



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

FACULTÉ DES SCIENCES

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mention : PROCÉDÉS ET ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER EN CHIMIE

Parcours : Génie de l'eau et Génie de l'Environnement (2GE)

Intitulé :



Présenté par : ZAMANILEHA Elando Fréda

Soutenu publiquement à la faculté des sciences de l'Université d'Antananarivo

Le 08 octobre 2019, devant la commission d'examen composé du :

Président : Monsieur RAVELONANDRO Pierre Hervé, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo

Examinateur : Monsieur RAHOBISOA Jean Jacques, Maitre de Conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo

Rapporteur : Monsieur MONG Yves Jean Michel, Maitre de Recherches et Directeur de Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE).





UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

FACULTÉ DES SCIENCES

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mention : PROCÉDÉS ET ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER EN CHIMIE

Parcours : Génie de l'eau et Génie de l'Environnement (2GE)

Intitulé :



Présenté par : ZAMANILEHA Elando Fréda

Soutenu publiquement à la faculté des sciences de l'Université d'Antananarivo

Le 08 octobre 2019, devant la commission d'examen composé du :

Président : Monsieur RAVELONANDRO Pierre Hervé, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo

Examinateur : Monsieur RAHOBISOA Jean Jacques, Maitre de Conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo

Rapporteur : Monsieur MONG Yves Jean Michel, Maitre de Recherches et Directeur de Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE)



REMERCIEMENTS

La première phrase qui me parvienne pour la réalisation de cet ouvrage ce que « Dieu soit loué ».

Le présent travail a été effectué : au Laboratoire d'Analyse et de Contrôle des Aliments et des Eaux (LACAE) du Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE) à Antananarivo.

En tout premier lieu, je tiens à remercier Monsieur MONG Yves Jean Michel, Maître de Recherches et Directeur du CNRE, mon rapporteur, qui a encadré ce travail avec une disponibilité et une immense patience. La clarté de ses idées et sa rigueur scientifique m'ont beaucoup apporté tout au long de ce parcours. Je suis profondément reconnaissant et je manifeste toute ma gratitude et mon respect envers lui.

J'exprime toute ma gratitude à tous les membres de jury de cette soutenance de mémoire. Monsieur RAVELONANDRO Pierre Hervé, Professeur Titulaire à la faculté des sciences de l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté de présider cette soutenance. Monsieur RAHOBISOA Jean Jacques, Maître de Conférences à la faculté des sciences de l'Université d'Antananarivo, qui m'ont fait l'honneur de lire et d'examiner ce document et de participer au jury.

Je remercie également les personnes qui m'ont fourni les données nécessaires pour la validation de ce travail, en particulier Monsieur le directeur de CNRE, Madame RABENIRINA Harilanto Miarantsoa qui ma dirigé pendant mon stage. Ma reconnaissance va également à tous les personnels du LACAE pour m'avoir bien accueilli et mis à ma disposition les données disponibles.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes, par leurs enseignements, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques, ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Tous mes respects et ma reconnaissance à ma famille : à mes très chers Parents, Frères et Sœurs qui ont toujours été là pour moi, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Enfin, mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, et ceux qui m'ont montré leur intérêt.

DEDICACES

Je dédie celle mémoire. . . .

À mes chère parents, source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Vous avez été et vous seriez toujours un exemple pour moi par vos qualités humaines et vos valeurs nobles. En ce jour, j'espère réaliser l'un de vos rêves. Aucun mot ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon amour profond. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais pas exprimer ma grande affection ; votre prière m'a été d'une très grande aide tout au long de ma vie. Puisse Dieu vous préservez et vous procurez de santé et de bonheur.

À tous mes chers frères et sœurs, aucune dédicace ne saurait exprimer ma reconnaissance pour votre support, vos conseils et vos patience.

À ma petite amie, Quetly, Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon respect et mon amour.

Enfin, À tous mes chers amis,

À tous les membres de ma promotion,

À tous les enseignants qui m'ont accompagnée le long de mes années d'étude.

ZAMANIEHA Elango Fréda

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
DEDICACES	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES PHOTOS	viii
LISTES DES TABLEAUX	ix
ABREVIATIONS	xi
LISTE DES UNITES	xii
GLOSSAIRE	xiii
INTRODUCTION	1
PARTIE I- SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES	
I.1. Généralités	3
I.1.1. Répartition de l'eau sur la Terre	3
I.1.2. Cycle de l'eau	3
I.1.3. Principales sources de polluant dans les eaux souterraines	4
I.1.4. Formes de l'eau dans le sol	4
I.1.5. Piézométrie	5
I.1.5.1. Puits d'observation	5
I.1.5.2. Piézomètre	5
I.1.5.3. Niveau piézométrique	5
I.1.6. Captage par puits	6
I.1.6.1. Types de puits	6
I.1.6.2. Aménagement d'un puits	7
I.1.7. Propriétés des composés azotés dans l'eau	7
I.1.8. Cycle de l'azote	7
I.1.9. Processus de base du cycle d'azote	8
I.1.9.1. Fixation de l'azote	8
I.1.9.2. Nitrification	9
I.1.9.3. Dénitrification	9
I.2. Contexte du projet	10
I.3. Caractéristiques des eaux souterraines	11
I.3.1. Concept d'écoulement souterrain	11
I.3.2. Ecoulement vers un puits	11
I.3.2.1. Essai de pompage	11
I.3.2.2. Objectif des essais de pompages	11
I.3.2.3. Principe de base	11
I.3.2.4. Mécanisme de rabattement	11
I.3.3. Modèles d'écoulement et de transport	13
I.3.4. Modèle d'écoulement souterrain	13
I.3.5. Aperçu sur les différentes méthodes numériques	14
I.4. MODFLOW (Three-Dimensional Ground-Water Flow model)	14
I.5. Méthodes pour l'estimation de la vulnérabilité	15

I.5.1.	Contexte général	15
I.5.2.	Risques pour les ressources en eau.....	15
PARTIE II - MATERIELS ET METHODES		
II.1.	Présentation de la zone d'étude.....	17
II.1.1.	Localisation géographique.....	17
II.1.2.	Population et situation démographique	18
II.1.3.	Activités socio-économiques.....	18
II.1.4.	Végétation	19
II.1.5.	Climatologie	19
II.1.6.	Pédologie	21
II.1.7.	Géologie	21
II.1.8.	Relief	22
II.1.9.	Hydrogéologie	22
II.1.10.	Aspects sanitaire	23
II.1.11.	Cadre d'allimentation	23
II.2.	Géomorphologie de la zone d'étude	24
II.2.1.	Répartition de la zone	24
II.2.2.	Cactéristique morphologique d'un bassin versant.....	24
II.2.3.	Réseau hydrographique	26
II.2.4.	Bilan hydrologique selon Thornthwaite.	26
II.3.	Travaux de terrain	27
II.4.	Enquêté sur l'évaluation du risque de contamination	27
II.5.	Points des prélèvements	27
II.6.	Analyse physico-chimique des échantillons	29
II.6.1.	pH.....	29
II.6.2.	Mésure de la couleur de l'échantillon	29
II.6.3.	Mesure de la turbidité.....	30
II.6.4.	Salinité et conductivité	30
II.6.5.	Dosage de nitrate	31
II.6.6.	Dosage de nitrite.....	32
II.6.7.	Dosage d'ammonium	32
II.7.	Modélisation numérique	32
II.7.1.	Présentation du MODFLOW.....	33
II.7.2.	Modèles mathématiques d'écoulement et de transports de polluant dans une nappe phréatique à ce modèle conceptuel.....	34
II.7.2.1.	Caractéristique d'un milieu poreux	34
II.7.2.2.	Perméabilité.....	34
II.7.2.3.	Loi de Darcy	35
II.7.2.4.	Equation de base de la conductance hydraulique	35
II.7.2.5.	Dérivation de l'équation différence-finie.....	37
II.8.	Etude de la vulnérabilité par la méthode de SINTACS	37
II.8.1.	Présentation de la méthode SINTACS	37

II.8.2.	Spécificité de la méthode SINTACS	38
II.8.3.	Cote attribuée à chaque paramètre de la méthode SINTACS.....	38
II.8.4.	Système de cotation.....	40
II.8.5.	Mode d'interprétation de l'indice.....	40
PARTIE III - RESULTATS, INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS		
III.1.	Résultats de l' enquête d'évaluation du risque de contamination	41
III.2.	Résultats sur les analyses physico-chimiques	41
III.2.1.	pH de l'échantillon analysé	41
III.2.2.	Couleur	42
III.2.3.	Turbidité	43
III.2.4.	Salinité et conductivité	43
III.2.5.	Nitrate.....	44
III.2.6.	Nitrite.....	45
III.2.7.	Ammonium.....	46
III.3.	Simulation numérique	47
III.3.1.	Simulation d'un écoulement souterrain dans un aquifère à nappe libre	47
III.3.2.	Simulation de transport des polluants dans un aquifère à nappe libre à partir de MODFLOW ...	50
III.4.	Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques de la méthode SINTACS	53
III.4.1.	Paramètre profondeur de la nappe « S ».....	54
III.4.2.	Paramètre d'infiltration « I »	55
III.4.3.	Paramètre de zone non saturée « N »	56
III.4.4.	Paramètre texture du sol « T ».....	57
III.4.5.	Paramètre de type d'aquifère « A ».....	58
III.4.6.	Paramètre conductivité hydraulique « C »	59
III.4.7.	Paramètre topographie « S ».....	60
III.4.8.	Calcul de l'indice SINTACS général	61
CONCLUSION GENERALE.....		64
RECOMMANDATION.....		65
REFERENCES		66
ANNEXES		
Annexe 1-	Mode opératoire	I
Annexe 2-	Mode de calcul de la conductivité hydraulique	V
Annexe 3-	Résultats des calculs et des analyses et des simulations.....	VI
Annexe 4-	Enquêtes au moment du prélèvement (évaluation du risque de contamination)	IX
Annexe 5-	Calcul de l'indice SINTACS général	XI
Annexe 6-	Répartition des nitrate et ammonium dans le zone d'étude	XIII
Annexe 7-	Tableau recapitatif de l'aspects sanitaire du Commune Urbaine de Mananara-Nord	XV
Annexe 8-	Emplacement des prélèvements et photos des puits sources de prélèvement	XVI
Annexe 9-	Situations géographique et géologique de la zone.....	XXII

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cycle d'eau et circulation de l'eau dans l'aquifère [W2].....	4
Figure 2: Formes de l'eau dans le sol [W3].....	5
Figure 3: Cycle de l'azote [W6].	8
Figure 4: Représentation schématiques des processus influençant les comportements et le devenir des polluants dans les sols (Adel et al., 2018).....	16
Figure 5: Carte de localisation de la commune urbaine de Mananara-Nord	17
Figure 6: Courbe de la température mensuelle de Mananara-Nord année 2018.	20
Figure 7: Histogramme de la précipitation mensuelle de Mananara-Nord année 2018	21
Figure 8: Carte de la commune du Mananara-Nord et sa Zone d'étude.	28
Figure 9: Présentation du cession d'ouvert du logiciel visual MODFLOW Flex 2015.1.....	33
Figure 10: Interface du visual MODFLOW Flex 2015.1	34
Figure 11: Prisme en matériau poreux illustrant la loi de Darcy (McDonald et Harbaugh, 1988).....	35
Figure 12: Calcul de la conductance à travers plusieurs prismes en série. (McDonald et Harbaugh, 1988). ..	36
Figure 13: Diagramme d'évaluation du risque de contamination.	41
Figure 14: Valeurs du pH des échantillons de chaque point de prélèvement.....	42
Figure 15: Valeurs des couleurs des échantillons analysés.	42
Figure 16: Résultats de la mesure de la turbidité des échantillons.....	43
Figure 17: Valeurs des salinités et des conductivités des échantillons d'eau souterraine analysés.	44
Figure 18: Résultats sur les valeurs de la teneur en nitrate des échantillons.	45
Figure 19 : Représentation de la teneur des ions nitrites en mg.l ⁻¹ des échantillons analysés.....	46
Figure 20 : Représentation de la teneur des ions ammonium des échantillons analysés.....	46
Figure 21: Niveau piézométrique numérique de la nappe.....	48
Figure 22: Niveau piézométrique analytique de la nappe.	48
Figure 23: Niveaux piézométriques le long de la nappe obtenus par les méthodes analytique et numérique..	49
Figure 24: Représentation en D de la vitesse d'écoulement de la nappe libre.	49
Figure 25: Représentation en 1D de la vitesse d'écoulement de la nappe libre.	50
Figure 26 : Carte topographie de la distribution de la teneur en ammonium vue en 2D.....	51
Figure 27 : Carte de la distribution de la concentration en ammonium vue en 3D.	52
Figure 28 : Carte topographie de la distribution de la teneur en Nitrate vue en 2D	52
Figure 29: Carte de la distribution de la concentration en Nitrate vue en 3D.	53
Figure 30: Carte du paramètre « profondeur du nappe (S) ».....	54
Figure 31: Carte du paramètre d'infiltration « I ».	55
Figure 32: Carte du paramètre « impact de la zone non saturée (N) ».....	56
Figure 33: Carte du paramètre « texture de sol (T) ».	57
Figure 34: Carte du paramètre « type d'aquifères (A) ».....	58

Figure 35: Carte du paramètre « conductivité hydraulique (C) ».....	59
Figure 36: Carte du paramètre « topographie (S) ».....	60
Figure 37: Carte de vulnérabilité à la pollution de la commune urbaine de Mananara-Nord.	61
Figure 38: Fonctionnement de réfractomètre.	III
Figure 39: Carte végétation de Mananara-Nord.....	XXIII
Figure 40: Carte pédologie de Mananara-Nord.....	XXIV
Figure 41: Carte géologie de la commune urbaine de Mananara-Nord.....	XXV
Figure 42: Carte hydrographie de Mananara-Nord.	XXVI

LISTE DES PHOTOS

Photos 1: pH-mètre de marque Eutech Instrument, EcoScan pH 5.....	29
Photos 2: Photomètre portable Palintest 7000 SE.....	30
Photos 3: Turbidimètre portable HANNA, HI 93703.	30
Photos 4: Réfractomètre portable.....	31
Photos 5: Expérience de dosage de nitrate.	31
Photos 6: Spectrophotomètre UV Beckman.....	31
Photos 7: Expérience du dosage de nitrite.....	32
Photos 8: Spectroquant NOVA 60	32
Photos 9 : Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Ambitsika.	XVI
Photos 10: Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Antanankoro.	XVII
Photos 11 : Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany de Mananara centre.....	XVII
Photos 12: Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Antanambao.....	XVIII
Photos 13: Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Androkaroka.....	XVIII
Photos 14: Localisation des points de prélèvement des échantillonnages à Mananara.....	XIX
Photos 15: Préservation des échantillons récoltés dans les bouteilles plastiques.....	XIX
Photos 16: Mode de codage des échantillons.....	XIX
Photos 17: Conservation des échantillons dans une glacière.	XIX
Photos 18: Localisation de la commune du Mananara-Nord par rapport au capitale Antananarivo.	XXII

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre (Peter et Meena, 2010).....	3
Tableau 2: Propriété des composés azotés dans l'eau.....	7
Tableau 3: Ventilation de ménage et population par sexe et Fokontany de Mananara-Nord	18
Tableau 4: Situation mensuelle de la température et de la précipitation de Mananara-Nord de l'année 2018.	20
Tableau 5: Périmètre et superficie du sous bassin versant.....	24
Tableau 6: Indice de compacité de ces deux bassins.....	25
Tableau 7: Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius et largeur du rectangle équivalent.	25
Tableau 8: Densité de drainage de chaque bassin.....	26
Tableau 9: Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode.	38
Tableau 10: Paramètres des profondeurs de nappe « S».....	39
Tableau 11: Paramètre de l'infiltration «I».....	39
Tableau 12: Paramètre de zone saturée «N»	39
Tableau 13 : Paramètre de la texture de sol «T».....	39
Tableau 14: Paramètre de type d'aquifère «A».....	39
Tableau 15: Paramètre de la conductivité hydrique «C»	39
Tableau 16: Paramètre de topographie du sol « S ».....	39
Tableau 17: Catégories de vulnérabilité.....	40
Tableau 18: Indice partiel du paramètre « S ».	54
Tableau 19: Indice partiel du paramètre « I ».	55
Tableau 20: Indice partiel du paramètre « N ».....	56
Tableau 21: Indice partiel de paramètre « T ».	57
Tableau 22: Indice partiel du paramètre « A ».....	58
Tableau 23: Indice partiel du paramètre « C ».....	59
Tableau 24: Indice partiel du paramètre « S ».	60
Tableau 25: Réactifs et produits auxiliaires (ammonium).	II
Tableau 26: Domaine de mesure et nombre de dosages.....	II
Tableau 27: Description du mode opératoire du dosage d'ammonium.	II
Tableau 28: Résultats des paramètres physiques.	VI
Tableau 29: Résultats des paramètres chimiques.....	VI
Tableau 30: Valeurs des paramètres pour chaque classe de conformité physico-chimique des eaux.....	VII
Tableau 31 : Résultats des calculs sur les simulations d'un écoulement souterrain de la nappe libre.	VII
Tableau 32: Calcule du bilan hydrologique de Mananara-Nord, année 2018.....	VIII
Tableau 33: Récapitulative des réponses lors de l'enquête.....	X

Tableau 34 : Résultats de calcul de l'indice générale par la méthode SINTACS	XI
Tableau 35: Distribution de nitrate et d'ammonium dans la commune urbaine de Mananara-Nord	XIII
Tableau 36: Consultation externe du CSBII Mananara-Nord du 01/2017 à 12/2017 (CSBII et CHRD2, 2017).	XV
Tableau 37: Consultations Externes de Réf, MEDECINE (Liste des pathologies) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2017 à 12/2017 (CSBII et CHRD2, 2017).	XV
Tableau 38: Hospitalisation Médecine (Morbidité et mortalité) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2017 à 12/2017 (CSBII et CHRD2, 2017).	XV
Tableau 39: Consultation externe du CSBII Mananara-Nord du 01/2018 à 12/2018 (CSBII et CHRD2, 2018).	XV
Tableau 40: Consultations Externes de Réf, MEDECINE (Liste des pathologies) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2018 à 12/2018 (CSBII et CHRD2, 2018).	XVI
Tableau 41: Hospitalisation Médecine (Morbidité et mortalité) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2018 à 12/2018 (CSBII et CHRD2, 2018).	XVI
Tableau 42: Localisation des points de prélèvement.	XX
Tableau 43: Niveaux piézométriques de chaque zone	XX

ABREVIATIONS

1D	: 1 (une) Dimension
2D	: 2 (deux) Dimension
3D	: 3 (trois) Dimension
AE	: Alimentation d'Eau
AEP	: Adduction d'eau Potable
AEPG	: Adduction d'Eau Potable Gravitaire
CHRD2	: Centre Hospitalier de Référence du District niveau II
CNRE	: Centre National de Recherches sur l'Environnement
CRS	: Catholique Relief Service
CSBII	: Centre de Santé de BASE II
CU.Mananara	: Commune Urbaine de Mananara-Nord
EDP	: Equations aux Dérivées Partielles
EGC3S	: Entreprise Générale de Construction Sylvania-Sylverina-Sylvaincia
ISO	: International Organization for Standardization
LACAE	: Laboratoire d'Analyse et de Contrôle des Aliments et des Eaux
LMD	: Limite de Detection
MLG	: Malagasy
MOS	: Matières Organiques des Sols
MT3DMS	: Modular Transport, 3-Dimensional, Multi-Species model
NB	: Noté bien
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
pH	: potentiel d'Hydrogène
SESAM	: Suivi-Evaluation de l'eau et Suivi de l'assainissement de Madagascar
SIG	: Système d'Information Géographique
T°	: Température
VMA	: Valeurs Maximales Admissibles
WHO	: World Health Organization

LISTE DES UNITES

%	: pourcentage
°C	: degré Celsius
ha	: hectares
hab.km ⁻²	: habitant par kilomètre carré
km	: kilomètre
km.h ⁻¹	: kilomètre par heure
km ²	: kilomètre carré
kN.m ⁻³	: kilonewton par mètre cube
kN.s.m ⁻²	: kilonewton second par mètre carré
l/sec/m	: litre par second et par mètre
m	: mètre
m.s ⁻¹	: mètre par second
m ⁻¹	: par mètre
m ²	: mètre carré
m ² .s ⁻¹	: mètre carré par second
m ³	: mètre cube
m ³ .s ⁻¹	: mètre cube par second
meq/100 g	: milliéquivalent par 100 grammes
mg.l ⁻¹ ou mg/l	: milligramme par litre
mg.l ⁻¹ Pt-Co	: milligramme par litre de platine-cobalt
mn	: minute
mol.l ⁻¹ ou mol/l	: mole par litre
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
ppm	: partie par million
s	: second
s ⁻¹	: par second
t/ans	: tonne par ans

GLOSSAIRE

Commune : collectivité décentralisée de base au même titre que la région. C'est une collectivité locale de droit public dotée de la personnalité morale et d'autonomie financière et administrative. Ses organes, le maire et les conseillers sont élus au suffrage universel direct et administrent librement la commune. (Loi n°94-007 du 26 avril 1995)

Cycle de l'eau : écoulement d'eau sous forme de circuit fermé avec changement d'état, entre les réservoirs de l'hydrosphère ou l'océan, l'atmosphère, la surface et le sous-sol des terres émergées. Le cycle de l'eau met en jeu les phénomènes d'évaporation, de convection, de condensation, de précipitation, d'écoulement et d'infiltration, ainsi que les variations et renouvellements des stocks dans ces réservoirs.

Nappe souterraine : masse d'eau contenue dans les interstices ou fissures du sous-sol. On distingue deux types de nappes : libres ou phréatiques et captives.

Nappe libre : nappe qui communique directement avec la surface. Sa recharge provient directement de l'infiltration verticale à partir de la surface du sol.

Nappe captive : nappe emprisonnée sous pression entre deux couches imperméables. Sa recharge s'effectue latéralement dans des espaces où la nappe devient libre ou au contact de matériaux semi-perméables. Le niveau des nappes peut varier en fonction des infiltrations et des prélèvements d'eau.

Aquifères : formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau et constituée de roches perméables et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation.

Eau de surface : ensemble des eaux provenant de la pluie, neige mais également toutes les eaux provenant de rivières, lacs et océans.

Eaux souterraines : eaux contenues dans les nappes phréatiques et aquifères souterrains. Le plus souvent elles sont stockées dans les pores des sédiments ou des roches. Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches, humidifient les couches profondes, jusqu'à ce qu'elles rencontrent une couche imperméable où elles s'accumulent, remplissent le moindre vide, saturent l'humidité du sous-sol et forment ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère. La nappe chemine le sous-sol sur la couche imperméable en suivant les pentes parfois pendant des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre pour alimenter une source ou un cours d'eau.

Eau de mer et océans : les mers et les océans sont des énormes réservoirs d'eau. Ils représentent près de 97,4% du volume d'eau existant actuellement sur Terre. L'eau de mer présente une concentration élevée de sels dissous. Sa salinité varie à la surface du globe terrestre, en fonction de la latitude, de l'ouverture de la mer vers l'océan, de son étendue, des apports terrestres.

Eau météorique : terme hydrologique utilisé pour définir un type d'eau existant dans le sol depuis longtemps (à l'échelle géologique), et qui provient des précipitations pluviales.

Pollution de l'eau : toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants qui la consomme. Quand les êtres humains consomment de l'eau polluée, il y a en général des conséquences sérieuses pour leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau impropre à l'usage désiré.

Echantillonnage : action qui consiste à prélever une partie considérée comme représentative d'un milieu en vue de l'examen de diverses caractéristiques définies.

ArcGIS : suite des logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute, Inc.). Ce système est composé de différentes plateformes qui permettent aux utilisateurs SIG, qu'ils soient bureautiques, web, ou mobiles, de collaborer et de partager l'information géographique.

EGC3S (Entreprise Générale de Construction Sylvania-Sylverina-Sylvaincia) : entreprise créée en 2011 constituée par l'initiative des villageois et techniciens qui ont travaillé dans le cadre de la santé, de la nutrition, de l'eau et de l'assainissement à Madagascar. Sa création est le fruit d'un long processus débuté en 2011 dont le but est d'améliorer durablement la situation sanitaire de la population grâce à l'accès à la nourriture saine, à l'eau potable et à l'assainissement, ainsi que de renforcer les capacités locales de la gestion communautaire dans la zone d'intervention. Parallèlement, l'EGC3S suit et accompagne des villageois alimentés en eau potable depuis 2010, afin de renforcer progressivement leurs capacités de gestion et leur autonomie jusqu'à la renforcement complète de leurs installations à Mananara-Nord depuis 2012.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'eau est la substance la plus abondante sur la planète Terre. Elle constitue le principal composant des matières et des êtres vivants. C'est pour cette raison qu'on dit souvent que l'eau est la vie. Depuis le commencement, la vie humaine a été liée à l'eau. Toutefois, sa disponibilité varie dans l'espace et dans le temps. Elle est en relation étroite avec le climat et la géomorphologie du continent ou pays considéré. Aujourd'hui, plus de 800 millions des personnes dans le monde n'ont pas d'accès à l'eau potable ou de qualité suffisante pour leur subsistance et pour les services sanitaires. A cet égard la prévention contre la pollution des nappes constitue une question importante à laquelle les scientifiques consentent plus d'effort.

A Mananara-Nord, les eaux souterraines sont considérées comme sources d'eau potable de la population, donc elles sont désormais reconnues comme une ressource économique et un patrimoine écologique qu'il importe de gérer et de préserver. Ceci est d'autant plus important dans les pays tropicaux comme Madagascar qui soutire ses besoins en eaux.

L'azote est un élément essentiel pour la croissance des plantes. Dans la plupart des cas, les plantes satisfont leurs besoins en azote en absorbant l'ammonium ou le nitrate de l'eau et du sol (Mackerness et Keevil, 1996).

La contamination de l'eau de surface et de l'eau souterraine peu profonde par l'azote est un problème typique pour l'urbanisation, l'agriculture dans les régions et partout dans le monde. Cette contamination est mise en évidence dans plusieurs pays sans souci du niveau de développement économique comme Madagascar. La spécification de l'azote dans l'eau souterraine et la vulnérabilité de ce type d'eau à la contamination par l'azote sont déterminés par des facteurs tel que l'activité bactérienne, les matières organiques du sol (MOS) et les caractéristiques physico-chimiques du sol, les compositions minérales, les activités agricoles intenses avec l'application d'engrais, la densité de la population dense, l'augmentation du taux de l'urbanisation, l'écoulement et l'irrigation (Soldatova et al., 2017).

En effet, les problèmes relatifs à la pollution d'azote des eaux souterraines constituent actuellement une source de crainte qui demande une rente mondiale. Ces eaux sont menacées par certaines sources de pollution provenant des activités anthropiques et agricoles, des décharges publiques incontrôlées, des systèmes d'assainissement non contrôlés, des eaux usées domestiques et industrielles. La pollution générée par ces activités atteint des niveaux critiques et présente un danger grave pour la santé publique (Adel et al., 2018).

En plus, la préservation de l'eau est une boucle de l'écosystème, qui assure également une fonction écologique non négligeable. La contamination de la nappe souterraine par les composés azotés est l'une des sources de la pollution de l'eau souterraine, mais on ne peut pas s'en tenir uniquement à une appréciation quantitative des ressources en eau pour juger le cas du projet. Conjointement à l'étude de la disponibilité de l'eau, il est impératif d'intégrer à l'analyse les dimensions environnementales de l'enjeu. Le but est de préserver au mieux l'environnement.

Ce projet a pour objectif de faire : des modèles numériques et analytiques simulant la migration des composés azotés à travers la zone non-saturée et aux approches couramment utilisées pour évaluer la vulnérabilité et le risque de pollution des ressources en eaux souterraines des aquifères de la Commune urbaine de Mananara-Nord. Elle aborde les avantages et les inconvénients des différentes techniques.

Le sujet ultérieur est principalement l'objet du présent mémoire intitulé : « MODÉLISATION DE L'ACCUMULATION DES COMPOSÉS AZOTÉS DANS LES EAUX SOUTERRAINES DE LA COMMUNE URBAINE DE MANANARA-NORD ». Ce travail est développé en trois parties qui sont structurés comme suit :

- La première partie concerne la synthèse bibliographique.
- Les matériels et méthodes font l'objet de la deuxième partie où nous explicitons les milieux environnants du site, les analyses physico-chimiques, les détails du modèle conceptuel utilisé et l'estimation de l'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode de SINTACS.
- Les résultats, les interprétations et les discussions constituent la troisième partie de ce travail.

PARTIE I- SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

I.1. Généralités

I.1.1. Répartition de l'eau sur la Terre

La Terre porte le nom de planète bleu grâce à la quantité de l'eau qui est considérée comme étant la substance majoritaire à la surface de la Terre. En effet, 70% de la surface terrestre est représenté par l'eau qui est estimée à 1,4 milliards de km³, dont 2,53 % soit 35 millions de km³ sont constitués d'eau douce. Cette eau douce est insuffisante pour les besoins des êtres vivants et surtout ceux de l'Homme. Lorsqu'elle est contaminée, l'eau ne peut plus remplir ses différents rôles écologiques. La majeure partie de l'eau de la planète est salée (mers et océans) [W1].

Tableau 1 : Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre (Peter et Meena, 2010).

	Volume (10 ³ km ³)	Pourcentage de l'eau totale (%)	Pourcentage de l'eau douce (%)
Eau totale	1,386 millions	100	-
Eau douce totale	35 000	2,53	100
Océans mondiaux	1,340 millions	96,47	-
Eau salée souterraine	13 000	1	-
Eau douce souterraine	10 500	0,76	30
Glaciers antarctiques	21 600	1,56	61,7
Glaciers du Groenland	2 340	0,17	6,7
Îles arctiques	84	0,006	0,24
Glaciers montagneux	40,6	0,003	0,12
Pergélisol et glace souterraine	300	0,022	0,86
Lacs salins	85,4	0,006	-
Lacs d'eau douce	91	0,007	0,26
Humidité du sol	16,5	0,0012	0,047
Tourbières	11,5	0,0008	0,03
Rivières (flux moyen)	2,12	0,0002	0,006
Dans la matière biologique	1,12	0,0001	0,0003
Dans l'atmosphère (en moyenne)	12,9	0,0001	0,04

I.1.2. Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, mu par l'énergie solaire, joue un rôle de la redistribuer à la surface de la Terre. L'eau de pluie circule dans les pores et les fissures des roches ; on parle alors de roches réservoirs ou d'aquifères. L'analyse du cycle de l'eau souligne le poids de l'évaporation des surfaces sur les pluies et les poids de la disponibilité en eau de surface sur l'évaporation. (Perrier et Tuzet, 2005).

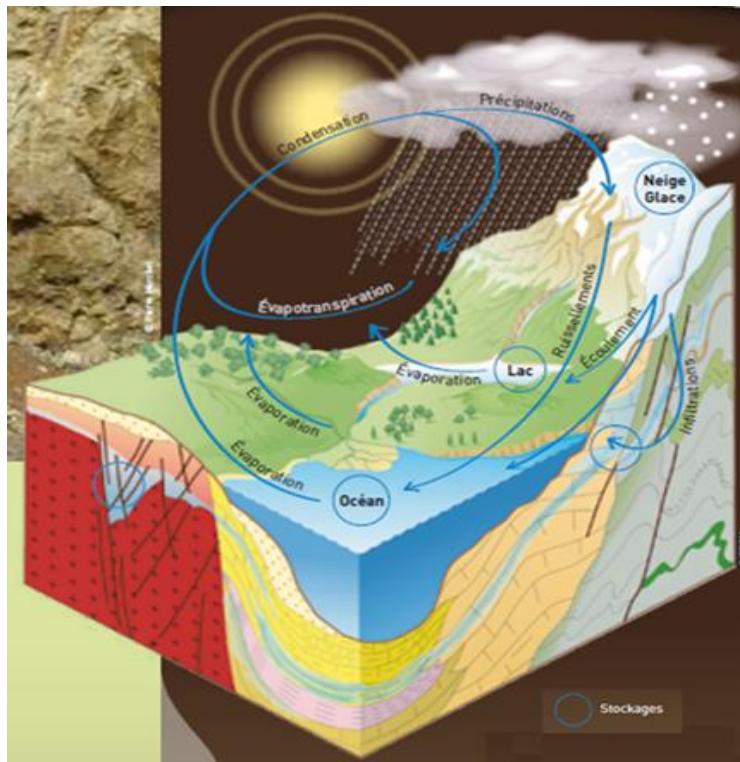


Figure 1: Cycle d'eau et circulation de l'eau dans l'aquifère [W2].

I.1.3. Principales sources de polluant dans les eaux souterraines

La pollution des eaux souterraines peut provenir de sources ponctuelles et de sources non ponctuelles. Les sources ponctuelles peuvent être bien identifiées dans l'espace, par exemple, les décharges, les réservoirs de stockage souterrains ou les systèmes septiques. Tandis que les sources non ponctuelles sont dispersées sur de grandes surfaces. Dans le premier cas, des panaches de polluants bien définis suivant le gradient hydraulique des aquifères sont formés, alors que dans le second cas, les polluants se répandent largement dans le sous-sol. Ce dernier est plus difficile à identifier, mesurer et contrôler que le premier. Certaines de ces sources de polluants sont situées au-dessus de la surface du sol et d'autres sont dans le sous-sol. Cet aspect affectera le transfert des polluants vers la zone saturée (Postigo et al., 2018).

I.1.4. Formes de l'eau dans le sol

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol. Ces états se distinguent essentiellement par l'intensité des forces qui lient l'eau et les grains du sol. On distingue classiquement :

- L'**eau de constitution** qui entre dans la composition chimique/minéralogique de certains minéraux (essentiellement les argiles) ;

- L'**eau liée** à la surface des grains, qui est solidaire des grains ;
- L'**eau capillaire** qui est retenue par les pores les plus fins du sol au-dessus du niveau de la nappe : la zone de remontée capillaire peut être complètement ou partiellement saturée ;
- L'**eau libre** qui peut circuler dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur : le volume occupé par cette eau définit la notion de porosité efficace qui est plus petite que la porosité géométrique.

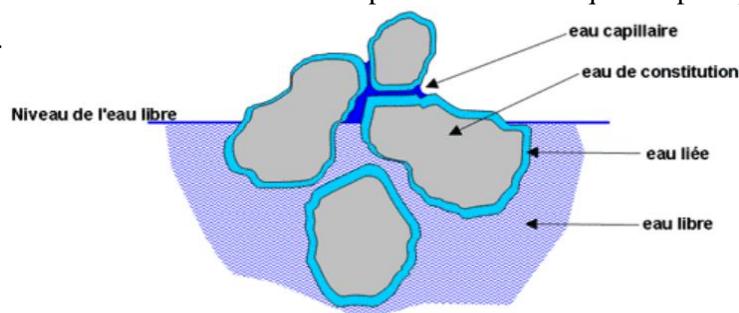


Figure 2: Formes de l'eau dans le sol [W3].

I.1.5. Piézométrie

I.1.5.1. Puits d'observation

Un puits d'observation est un ouvrage qui permet l'échantillonnage de l'eau souterraine pour pouvoir déterminer la qualité physico-chimique ou microbiologique. Les caractéristiques d'aménagement du puits d'observation comme l'emplacement, la profondeur, la portion crépinée, et autres sont déterminantes pour assurer la représentativité de l'échantillon d'eau souterraine (MDDEPQ, 2011).

I.1.5.2. Piézomètre

Un piézomètre est un dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un aquifère ; elle indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau libre ou d'une pression (Castany et Margat, 1977). Il s'agit, d'un sondage équipé d'un tubage, généralement à faible diamètre, permettant essentiellement des mesures du niveau de l'eau. Par extension, le piézomètre désigne tout forage destiné à effectuer des mesures et des prélèvements sur la nappe (BRGM, 1994).

I.1.5.3. Niveau piézométrique

Quand un forage atteint une nappe, l'eau pénètre dans le tube et se stabilise à un niveau qu'on appelle niveau piézométrique, qui coïncide au niveau de l'eau dans l'aquifère environnant.

I.1.6. Captage par puits

Un puits est un ouvrage de captage qui pénètre verticalement dans la nappe. Il offre généralement un diamètre (de 1 à 6 m) et une profondeur limitée à quelques mètres ou quelques dizaines de mètres, mais certains peuvent atteindre une centaine de mètres en terrain rocheux.

I.1.6.1. Types de puits

On distingue trois principaux types de puits : le puits ordinaire, le puits foncé et le puits foré.

- **Puits ordinaire** : est un puits creusé manuellement à l'aide d'une pioche, d'une pelle et de tout autre matériel d'excavation. Il peut être de forme carrée ou circulaire.
- **Puits foncé** : il existe plusieurs méthodes de fonçage de puits : fonçage par battage de tube perforé, fonçage par injection d'eau et fonçage par havage.
 - **Fonçage par battage** : c'est une méthode qui consiste à chasser dans le sol, à l'aide d'un mouton, un tube. L'extrémité inférieure un embout conique qui est fixé de ce tube. Le fonçage s'arrête à quelques mètres au-dessous de la surface libre de la nappe. Les puits foncés par battage ont en général un diamètre de 2,5 à 100 mm et ne peuvent être utilisés que dans les formations dépourvues de pierres, de roches ou d'argile compacte où la profondeur de la nappe est faible.
 - **Fonçage par injection d'eau** : cette méthode permet d'atteindre très rapidement des profondeurs considérables. Elle consiste à creuser à l'emplacement prévu pour le trou de 1,5 à 2 m de profondeur. Sur cette emplacement, on monte un trépied portant un tourillon creux ; à ceci se fixe un tubage dont l'extrémité inférieure est munie d'un couteau pénètre dans le trou. Cette méthode convient pour des sables et des alluvions et pour les puits de diamètre allant de 38 à 380 mm et de profondeurs de 50 à 100 m.
 - **Fonçage par havage** : ce procédé permet de construire dans des sols meubles, des puits de grands diamètres mais de faibles profondeurs (15 à 20 m). De ce fait, on dispose sur le sol une couronne métallique triangulaire formant une trousse circulaire coupante.
- **Puits foré** : c'est puits a un diamètre relativement réduit, il est foré à la main ou à l'aide de divers accessoires grâce auxquels on peut atteindre de grandes profondeurs et extraire de plus grandes quantités d'eau que le puits creusé à la main. Il peut donner lieu à un puits artésien.

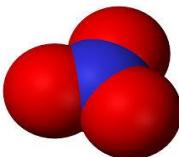
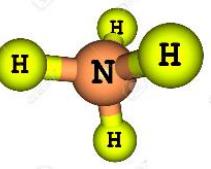
I.1.6.2. Aménagement d'un puits

Un puits aménagé comprend deux parties : le puits proprement dit qui se situe dans le sol et le captage qui s'enfonce dans le sol sous le niveau de la nappe phréatique et à travers lequel l'eau suinte pour remplir le fond. Le puits est donc une construction fixe et définitive, installée dans le sol et dont le captage, la base mobile, glisse dans l'orifice du puits et s'enfonce dans le sol au fur et à mesure que l'on creuse le fond du puits. La hauteur du puits et du captage dépend de la position de la nappe. Le puits sera donc profond, si la nappe est située en profondeur. La hauteur du captage dépend aussi de la configuration du terrain et de l'épaisseur de la nappe à exploiter pour avoir un débit suffisant.

I.1.7. Propriétés des composés azotés dans l'eau

L'azote est un élément indispensable des êtres vivants, il est les principaux composants dans les cycles biogéochimiques.

Tableau 2: Propriété des composés azotés dans l'eau.

Nom	Nitrite (NO_3^-)	Nitrate (NO_2^-)	Azote ammoniacal (ammonium NH_4^+)
Signification environnementale [W4]	L'ion nitrate est la principale forme d'azote inorganique trouvée dans les eaux naturelles. Il constitue le stade final de l'oxydation de l'azote. L'ion nitrite s'oxyde facilement en ion nitrate et, pour cette raison, se retrouve rarement en concentration importante dans les eaux naturelles. Les principales sources de nitrates sont les effluents industriels et municipaux et le lessivage des terres agricoles. Des concentrations trop élevées de nitrites-nitrates peuvent être toxiques pour la faune aquatique et provoquer une maladie infantile (méthémoglobinémie).		L'azote ammoniacal est毒ique pour la vie aquatique. Le critère de toxicité n'est pas fixe mais variable selon le pH et la température. Dans les eaux naturelles, l'azote ammoniacal provient principalement du lessivage des terres agricoles ainsi que des eaux usées d'origine municipale et industrielle.
VMA de concentration dans l'eau selon OMS [W5]	< 50 mg.l ⁻¹	< 0,1 mg.l ⁻¹	< 0,5 mg.l ⁻¹
Figure de la molécule	 Vue en 3D de la structure de l'ion nitrate	 Vue en 3D de la structure de l'ion nitrite	 Vue en 3D de la structure de l'ion ammonium

I.1.8. Cycle de l'azote

Les études sur le cycle de l'azote ont eu pour première motivation la compréhension des flux et sa participation aux structures et aux fonctions biologiques. Aujourd'hui, par des méthodes

analogues à celles qui ont été employées pour les études fondamentales, il s'agit d'examiner comment le cycle de l'azote est perturbé par l'activité humaine (Mitchell et al., 2018). Les plusiers forment d'azote inorganique sont incorporées dans les cellules vivantes et tissus. Par la suite, ils sont recyclés dans une variété de formes inorganiques qui soutiennent la productivité d'océan. Le cycle de l'azote dans l'eau souterraine est conduit à l'origine par les micro-organismes. Leur métabolisme implique une série complexe de transformation des états de l'oxydation d'azote et de produire un spectre général de dissoute et molécules du particule et composés, y compris gaz. (Karl et Michaels, 2019).

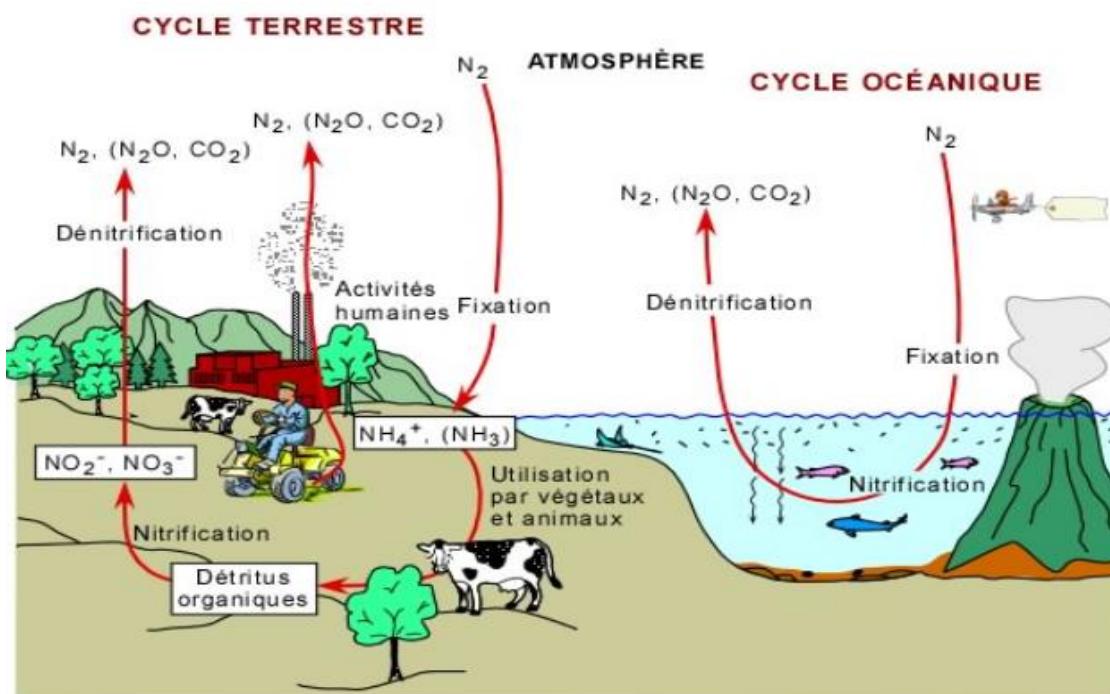


Figure 3: Cycle de l'azote [W6].

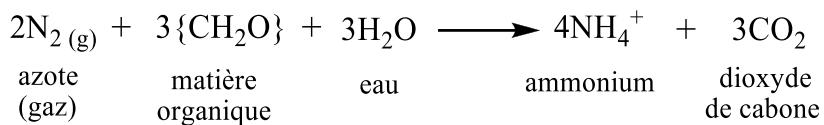
I.1.9. Processus de base du cycle d'azote

Les trois processus de base dont la fixation de l'azote diatomique N₂, la nitrification et la dénitrification sont impliqués dans le recyclage de l'azote.

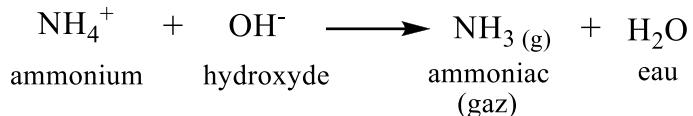
I.1.9.1. Fixation de l'azote

La fixation de l'azote correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans les sols ou dans l'eau et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique N₂ (Garcia et al., 2006).

La réaction chimique :



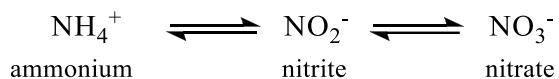
Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux :



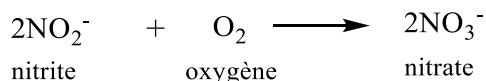
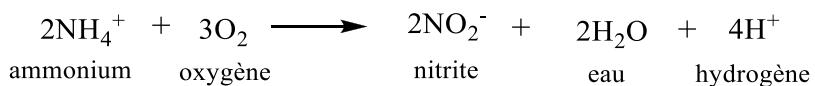
La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses). Cette fixation tend à produire des composés ammoniaqués tels que l'ammonium NH_4^+ et son acide conjugué l'ammoniac NH_3 (Hauke-Pacewiczowa et al., 1970).

I.1.9.2. Nitrification

La nitrification transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en NO_x (soient NO_2^- et NO_3^-), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymatique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau (Li et al., 2019). La réaction suivante montre les processus de nitrification :

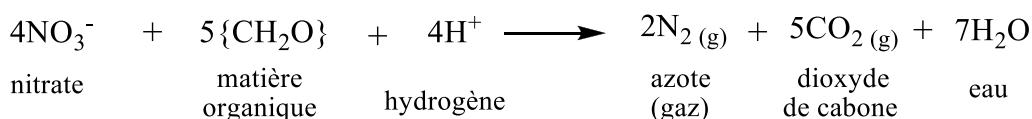


Soit:



I.1.9.3. Dénitrification

La dénitrification retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N₂, avec un produit secondaire du CO₂ et du N₂O : le gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. Il s'agit d'une réaction de réduction de NO₃⁻ par l'intermédiaire de bactéries transformant la matière organique (Cecconet et al., 2019). D'où la réaction suivante :



I.2. Contexte du projet

L'eau souterraine est importante à Mananara-Nord puisqu'elle est la source d'eau pour tout usage domestique pour la majorité des habitants de la commune. L'eau souterraine n'est pas cependant à l'abri de la pollution de surface puisqu'elle est en grande partie véhiculée par les eaux de ruissellement qui s'infiltrent à travers le sol jusqu'à la nappe phréatique ; emportant avec elles certains produits très solubles tels que les nitrites, les nitrates, les ammoniums et les azotes organiques. C'est pourquoi on retrouve souvent ces minéraux et éléments en excès du sol dans l'eau souterraine (Sebilotte, 1994). L'épandage d'engrais chimiques en trop grandes quantités figure parmi les sources potentielles de contamination diffuse qui peut affecter la qualité des eaux souterraines en milieux rural et urbain.

L'azote est un élément utilisé pour la fertilisation des terres agricoles ou autres ; on le retrouve partout dans l'écosystème planétaire même à l'état naturel. Il est l'un des éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes. La pratique courante veut que l'on ajoute de l'ammonium sous forme de lisier ou de fumier, ou de l'azote minéral (NH_4^+ ou NO_3^-) sous forme de fertilisants pour maximiser la pousse des plantes cultivées. L'excès d'azote dans le sol sera lessivé et transporté sous forme de nitrate jusqu'à la nappe phréatique, puisque que le nitrate (NO_3^-) est la forme la plus soluble de l'azote (Samuel, 2008). Les processus de transformation de l'azote et de migration des nitrates (NO_3^-) diffèrent d'un endroit à l'autre en fonction de certains paramètres comme la nature de l'aquifère, la topographie et la profondeur de la nappe. En étudiant ces paramètres, la vulnérabilité d'un aquifère à la contamination par les polluants de source diffuse peut être évaluée (Arab et Felkaoui, 2016).

Le devenir des composés azotés et des divers contaminants, lorsqu'ils passent dans la zone non-saturée, est difficile à analyser en raison de la diversité des processus biochimiques ayant lieu dans le sol. Ces processus sont pourtant d'une importance capitale dans les diverses études de caractérisation environnementale. Il est essentiel d'évaluer la migration du contaminant provenant de la surface et s'infiltrant jusqu'à la nappe d'eau souterraine (Samuel, 2008).

Ce projet a pour ambition de déterminer les polluants des composés azotés et les risques de contaminations dans les eaux souterraines de la commune urbaine de Mananara-Nord.

Mananara Nord est une commune urbaine malgache, chef-lieu du district de Mananara, située dans la partie centre-est de la région d'Agnalanjirofo.

I.3. Caractéristiques des eaux souterraines

I.3.1. Concept d'écoulement souterrain

C'est la partie cachée du cycle hydrologique, il représente la transition de l'eau dans la nappe phréatique avec une vitesse de quelques mètres par jour avant de rejoindre le cours d'eau. La plupart des eaux souterraines ont une origine météorique, c'est-à-dire proviennent des précipitations et de leurs infiltrations dans le sous-sol.

I.3.2. Ecoulement vers un puits

I.3.2.1. Essai de pompage

L'essai de pompage est prétendu à évaluer le coefficient de perméabilité global des sols, ainsi que le facteur d'emmagasinement et le rayon d'action du pompage. Dans la présence des piézomètres, on pompe à débit constant et on suit l'abaissement du niveau de la nappe dans le puits et dans les piézomètres (Bear, 1979).

Le coefficient de perméabilité mesuré dans un tel essai est une valeur dont la connaissance est nécessaire pour résoudre un certain nombre de problèmes pratiques, tel que : l'évaluation du débit drainé par une tranchée, l'évaluation du débit traversant le sol d'une digue ou d'un barrage et le dimensionnement d'un système de rabattement par puits.

I.3.2.2. Objectif des essais de pompages

Établir les caractéristiques différentes de référence de l'ouvrage ou de la nappe testée ; déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ; évaluer les conditions aux limites de l'aquifères ; rechercher les conditions optimales d'exploitation ; disposer d'outil permettant une modélisation mathématique de l'exploitation de l'ouvrage (Mohellebi et Belkacem, 2016)

I.3.2.3. Principe de base

On pompe à débit variante dans l'ouvrage (puits) et on mesure l'influence du pompage sur le niveau piézométrique dans l'ouvrage à proximité (piézomètre).

I.3.2.4. Mécanisme de rabattement

Approximation de Dupuit en 1863 qui s'est basé sur les hypothèses d'observation pour la plupart des écoulements souterrains, la pente de la surface phréatique est très faible. Dans un

écoulement régulier sans augmentation dans un plan (x,y) bidimensionnel, la surface phréatique est une ligne de courant et le débit spécifique est en direction tangente à ces lignes de courants, donné par la loi de Darcy (Bear, 1972)

Mettons en hypothèses : la nappe est illimitée ; la nappe à une ampleur aérienne infinie ; la nappe est homogène, isotrope et avec une épaisseur uniforme ; la surface piézométrique est horizontale avant le pompage ; le débit de pompage est constant ou variante ; le puits doit être complètement pénétré dans la nappe.

A l'état d'équilibre le débit d'eau est conservé (d'après la loi de Darcy) :

$$q = Ki \quad \text{avec} \quad i = \frac{\partial h}{\partial r} \quad \text{I- 1}$$

Avec, le débit Q d'un puit :

$$Q = -2\pi rhq \quad \text{I- 2}$$

En éliminant q, on a :

$$Q = -2\pi rh K \frac{\partial h}{\partial r} \quad \text{I- 3}$$

Equation de continuité en coordonnée polaire

$$\Delta h = \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad \text{I- 4}$$

Pour Nappe libre :

$$Q = -2\pi r K \frac{\partial h}{\partial r},$$

Par intégration entre r_p et R_a (h_p et H_o)

$$Q = \frac{\pi K (H_o^2 - h_p^2)}{\ln \frac{R_a}{r_p}} \quad \text{I- 5}$$

Pour Nappe captive ou artésienne

(épaisseur = e) :

$$Q = -2\pi r K e \frac{\partial h}{\partial r},$$

Par intégration entre r_p et R_a (h_p et H_o)

$$Q = \frac{2\pi K e (H_o - h_p)}{\ln \frac{R_a}{r_p}} \quad \text{I- 6}$$

On se basant sur les hypothèses de Dupuit et Forcheimer : supposons que les lignes de courants sont horizontales et parallèles à la couche imperméable ; le gradient hydraulique est égal à la pente d'eau (la pente est très faible).

Pour que $h=b-s$, il est similaire dans la forme à l'équation de Thiem, la décharge peut être exprimée en termes de rabattement par :

$$\frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{r_2}{r_1} = \left(S_1 - \frac{S_2^2}{2b} \right) - \left(S_2 - \frac{S_2^2}{2b} \right) \quad \text{I- 7}$$

I.3.3. Modèles d'écoulement et de transport

La modélisation de l'écoulement et du transport peut être réalisés à partir de modèles physiques, de modèles analogiques ou de modèles mathématiques. Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière adéquate la réalité à une échelle réduite. Les modèles analogiques utilisent les similitudes qui existent entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La méthode la plus courante est l'analogie entre le courant électrique et le flux d'eau. Le modèle mathématique est issu des lois physiques réagissant ces phénomènes. Celles-ci sont la loi de Darcy et l'équation de continuité pour l'écoulement et l'équation de convection-dispersion pour le transport de masse (Lamraoui, 2010).

Les processus de transport dans un aquifère ont lieu principalement dans la phase liquide, par le réseau poreux rempli d'eau. Un soluté est une substance chimique qui se dissout dans la phase liquide de l'eau (Musy et Souter, 1991). Quand les solutés entrent dans le sol, ils sont transportés par l'eau avec un mouvement convectif, dispersif et diffusif. L'équation de convection-dispersion pour le transport de masse s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_r \frac{\partial C}{\partial x} \quad I - \delta$$

Où : C : concentration (mol.l^{-1}) ; t : temps (s) ; D_L : dispersion hydrodynamique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) ; V_r : vitesse réelle de l'eau (m.s^{-1}) et x : distance (m).

I.3.4. Modèle d'écoulement souterrain

Un modèle d'écoulement souterrain est contrôlé par la configuration de la surface piézométrique et par la distribution de la perméabilité du milieu poreux. De plus, la surface piézométrique est une fonction de la topographie et est contrôlée par le climat. Ainsi, le modèle d'écoulement est une fonction de la topographie, du climat et de la géologie. Ces trois derniers paramètres représentent « the hydrogeologic environment ». L'identification et la caractérisation des relations entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines sont importantes. Les écoulements souterrains sont régis par la distribution des champs de perméabilité, de la porosité, du coefficient d'emmagasinement spécifique. Ces facteurs résultent de la transformation des paramètres géomorphologiques et géologiques. L'utilisation des modèles mathématiques et numériques dans la compréhension des écoulements souterrains est maintenant très courante (Ababou et Bagtzoglou, 1993).

I.3.5. Aperçu sur les différentes méthodes numériques

Aussitôt le développement d'un modèle numérique, la collection d'une méthode de discrétisation est essentielle. Il subsiste trois méthodes principales de discrétisation, les plus courant est la méthode EDP à savoir méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis (Nana et Imloul, 2018).

- **Méthode des différences finies :** est un agissement ordinaire de la prospection de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles qui permet de résoudre un système des relations affables, c'est-à-dire que les valeurs des fonctions inconnues qui sont proches les unes des autres (Ferziger et Paric, 1999).
- **Méthode des éléments finis :** est basé sur l'étude des domaines de formes complexes en deux ou trois dimensions. L'ascendance est de diviser le domaine étudié en des sous-domaines de petites dimensions appelés « éléments » (Abdallah, 2005).
- **Méthode des volumes finis :** consiste à assimiler les équations aux dérivées partielles et à définir à l'intérieur du domaine de calcul une grille de points appelés nœuds. Chaque nœud se trouve entouré par un volume élémentaire sur lequel les équations aux dérivés partiels sont intégrées (Mohamed, 2005).

I.4. MODFLOW (Three-Dimensional Ground-Water model)

Un modèle 3D d'écoulement souterrain basé sur la méthode des différences finies, est utilisé pour simuler les écoulements tridimensionnels des eaux souterraines (Batu, 2006). MODFLOW actuellement est l'un des plus utilisés en écoulements souterrains. Il permet de modéliser les écoulements dans un sol saturé par un schéma de différences finies implicite sur plusieurs couches, en spécifiant la conductivité entre chacune, ce qui produit un écoulement quasi tridimensionnel (Auterives, 2006).

La construction d'un modèle a pour but de prétendre l'aspect hydraulique des systèmes aquifères. Pour la mise au point des problèmes de différentes opérations pour l'exploitation minière et souterraine, ce problème est dû aux eaux souterraines dans la nappe et l'aquifère. En fonction des objectifs de ce travail, la modélisation hydrogéologique des systèmes aquifères dans la zone d'étude constitue un outil d'aide à la compréhension de son fonctionnement hydrologique contraint par les données existantes, un facteur dynamisant l'acquisition d'autres données bien spécifiques et un outil pour la planification et l'exploitation des données piézométriques. Pour

atteindre les objectifs de ce travail, on utilise le logiciel « Visual MODFLOW Flex 2015.1» comme outil de modélisation pour le traitement des données d'informations.

I.5. Méthodes pour l'estimation de la vulnérabilité

I.5.1. Contexte général

L'étude de vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution permet d'identifier les régions les plus susceptibles à la contamination dans un aquifère donné. Il existe différentes méthodes pour évaluer la vulnérabilité des aquifères : SINTACS (Civita, 1994), EPIK (Doerfliger et al., 1999) , DRASTIC (Aller et al., 1987), et ISIS (Civita et De Regibus, 1995). La méthode la plus utilisée est l'indice DRASTIC. Cette méthode constitue sept paramètres : la profondeur à la nappe (D pour Depth to water table), la recharge (R), la lithologie de l'aquifère (A), le type de sol (S), la pente (T pour Topography), la zone non-saturée (I pour Infiltration) et la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Pour cette étude, SINTACS est la méthode proposée.

I.5.2. Risques pour les ressources en eau

Les polluants dans les sols modifient la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Le transfert des polluants vers les ressources en eaux est indissociable de l'écoulement du fluide qui les véhicule. Ce fluide peut être l'eau d'infiltration (polluants solubles), l'eau de ruissellement (polluants solubles et polluants entraînés sous forme particulaire), ou une phase liquide non aqueuse (polluants organiques liquides immiscibles à l'eau). L'atteinte des ressources en eau souterraine dépend des facteurs précédentes (Lamraoui, 2010). Pour les polluants solubles, la migration avec les eaux d'infiltration dans la zone non saturée du profil conduit généralement à une réduction des concentrations, grâce aux réactions de dilution, de dégradation et désorption sur les constituants du sol. Lorsqu'ils atteignent la nappe, leur concentration diminue encore par dilution. Pour les produits purs non solubles (hydrocarbures, huiles, solvants chlorés...), l'atteinte de la nappe dépend des caractéristiques du produit (densité, viscosité...) et de la porosité du sol.

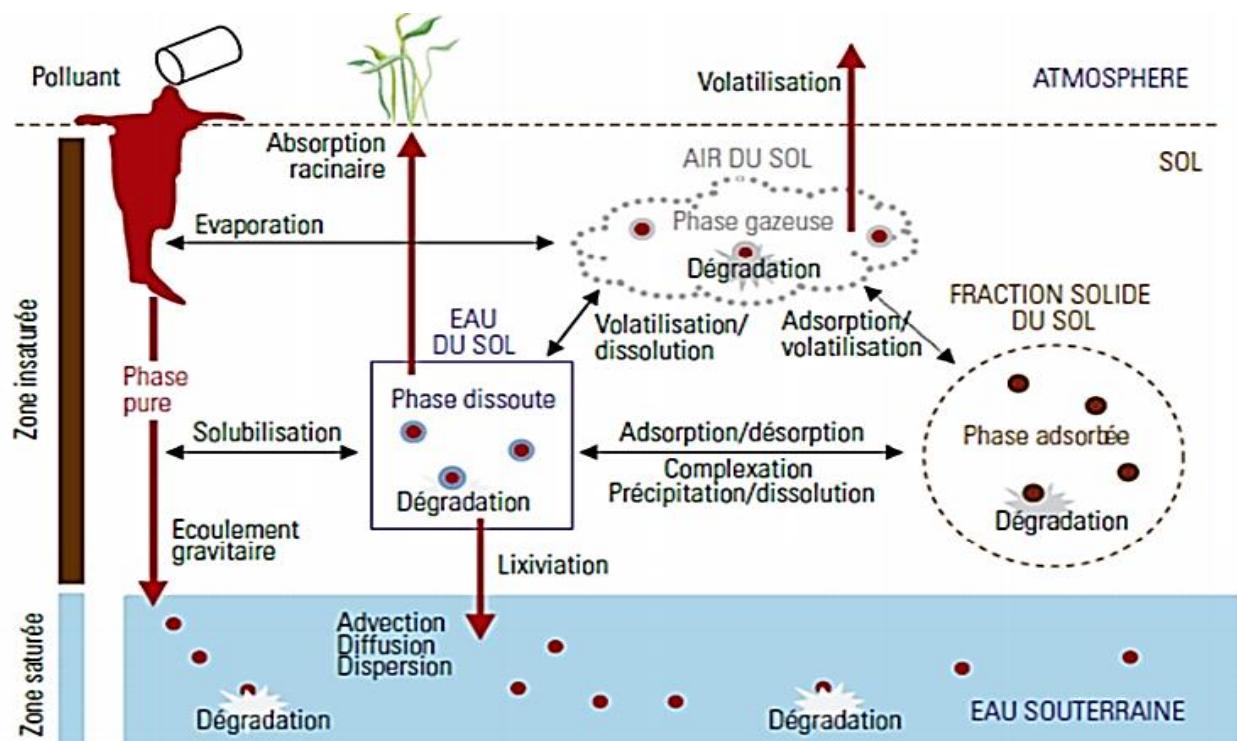


Figure 4: Représentation schématiques des processus influençant les comportements et le devenir des polluants dans les sols (Adel et al., 2018).

PARTIE II - MATERIELS ET METHODES

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Localisation géographique

L'étude a été effectué sur la côte-Est de Madagascar dans la zone de la commune urbaine Mananara-Nord, chef-lieu du district de Mananara-Nord, située dans la partie centre-Est de la région d'Agnalanjirofo, à environ 637 km de la Capitale Malagasy (Antananarivo) et à 250 km de la Capitale de la région Agnalanjirofo (Fénérive-Est). La ville est accessible par voie maritime, aérienne et par voie routière dont le 523 km est revêtu et 174 km ne l'est pas : elle n'est même accessible que par des véhicules 4x4 (CU.Mananara, 2012). Elle a une latitude $16^{\circ}10'7.29''$ Sud, et une longitude à $49^{\circ}45'56.57''$ Est.

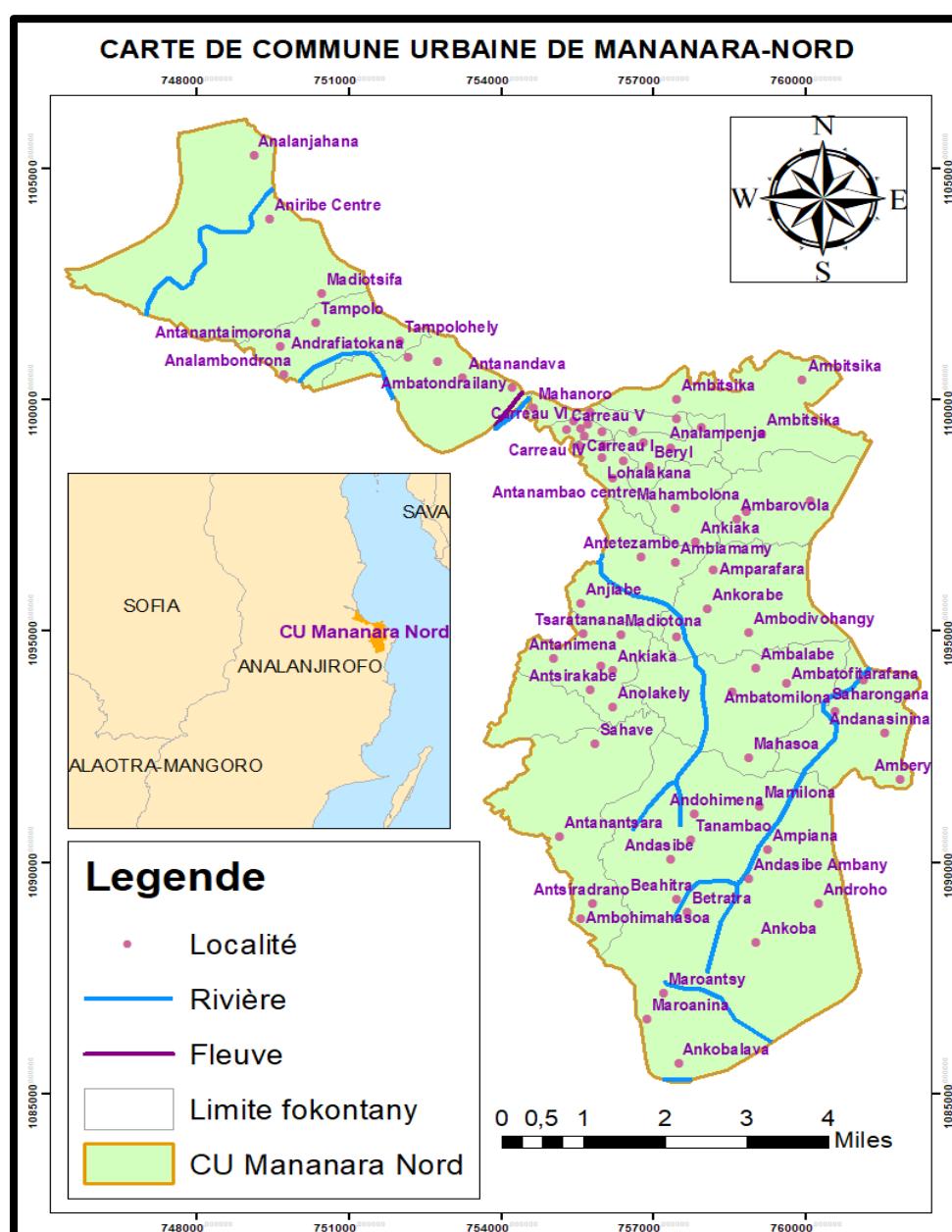


Figure 5: Carte de localisation de la commune urbaine de Mananara-Nord

II.1.2. Population et situation démographique

La commune urbaine de Mananara-Nord couvre une superficie de 10472,4 ha ou 104,724 km² environ, et compte 37 612 habitants depuis le dernier recensement de la population. La densité moyenne varie entre 93 à 141 hab.km⁻² [W8] et abrite dix-huit fokontany. Le tableau suivant montre la répartition des populations dans chaque fokontany.

Tableau 3: Ventilation de ménage et population par sexe et Fokontany de Mananara-Nord

N°	Fokontany	Ménage	Hommes	Femmes	Total
1	Ambatofitarafana	867	1228	1269	2497
2	Ambitsika	734	1228	1243	2471
3	Amboditangena	274	417	444	861
4	Ambodivoangy	401	613	678	1291
5	Andasibe	192	299	310	609
6	Androkaroka	1800	2767	3004	5771
7	Androrangavola	162	278	282	560
8	Aniribe	494	650	982	1632
9	Antanambao	3066	4287	5355	9642
10	Antanandava	134	194	200	394
11	Antanankoro	1524	2153	2348	4501
12	Antetezambe	250	462	422	884
13	Antsiratenina	178	241	242	483
14	Madiotona	273	384	415	799
15	Mahambolona	283	441	434	875
16	Mananara centre	730	1319	1368	2687
17	Sahave	346	585	588	1173
18	Tampolo	114	242	240	482
TOTAL		11822	17788	19824	37612

Sources : services techniques – Commune urbaine de Mananara Nord – Année 2019.

II.1.3. Activités socio-économiques

La région est à vocation agricole puisque 80% du revenu des ménages proviennent principalement des activités agricoles comme les cultures de rente (*cacao, café, arachide, vanille, girofle, poivre*) , les rizicultures qui sont à bas-fonds ou sur-brûlis, les cultures vivrières (*maïs, manioc, patate douce, pomme de terre*) et cultures fruitières (*letchis, canne à sucre,...*) (AHM/CRS, 2012). Parmi les différentes cultures de rente pratiquées, le fait la renommée de la région. Son appellation « Agnalanjirofo » signifie littéralement « aux forêts des girofliers ». De cette potentialité économique, elle est «la capitale malgache du girofle ».

La richesse de la ville de Mananara-Nord est l'un des poumons économiques de la région d'Agnalanjirofo en termes de production de girofle et de vanille. Héritée du temps colonial, cette spécialisation rend l'économie de Mananara dépendant des cours mondiaux des produits comme l. Le tableau suivant montre la production annuelle de quelque produits agricoles de la Commune.

II.1.4. Végétation

Le massif forestier de Mananara-Nord est un des derniers vestiges de recherche scientifique mondiale, un témoin important de la forêt tropicale humide de basse altitude de la région orientale du pays. La flore et la faune qui la composent sont en majorité endémiques ; 170 espèces arborescentes y ont été recensées sur une population totale estimée à 250 espèces sur la côte-Est (Dumetz, 1988). Après le passage des feux, la forêt primaire se modifie en des formations forestières secondaires puis en des formations arbustives, « savoka », de plus en plus dégradées. La végétation modifiée se caractérise par sa pauvreté en espèces, souvent à large répartition géographique. Les espèces dominantes des savoka à Mananara-Nord sont : *Ravenala madagascariensis* (Strelitziaceae), *Trema orientalis* (Ulmaceae), *Harunga madagascariensis* (Hypericaceae) et *Psidia altissima* (Asteraceae), ... (Ramangalahy, 1990).

La région dispose de la végétation originale qui est principalement forestière avec trois variétés : la forêt dense humide sempervirente se découvre sur le socle cristallin et ses altérations latéritiques. Elle est caractérisée par *Anthonstema*, les *Myristi-caceae* et les *Sapotaceae* (Velonjara, 2016) :

- La forêt littorale, qui est une variante édaphique sur sols sédimentaires récents. Il s'agit d'une variante de la forêt dense sempervirente de basse altitude et qui est caractérisée par la prospérité des *Intsia* et *Uapaca*.
- La mangrove colonise les côtes et protège des fortes houles.

II.1.5. Climatologie

Le climat de Mananara-Nord est tropical de type équatorial ; des précipitations importantes sont enregistrées toute l'année. La température moyenne annuelle y est de 24,4 °C et la précipitation annuelle moyenne sont de 3415,5 mm. La saison chaude vu de janvier à avril. Pendant cette période, des cyclones peuvent survenir. Au niveau éolien, l'alizé est le vent des régions intertropicales qui souffle presque toute l'année (DGM, 2018)

Tableau 4: Situation mensuelle de la température et de la précipitation de Mananara-Nord de l'année 2018.

Mois	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Température moyenne (°C)	Précipitation (mm)	Jours de pluie
Janvier	23	31	27	644,3	18
Février	22,8	30,9	26,8	214,8	21
Mars	22,6	30,5	26,5	786,2	19
Avril	21,6	30	25,8	468,9	22
Mai	19,6	28,6	24,1	419,1	21
Juin	18,3	26,9	22,6	168,5	17
Juillet	17,9	25,7	21,8	428,2	24
Août	17,8	25,7	21,7	68,7	14
Septembre	18,6	26,2	22,4	55,2	13
Octobre	19,2	27,9	23,5	26,9	9
Novembre	20,9	29,2	25	60,6	14
Décembre	22,2	30,2	26,2	74,1	11
Moyenne annuelle	20,4	28,6	24,5	3415,5	203

Sources : Station météorologique d'Ampandrianomby (Madagascar).

La température représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 2003). Les températures moyennes sont : de **28,6°C** (moyenne des maxima mensuels) et de **20,4°C** (moyenne des minima mensuels). Pour le mois le plus chaud, la moyenne des maxima est de 31°C (mois de janvier), et pour le mois le plus froid moyenne des minima est de 17,8 °C (mois d'août). Ce facteur entre autres, a de profondes répercussions sur le type d'habitat et sur certains comportements humains qui influent sur la demande en eau. En effet, les gens sont plus à l'aise chez eux qu'à l'extérieur et ce qui explique la nouvelle politique de développement des branchements sociaux et des branchements particuliers.

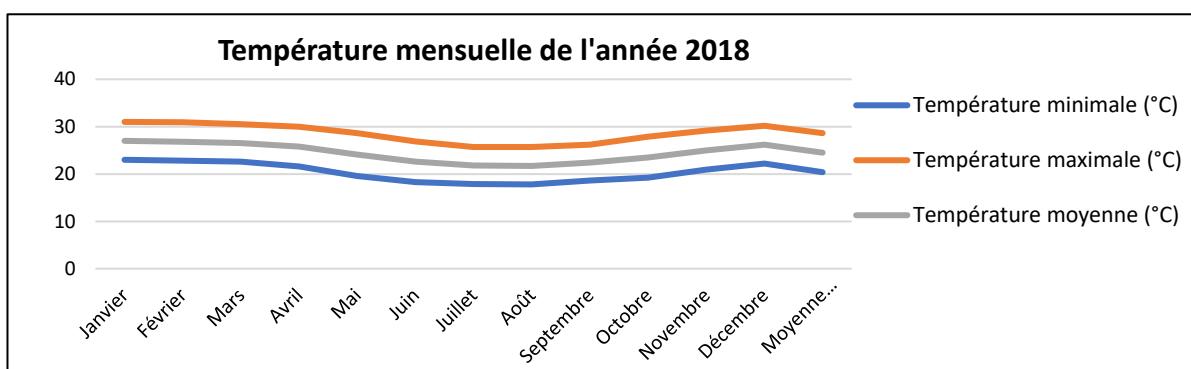


Figure 6: Courbe de la température mensuelle de Mananara-Nord année 2018.

Les précipitations sont les résultats de refroidissement de l'air humide provoquant la condensation de vapeur d'eau.

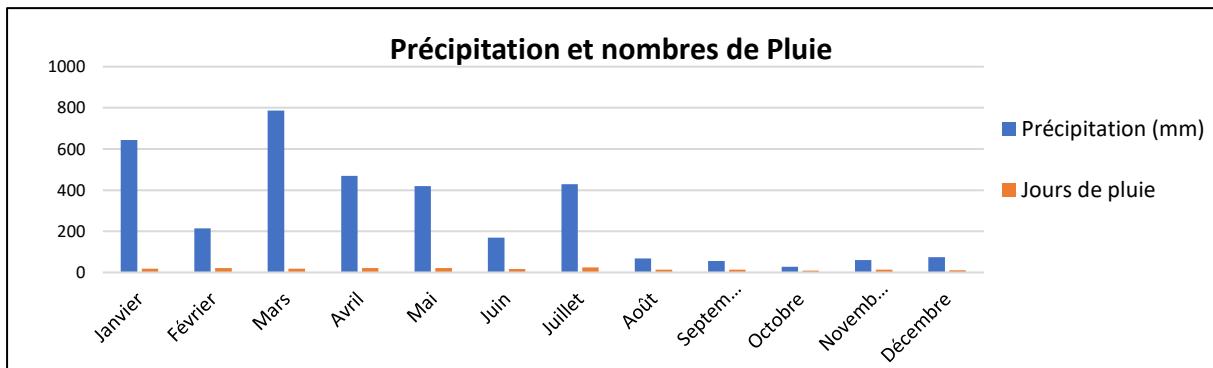


Figure 7: Histogramme de la précipitation mensuelle de Mananara-Nord année 2018

Le vent : Alizé est le vent dominant qui souffle en moyenne à 3 km.h^{-1} . Il frappe en permanence sur toutes les côtes orientales depuis l'Est et le Sud-Est.

II.1.6. Pédologie

La première couche superficielle du sol de la commune de Mananara-Nord est de type hydromorphe alluvionnaire majoritairement sableuse. La deuxième couche superficielle distinguée au niveau des collines sous couvert forestier est formée par des sols de types ferralitiques jaune et jaune/rouge. Faiblement acide, les sols de la commune proviennent des substrats dont le pH est de l'ordre de 5, avec des variations en fonction de leurs caractéristiques.

Une nette différence sépare les sols littoraux qui sont sableux et chimiquement pauvres, des sols dérivés des roches cristallines. Ces derniers varient en épaisseur selon le type de roche et de pente. Sous végétation naturelle, la forêt dense humide, ces sols ont un horizon humifère important qui concentre également la plus grande partie des nutriments du sol ; la teneur en bases échangeables est néanmoins faible de l'ordre de 0,5 à 13 meq/100 g de sol. Ils ont une porosité élevée et le drainage est bon. Après déboisement, mise en culture et exposition aux intempéries, ces sols perdent une grande partie de leurs matières organiques et de leurs éléments minéraux ; la porosité diminue, le drainage devient déficient et l'érosion superficielle peut se déclencher (Ravolasoa, 2017).

II.1.7. Géologie

D'après la carte Géologie de Madagascar qui a été mettre à jour en 1^{er} janvier 1964 par Henri Besairie, l'extrait de la carte du commune urbaine de Mananara-Nord (Annexe 9, Carte

géologique du CU.Mananara), est dominée par la Granite d'Antogil à enclaves basiques du 770 Millions d'Années du partie Nord au Sud. Dans le centre de la carte qui est enjointe par des Alluvions concernent les fokontany (Tampolo, Antanandava, Antanankoro, Mananara Centre, Antanambao, Andraokaraoka, Ambitsika). Dans quelque partie de la fokontany Aniribe et Tampolo il y a la présence de C8- Groupe d'Antogil : Migmatites à épidotes.

II.1.8. Relief

Le relief du district de Mananara est contrasté avec des plaines littorales surtout dans la partie Nord et Sud ainsi qu'au Sud d'Antanambe. Bâtie au bord de l'océan indien, il est dominé par les reliefs montagneux d'Ambarobe (279 m) de Mahambomaso (270 m), d'Ambatifitra (242 m) et d'Antevialabe (134 m) (Velonjara, 2016). Cependant, les reliefs sont essentiellement de type montagneux de basse altitude de 0 à 500 m, muni de vallées étroites et profondes, à fortes pentes pouvant être supérieurs à 40%. La commune urbaine de Mananara-Nord est couverte de plaines et se divise en deux zones : la partie Nord est en basse altitude de 0 à 18 m où la pente est comprise entre 6 à 10% et la partie Sud, en haute altitude de 19 à 300 m où la pente comprise entre 11 à 20% (Ravolasoa, 2017).

II.1.9. Hydrogéologie

La partie Nord-Ouest s'ouvre sur de grandes vallées traversées par le fleuve Magnanara, ainsi sa partie Nord-Est est composée d'une ficelle littorale aux falaises rocheuses alternées. Grâce au climat humide et du fait de la géomorphologie globale de Madagascar qui présente une plus forte pente topographique du plateau des hautes terres centrales vers la côte-Est, le réseau hydrographique est dense.

Les masses nuageuses entretenues par le régime de l'Alizée en provenance du Sud-Est y sont fortement concentrées, ce qui provoque une surabondance des précipitations rendant cette zone humide en permanence. De ce fait, les fleuves et rivières situés dans la partie Est de l'île sont généralement caractérisés par des crues violentes c'est-à-dire rapides et à gros débits ; et le fleuve Magnanara n'y fait pas exception. Il s'agit du seul fleuve utilisé pour le transport de marchandises et humain, mais le parcours est très limité à cause de nombreux obstacles tels que les rochers, les cascades et les chutes le long du fleuve.

Dans le document de Synthèse de l'hydrologie, de la géologie et de l'hydrogéologie de Madagascar intégrée dans le SESAM, Mananara-Nord est classé dans la zone hydrogéologique du

bassin sédimentaire de la côte-Est dont la nappe principale est la nappe libre et peu profonde (Rakotondrainibe, 2016).

- **Nappes d'alluvions** ; lithologie : sables argileux ; type de porosité : poreux ; type de nappe : captif ou artésien selon la structure géologique ; niveau statique : 2-3 m ; profondeur d'ouvrage : jusqu'à 20 m ; épaisseur d'aquifère : jusqu'à 10 m ; qualité de l'eau : eau douce, risque d'invasion d'eau salée ; débit spécifique : 2-5 l/sec/m.
- **Nappes des sables de plage** ; lithologie : sables fins ; type de porosité : poreux ; type de nappe : libre ; niveau statique : 2-3 m ; profondeur d'ouvrage : 1-5 m ; épaisseur d'aquifère : 5 à 10 m ; qualité de l'eau : douce à saumâtre ; parfois salée ; débit spécifique : 0,4 à 2,6 l/sec/m.
- **Nappes du Crétacé** ; lithologie : grès argileux ; type de porosité : poreux ; type de nappe : captif ; niveau statique : 2-3 m ; profondeur d'ouvrage : jusqu'à 40 m ; épaisseur d'aquifère : 10-20 m ; qualité de l'eau : eau très riche en fer ; débit spécifique : 0,18 l/sec/m.

II.1.10. Aspects sanitaire

La commune de Mananara Nord dispose un CSBII, un CHRD2 et un dispensaire. Les maladies fréquentes qui affectent la population sont le paludisme, la dysenterie et le diarrhéique liées en général à la mauvaise qualité de l'eau et le manque d'hygiène. Les tableaux dans l'Annexe 7 qui résument la fréquence des maladies d'origine hydrique durant l'année 2017 à 2018 dans la commune urbaine du Mananara-Nord.

II.1.11. Cadre d'allimentation

La ville de Mananara Nord dispose un système d'AEPG, à partir de la source de la montagne d'Andasibe. Ce système a été adopté dans le cadre du projet Ranon'AlA, de l'organisation CRS Madagascar. Il a été réhabilité par l'entreprise SANDANDRANO en 2011 et géré par l'entreprise EGC3S depuis le mois d'Août 2012.

Parmi les 18 Fokontany de la Commune, seuls quelques Fokontany sont servis par le projet, à savoir (Ravolasoa, 2017): Mananara Centre, Androkaroka, Antanambao, et Antanankoro (au niveau du Chef-lieu de la Commune) ; le Fokontany d'Ambitsika (à environ 2 km du Chef-lieu, sélectionné pour son potentiel de développement touristique élevé), et certains Fokontany sont desservis par la conduite de transfert en provenance du captage de Vohidravina à Sahave, tels que le Fokontany de Sahave, Antsiratenina, Madiotona et Antetezambe, ainsi que le village d'Ambolomoko (Fokontany de Mahambolona) (Entreprise Sandandrano, 2011).

L'objectif global du projet était d'atteindre un taux de déserte de 90% en eau potable pour l'année 2015-2021 et d'assurer le bon fonctionnement des ouvrages pour 10 ans, soit en 2021 (Bogardus, 2016).

II.2. Géomorphologie de la zone d'étude

II.2.1. Répartition de la zone

La géomorphologie de la zone est caractérisée par l'ensemble des reliefs qui limitent les lignes de répartition des eaux de ruissellement et d'infiltration qui s'écoulent des hautes vers les basses altitudes, et alimentent les effluents, ces reliefs forment topographiquement les deux sous bassins versants, Nord et Sud dans la région d'étude :

- **Le sous bassin versant Nord** : constitué par d'Aniribe, Tampolo, Antanandava, Antanankoro, Mananara-centre, Ambitsika, Androkaroka, Antanambao, Mahambolona, Antetezambe, Ambodivohangy et Amboditangena. L'altitude de ce zone varie entre 0 à 20 m et les nappes sont peu profondes.
- **Le sous bassin versant Sud** : constitué par Madiotona, Androraagavola, Antsiratenina, Ambatofitarafana, Ambatomilona, Andasibe et Sahave. L'altitude de ce zone est supérieure à 15 m et les profondeurs des nappes sont peu élevées.

Pourtant, le cours d'eau d'un bassin versant donner peut-être alimenté par les eaux précipitées sur un bassin topographiquement adjacent. C'est le cas provoqué par la présence d'un horizon imperméable ou d'écoulements souterrains complexes comme dans les terrains karstiques (Zair et Bensalem, 2014).

II.2.2. Cactéristique morphologique d'un bassin versant

Chaque bassin topographique est caractérisé par :

- **Le périmètre (P) et la superficie (A)** : généralement exprimée en km et km² respectivement. On les détermine à l'aide de logiciel ArcMap 10.3.1.

Tableau 5: Périmètre et superficie du sous bassin versant

Sous Bassin	Périmètre (km)	Superficie (km ²)	Supeficièle en (%)
Sous bassin versant Nord	57,9672	51,1111	60,112
Sous bassin versant Sud	38,4644	53,6088	39,888

- **Indice de compacité** : cette indice permet d'évaluer globalement le réseau de drainage. Plus le bassin est compact, plus sa forme est ramassée, par l'indice de Gravilius est faible et plus le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire sera court et inversement (Bendjoudi, 2002).

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad II- 1$$

Tableau 6: Indice de compacité de ces deux bassins

Bassin	Kc
Sous bassin versant Nord	2,27
Sous bassin versant Sud	1,471

Dans notre cas, l'indice de compacité de ces deux bassins est supérieur à 1. Alors, leurs formes sont vastes, tandis que la vitesse d'écoulement des eaux superficielle est faible, ce qui induit moins de crue, en raison des temps d'acheminement plus importants de l'eau à l'exutoire.

- **Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius L:** permet de comparer simplement les deux sous bassins versants, par l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le sous bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique (Hadj-said, 2007).

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right) \quad II- 2$$

$$Et, 2(L + l) = P \quad donc; \quad l = \frac{P}{2} - L \quad II- 3$$

Où : L : rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius et l : largeur du rectangle équivalent.

Tableau 7: Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius et largeur du rectangle équivalent.

Bassin	L (m)	l (m)
Bassin versant Nord	27,097	1,886
bassin versant Sud	15,85	3,382

- **Indice de la densité de drainage D_d** , introduit par Horton : représente la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{Lp}{A} \quad II- 4$$

Où : D_d : Densité de drainage ; Lp : longueurs totales des points de rivière permanents et A : Superficie du sous bassin.

Tableau 8: Densité de drainage de chaque bassin

Bassin	Rivières	Lp (km)	D_d
Sous bassin versant Nord	Aniribe	4,887	0,096
	Analambondrona	2,708	0,053
	Ambatondrainany	1,035	0,02
	Antetezambe/Ambodivohangy	3,275	0,064
Sous bassin versant Sud	Ambatofitarafana/Andasibe	5,35	0,1
	Ambatomilona/Andasibe	9,75	0,182
	Ankobalava	0,578	0,011

II.2.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturel ou artificiels, permanent ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Il est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin (Zair et Bensalem, 2014). Le réseau hydrographique est influencé par quatre facteurs principaux :

- La géologie : la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique.
- Le climat : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- La pente du terrain : elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaires.
- La présence humaine : drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

II.2.4. Bilan hydrologique selon Thornthwaite.

A partir des données de températures et de pluies le calcul du bilan hydrologique a été effectué en utilisant la formule de Thornthwaite par la relation suivante :

$$P = E + R + I \pm \Delta S \quad II-5$$

Où : P : Pluies, E : Evapotranspiration, R : Ruissellement, I : infiltration, $\pm \Delta S$: variation du stock d'eau du sol.

D'après (tableau 32 et paragraphe calcule de l'infiltration, Annexe 3), on a pu tirer :

$$P = 3415,5 \text{ mm} ; R = 117,73 \text{ mm} ; E = 2981,86 \text{ mm} ; I = 315,73 \text{ mm} ; \pm \Delta S = 0$$

II.3. Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont eu lieu au cours du mois de mars 2019 dans la commune urbaine de Mananara-Nord, dont dix-sept (17) points d'échantillonnage. La première partie des travaux a été principalement axée sur les sondages, enquête et collectes d'information disponible, la caractérisation des dépôts meubles et la mesure des niveaux d'eau dans les puits résidentiels. La deuxième partie des travaux consistait à analyser les paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau souterraine.

II.4. Enquête sur l'évaluation du risque de contamination

Pendant le prélèvement des échantillons, une enquête a été effectuer au sein des ménages situés au tour des points de prélèvement. Un questionnaire préambule (Annexe 4) a permis de mettre en évidence la vulnérabilité de l'eau par rapport au risque de contamination et de contrôler la qualité des données collectées ou des analyses effectuées. Un score final est obtenu en comptant le nombre de réponses « Oui » pour chacune des questions numérotées dans la carte de score. Ce score est appelé le « score de risque de contamination » et les scores suivants sont considérés comme très élevé (9-12), élevé (7-9), moyenne (4-6), bas (0-3). Ce score serait alors comparé aux résultats de l'analyse des échantillons prélevés sur chaque point d'eau pour déterminer le risque global du score de contamination.

II.5. Points des prélèvements

La zone d'étude s'effectue est dans la commune urbaine de Mananara-Nord. On établit 17 points de prélèvements à partir du puits. Pendant le prélèvement, tous les échantillons sont codés comme ceci « **ZI1** » dont **Z** représente mon nom **ZAMANILEHA**, le chiffre romain représente le *fokontany* et le chiffre arabe indique le *carreau* dans *le quartier*.

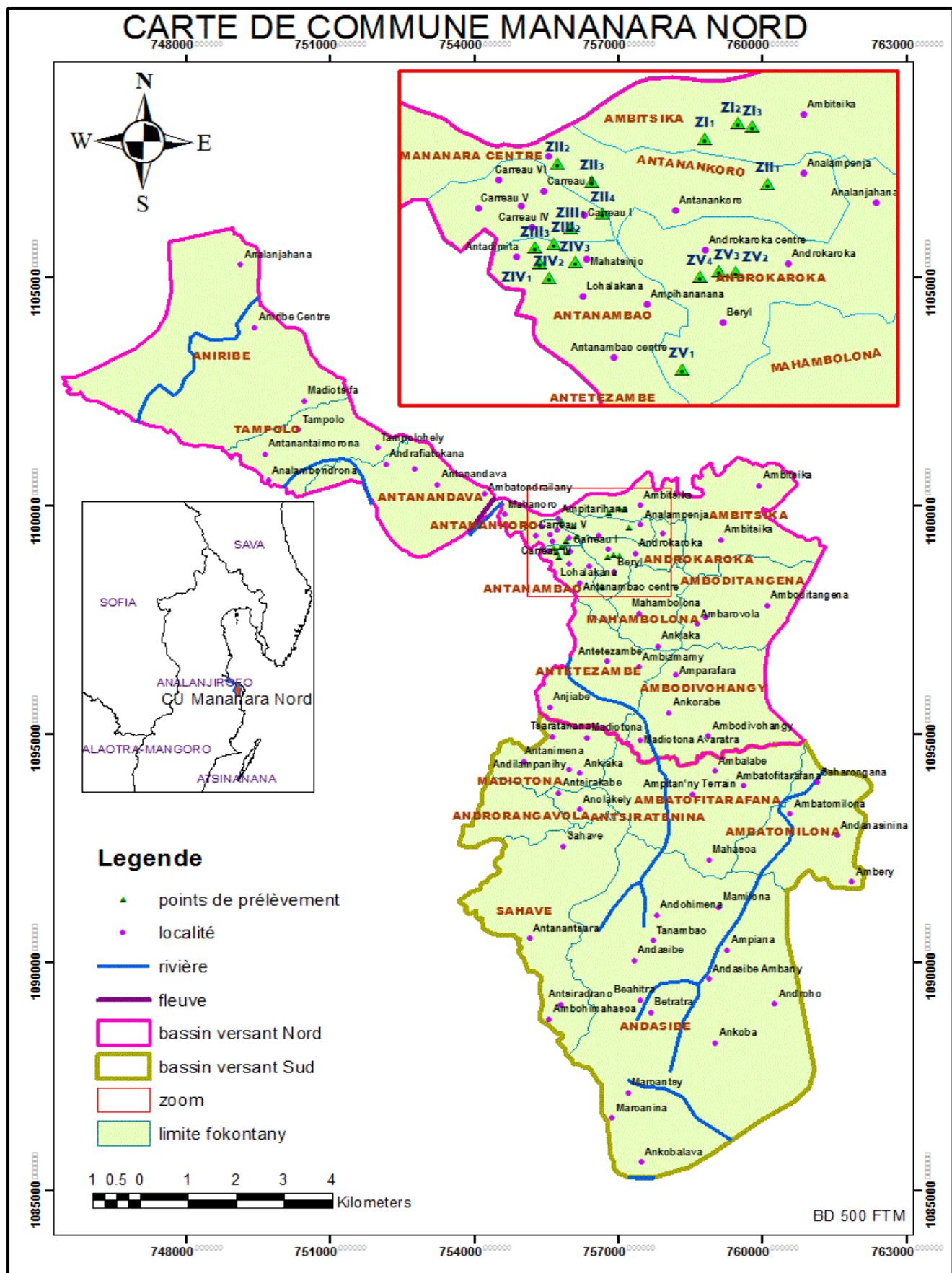


Figure 8: Carte de la commune du Mananara-Nord et sa Zone d'étude.

II.6. Analyse physico-chimique des échantillons

Les analyses consistent à mesurer les taux des paramètres tels que : le pH, la couleur, la turbidité, la salinité, la conductivité, le nitrate, le nitrite et l'ammonium. Ces analyses ont été effectuées au LACAE du CNRE Antananarivo.

II.6.1. pH

La mesure du pH a été effectuée par la méthode électrométrique, en utilisant un pH-mètre de marque Eutech Instrument, EcoScan pH 5. Le modèle d'EcoScan pH 5 est un pH-mètre portatif développé par Eutech Instruments. Il est fourni avec la compensation automatique de la température utilisée pour l'exactitude la plus élevée sous des températures de fluctuation. Le système est équipé de point de droit portant rugueux, de grands affichages à cristaux liquides de coutume pour le visionnement optimum, et un auto-diagnostique avec des codes de message pour le dépannage facile.



Photos 1: pH-mètre de marque Eutech Instrument, EcoScan pH 5.

II.6.2. Mesure de la couleur de l'échantillon

Le palintest 7000 SE est un photomètre à lecture directe, pour mesurer l'intensité de couleur. La lumière passe à travers une éprouvette qui contient l'échantillon, et puis à travers un filtre coloré vers une photo détectrice. Les filtres sont choisis afin que la lumière d'une longueur d'onde spécifique soit sélectionnée. Quand la solution est complètement sans couleur, toute la lumière passe à travers l'échantillon. Avec des échantillons colorés, la lumière est absorbée, et celle qui passe à travers l'échantillon est réduite proportionnellement. La couleur observée est appréciée par rapport à une solution de référence (platine-cobalt), il donne des résultats par des unités mg.l^{-1} Pt-Co.



Photos 2: Photomètre portable Palintest 7000 SE.

II.6.3. Mesure de la turbidité

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre. Cet instrument envoie un rayon de lumière à travers un échantillon d'eau et mesure la quantité de lumière qui passe à travers l'eau (échantillon) par rapport à la quantité de lumière qui est réfléchie par les particules dans l'eau.

Principe de turbidimètre : le système optique comprend une lampe à filament de tungstène, un détecteur à 90° pour la mesure de la lumière dispersée et un détecteur de lumière transmise. Le microprocesseur calcule le rapport des signaux des détecteurs à 90° et de lumière transmise. Cette technique de rapport corrige les interférences de la couleur et des particules absorbent la lumière (telles que le charbon actif) et compensent les fluctuations d'intensité de la lampe, en assurant une stabilité d'étalonnage à long terme. Le principe optique minimise aussi la lumière parasite, améliorant l'exactitude de la mesure.



Photos 3: Turbidimètre portable HANNA, HI 93703.

II.6.4. Salinité et conductivité

Un réfractomètre est un instrument portable très simple et rapide permettant la mesure de l'indice de réfraction d'un milieu. Cet appareil mesure les indices de réfraction d'une solution (changement de direction de la lumière passant d'un milieu à un autre). Le contrôle de la

concentration s'effectue en lecture directe après avoir mis quelques gouttes de saumure dans l'instrument. Dans le champ visuel de l'oculaire, une ligne de séparation entre les plages obscure et claire indique la graduation de la concentration (Benali et Mammar, 2016).



Photos 4: Réfractomètre portable.

Ainsi en mesurant la salinité de l'eau on peut en déduire sa conductivité. Cette méthode peut être utilisée pour mesurer la salinité d'une solution ou d'un matériau. On utilise pour cela un réfractomètre ou un densimètre ; il s'agit d'ailleurs du seul appareil qui permet de tester la salinité d'un sol. Il n'est pas forcément judicieux d'opter pour cette méthode si vous êtes un aquariophile. Certains aquariophiles combinent toutefois conductimètre et réfractomètre ou densimètre pour être sûrs de la fiabilité de leurs mesures (Benali et Mammar, 2016).

II.6.5. Dosage de nitrate

Selon les normes ISO-7890-3 (NF-T90-45/1989), en présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique au spectromètre UV-visible avec $\lambda = 415\mu\text{m}$. Le dosage doit se faire dans les meilleurs délais pour éviter l'évolution des nitrates en nitrites.



Photos 5: Expérience de dosage de nitrate.



Photos 6: Spectrophotomètre UV Beckman.

II.6.6. Dosage de nitrite

La diazotation de la sulfanilamide en milieu acide et son couplement avec la N(1-naphtyl) ethylènediamine forment avec les ions NO_2^- un complexe coloré pourpre susceptible d'un dosage colorimétrique au spectrophotomètre UV-Visible, $\lambda = 543\text{nm}$, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en Nitrite.



Photos 7: Expérience du dosage de nitrite.

II.6.7. Dosage d'ammonium

Selon l'ISO 7150/1 ; l'azote ammonical ($\text{NH}_4\text{-N}$) se présente en partie sous la forme d'ion ammonium et en partie sous la forme d'ammoniaque. Il existe un équilibre pH dépendant entre ces deux formes. Dans une solution fortement alcaline ne contenant pratiquement que de l'ammoniaque, ce dernier réagit avec un agent de chloration pour donner de la monochloramine. Celle-ci forme avec du thymol un dérivé bleu d'indophénol qui est dosé par photométrie. La méthode est analogue à EPA 350.1, APHA 4500-NH₃ D et ISO 7150/1.



Photos 8: Spectroquant NOVA 60

II.7. Modélisation numérique

La simulation de l'écoulement revient à résoudre le système d'équations à l'aide d'un schéma numérique capable de donner une solution proche de la réalité quelles que soient les particularités de l'écoulement.

II.7.1. Présentation du MODFLOW

MODFLOW (Three-Dimensional Ground-Water Flow model) est un modèle numérique à trois dimensions basées sur la méthode des différences finies, et utilisé pour simuler les écoulements tridimensionnels des eaux souterraines. Le modèle a été développé par l'U.S. Geological Survey. Ce code a été rendu public en 1984. Il est devenu standard dans la modélisation des écoulements souterrains (Chabani et al., 2009). Il a été appliqué à de nombreux systèmes hydrogéologiques : des aquifères poreux, des aquifères karstiques, des nappes alluviales, ou des aquifères complexes multicouches ; dans le cadre de divers problématiques tels que : les échanges nappe-rivière, l'influence du climat sur les hydro systèmes, les problèmes de transferts de polluants et de contamination des aquifères ou encore l'impact de pompage sur les écoulements souterrains (Auterives, 2006).

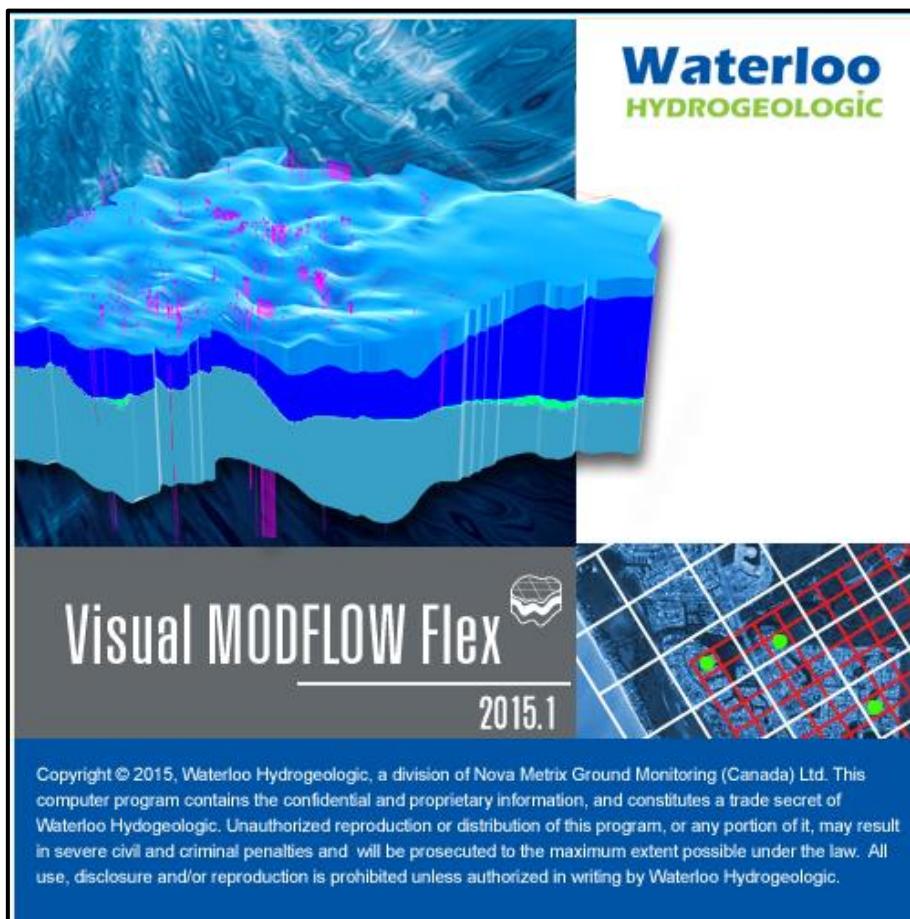


Figure 9: Présentation du cession d'ouvert du logiciel visual MODFLOW Flex 2015.1.

Le code MODFLOW est un modèle numérique à trois dimensions. Il décrit les écoulements souterrains en milieu poreux anisotrope et hétérogène, en conditions de flux stationnaires ou transitoires, pour des aquifères libres/captifs ou mixtes (McDonald et Harbaugh, 1988).

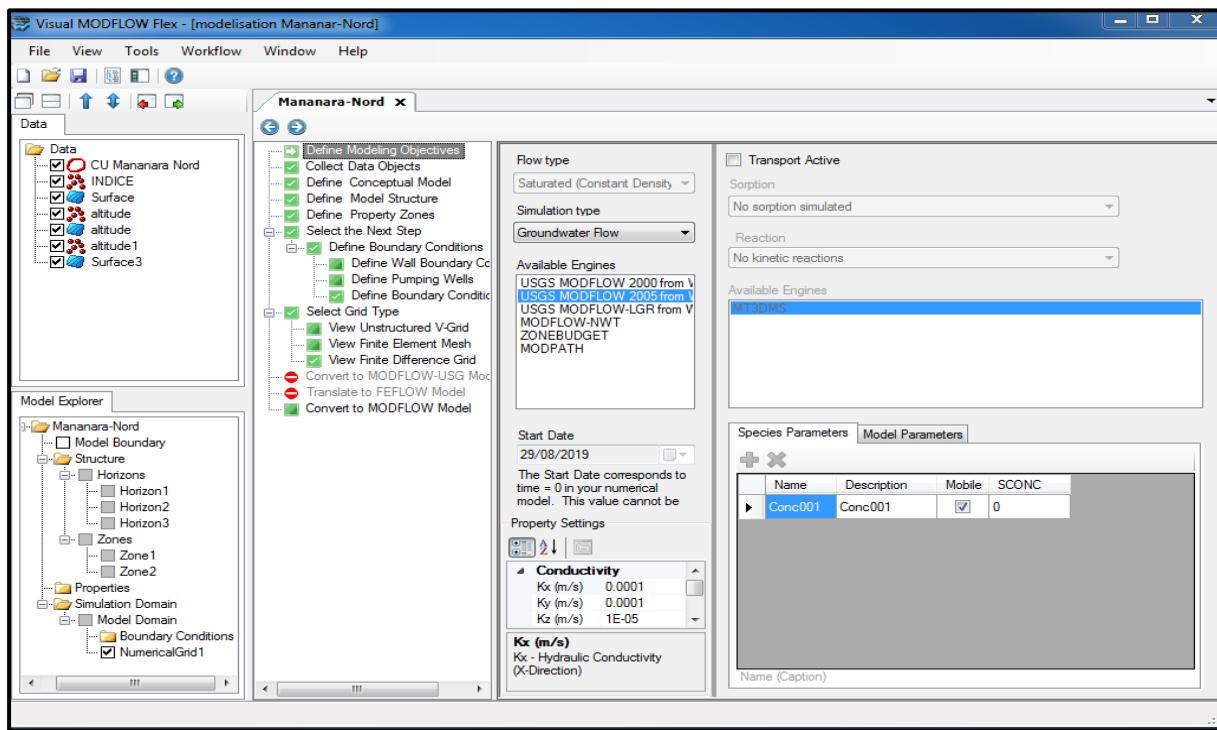


Figure 10: Interface du visual MODFLOW Flex 2015.1

II.7.2. Modèles mathématiques d'écoulement et de transports de polluant dans une nappe phréatique à ce modèle conceptuel

II.7.2.1. Caractéristique d'un milieu poreux

Elle représente le taux de volume vide par rapport au volume total du matériau (Mahamat et al., 2004). On a donc :

$$\omega = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total de l'échantillon}} \quad II- 6$$

II.7.2.2. Perméabilité

La perméabilité est définie soit par la grandeur dite perméabilité intrinsèque notée k (m^2), soit par le coefficient de perméabilité K exprimé en (m.s^{-1}) associé à la loi de Darcy qui est mesurée en m.s^{-1} . Le coefficient de perméabilité K est relié à k et aux caractéristiques du fluide qui s'écoule dans le milieu :

$$K = \frac{k}{\mu} \gamma_w \quad II- 7$$

Où : μ est la viscosité dynamique de l'eau exprimée en kN.s.m^{-2} ; γ_w le poids volumique de l'eau en kN.m^{-3} .

II.7.2.3. Loi de Darcy

La loi de Darcy telle qu'elle a été formulée par Henry Darcy en 1856 dans l'appendice D de son célèbre ouvrage « Les Fontaines publiques de la ville de Dijon », exprime le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire au travers d'un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ($h_1 - h_2$) (Zerner, 2011).

$$Q = \frac{KA(h_1 - h_2)}{L} \quad II- 8$$

Où ; Q : est le débit volumétrique ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) ; K : est la conductivité hydraulique du matériau dans la direction du flux (m.s^{-1}) ; A : est l'aire de la section transversale perpendiculaire à l'écoulement (m^2) ; $h_1 - h_2$: est la différence de tête à travers le prisme parallèlement au flux (m) ; L : est la longueur du prisme parallèle au chemin d'écoulement (m).

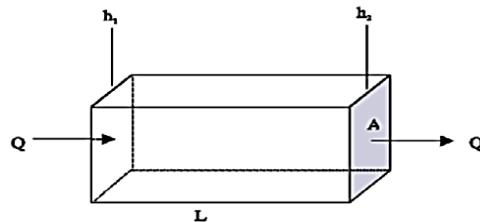


Figure 11: Prisme en matériau poreux illustrant la loi de Darcy (McDonald et Harbaugh, 1988).

II.7.2.4. Equation de base de la conductance hydraulique

La conductance, C, est défini comme :

$$C = \frac{KA}{L} \quad II- 9$$

Par conséquent, la loi de Darcy peut être écrite comme

$$Q = C(h_1 - h_2) \quad II- 10$$

Une autre forme de la définition de la conductance pour le courant horizontal dans un prisme est

$$C = \frac{TW}{L} \quad II- 11$$

Où ; T est la transmissivité (K fois l'épaisseur du prisme) dans la direction de l'écoulement ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) ; W est la largeur du prisme (m) et L est la longueur du prisme. Donc l'unité de la conductance est (m^2s^{-1})

La conductance est définie pour un prisme de matériau particulier et pour une direction d'écoulement particulière. Dans un anisotrope milieu caractérisé par trois directions principales de

conductivité hydraulique, les conductances d'un prisme dans ces trois directions principales seront généralement différentes. Si un prisme en matériau poreux est constitué de deux sous-prismes ou plus en série (alignés séquentiellement dans la direction de l'écoulement), comme indiqué à la figure 11, et que la conductance de chaque sous-prisme est connue, une conductance représentant l'ensemble le prisme peut être calculé (Harbaugh, 2005). La conductance équivalente pour le prisme entier est le débit dans le prisme divisé par le changement de tête sur le prisme :

$$C = \frac{Q}{h_A - h_B} \quad II- 12$$

Assumer la continuité de la tête sur chaque sous-réseau donne l'identité :

$$\sum_{i=1}^n \Delta h_i = h_A - h_B \quad II- 13$$

Le remplacement de la tête de chaque sous-réseau par la loi de Darcy l'équations (II-10) donne :

$$\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{c_i} = h_A - h_B \quad II- 14$$

Où : q_i est le flux à travers le sous-prisme i, et c_i est la conductance du sous-prisme i.

Comme le flux est unidimensionnel et que nous ne supposons aucune accumulation ni épuisement, chaque q_i est égal au total flux Q ; par conséquent :

$$Q \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} = h_A - h_B$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} = \frac{h_A - h_B}{Q} \quad II- 15$$

En comparant l'équation (II-15) avec équation (II-12), le lecteur peut voir cela.

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} \quad II- 16$$

Ainsi, pour un ensemble de conductances disposées en série, l'inverse de la conductance équivalente à la somme des inverses des conductances individuelles, on a alors :

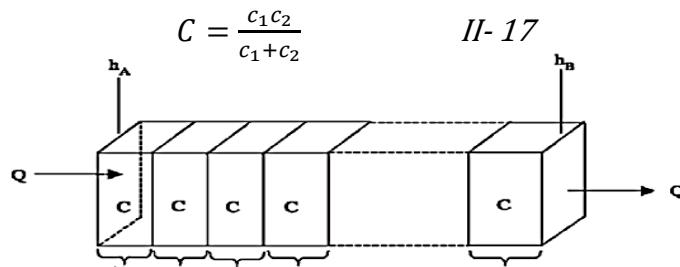


Figure 12: Calcul de la conductance à travers plusieurs prismes en série. (McDonald et Harbaugh, 1988).

II.7.2.5. Dérivation de l'équation différence-finie

Le mouvement tridimensionnel des eaux souterraines de densité constante à travers un matériau de terre poreuse peut être décrit par l'équation différentielle partielle. (Rushton et Redshaw, 1979)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad II-18$$

Où : K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les valeurs de la conductivité hydraulique le long des axes de coordonnées x, y et z, qui sont supposés parallèles aux grands axes de la conductivité hydraulique ($m.s^{-1}$) ; h est la tête potentiométrique (m); W est un flux volumétrique par unité de volume représentant les sources ou les puits d'eau, avec $W < 0,0$ pour un écoulement hors du système d'eau souterraine, et $W > 0,0$ pour un écoulement dans le système (s^{-1}) ; S_s est le stockage spécifique du matériau poreux (m^{-1}) ; et t est le temps (s). En général, S_s , K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} varient en fonction de l'espace ($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$, etc.) et W varient en fonction de l'espace et du temps ($W = W(x, y, z, t)$). L'équation (II-18) décrit l'écoulement des eaux souterraines dans des conditions non d'équilibre dans un milieu hétérogène et anisotrope, à condition que les axes principaux de la conductivité hydraulique soient alignés avec les coordonnées directions. L'équation (II-18), ainsi que la spécification des conditions d'écoulement et/ou de hauteur aux limites d'un système aquifère et la spécification des conditions de hauteur initiale, on peut constituer une représentation mathématique d'un système d'écoulement d'eau souterraine.

L'équation de flux en différences finies pour une cellule est une représentation du flux volumétrique de toutes les sources sont en unités de $m^3 s^{-1}$.

II.8. Etude de la vulnérabilité par la méthode de SINTACS

II.8.1. Présentation de la méthode SINTACS

Elle est la version italienne de la méthode DRASTIC, c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranéennes. Cette méthode prend en compte les mêmes paramètres que DRASTIC avec des poids et des cotes distinctes. L'acronyme SINTACS correspond aux initiales des sept facteurs suivants : la profondeur du plan d'eau (S = Soggiacenzia), la recharge efficace de l'aquifère (I = infiltrazione), l'effet de l'autoépuration de la zone vadose (N = effetto di autoepurazione del non-saturo), le type de sol (T = typologia della copertura), les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (A = caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero), la

conductivité hydraulique de l'aquifère (C = conductibilità dell'acquifero) et la pente topographique (S = l'acclivita della superficie topografica).

II.8.2. Spécificité de la méthode SINTACS

La spécificité de cette méthode consiste au fait qu'elle propose cinq scénarios différents :

Scénario « Impact Normal » : scénario relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée et localisés dans des aires à sols épais. Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables, de point de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et des périmètres urbains très dispersés ; **Scénario « Impact Sévère »** : correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une occupation des sols intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets ; **Scénario « Drainage important à partir d'un réseau superficiel »** : scénario relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau ; **Scénario « Terrain très karstifié » et Scénario « Terrain fissuré »** (Hamza et al., 2008).

Les poids attribués aux différents paramètres dans les différentes versions SINTACS sont présentés dans le tableau 7. Quatre classes de vulnérabilité peuvent être identifiées selon les valeurs des indices de vulnérabilité.

Tableau 9: Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode.

Scénario paramètre	Impact Normal	Impact Sévère	Drainage important	Karst	Terrains Fissures
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

II.8.3. Cote attribuée à chaque paramètre de la méthode SINTACS

Les tableaux suivants montrent tous les cotes attribuées aux paramètres de la méthode SINTACS (Arzika et Nacera, 2017) :

Tableau 10: Paramètres des profondeurs de nappe « S »

Profondeur des nappes « S » (m)	
Intervalles	Cote
0 - 1,3	10
1,3 - 2,6	9
2,6 - 3,9	8
3,9 - 5,6	7
5,6 - 8,2	6
8,2 - 10,8	5
10,8 - 16,5	4
16,5 - 24,3	3
24,3 - 41,47	2
41,47 - 100	1

Tableau 11: Paramètre de l'infiltration « I »

Infiltration « I »	
Intervalles	Cote
0 - 30	1
31 - 50	2
50 - 80	3
81 - 100	4
101 - 120	5
121 - 150	6
151 - 180	7
181 - 210	8
211- 250	9
≥ 251	10

Tableau 12: Paramètre de zone saturée « N »

Zone non saturée « N »	
Nature de la zone	cote
Dépôt alluviale grossier	8 - 9
Calcaire karstique	9 - 10
Dolomie fracturée (fissurée)	4 - 7
Moyen à fin alluvion	6 - 8
Calcaire fracturé	6 - 9
Complexe sableux	7 - 8
Grés-conglomérats	4 - 9
Roches plutonique fissuré	2 - 4
Séquence turbiditique fissure	5 - 8
Roche volcanique fissurée	8 - 10

Tableau 13 : Paramètre de la texture de sol « T »

Texture de sol « T »	
Nature de sol	cote
Sol à faible épaisseur ou absent	9,8 - 10
Gravier pur	9,7 - 10
Sable pur	8,9 - 9,5
Sol sableux	8 - 8,5
Schiste sableux	6,2 - 7
Sableux terreux	5,5 - 6
Limon-schiste-sable	4,5 - 5,2
Sol limoneux	3,5 - 4,2
Limono-terreux	3 - 4
Limoneux argileux	6 - 8

Tableau 14: Paramètre de type d'aquifère « A »

Type d'aquifère « A »	
Nature d'aquifère	Cote
Alluvion grossier	8 - 9
Karstique	9 - 10
Dolomie fracture	4 - 7
Alluvion d'un amont	6 - 8
Sable complexe	7 - 9
Grés, conglomérat	4 - 9
Flysch (séquence turbidique)	5 - 8
Marne, argile	1 - 3

Tableau 15: Paramètre de la conductivité hydrique « C »

Conductivité « C » (m.s ⁻¹)	
Rang	Cote
Gravier	10
Conglomérat	6 - 9
Grés	7 - 4
Sol marneux	4 - 2
Sol terreux	3 - 2

Tableau 16: Paramètre de topographie du sol « S » %

Topographie « S » %	
Rang	Cote
0-5	10
6-10	8
11-20	5
21-30	3
>100	1

II.8.4. Système de cotation

L'indice SINTACS est basé sur l'évolution des sept paramètres fomentés. Tous ces paramètres sont mandés d'un poids relatif fixe dont la valeur, compris entre 1 et 5. Un paramètre dominant se voit assigner un poids de 5 alors qu'un paramètre ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant est assigné d'un poids de 2. Une cote 1 correspond aux conditions de moindre vulnérabilité alors qu'une cote de 10 reflète les conditions les plus propices à la contamination (Arzika et Nacera, 2017).

Un indice SINTACS partiel propre à chaque paramètre est alors déduit en multipliant sa cote par son poids relatif.

$$\text{Indice partiel} = \text{poids} * \text{cote} \quad \text{II- 19}$$

L'indice SINTACS global résulte de la somme pondérée des indices partiels correspondant à chaque paramètre.

$$IS = (Sc.Sp) + (Ic.Ip) + (Nc.Np) + (Tc.Tp) + (Ac.Ap) + (Cc.Cp) + (Sc.Sp) \quad \text{II- 20}$$

Où : S, I, N, T, A, C, S : Paramètres ; c : Cote du paramètre considéré ; Sc : Est la cote du paramètre S et Sp est son poids.

II.8.5. Mode d'interprétation de l'indice

L'évaluation de l'indice SINTACS, n'est possible que par l'analyse comparative entre différents sites. A cet effet, un système de représentation offre à l'utilisateur une visualisation immédiate du degré de vulnérabilité. Le principe de cette représentation regroupe les indices de vulnérabilité en quatre (4) classes.

Tableau 17: Catégories de vulnérabilité.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 106
Moyen	106 - 186
Elevé	187 - 210
Très élevé	> 210

Les cartes obtenues permettent de placarder le degré relatif de vulnérabilité de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'indice.

PARTIE III - RESULTATS, INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

III.1. Résultats de l'enquête d'évaluation du risque de contamination

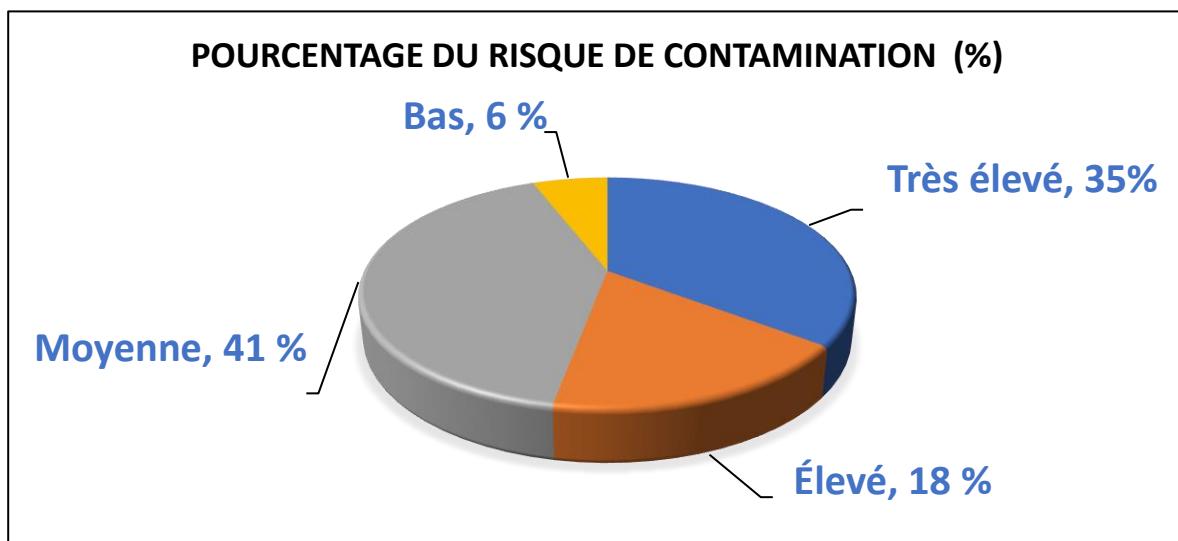


Figure 13: Diagramme d'évaluation du risque de contamination.

Les résultats de l'enquête sur l'occupation des sols montrent que 41% des distributions ont des risques d'une contamination moyenne, 35% risque très élevé, 18% qui est élevé et 6% de risque est bas. Ce qui explique que les sols sont en mauvais état en général. L'eau souterraine fournie par le système est probablement contaminée. Les analyses ont permis de mettre en évidence la vulnérabilité de l'eau par rapport à la contamination.

III.2. Résultats sur les analyses physico-chimiques

III.2.1. pH de l'échantillon analysé

Selon la directive de l'OMS le pH de l'eau souterraine doit être comprise entre 6,5 à 8,5. Les résultats des analyses ont montré que les pH des échantillons analysés sont inférieurs à 6,5 ; ce qui implique que les eaux analysées sont tous de pH acide. Ceci pourrait être causé par le déversement de pollution due aux activités quotidiennes de la population en surface de la terre telle que : l'éclat des matières organiques, minérales et toxiques (métaux lourds, etc.). Les valeurs de pH trouvées lors des mesures prouvent la présence plausible d'acides minéraux ou organiques provenant des débris végétaux enfouis dans le sol et des matières fécales dispersées ou enterrées dans le sable. Les résultats obtenus après les analyses sont présentés sur la figure 16.

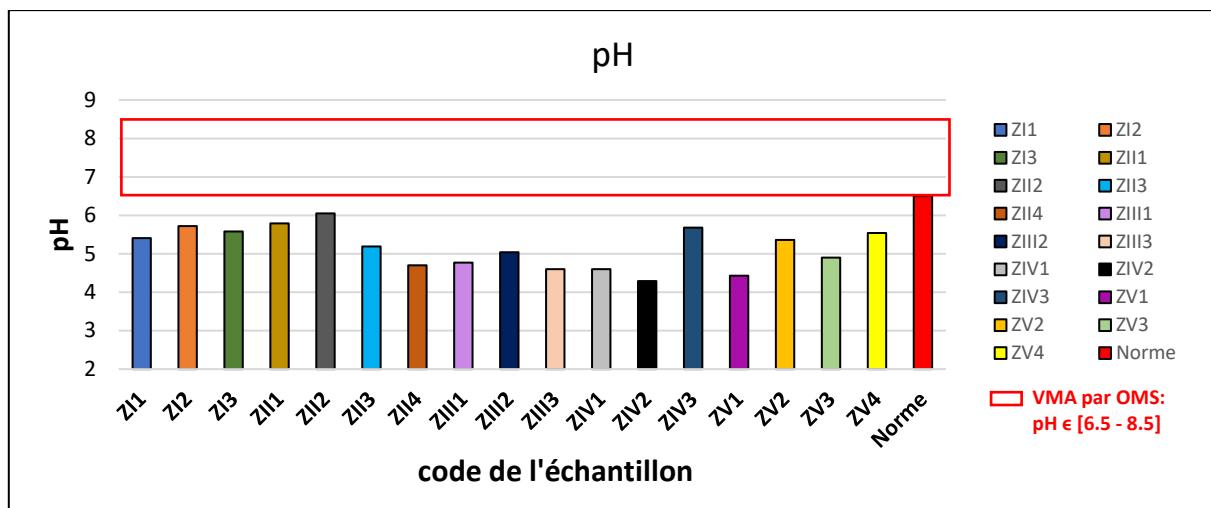


Figure 14: Valeurs du pH des échantillons de chaque point de prélèvement.

III.2.2. Couleur

L'aspect des échantillons varie entre la couleur limpide à légèrement jaunâtre et rougeâtre. D'après les résultats obtenus 58,82 % des échantillons analysés ne correspondent pas à la valeur admissible de la norme utilisée. Les valeurs sont strictement supérieures à 15 mg.l^{-1} Pt-Co ; ces valeurs justifient les fortes intensités des couleurs des eaux analysées. Dans la zone : ZI1, ZI2, ZI3, ZII1, ZII2, et ZV1 leur couleur est jaunâtre, tandis que ZV2 est rougeâtre. Ces couleurs sont dû à l'excès de : matières organiques, matières en suspension, végétaux et sels minéraux dissous provoqués par les activités domestiques, agricoles et industrielles de la population de la région. A noter que les composés de fer teintent l'eau en jaune ou rouge. La géologie et l'occupation des sols des sous bassin versant prouvent la couleur de chaque point de prélèvement.

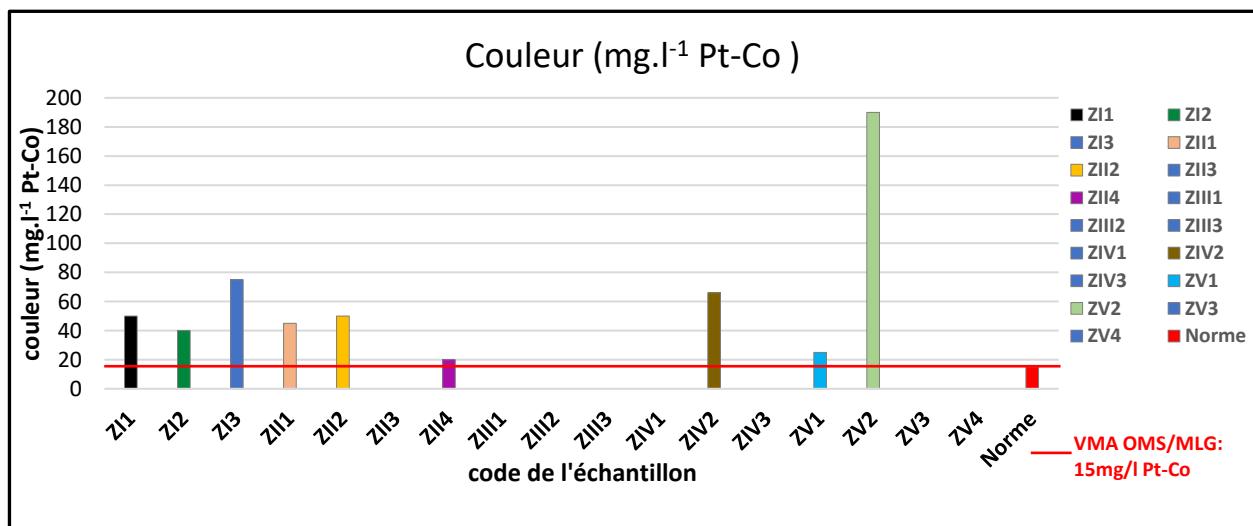


Figure 15: Valeurs des couleurs des échantillons analysés.

III.2.3. Turbidité

Les valeurs des turbidités des échantillons d'eau souterraine du CU.Mananara peuvent être classés en deux catégories. La première est comprise entre 0 à 4,9 NTU valeurs considérées acceptable par rapport à la norme de OMS, 88,24% des échantillons prélevés appartiennent à cette gamme normale. Tandis que, dans la deuxième catégorie les valeurs des turbidités sont comprises entre 5 à 16 NTU, les eaux ayant une turbidité appartiennent à cet intervalle sont considérée comme hors norme (supérieure à 5), ce cas concerne les points ZI1 et ZIV1 et elle explique la présence de particules en suspension dans l'eau comme les débris organiques, organisme microscopique, c'est-à-dire les microorganismes s'affermant sur les particules en suspension. Alors, cette turbidité montre des circonstances de contamination bactériologique. Malgré la turbidité élevée des eaux, la population la consomme encore d'où la persistance des maladies hydriques au sein de la zone.

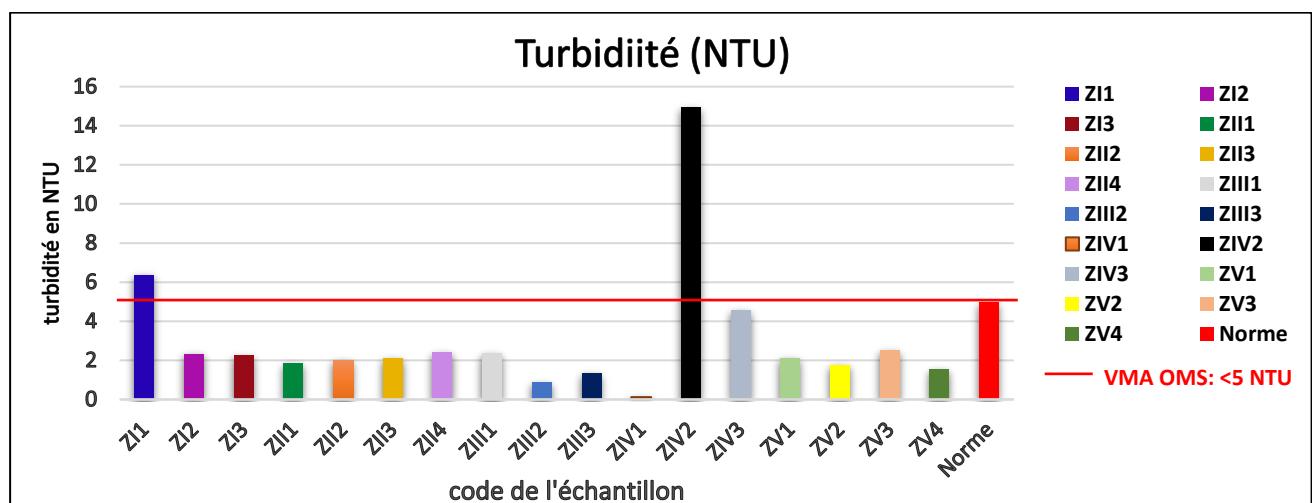


Figure 16: Résultats de la mesure de la turbidité des échantillons.

III.2.4. Salinité et conductivité

Les valeurs de la salinité et de la conductivité des échantillons d'eau souterraine analysés sont toutes inférieures à la valeur maximale admissible de l'OMS (1000 mg.l^{-1} pour la salinité et $2000 \mu\text{S.cm}^{-1}$ pour la conductivité). L'eau est issue des nappes phréatiques peu profondes et légèrement minéralisées. Les valeurs basses de la conductivité pourraient être liées à la nature de la nappe (nappe libre). Les valeurs obtenues présentées dans la figure 19.

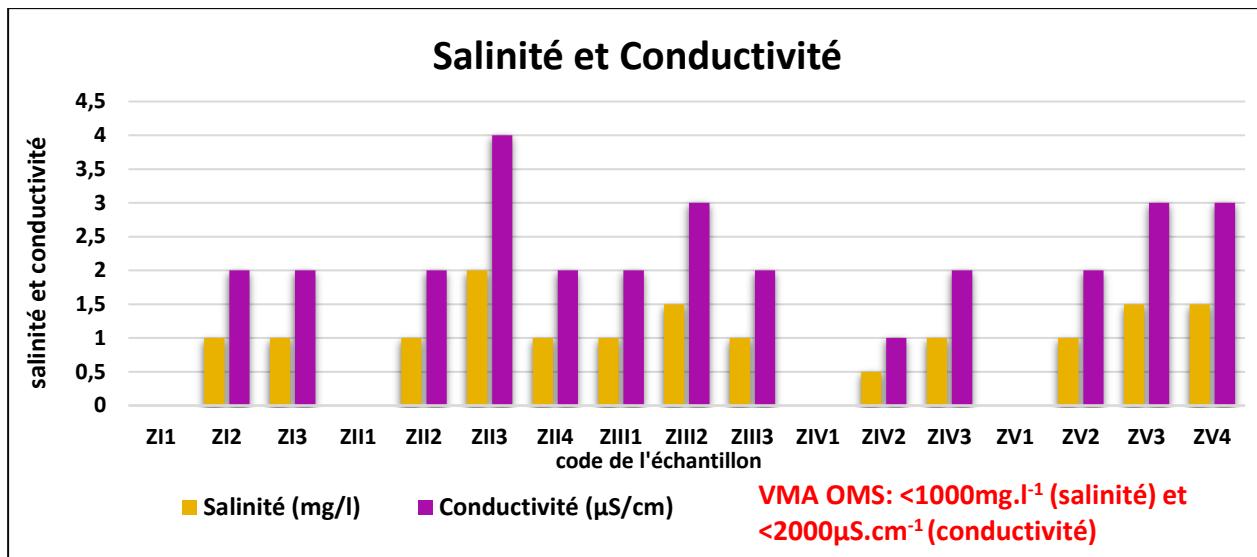


Figure 17: Valeurs des salinités et des conductivités des échantillons d'eau souterraine analysés.

III.2.5. Nitrate

Les concentrations en nitrate des échantillons varient entre 0 à 137 mg.l⁻¹. Les teneurs en nitrate sont reparties en deux catégories et en cinq classes différentes :

- La première catégorie comprend des valeurs hors norme c'est-à-dire supérieures à la directive de l'OMS de 50 mg.l⁻¹, elle est divisées en deux classes distinctes dont les valeurs supérieure à 100 mg.l⁻¹ considérées comme « classe très mauvaise » qui concerne la zone ZII3 et ZII4, et les valeurs comprises entre 50 et 100 mg.l⁻¹ classée comme « classe mauvaise » où se trouvent la zone ZIII1 et ZIV1. Ces valeurs signifient que l'eau est contaminée. Les ions nitrates proviennent de la dégradation des matières organiques par les microorganismes. Les sources anthropiques d'azote comprennent l'azote du sol, les engrains, les eaux usées, les fosses septiques, les latrines, les déchets d'animaux, les engrains verts et les résidus de plantes. Dans des conditions aérobies, l'azote est finalement converti en nitrate par les bactéries nitrifiantes (Tindall et al., 1995). Cette augmentation de la concentration en nitrates serait liée à l'infiltration des eaux usées, à l'usage d'engrais chimiques à proximité, à la présence de matière organique telle que les matière fécales des fosses perdues, ou à l'enfouissement d'ordure dans le sable ou dans le sol (Mpakam, 2009). Sa forte concentration dans l'eau potable est toxique et provoque le syndrome du « bébé bleu » ou méthémoglobinémie chez les enfants et les carcinomes gastriques (Gilly et al., 1984).
- D'après les résultats obtenus 76,5% des l'échantillons analysés ont de concentration en nitrate inférieur à la norme de l'OMS. Elles sont reparties en trois classe différentes ; les valeurs comprises entre 25 à 50 mg.l⁻¹ appartiennent à la « classe moyenne » et concernent les point de

prélèvement ZII2, ZIII3, ZIV1 et ZV4 ; entre 5 à 25 mg.l⁻¹ se trouve la « classe bonne » qui concerne les zones de ZI2, ZV1 et ZIV3 ; enfin, pour les zones de ZI1, ZI3, ZII2, ZV2 et ZV3, les concentrations en nitrate sont inférieur à 5 mg.l⁻¹ ces valeurs sont dites « excellentes ». Ces faibles concentration de nitrate sont dues à la force de l'écoulement d'eau dans le sous sol car il emporte les polluants infiltrés dans le sol vers les cours d'eau, les rivières et la mer. Même si les valeurs de la concentration en nitrate est inférieure à 50 mg.l⁻¹ l'eau souterraine est encore contaminée par les composés azotés mais en faible quantité.

L'épandage de ces polluants azotés devient critique à l'heure actuelle car ils s'accumulent dans le sous-sol puis leurs teneurs augmentent ils deviennent toxiques. La pollution des eaux souterraines par les composés azotés peut être due de par la nature géologique plus les formations géologiques sont perméables et peu épaisse, plus les concentrations en nitrates dans la nappe sous-jacente sont élevées (Zeraouli, 1993).

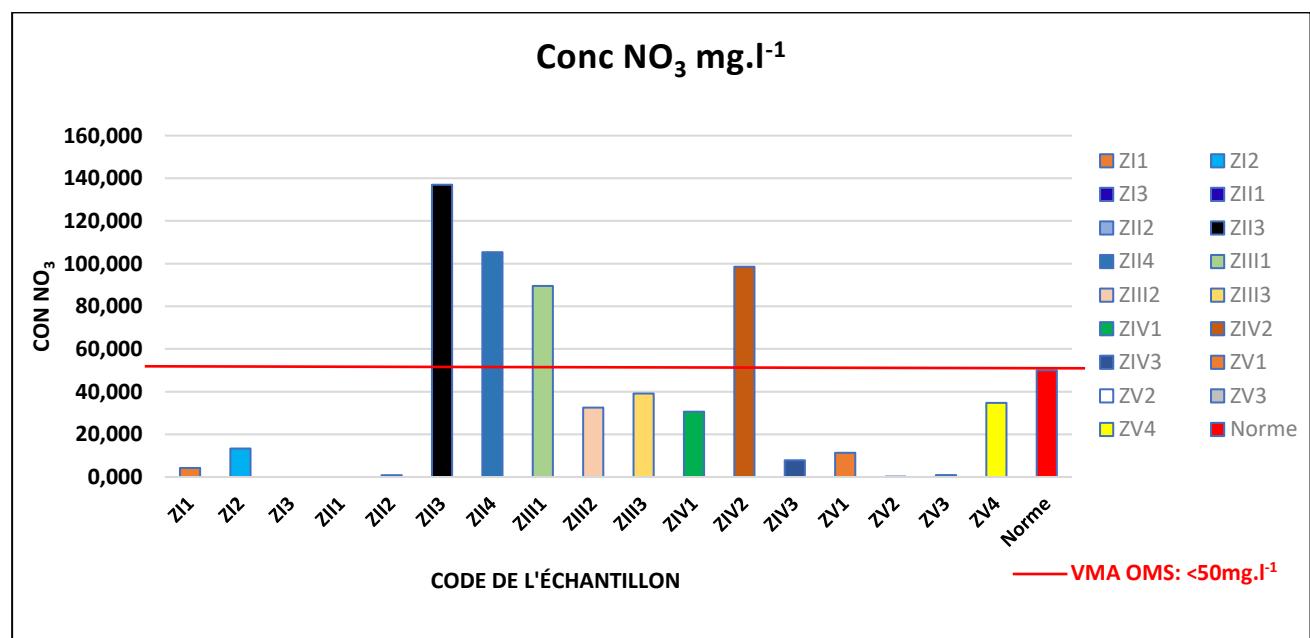


Figure 18: Résultats sur les valeurs de la teneur en nitrate des échantillons.

III.2.6. Nitrite

Les teneurs en nitrites des échantillons varient entre 0.001 à 0,061 mg.l⁻¹. Les nitrites sont tous à l'état de trace dans les eaux analysées et les valeurs sont inférieurs à la norme de l'OMS (0.1 mg.l⁻¹). Ces résultats sont dus à l'influence des formations géologiques de la zone.

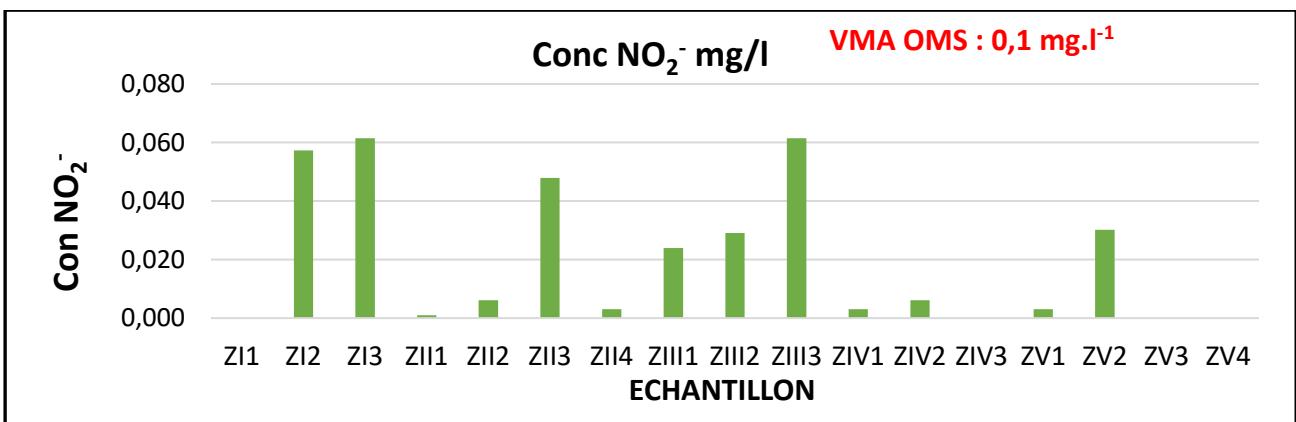


Figure 19 : Représentation de la teneur des ions nitrites en mg.l⁻¹ des échantillons analysés.

III.2.7. Ammonium

Les concentrations en ammoniums des eaux des puits ZI2, ZII1, ZIII2 et ZV4 sont supérieure à la norme de l'OMS ($0,5 \text{ mg.l}^{-1}$) ; les valeurs maximale est de l'ordre de $1,12 \text{ mg.l}^{-1}$. En effet, dans la commune urbaine de Mananara-Nord, la population ne dispose pas d'un système de traitement des ordures ménagères, encore moins d'un système de collecte et de traitement et d'évacuation des eaux usées. De plus, beaucoup des latrines sont situées à une distance non conforme à la norme recommandée par l'OMS (15 m entre une latrines et un puits). La mauvaise gestion des ordures ménagères et des eaux usées, la contamination du sol par les excréta humains, le non-respect de la distance entre les latrines et les puits provoquent les fortes teneurs en ammonium de l'eau et en certains éléments chimiques (nitrites, fer, manganèse) qui sont tous des signes pollution.

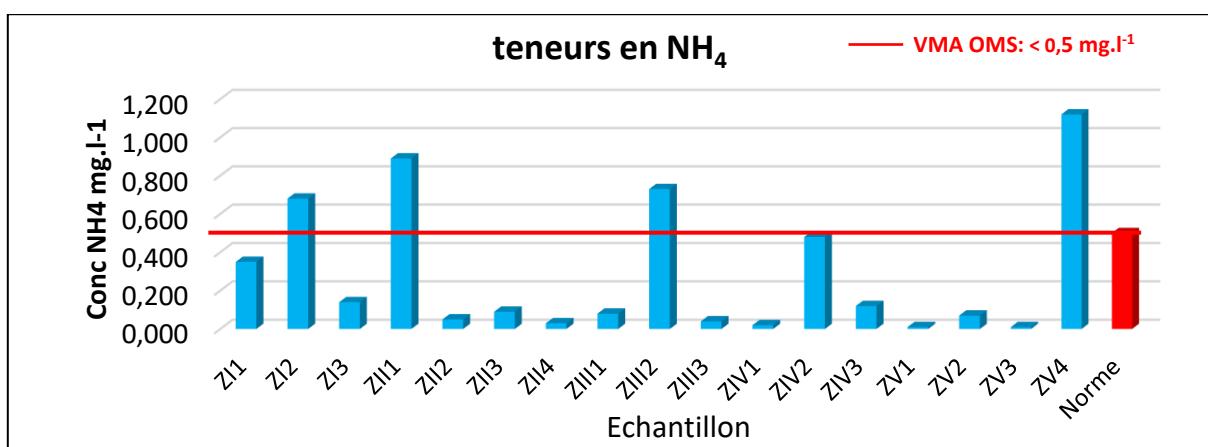


Figure 20 : Représentation de la teneur des ions ammonium des échantillons analysés.

III.3. Simulation numérique

III.3.1. Simulation d'un écoulement souterrain dans un aquifère à nappe libre

La nappe libre est à substratum verticale (ou incliné), La solution analytique pour ce problème est donnée par l'équation de la ligne piézométrique III-1 (Chapuis, 2002).

$$P = \sqrt{p_0^2 + (p_L^2 - p_0^2) \frac{x}{L}} \quad III-1$$

$$Ve = k \frac{p_L^2 - p_0^2}{x \cdot p \ln \frac{L}{r}} \quad II-2$$

Où : P : Charge hydraulique ; p_0 et p_L : hauteurs piézométriques en haut ; L : longueur de la nappe ; l : largeur de la nappe (constant)

Pour valider ce modèle, les dimensions de la nappe utilisées sont : L varie entre 2 à 20 m, l=9 m, $p_0=2,5$ m et $p_L=8$ m, avec dx=2 m et dy = 0.5 m. La perméabilité (k) est de 0,001 m.s⁻¹, le coefficient d'emmagasinement (S) est égal à 0,08. La simulation a été réalisée par deux essais et en combine les résultats obtenus pour modéliser la simulation des vitesses d'écoulement. Le pas de temps est de 0,25 s. Pour cette application on a adopté $\theta = 0,025$ (temps séquentiel).

Les figures (23, 24, 25) représentent les niveaux piézométriques de la nappe une fois que le régime permanent est établi par les deux méthodes numérique et analytique. La vitesse d'écoulement est montrée sur les figures (26, 27). Les figures montrent une petite différence entre les deux courbes obtenues par la solution analytique et la solution numérique. Cette différence est due aux paramètres de perméabilité et au coefficient d'emmagasinement dans l'établissement de la solution analytique.

Les paramètres ont un rôle important dans l'écoulement des eaux souterraines. La différence peut être également due aux erreurs de discréétisation de la méthode numérique. Une décroissance de la vitesse est constatée sur la figure (25, 26), elle est due au gradient hydraulique. Cette diminution de la vitesse montre que l'écoulement des polluants se ralentie et cumulative par rapport au temps. Les polluants s'infiltrent dans le sol par le phénomène de précipitation et/ou ruissellement ; elles sont emportées par l'eau par le mouvement de convection, dispersion et diffusion. Ainsi qu'elles arrivent aux nappes souterraines.

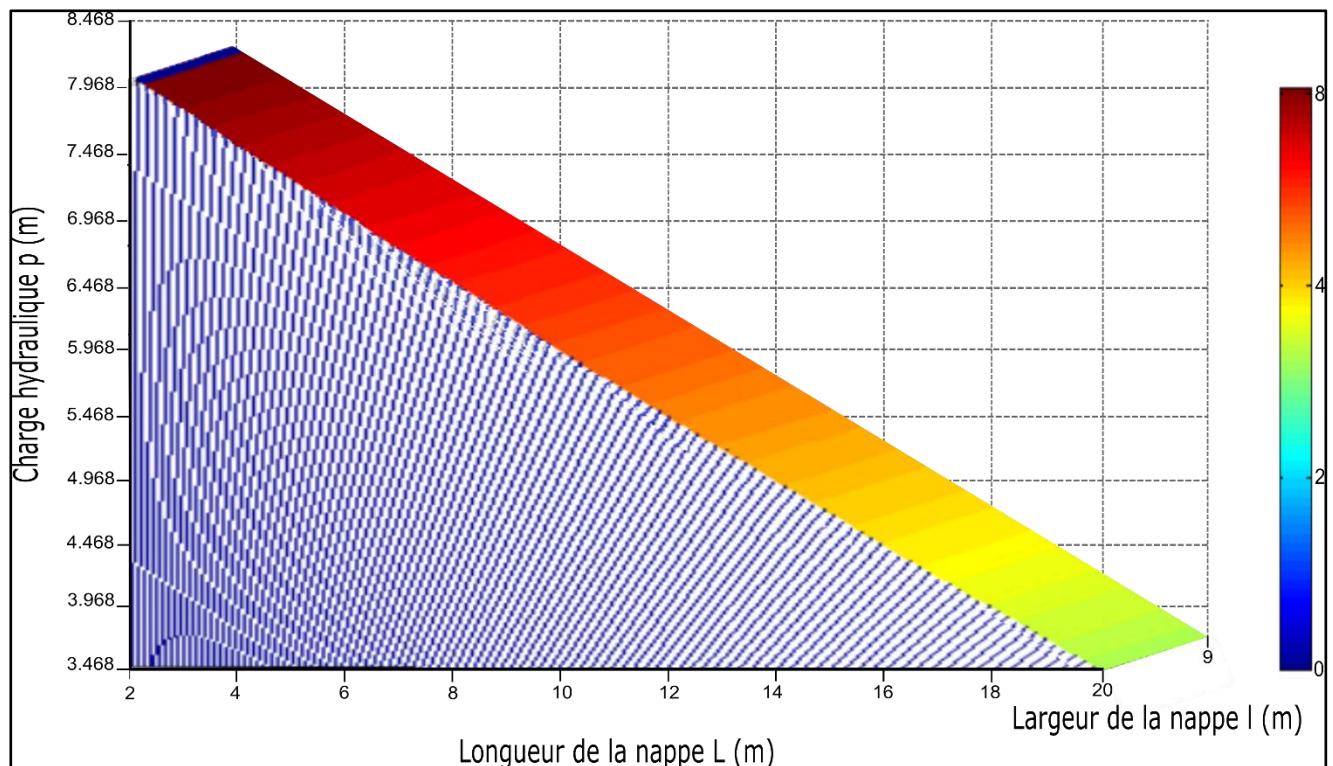


Figure 21: Niveau piézométrique numérique de la nappe.

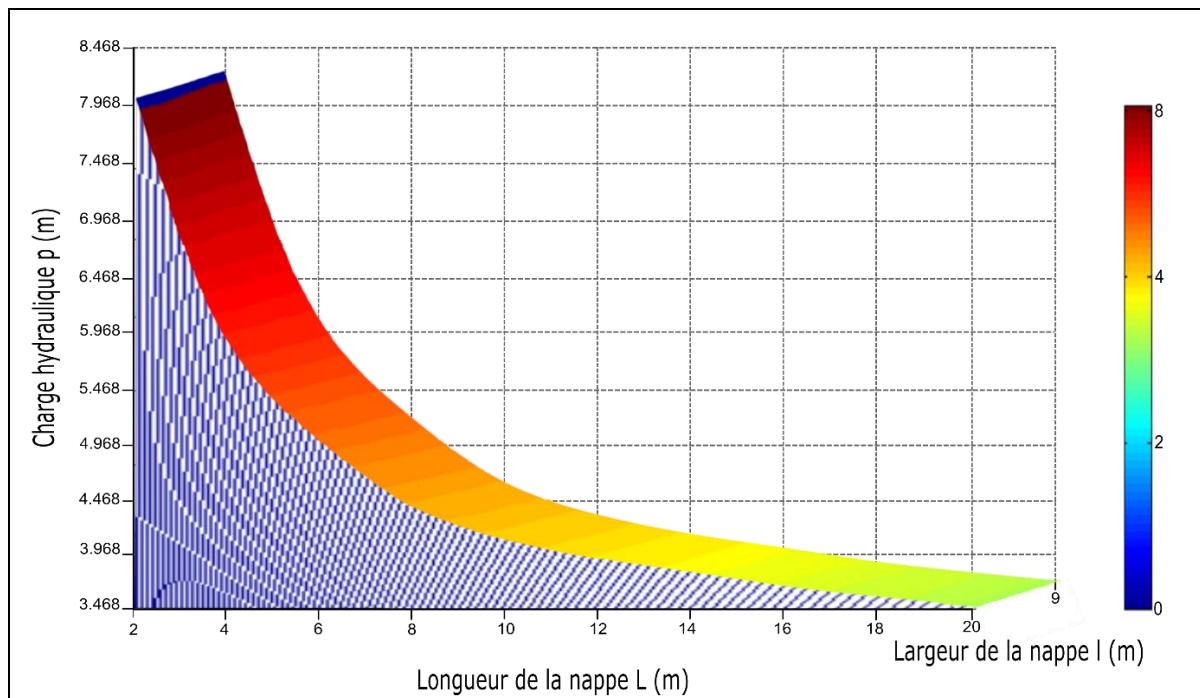


Figure 22: Niveau piézométrique analytique de la nappe.

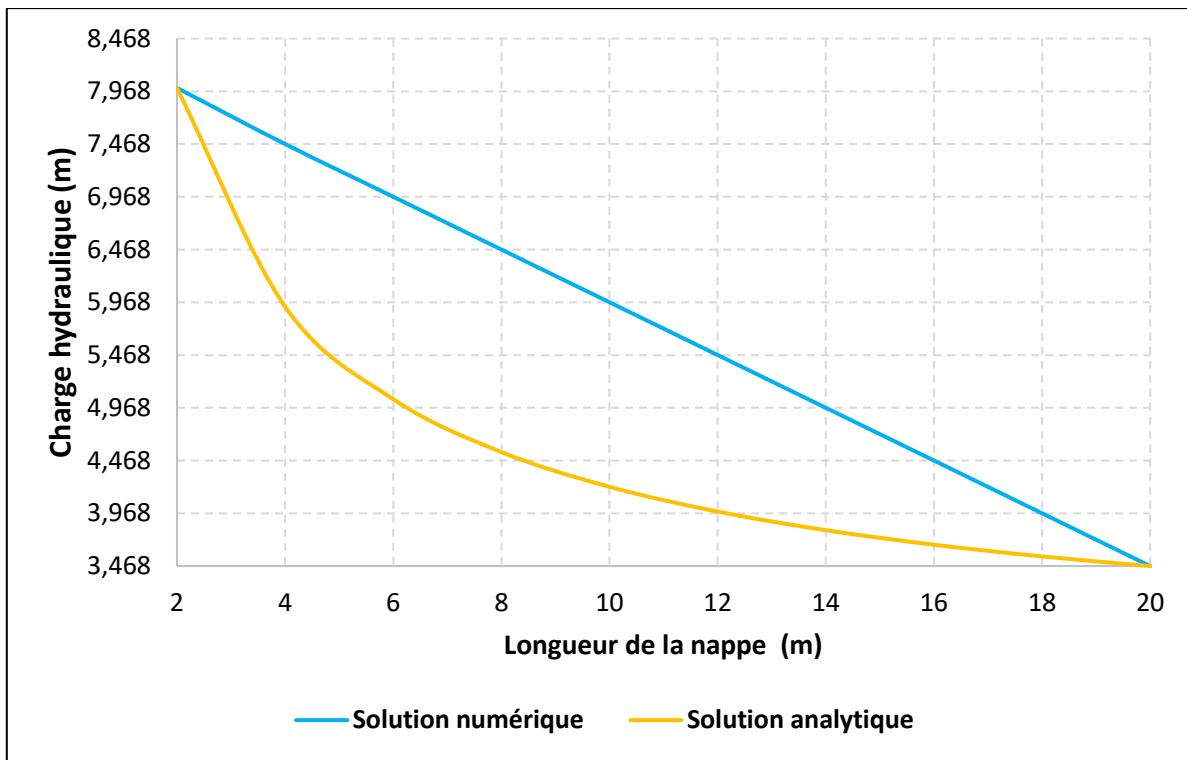


Figure 23: Niveaux piézométriques le long de la nappe obtenus par les méthodes analytique et numérique.

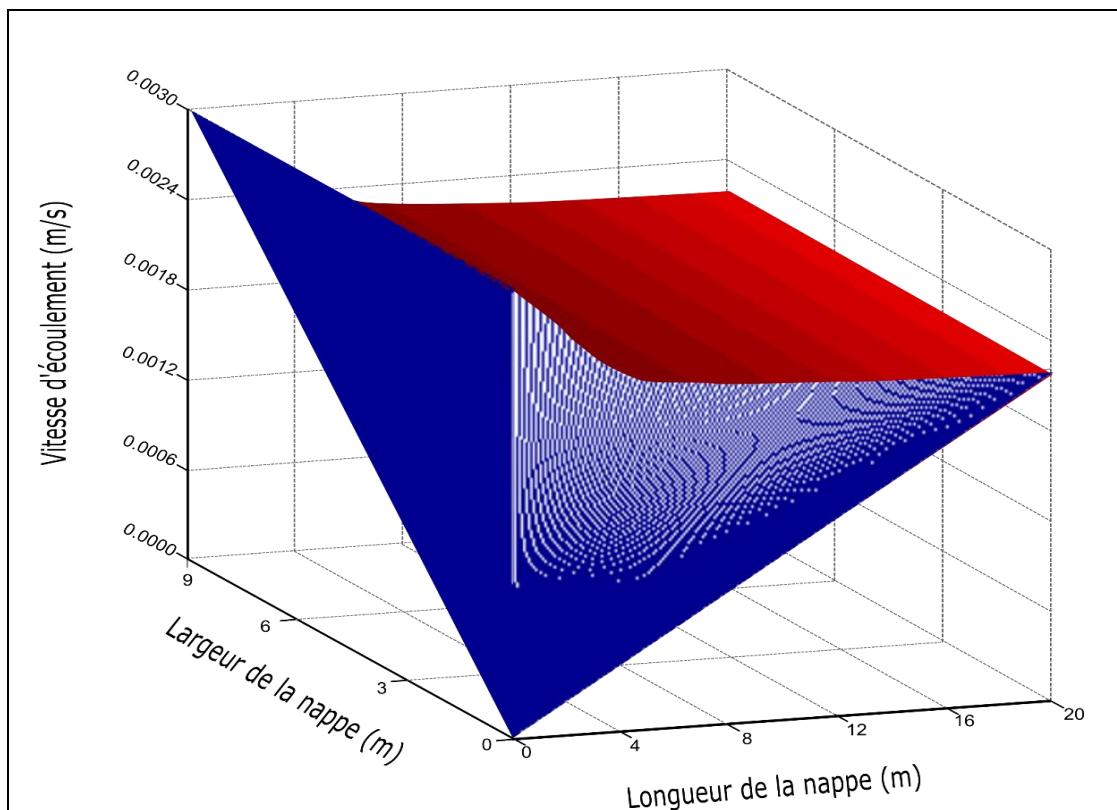


Figure 24: Représentation en 3D de la vitesse d'écoulement de la nappe libre.

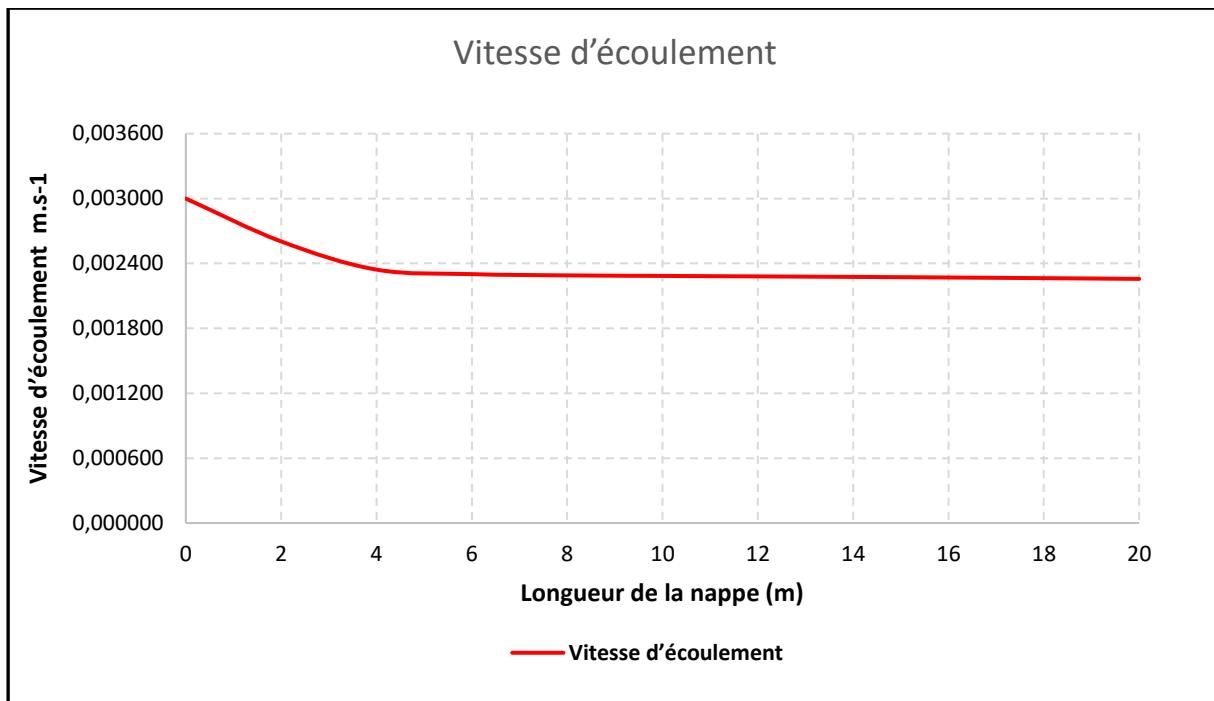


Figure 25: Représentation en 1D de la vitesse d'écoulement de la nappe libre.

III.3.2. Simulation de transport des polluants dans un aquifère à nappe libre à partir de MODFLOW

La modélisation du transport des eaux souterraines est un outil important pour l'élaboration d'une proposition des mesures de protection basées sur l'application de la modélisation numérique. Il est utilisé pour une évaluation de la pollution des eaux souterraines et des voies de migration des polluants vers les puits, et pour la prévision de son devenir et de ses impacts futurs. (Rapantova et al., 2017):

- Modélisation préliminaire du débit et du transport centrée sur la palier de la plaine fluviale de la rivière : identification et quantification des sources de pollution, prévision du niveau de menace pour les ressources en eaux souterraines, test des alternatives de protection (en mettant l'accent sur d'éventuelles mesures de protection passive) ; identification des lacunes, des incertitudes, et des informations ; spécification des tâches et des problèmes à résoudre.
- Validation du modèle hydraulique de la plaine fluviale sur le deuxième ensemble de données mesurées.
- Poursuite du développement du modèle de transport sur la base des résultats d'une nouvelle campagne d'échantillonnage : développement du modèle de transport de palier en plaine fluviale (inclusion d'un paquet de réaction), mise en place d'un modèle de la palier supérieure

rélié au modèle de palier en plaine par la limite commune état, test de l'apport de pollution par le palier supérieur, alternatives de dépollution.

- Élaboration de critères pour une approche coordonnée de la protection des ressources en eaux souterraines de Mananara-Nord : proposition et test de solutions de recharge d'atténuation, proposition d'alternative pour un système de surveillance.

L'étude reposait sur l'exploitation cohérente des données existantes (tableau 35, annexe 6). Un assemblage d'une grande quantité de matériaux et d'informations sur les conditions géologiques et hydrogéologiques de la zone concernée, dont les analyses physico-chimiques réalisée, a été effectué avant la mise en place des modèles numériques. La base de données contient également des informations sur les résultats des échantillonnages de sol et d'eau souterraine qui ont été analysés. Les résultats des concentrations de nitrate et d'ammonium sont cohérente l'un de l'autre. L'emplacement des domaines du modèle est présenté sur les figures ci-dessus.

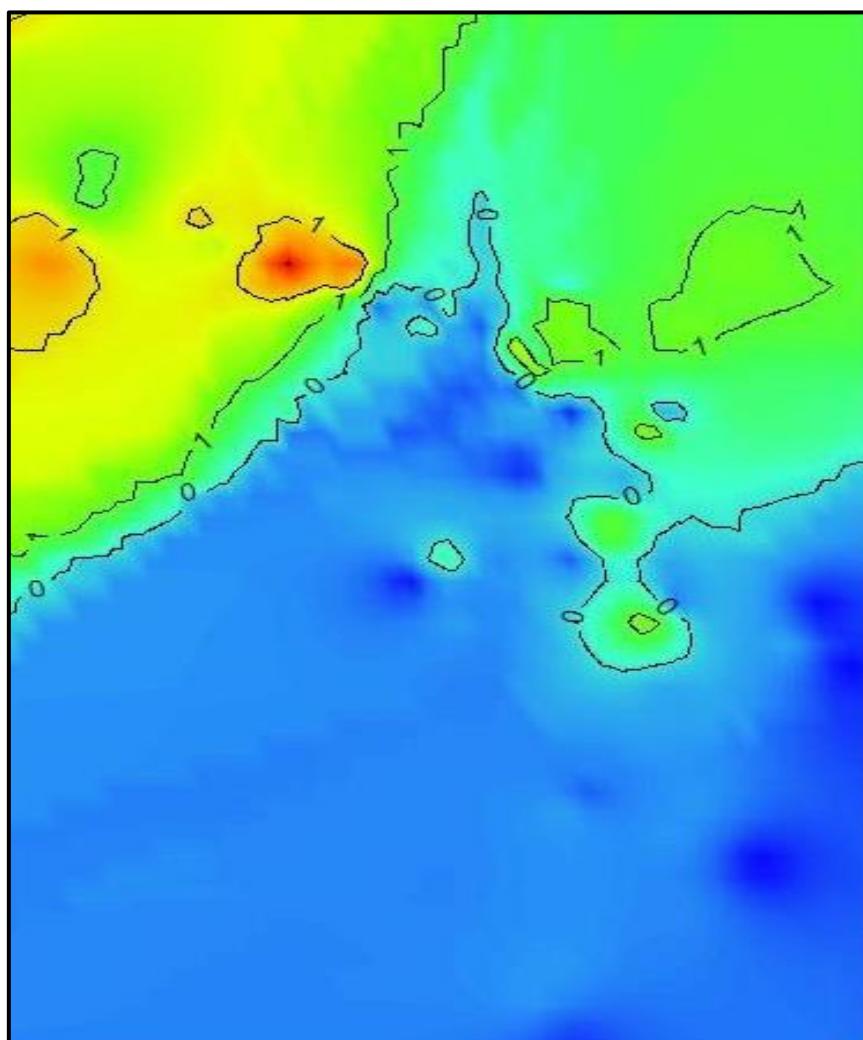


Figure 26 : Carte topographie de la distribution de la teneur en ammonium vue en 2D.

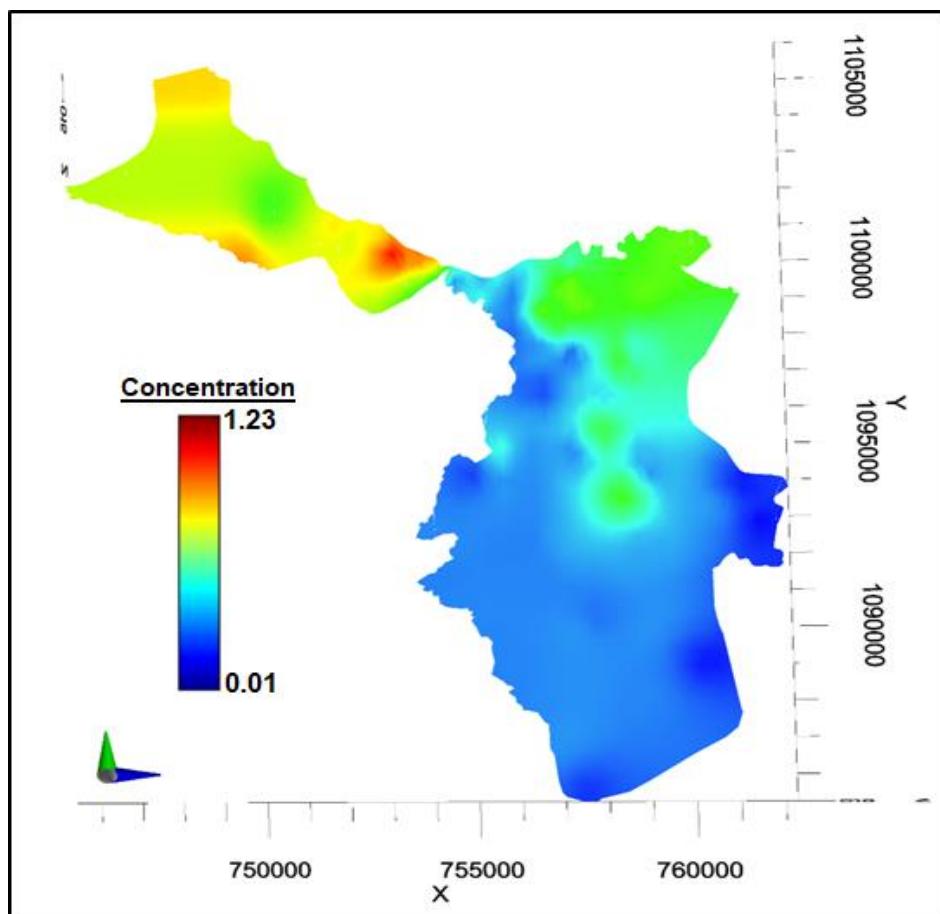


Figure 27 : Carte de la distribution de la concentration en ammonium vue en 3D.

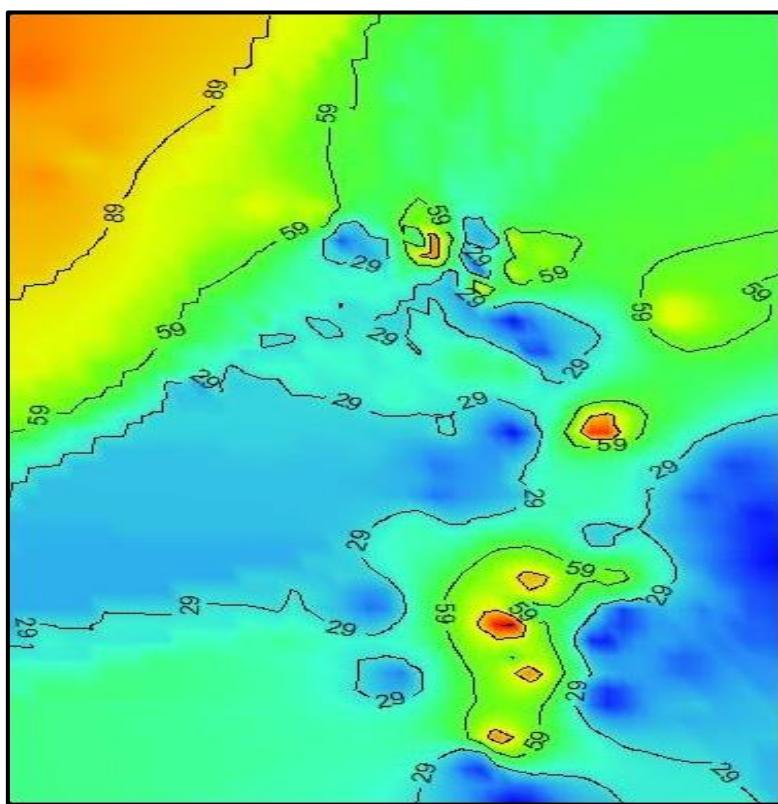


Figure 28 : Carte topographie de la distribution de la teneur en Nitrate vue en 2D

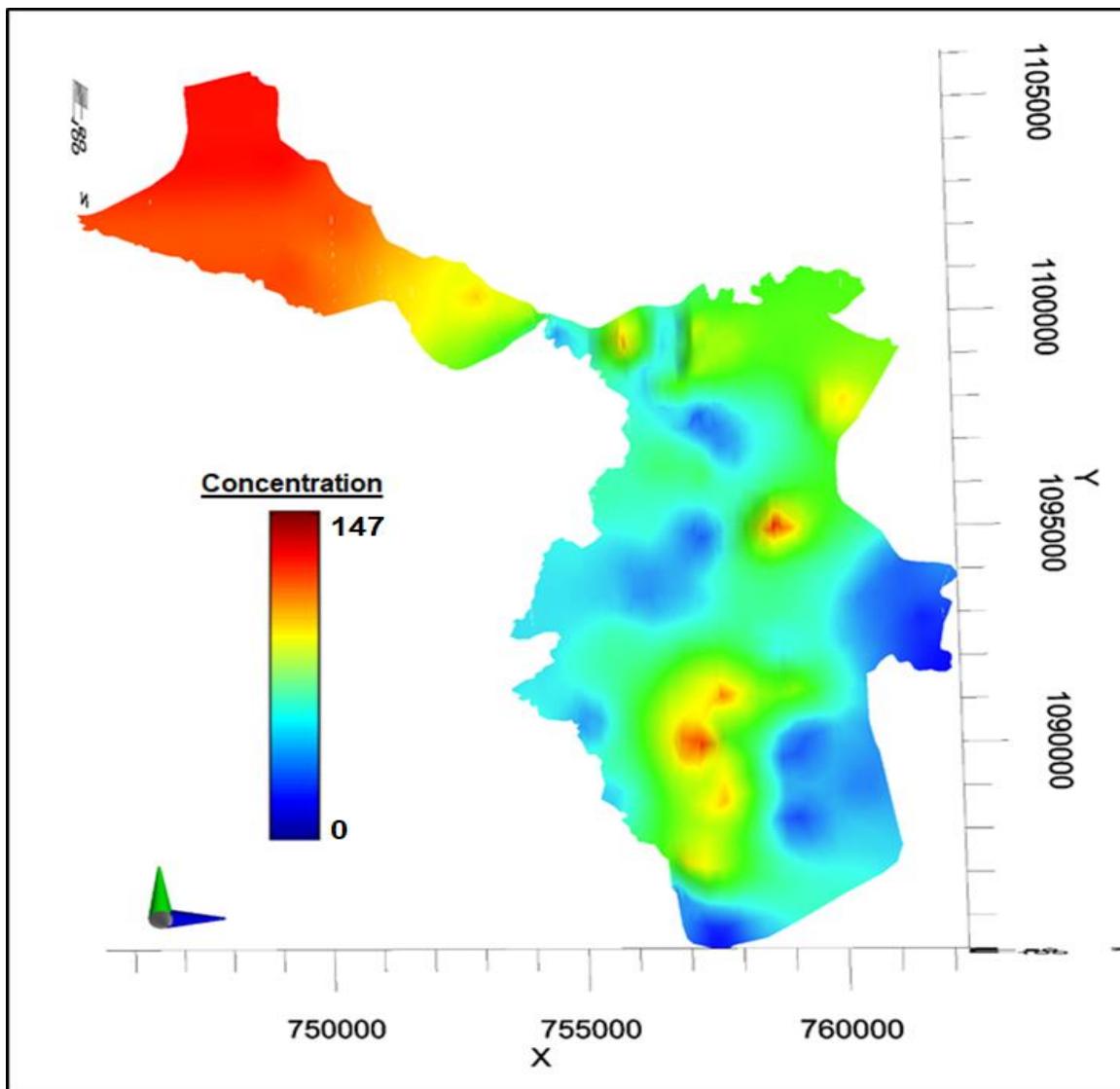


Figure 29: Carte de la distribution de la concentration en Nitrate vue en 3D.

III.4. Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques de la méthode SINTACS

Le calcul et la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de la commune urbaine de Mananara-Nord ont été réalisés par la méthode SINTACS et à l'aide du logiciel « Visual MODFLOW flex 2015.1 ». Les étapes de l'élaboration de la carte de vulnérabilité comprennent : la collecte des données, la numérisation des données, le calcul des scores, l'attribution des scores pondérés, le calcul de l'indice de vulnérabilité, l'élaboration de la carte indice de vulnérabilité , la classification et l'élaboration de la carte de vulnérabilité (Rafarandrainy, 2016). La carte obtenue à partir du MODFLOW est calée sur ArcGIS, pour avoir des cartes bien ordonnées.

III.4.1. Paramètre profondeur de la nappe « S »

Les indices partiels calculés ont permis de créer la carte des profondeurs qui est constituée de cinq zones distinctes, dont l'indice le plus élevé est égal à 50 (dans la zone littorale, au centre-ville et presque dans tout le sous bassin versant Nord), l'indice 45 est localisé presque dans la zone où on trouve beaucoup de rizières, l'indice 40 dans la partie Nord-Est et au centre-Nord du sous bassin versant Sud, l'indice 25, au Nord-ouest et au centre-Nord du sous bassin versant Sud, et l'indice 20 est dans la zone externe au Sud du sous bassin versant Sud.

Tableau 18: Indice partiel du paramètre « S ».

Intervalles	Cotes	Scénario: Impact	Poids	Indice partiel
0 - 1,3	10	Normal / Sévère	5	50
1,3 – 2,6	9	Normal / Sévère	5	45
2,6 – 3,9	8	Normal / Sévère	5	40
8,2 – 10,8	5	Normal / Sévère	5	25
10,8 – 16,5	4	Normal / Sévère	5	20

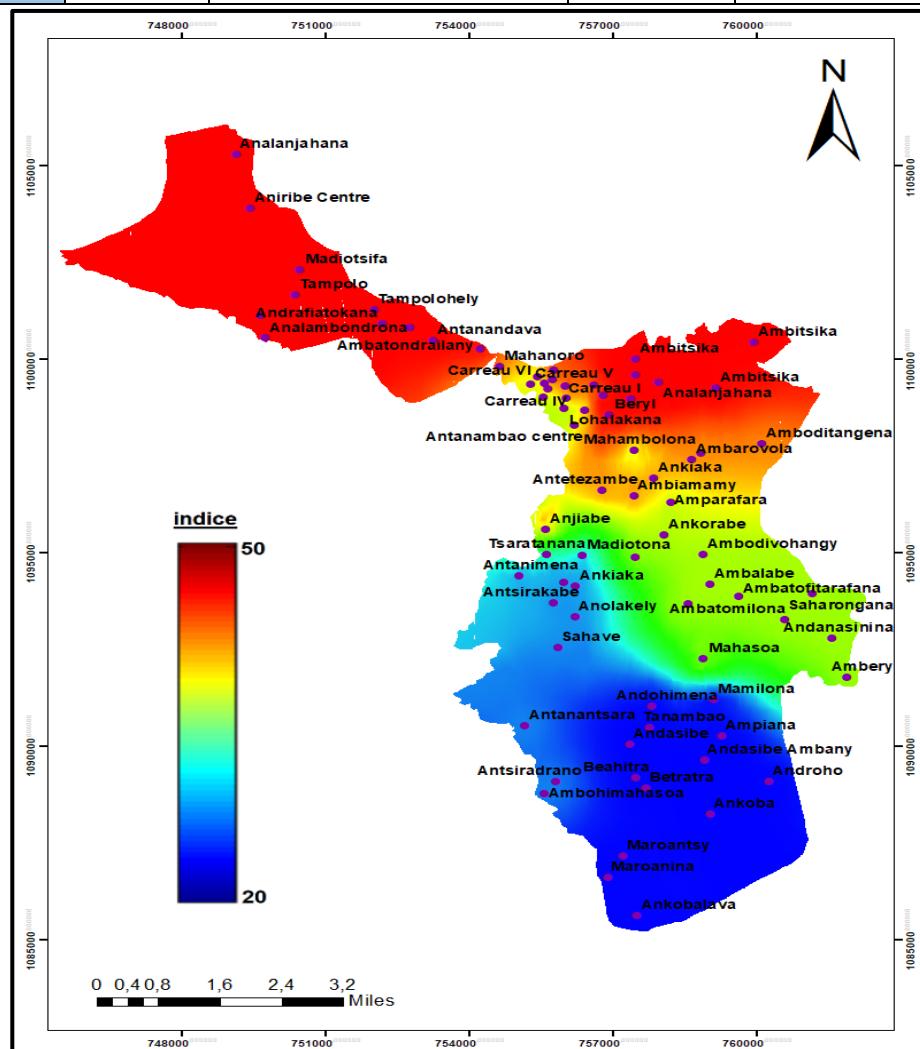


Figure 30: Carte du paramètre « profondeur du nappe (S) ».

III.4.2. Paramètre d'infiltration « I »

Ce paramètre a permis de mettre en évidence deux zones reparties en fonction des scénarios de la méthode SINTACS : la première zone a pour indice 32 où le scénario a un impact normal et dans la deuxième zone, l'indice est égal à 40 où le scénario est impact sévère.

Tableau 19: Indice partiel du paramètre « I ».

Intervalles	Cotes	Scénario: Impact	Poids	Indice partiel
≥ 251	10	Normal	4	40
		Sévère	5	50

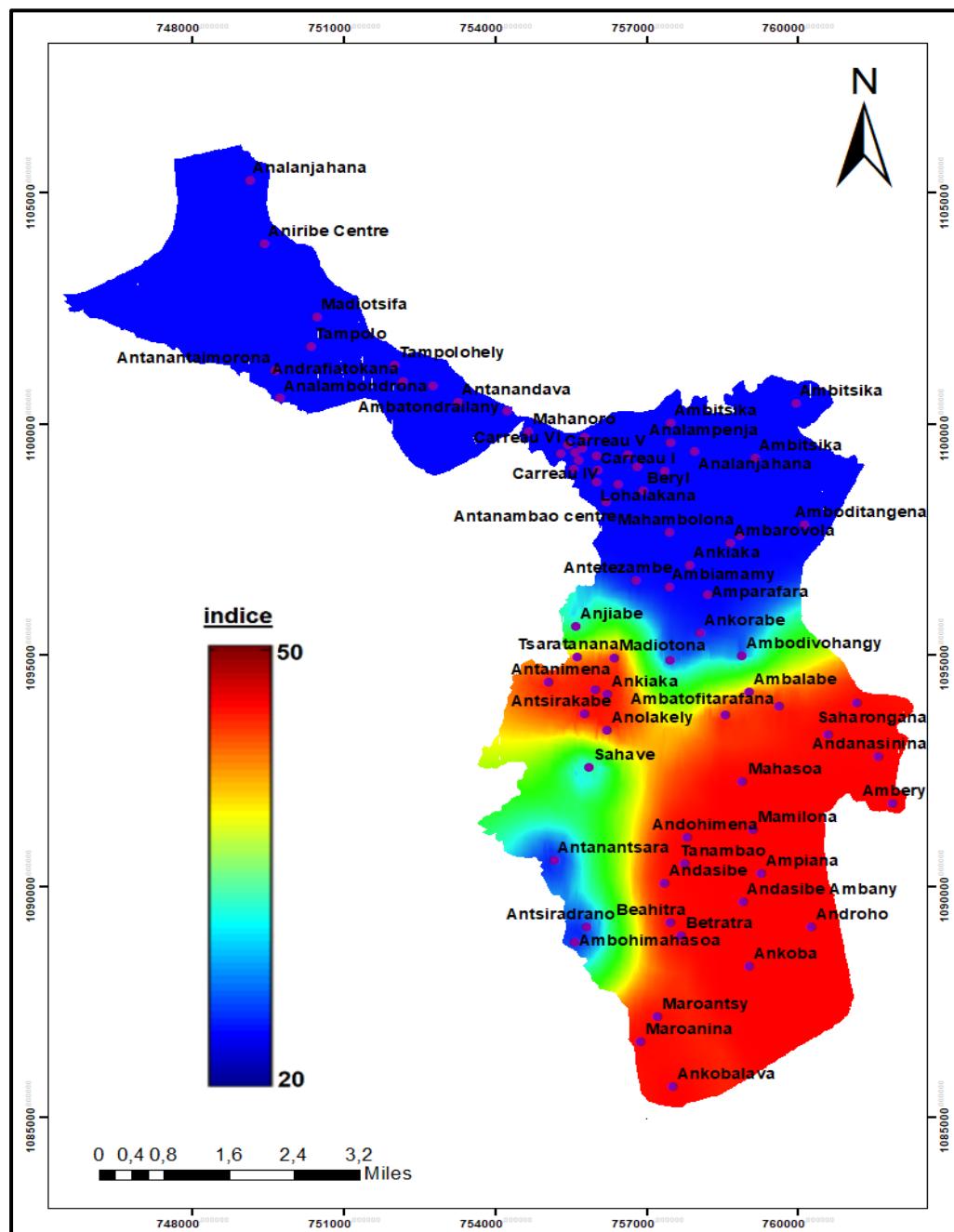


Figure 31: Carte du paramètre d'infiltration « I ».

III.4.3. Paramètre de zone non saturée « N »

Avec ce paramètre on a pu diviser la région en trois zones en fonction du scenario : la première zone est caractérisée par les dépôts alluviaux grossiers, elle est divisée en deux sous-zones : l'une est avec un indice égal à 40 et un impact normal tandis que l'autre est avec un indice égal à 32 et un l'impact sévère. La deuxième zone comprend des formations complexes sableuses et divisée également en deux sous-zone : la sous-zone à indice 35 correspond à l'impact est normal et pour l'impact sévère l'indice égale à 28. La troisième zone est caractérisée par des Grés-conglomérats comprend en deux sous-zone : indice 20 pour l'impact normal et indice 16 pour l'impact sévère.

Tableau 20: Indice partiel du paramètre « N ».

Nature de la zone	Cotes	Scénario: Impact	Poids	Indice partiel
Dépôt alluviale grossier	8	Normal	5	40
		Sévère	4	32
Complexe sableux	7	Normal	5	35
		Sévère	4	28
Grés-conglomérats	4	Normal	5	20
		Sévère	4	16

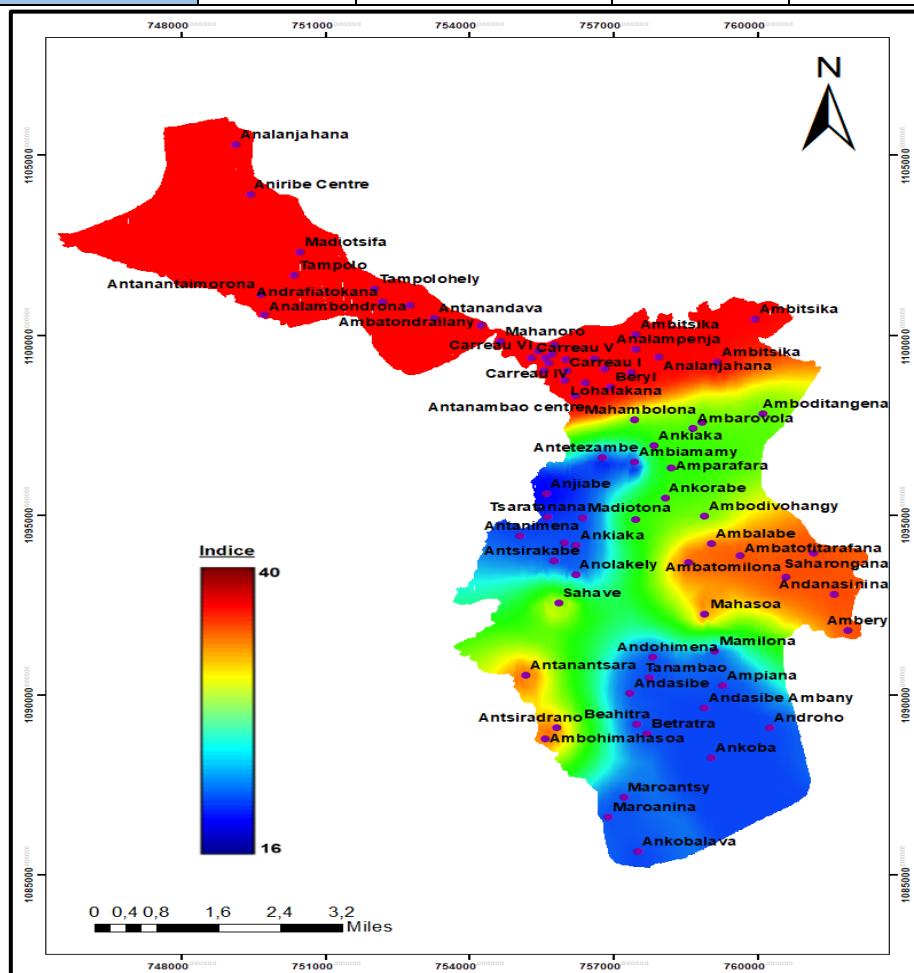


Figure 32: Carte du paramètre « impact de la zone non saturée (N) ».

III.4.4. Paramètre texture du sol « T »

L'étude pédologique de la région a montré une grande différence dans les textures des sols en fonction du scenario. Le calcul du paramètre texture du sol a permis de distinguer trois zones différentes : dans la première zone, les sols sont sableux, l'indice partiel est égal à 32 où scénario est impact normal ; pour la deuxième zone, les sols sont formés de limon, de schiste et de sable l'indice est égal à 30 et l'impact est sévère ; pour l'indice égale à 24, l'impact est normal. Enfin, dans la troisième zone, les sols sont limono-terreux, l'indice est 15 pour l'impact normale et 12 pour l'impact sévère.

Tableau 21: Indice partiel de paramètre « T ».

Nature de sol	Cotes	scénario: impact	Poids	Indice partiel
Sol sableux	8	Normal	4	32
Limon-schiste-sable	6	Normal	4	24
		Sévère	5	30
Limono-terreux	3	Normal	4	12
		Sévère	5	15

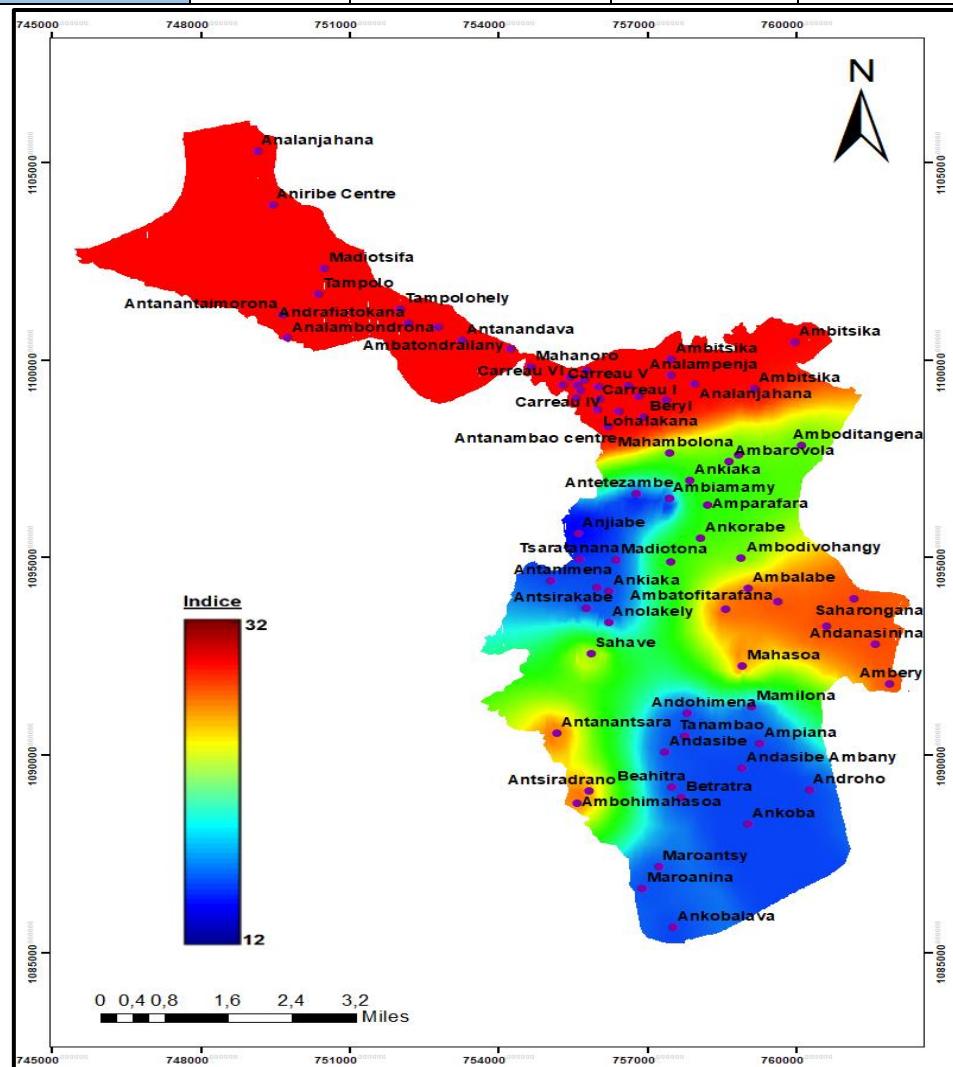


Figure 33: Carte du paramètre « texture de sol (T) ».

III.4.5. Paramètre de type d'aquifère « A »

L'indice partiel de ce paramètre a permis de distinguer trois zones importantes : les formations d'alluvions grossières avec un indice égal à 24, les complexes sableux dont l'indice est de l'ordre de 21, et les formations des grés-conglomérats où l'indice est 12, comme montre la figure 36.

Tableau 22: Indice partiel du paramètre « A ».

Nature d'aquifère	Cotes	Scénario: impact	Poids	Indice partiel
Alluvion grossier	8	Normal / Sévère	3	24
Complexe sableux	7	Normal / Sévère	3	21
Grés-conglomérats	4	Normal / Sévère	3	12

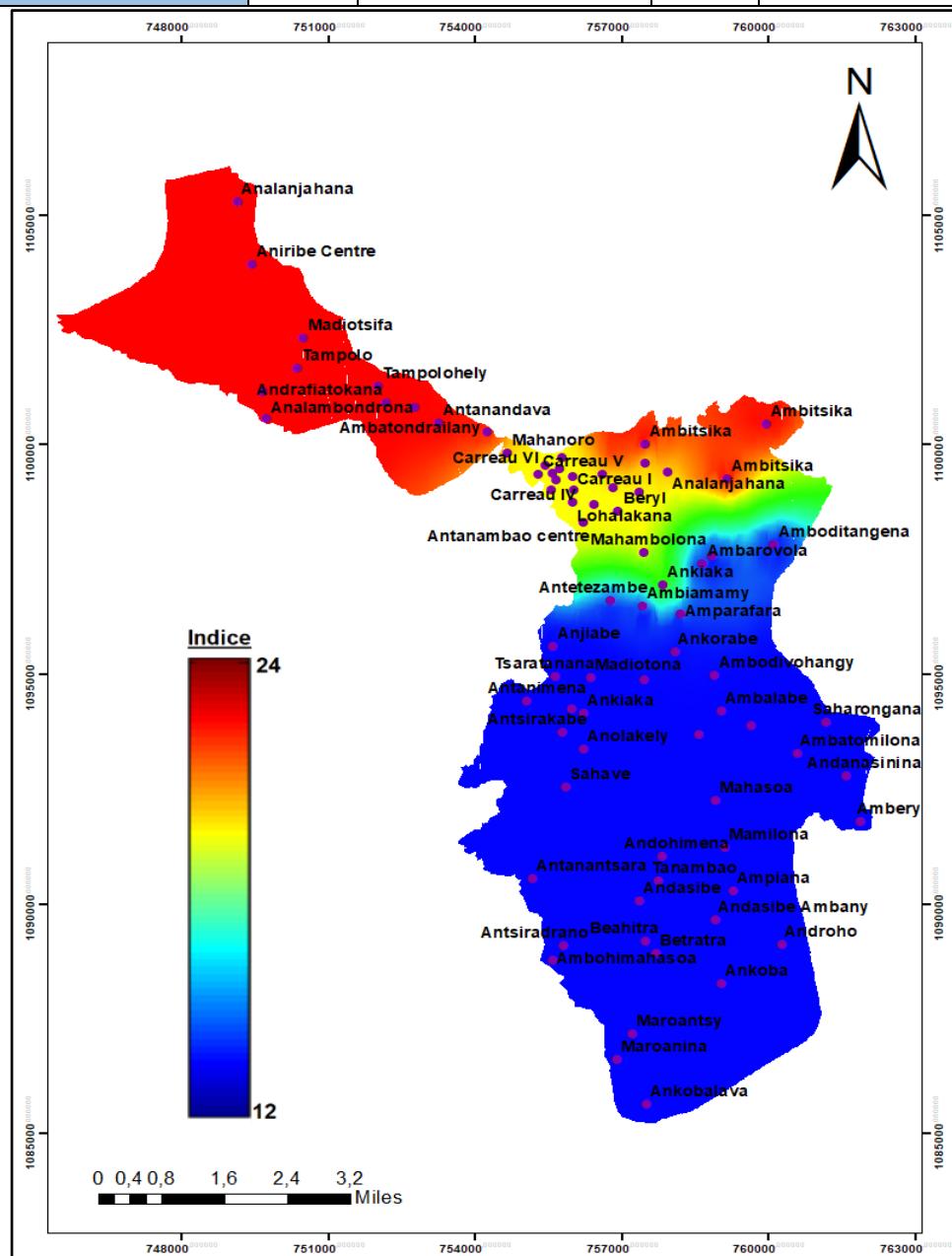


Figure 34: Carte du paramètre « type d'aquifères (A) ».

III.4.6. Paramètre conductivité hydraulique « C »

La conductivité hydraulique est en type de la nappe du grès et en fonction du scénario, montrent deux zones différentes. L'indice partiel est 21 pour l'impact normal (dans la zone de sous bassin versant Nord) et l'indice partiel 14 pour l'impact sévère (pour le sous bassin versant Sud).

Tableau 23: Indice partiel du paramètre « C ».

Rang	Cotes	Scénario: Impact	Poids	Indice Partiel
Grés	7	Normal	3	21
		Sévère	2	14

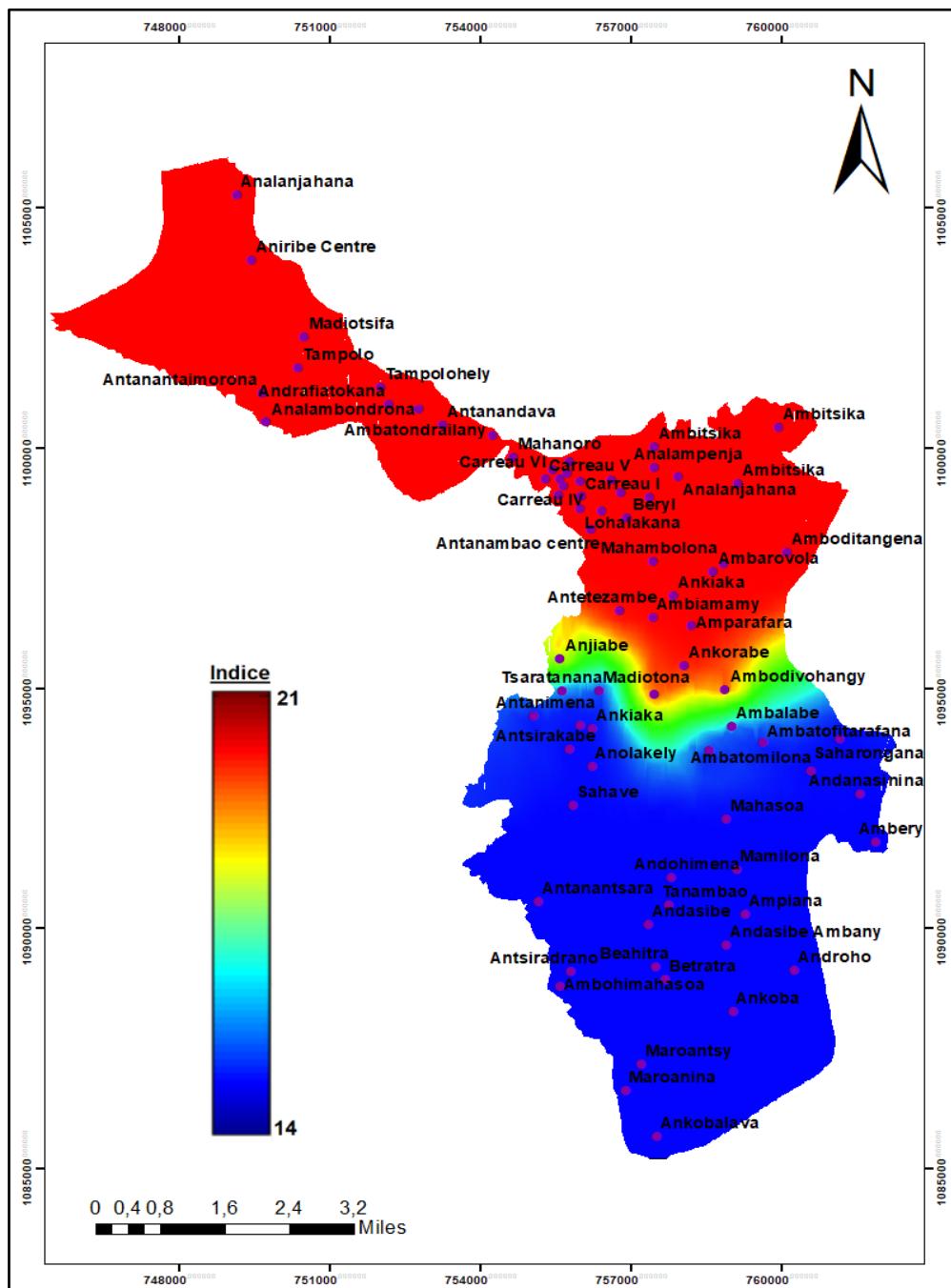


Figure 35: Carte du paramètre « conductivité hydraulique (C) ».

III.4.7. Paramètre topographie « S »

Avec ce paramètre, la région a pu être divisée en deux zones topographiques en fonction du scénario. La première zone a pour l'indice 14, la pente varie entre 6 et 10% et l'impact est normal et la deuxième pente varie entre 11 et 20%, l'indice est estimé à 10 et l'impact est sévère.

Tableau 24: Indice partiel du paramètre « S ».

Rang	Cote	Scénario: Impact	Poids	Indice Partiel
6-10	8	Normal	2	16
11-20	5	Sévère	2	10

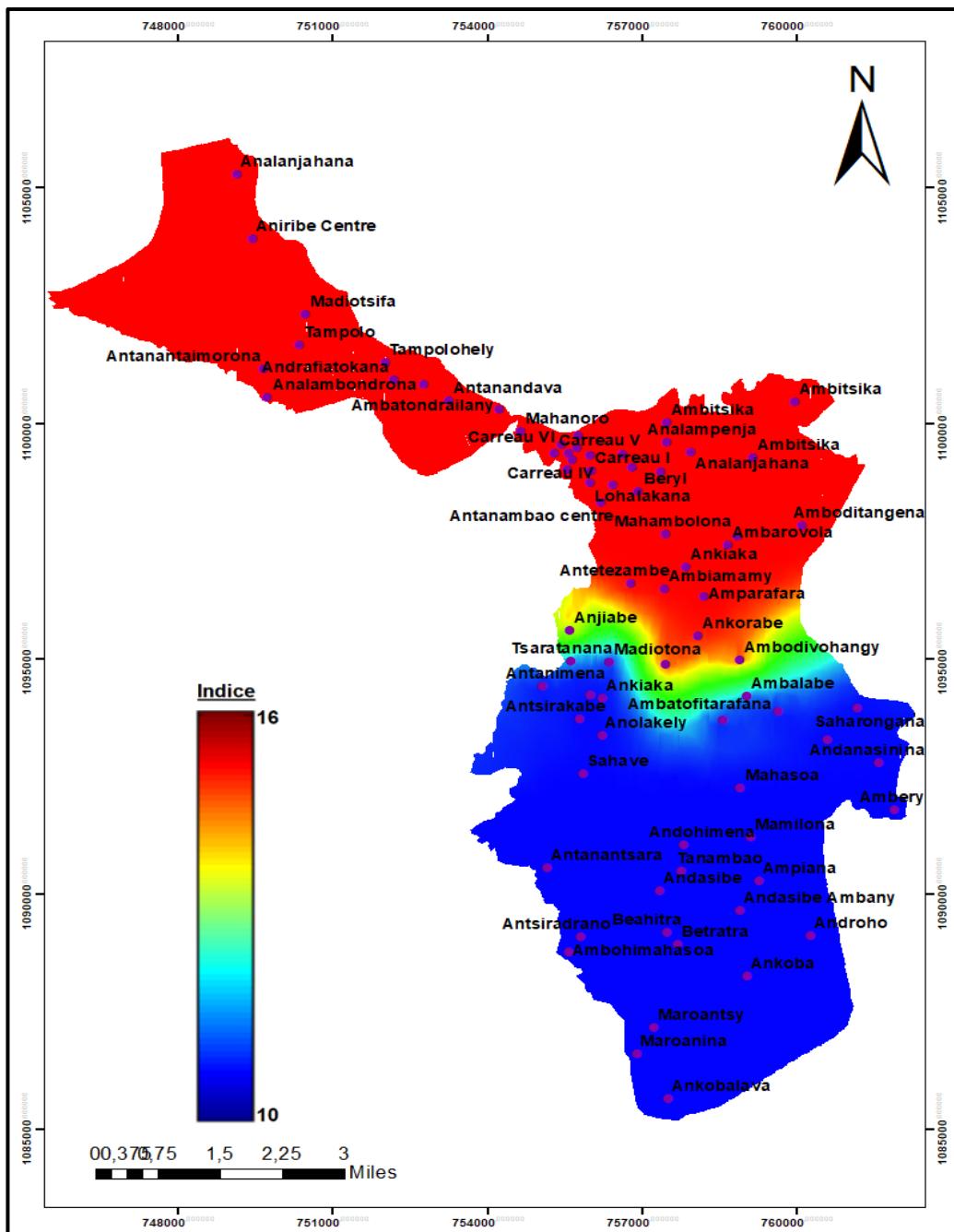


Figure 36: Carte du paramètre « topographie (S) ».

III.4.8. Calcul de l'indice SINTACS général

L'amoncellement des sept cartes créées et l'application de l'équation de l'indice SINTACS général nous ont permis de tracer la carte finale de vulnérabilité. Le tableau 35 en Annexe 5 montre les résultats du calcul de l'indice de vulnérabilité générale selon SINTACS qui est donné par la formule :

$$IS = (Sc.Sp) + (Ic.Ip) + (Nc.Np) + (Tc.Tp) + (Ac.Ap) + (Cc.Cp) + (Sc.Sp).$$

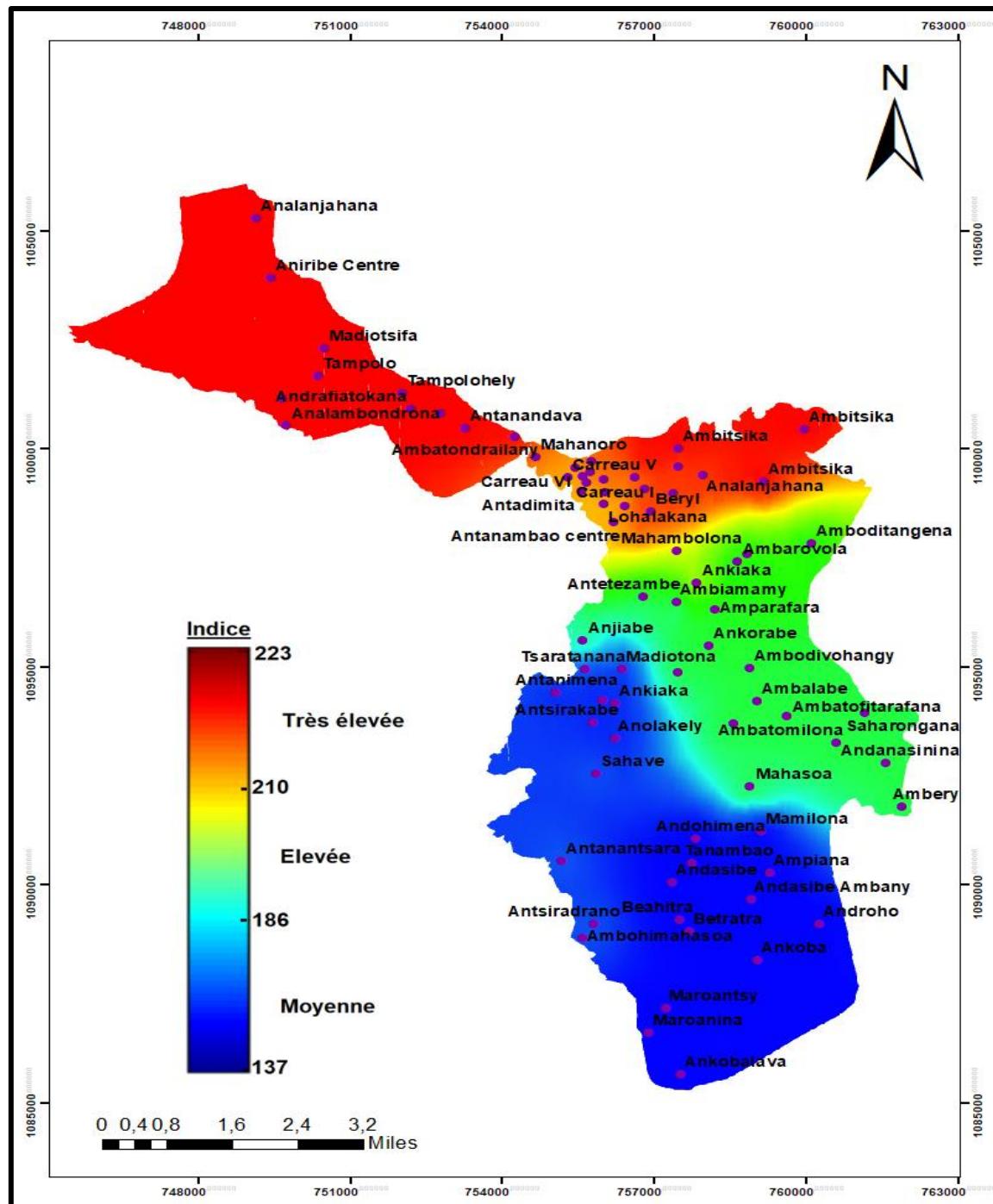


Figure 37: Carte de vulnérabilité à la pollution de la commune urbaine de Mananara-Nord.

La création de la carte de vulnérabilité s'est reposée sur le raisonnement de l'indice de vulnérabilité qui intègre les sept paramètres. Les indices SINTACS remportés varient entre 137 à 223. Elle nous montre trois grandes classes différentes : une classe moyenne, une classe élevée et une classe très élevée.

- **La classe moyenne** : représente 40,25% de la superficie de la zone cartographiée ; la vulnérabilité dont pollution est moyenne. Les profondeurs de la nappe sont relativement élevées et varient entre 5 et 20 m, la pente oscille entre 11 à 20 %. Cette concerne la zone de sous bassin versant Sud , se localise dans le fokontany Antsiratenina , Andasibe, Sahave, Androrangavola.
- **La classe élevée** : représente 26,53% de la superficie de la commune urbaine de Mananara-Nord. Elle possède de vulnérabilité de la pollution élevée. Les profondeurs de la nappe sont faibles et varient entre 2 à 4 m, dont la pente est environ 6 à 10% . Elle se trouve presque dans le sous bassin versant Nord. Se trouve dans les fokontanyAntetezambe, Amboditangena, quelque partie de Mahambolona, Madiotona, Ambatofitarafana, Ambatomilona :
- **La classe très élevée** : dont il représente 33,22% de la superficie de la zone.Où la vulnérabilité est forte en pollutions. Les profondeurs de la nappe sont faible ou peu profonde et varient entre 0 à 2 m, dont la pente est environ 6 à 10% . Elle se trouve dans le sous bassin versant Nord.

Les concentrations en nitrates et ammoniums des eaux souterraines présentées sur les figures 29 et 31 montrent une empreinte anthropogénique claire des eaux souterraines. Les concentrations sont supérieures à la limite standard de l'OMS de 50 mg.l^{-1} de nitrate et $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$ d'ammonium. Les concentrations les plus élevées sont trouvées presque dans la zone littorale et peu profonde du sous bassin versant Nord. Les résultats sur les nitrates sont en bon accord avec les résultats de (Erostate et al., 2018) qui ont clairement mis en évidence une contamination par les nitrates dans l'aquifère ont également montré que les concentrations de nitrates les plus élevées dans l'aquifère peuvent en grande partie être attribuées aux activités anthropiques et agricoles de ces dernières années. Par contre les concentrations en nitrate et en ammonium sont relativement faibles dans le sous bassin versant Sud.

La contamination des eaux souterraines modernes souligne que les pratiques de gestion en cours visant à réduire la pollution de surface par les nitrates et ammoniums ; ces polluants s'infiltrent dans le sol jusqu'à la nappe et qu'ils progressent dans les parties « anciennes » de l'aquifère, indique la faible capacité d'auto-assainissement du système.

Ce zonage géographique est en accord avec les cartes de vulnérabilité de la figure 37. En effet, les sites d'échantillonnage présentant des concentrations de NO_3^- et NH_4^+ (tableau 36, Annexe 6), où les concentrations les plus élevées se situent dans les classes de vulnérabilité très élevée et élevée, tandis que les faibles concentrations se coïncident dans la classe moyenne. Ces indices sont obtenus à partir de l'occupation des sols superficiels. Ces résultats sont dus par la nature géologique (en générale graphites et granitistes), la nature du sol (grès, sableux et alluviaux) et l'occupation du sol à la surface.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

CONCLUSION GENERALE

L'accroissement généralisé de la pollution des eaux par les composés azotés traduit le déséquilibre du cycle de l'azote généré par l'intensification des activités agricoles et les modifications de l'occupation des sols et de la gestion de l'espace.

La population de la commune urbaine de Mananara-Nord utilise l'eau de puits comme source d'eau potable. D'après l'enquête sur l'environnement qui les entoure, les eaux souterraines sont en mauvais état. Les analyses physico-chimiques des échantillons ont montré que les eaux souterraines sont de pH acide, et certains échantillons ont des couleurs liées à la présence des matières organiques, des matières en suspension, des végétaux et des sels minéraux. Cependant, presque la majorité des échantillons analysés ont de la turbidité et de la couleur qui ne respectent pas la norme de potabilité des eaux. La salinité, la conductivité et la concentration de nitrite des échantillons respectent également cette norme.

Les concentrations en Nitrate des échantillons varient entre 0 et 136,987 mg.l⁻¹, quatre échantillons sont hors norme tandis que les treize échantillons restants respectent la norme. Certaines concentrations en ammonium sont supérieures à la valeur permise dans la norme de potabilité de l'eau. Les origines de l'excès des concentrations des composés azotés (nitrate et ammonium) sont la dégradation des matières organiques par les microorganismes en matières minérales, les sources anthropiques d'azote comme l'azote du sol, les engrains, les eaux usées, les fosses septiques, les latrines, les déchets animaux, les engrains verts et les résidus des plantes. Or la population ne dispose pas d'un système de traitement des ordures ménagères, encore moins d'un système de collecte, de traitement et d'évacuation des eaux usées.

La simulation numérique de l'écoulement souterrain a été effectué à l'aide du logiciel « visual MODFLOW Flex 2015.1 ». La vitesse d'écoulement diminue par rapport à la longueur et à la largeur de la nappe, cela est due à l'influence du gradient hydraulique et aux paramètres du perméabilité et de coefficient d'emmagasinement. La simulation des transports des polluants dans les eaux souterraines permet de proposer des mesures de protection basées sur l'application de la modélisation numérique en donnant des cartes de distribution en nitrate et ammonium, que la partie du sous bassin versant Nord se localise des concentrations élevées et plus élevées et que la partie Sud avec des faibles concentrations.

Par la méthode SINTACS, l'étude de la pollution par les nitrates de la nappe en question a été testée, en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la

nappe et la répartition des classes de vulnérabilité différents (moyenne, élevée et très élevée). Les résultats obtenus montrent que la partie du sous bassin versant Nord ont des classes de vulnérabilité élevée et très élevée cela signifie que la pollution des eaux souterraines est probablement forte dans cette zone, tandis que la partie du sous bassin versant Sud a une faible probabilité de pollution, ces résultats sont en cohérence avec les teneurs en nitrate et en ammonium trouvées. Ils sont influencés par la nature géologique, la nature du sol et l'occupation du sol à la surface.

RECOMMANDATION

En vue d'assurer la gestion durable des champs de captage des puits et de son utilisation, avec les initiatives déjà entreprises par l'Etat, les communautés, les institutions et les collectivités locales ; il s'avère urgent et prioritaire de mener les actions suivantes : le respect effectif des trois périmètres de protection autour des champs de captage par les communautés riveraines, notamment les périmètres de protection immédiats, rapprochés et éloignés; le respect effectif des normes de réalisation des puits et des ouvrages d'assainissement dans la commune par les structures en charge des conceptions; limiter les pollutions diffuses agricoles et domestiques.

Améliorer le taux de raccordement des populations de la commune au réseau d'adduction d'eau potable mené par EGC3S ; promouvoir des campagnes de sensibilisation mensuelle ou semestrielle sur l'hygiène et l'assainissement de base ; le traitement périodique et cyclique des réserves d'eaux destinées à la consommation de la population avoisinant les champs de captage.

Pour les eaux usées et l'assainissement urbain : éviter les rejets à ciel ouvert et rétablir à nouveau le réseau d'assainissement.

REFERENCES

REFERENCES

❖ Bibliographies

- Ababou, R. et A. C. Bagtzoglou. (1993).** BIGFLOW, a Numerical Code for Simulating Flow in Variably Saturated Heterogeneous Geologic Media: Theory and User's. Manual 1.1, NUREG/CR-6028. Report. U.S. NRC, Government Printing Office, Washington DC.
- Abdallah, M. (2005, mai 3).** *Les méthodes de discréétisation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires appliquées aux équations de Barré de Saint-Venant pour la modélisation de l'hydraulique en réseau d'assainissement* (Doctorat). Université Louis Pasteur-Strasbourg I, Strasbourg.
- Adel, D., S. Kissar, et K. E. Khemmoudj. (2018, juin 6).** *Etude comparative de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution De la zone de Boulimate par la méthode DRASTIC et SINTACS* (Master). Université Abderrahmane Mira - Bejaia.
- AHM/CRS. (2012, novembre).** Projet RANON'ALA : Plan de protection des ressources en eau de la commune rurale de Mananara Nord. p 7.
- Aller, L., T. Bennet, H. J. Lehr, J. R. Petty, et G. Hackett. (1987).** DRASTIC : a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. In : Ada OK, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency Report EPA-600/2-87-035, 622 pp.
- Arab, L. et D. Felkaoui. (2016).** *Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution au niveau de la commune d'Aokas par laméthode RISK.* (Master). Université Abderrahmane Mira - Bejaia.
- Arzika, S. A. et Y. Nacera. (2017, juin 22).** *Etude de la vulnérabilité à la pollution de la région de Boulimat par la méthode SINTACS* (Master). iversitUné Abderrahmane Mira-Bejaia, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Sciences Biologiques de l'Environnement.
- Auterives, C. (2006).** *Influence des flux d'eau souterraine entre une zone humide superficielle et un aquifère profond sur le fonctionnement hydrochimique des tourbières : Exemple des marais du Cotentin, Basse-Normandie* (Doctorat). Université de Rennes 1, France.
- Batu, V. (2006).** Applied flow and solute transport modeling in aquifers. published by CRC Press,,
- Bear, J. (1972).** Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier Publishing company, Inc, New York.
- Bear, J. (1979).** Hydraulics of Groundwater. McGraw-hill, Inc., New York.
- Benali, W. et A. Mammar. (2016).** *Mesure de salinité par conductimétrie* (Master). Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Biomédical, Laboratoire de Recherche de Génie Biomédical.
- Bendjoudi, H. (2002, juillet).** Hydrological Sciences - Journal des sciences Hydrologiques. Université Pierre et Marie Curie, Paris.

- Bogardus, B. (2016, décembre 15).** *Functionality and Sustainability of Water Systems Implemented Using the Public-Private Partnership Approach in Madagascar.*
- BRGM. (1994).** Bureau de Recherches Géologiques et Minières. « Surveillance de la qualité des eaux souterraines: Mise en place de piézomètres de contrôle ». Bretagne, 27 pages.
- Castany, G. et J. Margat. (1977).** Dictionnaire français d'hydrogéologie. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) Service géologique national, Orléans, 249 pages.
- Cecconet, D., S. Bolognesi, A. Callegari, et A. G. Capodaglio. (2019).** Controlled sequential biocathodic denitrification for contaminated groundwater bioremediation. *Science of The Total Environment* 651, 3107-3116.
- Chabani, A., A. Bekkouche, et Y. Abdelaziz. (2009, octobre 27).** Utilisation de modèles numériques pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines. Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSATlemcen09 » Tlemcen,,
- Chapuis, R. P. (2002, août).** Solution analytique de l'écoulement en régime permanent dans un aquifère incliné à nappe libre, et comparaison de cette solution avec des solutions numériques plus complètes. Rapport technique, Ecole polytechnique Montréal, Montréal.
- Civita, M. (1994).** La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica. Pitagora Ed. Bologna, Italie, 325 p.
- Civita, M. et C. De Regibus. (1995).** Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli aquiferi (in Italian). Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Ed. Bologna, 3, pp 63-71.
- CSBII et CHRD2. (2017).** *Sectorisation Sanitaire: CSBII et CHRD2 Mananara Nord.*
- CSBII et CHRD2. (2018).** *Sectorisation Sanitaire: CSBII et CHRD2 Mananara Nord.*
- CU.Mananara. (2012, octobre).** Plan de développement comportant un plan d'investissement et d'affaires en Adduction d'Eau potable, assainissement et Hygiène (PDIA – AEPAH : 2012 - 2016) Cas de la Commune Urbaine de Mananara-nord. Commune Urbaine de Mananara nord.
- DGM. (2018).** Direction Générale de Météorologie. Précipitation annuelle des station à Madagascar.
- Doerfliger, N., P.-Y. Jeannin, et F. Zwahlen. (1999).** Water vulnerability assessment in karst environments : a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environ Geol* 39(2) : p.165-176.
- Dumetz, N. (1988).** *Inventaire botanique et régénération forestière de la réserve naturelle de Mananara-Nord (Madagascar).* (DEA). Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Entreprise Sandandrano. (2011, décembre).** Avant-Projet Détaillé (APD) de l'amélioration de l'alimentation en eau potable du Chef-lieu de la Commune urbaine de Mananara Nord.
- Erostate, M., F. Huneau, E. Garel, M. F. Lehmann, T. Kuhn, L. Aquilina, et al. (2018).** Delayed nitrate dispersion within a coastal aquifer provides constraints on land-use evolution and nitrate contamination in the past. *Science of The Total Environment* 644, 928-940.

- Ferziger, J. H. et M. Paric. (1999).** Computational methods for fluid dynamics. Editions Springer, Berlin, 389 pages.
- Garcia, N., P. Raimbault, E. Gouze, et V. Sandroni. (2006).** Fixation de diazote et production primaire en Méditerranée occidentale. *Comptes Rendus Biologies* 329, 742-750.
- Gilly, G., G. Corrao, et S. Favilli. (1984).** Concentrations of nitrates in drinking water and incidence of gastric carcinomas: First descriptive study of the Piemonate region Italy. *Sci. Total Environ.*, 34: 35-37.
- Hadj-said. (2007).** Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière: cas de la nappe de guerbes. Université de Annaba.
- Hamza, M., A. Added, A. Francès, R. Rodriguez, M. Ajmi, et S. Abdeljaoued. (2008).** Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science* 21, 75-86.
- Harbaugh, A. W. (2005).** MODFLOW-2005, *The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process* (report presents MODFLOW-2005), p. 54-56, chap 5. U.S. Geological Survey.
- Hauke-Pacewiczowa, T., J. Balandreau, et Y. Dommergues. (1970).** Fixation microbienne de l'azote dans un sol salin tunisien. *Soil Biology and Biochemistry* 2, 47-53.
- Karl, D. M. et A. F. Michaels. (2019).** Nitrogen Cycle. In J. K. Cochran, H. J. Bokuniewicz, et P. L. Yager (Eds.), *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)*, p. 408-417. Oxford: Academic Press.
- Lamraoui, F. (2010, avril).** Modélisation physique et numérique du transfert d'un traceur de source diffuse dans l'eau souterraine. (Master). Université du Québec à Montréal, Sciences de l'atmosphère.
- Li, J., B. Wu, Q. Li, Y. Zou, Z. Cheng, X. Sun, et B. Xi. (2019).** Ex situ simultaneous nitrification-denitrification and in situ denitrification process for the treatment of landfill leachates. *Waste Management* 88, 301-308.
- Mackerness, C. W. et C. W. Keevil. (1996).** 4 - Origin and significance of nitrite in water. In M. Hill (Ed.), *Nitrates and Nitrites in Food and Water*, p. 77-92. Woodhead Publishing.
- Mahamat, A. B., F. P. Arnaud, et F. Khomh. (2004).** Modélisation d'écoulement et de transport de polluants dans les nappes phréatiques. Université de Yaoundé I à Cameroun: Projet de modélisation.
- McDonald, M. G. et A. W. Harbaugh. (1988a).** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of WaterResources Investigations, book 6., p. chap. A1, 588 pp.
- McDonald, M. G. et A. W. Harbaugh. (1988b).** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of WaterResources Investigations, book 6., p. chap. A1, 586 p.

- MDDEPQ. (2011).** Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines ». Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 60 pages.
- Mitchell, M. E., T. L. Hamilton, C. Uebel-Niemeier, K. N. Hopfensperger, et I. Buffam. (2018).** Nitrogen cycling players and processes in green roof ecosystems. *Applied Soil Ecology* 132, 114-125.
- Mohellebi, S. et C. Belkacem. (2016).** Etude expérimentale et simulation numérique des écoulements souterrain-écoulement vers un puits dans une nappe libre- (Master). université Abderahmane Mira.
- Mpakam, H. G. (2009).** Vulnérabilité à la pollution des ressources en eaux à Bafoussam et incidences socio-économiques et sanitaires : modalités d'assainissement. (Doctorat). Université de Yaoundé I.
- Musy, A. et M. Soutter. (1991).** Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p, Lausanne, Suisse.
- Nana, K. et K. Imloul. (2018, juillet 1).** Contribution à la modélisation numérique de la recharge artificielle des nappes souterraines, -couplage rivière-nappe - (Thesis). Université Abderrahmane Mira- Bejaia.
- Perrier, A. et A. Tuzet. (2005).** Le cycle de l'eau et les activités au sein de l'espace rural. Enjeux globaux, solutions locales et régionales. *Comptes Rendus Geoscience* 337, 39-56.
- Peter, G. H. et P. Meena. (2010).** Peak water limits to freshwater withdrawal and use, Proceedings of the National Academy of Science 107, 11155–11162.
- Postigo, C., D. E. Martinez, S. Grondona, et K. S. B. Miglioranza. (2018).** Groundwater Pollution: Sources, Mechanisms, and Prevention. In D. A. Dellasala et M. I. Goldstein (Eds.), *Encyclopedia of the Anthropocene*, p. 87-96. Oxford: Elsevier.
- Rafarandrainy, R. (2016, juillet 18).** Impact de l'occupation du sol sur la qualité de la nappe d'eau souterraine: Cas de la ville de Toamasina. (Master). Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences.
- Rahobisoa, J.-J. (2013).** Etude de la recharge du bassin hydrogéologique du plateau de l'Horombe et ses environs (Sud de Madagascar) (Doctorat). Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Doctorat en géologie appliquée Option: Hydrogéologie.
- Rakotondrainibe, J. H. (1984, avril).** Les eaux souterraines de Madagascar. Service hydrogéologiques, Ministère de l'enegie et des Mines, Ampandrianomby.
- Rakotondrainibe, J. H. (2016).** Synthèse de l'hydrologie, de la géologie et de l'hydrogéologie de Madagascar intégrée dans le SESAM (suivi-évaluation de l'eau et de l'assainissement de Madagascar).
- Ramade, F. (2003).** Eléments d'écologie-Ecologie fondamentale. Dunod, Paris.

- Ramangalahy, D. (1990).** *Contribution à l'étude floristique diversité et structure de quelques types de « savoka » de la région de Mananara-Nord.* (DEA). Université d'Antananarivo.
- Rapantova, N., J. Tylcer, et D. Vojtek. (2017).** Numerical modelling as a tool for optimisation of ground water exploitation in urban and industrial areas. *Procedia Engineering* 209, 92-99.
- Ravolasoa, U. (2017).** *Contribution à la pérennisation du système d'adduction d'eau potable de la commune urbaine de Mananara nord, région Analanjirofo* (Master). Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, ISTE.
- Rushton, K. R. et S. C. Redshaw. (1979).** Seepage and groundwater flow: Numerical analysis by analogue and digital methods: New York, p. 339. John Wiley and Sons.
- Samuel, T. (2008).** *Caractérisation, modélisation et étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine contaminée aux nitrates dans un sous bassin de la vallée d'Annapolis (Nouvelle-Ecosse).* (Master). Université du Québec à Montréal.
- Sebillote, J. (1994).** Qualité de l'environnement et pollution azotée de l'eau : Quelles procédures pour le développement agricole?. Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, INRA 28, 277-285.
- Soldatova, E., N. Guseva, Z. Sun, V. Bychinsky, P. Boeckx, et B. Gao. (2017).** Sources and behaviour of nitrogen compounds in the shallow groundwater of agricultural areas (Poyang Lake basin, China). *Journal of Contaminant Hydrology* 202, 59-69.
- Tindall, J. A., R. L. Petrusak, et P. B. Mc Mohan. (1995).** Nitrate transport and transformation process in unsaturated porous media. *J. Hydrol.*, 169, 51- 94.
- Velonjara, N. C. I. (2016).** *Etude de l'efficacité du chlore pour le traitement de l'eau du système D'AEP, cas de l'EGC3S à Mananara* (Master). Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, ISTE.
- Zair, S. et I. Bensalem. (2014).** *Etude de la vulnérabilité à la pollution de la baie de Bejaia par les méthodes DRASTIC et SINTACS* (Master). Université Abderrahmane Mira - Bejaia.
- Zeraouli, M. (1993, septembre).** Pollution par les nitrates. Premiers résultats de la situation actuelle dans la nappe des Mnasra (décembre 1992-janvier 1993). Office régional de mise en valeur agricole du Gharb, Département de développement agricole, Service des études de développement agricole, Bureau AgroPédologique, Publication interne ORMVAG.
- Zerner, M. (2011).** Aux origines de la loi de Darcy (1856). *Documents pour l'histoire des techniques. Nouvelle série* 29-40.

❖ **Webographies**

- [W1]. <https://planeteviable.org/repartition-eau-sur-terre/> (04/04/2019)
- [W2]. <https://www.eau-adour-garonne.fr> (17/02/2019)
- [W3]. http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/écoulement.html (06/04/2019)
- [W4]. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/rivieres/annexes.htm (08/04/2019)
- [W5]. <https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm> (08/04/2019)
- [W6]. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.azote.html> (18/04/2019)
- [W7]. <https://fr.climate-data.org/afrique/madagascar/mananara-avaratra/mananara-avaratra-717886/> (03/02/2019)
- [W8]. <http://www.cons-dev.org/consdev/madagascar/MANANARA/Mananet/TEXTE/chap2.html> (03/02/2019)
- [W9]. <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/chapitre1.html> (15/06/2019)

ANNEXES

Annexe 1- Mode opératoire

❖ Dosage de NITRATE

- **Matériels utilisés :** spectromètre UV, béchers, pipettes, fioles jaugées, dessiccateur, étuve.
- **Reactifs :** eau distillée, solution de salicylate de sodium à 0,5 %, solution de tartrate double de sodium et de potassium.
- **Mode opératoire :**

On place les 18 béchers sur une paillasse ; l'un de ces béchers contient 10ml d'eau distillée (essai à blanc) et les 17 autres contiennent 10 ml des échantillons à analyser et numéroté selon les codes de l'échantillon. On ajoute dans chaque bécher 2 à 3 gouttes de la solution de NaOH à N/40 et 1 ml de salicylate de sodium 0,5 %, puis on évapore à sec entre 75 °C à 80 °C dans une étuve. On les laisse refroidir à température ambiante dans un dessiccateur. On ajoute dans chaque bécher 2 ml d'acide sulfurique concentré et on agite jusqu'à la dissolution totale de l'acide. On les laisse se reposer pendant 10 mn. Après on ajoute 15 ml d'eau distillée, puis 15 ml de solution de tartrate double de sodium et de potassium et on le laisse se refroidir. On effectue des mesures à l'aide d'un spectromètre à 415 nm (la gamme de l'absorbance ne doivent pas dépassés 1,513 sinon il faut diluer l'échantillon jusqu'à ce qu'on obtienne une absorbance). Pour essais à blanc : il faut cliquer sur la touche « CALIBRATION » et pour les échantillons : il faut cliquer sur la touche « READ »

La concentration de nitrate dans chaque bécher est obtenue à partir d'une courbe d'étalonnage préconçue.

$$[NO_3^-] = \frac{(3,2769 * \text{absorbance} + 0,032) * 62,004}{14,007} \text{ (exprimée en mg.l}^{-1}\text{)}$$

❖ Dosage du NITRITE

- **Matériels utilisés :** spectromètre UV, béchers, pipettes, fioles jaugées, dessiccateur.
- **Réactifs :** eau distillée, solution de Sulfanilamide, solution de N-1-naphtylethylènediamine.
- **Mode opératoire :**

Poser les 18 béchers sur une paillasse ; l'un de ces béchers contient 50 ml d'eau distillée (essai à blanc) et les 17 autres contiennent 50 ml des échantillons analyser et numérotés selon les codes des échantillons. On ajoute dans chaque bécher 1ml de solution de sulfanilamide et on les laisse refroidir pendant 5 mn. On ajoute 1ml de la solution de -1-naphtylethylènediamine et on

incube dans une chambre noire pendant 30mn exactement afin de permettre le développement de la coloration rose. L'absorbance de chaque échantillon est mesurée à l'aide d'un spectromètre à 543nm (dont la gamme de l'absorbance ne dépasse pas 0,064, si cette valeur est dépassée alors on dilue l'échantillon jusqu'à ce qu'on conquière la gamme). Pour essais à blanc, il faut cliquer « CALIBRATION » et pour les échantillons, il faut cliquer « READ ».

$$[NO_2^-] = \frac{(317.8 * absorbance - 0.032) * 46.005 * 1000}{14.007} \text{ (exprimée en mg.l}^{-1}\text{)}$$

❖ Dosage d'AMMONIUM

- Matériels utilisés :** cuves rectangulaires 10, 20 et 50 mm (2 de chaque), Pipettes pour volumes de pipettage de 0,60 et 5ml, Spectroquant® CombiCheck 50.
- Réactifs et produits auxiliaires :**

Tableau 25: Réactifs et produits auxiliaires (ammonium).

Contenu d'un emballage	Autres réactifs et accessoires
1 flacon de réactif NH ₄ -1B ; 2 flacons de réactif NH ₄ -2B ; 1 flacon de réactif NH ₄ -3B ; 1 AutoSelector	Sodium hydroxyde en solution 1 mol.l ⁻¹ ; Acide sulfurique 0,5mol.l ⁻¹ ;

Tableau 26: Domaine de mesure et nombre de dosages.

Longueur d'onde (nm)	Cuve mm	Domaine de mesure		Nombre de dosages
		mg.l ⁻¹ de NH ₄ -N	mg.l ⁻¹ de NH ₄ ⁺	
692	50	0,010 – 0,500	0,013 – 0,644	500
	20	0,03 – 1,50	0,04 – 1,93	
	10	0,05 – 3,00	0,06 – 3,86	

- Mode opératoire :**

Tableau 27: Description du mode opératoire du dosage d'ammonium.

Echantillon préparé	5 ml	Pipetter dans une éprouvette.
Réactif NH ₄ -1B	0,6 ml	Ajouter à la pipette et mélanger
réactif NH ₄ -2B	1 microcuiller bleue arasée (dans le bouchon du flacon NH ₄ -2B)	Ajouter et agiter vigoureusement jusqu'à dissolution totale du réactif
Laisser reposer 5mn (temps de réaction A).		
Réactif NH ₄ -3B	4 gouttes	Ajouter et mélanger
Laisser reposer 5 mn (temps de réaction B), puis introduire l'échantillon dans la cuve et mesure dans le l'appareil (photomètre Spectroquant® CombiCheck 50).		
Pour la mesure dans la cuve de 50 mm, le volume de l'échantillon ainsi que les quantités des réactifs NH ₄ -1B, NH ₄ -2B, NH ₄ -3B doivent être doublés.		
Remarques : Reboucher les flacons immédiatement après le prélèvement de réactifs. Rincer la verrerie avec l'eau distillée jusqu'à l'absence d'ammonium . Ne pas employer de détergent !		

- **Remarques concernant la mesure :**

La réaction colorée étant fortement dépendante de la température, les réactifs doivent avoir une température entre 20 °C et 30 °C. Selon le type de photomètre, il est nécessaire de préparer un échantillon à blanc (comme l'échantillon à mesurer, mais avec de l'eau distillée à la place de l'échantillon). Les cuves utilisées pour la mesure photométrique doivent être propres, les essuyer le cas échéant avec un chiffon sec et propre. Les troubles éventuels se développant après la réaction donnent des résultats trop élevés. Les échantillons exempts d'ammonium virent au jaune après addition du réactifs NH₄-3B. Le pH de la solution à mesurer doit être environ 12,5. La couleur de la solution à mesurer reste stable pendant un minimum de 60 mn passé le temps de réaction B indiqué plus haut. A concentrations d'ammonium supérieures à 100 mg.l⁻¹, d'autre produits de réaction se forment et on obtient des résultats trop faibles. Dans ce cas, il est conseillé d'effectuer un contrôle de plausibilité des résultats par la dilution de l'échantillon.

❖ **Mesure de la SALINITE**

Fonctionnement d'un réfractomètre : pour les réfractomètres portables, la mesure se fait par transparence, au moyen d'un prisme présentant un indice de réfraction élevé, et peut être lue directement sur l'échelle graduée équipant l'instrument. La lumière, au passage du dioptre entre l'échantillon et le prisme, est détournée de sa trajectoire initiale c'est le phénomène de réfraction sur lequel se base le fonctionnement du réfractomètre. Si l'échantillon est faiblement concentré, l'angle de réfraction est grand, car la différence d'indice de réfraction entre l'échantillon et le prisme est élevée. Et si l'échantillon est très concentré, l'angle de réfraction est petit, car la différence d'indice de réfraction entre l'échantillon et le prisme est réduite.

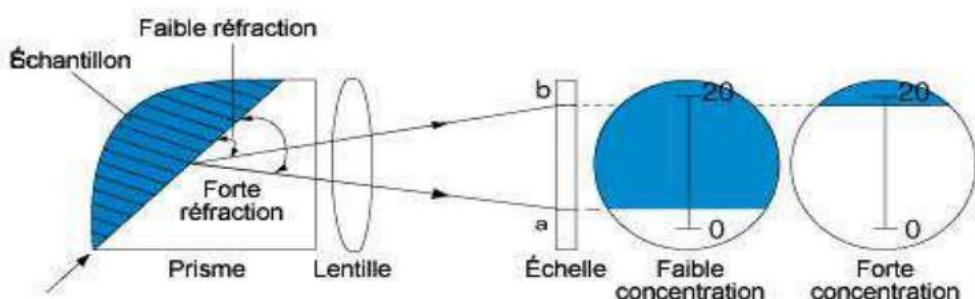


Figure 38: Fonctionnement de réfractomètre.

❖ **Mesure de la TURBITIDE**

Allumer l'appareil, introduire un tube vide et propre pour régler le zéro grâce à la molette. Remplir la cuve de mesure propre avec l'échantillon bien homogénéisé et effectuer la mesure (dans

le cas d'échantillons avec de fortes concentrations en MES, attendre un temps identique avant la prise de mesure de chaque échantillon). Penser également à bien faire correspondre les repères de la cuve et de l'appareil. Si l'appareil sature, changer de gamme avec le bouton gris sur la droite de l'écran. On lit la valeur de la turbidité directement sur l'appareil. Les résultats s'expriment en NTU. Bien laver les cuves après utilisation.

❖ Mesure de la COULEUR

Allumer l'appareil, introduire l'eau distillé dans le cube spécial à l'appareil du photomètre, on la met dans l'appareil, la valeur s'affiche à l'écran. Puis, remplir la cuve de mesure propre avec l'échantillon bien homogénéisé et effectuer la mesure, attendre un temps identique avant la prise de mesure de chaque échantillon. La valeur de la couleur directement sur l'appareil est exprimé en mg.l^{-1} Pt-Co. Rincer la cuve avec l'eau distillé après la mesure de l'autre échantillon.

❖ Mesure du pH

Introduire l'échantillon dans un bêcher et on met l'électrode du pH-mètre dans l'échantillon à analyser. On allume l'instrument (EcoScan pH 5) et attendre jusqu'à ce que la valeur qui s'affiche sur l'écran de l'instrument est stable.

❖ La loi de Beer - Lambert

Principe : Un spectrophotomètre (colorimètre) est un appareil qui permet de faire passer de la lumière blanche (toutes les longueurs d'onde) à travers une solution et de mesurer l'intensité de lumière transmise en fonction de la longueur d'onde. Pour une longueur d'onde donnée et une épaisseur de la cuve donnée :

On définit alors l'absorbance A par : $A = \log \frac{I_0}{I}$

Où : I est l'intensité de cette longueur d'onde transmise à travers une solution de concentration c (en mol.l^{-1}) dans le spectrophotomètre, I_0 l'intensité de lumière transmise à travers le solvant pur.

Les spectrophotomètres déterminent l'absorbance. Nous allons vérifier la loi de Beer-Lambert disant que l'absorbance est proportionnelle à la concentration du soluté :

$$A = kc \text{ (loi de Beer-Lambert).}$$

Où : k est une constante pour une épaisseur de cuve donnée, une longueur d'onde donnée et un soluté donné.

Annexe 2- Mode de calcul de la conductivité hydraulique

La transmissivité à $T = 0,001 \text{m}^2.\text{s}^{-1}$ de Mananara-Nord est similaire à celle de la ville de Toamasina donc la méthode de calcul de la conductivité hydraulique est la même à celle de l'ouvrage de (Rafarandrany, 2016) car ils sont de même nature du sol et géologique. « La méthode de SINTACS » nécessite la connaissance de la conductivité hydraulique. Cette conductivité contrôle la vitesse de propagation des polluants dans l'aquifère.

Comme $K = \frac{T}{e}$ (d'après l'équation II-11), avec T : transmissivité ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) et e : épaisseur de l'aquifère (m).

L'épaisseur de l'aquifère de Mananara-Nord mesure 5 à 10 m, donc l'application numérique sera :

$$K = \frac{0,001}{5} = 0,0002 \text{ m.s}^{-1}$$

Perméabilité et infiltration de certaine roche réservoir.

K (m.s⁻¹)	0-10⁻³	10⁻⁵-10⁻⁴	10⁻⁷-10⁻⁴	10⁻⁸-10⁻⁴	10⁻⁹-10⁻⁵	10⁻⁸-10⁻⁵	10⁻¹¹-10⁻⁸	10⁻¹⁰-10⁻⁶	10⁻¹²-10⁻⁹
Roche	Gravier	Grès	Sable	Sable limoneux	Limon	Sable argileux	Limon argile	Calcaire	Argile
Infiltration	Forte	Moyenne						Faible	Très Faible

Annexe 3- Résultats des calculs et des analyses et des simulations

Tableau 28: Résultats des paramètres physiques.

ECHANTILLON	PARAMETRES PHYSIQUES			
	pH	Color (mg.l ⁻¹ Pt-Co)	Turbidité (NTU)	TDS (mg.l ⁻¹)
ZI1	5,41	50	6,39	0
ZI2	5,72	40	2,35	1
ZI3	5,58	75	2,27	1
ZII1	5,79	45	1,84	0
ZII2	6,05	50	2,01	1
ZII3	5,19	0	2,13	2
ZII4	4,7	20	2,45	1
ZIII1	4,77	0	2,38	1
ZIII2	5,04	0	0,91	1,5
ZIII3	4,6	0	1,35	1
ZIV1	4,6	0	0,12	0
ZIV2	4,29	66	14,94	0,5
ZIV3	5,68	0	4,6	1
ZV1	4,43	25	2,13	0
ZV2	5,36	190	1,77	1
ZV3	4,9	0	2,55	1,5
ZV4	5,54	0	1,58	1,5

Tableau 29: Résultats des paramètres chimiques.

ECHANTILLON	PARAMETRES CHIMIQUES		
	Conc NO ₃ mg/l	Conc NO ₂ mg/l	Conc NH ₄ mg/l
ZI1	4,241	LMD	0,35
ZI2	13,351	0,057	0,68
ZI3	LMD	0,061	0,14
ZII1	LMD	0,001	0,89
ZII2	0,852	0,006	0,05
ZII3	136,987	0,048	0,09
ZII4	105,365	0,003	0,03
ZIII1	89,553	0,024	0,08
ZIII2	32,532	0,029	0,73
ZIII3	39,118	0,061	0,04
ZIV1	30,618	0,003	0,02
ZIV2	98,547	0,006	0,48
ZIV3	7,844	LMD	0,12
ZV1	11,349	0,003	0,01
ZV2	0,208	0,03	0,07
ZV3	0,905	LMD	0,01
ZV4	34,739	LMD	1,12

❖ **Valeurs des paramètres pour chaque classe de conformité physico-chimique des eaux**

Tableau 30: Valeurs des paramètres pour chaque classe de conformité physico-chimique des eaux.

Paramètre	Unité	Normes MGL	Normes OMS	Excellent	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très Mauvaise
pH		6,5 - 9	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 9,2	<6,6 ou >9,2	-
Couleur	mg.l ⁻¹ Pt-Co	<15	<20	<20	20 - 50	50 - 100	100 - 200	>200
Turbidité	NTU	<5	<15	<15	15 - 35	35 - 70	70 - 100	>100
Salinité	mg.l ⁻¹	<1500	<1000	<375	375-650	650-1350	1350-1500	>1500
Conductivité	µS.cm ⁻¹	<3000	<2000	<750	750 - 1300	1300 - 2700	2700 - 3000	>3000
Nitrate	mg.l ⁻¹	<50	<50	<5	5-25	25 - 50	50 - 100	>100
Nitrite	mg.l ⁻¹	<0,1	≤0,1	≤0,1	0,1 - 0,5	0,5 - 2	02-8	>8
Ammonium	mg.l ⁻¹	<0,5	≤0,5	≤0,03	0,03 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 1	>1

Sources : Actes des journées de l'eau 16-20 Nov 1992 Qualité de l'eau pour la norme de l'OMS et Décret n°2004/635 du 15 juin 2004 pour la norme MLG.

❖ **Résultats dans la section simulation d'un écoulement souterrain, dans un aquifère à nappe libre**

Tableau 31 : Résultats des calculs sur les simulations d'un écoulement souterrain de la nappe libre.

	Longueur de la nappe L (m)	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
ESSAI 1	Charge hydraulique numérique (m)	3,484	3,991	4,475	4,974	5,472	5,972	6,474	6,975	7,472	8,08
	Charge hydraulique analytique (m)	3,484	3,606	3,7	3,831	3,986	4,222	4,556	5,09	5,93	8,04
	Vitesse d'écoulement (m.s ⁻¹)	0,002269	0,002267	0,002272	0,002278	0,002282	0,002287	0,002293	0,0023012	0,002345	0,002607
ESSAI 2	Charge hydraulique numérique (m)	3,452	3,945	4,461	4,962	5,464	5,964	6,462	6,961	7,464	7,92
	Charge hydraulique analytique (m)	3,452	3,512	3,64	3,785	3,982	4,216	4,54	5,01	5,924	7,96
	Vitesse d'écoulement (m.s ⁻¹)	0,002245	0,002261	0,002268	0,002274	0,002278	0,002283	0,002287	0,0023008	0,002341	0,002601
MOYENNE	Charge hydraulique numérique (m)	3,468	3,968	4,468	4,968	5,468	5,968	6,468	6,968	7,468	8
	Charge hydraulique analytique (m)	3,468	3,559	3,67	3,808	3,984	4,219	4,548	5,05	5,927	8
	Vitesse d'écoulement (m.s ⁻¹)	0,002257	0,002264	0,00227	0,002276	0,00228	0,002285	0,00229	0,002301	0,002343	0,002604

❖ **Bilans Hydriques**

Tableau 32: Calcule du bilan hydrologique de Mananara-Nord, année 2018

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Dec	Annuelle
T	27,0	26,8	26,5	25,8	24,1	22,6	21,8	21,7	22,4	23,5	25,0	26,2	24,450
P	644,3	214,8	786,2	468,9	419,1	168,5	428,2	68,7	55,2	26,9	60,6	74,1	3415,5
Nb Pluie	18	21	19	22	21	17	24	14	13	9	14	11	203
i	12,85	12,70	12,49	11,99	10,82	9,81	9,29	9,23	9,68	10,41	11,44	12,28	133
K	34,2	29,7	31,6	29,1	28,8	27,3	28,5	29,8	29,8	32,4	32,6	34,4	
EPT	351,80	299,60	309,47	265,63	219,77	175,96	167,09	172,61	187,63	231,40	273,93	326,96	2981,86
P-ETP	292,50	-84,80	476,73	203,27	199,33	-7,46	261,11	-103,91	-132,43	-204,50	-213,33	-252,86	
ETR	351,80	214,80	309,47	265,63	219,77	168,50	167,09	68,70	55,20	26,90	60,60	74,10	1982,56

Source : Station météorologique Ampandrianomby Antananarivo

Où : T : Température mensuelle moyenne ($^{\circ}\text{C}$) ; P : Précipitation mensuelle (mm) ; Nb pluie : nombre de pluie par mois ; i : indices mensuels ; K : Coefficient de correction ; EPT : Evapotranpiration potentiel ; ETR : Evapotranpiration réelle.

❖ **Calcule de l'infiltration**

On a, la précipitation moyenne (P)= 3415,5mm et l'Evapotranspiration potentiel (ETP)= 2981,86 mm.

L'infiltration est évaluée à partir de l'hydrique : $\mathbf{P} = \mathbf{E} + \mathbf{R} + \mathbf{I}$ où P : précipitation ; E : évapotranspiration ; R : ruissellement ; I : infiltration.

Application numérique et formule [W9]

- Les déficits de l'écoulement (D) est donnée par :

$$\mathbf{D} = \mathbf{P} - \mathbf{R} \longrightarrow \mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{I}; \quad \text{alors} \quad \mathbf{I} = \mathbf{D} - \mathbf{E}$$

- D'après la formule de TURC on a : $\mathbf{D} = \frac{\mathbf{P}}{\sqrt{0,9 + \frac{\mathbf{P}^2}{L^2}}}; \quad \text{où } L = 300 + 25T + 0.5T^3$

D'où on a, **D = 3297,77 mm.**

- L'application numérique de l'infiltration est : **I = 3297,77 - 2981,86 = 315,91 mm**

D'où l'infiltration est égale à **315,91 mm.**

- Ainsi que le ruissellement devient alors, **R= 117,73 mm.**

Annexe 4- Enquêtes au moment du prélèvement (évaluation du risque de contamination)

FICHE DE PRELEVEMENT

A. INFORMATIONS GENERALES

1. Code l'échantillon
2. Date de prélèvement :.....
3. Heure de prélèvement :.....
4. Lieu de prélèvement :.....
5. Type de puits :.....
6. Puits en béton: OUI NON
7. Puits avec tête couvert: OUI NON
8. Profondeur du puits (m) :.....
9. Coordonnées géographique :

Latitude (X)S
Longitude (Y)E

B. INFORMATIONS SPECIFIQUES POUR L'EVALUATION DU DIAGNOSTIC

- 1- Y a-t-il des latrines à moins de 10 mètres des puits ?
 1, OUI 0, NON
- 2- Les latrines les plus proches sont-elles en hauteur par rapport à la puits ?
 1, OUI 0, NON
- 3- Y a-t-il une autre source de contamination (excréments, ordures, eau de surface, canal d'eau usé, matières gras (hydrocarbure),etc...) à moins de 10 mètres des puits ?
 1, OUI 0, NON
- 4- L'état du sol au niveau de l'évacuation entraîne-t-il une retenue d'eau stagnante dans les 2 mètres du ciment autour du puits ?
 1, OUI 0, NON
- 5- La canal d'évacuation de l'eau : (a) est-elle défectueuse ? (b) Est-elle cassée permettant la présence d'eau stagnante ? (c) A-t-elle besoin d'être nettoyée ?...
 (a) 1, OUI 0, NON | (b) 1, OUI 0, NON | (c) 1, OUI 0, NON
- 6- Y a-t-il inexistence ou défaillance d'une clôture, donnant la possibilité aux animaux d'entrer ?
 1, OUI 0, NON
- 7- Le ciment autour du puits mesure -t-il moins d'un mètre ?
 1, OUI 0, NON
- 8- Y a-t-il la moindre d'eau stagnante sur le sol bétonné autour des puits?
 1, OUI 0, NON
- 9- Y a-t-il une fissure dans le sol bétonné autour du puits qui permettrait à l'eau d'entrer dans le puits ?
 1, OUI 0, NON
- 10- Le puits est-il relâché au niveau des fixations de bas en haut permettant à l'eau d'y entrer?
 1, OUI 0, NON

C. RISQUE DE CONTAMINATION

Score total du risque...../12

Score du risque de contamination :

- 9-12 Très élevé**
7-9 Élevé
4-6 Moyenne
0-3 Bas

❖ Résultats des Enquêtes sur l'occupation des sols dans la commune urbaine de Mananara-Nord

N°	CE	INFORMATIONS GENERALES								INFORMATIONS SPECIFIQUES POUR L'EVALUATION DU DIAGNOSTIC (Réponses des										RISQUE DE CONTAMINATION						
		date	heure	lieu	type puits	Puits en béton	Puits avec tête couvert	Profondeur du puits	Coordonné géographique (Laborde : Tananarive 1925 Laborde Grid)		1	2	3	4	5			6	7	8	9	10	SCORE /12	Evaluation du risque		
									Latitude (E)	Longitude (S)					a	b	c									
1	ZI1	08/02/2019	9h50	Ambitsika	ordinaire	oui	oui	1.5	756807.670	1099849.437	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	6	Moyenne		
2	ZI2	08/02/2019	9h56	Ambitsika	ordinaire	oui	oui	1.15	757024.331	1099957.768	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	6	Moyenne	
3	ZI3	08/02/2019	10h10	Ambitsika	ordinaire	oui	non	1.07	757125.318	1099933.898	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	9	Très élevé	
4	ZII1	08/02/2019	9h45	Analampeja	ordinaire	oui	non	1.6	757222.632	1099533.626	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	10	Très élevé
5	ZII2	08/02/2019	10h45	Ampitarihana	ordinaire	oui	non	2.2	755820.054	1099674.988	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	7	Élevé
6	ZII3	08/02/2019	10h57	Antanankoro	ordinaire	oui	non	2.8	756052.021	1099551.141	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	11	Très élevé	
7	ZII4	08/02/2019	11h10	Antanankoro	ordinaire	oui	non	2.77	756120.825	1099327.037	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	10	Très élevé
8	ZIII1	08/02/2019	11h36	Carreau I	ordinaire	oui	non	4	755904.584	1099220.882	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	Très élevé	
9	ZIII2	08/02/2019	11h42	Carreau II	ordinaire	oui	oui	4	755800.396	1099114.728	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	4	Moyenne	
10	ZIII3	08/02/2019	12h03	Carreau III	ordinaire	oui	oui	3	755668.686	1099085.241	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	Bas	
11	ZIV1	08/02/2019	12h14	Antadimita	ordinaire	oui	oui	5	755702.105	1098973.189	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6	Moyenne	
12	ZIV2	08/02/2019	12h58	Antanambao centre	ordinaire	non	non	8	755765.011	1098874.897	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	6	Moyenne	
13	ZIV3	08/02/2019	13h15	Mahatsinjo	ordinaire	oui	non	6	755938.003	1098981.052	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	9	Très élevé		
14	ZV1	08/02/2019	14h05	Beryl	ordinaire	oui	non	3	756651.597	1098234.039	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	8	Élevé		
15	ZV2	08/02/2019	14h30	Analanjahana	ordinaire	oui	oui	3	757013.309	1098912.248	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	8	Élevé		
16	ZV3	08/02/2019	14h40	Androkaroka	ordinaire	oui	oui	5	756899.291	1098924.043	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	6	Moyenne		
17	ZV4	08/02/2019	14h58	Androkaroka centre	ordinaire	oui	oui	7.15	756773.478	1098884.727	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	4	Moyenne		

CE : code de l'échantillon

NB : chiffre 1 et 0 dans la section des information spécifiques pour l'évaluation correspond à la réponse oui ou non dont oui=1 et non=0

Tableau 33: Récapitulative des réponses lors de l'enquête

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
CE	ZI1	ZI2	ZI3	ZII1	ZII2	ZII3	ZII4	ZIII1	ZIII2	ZIII3	ZIV1	ZIV2	ZIV3	ZV1	ZV2	ZV3	ZV4
Score	6	6	9	10	7	11	10	12	4	3	6	6	9	8	8	6	4
Evaluation du risque	Moyenne	Moyenne	Très élevé	Très élevé	Élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Moyenne	Bas	Moyenne	Moyenne	Très élevé	Élevé	Moyenne	Moyenne	

Annexe 5- Calcul de l'indice SINTACS général

Tableau 34 : Résultats de calcul de l'indice générale par la méthode SINTACS

Toponyme	Fokontany	X	Y	S	I	N	T	A	C	S'	IS	Vulnérabilité
Ambatofitarafana	Ambatofitarafana	759625	1093880	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Mahasoa	Ambatofitarafana	758892	1092260	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Ampitan'ny Terrain	Ambatofitarafana	758563	1093690	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Ambalabe	Ambatofitarafana	759023	1094200	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Andanasinina	Ambatomilona	761578	1092800	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Ambery	Ambatomilona	761877	1091790	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Saharongana	Ambatomilona	761158	1093950	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Ambatomilona	Ambatomilona	760592	1093270	40	50	16	30	12	14	10	172	<i>Moyenne</i>
Ambitsika	Ambitsika	759947	1100440	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Ambitsika	Ambitsika	757125,318	1099933,898	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Ambitsika	Ambitsika	759140	1099260	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Ambitsika	Ambitsika	757024,331	1099957,768	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Ambitsika	Ambitsika	757460	1100020	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Ambitsika	Ambitsika	756807,67	1099849,437	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Ambodiforaha	Amboditangena	758836	1097580	45	40	20	24	12	21	16	178	<i>Moyenne</i>
Ambarovola	Amboditangena	758644	1097420	45	40	20	24	12	21	16	178	<i>Moyenne</i>
Amboditangena	Amboditangena	760106	1097830	45	40	20	24	12	21	16	178	<i>Moyenne</i>
Madiotona Avaratra	Ambodivohangy	757455	1094880	40	40	20	24	12	21	16	173	<i>Moyenne</i>
Ankorabe	Ambodivohangy	758067	1095470	40	40	20	24	12	21	16	173	<i>Moyenne</i>
Ambodivohangy	Ambodivohangy	758882	1094970	40	40	20	24	12	21	16	173	<i>Moyenne</i>
Amparafara	Ambodivohangy	758199	1096310	40	40	20	24	12	21	16	173	<i>Moyenne</i>
Andasibe	Andasibe	757339	1090070	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Andasibe Ambany	Andasibe	758897	1089660	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Ampiana	Andasibe	759266	1090280	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Maroantsy	Andasibe	757212	1087170	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Maroanina	Andasibe	756883	1086620	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Mamilona	Andasibe	759099	1091220	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Beahitra	Andasibe	757475	1089200	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Betratra	Andasibe	757683	1088930	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Andohimena	Andasibe	757804	1091050	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Ankoba	Andasibe	759028	1088260	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Tanambao	Andasibe	757743	1090490	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Androho	Andasibe	760258	1089110	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Ankobalava	Andasibe	757501	1085650	20	50	16	15	12	14	10	137	<i>Moyenne</i>
Analanjahana	Androkaroka	757943	1099400	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Analanjahana	Androkaroka	757013,309	1098912,248	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Androkaroka centre	Androkaroka	756803	1099070	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Androkaroka centre	Androkaroka	756773,478	1098884,727	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Androkaroka	Androkaroka	757358	1098970	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Androkaroka	Androkaroka	756899,291	1098924,043	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Beryl	Androkaroka	756921	1098560	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Beryl	Androkaroka	756651,597	1098234,039	50	40	35	32	21	21	16	215	<i>Très Elevé</i>
Madiotsifa	Aniribe	750459	1102310	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Aniribe Centre	Aniribe	749429	1103910	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>
Analanjahana	Aniribe	749124	1105280	50	40	40	32	24	21	16	223	<i>Très Elevé</i>

Ampihananana	Antanambao	756415	1098690	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Antadimita	Antanambao	755547	1099020	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Antadimita	Antanambao	755702,105	1098973,189	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Lohalakana	Antanambao	755985	1098740	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Mahatsinjo	Antanambao	756014	1099000	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Mahatsinjo	Antanambao	755938,003	1098981,052	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Antanambao centre	Antanambao	756195	1098310	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Antanambao centre	Antanambao	755765,011	1098874,897	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Ambatondrainy	Antanandava	754230	1100280	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Andrafiatokana	Antanandava	752170	1100920	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Andranonampango	Antanandava	752761	1100820	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Antanandava	Antanandava	753248	1100480	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Ampitarihana	Antanankoro	755820,054	1099674,988	45	40	35	32	21	21	16	210	Elevé
Antanankoro	Antanankoro	756120,825	1099327,037	45	40	35	32	21	21	16	210	Elevé
Mahanoro	Antanankoro	754640	1099820	45	40	35	32	21	21	16	210	Elevé
Antanankoro	Antanankoro	756605	1099340	45	40	35	32	21	21	16	210	Elevé
Antanankoro	Antanankoro	756052,021	1099551,141	45	40	35	32	21	21	16	210	Elevé
Ampitarihana	Antanankoro	755760	1099720	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Analampeja	Antanankoro	757222,632	1099533,626	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Analampenja	Antanankoro	757464	1099600	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Antetezambe	Antetezambe	756772	1096610	45	40	20	12	12	21	16	166	Moyenne
Ambiamamy	Antetezambe	757430	1096480	45	40	20	12	12	21	16	166	Moyenne
Anjiabe	Antetezambe	755583	1095610	50	40	20	12	12	21	16	171	Moyenne
Antsirakabe	Antsiratenina	755770	1093720	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Ankiaka	Madiotona	756211	1094150	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Madiotona	Madiotona	756357	1094930	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Anolakely	Antsiratenina	756211	1093360	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Andilampanihy	Madiotona	755973	1094240	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Tsaratanana	Madiotona	755624	1094950	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Antanimena	Madiotona	755047	1094420	25	50	16	15	12	14	10	142	Moyenne
Mahambolona	Mahambolona	757440	1097650	40	40	35	24	21	21	16	197	Elevé
Ankiaka	Mahambolona	757840	1096940	45	40	35	24	21	21	16	202	Elevé
Carreau III	Mananara Centre	755668,686	1099085,241	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Carreau IV	Mananara Centre	755646	1099230	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Carreau V	Mananara Centre	755287	1099360	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Carreau VI	Mananara Centre	755423	1099560	40	40	35	32	21	21	16	205	Elevé
Carreau II	Mananara Centre	755724	1099470	45	40	35	32	21	21	16	210	Elevé
Carreau I	Mananara Centre	755992	1099310	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Carreau I	Mananara Centre	755904,584	1099220,882	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Carreau II	Mananara Centre	755800,396	1099114,728	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Carreau III	Mananara Centre	755576	1099370	50	40	35	32	21	21	16	215	Très Elevé
Ambohimahasoa	Sahave	755568	1088780	25	40	16	30	12	14	10	147	Moyenne
Antsiradrano	Sahave	755801	1089100	25	40	16	30	12	14	10	147	Moyenne
Sahave	Sahave	755851	1092560	25	40	16	30	12	14	10	147	Moyenne
Antanantsara	Sahave	755158	1090550	25	40	16	30	12	14	10	147	Moyenne
Tampolohely	Tampolo	752008	1101280	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Tampolo	Tampolo	750348	1101670	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Antanantaimorona	Tampolo	749642	1101150	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé
Analambondrona	Tampolo	749718	1100550	50	40	40	32	24	21	16	223	Très Elevé

Annexe 6- Répartition des nitrate et ammonium dans le zone d'étude

Tableau 35: Distribution de nitrate et d'ammonium dans la commune urbaine de Mananara-Nord

Toponyme	Fokontany	X	Y	Nitrate	Ammonium
Ambatofitarafana	Ambatofitarafana	759625	1093880	37,56	0,73
Mahasoa	Ambatofitarafana	758892	1092260	22,89	0,203
Ampitan'ny Terrain	Ambatofitarafana	758563	1093690	40	0,12
Ambalabe	Ambatofitarafana	759023	1094200	29,96	0,223
Andanasinina	Ambatomilona	761578	1092800	9,98	0,2099
Ambery	Ambatomilona	761877	1091790	7,56	0,01
Saharongana	Ambatomilona	761158	1093950	2,56	0,01
Ambatomilona	Ambatomilona	760592	1093270	0,269	0,07
Ambitsika	Ambitsika	759947	1100440	4,241	0,35
Ambitsika	Ambitsika	757125,318	1099933,898	13,351	0,68
Ambitsika	Ambitsika	759140	1099260	56,89	0,14
Ambitsika	Ambitsika	757024,331	1099957,768	53,89	0,3
Ambitsika	Ambitsika	757460	1100020	54,6	0,67
Ambitsika	Ambitsika	756807,67	1099849,437	54,6	0,67
Ambodiforaha	Amboditangena	758836	1097580	24	0,89
Ambarovola	Amboditangena	758644	1097420	33	0,09
Amboditangena	Amboditangena	760106	1097830	89	0,48
Madiotona Avaratra	Ambodivohangy	757455	1094880	0,894	0,12
Ankorabe	Ambodivohangy	758067	1095470	32	0,73
Ambodivohangy	Ambodivohangy	758882	1094970	26,98	0,204
Amparafara	Ambodivohangy	758199	1096310	125,69	0,207
Andasibe	Andasibe	757339	1090070	0,0065	0,189
Andasibe Ambany	Andasibe	758897	1089660	103,87	0,19
Ampiana	Andasibe	759266	1090280	126,56	0,201
Maroantsy	Andasibe	757212	1087170	56,87	0,183
Maroanina	Andasibe	756883	1086620	0,208	0,07
Mamilona	Andasibe	759099	1091220	104,89	0,1807
Beahitra	Andasibe	757475	1089200	34,738	0,12
Betratra	Andasibe	757683	1088930	106,78	0,177
Andohimena	Andasibe	757804	1091050	0	0,19
Ankoba	Andasibe	759028	1088260	0,89	0,174
Tanambao	Andasibe	757743	1090490	68,69	0,186
Androho	Andasibe	760258	1089110	0,56	0,19
Ankobalava	Andasibe	757501	1085650	11,34	0,01
Analanjahana	Androkaroka	757943	1099400	11,349	0,01
Analanjahana	Androkaroka	757013,309	1098912,248	34,739	1,12
Androkaroka centre	Androkaroka	756803	1099070	86,35	0,9
Androkaroka centre	Androkaroka	756773,478	1098884,727	0,905	0,01
Androkaroka	Androkaroka	757358	1098970	98,54	0,78
Androkaroka	Androkaroka	756899,291	1098924,043	0,208	0,78
Beryl	Androkaroka	756921	1098560	96,45	0,67
Beryl	Androkaroka	756651,597	1098234,039	78	0,57
Madiotsifa	Aniribe	750459	1102310	104	0,93
Aniribe Centre	Aniribe	749429	1103910	106	0,78
Analanjahana	Aniribe	749124	1105280	99,56	0,56

Amphihananana	Antanambao	756415	1098690	1,234	0,049
Antadimita	Antanambao	755547	1099020	30,618	0,02
Antadimita	Antanambao	755702,105	1098973,189	98,547	0,48
Lohalakana	Antanambao	755985	1098740	7,844	0,12
Mahatsinjo	Antanambao	756014	1099000	0,852	0,05
Mahatsinjo	Antanambao	755938,003	1098981,052	34,738	0,09
Antanambao centre	Antanambao	756195	1098310	33,064	0,049
Antanambao centre	Antanambao	755765,011	1098874,897	5,68	0,3
Ambatondrainy	Antanandava	754230	1100280	79,4	0,78
Andrafiatokana	Antanandava	752170	1100920	75,6	0,89
Andranonampango	Antanandava	752761	1100820	86,24	1,23
Antanandava	Antanandava	753248	1100480	89,5	1,23
Ampitarihana	Antanankoro	755820,054	1099674,988	0,879	0,04
Antanankoro	Antanankoro	756120,825	1099327,037	89,55	0,789
Mahanoro	Antanankoro	754640	1099820	0,852	0,05
Antanankoro	Antanankoro	756605	1099340	136,987	0,09
Antanankoro	Antanankoro	756052,021	1099551,141	105,365	0,03
Ampitarihana	Antanankoro	755760	1099720	0,25	0,243
Analampeja	Antanankoro	757222,632	1099533,626	0	0,89
Analampenja	Antanankoro	757464	1099600	89,55	0,73
Antetezambe	Antetezambe	756772	1096610	36,5	0,223
Ambiamamy	Antetezambe	757430	1096480	48,2	0,04
Anjiabe	Antetezambe	755583	1095610	49,32	0,243
Antsirakabe	Antsiratenina	755770	1093720	26,5	0,02
Ankiaka	Madiotona	756211	1094150	26	0,45
Madiotona	Madiotona	756357	1094930	23,04	0,203
Anolakely	Antsiratenina	756211	1093360	20,08	0,163
Andilampanihy	Madiotona	755973	1094240	12,45	0,1719
Tsaratanana	Madiotona	755624	1094950	12,45	0,166
Antanimena	Madiotona	755047	1094420	32,15	0,1689
Mahambolona	Mahambolona	757440	1097650	1,065	0,05
Ankiaka	Mahambolona	757840	1096940	3,5	0,3
Carreau III	Mananara Centre	755668,686	1099085,241	4,68	0,45
Carreau IV	Mananara Centre	755646	1099230	15,68	0,01
Carreau V	Mananara Centre	755287	1099360	104	0,97
Carreau VI	Mananara Centre	755423	1099560	42,87	0,12
Carreau II	Mananara Centre	755724	1099470	39,118	0,04
Carreau I	Mananara Centre	755992	1099310	39,118	0,04
Carreau I	Mananara Centre	755904,584	1099220,882	32,532	0,73
Carreau II	Mananara Centre	755800,396	1099114,728	89,553	0,08
Carreau III	Mananara Centre	755576	1099370	146,574	0,56
Ambohimahasoa	Sahave	755568	1088780	12,45	0,1719
Antsiradrano	Sahave	755801	1089100	12,45	0,166
Sahave	Sahave	755851	1092560	32,15	0,1689
Antanantsara	Sahave	755158	1090550	38,716	0,165
Tampolohely	Tampolo	752008	1101280	101,05	0,96
Tampolo	Tampolo	750348	1101670	95,85	1,05
Antanantaimorona	Tampolo	749642	1101150	90,65	0,56
Analambondrona	Tampolo	749718	1100550	85,45	0,95

Annexe 7- Tableau recapitulatif de l'aspects sanitaire du Commune Urbaine de Mananara-Nord

Tableau 36: Consultation externe du CSBII Mananara-Nord du 01/2017 à 12/2017 (CSBII et CHRD2, 2017).

Maladies	Total nouveaux cas		Total nouveaux cas	Proportion de nouveaux cas de maladie	Population	Indice P,10000hab
	Masculin	Féminin				
Diarrhées	87	96	183	7,7	30905	59,2
Paludisme simple	59	62	121	5,1	30905	39,2
Paludisme grave	9	2	11	0,5	30905	3,6

Tableau 37: Consultations Externes de Réf, MEDECINE (Liste des pathologies) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2017 à 12/2017 (CSBII et CHRD2, 2017).

Maladies	Total	
	Cas	%
Diarrhée avec déshydratation sévère d'origine bactérienne	189	4,9
Dysenterie avec déshydratation sévère	28	0,7
Paludisme simple	392	10,2
Paludisme grave et compliqué	76	2

Tableau 38: Hospitalisation Médecine (Morbilité et mortalité) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2017 à 12/2017 (CSBII et CHRD2, 2017).

Maladies	Total			
	Cas	%	Décès	Léthalité spécifique
Diarrhée avec déshydratation sévère d'origine bactérienne	61	7,8	0	0
Dysenterie avec déshydratation sévère	12	1,5	0	0
Paludisme grave et compliqué	167	21,2	13	7,8

Tableau 39: Consultation externe du CSBII Mananara-Nord du 01/2018 à 12/2018 (CSBII et CHRD2, 2018).

Maladies	Total nouveaux cas		Total nouveaux cas	Proportion de nouveaux cas de maladie	Population	Indice P,10000hab
	Masculin	Féminin				
Diarrhées	89	92	181	7,2	31742	57
Paludisme simple	126	74	200	7,9	31742	63

Tableau 40: Consultations Externes de Réf, MEDECINE (Liste des pathologies) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2018 à 12/2018 (CSBII et CHRD2, 2018).

Maladies	Total	
	Cas	%
Diarrhée avec déshydratation sévère d'origine bactérienne	125	3,6
Dysenterie avec déshydratation sévère	30	0,9
Paludisme simple	316	9,1
Paludisme grave et compliqué	151	4,4

Tableau 41: Hospitalisation Médecine (Morbidité et mortalité) du CHRD2 Mananara-Nord du 01/2018 à 12/2018 (CSBII et CHRD2, 2018).

Maladies	Total			
	Cas	%	Décès	Léthalité spécifique
Diarrhée avec déshydratation sévère d'origine bactérienne	47	5,9	0	0
Dysenterie avec déshydratation sévère	23	2,9	0	0
Paludisme grave et compliqué	233	29,4	17	7,3

Annexe 8- Emplacement des prélèvements et photos des puits sources de prélèvement

❖ Prélèvements dans la première zone



ZI1 : Ambitsika



ZI2 : Ambitsika



ZI3 : Ambitsika

Photos 9 : Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Ambitsika.

❖ **Prélèvements dans la deuxième zone**



ZII1 : Analampenja



ZII2 : Ampitarihana



ZII3 : Antanankoro



ZII4 : Antanankoro

Photos 10: Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Antanankoro.

❖ **Prélèvements dans la troisième zone**



ZIII1 : Carreau I



ZIII2 : Carreau II



ZIII3 : Carreau III

Photos 11 : Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany de Mananara centre.

❖ **Prélèvements dans la quatrième zone**



ZIV1 : Lohalakana



ZIV2 : Antanambao



ZIV3 : Mahatsinjo

Photos 12: Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Antanambao.

❖ **Prélèvements dans la cinquième zone**



ZV1 : Beryl



ZV2 : Analanjahana

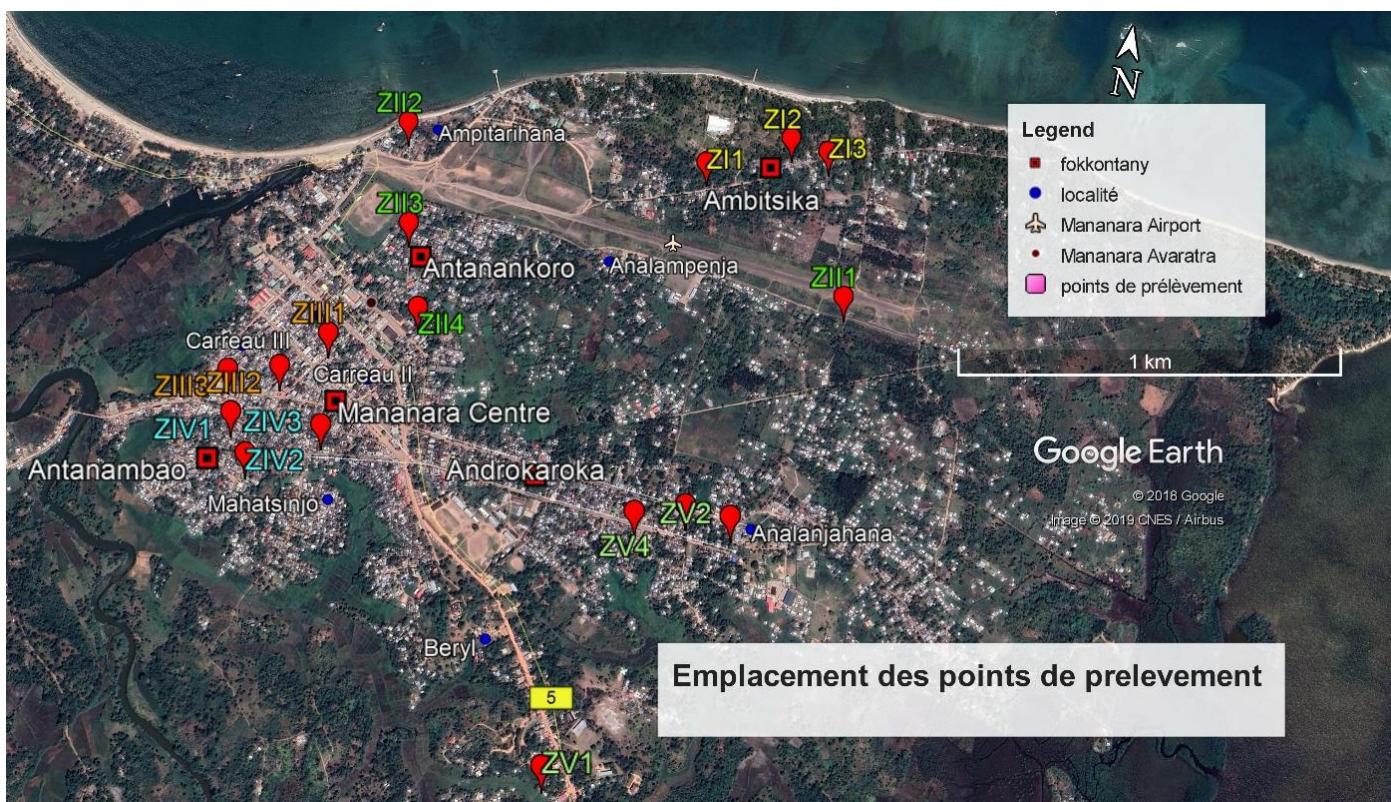


ZV3 : Androkaroka



ZV4 : Androkaroka

Photos 13: Prélèvements des échantillons dans les puits du fokontany d'Androkaroka.



Source : Google Earth, image 2019

Photos 14: Localisation des points de prélèvement des échantillonnages à Mananara.

❖ **Photos de la conservation des échantillons**



Photos 15: Préservation des échantillons récoltés dans les bouteilles plastiques.



Photos 16: Mode de codage des échantillons.

Photos 17: Conservation des échantillons dans une glacière.

❖ **Localisation des points de prélèvement et les niveaux piézométriques**

Tableau 42: Localisation des points de prélèvement.

Code des échantillons	Coordonnée géographique (Laborde : Tananarive 1925 Laborde Grid)		Elévation (m)	Altitude (m)	Profondeur du puits (m)	Niveau statique (m)
	Longitude (Est)	Latitude (Sud)				
ZI1	756807,67	1099849,437	10	13	1,5	0,95
ZI2	757024,331	1099957,768	9	12	1,15	0,85
ZI3	757125,318	1099933,898	10	12	1,07	0,57
ZII1	757222,632	1099533,626	6	8	1,6	1,1
ZII2	755820,054	1099674,988	6	9	2,2	1,45
ZII3	756052,021	1099551,141	10	12	2,8	2
ZII4	756120,825	1099327,037	13	15	2,77	1,77
ZIII1	755904,584	1099220,882	15	17	4	0,25
ZIII2	755800,396	1099114,728	15	17	4	1,25
ZIII3	755668,686	1099085,241	13	11	3	2
ZIV1	755702,105	1098973,189	18	20	5	3
ZIV2	755765,011	1098874,897	18	32	8	1
ZIV3	755938,003	1098981,052	15	17	6	4,3
ZV1	756651,597	1098234,039	18	20	3	3
ZV2	757013,309	1098912,248	12	14	3	2,2
ZV3	756899,291	1098924,043	14	16	5	3
ZV4	756773,478	1098884,727	14	16	7,15	0,85

Tableau 43: Niveaux piézométriques de chaque zone

Localité	Fokontany	X	Y	Elevation	Altitude	NPZ
Analanjahana	ANIRIBE	749124	1105280	16	21	16
Aniribe Centre	ANIRIBE	749429	1103910	12	14	12
Madiotsifa	ANIRIBE	750459	1102310	15	17	15
Tampolo	TAMPOLO	750348	1101670	29	30	29
Ampiana	ANDASIBE	759266	1090280	124	126	124
Antanantaimorona	TAMPOLO	749642	1101150	43	45	43
Analambondrona	TAMPOLO	749718	1100550	32	34	32
Tampolohely	TAMPOLO	752008	1101280	15	17	15
Andrafiatokana	ANTANANDAVA	752170	1100920	18	20	18
Andranonampango	ANTANANDAVA	752761	1100820	16	18	16
Antanandava	ANTANANDAVA	753248	1100480	14	16	14
Ambatondrainany	ANTANANDAVA	754230	1100280	6	8	6
Mahanoro	ANTANANKORO	754640	1099820	8	10	8
Ampitarihana	ANTANANKORO	755760	1099720	9	12	9
Antanankoro	ANTANANKORO	756605	1099340	10	11	10
Analampenja	ANTANANKORO	757464	1099600	9	11	9
Antadimita	ANTANAMBIAO	755547	1099020	14	16	14
Mahatsinjo	ANTANAMBIAO	756014	1099000	14	16	14
Lohalakana	ANTANAMBIAO	755985	1098740	12	12	12
Ampihananana	ANTANAMBIAO	756415	1098690	18	20	18
Antanambao centre	ANTANAMBIAO	756195	1098310	14	16	14
Carreau VI	MANANARA CENTRE	755423	1099560	5	7	5
Carreau II	MANANARA CENTRE	755724	1099470	11	13	11
Carreau III	MANANARA CENTRE	755576	1099370	6	8	6

Carreau I	MANANARA CENTRE	755992	1099310	17	19	17
Carreau IV	MANANARA CENTRE	755646	1099230	10	13	10
Carreau V	MANANARA CENTRE	755287	1099360	6	9	6
Androkaroka centre	ANDROKAROKA	756803	1099070	14	16	14
Beryl	ANDROKAROKA	756921	1098560	13	15	13
Analanjahana	ANDROKAROKA	757943	1099400	7	9	7
Androkaroka	ANDROKAROKA	757358	1098970	8	10	8
Ambitsika	AMBITSIKA	757460	1100020	9	11	9
Ambitsika	AMBITSIKA	759140	1099260	0	2	0
Ambitsika	AMBITSIKA	759947	1100440	0	2	0
Ambodiforaha	AMBODITANGENA	758836	1097580	6	8	6
Ambarovola	AMBODITANGENA	758644	1097420	10	12	10
Amboditangena	AMBODITANGENA	760106	1097830	33	35	33
Ankiaka	MAHAMBOLONA	757840	1096940	21	22	21
Mahambolona	MAHAMBOLONA	757440	1097650	23	25	23
Antetezambe	ANTETEZAMBE	756772	1096610	15	17	15
Ambiamamy	ANTETEZAMBE	757430	1096480	24	26	24
Anjiabe	ANTETEZAMBE	755583	1095610	20	22	20
Amparafara	AMBODIVOHANGY	758199	1096310	23	25	23
Ankorabe	AMBODIVOHANGY	758067	1095470	16	18	16
Ambodivohangy	AMBODIVOHANGY	758882	1094970	29	31	29
Madiotona Avaratra	AMBODIVOHANGY	757455	1094880	25	27	25
Madiotona	ANTSIRATENINA	756357	1094930	21	23	21
Tsaratanana	ANTSIRATENINA	755624	1094950	28	30	28
Andilampanihy	ANTSIRATENINA	755973	1094240	28	30	28
Ankiaka	ANTSIRATENINA	756211	1094150	24	26	24
Antanimena	ANTSIRATENINA	755047	1094420	20	23	20
Antsirakabe	ANTSIRATENINA	755770	1093720	27	29	27
Anolakely	ANTSIRATENINA	756211	1093360	28	30	28
Ambalabé	AMBATOFITARAFANA	759023	1094200	20	22	20
Ampitan'ny Terrain	AMBATOFITARAFANA	758563	1093690	28	30	28
Ambatofitarafana	AMBATOFITARAFANA	759625	1093880	30	32	30
Mahasoa	AMBATOFITARAFANA	758892	1092260	221	222	221
Saharongana	AMBATOMILONA	761158	1093950	34	36	34
Ambatomilona	AMBATOMILONA	760592	1093270	22	24	22
Andanasinina	AMBATOMILONA	761578	1092800	94	95	94
Ambery	AMBATOMILONA	761877	1091790	155	157	155
Mamilona	ANDASIBE	759099	1091220	123	125	123
Andohimena	ANDASIBE	757804	1091050	204	206	204
Tanambao	ANDASIBE	757743	1090490	247	249	247
Andasibe Ambany	ANDASIBE	758897	1089660	146	148	146
Androho	ANDASIBE	760258	1089110	236	238	236
Beahitra	ANDASIBE	757475	1089200	301	302	301
Betratra	ANDASIBE	757683	1088930	296	298	296
Ankoba	ANDASIBE	759028	1088260	296	297	296
Maroantsy	ANDASIBE	757212	1087170	313	315	313
Maroanina	ANDASIBE	756883	1086620	368	369	368
Andasibe	ANDASIBE	757339	1090070	285	287	285
Ankobalava	ANDASIBE	757501	1085650	268	270	268
Sahave	SAHAVE	755851	1092560	30	33	30
Antanantsara	SAHAVE	755158	1090550	178	179	178
Antsiradrano	SAHAVE	755801	1089100	292	294	292
Ambohimahasoa	SAHAVE	755568	1088780	287	289	287

Annexe 9- Situations géographique et géologique de la zone

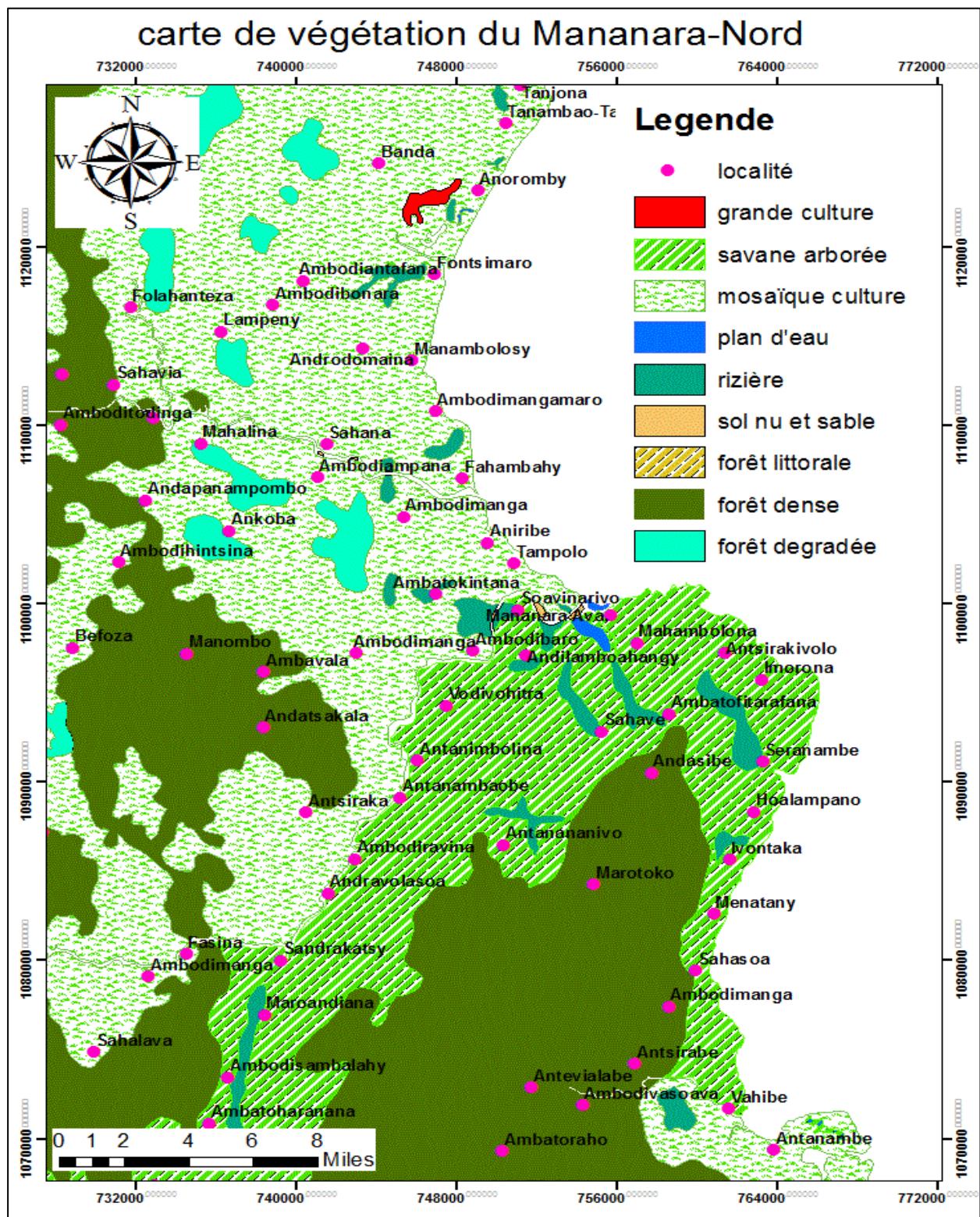
❖ Localisation de Mananara-Nord par rapport à la capitale d'Antananarivo



Source : Google Map, image 2019.

Photos 18: Localisation de la commune du Mananara-Nord par rapport au capitale Antananarivo.

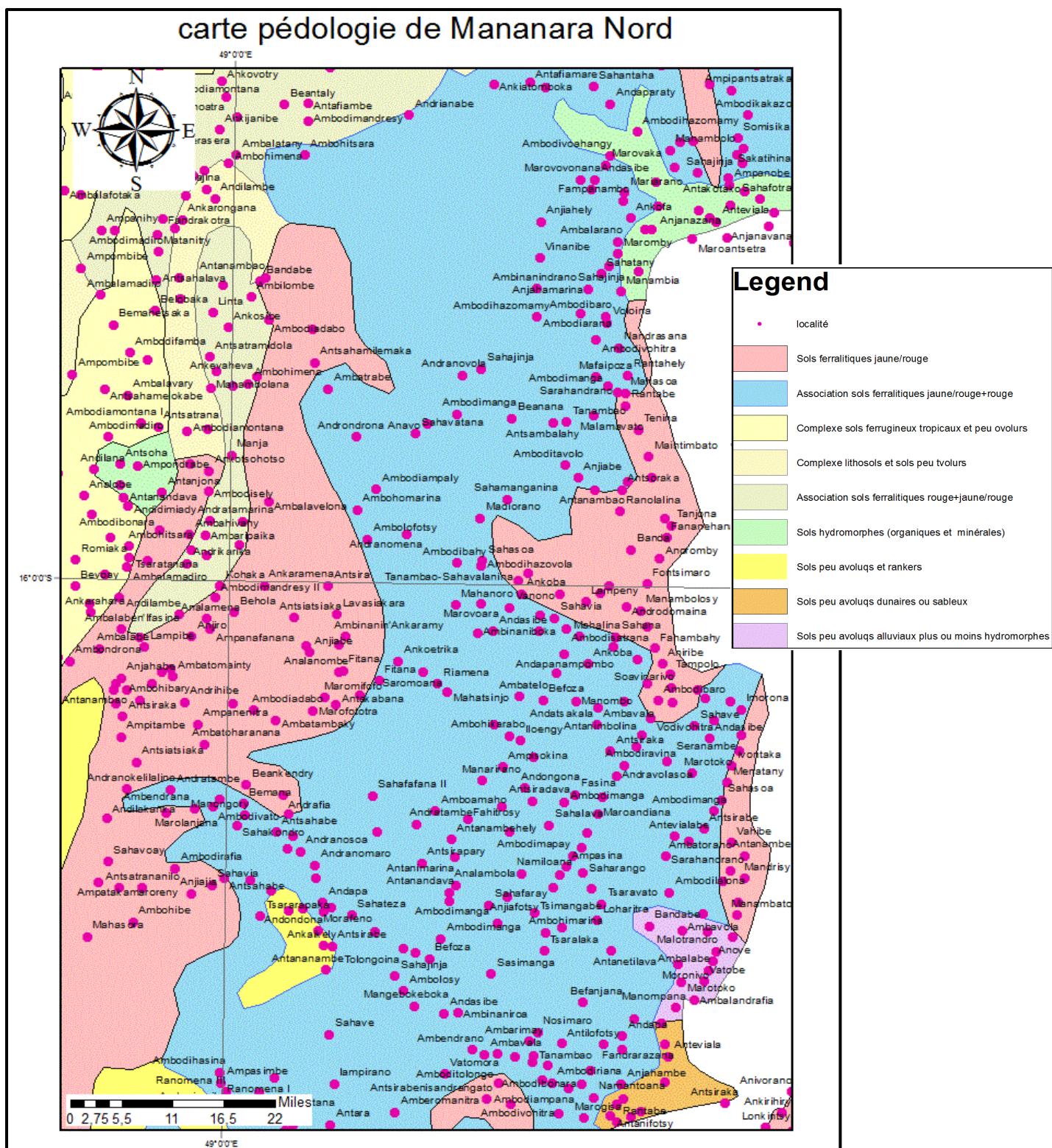
❖ Carte végétation de Mananara-nord



Source: BD 500 FTM (Foibe Tao-Tsaritan'i Madagasikara).

Figure 39: Carte végétation de Mananara-Nord.

❖ Carte pédologie de Mananara-Nord



Source: BD 500 FTM (Foibe Tao-Tsaritan'i Madagasikara)

Figure 40: Carte pédologie de Mananara-Nord.

❖ Carte géologie de la commune urbaine du Mananara-Nord

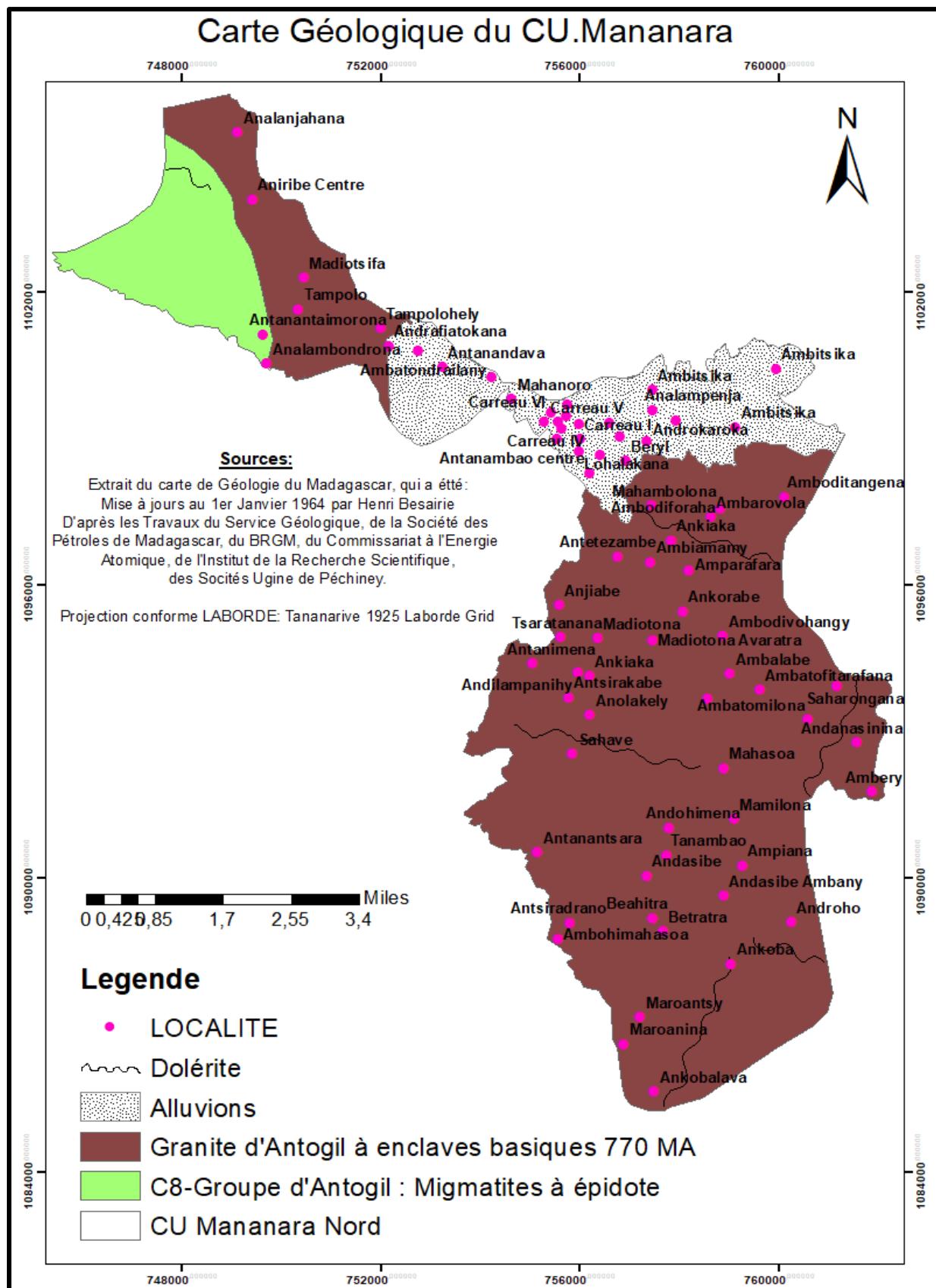
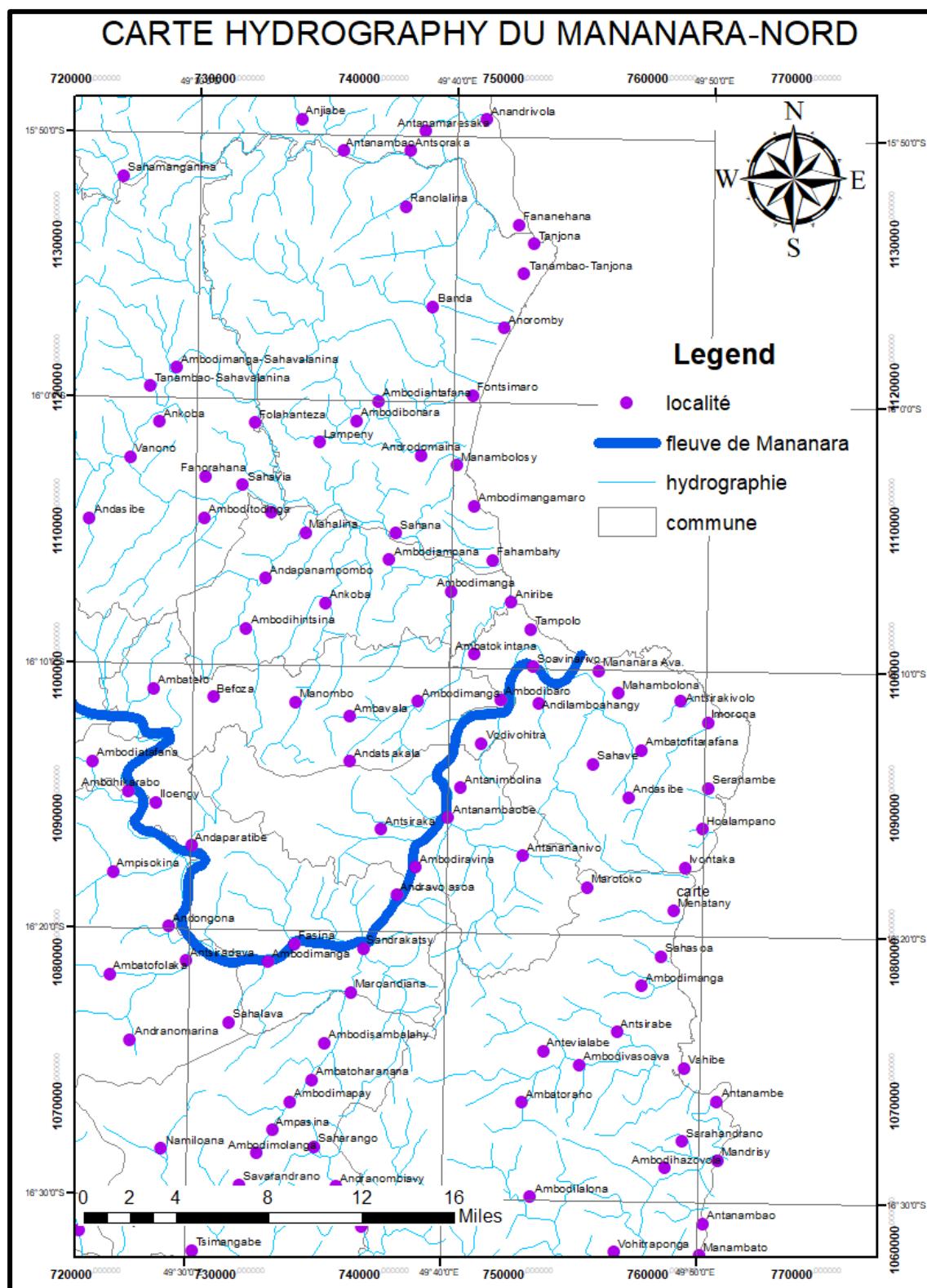


Figure 41: Carte géologie de la commune urbaine de Mananara-Nord.

❖ Carte hydrographie de Mananara-Nord



Source: BD 500 FTM (Foibe Tao-Tsaritan'i Madagasikara).

Figure 42: Carte hydrographie de Mananara-Nord.

Nom et Prénoms : ZAMANILEHA Elando Fréda
Adresse : Cité Universitaire d'Ambohipo Bloc 11 porte B1 Antananarivo
Contact : 034 03 271 30 / 032 63 601 07
E-mail : elandozamanileha@gmail.com



“MODÉLISATION DE L’ACCUMULATION DES COMPOSÉS AZOTÉS DANS LES EAUX SOUTERRAINES DE LA COMMUNE URBAINE DE MANANARA-NORD”

RESUME

La commune urbaine de Mananara-Nord est caractérisé par des sols hydromorphes alluvionnaire majoritairement sableux et sols ferrallitiques. D'où la présence de fer en quantité élevée dans les eaux, le climat est tropical. L'aquifère constitue une nappe peu profonde dans le sous bassin versant Nord et une nappe peu élevée dans le sous bassin versant Sud. Les échantillons sont prélevés à partir des différents puits. D'après les analyses physico-chimiques, le pH est acide, le nitrite, la salinité et la conductivité sont conforme aux normes de potabilité de l'eau de l'OMS. Pour la turbidité, deux parmi les dix-sept échantillons ne sont pas conformes à la norme et pour la couleur, neuf sur dix-sept échantillons sont supérieurs à la norme. Quatre échantillons montrent une concentration élevée en nitrate ($136,987 \text{ mg.l}^{-1}$ plus élevé) et en ammonium ($1,120 \text{ mg.l}^{-1}$ plus élevé). L'utilisation du logiciel « visual MODFLOW Flex 2015.1 » a permis de modéliser les vitesses d'écoulement, la carte de distribution de nitrate et d'ammonium et la vulnérabilité des eaux souterraines de la zone d'étude. Par la méthode SINTACS, on obtient des indices de vulnérabilité très élevé et élevé dans la partie du bassin versant Nord et un indice moyen dans la partie du bassin versant Sud.

Mots-clés : Mananara-Nord, Nitrate, Ammonium, Modélisation, Visual MODFLOW Flex 2015.1, Vulnérabilité, SINTACS.

“MODELING THE ACCUMULATION OF NITROGEN COMPOUNDS IN UNDERGROUND WATERS OF THE URBAN COMMUNITY OF NORTH MANANARA”

ABSTRACT

The urban commune of North Mananara is characterized by predominantly sandy alluvial hydromorphic soils and ferrallitic soils. Hence the presence of iron in high quantities in the waters, the climate is tropical. The aquifer constitutes a shallow aquifer in the northern sub-basin and a low aquifer in the southern sub-watershed. Samples are taken from the different wells. According to the physicochemical analyzes, the pH is acidic, the nitrite, the salinity and the conductivity are in conformity with the norms of potability of the water of WHO. For turbidity, two of the seventeen samples do not meet the standard and for color, nine out of seventeen samples are above the standard. Four samples show a high concentration of nitrate ($136,987 \text{ mg.l}^{-1}$ higher) and ammonium ($1,120 \text{ mg.l}^{-1}$ higher). The visual MODFLOW Flex 2015.1 software was used to model the flow velocities, the nitrate and ammonium distribution map, and the groundwater vulnerability of the study area. Using the SINTACS method, very high and high vulnerability indices are obtained in the northern part of the catchment and an average index in the southern part of the catchment.

Keywords: North Mananara, Nitrate, Ammonium, Modeling, Visual MODFLOW Flex 2015.1, Vulnerability, SINTACS.

Rapporteur : Monsieur MONG Yves Jean Michel, Maitre de Recherches et Directeur de Centre National de Recherches sur l’Environnement (CNRE)