MAGMAP**. 3p. [11]
- Geosoft Incorporated (2013). **Editing drillhole databases in target**. 8p. [12]
- Geosoft Incorporated (2013). **Import drillhole data in target**. 19p. [13]
- Geosoft Incorporated (2013). **Target 3D geology surfaces**. 11p. [14]
- Geosoft Incorporated (2013). **Target lithology voxels**. 17p. [15]
- Geosoft Incorporated (2013). **Target for ArcGIS section maps**. 11p. [16]
- Hydro-Québec (1990). **Le document d'Hydro-Québec et SEBJ**. [17]
- Institut Atlantique d'Aménagement des Territoires (2003). **Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG**. 34p. [18]
- JAUFFRET D., LOUBIER S. (2004). **Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en France**. BRGM. [19]
- LAMONTAGNE Charles. **L'eau souterraine et l'environnement, hydrogéologue au MDDEP**. [20]

- Les agences de l'eau. **Cycle de l'eau**. 4p. [21]
- MARGAT J. (1972).**Terminologie hydrogéologique-propositions pour un dictionnaire**. [22]
- MAURUTTO Claude.**Les forages de puits d'eau**.8° Journée de l'APRONA. [23]
- MERMOUD A.(2006).**Ecoulement vers les ouvrages de captage**, école polytechnique fédérale de Lausanne. [24]
- MERRIEN-SOUKATCHOFFV. (2003/2004).**Hydrologie et hydrogéologie**. Cours d'hydrogéologie. Ecole des Mines de Nancy. [25]
- Ministère de l'environnement, des eaux et forêts (2006). **Kit pédagogique de la région Melaky**. Madagascar. [26]
- MURRAY James M.**Hydrologie de l'eau souterraine**. Chapitre VI. [27]
- RENARD François (2002).**Cours d'hydrogéologie**. [28]
- SDEM50. **Tutoriel du Système d'Information Géographique SDEM50**. 12p. [29]
- TATAHAFA Lahimandakotsifolaky. **Plan régional de développement Melaky**. [30]
- Université du Québec (2007). **Automatisation du processus de modélisation 3D en hydrogéologie par système expert et ontologies**. Québec. [31]

# WEBOGRAPHIE

- <http://www.adès.eaufrance.fr/Spip.aspx?page=spip.php?rubrique38>(14 août 2014)
- [www.cap-sciences.net](http://www.cap-sciences.net)(17 mai 2014)
- [www.geosoft.com](http://www.geosoft.com)(22 septembre 2014)

# **ANNEXES**

### Annexe 1 : Les points de forage

District AMBATOMAINTY							
Numéro	Identité des forages	X [en m]	Y [en m]	Z [en m]	Profondeur[en m]	N.S av soufflage[en m]	N.S ap soufflage[en m]
1	ABT-025	317475.7773	937825.0355	310	80	0	0
2	ABT-042	283788.7376	936487.1901	366	60	0	0
3	ABT-043	283790.2781	936222.7282	364	60	0	0
4	ABT-047	287991.1872	932275.327	380	76	0	0
District ANTSALOVA							
5	ALV-001	217203.0877	770416.2074	52	24.30	2.70	4.20
6	ALV-002	217187.1812	770220.1393	53	80.65	0	0
7	ALV-003	217520.5189	770229.0276	56	47	1.5	7.5
8	ALV-004	187111.5761	836823.5776	101	27.30	0.42	0.74
9	ALV-005	187250.3548	836412.2381	103	26.40	3.10	3.27
10	ALV-006	193745.0156	827695.6267	49	22.80	3.52	3.88
11	ALV-009	201694.5951	798768.419	45	24.10	1.80	2.80
12	ALV-010	195202.3097	778385.7751	40	22.17	0	3
13	ALV-011	195020.6721	778534.2733	41	23.25	0	4.5
14	ALV-012	194968.0735	778345.5002	44	31.63	0	5
15	ALV-013	202295.2247	773572.8317	16	33.35	14.76	14.70
16	ALV-014	202476.4457	773645.6454	20	23.15	0	12.10
17	ALV-015	202668.1575	773818.1921	23	82.60	0	0
18	ALV-016	210280.1044	772098.4198	40	26.92	0	5.20
19	ALV-017	209908.2892	771741.4422	39	32.24	0	11.10
20	ALV-018	209520.0279	771649.9303	35	23.30	2.1	2.6
21	ALV-020	227328.5651	771772.6103	104	56	-0.3	-0.3
22	ALV-021	227236.7142	771918.939	106	60.30	6.7	6.5
23	ALV-022	227429.3245	771795.7028	103	56.40	6.75	0
24	ALV-023	226919.8368	771836.2363	107	56	-0.3	-0.3

Numéro	Identité des forages	X [en m]	Y [en m]	Z [en m]	Profondeur[en m]	N.S av soufflage[en m]	N.S ap soufflage[en m]
25	ALV-024	218695.5741	759707.2343	59	78.70	0	0
26	ALV-025	217755.173	759144.3652	55	78.10	0	0
27	ALV-026	218787.3702	761036.3322	61	27.35	3.5	2.25
28	ALV-027	224097.8051	780096.811	119	20	1.70	2.60
<b>District MAINTIRANO</b>							
29	MTR-003	187598.1684	900658.2721	205	36.65	11	13
30	MTR-004	187402.4604	900535.4469	208	33.15	12	16
31	MTR-005	187317.8699	900712.7553	203	45	12	12
32	MTR-006	177835.0793	904511.9573	103	21.70	1.5	4.2
33	MTR-007	177715.8721	904648.981	102	23.20	0	4
34	MTR-008	177690.718	904532.4411	100	28.80	2	11
35	MTR-010	154123.2411	909018.2698	50	69.05	0	0
36	MTR-011	153389.0935	908142.9903	49	23.80	1.70	3.20
37	MTR-012	155287.8083	909985.3303	58	80	0	0
38	MTR-013	154707.899	909815.2135	54	22.80	7	8.30
39	MTR-014	157119.4416	893284.9106	56	33.35	5	5.5
40	MTR-016	156884.6284	893257.5763	62	28.75	2.5	3
41	MTR-018	153734.4989	885832.7669	30	28.8	3.5	4.6
42	MTR-019	153289.0131	895017.7019	60	59.95	1	0
43	MTR-020	153369.5145	895018.7362	61	42.30	2.80	6.80
44	MTR-021	151088.7876	891331.7842	61	24	6	6.50
45	MTR-022	150925.0242	891707.2554	59	20	4.70	5.30
46	MTR-023	151230.3248	891117.6938	64	28.50	8	11
47	MTR-024	147162.4217	892360.0344	40	65	13.66	14.37
48	MTR-025	157039.0099	878785.1949	24	33.05	1.83	1.93
49	MTR-026	157627.1147	879232.2743	30	60	0	0
50	MTR-027	157450.7153	879203.4542	29	15	1	1.15
51	MTR-028	157325.1433	879173.0657	26	19.70	2	2.60

Numéro	Identité des forages	X [en m]	Y [en m]	Z [en m]	Profondeur[en m]	N.S av soufflage[en m]	N.S ap soufflage[en m]
52	MTR-029	156770.7873	877410.9691	25	18.45	0	2.20
53	MTR-030	156704.6942	877861.8906	22	18.55	0	2
54	MTR-031	158344.0647	881123.729	36	60	0	0
55	MTR-032	154536.7726	881661.9488	33	21	0	0
56	MTR-034	158175.2629	877660.2877	35	28.7	0	1.65
57	MTR-036	160810.2931	876507.7299	44	22.5	4.14	4.09
58	MTR-037	159114.9139	877173.94	40	24	1.95	4.30
59	MTR-040	148440.2902	885969.745	20	75.80	0	0
60	MTR-047	158596.8714	871384.1909	55	24.25	6.02	6.26
61	MTR-049	181758.2404	852617.1971	130	22.30	2	3.33
62	MTR-050	184168.0501	848169.1568	103	21.56	3.4	3.47
63	MTR-051	183867.6145	848386.0062	105	27.25	1.34	2
<b>District MORAFENOBE</b>							
64	MFB-008	231513.3868	909201.224	260	40	13.51	13.90
65	MFB-011	204392.356	897157.0929	312	33.65	10.20	0
66	MFB-012	206260.4445	898448.9311	304	27	5.40	6.40
67	MFB-013	206360.1501	898540.7011	308	23.83	5.30	5.70
68	MFB-014	206555.0093	898438.5993	300	27.10	3.10	4.10
69	MFB-015	209909.4912	900163.2871	240	30.10	2.30	3
70	MFB-018	225154.6702	902797.3931	198	72.10	27.23	30.75
71	MFB-019	225064.7121	902670.4014	201	75.10	27.16	30.50
<b>Morafenobe</b>							
72	MFBE 01'	204468.6758	897185.9089	285	20	2.5	4
73	MFBE 02'	206294.6175	898468.0919	285	20	4.30	6.20
74	MFBE 06'	225167.4881	903112.2220	200	33.70	8	12
75	MFBE 07'	236558.5752	910424.0259	245	22	2	5.3
76	MFBE 08'	156104.9407	929250.8050	306	20	7.5	10

Ambatomainty							
Numéro	Identité des forages	X [en m]	Y [en m]	Z [en m]	Profondeur[en m]	N.S av soufflage[en m]	N.S ap soufflage[en m]
77	AMBT 01'	288313.6741	932076.7298	140	70	-	-
78	AMBT 02'	287741.5264	921770.2719	329	60	-	-
Maintirano							
79	MTRO 04'	150427.6481	906253.6128	10.3	44	-	-
80	MTRO 05'	153337.1075	907158.4008	7	17	3	6
81	MTRO 10'	157283.8880	881248.6701	25	13	2	5
82	MTRO 11'	154558.2058	881687.4465	15	15	8	4.6
83	MTRO 12'	150331.6667	893456.3838	20	60	-	-
84	MTRO 13'	161833.8222	884941.4757	25	18	2	4.2
85	MTRO 14'	155707.5338	885860.6773	14	23	0	1
86	MTRO 15'	153847.2936	877990.3749	15	14	1	2.8
87	MTRO 16'	157898.9500	872662.9122	12	18	3	5.2
88	MTRO 17'	153002.6739	873076.5696	7	20	2.20	4.5
89	MTRO 19'	168697.6906	898146.0784	47	20	4.5	6
90	MTRO 22'	152419.1189	906869.8263	16	17.50	5	6.40
91	MTRO 23'	151667.0128	906506.4389	7	19	?	?
92	MTRO 25'	148141.9966	902468.1107	20	22	15	14
93	MTRO 27'	187622.6804	900538.1160	154	34	11.20	12.80



## Annexe 2 : Conductivité Melaky triées

Région	District	Commune	Village	Cie_For	N°Id	Date_fin	X_DegDec	Y_DegDec	Conductivité
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Ambalakaza Nord	CGC300	ALV026	19/06/2010	44,78849	-19,14672	2380
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Antsaraolo Centre	CGC300	ALV001	28/05/2010	44,69883	-19,15911	1240
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Antsaraolo E	CGC300	ALV003	05/08/2010	44,70183	-19,16083	950
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Beapinga S	CGC300	ALV027	02/08/2010	44,76527	-19,07226	599
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Bekopaka Est	CGC300	ALV022	30/07/2010	44,79618	-19,14755	922
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Bekopaka Nord	CGC300	ALV021	19/07/2010	44,79436	-19,14642	1380
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Bekopaka Ouest	CGC300	ALV023	05/07/2010	44,79134	-19,14714	1770
Melaky	Antsalova	Bekopaka	Bekopaka Sud	CGC300	ALV020	12/07/2010	44,79522	-19,14775	1130
Melaky	Antsalova	Soahany	Antsianaloka	CGC300	ALV006	10/05/2010	44,48193	-18,63939	470
Melaky	Antsalova	Soahany	Bemonto Nord	CGC300	ALV004	08/05/2010	44,42006	-18,55626	510
Melaky	Antsalova	Soahany	Bemonto Sud	CGC300	ALV005	10/05/2010	44,42133	-18,55999	1840
Melaky	Antsalova	Trangahy	Antsalaza	CGC300	ALV009	14/05/2010	44,55432	-18,90150	200
Melaky	Antsalova	Trangahy	Bejangoa Est	CGC300	ALV017	27/08/2010	44,62961	-19,14646	1130
Melaky	Antsalova	Trangahy	Bejangoa Nord-Est	CGC300	ALV016	31/08/2010	44,63318	-19,14327	830
Melaky	Antsalova	Trangahy	Bejangoa Ouest	CGC300	ALV018	09/08/2010	44,62591	-19,14725	980
Melaky	Antsalova	Trangahy	Soatana Est	CGC300	ALV010	18/09/2010	44,49053	-19,08499	644
Melaky	Antsalova	Trangahy	Soatana Nord	CGC300	ALV011	04/09/2010	44,48882	-19,08363	790
Melaky	Antsalova	Trangahy	Soatana Ouest	CGC300	ALV012	11/09/2010	44,48830	-19,08533	850
Melaky	Antsalova	Trangahy	Trangahy Centre	CGC300	ALV014	22/05/2010	44,55916	-19,12854	580
Melaky	Antsalova	Trangahy	Trangahy Ouest	CGC300	ALV013	18/05/2010	44,55743	-19,12918	1990
Melaky	Maintirano	Andrea	Andrea Centre	CGC300	MTR013	13/12/2009	44,12211	-17,89347	1120
Melaky	Maintirano	Andrea	Andrea_Ambalarano	CGC300	MTR011	11/12/2009	44,10947	-17,90842	2650
Melaky	Maintirano	Ankisatra	Marokibo	CGC300	MTR047	04/05/2010	44,15422	-18,24099	300
Melaky	Maintirano	Antsondrondava	Andramy	CGC300	MTR050	08/05/2010	44,39342	-18,45347	400
Melaky	Maintirano	Antsondrondava	Andramy	CGC300	MTR051	07/05/2010	44,39060	-18,45148	440
Melaky	Maintirano	Antsondrondava	Antsondrodava	CGC300	MTR049	06/05/2010	44,37110	-18,41304	190
Melaky	Maintirano	Belitsaka	Amborokotsy E	CGC300	MTR006	16/12/2009	44,33969	-17,94389	180
Melaky	Maintirano	Belitsaka	Amborokotsy N	CGC300	MTR007	14/12/2009	44,33858	-17,94264	230
Melaky	Maintirano	Belitsaka	Amborokotsy W	CGC300	MTR008	15/12/2009	44,33833	-17,94369	209

Région	District	Commune	Village	Cie_For	N°Id	Date_fin	X_DegDec	Y_DegDec	Conductivité
Melaky	Maintirano	Belitsaka	Belitsaka E	REVA350	MTR003	05/12/2009	44,43142	-17,97969	130
Melaky	Maintirano	Belitsaka	Belitsaka S	CGC300	MTR004	17/12/2009	44,42956	-17,98078	230
Melaky	Maintirano	Belitsaka	Belitsaka W	REVA350	MTR005	04/12/2009	44,42878	-17,97917	110
Melaky	Maintirano	Betanatanana	Ambalasatramorafeno Nord	CGC300	MTR030	30/04/2010	44,13712	-18,18227	2850
Melaky	Maintirano	Betanatanana	Ambalasatramorafeno Sud	CGC300	MTR029	03/05/2010	44,13769	-18,18635	790
Melaky	Maintirano	Betanatanana	Ambonarake Est	CGC300	MTR037	26/04/2010	44,15981	-18,18876	490
Melaky	Maintirano	Betanatanana	Ambonarake Ouest	CGC300	MTR034	25/04/2010	44,15099	-18,18426	640
Melaky	Maintirano	Betanatanana	Ankilimanarivo	CGC300	MTR036	27/04/2010	44,17575	-18,19497	630
Melaky	Maintirano	Betanatanana	BetanatananaNord_Est	CGC300	MTR027	13/04/2010	44,14433	-18,17024	2110
Melaky	Maintirano	Betanatanana	BetanatananaNord_Ouest	CGC300	MTR028	12/04/2010	44,14314	-18,17050	4300
Melaky	Maintirano	Betanatanana	Betanatanana Sud	CGC300	MTR025	09/04/2010	44,14039	-18,17397	2160
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Ambolando Centre	CGC300	MTR019	01/12/2009	44,10694	-18,02694	1170
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Ambolando_Andranonankoay	CGC300	MTR020	30/11/2009	44,10694	-18,02694	1070
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Antsihanaloky	CGC300	MTR018	05/04/2010	44,11003	-18,10994	1639
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Mafaijijo	CGC300	MTR021	29/11/2009	44,08572	-18,05997	2540
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Mafaijijo	CGC300	MTR023	29/11/2009	44,08422	-18,05656	1380
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Mafaijijo	CGC300	MTR022	28/11/2009	44,08703	-18,06192	1500
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Tanandava Centre	CGC300	MTR014	10/10/2010	44,14289	-18,04303	570
Melaky	Maintirano	Mafaijijo	Tanandava W	CGC300	MTR016	08/10/2010	44,14067	-18,04325	390
Melaky	Maintirano	Maintirano	Maintirano	REVA350	MTR024	18/10/2009	44,04878	-18,05022	1410
Melaky	Morafenobe	Andramy	Ambalabao	REVA350	MFB011	21/11/2009	44,58961	-18,01292	60
Melaky	Morafenobe	Andramy	Andafia	REVA350	MFB015	09/11/2009	44,64198	-17,98626	100
Melaky	Morafenobe	Andramy	Andramy	REVA350	MFB018	07/11/2009	44,78613	-17,96376	1000
Melaky	Morafenobe	Andramy	Andramy	REVA350	MFB019	31/10/2009	44,78527	-17,96490	1340
Melaky	Morafenobe	Andramy	Antsingilitoka	REVA350	MFB014	20/11/2009	44,60737	-18,00142	230
Melaky	Morafenobe	Andramy	Antsingilitoka	REVA350	MFB013	11/11/2009	44,60832	-18,00060	150
Melaky	Morafenobe	Andramy	Antsingilitoka	REVA350	MFB012	10/11/2009	44,61015	-18,00154	210
Melaky	Morafenobe	Morafenobe	Andranomamorery	REVA350	MFB008	28/10/2009	44,84668	-17,90641	

### Annexe 3 : 100forages Melaky 2014

Avancement des travaux 40 forages Melaky									Latitude			Longitude			Altitude	Nbr implante	PT	Ptubage	Debit	Conductiv e	Nbr Positive	NbrNegativ e	Nbrforer	Taux de reussite
N°	REGION	DISTRICT	COMMUNE	FOKONTAN Y	POP	NBRE PDO	RMRQ	Implantatio n	dg	mn	sec	dg	mn	sec										
1	MELAKY	AMBATOMAINTY	MAROTSIALEHA	BEKARARA	350	1		AMBT04	17	39	55,4	45	20	34,2	362	1							0	
2	MELAKY	AMBATOMAINTY	AMBATOMAINTY	ANKIHONALA	420	1		AMBT05	17	40	49,9	45	32	29,2	342	1							0	
3	MELAKY	AMBATOMAINTY	MAROTSIALEHA	Ambalapamba HOTEL	400	1		AMBT01	17	42	12,1	45	23	2,4	364	1							0	
54	MELAKY	AMBATOMAINTY	BEMARIVO	Ambalarano		1		AMBT10	17	35	8,1	45	33	26	331	1							0	
55	MELAKY	AMBATOMAINTY	AMBATOMAINTY	Ampasindava		1		AMBT08	17	35	57,9	45	29	40,8	345	1							0	
56	MELAKY	AMBATOMAINTY	AMBATOMAINTY	Ambajabe		1		AMBT07	17	42	50,4	45	37	22,9	327	1							0	
57	MELAKY	AMBATOMAINTY	AMBATOMAINTY	Ambahivahy		1		AMBT06	17	42	33,8	45	36	21,5	337	1							0	
58	MELAKY	AMBATOMAINTY	MAROTSIALEHA	MAROTSIALEHA		1		AMBT03	17	47	54,3	45	22	47	329	1							0	
59	MELAKY	AMBATOMAINTY	MAROTSIALEHA	MAROTSIALEHA		1		AMBT02	17	47	47,3	45	22	41	317	1							0	
60	MELAKY	AMBATOMAINTY	AMBATOMAINTY	JIRAMA		1	JIRAMA	AMBT12	17	41	50,8	45	40	1,8	306	1							0	
61	MELAKY	AMBATOMAINTY	AMBATOMAINTY	JIRAMA		1	JIRAMA	AMBT13	17	41	48,9	45	39	39	312	1							0	
62	MELAKY	AMBATOMAINTY	BEMARIVO	Bemarivo		1		AMBT11	17	34	10,8	45	48	24,5	310	1								
4	MELAKY	ANTSALOVA	SOAHANY	Fkt ANTSIALOKA	350	1	positif	ALVA03	18	38	23	44	28	53,5	32	1	15,11	15	0,8	600	1	0	1	
5	MELAKY	ANTSALOVA	TRANGAHY	Fkt SOATANANA	437	1		ALVA01	19	5	2,4	44	29	15,4	18	1							0	
45	MELAKY	ANTSALOVA	ANTSALOVA			1	JIRAMA	ALVA02	18	40	15,3	44	37	32,2	89	1							0	
6	MELAKY	BESALAMPY	AMPAKO	Fkt AMPAKO	700	0	Inaccessi ble																0	
7	MELAKY	BESALAMPY	MAROVOAY SUD	Fkt MAROVOAY SUD	450	0	Inaccessi ble																0	
8	MELAKY	BESALAMPY	MAROVOAY SUD	AMBALARANO	300	0	Inaccessi ble																0	
9	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	Fkt AMPANDRA TETEZANA	550	1	positif	MTRO05	17	55	2,3	44	6	31,9	7	1	17	17	3	1800	1	0	1	
10	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	Fkt AMBAROJEBY d'Ampandra	356	1		MTRO04	17	55	30,5	44	4	52,7	10,3	1							0	
11	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	Fkt ANTABOABOAKY	300	0	Inaccessi ble	MTRO08	17	51	53,5	44	10	16,3									0	
12	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	mandroatsybara	350	0	Inaccessi ble	MTRO07							24								0	

Avancement des travaux 40 forages Melaky									Latitude			Longitude			Altitude	Nbr implante	PT	Ptubage	Debit	Conductivité	Nbr Positive	Nbr Negative	Nbr forer	Taux de reussite
N°	REGION	DISTRICT	COMMUNE	FOKONTAN Y	POP	NBRE PDO	RMQR	Implantati on	dg	mn	sec	dg	mn	sec										
13	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	BEMENA	450	0	Inaccessi ble	MTRO06	17	52	25,2	44	7	35,4	31								0	
14	MELAKY	MAINTIRANO	AMBIKY	Fkt AMBIKY amorondalana	.	0	Inaccessi ble																0	
15	MELAKY	MAINTIRANO	ANDABOTOKA	KIMAZIMAZY	707	1		MTRO13	18	7	8,1	44	11	11,1	27	1							0	
16	MELAKY	MAINTIRANO	ANDRANOVAO	ANDRANOVAO	183 2	0	Inaccessi ble																0	
17	MELAKY	MAINTIRANO	ANDRANOVAO	MANAPAPE	600	0	Inaccessi ble																0	
18	MELAKY	MAINTIRANO	ANKISATRA	ANKISATRA	842	1		MTRO16	18	13	45,7	44	8	52	12	1							0	
19	MELAKY	MAINTIRANO	ANKISATRA	Fkt AMPATIFATY	500	1		MTRO17	18	13	30,2	44	6	5,6	7	1							0	
20	MELAKY	MAINTIRANO	BEMOKOTRA SUD	AMBOROKOTSY	450	0	Inaccessi ble																0	
21	MELAKY	MAINTIRANO	BEMOKOTRA SUD	ANKERABE SUD	215	0	Inaccessi ble																0	
22	MELAKY	MAINTIRANO	BELITSAKY	Fkt MANDREVOMBY	479	1		MTRO19	18	0	1,5	44	15	9,9	47	1							0	
23	MELAKY	MAINTIRANO	BELITSAKY	MANDREVOMBY TOBY	479	1		MTRO18	18	0	19,4	44	15	24,7	41	1							0	
24	MELAKY	MAINTIRANO	BELITSAKY	AMBOROKOTSY HOTEL	248	1		MTRO20	17	56	57,7	44	20	5,4	56,6	1							0	
25	MELAKY	MAINTIRANO	BETANATANANA	ANDRANOMALIO EST	400	1		MTRO10	18	9	6,3	44	8	34,8	23	1							0	
26	MELAKY	MAINTIRANO	BETANATANANA	ANALAMAMOKO CENTRE	450	1		MTRO11	18	8	50,9	44	7	2,3	15	1							0	
27	MELAKY	MAINTIRANO	BELITSAKY	BELITSAKY	850	1		MTRO26	17	58	50,8	44	25	53,9	159	1							0	
28	MELAKY	MAINTIRANO	MAFAIJJO	BEREKETA ZOMBA	400	1	positif	MTRO09	18	2	59,2	44	6	53,5	22	1	18,8	18,8	1	597	1	0	1	
29	MELAKY	MAINTIRANO	MAFAIJJO	BELOBAKA	.	0	Inaccessi ble	MTRO12	18	2	26,5	44	4	43,5	20	0							0	
30	MELAKY	MAINTIRANO	MAROHAZO	MAROHAZO	964	0																	0	
31	MELAKY	MAINTIRANO	MANGOTROKY	Fkt BELEJA	260	1		MTRO21	18	0	46,3	44	4	21,6	56	1							0	
32	MELAKY	MAINTIRANO	BETANATANANA	421 Base Militaire	350	1		MTRO15	18	10	50,8	44	6	36,5	15	1							0	
42	MELAKY	MAINTIRANO	MAINTIRANO			1	JIRAMA	MTRO01	18	3	25,9	44	3	26,4		1							0	

Avancement des travaux 40 forages Melaky									Latitude			Longitude			Altitude	Nbr implante	PT	Ptubage	Debit	Conductivité	Nbr Positive	Nbr Negative	Nbr forer	Taux de reussite
N°	REGION	DISTRICT	COMMUNE	FOKONTAN Y	POP	NBRE PDO	RMRQ	Implantati on	dg	mn	sec	dg	mn	sec										
43	MELAKY	MAINTIRANO	MAINTIRANO			1	JIRAMA	MTRO02	18	3	16	44	3	23,7		1							0	
44	MELAKY	MAINTIRANO	MAINTIRANO			1	JIRAMA	MTRO03	18	3	0,9	44	2	57,2		1							0	
46	MELAKY	MAINTIRANO	ANDABOTOKA	ANDABOTOKA		1		MTRO14	18	6	35,7	44	7	43,2	14	1							0	
47	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	ANKISAOSAO		1	positif	MTRO22	17	55	11,3	44	6	0,6	16	1	17,3	17,3	4	1600	1	0	1	
48	MELAKY	MAINTIRANO	ANDREA	ANTANANARIVO KELY		1	positif	MTRO23	17	55	22,8	44	5	34,9	7	1	19	19	5	1200	1	0	1	
50	MELAKY	MAINTIRANO	Mafaijijo	Mafaijijokely		1		MTRO24	18	4	47	44	5	47,5	22	1					0	1	1	
51	MELAKY	MAINTIRANO	MAINTIRANO	Belailay	234	1		MTRO25	17	57	32,6	44	3	33,4		1							0	
52	MELAKY	MAINTIRANO	BELITSAKY	BELITSAKY	850	1		MTRO27	17	58	46,1	44	25	49,7	154,4	1							0	
33	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Fkt ANKALALO	1250	1		MFBE10	18	10	55,6	45	1	21,3	282								0	
34	MELAKY	MORAFENOBE	ANDRAMY	ANDRAMY	860	1		MFBE05	17	57	39,3	44	47	10,6	186	1							0	
35	MELAKY	MORAFENOBE	ANDRAMY	ANTSIGILITOKA	450	1		MFBE02	18	0	4,5	44	36	27,7	296	1							0	
36	MELAKY	MORAFENOBE	ANDRAMY	ANDAFIA	300	1		MFBE03	17	59	10,4	44	38	31,1	237	1							0	
37	MELAKY	MORAFENOBE	ANDRAMY	ANALABE ANTSINGILITOKA	200	1		MFBE04	17	57	22,6	44	40	16,7	203	1							0	
38	MELAKY	MORAFENOBE	ANDRAMY	AMBALABAO	300	1		MFBE01	18	0	45,6	44	35	25,2	285	1							0	
39	MELAKY	MORAFENOBE	MORAFENOBE	BEMOKOTY D'ANDRANOMA MORERY	245	1		MFBE07	17	53	44,7	44	53	39,8	247	1							0	
40	MELAKY	MORAFENOBE	MORAFENOBE	ANDRANOVRIV ONALA	310	1		MFBE09bis	18	4	15	44	54	55,2	227	1							0	
41	MELAKY	MORAFENOBE	MORAFENOBE	BESAHONA FRONT AMBTY	250	1		MFBE08	17	43	5,2	45	8	15,3	300	1							0	
53	MELAKY	MORAFENOBE	ANDRAMY	ANDRAMY	860	1		MFBE06	17	57	49,3	44	47	9,7	200	1							0	
63	MELAKY	MORAFENOBE	MORAFENOBE	BekodokaAvaratra		1		MFBE09	18	0	12,1	44	54	49	285	1								
64	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Fkt ANKALALO	1250	1		MFBE11	18	10	53,5	45	1	22,9	282	1								
65	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Fkt ANKALALO	1251	1		MFBE12	18	10	58,8	45	1	19,8	282	1								
66	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Ambalatany		1		MFBE13	18	11	25,7	45	12	19,2	287	1								
67	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Antsakasarotra		1		MFBE14	18	16	8	45	27	49,4		1								

Avancement des travaux 40 forages Melaky									Latitude			Longitude													
N°	REGION	DISTRICT	COMMUNE	FOKONTANY	POP	NBRE PDO	RMRQ	Implantation	dg	mn	sec	dg	mn	sec	Altitude	Nbr implante	PT	Ptubage	Debit	Conductivite	Nbr Positive	NbrNegative	Nbrforer	Taux de reussite	
68	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Orimbato 2		1		MFBE15	18	18	7,1	45	33	14,7	125 8	1									
69	MELAKY	MORAFENOBE	BERAVINA	Orimbato 1		1		MFBE16	18	18	21,1	45	33	55,2	129 1	1									
55																54									
5																					1	6	83,33333333		

# Annexe 4 : Belitsaka

<b>PAEAR</b> Volet 1250 forages		<b>COUPE DE FORAGE</b>		<b>CTRL : 2</b>	
<b>N°Idr : MTR 003</b>		<b>PROJET D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE</b>			
Coord Lat : 17°58'46.5" Long : 44°25'53.1"		Diam. forage : $\phi 104$ et $\phi 64$ Tubage aveugle (ml) : 27.1 Tubage crépine (ml) : 8.55 Gravier (ml) : 20.65 Tout venant (ml) : 14 Débit fin forage : $\geq 45 \text{ m}^3/\text{h}$ Débit fin soufflage : $\geq 40 \text{ m}^3/\text{h}$ Durée du soufflage : 30mn		Région : MELAKY District : Mantirano Commune : Belitsaka Fokontany : Belitsaka Village : Belitsaka E  N.S avant Souffl. : 11 N.S. après Souffl. : 13	
Entreprise : REVAFORAGE Foreur : SALAHARIMILIANE Contrôleur : ADINANE Omar Date début : 05/12/09 Date fin : 05/12/09					
<b>COUPE TECHNIQUE</b>				<b>COUPE GEOLOGIQUE</b>	
Vitesse d'avancement (m/h) 10 20 30 40	Prof V.e (m)	Débit cumulé / Cond. (m3/h) / $\mu\text{S}/\text{cm}$	<b>EQUIPEMENT</b>	Prof (m)	<b>LITHOLOGIE</b>
Observations : $P_F = P_E = 36.65 \text{ m}$ L'entreprise ne possède pas une sonde électrique Conductivité fin soufflage = 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$					

Signature du contrôleur :

Signature de l'hydrogéologue (Entreprise) :

ADINANE Omar

Groupement TECSULT - SGDM - TECMAD

# **RAPPORT DE CHANTIER PAR FORAGE**

Code site : <b>NTS 02 3</b>	Atelier :	Entreprise : <b>REVAFORAGE</b>
Village : <b>Schababa E</b>	Commune : <b>Schababa</b>	District : <b>Namurano</b>
DATES : <b>05/12/09</b>		Région : <b>FIELAKY</b>
Description des conditions météorologiques : <b>bonne</b>		

## **CHRONOLOGIE DES ACTIVITES DE TRAVAUX DE FORAGE**

DATE	heures	Description
<b>05/12/09</b>	<b>9<sup>h</sup>00</b>	Installation de machine
	<b>10<sup>h</sup>25</b>	debut du forage
	<b>11<sup>h</sup>02</b>	pose tubage provisoire
	<b>11<sup>h</sup>15</b>	Continuation du forage
	<b>14<sup>h</sup>12</b>	fin du forage et
	<b>16<sup>h</sup>30</b>	équipement à 15 <sup>h</sup> 30
		fin du forage

Travaux réalisés pour ce forage	Forage à boue	Forage à l'air	Equipement
Mètres linéaires réalisés	<b>marc = 4,10</b>	<b>NFT = 32,55</b>	<b>10 + 30 + 94</b>

## **PERSONNEL PRÉSENT SUR LE CHANTIER**

Fonction	Nom	Observation
Hydrogéologue	<b>Hery tiana</b>	
Chef foreur	<b>Sallah et R. Williams</b>	
Aide foreur	<b>Flavien</b>	
Manœuvres	<b>Zohilaby, Badi + Tamarc, Julien</b>	
Contrôleur	<b>ADINANE Omar</b>	
Autres		

## **ENTRÉE ET SORTIE DES MATÉRIAUX**

Désignation	Entré	Sortie

## **EVENEMENTS SUR MATÉRIELS ET ÉQUIPEMENTS**

## **OBSERVATIONS COMPLÉMENTAIRES**

Pour le bureau d'étude, le Contrôleur

Pour l'Entreprise, l'hydrogéologue

SIGNATURES

  
**ADINANE Omar**

  
**Hery Tiana**



## RÉSUMÉ DES QUANTITÉS DES TRAVAUX RÉALISÉS

Entreprise : REVAFORAGE

Date : 05/12/09

Village : Behitaba

Forage N°:

Code Village : NT2003

N°	DESIGNATION DES OUVRAGES	Unité	Quantité
<b>Poste 200 – Réalisation des forages</b>			
201	Installation et décapage de la zone	Unité	
202	Forage au Rotary	ml	4,10
203	Forage au marteau fond de trou	ml	32,55
<b>Poste 300 – Equipement</b>			
301	Fourniture et pose de tubage aveugle	ml	27,10
302	Fourniture et pose de tubage crépiné	ml	8,55
303	Fourniture et pose de tubage à sédiment	Unité	1,00
304	Fourniture et pose de massif filtrant	ml	20,65
305	Cimentation et margelle	Unité	1
<b>Poste 400 – Développement et Essais de débit</b>			
401	Développement et essais de débit	Unité	1

## Annexe 5 : Norme internationale de la qualité des eaux imposée par l'OMS

Catégories	Caractéristiques	Symbole	Unités	Eaux souterraines
<i>Caractères physico-chimiques et organoleptiques</i>	Température	T°	°C	7-25
	Couleur	Coul	U-Pt	0-20
	Turbidité	Tu	g/m <sup>3</sup>	0-20
	Gout, odeur		seuil	1- 4
	Pouvoir colmatant	Po	L	0.01-1
	pH	pH		5.5-8
	Résistivité	R	KΩ.cm	1-5
	Dissolution O <sub>2</sub>		mg/L	>ou =5
<i>Examens préliminaires</i>	Minéralisation			
	Dureté total	TH	°F	0-60
	Alcalinité	TAC	°F	0-40
<i>Signes de pollution</i>	Matières organiques en milieu alcalin	MC	mg/L	0-3
	Azote ammoniacal	NH <sub>4</sub>	mg/L	0-1
	Azote nitreux	NO <sub>2</sub>	mg/L	0-0.5
<i>Eléments toxiques ou indésirables</i>	CO <sub>2</sub> agressif	CO <sub>3</sub>	mg/L	0-100
	Fluorures	N	mg/L	0-10
	Chlorures	Cl	mg/L	0-500
	Sulfates	SO <sub>4</sub>	mg/L	0-500
	Nitrates	NO <sub>3</sub>	mg/L	0-20
	Cyanures	CN	mg/L	0
	Chromates	CrO <sub>4</sub>	mg/L	0
	Chlores libres	Cl	mg/L	0
	Silice	SiO <sub>2</sub>	mg/L	0-80
	Phénols		mg/L	0

<b><i>Cations</i></b>	Sodium	Na	mg/L	Liés à SO <sub>4</sub> et Cl
	Potassium	K	mg/L	
	Magnésium	Mg	mg/L	0-200
	Calcium	Ca	mg/L	0-200
	Fer	Fe	mg/L	0-10
	Cuivre	Cu	mg/L	0
	Zinc	Zn	mg/L	0
	Aluminium	Al	mg/L	0-5
	Plomb	Pb	mg/L	0
	Arsenic	As	mg/L	0
	Sélénium	Se	mg/L	Traces
	Uranium	U	mg/L	Traces
	Manganèse	Mn	mg/L	0-5
<b><i>Qualité bactériologique</i></b>	Coliformes totaux			10/100
	Coliformes fécaux			Absence dans 100ml

## Annexe 6 : Planche photos







# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE .....	III
LISTE DES ACRONYMES .....	IV
LISTE DES CARTES .....	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
LISTE DES ANNEXES .....	IX
INTRODUCTION .....	1
PREMIERE PARTIE : NOTIONS GENERALES SUR L'HYDROGEOLOGIE.....	3
I.    Cycle de l'eau.....	4
1.    Généralités sur l'eau .....	4
2.    Différents types d'eau .....	4
3.    Origines des eaux souterraines .....	4
4.    Composants du Cycle de l'Eau.....	5
5.    Moteurs essentiels du cycle de l'eau .....	6
II.    Généralités sur les aquifères.....	6
1.    Quelques définitions.....	6
2.    Aquifère.....	6
3.    Différents types d'aquifères .....	7
3.1. Aquifères fluviatiles.....	7
3.2. Aquifères karstiques .....	8
3.3. Les milieux fissurés .....	9
III.    Nappes.....	9
1.    Différents types de nappes .....	10
1.1. Nappe libre.....	10
1.2. Nappe captive.....	10
1.3. Nappe semi captive .....	11
IV.    Niveau piézométrique.....	12
1.    Niveau piézométrique.....	12
2.    Piézomètre .....	12
3.    Type des piézomètres .....	13
3.1. Puits ouvert ( <i>Open well</i> ) .....	13
3.2. Piézomètre à élément poreux ( <i>Porous Element Piezometer</i> ) .....	13
3.3. Autres types de piézomètres .....	14
4.    Mesure piézométrique .....	14
5.    Sonde piézométrique .....	15
V.    Forage d'eau.....	16
1.    Définition du forage en général.....	16
2.    Définitions du forage d'eau .....	17
3.    Méthodes de forages courants .....	17
3.1. Forage à la tarière manuelle .....	18
3.2. Forage au jet.....	18
3.3. « Sludging » .....	18

3.4.	Forage par battage ou forage à percussion .....	18
3.5.	Forage rotary et marteau fond de trou.....	19
4.	Méthodes de forages d'eau.....	20
4.1.	Havage .....	20
4.2.	Marteau fond de trou.....	20
4.3.	Rotary.....	21
5.	Matériels de forage d'eau .....	22
5.1.	Choix d'une foreuse .....	23
5.2.	Machines de forage rotary et marteau fond de trou (MFT).....	23
6.	Cas des forages dans MELAKY .....	24
6.1.	Matériels de forage .....	25
6.2.	Déroulement des opérations.....	30
<b>DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>		<b>32</b>
I.	<i>Situation géographique de la Région Melaky .....</i>	<i>33</i>
1.	Structure administrative .....	34
2.	Contexte climatique.....	34
3.	Contexte géologique.....	36
II.	<i>Contexte hydrogéologique.....</i>	<i>39</i>
1.	Grands cours d'eau .....	39
1.1.	Lacs.....	39
1.2.	Mer .....	39
1.3.	Sources thermominérales et chutes d'eau .....	39
2.	Classification des nappes rencontrées dans la zone.....	40
III.	<i>Fonctions de l'eau dans la Région Melaky .....</i>	<i>41</i>
1.	Fonction biologique.....	41
2.	Fonction écologique .....	41
3.	Fonctions climatiques.....	42
4.	Fonction sociale et économique .....	42
5.	Autres fonctions .....	42
IV.	<i>Pressions sur l'eau dans la Région Melaky .....</i>	<i>43</i>
1.	Facteurs d'origine anthropique.....	43
2.	Pollution de l'eau.....	43
3.	Milieu humain .....	44
<b>TROISIEME PARTIE : METHODOLOGIE APPLIQUEE A LA MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE .....</b>		<b>45</b>
I.	<i>Etapes de conception d'un modèle 3D hydrogéologique .....</i>	<i>46</i>
1.	Définition de l'objectif .....	47
2.	Caractérisation hydrogéologique.....	47
3.	Analyse des données géologiques .....	47
4.	Modèle conceptuel géologique.....	48
5.	Modèle conceptuel hydrogéologique .....	48
6.	Modèle géométrique 3D.....	48
7.	Modèle géologique 3D.....	49
II.	<i>Logiciel ROCKWORKS 15.....</i>	<i>50</i>
1.	Présentation du ROCKWORKS 15.....	50
2.	Champs de travail inclus dans RockWorks15 .....	50
2.1.	Le Borehole Manager.....	51
2.2.	Le RockWorks Utilities .....	51
2.3.	Outils graphiques .....	51
2.4.	L'affichage en 2D ou « RockPlot 2D ».....	52

2.5.	L'affichage en 3D avec RockPlot 3D .....	52
2.6.	La mise en page ou « ReportWorks » .....	53
III.	<i>Logiciel Geosoft Oasis Montaj 7.5</i> .....	53
1.	Champs de travail inclus dans Oasis Montaj 7.5.....	54
2.	<i>Drillhole data</i> .....	54
3.	<i>Drillhole plot</i> .....	54
<b>QUATRIEME PARTIE : MODELISATIONS ET INTERPRETATIONS .....</b>		<b>55</b>
I.	<i>Présentation générale des résultats</i> .....	56
1.	Topographie et emplacement des points de forages .....	56
2.	Modélisation 3D des données de forages et de l'aquifère .....	57
3.	Modélisation lithologique de la Région Melaky .....	61
II.	<i>Modélisation 2D par District</i> .....	63
1.	Coupe lithologique d'Ambatomainty .....	63
2.	Coupe lithologique de Morafenobe .....	64
3.	Coupe lithologique de Besalamby .....	66
4.	Coupes lithologiques d'Antsalova.....	66
5.	Coupes lithologiques de Maintirano.....	69
III.	<i>Caractéristiques de l'eau souterraine de la Région Melaky</i> .....	72
1.	Salinité des nappes .....	75
2.	Quantité et qualité .....	75
2.1.	Quantité .....	75
2.2.	Qualité .....	75
3.	Synthèse des caractéristiques des eaux souterraines de Melaky .....	76
<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>		<b>77</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>78</b>
<b>WEBOGRAPHIE.....</b>		<b>80</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>81</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>		<b>99</b>



**Auteur du Mémoire :** ANDRIAMANANTENA AinaNdrianjara

**Contact :** [njara1989@gmail.com](mailto:njara1989@gmail.com)

**Titre :** Modélisation hydrogéologique de la Région Melaky

**Nombre de pages :** 112

**Nombre de figures :** 54

**Nombre de tableaux :** 6

## **RESUME**

Une partie des données de forage d'eau du projet 1250 forages de P.A.E.A.R financé par la Banque Africaine de Développement dans la Région Melakya été utilisée afin de modéliser en 2D et 3D le sous-sol de ladite Région et dans le contexte d'améliorer la connaissance hydrogéologique de la zone. Cette étude montre l'existence d'au moins deux types de nappe d'eau : nappe d'eau superficielle et nappe d'eau peu profonde, et elles ont des caractères d'eau douce à saumâtre et parfois salée. La modélisation de l'aquifère peut être classifiée en six natures géologiques de nappe dans le sous-sol de Melaky.

**Mots clés :** Modélisation, nappe aquifère, forage d'eau, Melaky, hydrogéologie, Oasis Montaj 7.5.

## **ABSTRACT**

Part of the water drilling data related to the project 1250 drilling of P.A.E.A.R funded by the African Development Bank in the region Melaky was used to model in 2D and 3D the basement of that region, and in the context of improving hydrogeological knowledge of the area. This study shows the existence of at least two types of water table: table surface water and shallow groundwater, and have freshwater brackish characters and sometimes salty. The modeling of the aquifer can be classified into six geological natures lap in the basement of Melaky.

**Key words:** Modeling, groundwater table, water drilling, Melaky, hydrogeology, Oasis Montaj 7.5.