

I - 4.3 Géologie de la zone d'étude

Les plaines sont surtout constituées par des formations d'origine lacustre dominées par les argiles dont l'épaisseur peut atteindre dans certains secteurs plus de 15 mètres. Elles sont, avec des intercalations de petits niveaux, gréseuses et/ou tourbeuses (Rasolomanana et al., 2011). Ces zones d'alluvions lacustres, généralement fertiles, jouent un rôle important pour l'occupation humaine. Elles sont surtout utilisées pour la riziculture; mais dans les parties où l'eau est difficilement maîtrisable, ces argiles et tourbes, en particulier sur la capitale, sont exploitées pour la fabrication de briques cuites.

Pour la zone d'étude, les différents niveaux de surfaces supérieures sont formés essentiellement par le socle cristallin et cristallophyllien nu ou couvert de couches d'altérites d'épaisseur variée, jusqu'à 40 m sur les roches schisteuses. Ces sont des formations géologiques magmatiques et métamorphiques fortement altérées que l'on trouve sur les collines et les interfluves. Elles sont formées essentiellement de roches éruptives et de granitisation de la série ancienne de migmatites granitoïdes et granite migmatitique associé, et de schiste cristallin non migmatitiques d'âge précambrien et entre ces deux formations s'interpose une formation d'alluvions récentes à alluvions anciennes argileuses. On trouve aussi des formations de quartzites et des roches éruptives et de granitisation en forme de filon dans les deux formations essentielles de la zone d'étude.

Dans la plaine, on rencontre des sédimentations, résultats des phénomènes d'altération. On a quatre types de formation pédologique sur cette plaine de haut en bas dont:

- le matériau colluvial fin de surface d'origine colluviale qui peut atteindre jusqu'à 1m d'épaisseur
- le niveau organique, matériau sombre plus ou moins tourbeux d'une épaisseur entre 20m et 30m à partir de 0,4 à 1,00m de profondeur.
- le sable lavé ou nappe de fluage d'une épaisseur entre 0,20 et 0,60m de couleur beige blanchâtre, composé de sables quartzeux assez purs, sans trace de micas
- l'arène argilo-micacée. Cette formation constitue le substrat profond des vallées et plaines alluviales, de teinte grise verdâtre, argilo-sableuse, généralement riche en micas, feldspaths kaolinisés et autres minéraux éventuels (ferromagnésiens) en cours d'hydrolyse.

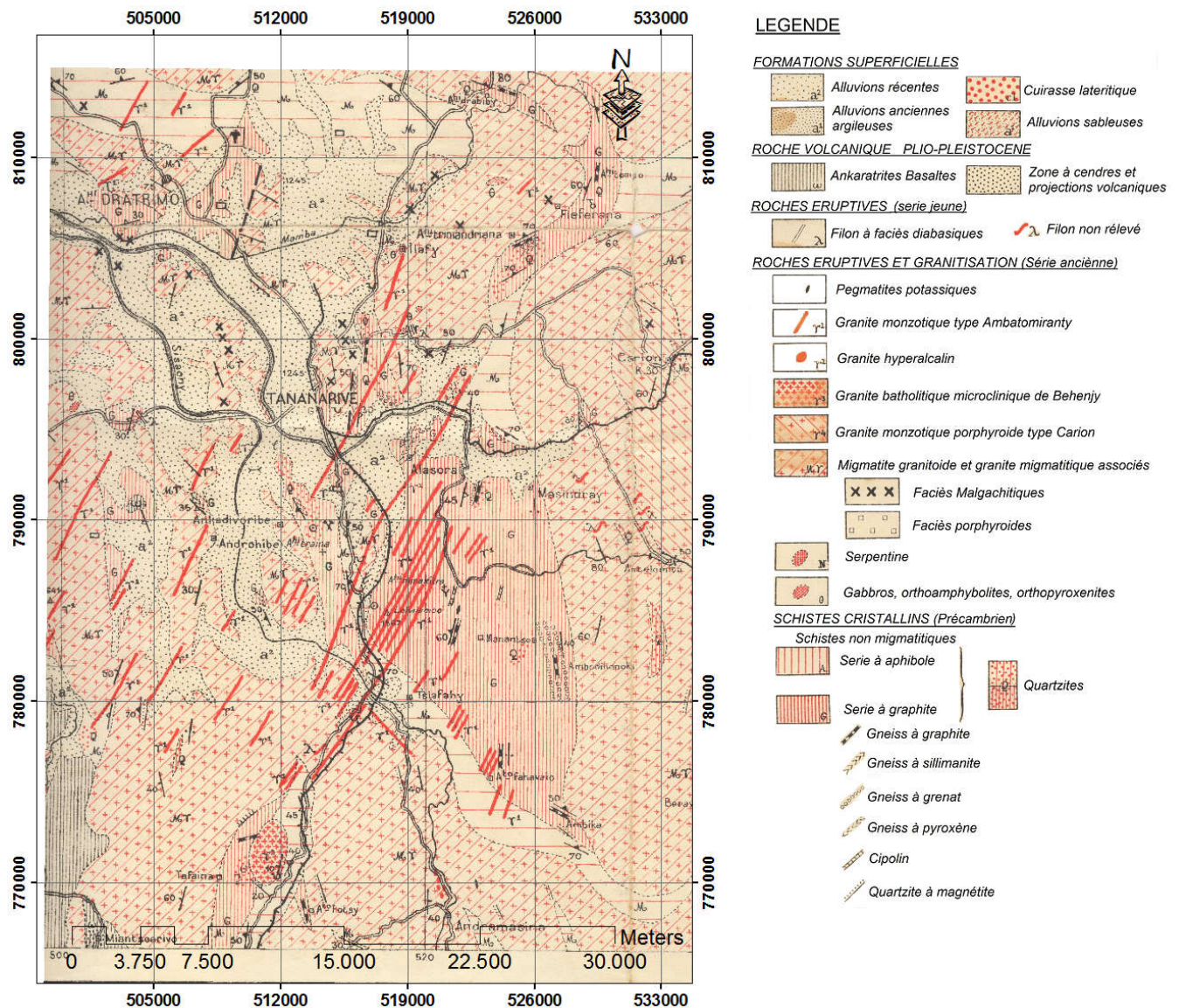


Figure5 : Carte géologique de la zone d'étude, (Service géologique MEM, Carte géologique)

I - 5 Contextes hydrographique et hydrogéologique

Bourgeat F. et Aubert G., 1972 souligne l'importance des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Le travail de Raunet M., 1980 définit au mieux la physiographie et la géomorphologie de la zone d'étude et avance aussi son importance hydrologique et hydrogéologique. Après, les travaux des différents chercheurs ont contribué à la caractérisation des différentes unités hydrogéologiques. Grillot J. C. et al., 1987 a trouvé que la couverture latéritique en Hautes Terres malgache a une épaisseur importante de 10 à 40m. Rakotondrainibe, 2010 a trouvé que les plaines alluvionnaires d'Antananarivo sont caractérisées par les aquifères multicouches. Il y a aussi les résultats des travaux de recherche de Dussarat B. et Ralaimaro, 1993 qui donne les caractéristiques hydrogéologiques de bassins versant du socle altéré des Hautes Terres de Madagascar.

I – 5.1 Contexte hydrographique

Fleuves et rivières

La géologie du bloc Antananarivo justifie le réseau hydrographique dite « dendritique ».

Formé par la réunion de la Varahina Nord et la Varahina Sud, dont le confluent se trouve au Sud de Manjakandriana, l'Ikopa traverse toute la région étudiée, du Sud-Est au Nord-Ouest. Elle est la principale rivière. Ses principaux affluents sont, sur la rive droite, l'Ivovoka, l'Ampasimbe et la Mamba, sur la rive gauche, la Sisaony et l'Andromba. Le cours de l'Ikopa est loin de son profil d'équilibre. Dans les montagnes de l'Est, les vallées sont étroites, le courant rapide. Mais, le seuil de Farahantsana, qui barre la vallée de l'Ikopa, vers l'Ouest, crée, au niveau de la plaine d'Antananarivo, une rupture de pente, qui est la source d'une forte sédimentation.

L'Ikopa, qui prend sa source dans la Falaise d'Angavo par l'intermédiaire de deux affluents Varahina, draine la majeure partie du Betsimitatatra de direction Est-Ouest. Au Nord de celle-ci, le Mamba draine la partie Nord d'Antananarivo, de direction Est-Ouest.

La Sisaony prend également sa source dans la Falaise d'Angavo. De direction Sud-Nord, l'Andromba débute dans le Massif d'Ankaratra, a une direction Sud-Nord avant de se jeter dans l'Ikopa.

Ces rivières jouent un rôle primordial dans la protection de la ville contre l'inondation. En dehors de ces rivières, des canaux de drainage et d'irrigation ont été créés.

Réseaux des canaux de drainage et d'irrigation

Le canal Andriantany est le principal collecteur des eaux usées de la ville. Ses eaux sont déviées de l'Ikopa au barrage de Tanjombato pour traverser la capitale vers le Nord et rejoindre l'Ikopa. Il présente la double vocation de canal d'irrigation en saison sèche et de drain en saison des pluies. Construit parallèle à l'Andriantany, le canal C3 décharge ce dernier. Le canal C2 au Nord de Tana sert au drainage agricole. Le canal GR, dévié du canal Andriantany à Ankadimbahoaka, assure l'irrigation des rizières.

Le réseau d'assainissement existant comprend un réseau séparatif en plaine et un réseau unitaire au centre-ville et dans des quartiers isolés. Le réseau séparatif collecte séparément les eaux usées et les eaux de ruissellement. Les eaux de ce réseau séparatif sont déversées

soit directement dans l'Ikopa, soit dans le canal Andriantany et le collecteur Analakely qui vont ensuite rejoindre l'Ikopa au Nord.

Le réseau unitaire collecte toutes les eaux. Les eaux de ce réseau en centre-ville se déversent dans le lac Anosy ou le canal Besarety pour rejoindre le canal Andriantany et celles du réseau unitaire isolé s'infiltrant directement dans le sol.

Lacs

Plusieurs lacs illustrent la région, dont les principales sont : les lacs d'Ambohibao, d'Ivato, de Mandroseza et de Mahazoarivo. Ce sont tous des lacs naturels. Leurs capacités de stockage sont relativement limitées en regard des besoins requis pour l'irrigation.

L'eau potable, pour l'approvisionnement de la ville provient en grande partie du lac Mandroseza qui lui est alimenté par pompage à partir de l'Ikopa.

Zones marécageuses

Les parties restant marécageuses, suite à l'aménagement de la plaine, sont innombrables. Quelques-unes sont devenues des lieux d'épuration, surtout celles à proximité des zones industrielles. Les autres restent de simples marécages, comme celui du Laniera (ex-zone rizicole)

Marais et lacs d'épuration

Le Marais Masay reçoit deux collecteurs d'eaux pluviales fortement chargés en eaux usées. Le premier descend des quartiers d'Antanimora et d'Ampahibe et le second descend des quartiers d'Ankasana, Ambatobe et Nanisana. L'émissaire de sortie du marais se jette ensuite dans le canal Andriantany.

Les lacs Anosy et Behoririka reçoivent une partie des eaux du réseau unitaire en centre ville. Les eaux des lacs sont par contre peu utilisées. Toutes ces eaux ne reçoivent aucun traitement préalable car jusqu'à présent il n'y a pas une station d'épuration fonctionnelle à Antananarivo.

Le Marais d'Andralanitra sert d'épuration de la décharge d'ordure avoisinante et des zones d'habitation aux alentours. La figure 6 suivante montre ces divers types de ressources :

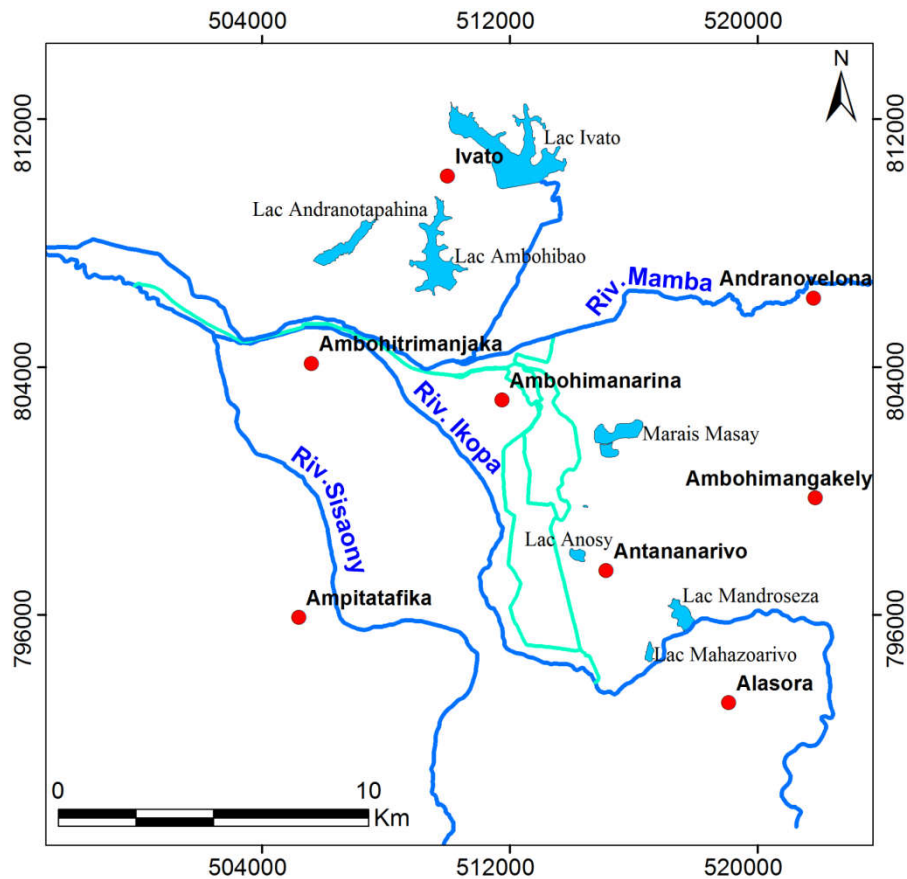


Figure 6 : Hydrographie de la zone d'étude

I – 5.2 Contexte hydrogéologique

Identification des réservoirs souterrains

Le principal réservoir aquifère de la zone est celui constitué par les sables alluvionnaires qui se sont déposés dans la plaine du Betsimitatatra. Il s'agit d'un sable siliceux parfois chargé en micas. Ce niveau, présent sur l'ensemble de la plaine, est souvent épais de plus d'une dizaine de mètres.

Le plus souvent, les bas-fonds abritent un niveau de sables grossiers, épais de quelques dizaines de centimètres. Il s'agit de sables quartzeux assez purs, sans trace de micas. Compte tenu de sa perméabilité, ce niveau joue le rôle de drain. De plus son alimentation se fait majoritairement via les arènes granitiques et est donc limitée par la faible perméabilité de ce niveau.

Au droit des interfluvés, la formation altéritique kaolinique est une couche aquifère qui abrite une nappe libre. Les eaux de cette nappe sont faiblement minéralisées. Cette nappe est actuellement exploitée pour l'alimentation des populations au travers de puits individuels. De

nombreuses sources qui émergent de ce niveau permettent également la mise en eau des rizières, y compris pendant l'étiage au cours du printemps austral.

Les arènes qui surmontent partout le socle sain, sont composées d'un matériau argilo sableux riche en micas, feldspaths kaolinisé et ferromagnésiens. Il n'est pas rare que le toit de ce niveau soit argilifié. Ce niveau aquifère abrite une nappe qui est au minimum semi-captive sous le niveau argilifié au droit des interfluves, et le plus souvent captive au droit des bas-fonds et de la plaine alluviale, sous le remplissage quaternaire.

Dans le socle métamorphique, l'eau circule principalement au niveau des réseaux de fractures. Dans la zone d'étude, ce socle, qui sous les arènes forme la base de l'ensemble des formations affleurantes, constitue un aquifère discontinu, alimenté au travers des arènes sus-jacentes.

Principe de fonctionnement du système

Rappelons que le climat est de type tropical d'altitude, avec des précipitations moyennes annuelles comprises entre 1.078 mm (décennale sèche) et 1.765 mm (décennale humide). Les irrégularités inter annuelles varient suivant les saisons.

Les reliquats des précipitations qui ne sont pas consommés par l'évapotranspiration, alimente directement les nappes souterraines ou ruisselle pour rejoindre le réseau hydrographique de surface.

Au droit des interfluves, les ruissellements sont importants : ils correspondent souvent à 70 ou 80 % du terme résiduel. Le reliquat alimente la nappe des altérites qui se vidange soit au niveau de sources sur les versants, soit dans les arènes et le socle sous-jacent.

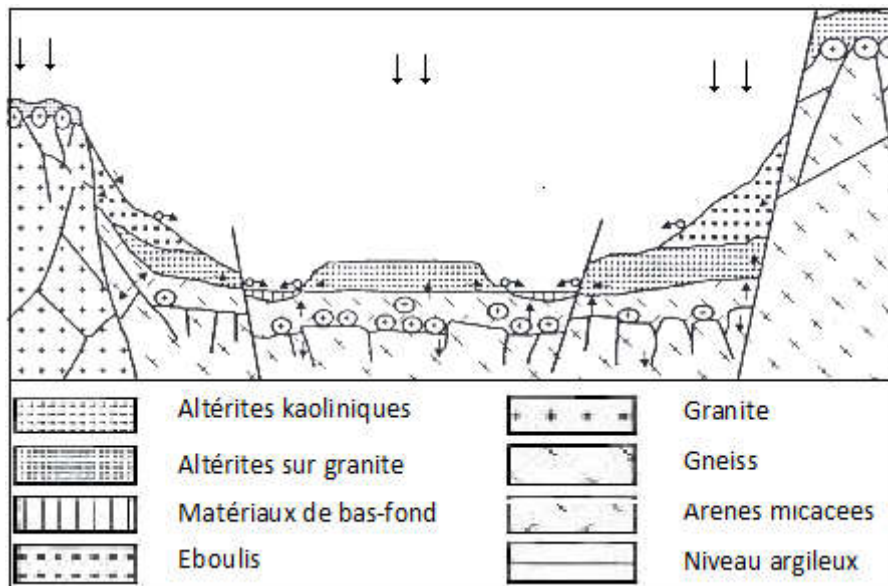


Figure 7 : Principe du fonctionnement hydrogéologique des interfluvés et des bas-fonds (modifié par DussaratB., 1994)

Compte tenu de la très faible pente des bas-fonds ou de la plaine alluviale, ainsi que des aménagements qui y ont été faits, entre autres les rizières, les ruissellements sont presque négligeables.

Dans ces zones, la majeure partie du terme résiduel, c'est à dire non évapotranspiré, rejoint la nappe sous-jacente. Cette dernière est également alimentée par le réseau hydrographique de surface. Au final, la nappe alluviale est alimentée par trois processus complémentaires :

Verticalement *per descendum* par les précipitations directes ou la mise en eau des rizières sur toute la surface des affleurements alluvionnaires. Ce mode d'alimentation est limité par la nature argileuse des formations à l'affleurement et par l'évapotranspiration qui consomme la plus grande part de ces eaux sur les surfaces agricoles ;

- Latéralement, par les massifs du socle fracturé et altéré. En effet, il y a continuité hydraulique entre la nappe des altérites et des arènes du socle. Au droit des massifs, leur charge hydraulique est souvent très supérieure au niveau statique dans la plaine : les massifs fissurés et altérés se vidangent au-dessus du niveau de la plaine, par autant de sources visibles à l'affleurement. Il y a lieu de penser que ce phénomène existe aussi à des niveaux topographiques inférieurs, latéralement vers les niveaux alluvionnaires perméables ;

- Verticalement *per descendum* par drainage du réseau hydrographique de surface. Ce phénomène est probablement le plus important en terme quantitatif. Il est contrôlé par la

nature du matériau au droit du lit mineur du cours d'eau : il est d'autant plus important que ce matériau soit perméable.

La nappe se vidange majoritairement dans le réseau des drains qui parcourent la plaine et peut-être directement dans l'Ikopa. Le profil piézométrique de la figure 10, établi dans la nappe alluviale à l'issue de la campagne d'investigations menée en 1973-74, schématise ce fonctionnement.

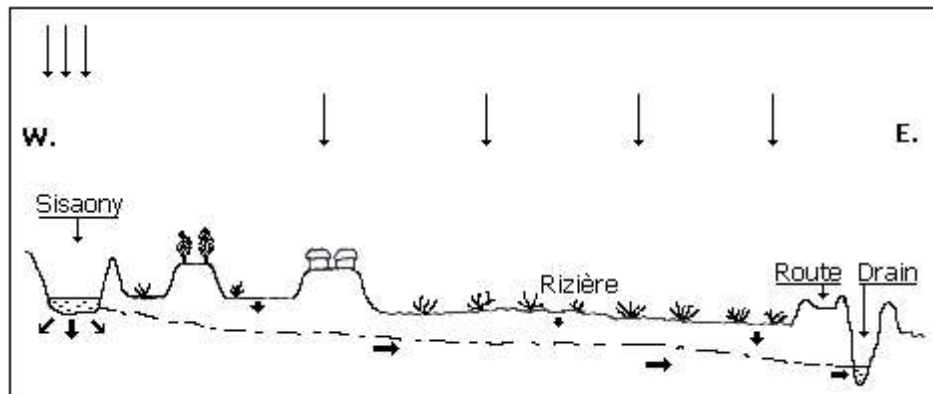


Figure 8 : Profil hydrogéologique schématisé de la plaine alluviale – principe de fonctionnement de la nappe

Les types de nappe

Les Hautes Terres de Madagascar présente une juxtaposition des systèmes hydrauliques plus ou moins interdépendants, au sein desquels, sont différenciés, trois types de nappes :

- La (ou les) nappe(s) des bas-fonds et des plaines alluviales : C'est une nappe captive ou semi-captive dans un horizon à dominance sableuse et sous un recouvrement argileux anthropique. Les éléments grossiers dominent vers la base. Son comportement dépend des ouvrages hydrauliques et des seuils rocheux. Les perméabilités verticales varient selon les matériaux du réservoir : arène micacée (4.10^{-6} m/s), sables lavés (2.10^{-5} m/s), tourbe franche (10^{-9} m/s), limon tourbeux (4.10^{-4} m/s).

Dans les bas-fonds, par exemple, les perméabilités horizontales ne sont que de quelques unités 10^{-5} m/s pour une épaisseur qui ne dépasse pas 1 à 2 m. La nappe alluviale présente des transmissivités le plus souvent comprise entre 3.10^{-3} m²/s et 2.10^{-2} m²/s. Elle est alimentée en permanence par les eaux de surface.

Le réservoir est constitué par les alluvions de l'Ikopa, de la Sisaony et de la Mamba. Les contours sont digités, analogues à ceux d'un lac de retenue. Le toit est plat, le gradient de pente moyenne en direction du Nord-Est de l'ordre de 0,40 %.

- Les nappes semi-captives : ce sont des nappes d'arènes + socle dont l'importance dépend de l'épaisseur de la couverture latéritique. Elles sont alimentées par l'impluvium régional. Les eaux y sont assez minéralisées avec une conductivité électrique généralement supérieure à 100 $\mu\text{S/cm}$. Le temps de réponse au signal pluie est au moins 3 mois. Le coefficient d'emmagasinement est $S=0,1\%$.
- Les nappes libres : ce sont les nappes des altérites. Elles sont très peu minéralisées (conductivité électrique inférieure à 30 $\mu\text{S/cm}$). Elles sont alimentées par l'impluvium local avec un temps de réponse au signal pluie de 15 jours. L'infiltration est rapide de 1m/jour avec une circulation lente dans la zone noyée (10^{-6} à 10^{-7} m/s).

I - 6. Taux d'accès à l'eau potable

A Madagascar, d'après une statistique indiquée dans le tableau de bord environnemental, seulement 42% de la population a accès à l'eau potable (Ministère de l'eau, 2012).

Pour la zone d'étude, Selon la classe sociale et le milieu, le taux d'accès à l'eau potable est de 77,40% en milieu urbain et 60,63% en milieu rural en 2009 et puis de 72,36% pour l'ensemble en 2010 (TBER, 2012). Le taux national de desserte en eau potable s'est amélioré de 45% selon INSTAT/DSM/EPM en 2010. Le tableau 1 suivant montre l'évolution du taux de desserte en eau potable pour la région Analamanga.

Tableau 1 : Taux de desserte en eau potable des quatre Districts de la Région Analamanga en 2010

Localisation	Année		Population totale	FPMH	PPMH	BF	BP	Population desservie	Taux (%)
Région Analamanga	2006	Milieu urbain	1 129 402			1 464	59 751	963 510	85,31
		Milieu rural	1 417 255	3	0	2 849	2	713 170	50,32
		Ensemble	2 546 657	3	0	4 313	59 753	1 676 680	65,84
	2008	Milieu urbain	1 193 999			19	312	924 200	77,40
		Milieu rural	1 498 317		39	3 624	432	920 070	61,41
		Ensemble	2 692 317		39	3 643	744	1 844 270	68,50
	2009	Milieu urbain	1 226 852			58	999	948 690	77,33
		Milieu rural	1 539 542			51	20	933 020	60,63
		Ensemble	2 766 394			109	1019	1 881 710	68,02
	2010	Ensemble	2 841 400			5 591	65 820	2 055 950	72,36
Localisation	Année		Population totale	FPMH	PPMH	BF	BP	Population desservie	Taux (%)
Madagascar	2006	Milieu urbain	4 024 071			4 587	127 719	2 423 940	60,24
		Milieu rural	14 231 756	2 595	501	14 209	907	4 490 420	31,55
		Ensemble	18 255 821	2 596	501	18 796	128 626	6 914 360	37,87
	2008	Milieu urbain	4 260 364			29	899	2 391 580	56,14
		Milieu rural	15 074 475	4557		17 660	1 471	5 141 470	34,11
		Ensemble	19 334 839	4557	501	17 689	2 370	7 533 050	38,96
	2009	Milieu urbain	4 391 789			233	1 699	2 466 820	56,17
		Milieu rural	15 555 003			1 459	32	5 934 030	38,15
		Ensemble	19 946 792			1 692	1 731	8 398 350	42,10
	2010	Ensemble	20 533 014			29 449	139 167	8 753 920	42,63

Source : Ministère de l'eau dans TBER 2012.

I-7 Contexte climatique

I-7.1 Climat de la zone d'étude

Les précipitations constituent un paramètre primordial qui conditionne le fonctionnement du cycle de l'eau. La température, la structure du sol, la géomorphologie et l'occupation du sol règlent la recharge des nappes aquifères.

Pour le cas de notre zone d'étude, elles se situent dans la zone intertropicale, dont la température moyenne sur une année est modérée par les effets d'altitude. Le climat est caractérisé par des hivers frais et très secs et des étés chauds et très pluvieux.

a) Les précipitations

La saison des pluies va de décembre à avril. Les pluies sont généralement concentrées en une période courte allant du mois de Décembre à Février.

b) L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est la combinaison des mots évaporation et transpiration. L'évaporation est le passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive. Lorsqu'il existe un volume libre au-dessus d'un liquide, une fraction des molécules composant le liquide peut passer sous forme gazeuse. À l'équilibre, la quantité de matière sous forme gazeuse définit la pression de vapeur saturante qui dépend de la température. Lorsque la pression partielle de la vapeur dans le gaz est inférieure à la pression de vapeur saturante et que celle-ci est inférieure à la pression totale ambiante, une partie des molécules passent de la phase liquide à la phase gazeuse: c'est l'évaporation, qui demande de fournir la chaleur latente correspondante, ce qui refroidit le liquide.

La transpiration se définit par les transferts d'eau dans la plante et les pertes de vapeur d'eau au niveau des stomates de ses feuilles.

c) La Température

Le phénomène du changement climatique est devenu actuellement un sujet qui intéresse les scientifiques du monde entier. Le réchauffement climatique touche la totalité de la planète bleue. Mann et al. en 2008 ont observé une forte tendance au réchauffement depuis l'année 1900 environ pour l'hémisphère nord, marqué par un réchauffement rapide, très significatif, de 0,5°C/décennie entre 1979 et 2010, soit un total de 1,5°C pour une période de 30 ans. Lamarque et al. en 1994 ont observé une nette augmentation de la température de 1,8°C en 71 ans des températures minimales en trois stations de la région sud-ouest de la

France ; les températures maximales ne présentent pas de tendances significatives. Torok et al. en 1996 ont également mis en évidence une tendance à la hausse des températures minimales pour l'Australie. A Madagascar, une augmentation globale de la température moyenne de l'ordre de 0.6°C est observée, avec 0,8°C pour les températures minimales et 0,3°C pour les températures maximales entre 1961 et 1990 (Rabefitia Z, 1999).

I-7.2Bilan hydrique

Il est difficile de trouver une formule efficace et rapide qui permet d'estimer la quantité de précipitations suffisantes pour qu'il y ait infiltration de l'eau jusqu'en profondeur pour recharger les nappes d'eaux souterraines.

Le calcul du bilan hydrique estime l'écoulement et l'évaporation sur un pas de temps décadaire ou mensuel en fonction du sol et de la météorologie. Il consiste à évaluer les flux d'entrée et de sortie, ce qui permet l'analyse globale du cycle de l'eau.

Les précipitations, une fois arrivées au sol, subissent en général trois processus résumés par la figure 9 suivante

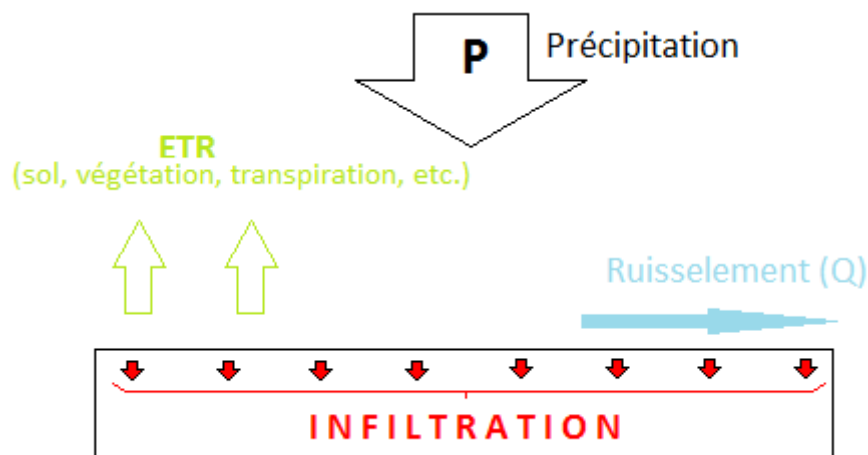


Figure 9: Schéma simplifié du cycle hydrologique

L'équation du bilan hydrologique s'exprime par l'équation suivante :

$$P = ETR + Q + I \pm \Delta R$$

P: précipitation (mm) ;

ETR: évapotranspiration réelle (mm) ;

I: lame d'eau infiltrée (mm) ;

Q: lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant (mm) ;

ΔR : variation du stock d'eau

a) La Réserve utile

Le sol a un impact important sur le bilan car il possède une capacité de stockage qui peut s'épuiser, ce qui conduit au flétrissement des végétaux et ainsi à une baisse de l'évapotranspiration. La capacité d'un sol à stocker l'eau, appelée Réserve Utile (RU) est estimée en mm. Pour un même type de sol, la RU varie de 50mm à 250mm. La RU est très variable selon le type de sol.

b) Evapotranspiration potentielle (ETP) / Evapotranspiration réelle (ETR)

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour estimer l'évapotranspiration potentielle dont celles de Thornthwaite, Turc, Coutagne, Penman, etc. Le choix de la méthode dépend de la structure géologique et du climat de la zone d'étude.

Vu qu'on a seulement les données de précipitations et de température, la méthode de Thornthwaite semble la mieux adaptée pour estimer l'ETP.

L'ETP sera ensuite calculée en faisant la comparaison de l'ETP mensuelle à la hauteur des précipitations mensuelles. Trois cas possibles peuvent se présenter :

- Si $ETP < P$, alors $ETR = ETP$
- Si $ETP = P$, alors $ETR = ETP = P$
- Si $ETP > P$, alors $ETR = P$ + tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci.

c) Bilan hydrique de la zone d'étude

Les études préétablies auparavant par des chercheurs sur le climat de la région Antananarivo ou encore la région Analamanga s'avèrent, jusqu'à nos jours, assez convaincantes compte tenu des données disponibles en notre possession.

Ralaimaro en 2004 a fait une étude du climat de la région d'Antananarivo en utilisant les données des précipitations et de température anciennes sur onze stations. Son étude a montré que la région d'Antananarivo possède une pluviométrie moyenne annuelle entre 1050 et 1525 mm avec 5 mois secs ($P < 20$ mm) de Mai à Septembre. 95% des pluies tombent en Décembre et Janvier.

La région possède deux saisons bien distinctes :

- la saison pluvieuse d'Octobre à Mars ;
- la saison sèche d'Avril à Septembre.

A l'exception de la station d'Ambohidratrimo (Ambo) où les plus faibles précipitations en période de crue sont observées, et la station de Mantasoa (Mat) où il pleut presque toute l'année, les précipitations sont bien réparties dans la région.

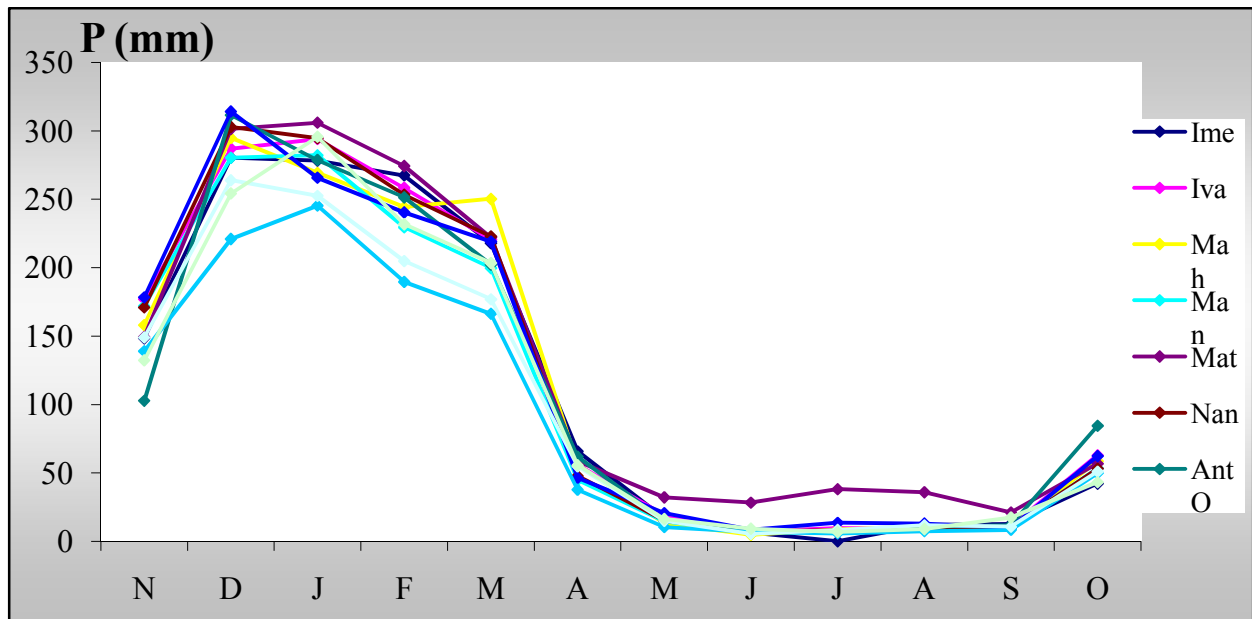


Figure 10 : Précipitations moyennes mensuelles (Ralaimaro, 2004)

Selon encore Ralaimaro, la température décroît à mesure que l'on pénètre vers les zones d'altitude. En effet, la température moyenne annuelle varie de 15° à 23°C. Les zones intertropicales de basse pressions et la cellule océanique de hautes pressions jouent un rôle important dans l'alternance saison chaude - saison fraîche et vents dominants moussons - alizés.

L'ETP calculée selon Thornthwaite est de l'ordre de 1000 mm (Chaperon et *al*, 1993 ; Rasoamiadana, 1993 ; Dussarrat, 1994).

Le calcul du bilan hydrologique de la région Analamanga occupe aussi une grande partie de l'étude faite par Raissa en 2016. Son étude semble encore plus intéressante vu qu'elle a utilisé des données plus récentes en complément des données anciennes utilisées par Ralaimaro en 2004. En effet, elle a utilisé des données de précipitations et température entre 1960 et 2014 de la station aéroport Ivato. Son observation montre un écart appréciable avec les résultats obtenus par Ralaimaro en 2004.

Elle a trouvé une répartition irrégulière des précipitations avec 80,6% entre Décembre et Mars contre 95% en Décembre et Janvier pour celui de Ralaimaro.

Selon l'analyse des données par Raissa, la pluviométrie moyenne annuelle est de 909,6 mm/an contre 1050 mm/an le minimum et 1525 mm le maximum d'après l'analyse des données par Ralaimaro.

Le phénomène de changement climatique ressenti depuis le début du 21^{ème} siècle pourrait être la raison de cet écart de résultat. En effet, l'augmentation de la température de

surface peut causer une influence sur les précipitations : une augmentation des précipitations moyennes sur les régions déjà bien arrosées (comme les régions de convergence intertropicales ou l'Europe boréale), une diminution sur les régions plus arides (comme la ceinture désertique tropicale ou le bassin méditerranéen).

La figure 11 suivante résume la tendance des précipitations et la température moyenne mensuelle.

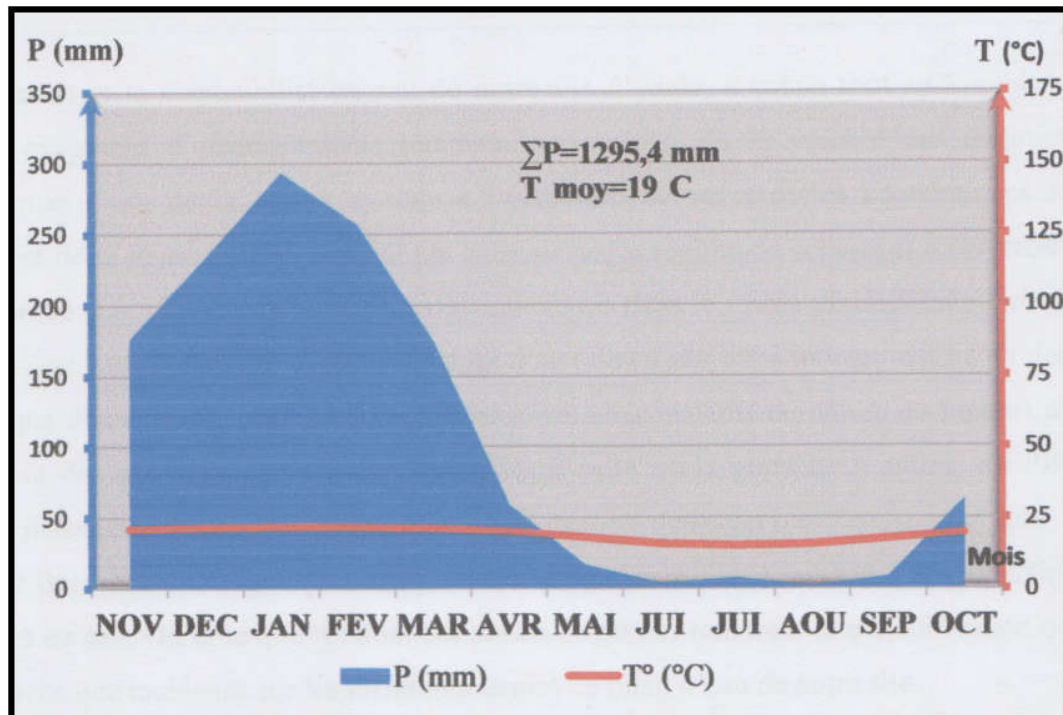


Figure 11 : Courbe ombrothermique de Gaussen (Raissa , 2016)

La courbe ombrothermique met en évidence la répartition du climat de la zone d'étude en deux saisons avec une saison pluvieuse de bilan hydrologique excédentaire et une saison sec de bilan hydrologique déficitaire.

I - 8. Taux de croissance et urbanisation

La connaissance du taux de croissance démographique et de l'urbanisation est importante car cela fait partie de l'indicateur socio-économique. La connaissance de ce paramètre indique la nécessité ou non de l'amélioration du réseau d'adduction d'eau potable pour une région ou pour toute un pays.

I - 8.1 Taux de croissance

Le premier recensement de 1975 a dénombré 7.603.790 personnes contre les 12.238.914 dénombrées en 1993 pour l'ensemble du pays Madagascar (Razafimananjato et al., 1997). La population malgache a donc évolué à un rythme de 2,7% par an au cours de la

période intercensitaire. Pour le Farintany d'Antananarivo, en ces mêmes années, les nombres des âmes recensés sont respectivement de 2.167.973 en 1975 et 3.601.127 en 1993 avec un taux d'accroissement égal à 2,86. Razafiarisoa et al. en 2009 a annoncé un taux d'accroissement global égal à la moyenne de 5% entre 2004 et 2008 pour tout le pays avec un nombre total de la population estimée à 20.097.000 individus.

Le tableau 2 suivant montre l'évolution de la population pour l'ensemble de la région Analamanga.

Tableau 2 : Population de la région Analamanga entre 1991 et 2001, d'après le RGPH 1993 et DDSS-INSTAT-1999.

Sous-prefecture	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2001
Antananarivo Renivohitra	566 472	634 294	710 236	730 655	753 450	776 956	801 196	826 192	851 181	903 450
Antananarivo Atsimondrano	166 098	195 283	229 198	236 198	243 567	251 166	259 002	267 082	275 160	499 999
Antananarivo Avaradrano	134 655	148 365	163 471	168 171	173 417	178 828	184 407	190 160	195 912	
Andramasina	88 449	98 388	109 444	112 590	116 103	119 725	123 461	127 312	131 163	139 217
Anjozorobe	81 802	98 457	114 312	117 598	121 267	125 051	128 952	132 975	136 997	145 410
Manjakandriana	138 920	148 811	159 406	163 989	169 105	174 381	179 821	185 431	191 040	202 771
Ambohidratrimo	145 003	164 003	185 146	190 469	190 411	202 539	208 858	215 374	221 888	285 514
Ankazobe	74 673	74 673	87 315	89 825	92 628	95 517	98 497	101 570	104 643	111 068
Ensemble Région	1 396 072	1 562 274	1 758 528	1 691 897	1 859 948	1 924 163	1 984 194	2 046 096	2 107 984	2 287 429

Les chiffres montrent clairement que le District d'Antananarivo Renivohitra abrite pour lui seul 40,62% de l'ensemble de la région. Le District d'Atsimondrano et le District d'Avaradrano prennent en charge les 22 % en moyenne de l'ensemble de la région. Ce qui fait que la zone d'étude incluant Antananarivo Renivohitra, Atsimondrano et Avaradrano subissent une forte pression de l'activité anthropique et notamment Antananarivo Renivohitra avec une densité de population de 13988 hab/Km² en 2011 (Institut National de la Statistique, Madagascar, « Collectivité malgache », GeoHive, 1993-2011).

I - 8.2 Urbanisation

D'après Razafimanjato et al., 1997, le taux d'urbanisation au niveau national est de 23%. De par ce résultat, le niveau d'urbanisation est encore "modéré" à Madagascar par rapport à celui des pays de l'Amérique Latine et même des autres pays d'Afrique. Au niveau des Faritany, Antananarivo reste le Faritany le plus urbanisé avec un taux d'urbanisation de 30%. En effet, 39% de la population urbaine se trouve dans ce Faritany, et la capitale à elle seule renferme plus du quart de la population urbaine de Madagascar.

I - 9 Données à disposition

I - 9.1 Données obtenus des documents existants ou des études précédentes

a- Les études géologiques

On n'a pas fait de campagne d'observation géologique comme lever de carte ou encore étude de la structure géologique sur terrain. Les documents existants ont été utilisés dans cette étude.

b- Les données météorologiques

Les données issues des stations météorologiques malgaches ont été utilisées. En plus, on a aussi profité des données de l'APIPA.

c- eaux souterraines

Cent quinze puits ou forages ont été utilisés au départ pour voir la fluctuation du niveau piézométrique des eaux souterraines. Trente points d'eaux parmi eux ont été retenus pour l'échantillonnage pour faire l'analyse des ions majeurs, et quatorze parmi les trente pour l'échantillonnage du radium des eaux souterraines.

I - 9.2 Données issues des travaux de terrain ou du laboratoire de l'IOGA

Cette étude puise son originalité par l'exploitation et l'interprétation des données issues des stations d'observations du laboratoire de sismologie et infrasons (LSI) de l'IOGA et aussi des données obtenues grâce à la collaboration entre le LGA et l'IGAG à travers le financement de l'UNESCO par le programme TRIL de l'ICTP.