

Study of Soil Permeability in the Fokontany of Ambohinaorina, Betafo District, Madagascar

[Etude De La Perméabilité Du Sol Du Fokontany Ambohinaorina Dans Le District De Betafo, Madagascar]

RAZAFIMITANTSOA Sedera¹, RAHARINIERANA Hantaniaina², RAMAROSON Jean de Dieu³

¹Doctorant, Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Equipe d'Accueil Doctorale Valorisation des Ressources Propres, Université d'Antananarivo

²Maître de Conférences, Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Equipe d'Accueil Doctorale Valorisation des Ressources Propres, Université d'Antananarivo

³Directeur de Recherches, Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Equipe d'Accueil Doctorale Valorisation des Ressources Propres, Université d'Antananarivo
Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

Corresponding author: RAZAFIMITANTSOA Sedera. E-mail: sedera.raza@gmail.com



Abstract: Since agriculture remains the backbone of the Malagasy economy, local life depends primarily on soil and water quality, as these factors are the primary determinants of crop quality. The Vakinankaratra region is one of Madagascar's leading vegetable-producing areas. And the Betafo district, with its large land area, is one of the largest vegetable producers among the region's seven districts. Of the 13 fokontany that make up the urban commune of Betafo—one of the communes comprising the district—the trials for this study were conducted in the fokontany of Ambohinaorina, which is inhabited primarily by farmers. Since agriculture is central to local life, the effects of climate change have a significant impact on the daily lives of the inhabitants of this fokontany. This study therefore aims to quantify the behavior of surface water in contact with the soil to establish a basis for the design of surface water management structures. During the study, it was found that the infiltration rate follows Kostiakov's law, and the soil tested exhibits good permeability, typical of sandy loam soils. The Ambohinaorina fokontany is ideal for the installation of water infiltration structures.

Keywords : Infiltration, agriculture, silt, Kostiakov, infiltrometer.

Résumé: Comme l'agriculture demeure le pilier de l'économie malagasy, la vie locale dépend principalement de la qualité du sol et des eaux puisque ces éléments sont les premiers acteurs assurant la qualité des récoltes. La région de Vakinankaratra est l'une des principales productrices de légumes de Madagascar. Et le district de Betafo, avec sa grande superficie est l'un des plus grands producteurs de légumes parmi les 7 districts de la région. Des 13 fokontany qui composent la commune urbaine de Betafo, qui est l'une des communes constituant le district, les essais lors de cette étude ont été réalisés dans le fokontany d'Ambohinaorina qui est habité majoritairement par des agriculteurs. Puisque l'agriculture est le cœur de la vie locale, les effets du changement climatique ont un fort impact sur le quotidien des habitants de ce fokontany. Cette étude vise alors à quantifier le comportement des eaux de surface au contact du sol pour créer une base pour le dimensionnement d'ouvrages de gestion des eaux de surface. Durant l'étude, on a constaté que le taux d'infiltration suit la loi de Kostiakov, et le sol sujet des essais admet une bonne perméabilité, typique aux sols limoneux sableux. Le Fokontany d'Ambohinaorina est idéal pour l'installation d'ouvrage d'infiltration d'eaux.

Mots clés : Infiltration, agriculture, limoneux, Kostiakov, infiltromètre.

1. Introduction

Madagascar, la grande île de l'Océan Indien, est un pays où l'agriculture est une des activités qui prédominent dans le quotidien de sa population. Cependant, l'insécurité alimentaire reste un défi majeur pour la grande île avec son volume de production qui peine à combler le besoin des habitants [1].

Madagascar est composé de 24 régions dont 4 se regroupent au centre de l'île et forment l'ancienne province d'Antananarivo. Parmi ces 4 régions centrales, on retrouve la région de Vakinankaratra qui constitue la partie Sud de la province d'Antananarivo.

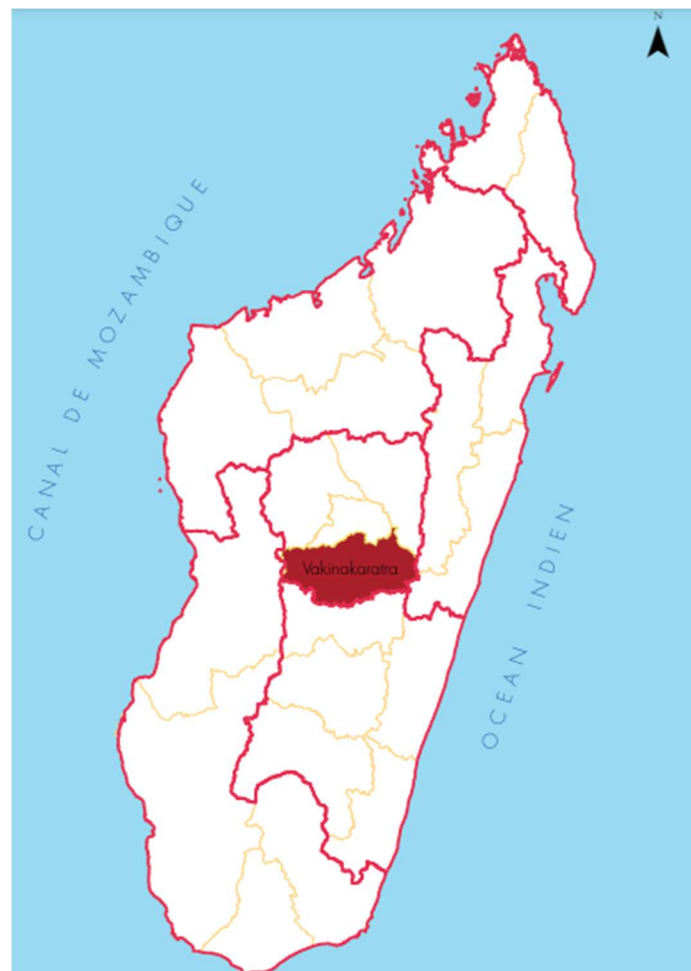


Figure 1 : Localisation de la région Vakinankaratra à Madagascar[2]

Dans la région Vakinankaratra, le secteur agricole est le pilier de l'économie locale. C'est le principal fournisseur de fruits et légumes du pays. La région est composée de 7 districts dont le district de Betafo qui se trouve dans le Sud-Ouest de la région, et fait partie de ses plus grands producteurs de légumes [3].



Figure 2 : Les sept districts de la région Vakinankaratra [3]

Comme l'agriculture est le pilier de l'économie de Betafo, une maîtrise des caractéristiques du sol est un des principaux leviers du développement local. Le district de Betafo est composé de 18 communes dont la commune urbaine de Betafo[4]. La commune urbaine de Betafo est constituée de 13 Fokontany dont le Fokontany d'Ambohinaorina [5], dans lequel les essais sont réalisés.

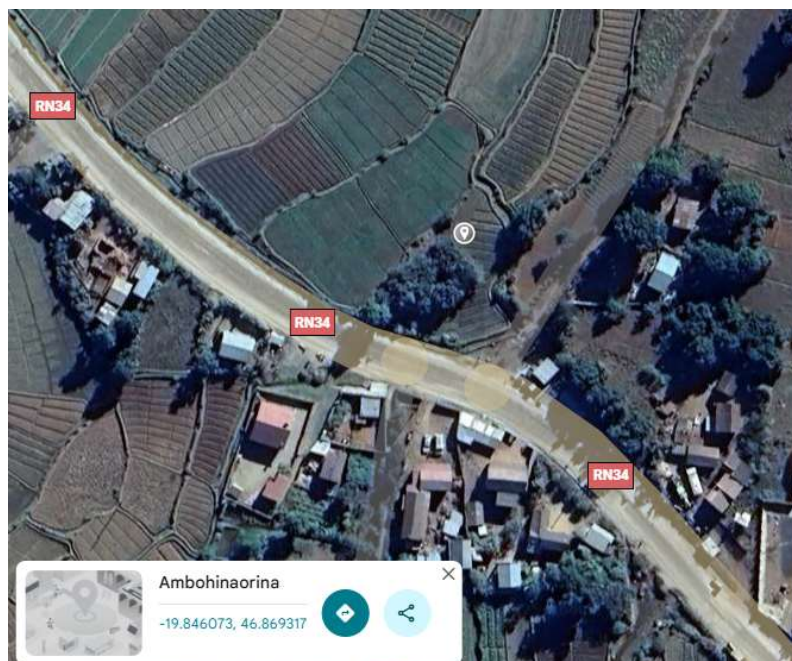


Figure 3 : localisation du site des essais d'infiltration

Les habitants de ce Fokontany sont composés majoritairement d'agriculteurs et d'éleveurs, à part les personnels enseignants, les fonctionnaires publiques et les employés des quelques autres activités minoritaires dans la zone. De ce fait, l'eau et la gestion des eaux est le centre de toute activité dans la région. Cette étude vise à contribuer à la mise en lumière des caractéristiques du sol dans le Fokontany d'Ambohinaorina, et se focalise surtout sur le taux d'infiltration des eaux dans le sol, afin de constituer une base pour le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux de surface dans la région.

2. Matériels et méthodes

2.1. Essais d'infiltration

Les essais sont réalisés sur un terrain d'environ 400 mètres carré de superficie bordé par un ruisseau. Les infiltromètres sont installés sur trois points de la parcelle d'étude : au nord du terrain, en son centre et au sud de la parcelle. Les relevés de la hauteur d'eau infiltrée sont effectués simultanément toutes les cinq minutes pendant une durée totale de 125 minutes. Un simple chronomètre sur smartphone suffit pour les repères temporels puisque les conditions environnantes ne sont pas extrêmes et les essais s'effectuent à l'air libre. Comme les caractéristiques d'un terrain peuvent être différentes d'un point à l'autre, le choix du nombre et des emplacements de ces points d'essais se fait de manière à ce qu'on puisse à peu près couvrir toute la parcelle. Dans notre cas, les infiltromètres sont disposés de manière à former un triangle à peu près isocèle au point centre. La distance entre le point centre et le point nord est la même que la distance entre le point centre et le point sud et mesure environ 7 mètres. Et la distance point nord point sud mesure environ 10 mètres.

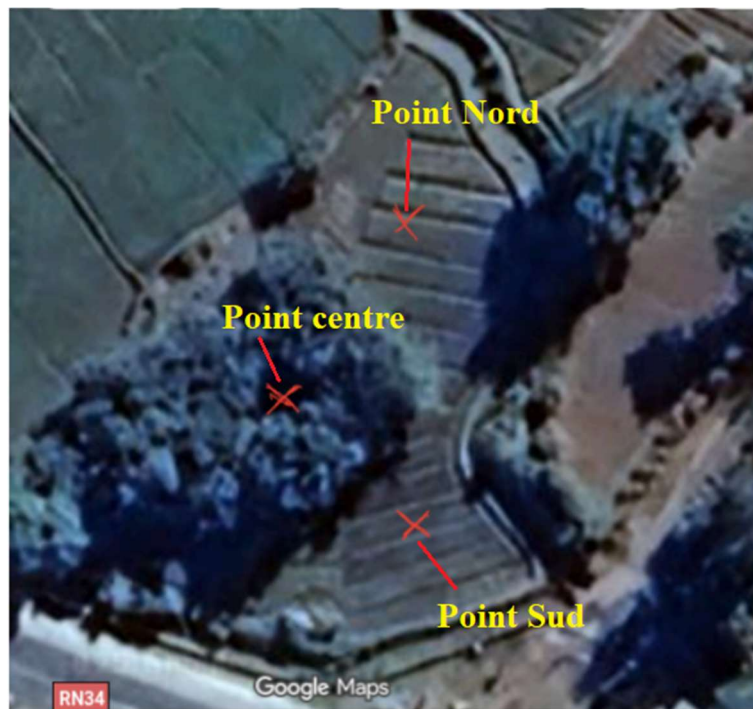


Figure 4 : localisation des points d'essai

Comme notre site est bordé par un ruisseau, le transport des eaux utilisées pour alimenter les infiltromètres se fait manuellement avec l'aide de quelques seaux d'eau.

Les valeurs relevées sont ensuite reportées sur un tableur afin d'effectuer les analyses.



Figure 5 : Techniciens effectuant les essais d'infiltration au point centre

2.2. Infiltromètre

Les essais d'infiltration sont réalisés avec des infiltromètres à double anneau bricolés sur place. Le matériel est composé d'un anneau central fabriqué avec un seau en plastique, d'un anneau externe fabriqué avec une cuvette en plastique, et d'une règle graduée.



Figure 6 : infiltromètre double anneau fabriqué sur place

2.3. Accessoires divers

Pour la réalisation des essais, en plus des infiltromètres, quelques accessoires sont nécessaires dont un chronomètre pour mesurer l'évolution de l'infiltration des eaux au cours du temps, un ou plusieurs seaux d'eau pour transporter l'eau des cours d'eau vers les infiltromètres, quelques feuilles d'essai d'infiltration et quelques stylos pour noter la hauteur instantanée d'eau sur les feuilles d'essai.

2.4. Outils et méthode d'analyse

2.4.1. Taux d'infiltration $i(t)$

Le taux d'infiltration est la vitesse à laquelle l'eau pénètre dans le sol. Il est généralement exprimé en millimètre par heure. Sa valeur, ou son expression, dépend des caractéristiques du terrain, mais peut s'obtenir directement par la dérivée de la fonction temporelle de la hauteur d'eau infiltrée dans le sol par rapport au temps. Cette fonction hauteur d'eau infiltrée est tirée directement de l'essai d'infiltration. Toutefois, les valeurs mesurées lors des essais constituent un nuage de points, alors nous allons utiliser la loi de régression non linéaire pour modéliser le comportement de la lame d'eau en surface. Notre modèle aura alors la forme

	$Li(t) = A_0 + A_1.t^n$	(01)
	$i(t) = \frac{dLi(t)}{dt}$	(02)

Dans laquelle $Li(t)$ est la lame d'eau infiltrée en centimètre au temps t en minutes. A_0 , A_1 et n sont des paramètres empiriques calculés à l'aide du logiciel nd Curve Master [6].

La détermination de A_0 , A_1 et n se fait par la méthode des moindres carrés appliquée à un modèle non linéaire [7].

Comme le nombre de points d'essais est de trois, avant de déterminer les paramètres de notre modèle, la valeur moyenne des hauteurs d'eau infiltrée relevées toutes les 5 minutes seront calculées. Ces valeurs moyennes serviront à déterminer les valeurs des paramètres A_0 , A_1 et n du site d'essai.

2.4.2. Coefficient de perméabilité

Le coefficient de perméabilité K est une valeur qui modélise la capacité du terrain à absorber du liquide, de l'eau dans notre cas. Sa valeur s'obtient par les formules suivantes :

	$K = \frac{-c}{60t} \ln \left(\frac{h+c}{H_0+c} \right)$ [8]	(03)
	$C = \frac{S}{P}$ [8]	(04)

Avec :

K = Coefficient de perméabilité en m/s

C = Coefficient en m défini par la formule (03)

S = Section de l'anneau central de l'infiltromètre en m^2

P = Périmètre de l'anneau central de l'infiltromètre en m

H_0 = la hauteur du niveau d'eau à $t = 0$

h = la hauteur d'eau à l'instant t où la mesure a été effectuée en m

t = l'instant où la mesure a été effectuée en min

Les seaux d'eau qui constituent l'anneau central de nos infiltromètres sont identiques et ont un diamètre intérieur de 0,19 mètre, ce qui donne un périmètre P d'environ 0,5966 mètre et une section S de 0,0283 mètre carré. Les valeurs de h et H_0 sont obtenues directement à partir des essais d'infiltration.

Comme la valeur de K dépend du temps, par l'intermédiaire de la hauteur d'eau h, il convient de calculer la moyenne des valeurs instantanées pour obtenir le coefficient de perméabilité du terrain. Et la valeur à saturation du sol peut être obtenue graphiquement, en identifiant la partie où la courbe devient horizontale [8].

3. Résultats

3.1. Taux d'infiltration

3.1.1. Résultats des essais

Après avoir relevés les valeurs des hauteurs d'eau infiltrée dans le sol au niveau de chaque infiltromètre sur les feuilles d'essais, ces mêmes valeurs sont reportés sur un tableur. Et les valeurs obtenues à l'aide du tableur sont résumés sur le tableau suivant.

Tableau 1 : relevée de la hauteur d'eau infiltrée en centimètres

Durée min	Hauteur d'eau (cm)			
	Point sud	Point centre	Point nord	Moyenne
5	1,2	1,5	1	1,2
10	2,3	3	1,5	2,3
15	3,3	4	2,5	3,3
20	4,3	5,4	3,5	4,4
25	5,3	6,4	4	5,2
30	6,2	7,5	5	6,2
35	7,2	8,5	6	7,2
40	8,1	9,5	6,6	8,1
45	8,1	11	6,9	9,0
50	8,6	11,5	7,3	9,1
55	9,6	12	8	9,9
60	10,6	13,3	8,5	10,8
65	11,6	14,3	8,9	11,6
70	12,6	15,3	9,3	12,4
75	13,1	16,3	9,8	13,1
80	13,6	17,3	10,1	13,7
85	14,4	18	10,5	14,3
90	15,1	20	11	15,4
95	16,1	20,5	11,2	15,9

100	16,6	21,5	12	16,7
105	17,1	22,4	12,6	17,4
110	17,6	23,1	13	17,9
115	18,1	24,4	13,5	18,7
120	18,6	25,6	14	19,4
125	19,4	26,1	14,2	19,9

Source : Auteur

Les résultats des essais d'infiltration indiquent un taux d'infiltration quasi constant durant les 125 minutes d'essai. A première vue, ces valeurs nous donnent un taux d'infiltration d'environ 1 centimètre toutes les 5 minutes.

3.1.2. Modèle mathématique du taux d'infiltration

A l'aide du logiciel NdCurveMaster, et des nuages de points obtenus lors des essais (tableau 1), on obtient les paramètres A_0 , A_1 et n de l'expression (01), et on a la fonction $Li(t)$ telle que:

$$Li(t) = -3,323 + 0,426. t^{0,8} \quad (05)$$

Par dérivation de $Li(t)$ par rapport au temps t , on obtient l'expression du taux d'infiltration $i(t)$:

$$i(t) = 0,341. t^{-0,2} \quad (06)$$

Dans l'expression (06), $i(t)$ est le taux d'infiltration en centimètres par minute au bout d'une durée t en minutes. Et la puissance négative de la variable t signifie que le taux d'infiltration diminue au fur et à mesure que la durée d'infiltration augmente.

3.2. Coefficient de perméabilité K

Les valeurs instantanées du coefficient de perméabilité K sont calculées à l'aide des formules (03) et (04). Les résultats sont affichés sur le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Valeurs instantanées du coefficient K

Durée t en minutes	Point sud		Point centre		Point nord	
	Hauteur infiltrée en cm	K en m/s	Hauteur infiltrée en cm	K en m/s	Hauteur infiltrée en cm	K en m/s
5	1,2	$3,02504.10^{-5}$	1,5	$4,34525.10^{-5}$	1	$3,61954.10^{-5}$
10	2,3	$2,17263.10^{-5}$	3	$3,87559.10^{-5}$	1,5	$3,11492.10^{-5}$
15	3,3	$2,23174.10^{-5}$	4	$3,22424.10^{-5}$	2,5	$2,79727.10^{-5}$
20	4,3	$2,18527.10^{-5}$	5,4	$3,00568.10^{-5}$	3,5	$2,55599.10^{-5}$
25	5,3	$1,93455.10^{-5}$	6,4	$2,7021.10^{-5}$	4	$2,36688.10^{-5}$
30	6,2	$1,89768.10^{-5}$	7,5	$2,50003.10^{-5}$	5	$2,21361.10^{-5}$
35	7,2	$1,84744.10^{-5}$	8,5	$2,32038.10^{-5}$	6	$2,08301.10^{-5}$

40	8,1	$1,724.10^{-5}$	9,5	$2,17434.10^{-5}$	6,6	$1,9712.10^{-5}$
45	8,1	$1,57834.10^{-5}$	11	$2,10882.10^{-5}$	6,9	$1,75218.10^{-5}$
50	8,6	$1,47396.10^{-5}$	11,5	$1,94742.10^{-5}$	7,3	$1,63736.10^{-5}$
55	9,6	$1,42124.10^{-5}$	12	$1,814.10^{-5}$	8	$1,5924.10^{-5}$
60	10,6	$1,35356.10^{-5}$	13,3	$1,76146.10^{-5}$	8,5	$1,54853.10^{-5}$
65	11,6	$1,28566.10^{-5}$	14,3	$1,69164.10^{-5}$	8,9	$1,50623.10^{-5}$
70	12,6	$1,22649.10^{-5}$	15,3	$1,62867.10^{-5}$	9,3	$1,46574.10^{-5}$
75	13,1	$1,18164.10^{-5}$	16,3	$1,57146.10^{-5}$	9,8	$1,398.10^{-5}$
80	13,6	$1,12798.10^{-5}$	17,3	$1,51918.10^{-5}$	10,1	$1,33795.10^{-5}$
85	14,4	$1,08639.10^{-5}$	18	$1,45892.10^{-5}$	10,5	$1,29897.10^{-5}$
90	15,1	$1,05441.10^{-5}$	20	$1,45199.10^{-5}$	11	$1,25837.10^{-5}$
95	16,1	$1,00943.10^{-5}$	20,5	$1,39223.10^{-5}$	11,2	$1,23307.10^{-5}$
100	16,6	$9,97701.10^{-6}$	21,5	$1,35337.10^{-5}$	12	$1,19017.10^{-5}$
105	17,1	$9,76727.10^{-6}$	22,4	$1,31434.10^{-5}$	12,6	$1,15094.10^{-5}$
110	17,6	$9,48734.10^{-6}$	23,1	$1,27292.10^{-5}$	13	$1,1149.10^{-5}$
115	18,1	$9,26608.10^{-6}$	24,4	$1,24898.10^{-5}$	13,5	$1,08165.10^{-5}$
120	18,6	$9,05831.10^{-6}$	25,6	$1,22356.10^{-5}$	14	$1,05086.10^{-5}$
125	19,4	$8,76318.10^{-6}$	26,1	$1,18496.10^{-5}$	14,2	$1,03015.10^{-5}$
Moyennes		$1,28111.10^{-5}$		$1,88219.10^{-5}$		$1,7348.10^{-5}$

Source : Auteur

Les valeurs du coefficient de perméabilité sur chaque point d'essai annoncent une bonne perméabilité sur notre site d'essai. Et la valeur moyenne du coefficient de perméabilité K de $1,6327.10^{-5}$ mètre par seconde.

4. Discussion

4.1. Taux d'infiltration

Le modèle mathématique du taux d'infiltration obtenu lors des essais, la fonction obtenue sur (06), correspond au modèle de Kostiaikov $i(t)=a.b.t^{b-1}$ [9] dans lequel les paramètres a et b valent respectivement 0,42625 et 0,8

Les relevées sur le tableau 1 montrent clairement que sur une durée assez longue, notre site d'essai admet une capacité d'absorption d'eau relativement constante. Cette bonne perméabilité est favorable pour l'implantation d'ouvrage de stockage des eaux par infiltration.

4.2. Coefficient de perméabilité

La valeur du coefficient de perméabilité K de $1,6327.10^{-5}$ mètre par seconde correspond à un sol qui admet une bonne perméabilité [10]. Son ordre de grandeur de 10^{-5} est typique d'un sol limoneux sableux [10]. Cet ordre de grandeur confirme le type de sol annoncé par Zebrowski dans sa contribution pédologique à la chronologie des éruptions volcaniques dans la région de Betafo-Antsirabe [11]. Ce type de sol est favorable à l'agriculture, justifiant la grande fertilité du sol de la zone, et plus

particulièrement vis-à-vis de la production de légumes, permettant à Betafo d'être l'un des berceaux de la production de légume de Madagascar.

5. Conclusion

La commune de Betafo est réputée pour son sol fertile et sa capacité à produire des légumes. Cette capacité de production est toutefois menacée par le dérèglement climatique, avec la modification des échéances de pluviométrie. Afin d'apporter une base de calcul pour les ouvrages de gestion des eaux, cette étude a été entreprise dans le but d'évaluer la perméabilité du sol dans le Fokontany d'Ambohinaorina, dans la commune urbaine de Betafo. Les résultats des essais réalisés ont permis d'affirmer que le taux d'infiltration des eaux dans le sol suit la loi de Kostiakov, et le coefficient de perméabilité du sol est de l'ordre de 10^{-5} mètre par seconde, une valeur typique d'un sol limoneux sableux. Il pourrait donc être intéressant d'investir dans des ouvrages d'infiltration d'eaux de pluies dans la commune de Betafo pour palier au dérèglement de la pluviométrie.

Références

- [1] FAO, « Les pays en un coup d'oeil | FAO in Madagascar, Comoros, Mauritius and Seychelles | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ». Consulté le: 19 février 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/madagascar/fao-a-madagascar/les-pays-en-un-coup-doeil/fr/>
- [2] « Monographie region Vakinankaratra », CENTRE DE RECHERCHES, D'ETUDES ET D'APPUI A L'ANALYSE ECONOMIQUE À MADAGASCAR, février 2013.
- [3] Région Vakinankaratra, Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation, Ministère des Affaires Étrangères, et PNUD, « Vakinankaratra, une Région à forte vocation agro-pastorale », Ministère des Affaires Étrangères, Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation, Région Vakinankaratra, PNUD, sept. 2022.
- [4] « Betafo – Région Vakinankaratra ». Consulté le: 4 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://region-vakinankaratra.mg/betafo/>
- [5] MINISTERE DE L'INTERIEUR ET DE LA DECENTRALISATION, « DECRET n°2015 – 592 portant classement des Communes en Communes urbaines ou en Communes rurales. » 1 avril 2015.
- [6] ndCurveMaster, « What Is Curve Fitting and How Does It Work? », ndCurveMaster. Consulté le: 17 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ndcurvemaster.com/curve-fitting-analysis-tool/>
- [7] FAO, « CHAPITRE 7 - ESTIMATION DE PARAMETRES ». Consulté le: 8 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/4/x8498f/x8498f0b.htm>
- [8] F. MAYER, Essai de perméabilité double-anneau. Bruxelles: Bruxelles Environnement / Leefmilieu Brussel, 2021.
- [9] N. Suryoputro, W. Soetopo, E. S. Suhartanto, et L. M. Limantara, « Evaluation of infiltration models for mineral soils with different land uses in the tropics », Journal of Water and Land Development, no 37, 2018, Consulté le: 3 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <http://archive.sciendo.com/JWLD/jwld.2018.37.issue-1/jwld-2018-0034/jwld-2018-0034.pdf>
- [10] FAO, « LE SOL ». Consulté le: 4 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm
- [11] C. Zebrowski, Contribution pédologique à la chronologie des éruptions volcaniques dans la région de Betafo-Antsirabe. IRD, 1974.