



**REPUBLIQUE DE MADAGASCAR
MINISTRE DE L'EAU**

**ETUDE DE FAISABILITE DES FORAGES MANUELS
IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLEMENT
FAVORABLES**

PRACTICA
FOUNDATION


EnterpriseWorks/VITA
A Division of  RELIEF INTERNATIONAL

unicef 

TABLE DE MATIERES

Introduction	4
Contexte général.....	5
Situation géographique.....	5
Contexte géomorphologique	5
Contexte climatologique	6
Contexte hydrologique :	7
Contexte géologique :	8
Contexte hydrogéologique :	12
Distribution de la population	14
Desserte en eau potable	17
Méthodologie d'identification des zones favorables	18
Sources d'information.....	18
Critères utilisés pour l'identification des zones favorables	18
Détermination de l'aptitude géologique, de la profondeur de l'eau et de l'aptitude hydrogéologique	19
Détermination de l'aptitude morphologique	23
Intégration de l'aptitude hydrogéologique et morphologique, et estimation de l'aptitude globale aux forages manuels	25
Interprétation de la distribution des zones favorables et comparaison avec la distribution de population	28

LISTE DE FIGURES

Schéma géomorphologique du Madagascar	6
Carte de distribution de Grands Centres Urbains et Villages	16
Avance vers les objectifs de desserte en eau potable en zones rurales et urbaines	17
Carte de la profondeur du niveau statique dans les puits et les forages	20
Carte d'aptitude hydrogéologique.....	22
Carte d'aptitude aux forages manuels.....	!Error! Marcador no definido.

Introduction

L'UNICEF a lancé cette année un projet sur le Forage Manuel (Manual Drilling) pour avoir une vision générale sur le potentiel du pays pour la mise en œuvre des techniques de perforation à bas coût.

Dans le cadre du projet d'appui à la diffusion des techniques de forage manuel en Afrique, UNICEF a réalisé une étude pour identifier les zones favorables aux forages manuels a Madagascar ; et pour la réalisation de cette étude, une collecte d'informations au niveau locale (dans les institutions principales) et auprès des sources de données internationales a été réalisée. Ces informations ont été organisées dans un système d'information géographique afin d'analyser les différentes couches thématiques qui permettent de déterminer, pour chaque zone, les paramètres qui contribuent à de la faisabilité des forages manuels.

PRACTICA et Volahary Salama ont déjà réalisée des études antérieures sur la faisabilité des forages manuels dans quelques régions du Madagascar en 2008 et 2009. Ces études ont fourni des informations détaillées pour des zones géographiques sélectionnées tandis que l'étude du présent rapport a comme finalité l'estimation au niveau national (de tout le Madagascar) du potentiel d'application des techniques des forages manuels, identifiant des zones prioritaires pour le développement futur du programme en terme d'aptitude favorable et présence de population avec faible accès à l'eau potable. La méthodologie utilisée est cohérente avec des critères et procédures utilisées dans 11 autres pays africaines, et en même temps a pris en considération la méthodologie et le résultat des études antérieures pour valoriser l'expérience déjà existante, et permettre une comparaison et intégration des résultats.

Contexte général

Pour la caractérisation du contexte général du pays, les aspects géographique, géomorphologique, climatologique, géologique et hydrogéologique ont été directement considérés à partir du rapport *Synthèse de la géologie et de l'hydrogéologie de Madagascar* (Par Rakotondrainibe Jean Herivelo, 2006)

Situation géographique

L'île de Madagascar, d'une superficie de 592000 Km², avec une longueur de 1600 km du Nord au Sud sur une largeur de 600 km au maximum de l'Ouest à l'Est, se trouve entre 12° et 25°30 de latitude (SUD), 42° et 50° de longitude (EST), à 400 Km à l'Est de la côte africaine, dans la zone intertropicale.

Contexte géomorphologique

La géomorphologie de Madagascar est caractérisée par 2 ensembles :

- Une région élevée appelée les hauts plateaux de Madagascar, s'étendant sur les 2/3 de la superficie totale, qui représente le socle précambrien altéré et aplani. Le paysage caractéristique montre des collines latéritiques arrondies séparées par des plaines alluviales suivant le réseau hydrographique. On y rencontre les reliefs élevés de Madagascar, le maximum étant de 2.876m (massif du Tsaratanana). Les hauts plateaux s'abaissent progressivement vers l'ouest à partir d'une altitude moyenne de 2000m, par des pénéplaines étagées, et brusquement par 2 falaises vers l'Est.
- Des bassins sédimentaires côtiers occupant le 1/3 de la superficie totale, dont la différenciation régionale permet de distinguer :
 - Le bassin du Nord dominé par des massifs volcaniques et calcaires karstifiés, de faible étendue, avec une petite plaine argileuse côtière.
 - Le grand bassin de l'Ouest descendant en pente douce vers l'Ouest avec des paysages de cuesta dans les massifs gréseux et volcaniques du crétacé, les plateaux calcaires du jurassique et de l'Ouest, et des plaines argileuses et sableuses.
 - Le bassin du sud, pénéplaine continentale descendant en pente douce vers le sud, dominée par des dunes anciennes et récentes le long de la côte.
 - Le bassin étroit de la côte. Les côtes de Madagascar sont dominées par des mangroves et des marécages le long de la côte ouest, par des dunes dans la partie Sud-Ouest et extrême-Sud, et par des plages sableuses à l'Est.

figure 1.4.
Schéma
géomorphologique

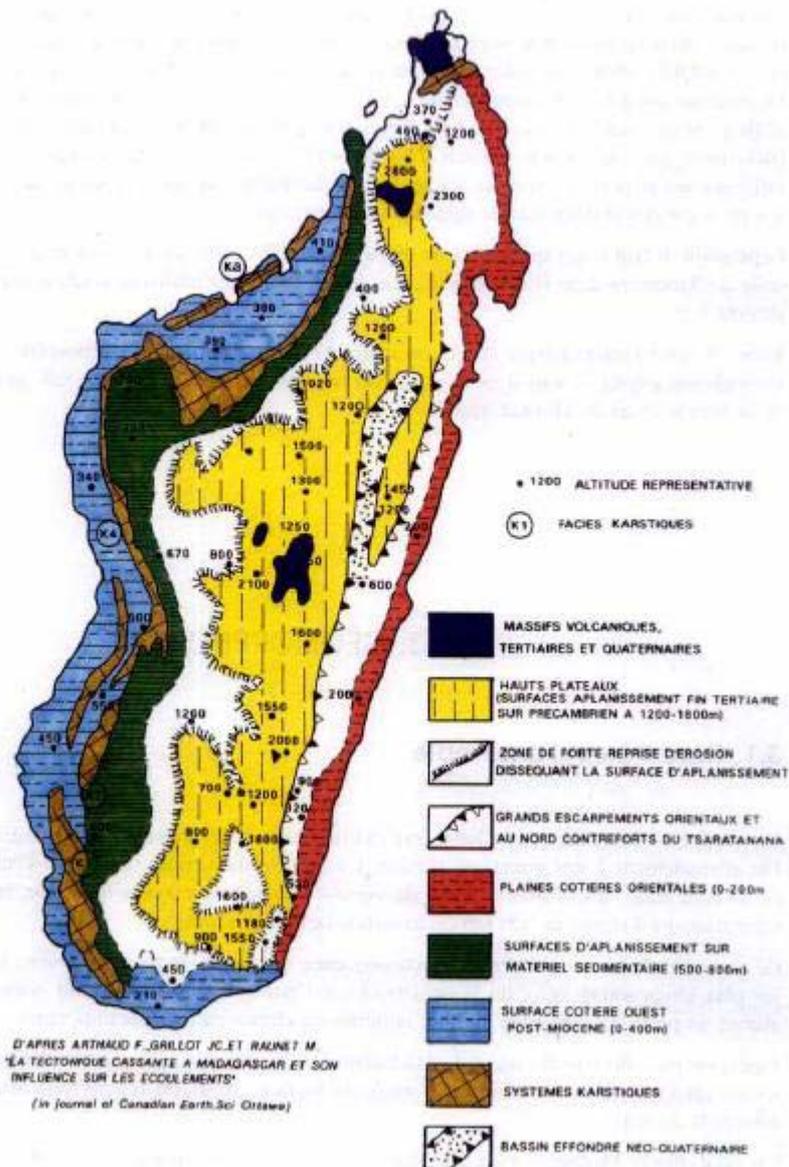


Schéma géomorphologique du Madagascar

Contexte climatologique

Le climat de Madagascar est conditionné par sa position géographique, la forme du relief, l'influence maritime et le régime des vents.

On distingue deux saisons bien marquées :

- La saison fraîche correspondant à l'hiver, de Mai à Octobre, régie par les alizés du Sud-Est apportant un vent frais d'abord humide sur la côte Est, devenant sec sur le reste de l'île. Seule la côte-Est reçoit de la pluie et cette saison est aussi appelée « saison sèche ».
- La saison chaude en été ou saison de pluie, de Novembre à Avril, dominé par la Mousson du Nord-Ouest apportant la pluie sur l'ensemble du pays.

- Sur la côte-Est et la plaine du Sambirano (N-NW) climat tropical humide avec des pluies annuelles de 2000 à 3600 mm.
- Sur les hauts-plateaux, climat tropical d'altitude, 2000 mm à 1000 mm de pluie d'Est en Ouest.
- Sur la côte-Ouest, climat tropical sec avec pluies allant 800mm à 1500 mm.
- Dans l'Extrême - Sud, climat semi- aride avec une pluviométrie inférieure à 400 mm.

La pluviométrie annuelle moyenne est estimée à 1632 mm par le service de la météorologie nationale malgache et à 1772 mm par des publications étrangères.

En ce qui concerne la température, elle varie de 16 à 20°C sur les hauts-plateaux. Sur les côtes elle dépend de la latitude et décroît assez régulièrement de 26°C au Nord à 23°C au Sud. La côte Ouest est plus chaude que la côte Est. La moyenne annuelle des maximums est de 28°C sur le versant Est et 32°C au Sud le versant Ouest. La température moyenne annuelle est estimée à 17°C.

Pour l'évapotranspiration, les calculs par la méthode de Thornthwaite ont donné les résultats suivants :

- Le long de la côte Ouest, l'ETP (évapotranspiration potentielle) décroît du Nord au Sud de 1747mm à Antsiranana à 1315 mm à Toliary. L'ETR (évapotranspiration réelle) varie de 1300 mm à 348 mm du Nord au Sud.
- Dans le bassin sédimentaire de l'Ouest, l'ETP a des valeurs entre 1700 mm et 2000 mm au centre et au Nord, et l'ETR est environ 1000 mm.
- Sur les Hauts-plateaux, l'ETP varie autour de 1000 mm à 1500 mm et l'ETR se situe de 700mm à 900 mm.
- Le côte-Est a une température allant de 1100 mm à 1300 mm et une ETR de 1000 à 1300 mm.
- Dans l'extrême Sud, l'ETP est de 1200 mm à 1300 mm et l'ETR est de 350 mm à 500 mm.

Contexte hydrologique :

Les rivières de Madagascar prennent leurs sources sur les Haut-plateaux et s'écoulent vers l'Ouest, vers le Sud et vers l'Est

Au Nord existent quelques petits écoulements issus des massifs volcaniques de crétacé du bassin de Diégo-Suarez.

Les rivières de l'Ouest descendent rapidement des Hauts-plateaux en charriant une quantité énorme de matières en suspension et colloïde argileuse et s'écoulent ensuite dans de larges lits boueux pour se jeter dans le Canal de Mozambique par des deltas vaseux à palétuviers.

Les rivières du Sud ont des régimes d'Oued, à très faible écoulement voire nul en saison sèche, avec des crues violentes de courte durée lors d'une grosse pluie.

Les rivières de l'Est ont de gros débits, sont en général courtes. Elles ont aussi des eaux chargées d'argiles.

A Madagascar, les rivières ont fait l'objet d'une étude l'ORSTOM qui a distingué 9 régimes. Ce sont :

- Régime du Nord ou de la Montagne d'Ambre (massif volcanique crétacé du bassin de Diégo-Suarez)
- Régime du Nord
- Régime du Tsaratanana
- Régime Côte-Est
- Régime Hauts-plateaux
- Régime Nord-Ouest
- Régime Centre-Sud
- Régime Ouest
- Régime Sahélien du Sud

Il existe certaines rivières à régime mixte.

Les principaux lacs malgaches sont :

- sur les Hauts-plateaux : le lac Alaotra d'origine technique, le lac Itasy et le lac d'Andraikiba, tous les deux liés au volcanisme quaternaire
- dans le bassin sédimentaire de l'Ouest, le lac Kinkony, le lac Hima, le lac d'Ihotry et le lac de Tsimanampatsotsa.
- dans l'Extrême-Sud, le lac salé d'Ihode.

Contexte géologique :

Madagascar est constitué pour les 2/3 de sa superficie par des roches magmatiques et métamorphiques précambriennes qui constituent le socle cristallin (Hauts-plateaux) et, pour le tiers restant, par des roches sédimentaires dont les affleurements vont :

- Du carbonifère à l'actuel dans le bassin de l'Ouest, avec une série complète.
- Du trias à l'actuel dans le bassin de Diégo-Suarez mais avec un grand développement des calcaires jurassiques et des basaltes crétacé.
- Du crétacé à l'actuel dans l'étroite bande sédimentaire de la côte-Est.
- Du Néogène à l'actuel dans l'Extrême-Sud.

Les roches métamorphiques du précambrien malgaches sont principalement des migmatites, des gneiss, des leptynites, amphibolites, des micaschistes, des cipolins, des quartzites, tandis que les roches magmatiques sont des granites, des basaltes et différents dépôts volcaniques du Néogène et Pléistocène.

a) Le bassin de l'ouest possède la série sédimentaire la plus complète de Madagascar. Certaines formations n'affleurent que dans des zones localisées du bassin mais en général toutes les couches se rencontrent du Nord au Sud avec quelques variations de faciès et suivant des développements variables.

Le bassin a une structure monoclinale avec une pente générale de direction Ouest, localement plissée affectant parfois l'allure de semi-bassin synclinaux de grand diamètre.

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

- le système du Karroo, constitue de formations continentales, allant du carbonifère supérieur à la fin du jurassique. Il comporte 3 groupes :
 - La sakoia (carbonifère supérieur), localisée dans le Sud-Ouest de l'île, composé de tillites, de schistes noirs, de grés à charbon, d'argile, une petite couche de calcaire.
 - La sakamena (Permien) en grande partie continentale mais avec des intercalations marines, formée de schistes et grés micacés, argiles grises à nodules, grés et argiles rouges.
 - L'Isalo divisé en Isalo I, Isalo II, Isalo III (du Trias au jurassique moyen)
 - L'Isalo I (trias) continental est constitué de grés blancs grossiers, mal cimentés, souvent conglomératiques avec stratification entrecroisées. Son épaisseur atteint plusieurs milliers de mètres.
 - L'Isalo II (Jurassique inférieur- lias supérieur) est formé d'une alternance de grés plus ou moins grossiers à stratification entrecroisée, jaunâtre ou rougeâtre et d'argiles rouges, parfois bariolées. Il renferme d'importantes intercalations marines constituées de marnes, et calcaires. Son épaisseur va de plusieurs centaines de mètres.
 - L'Isalo III (Jurassique moyen) est constitué d'une alternance de grés à stratification entrecroisée et d'argiles. Les intercalations marines y sont plus abondantes. L'épaisseur est de plusieurs centaines de mètres.

➤ Jurassique moyen marin (équivalent marin de l'Isalo II et III)

Les formations marines du jurassique moyen sont représentées par de grands plateaux calcaires karstifiés (plateaux de l'Ankara, du Kelifely de Bemaraha).

➤ Jurassique supérieur :

- Callovien : calcaires marneux et marnes
- Oxfordien : calcaires (Majunga-Antonibe), grés glauconieux (Morondava), marno-calcaire et marnes (Tulear)
- Argovien : marnes jaunes d'Ankilizato avec quelques intercalations calcaires et grés glauconieux (Morondava), grés entrecroisés avec l'intercalation marine à Tuléar.
- Kimmeridgien : marnes à mèches calcaires (Majunga), marnes (Morondava), calcaires, grés et marnes (Tuléar).
- Tithonique : argilo-marneux glauconieux (Majunga), marne, argiles glauconieuses avec bancs calcaires (Tuléar)

➤ Crétacé inférieur :

- Valanginien : marnes et argiles puis grés de Sitampiky (Majunga), calcaires et marnes (Morondava), marnes glauconieuses (Tuléar)

- Hauterivien : argiles, grés glauconieux et argiles grés-marneuses (Majunga), marnes et grés glauconieux (Tuléar).
- Crétacé moyen :
- Aptien : grés glauconieux et grés continentaux (Majunga), marnes blanches (Morondava), calcaire et grés argileux rouges (Tuléar).
 - Albien : grés, grés glauconieux argileux, argiles gréseuses et marnes jaunes (Majunga).
 - Cénomaniens : argiles à la base, puis grés grossiers entrecroisés (grés de l'Ankarafantsika-Majunga), grés rouges continentaux (Morondava), marnes et grés argileux rouges (Tuléar).
 - Turonien : grés, coulées basaltiques puis marnes argileuses (Majunga), grés calcaire et coulées basaltiques (Morondava), grés jaunes (Tuléar).
- Crétacé supérieur :
- Coniacien : grés argileux (Majunga), marnes grises et bancs calcaires (Morondava), basaltes et grés verdâtres (Tuléar).
 - Santonien : Grés continentaux entrecroisés (Majunga), marnes, calcaires marneux, calcaires (Morondava), grés continentaux entrecroisés, basaltes moyens interstratifiés (Tuléar)
 - Campanien : grés continentaux entrecroisés (Majunga), grés-marne-calcaires, calcaires crayeux (Morondava), calcaires (Tuléar)
 - Maestrichtien : marne, marno-calcaires (Majunga), marno-calcaire (Morondava), marno-calcaire, grés calcaires et marnes (Tuléar)
- Eocène :
- Essentiellement calcaires avec quelques passages calcareo-dolomitique, calcareo-marneux, marno-calcaires (Majunga), Calcaires dominants avec quelques marnes (Sud Morondava et Tuléar)
- Oligocène
- Marnes (Majunga), Affleurements localisés
- Néogène :
- Le néogène est essentiellement continental avec des grés tendres entrecroisés avec des argiles sableuses sur toute la région côtière, et recouvert de carapace sableuse dans tout le bassin de l'ouest.
- Quaternaire :
- Le Quaternaire est constitué de carapace sableuse ; alluvions et dépôts de mangrove. ; sables des plages et des dunes

b) Le bassin de Diégo-Suarez

La série va du permien au quaternaire. On rencontre du Sud au Nord :

- Permien : argiles gréseuses et schistes
- Isalo I : grés continentaux
- Jurassique inférieur : calcaires et marno-calcaires du lias
- Jurassique moyen : calcaires et calcaires dolomitiques du bajocien –Bathonien (plateau d’Analamena et de l’Ankara)
- Jurassique supérieur : marnes du bathonien supérieur et du callovien. Ces dépôts sont recouverts par les coulées basaltiques du grand massif d’Ambre.
- Crétacé inférieur :
 - marnes et argiles du valanginien- Hauterivien
 - épaisse série continentale constituant les grés de Saharena de l’Hauterivien supérieur à albien inférieur.
- Crétacé moyen :
 - marnes-marnes à gypses de l’Albien
 - marnes du cénomanien
 - gré du Turonien avec passages marneux
- Crétacé supérieur :
 - grés jaunes à bancs calcaires du coniacien
 - grés tendres blanchâtres du Santonien
 - craie marneuse du campanien
 - gré sableux du Maestrichtien
- Eocène : calcaire dolomitique à la base, Calcaires karstiques au sommet
- Néogène : marin, alternance de calcaires, de grés plus ou moins sableux et de tuf basaltiques. Il est recouvert par des coulées basaltiques anciennes.
- Quaternaire : Grés du quaternaire ancien recouverts par un premier récif corallien, puis des dunes rouges en partie grésifié. Enfin, dunes flamandaises actuelles.

Dans le Sud Ouest de grands deltas et des alluvions très développés.

c) Le bassin de la Côte-Est

Bassin sédimentaire peu développé à structure faiblement monoclinale avec une pente en direction de l’Est. La série très réduite, comprend de bas en haut:

- Crétacé
- dépôts volcaniques du crétacé supérieur,
- marnes et calcaires plus développés du Maestrichtien

- Néogène continental
- sédiments continentaux avec grès tendres entrecroisés et argiles
- coulées basaltiques
- Pliocène
- argiles à lits de schistes du pliocène
- Quaternaire et dépôts actuels
- sables, dunes, alluvions.

d) Le bassin de l'extrême sud :

Bassin sédimentaire à structure monoclinale avec une pente en direction du Sud et comprenant du nord au Sud, de bas en haut :

- néogène continental
- Ces sont des argiles, argilites, sables, sables argileux, grès argileux.

- quaternaire continental

On distingue 3 périodes dunaires :

- les dunes anciennes de l'Aepyornien ancien ou Tatsimien
- les dunes moyennes ou Karimbolien
- les dunes récentes ou Flandrien.

Les formations sont des sables d'origine probablement éolienne cimentés par une proportion notable de calcaire (appelés grès calcaires). On y rencontre aussi des croûtes calcaires.

- dépôts superficiels qui sont :
 - les sables roux
 - les sables blancs de Beloha et d'Ambondro
 - les alluvions
 - les sables d'Ambovombe

Contexte hydrogéologique :

Une étude de la différence Pluie - Evapotranspiration potentielle (P – ETP) permet de distinguer 5 zones d'humidité à Madagascar :

- Zone I P – ETP supérieure à + 1000 mm zone très humide
- Zone II P – ETP comprise entre +1000 mm et –200 mm zones humides
- Zone III P – ETP comprise entre +200 mm et –200 mm zones sous humides
- Zone IV P – ETP comprise entre -200 mm et –400 mm zones semi-aride
- Zone V P – ETP comprise entre -200 mm et –400 mm zones aride

Le zonage permet de distinguer des zones de recharge et les directions d'écoulement aussi bien de surface que souterraines.

Les réserves en eaux se créent au niveau des zones humides qui se trouvent dans les régions centrales et les écoulements s'effectuent du centre vers les bassins de l'ouest, du nord, de l'est, et du sud.

Le fonctionnement de ce système est facilité par le contexte géologique, car les formations d'altération du socle magmatique et métamorphique des hauts plateaux du centre constituent des réservoirs d'eaux souterraines extrêmement importants, du fait de leur porosité élevée et de leur faible perméabilité. Il y a en effet une grande accumulation d'eau qui se décharge lentement de façon continue alimentant, d'une part les aquifères des formations géologiques des bassins sédimentaires côtiers et d'autre part les débits de base (ou débits d'étiage) de tous les écoulements de surface.

Distribution de la population

La population de Madagascar est distribuée sur tout le territoire du pays, avec une concentration dans la partie Est du pays (région d'Antsiranana, Toamasina et la partie sud de Toliara), et dans la zone centrale qui correspond à la région d'Analamanga.

Selon les données collectées lors de l'EPM 2005, un peu moins de 8 individus sur 10 résident en milieu rural. Viennent ensuite les chefs lieu de districts (autres que les grands Centres Urbains) avec une proportion de 12,1%. Un individu sur 10 s'installe dans les grands Centres Urbains. En totalité, les urbains représentent 22% de la population. La distribution par région montre qu'Analamanga héberge un peu moins de 15 individus sur 100. Les régions de Melaky, Irhombe, Betsiboka et Diana contiennent chacune moins de 2% de l'ensemble des habitants. Vakinankaratra, Mahatratra, Ambony, Vatovavy Fotovinany, Atsinanana, Sofia, Atsimo Andrefana sont chacune le lieu de résidence de 5% à 9% de la population. Bien que la répartition actuelle soit en régions, une présentation par provinces, anciens découpage administratif permet d'avoir une vue globale sur la répartition des populations de Madagascar.

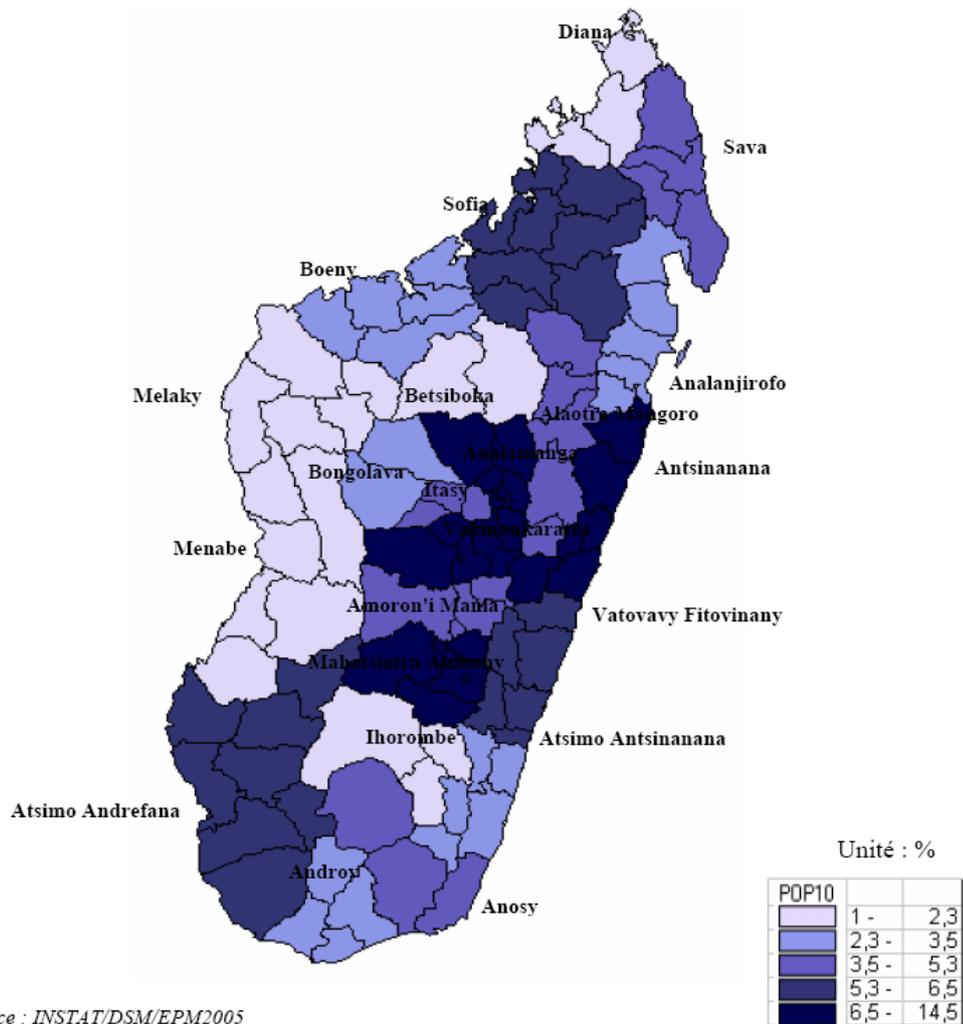
Faritany	Extension (km ²)	Villes et villages enregistrées	Villes et villages par 1000 km ²
ANTANANARIVO	58756	1535	26
ANTSIRANANA	43698	933	21
FIANARANTSOA	100722	2754	27
MAHAJANGA	153012	2730	18
TOAMASINA	71645	1930	27
TOLIARA	163956	3275	20

Distribution des villages par Provinces, anciens découpage

Province	Milieu		Ensemble
	Urbain	Rural	
Analamanga	29,6	10,2	14,5
Vakinankaratra	7,5	9,4	9,0
Itasy	2,5	5,0	4,5
Bongolava	2,1	2,4	2,4
Mahatsiatra Ambony	5,9	8,5	7,9
Amoron'I Mania	2,8	5,4	4,8
Vatovavy Fitovinany	4,4	7,0	6,5
Ihorombe	2,6	1,2	1,5
Atsimo Atsinanana	2,0	3,4	3,1
Atsinanana	6,7	6,4	6,5
Analanjorofo	2,1	3,7	3,4
Alaotra Mangoro	3,5	5,3	4,9
Boeny	4,1	2,0	2,5
Sofia	2,2	6,9	5,8
Betsiboka	2,5	1,8	1,9
Melaky	2,3	0,8	1,1
Atsimo Andrefana	4,6	5,5	5,3
Androy	3,8	3,4	3,5
Anosy	3,0	3,7	3,5
Menabe	2,0	2,2	2,2
Diana	2,3	1,8	1,9
Sava	1,5	4,1	3,5
Total	100,0	100,0	100,0

Source : INSTAT/DSM/EPM2005

Distribution de la Population par Region, nouveau découpage (EPM, 2005)



Source : INSTAT/DSM/EPM2005

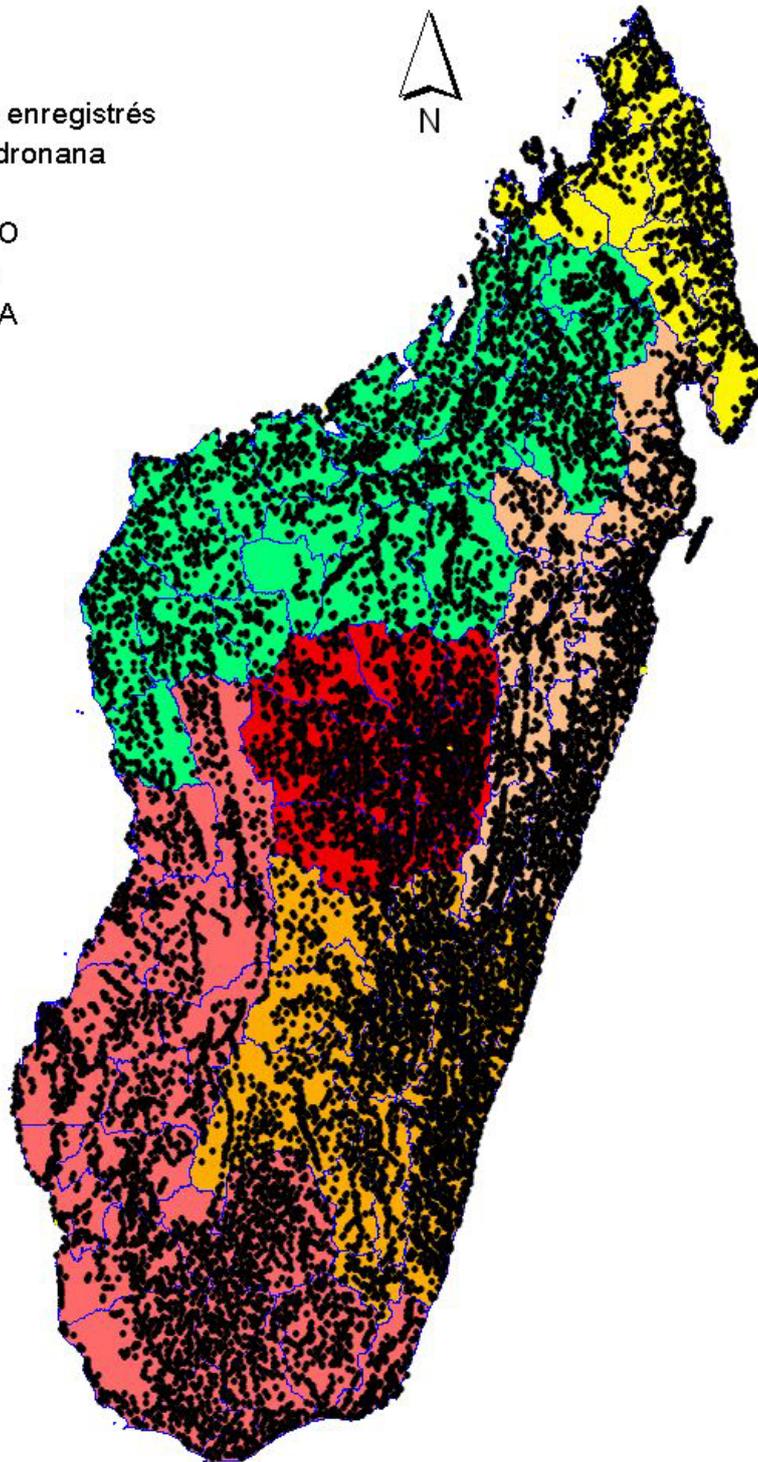
Carte de Distribution des populations par régions

Distribution des villes et villages

0 200 400 Kilometers



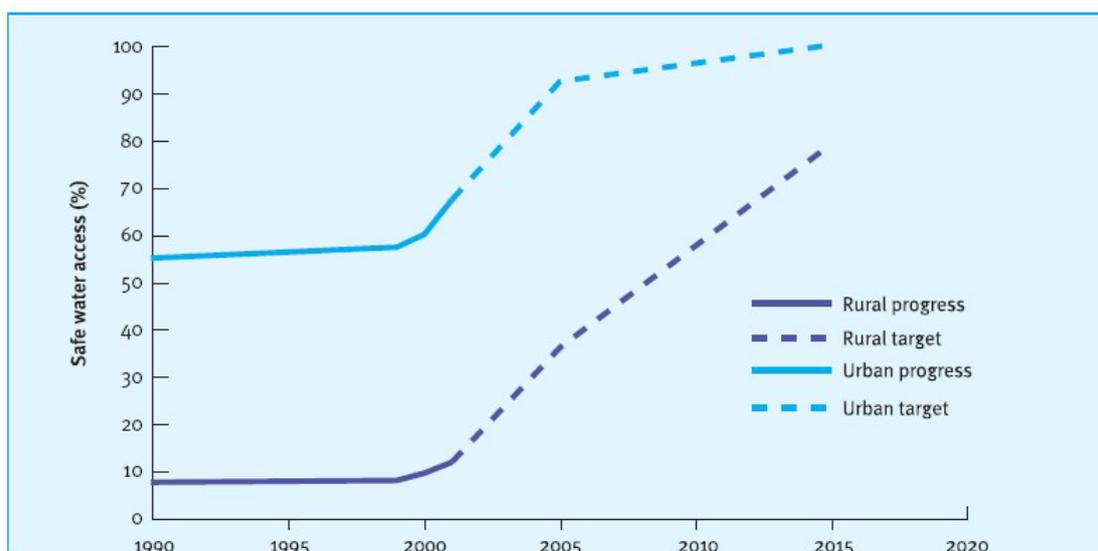
- Villes et villages enregistrés
 - Limites de fivondronana
- Faritany
- ANTANANARIVO
 - ANTSIRANANA
 - FIANARANTSOA
 - MAHAJANGA
 - TOAMASINA
 - TOLIARA



Carte de distribution de Grands Centres Urbains et Villages

Desserte en eau potable

En terme de taux de desserte en eau potable des informations détaillées ne sont pas disponibles. On peut affirmer que la situation de Madagascar, en particulier dans les zones rurales, est très difficile ; l'étude de WaterAid (National Water resources Assessment, Madagascar, 2005) affirme que le 67% de la population en zones urbaines peut avoir accès à eau potable, mais cette valeur est réduite au 12% en zones rurales.



Avance vers les objectifs de desserte en eau potable en zones rurales et urbaines
(source: Water Aid, national water resources assessment Madagascar)

Méthodologie d'identification des zones favorables

Sources d'information

On a utilisé principalement les sources d'information suivantes pour la détermination de l'aptitude :

- Carte géologique en format numérique, échelle 1 :500000, connue comme " Carte 8 zones
- Base de données de sources d'eau avec 7568 points enregistrés (1935 forages, 3401 puits et 2232 entre adduction d'eau potable et points sans information spécifique sur le type de source d'eau); pour chaque point d'eau il y a des information sur les caractéristiques physiques (type de points d'eau, profondeur, niveau statique, venue d'eau) mais il n'y a aucune information stratigraphique sur les couches géologiques ; on doit aussi mettre en évidence qu'il y a des points d'eau avec coordonnées non correcte (ils sont localisés en dehors du territoire du Madagascar) et que seulement 2038 puits (67% des puits) et 830 forages (43%) ont des données sur le niveau statique.
- Modèle d'élévation du terrain avec pixel de 90 m, élaboré à partir des images radar (programme SRTM) et disponible sur internet

On doit remarquer qu'il n'y a pas des informations spécifiques sur les aspects géomorphologiques ou sur la présence des couches d'altérations superficielles ; c'est pour cela qu'on a utilisée des élaborations du modèle d'élévation pour avoir des informations sur la morphologie

Les informations sur des autres aspects (données climatiques, réseau hydrographique, lac et bassins artificiels, données démographique, etcetera) n'ont pas été élaborées mais ils ont permis de définir le contexte générale du point de vue environnemental et social

Critères utilisés pour l'identification des zones favorables

Pour identifier les zones favorables une estimation des conditions potentielles existantes a été fait au niveau des couches superficielles (maximum 40 mètres, c'est-à-dire la limite de profondeur considérée pour la réalisation des forages manuels) en termes de dureté, perméabilité et présence d'eau.

Les aspects pris en considération pour déterminer le niveau d'aptitude sont :

L'aptitude géologique : Il s'agit d'identifier les zones où les couches superficielles ont des caractéristiques de dureté et de perméabilité favorables à la réalisation des forages manuels (il doit être possible de perforer avec techniques manuelles, et aussi la perméabilité de la couche exploitée doit être suffisante pour donner un débit significatif dans un forage à faible profondeur et de petit diamètre)

L'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau : Il s'agit d'identifier les zones où la probabilité de trouver des venue d'eau exploitable à une profondeur compatible avec les techniques manuelles de perforation est élevée

La combinaison de l'aptitude géologique et de l'aptitude sur la base du niveau d'eau nous donne *l'aptitude hydrogéologique* ;

L'aptitude morphologique: c'est à dire la présence des zones avec caractéristiques topographiques favorables (zone de bas fonds, ou zones plaine) pour la présence de couches d'altération des roches dures non enregistrées dans la carte géologique ; ces couches peuvent avoir des caractéristiques morphologiques favorables pour l'exploitation avec forages manuels ; en plus dans les zones de bas fond la profondeur de la nappe est en général plus superficielle que dans le zone de haute topographique.

La séquence d'actions pour l'identification des zones favorables est la suivante :

- Estimation des probables conditions lithologiques des couches superficielles et estimation de l'aptitude géologique
- Observation des niveaux statiques des points d'eau dans la base de donnée, et estimation de la profondeur de la nappe
- Analyse combinée de ces deux paramètres et détermination de l'aptitude hydrogéologique
- Détermination de l'aptitude morphologique
- Intégration de l'aptitude hydrogéologique et morphologique, et estimation de l'aptitude globale aux forages manuels
- Construction de la carte finale des zones favorables

Détermination de l'aptitude géologique, de la profondeur de l'eau et de l'aptitude hydrogéologique

Dans la carte géologique numérique 8 zones, chaque polygone est classée sur la base de deux colonnes : titre (il y a 118 valeurs différentes et correspondent à la formation géologique) et légende (37, qui correspond aux grands groupes)

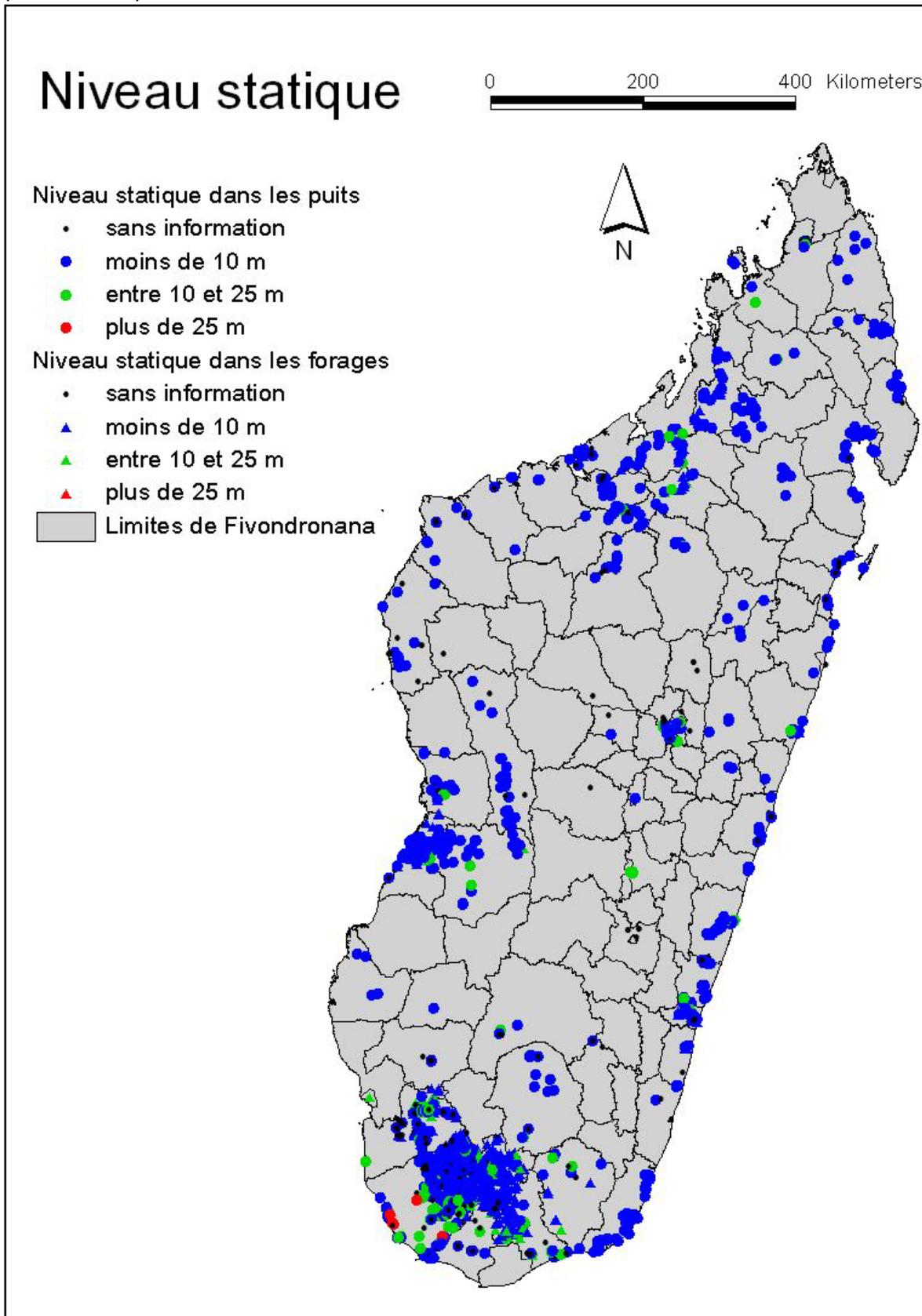
A partir de la colonne « titre » on a classé les formations dans les catégories suivantes

Catégorie de formations géologiques (classifié sur la base de la colonne "Titre" de la carte 8 zones
Sédiments pas consolidés continentaux génériques.
Sédiments pas consolidés continentaux d'origine alluviale.
Sédiments pas consolidés dérivant de l'altération
Roche cristalline très ancien Protérozoïque
Roche magmatique récent (cénozoïque)
Roche sédimentaire ancien (Mésozoïque)
Sédimentaire marin récent
Roche sédimentaire très ancienne (Protérozoïque)
Roche volcanique ancienne jusqu'à la fin du Mésozoïque)

Catégories des formations géologiques, groupées à partir de la colonne titres

En ce qui concerne la profondeur de l'eau, les informations directes sur le niveau statique des points d'eau ne sont pas suffisantes pour estimer d'une façon plus probable la profondeur de l'eau pour chaque zone du pays. De toute façon on peut observer dans la carte que presque dans tout le pays le niveau statique des points d'eau enregistré est compatible avec la profondeur maximale des forages manuels (on considère qu'il n'est pas une bonne solution de réaliser des forages manuels dans le cas où la profondeur de l'eau est supérieur à 25 mètres) ; on doit seulement

souligner des niveaux statiques profonds pour plusieurs points d'eau de l'extrémité sud-ouest du pays (District d'Ampanihy, dans la région de Atsimo Andrefana), en correspondance principalement avec les formations géologiques « Quaternaire éolien à supra littoral (Karimbolien) »



Carte de la profondeur du niveau statique dans les puits et les forages

A cause de l'inexistence d'information directe sur la nature de couches superficielles et l'insuffisance des informations sur la profondeur de l'eau, la zonification de tout le pays pour chacun de ces deux facteurs n'a pas été faite, mais une estimation générale de l'aptitude hydrogéologique de chaque formation a été réalisée sur base:

- des caractéristiques lithologiques probables dans les premiers 30 mètres, obtenues à partir des documents descriptifs du consultant local
- de l'existence d'un niveau d'eau favorable dans tout le pays (les variations du niveau statique en relation à la topographie locale seront considérées dans l'aptitude morphologique), à l'exception de la zone sud-ouest
- la présence des puits creusés à la main (on a considéré qu'il est probable que les zones où il y a une forte présence de puits creusés à la main montrent des conditions favorables aussi aux forages manuels)

Les classes d'aptitude hydrogéologique définies sont les suivantes :

Valeur	Code	Définition	Description
1	TF – sed	Très favorable – sur sédiments	Zones très favorables, formées par sédiments pas consolidés d'origine alluviale
2	F – sed (alt)	Favorable – sur matériaux d'altération	Zones favorables formées par couches d'altération pas consolidées
3	F – sed (prof)	Favorable - sur sédiments	Zones favorables, formées par sédiments caractérisés par présence discontinue de nappe exploitable (niveaux de l'eau parfois profonde)
4	MF – cr	Partiellement favorable sur roches cristallines	Zones partiellement favorables, formées par roches cristallines dures, où il y a possibilité de trouver couches d'altération et sédiments pas consolidés dans les zones avec morphologie favorable (bas fonds et quelque fois dans zones plaines)
5	MF – sed	Partiellement favorable – sur roches sédimentaire	Zones partiellement favorables, formées par roches sédimentaires dures, où il y a possibilité de trouver couches d'altération et sédiments pas consolidés dans les zones avec morphologie favorable (bas fonds et quelque fois dans zones plaines)

Classes d'aptitude hydrogéologique

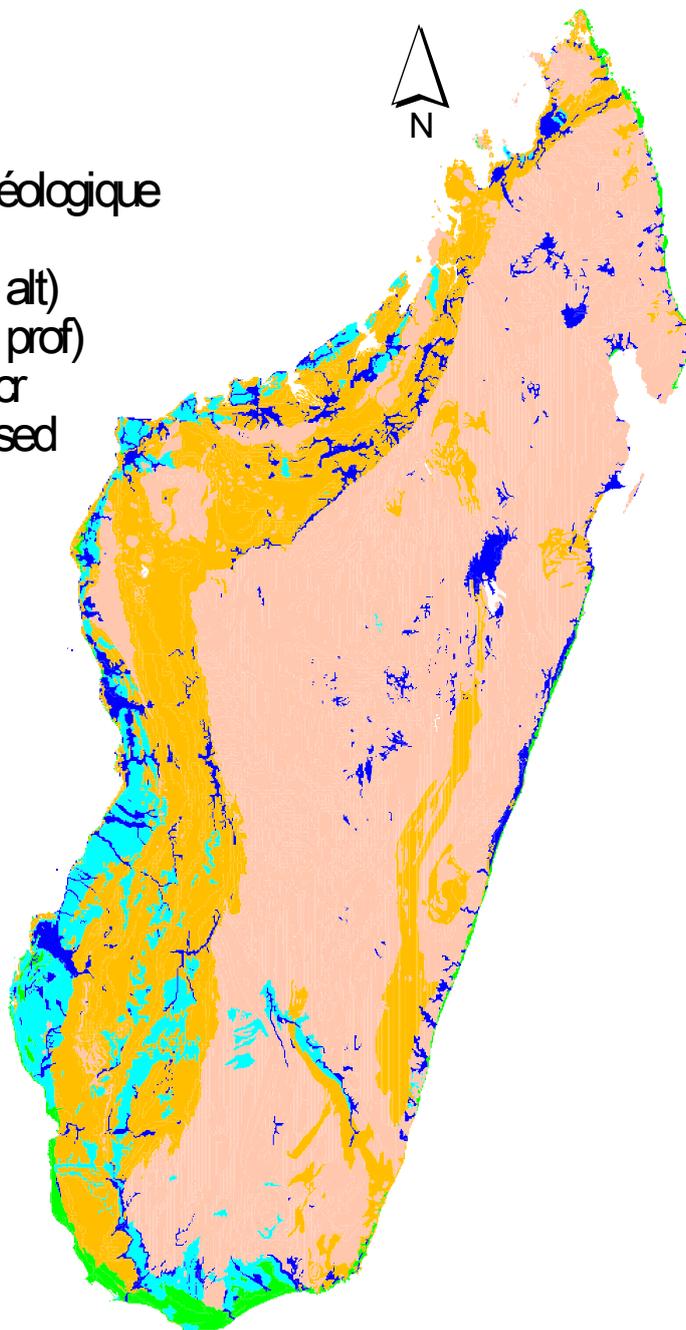
Aptitude hydrogéologique

0 200 400 Kilometers



Aptitude hydrogéologique

-  TF - sed
-  F - sed (alt)
-  F - sed (prof)
-  MOYF - cr
-  MOYF - sed



Carte d'aptitude hydrogéologique

Détermination de l'aptitude morphologique

Une grande partie du pays est formée par des unités géologiques qui ne sont pas favorables de par la nature de la roche mère, mais qui peuvent être couvertes par une importante couche d'altération exploitable par les forages manuels. L'épaisseur des couches d'altération est en relation avec les caractéristiques de la roche, le climat (et l'action des eaux de surface et du vent) et avec l'existence des morphologies qui facilitent la déposition et l'accumulation à la surface des sédiments pas consolidés

La manque ou l'insuffisance des données ne permet pas de faire une reconstruction de l'épaisseur des couches d'altération à partir des données directes des logs de forages (avec la procédure d'interpolation) ; il y a seulement les données pour un nombre limité de logs dans les régions centro-nord du pays. En plus la cartographie avec des informations sur les aspects géomorphologiques n'existe pas

L'analyse morphologique a été faite à partir du Modèle Digitale d'Élévation de 90 m de pixel obtenue par des données radar (projet SRTM, disponibles sur internet). Une procédure automatique basée sur un algorithme a été utilisée (TPI, Topographic Position Index), et qui fait une comparaison entre l'élévation de chaque pixel et l'élévation des pixels proches, jusqu'à une distance qui doit être définie par le technicien du SIG (dans cette étude la distance de 2 km a été optée).

Utilisant une procédure automatique de comparaison entre la carte du TPI et la carte d'inclinaison de terrain (aussi produite automatiquement à partir du modèle d'élévation), on a obtenu la carte des classes de position topographique (Slope Position Classification), qui classe le territoire en :

- Zone de bas-fond
- Zone à faible pente (inclinaison moins de 6 degrés)
- Zone à forte pente (inclinaison plus de 6 degrés)
- Zone de haut topographique

Cette carte a été transformée avec l'application d'un maximum de filtres sur une fenêtre de 10x10 pixel (c'est-à-dire que pour chaque pixel l'algorithme assigne la classe de position topographique prédominant dans une zone de 2 km) pour identifier la morphologie générale dans chaque zone.

Enfin la carte d'aptitude morphologique a été élaborée, avec la définition des classes qui se fonde sur la position topographique et l'inclinaison absolue du terrain ::

- zone morphologiquement favorable (zone de bas-fonds, avec pente moins de 2 degrés)
- zone morphologiquement parfois favorable (zone de bas fonds avec inclinaison entre 2 et 6 degrés, ou zone de plaine/faible pente avec inclinaison < 2 degrés)
- zone peu favorable (zone de faible pente, avec inclinaison entre 2 et 6 degrés)
- zone morphologiquement pas favorable (zone de haut topographique ou toutes les zones avec inclinaison >6 degrés)

	INCLINAISON		
POSITION TOPOGRAPHIQUE	Moins de 2 deg	Entre 2 et 6	Plus de 6 deg
Bas Fonds	Favorable	Parfois fav.	Pas fav
Faible Peinte	Parfois fav.	Peu fav.	Pas existante
Peinte	Pas existante	Pas existante	Pas fav
Relief	Pas fav	Pas fav	Pas fav

Classification d'aptitude morphologique en relation à la position topographique et l'inclinaison

On a modifié le résultat final de cette classification avec un maximum de filtre de 500 m, c'est-à-dire un filtre qui assigne à chaque pixel la valeur prédominante dans une zone rectangulaire de 500 mètres autour du pixel). Ce filtre permet d'avoir une vision de l'aptitude morphologique prédominant dans chaque zone et non des pixels individuels.

Ce type d'analyse morphologique est un résultat important pour les zones avec aptitude géologique moyenne sur couches d'altération, car l'existence et l'épaisseur de ces couches sont en relation avec les conditions morphologiques

On doit souligner que les zones avec morphologie favorable à la présence des conditions hydrogéologiques favorables pour les forages manuels ne correspondent pas dans certaines situations à des zones plus utilisées par la population. Comme exemple il est fréquent que dans les bas fonds il y a des conditions favorables à l'approvisionnement d'eau potable, mais ces zones sont inondables ou à drainage insuffisante et les conditions deviennent difficiles pour la vie quotidienne.

Intégration de l'aptitude hydrogéologique et morphologique, et estimation de l'aptitude globale aux forages manuels

Pour arriver à l'estimation finale de l'aptitude aux forages manuels, on a intégré les résultats de classification de l'aptitude hydrogéologique à l'aptitude morphologique et une classe d'aptitude globale a été assignée (selon une classification en 11 classes d'aptitude globale). Les critères de la classification sont les suivants :

- Les zones couvertes par des sédiments pas consolidés (enregistrés dans la carte géologique) sont classifiées comme très favorables (par les sédiments alluviaux), partiellement favorable pour les sédiments d'altérites (en considération d'une perméabilité plus faible) et les formations du karimbolien et éolienne (en considération de la profondeur de la nappe). En tout cas, la classification d'aptitude globale des formations pas consolidés n'est pas modifiée à la base de la morphologie
- Les zones couvertes par des roches dures cristallines ou sédimentaires peuvent présenter des couches d'altération avec bonne aptitude en particulier où la morphologie est favorable. C'est pour ça que ces zones sont distribuées en 4 niveaux d'aptitude différents (favorable, partiellement favorable, peu favorable et pas favorable) en base à la morphologie

Aptitude géologique	Aptitude morphologique			
	Favorable	Parfois fav.	Peu favor.	Pas favor.
	APTITUDE GLOBALE			
TF - sed	TF-all	TF-all	TF-all	TF-all
F - sed (alt)	MF - alt	MF - alt	MF - alt	MF - alt
F - sed (prof)	MF - prof	MF - prof	MF - prof	MF - prof
MF - cr	F - cr	MF - cr	PEU F - cr	PAS F - cr
MF - sed	F - sed	MF - sed	PEU F - sed	PAS F - sed

Combinaisons d'aptitude hydrogéologique et morphologique et assignation de la classe d'aptitude globale

CLASSE	DESCRIPTION
TF- all	Zones très favorables, formées de sédiments pas consolidés d'origine alluviale
F - cr	Zones favorables, formées de roches cristallines et morphologies favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées
F - sed	Zones favorables, formées de roches sédimentaires et morphologies favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées
MF - alt	Zones partiellement favorables formées de couches d'altération pas consolidées (altérites)
MF - prof	Zones partiellement favorables, formées de sédiments caractérisés par présence discontinue de nappe exploitable (niveaux de l'eau parfois profonde)
MF - cr	Zones partiellement favorables, formées de roches cristallines et morphologies parfois favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées
MF - sed	Zones partiellement favorables, formées de roches sédimentaires et morphologies parfois favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées
PEU F - cr	Zones peu favorables, formées de roches cristallines et morphologies peu favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées
PEU F - sed	Zones peu favorables, formées de roches sédimentaires et morphologie peu favorable à la présence de couches superficielles pas consolidées
PAS F - cr	Zones pas favorables, formées de roches cristallines et morphologie pas favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées (reliefs ou fort inclination)
PAS F - sed	Zones pas favorables, formées de roches sédimentaires et morphologies pas favorables à la présence de couches superficielles pas consolidées (reliefs ou fort inclination)

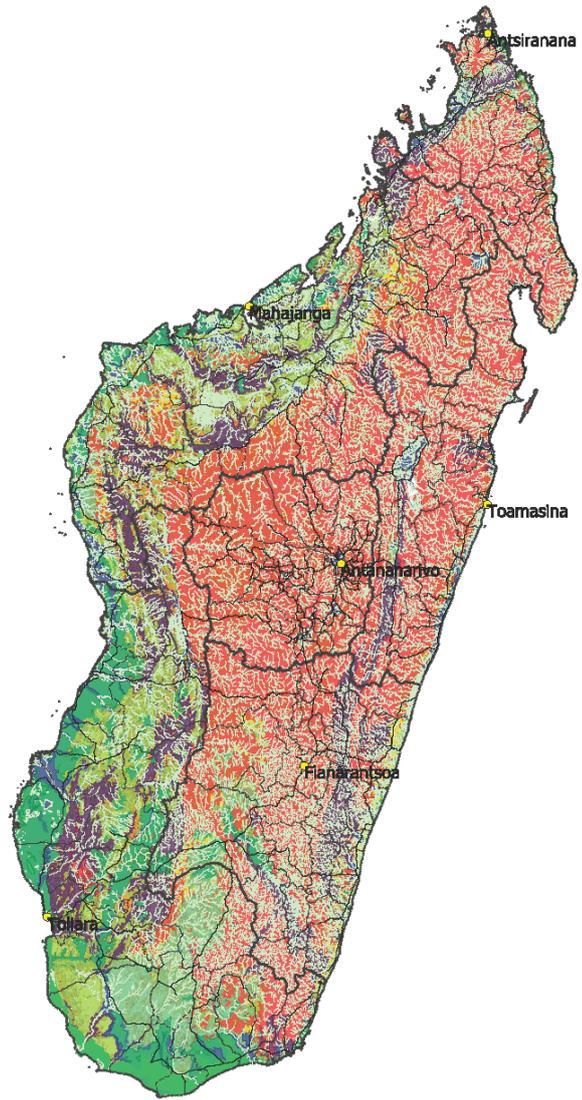
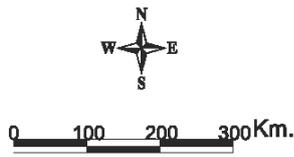
Description de la classification d'aptitude globale

ETUDE DE FAISABILITE DES TECHNIQUES DE FORAGES MANUELLE

APTITUDE AUX FORAGES MANUELS - REPUBLIQUE DE MADAGASCAR

Légende

- Chef lieux Fartany
- Routes**
- Routes d'intérêt provinciales
- Routes nationales
- - - - - Limites de Fivondronana
- Limites de Fartany
- Hydrographie
- Classification d'aptitude aux forages manuels**
- Zones très favorables, formées par sédiments peu consolidés, d'origine alluviale
- Zones favorables, formées par roches cristallines et morphologie favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées
- Zones favorables, formées par roches sédimentaires et morphologie favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées
- Zones partiellement favorables formées par couches stratifiées peu consolidées (sables)
- Zones partiellement favorables, formées par sédiments caractérisés par présence discontinu de nappe exploitables (niveau de l'eau parfois profond)
- Zones partiellement favorables, formées par roches cristallines et morphologie partiellement favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées
- Zones partiellement favorables, formées par roches sédimentaires et morphologie partiellement favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées
- Zones peu favorables, formées par roches cristallines et morphologie peu favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées
- Zones peu favorables, formées par roches cristallines et morphologie peu favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées (sables ou fort tertiaire)
- Zones peu favorables, formées par roches cristallines et morphologie peu favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées (sables ou fort tertiaire)
- Zones peu favorables, formées par roches sédimentaires et morphologie peu favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées (sables ou fort tertiaire)
- Zones peu favorables, formées par roches sédimentaires et morphologie peu favorable à la présence de couches superficielles peu consolidées (sables ou fort tertiaire)



Carte d'aptitude aux forages manuels

Interprétation de la distribution des zones favorables et comparaison avec la distribution de population

Comme on peut observer sur la carte d'aptitude aux forages manuels, les zones les plus favorables se trouvent dans les formations alluviales (concentrées dans la partie ouest du pays et partiellement dans la zone centrale) et dans les altérites de la zone ouest et sud. Ces zones ne correspondent pas aux zones avec plus haute concentration de population, mais il y a un grand nombre de villes et villages enregistrés, indiquant que la population est dispersée et concentrée en petit village. Bien qu'il n'y a pas d'informations détaillées systématisées disponibles sur le taux de desserte en eau potable dans ces zones, il est probable que les petits villages de la zone Ouest peuvent trouver dans les forages manuels une bonne opportunité pour améliorer les conditions d'accès à l'eau potable avec des solutions à faible coût (considérant aussi que la plupart d'investissement seront concentrés dans les zones plus peuplées).

La zone sud de Toliara présente aussi des conditions géologiques favorables (avec des sédiments aptes à la perforation et bonne perméabilité). Parallèlement on doit considérer que la perception des techniciens locaux et la présence des niveaux statiques parfois profondes demande avant la mise en œuvre d'un programme des forages manuels, la conduite des recherches plus en détaillées et de campagnes d'observations directes des points existants pour vérifier les conditions locales de la profondeur de l'eau. Des prospections géophysiques peuvent aussi contribuer à la détermination de la profondeur de la nappe, mais on recommande un inventaire et observations directe des points d'eaux existantes avant de commencer une campagne de prospection.

Dans la zone Est (et partiellement dans la zone central), où il y a la plus haute concentration de population, les conditions sont en général peu favorable à la réalisation des forages manuels ; la morphologie est ondulée ou montagneuse et formée par roches cristallines ou sédimentaire dures ; en tout cas il est possible que les zones de bas fonds ou plaine présentent des couches de sédiments pas consolidées qui peuvent être exploitées ; c'est pour ça qu'on a indiqué des zones d'extension limitées où le conditions sont potentiellement favorables et où il est recommandable une campagne d'observation directe sur les aspects géomorphologiques et sur la profondeur de l'eau (en considération du faible niveau d'information systématisée disponible)