

Évaluation Du Bilan Hydrique À Anosibe Ifanja (Madagascar) Durant La Période 2009 À 2018

[Water Balance Assessment In Anosibe Ifanja (Madagascar) Over The 2009–2018 Period]

RANDRIAMAMPIANINA Liva Harimanana ^{1,2}, RAKOTONDRAZAFY Raymond ¹, RAMIANDRISOA Njararivelo Louisa ¹

¹. Department of Earth Sciences and Environment, Faculty of Sciences and Technology, University of Antananarivo, Madagascar

². Doctoral school of Earth Sciences and Evolution, Faculty of Sciences and Technology, University of Antananarivo, Madagascar

Auteur Correspondant : RANDRIAMAMPIANINA Liva Harimanana. E-mail : hariliva@live.fr



Résumé - Cette article vise à évaluer le bilan hydrique de la commune rurale d'Anosibe Ifanja, située dans la région Itasy (Madagascar), sur la période 2009–2018, dans un contexte marqué par une forte dépendance à l'agriculture pluviale. Le bilan hydrique a été estimé à partir des données mensuelles de précipitations et de températures moyennes, en appliquant la méthode de Thornthwaite. Les résultats mettent en évidence un fonctionnement hydrologique fortement saisonnier, caractérisé par une courte période excédentaire et une longue période déficitaire. Bien que la pluviométrie annuelle moyenne soit relativement élevée (1638,4 mm), la disponibilité en eau demeure essentiellement concentrée entre les mois de décembre et mars. L'évapotranspiration réelle représente 41 % des précipitations annuelles (673,9 mm), tandis que l'excédent hydrique atteint 964,5 mm. La répartition de cet excédent révèle une nette dominance de l'infiltration (47 %, soit 771,6 mm) par rapport au ruissellement de surface (12 %, soit 192,9 mm), soulignant le rôle déterminant de la recharge des aquifères. Ces résultats apportent des éléments pertinents pour la gestion durable des ressources en eau et l'identification des zones de recharge dans la région d'Itasy.

Mots-clés : Bilan hydrique, Méthode de Thornthwaite, Recharge des aquifères, Saisonnalité hydrologique, Infiltration, Ruissellement, Région Itasy.

Abstract– This article aims to evaluate the water balance of the rural commune of Anosibe Ifanja, located in the Itasy region (Madagascar), over the period 2009–2018, within a context characterized by a heavy reliance on rain-fed agriculture. The water balance was estimated using monthly precipitation and average temperature data, applying the Thornthwaite method. The results highlight a highly seasonal hydrological pattern, characterized by a short surplus period and a long deficit period. Although the average annual rainfall is relatively high (1638.4 mm), water availability remains primarily concentrated between the months of December and March. Actual evapotranspiration accounts for 41% of annual precipitation (673.9 mm), while the water surplus reaches 964.5 mm. The distribution of this surplus reveals a clear dominance of infiltration (47%, or 771.6 mm) compared to surface runoff (12%, or 192.9 mm), emphasizing the critical role of aquifer recharge. These findings provide relevant data for the sustainable management of water resources and the identification of recharge zones in the Itasy region.

Keywords: Water balance, Thornthwaite method, Groundwater recharge, Hydrological seasonality, Infiltration, Surface runoff, Itasy Region.

I. INTRODUCTION

La disponibilité en eau constitue un facteur déterminant pour la production agricole et le développement socio-économique dans les Hautes Terres centrales de Madagascar, où les moyens de subsistance reposent majoritairement sur l'agriculture pluviale. Dans ce contexte, la forte variabilité saisonnière des précipitations, associée à une capacité limitée de stockage de l'eau, rend les territoires ruraux particulièrement vulnérables aux déficits hydriques durant la saison sèche. La compréhension du fonctionnement hydrologique et de la répartition temporelle des ressources en eau apparaît ainsi comme un enjeu majeur pour une gestion durable des ressources naturelles.

La commune rurale d'Anosibe Ifanja, située dans la région Itasy, illustre pleinement ces contraintes environnementales et socio-économiques. Bien que la pluviométrie annuelle y soit relativement élevée, la disponibilité en eau reste fortement inégale au cours de l'année, avec une concentration des précipitations sur une courte saison humide et une longue période de déficit hydrique. Par ailleurs, le contexte géologique local, dominé par des formations volcaniques altérées et un socle cristallin fracturé, conditionne les processus d'infiltration et la recharge des aquifères. Dans ce contexte, **comment se répartissent spatialement et temporellement les différentes composantes du bilan hydrique à Anosibe Ifanja, et dans quelle mesure les excédents hydriques contribuent-ils à la recharge des aquifères dans un territoire fortement dépendant de l'agriculture pluviale ?**

La présente étude s'inscrit dans le **cadre théorique du bilan hydrique**, fondé sur l'analyse des flux et des stocks d'eau au sein du cycle hydrologique continental. Elle repose sur le **modèle conceptuel de Thornthwaite**, qui considère la température comme le principal facteur de contrôle de l'évapotranspiration et suppose une réserve en eau utile limitée du sol. Ce cadre est complété par une approche hydrogéologique de la recharge des aquifères, permettant d'analyser la répartition de l'excédent hydrique entre ruissellement de surface et infiltration dans un contexte tropical d'altitude marqué par une forte saisonnalité climatique.

L'analyse du bilan hydrique constitue un outil fondamental pour appréhender la disponibilité et la répartition des ressources en eau au sein d'un territoire. Elle permet de quantifier les principales composantes du cycle hydrologique, notamment les précipitations, l'évapotranspiration, les excédents et les déficits hydriques. Parmi les méthodes existantes, la méthode de Thornthwaite est largement utilisée dans les régions à données climatiques limitées, car elle repose essentiellement sur les températures moyennes et permet une estimation fiable de l'évapotranspiration à l'échelle mensuelle et interannuelle.

Dans ce cadre, la présente étude vise à évaluer le bilan hydrique de la commune rurale d'Anosibe Ifanja sur la période 2009–2018 à l'aide de la méthode de Thornthwaite. Les objectifs spécifiques sont : (i) de quantifier les différentes composantes du bilan hydrique, (ii) d'identifier les périodes de déficit et d'excédent hydrique, et (iii) d'analyser la répartition de l'excédent hydrique entre ruissellement de surface et infiltration, afin d'apprécier le rôle de la recharge des aquifères. Les résultats obtenus visent à fournir des éléments d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau et l'identification des zones potentielles de recharge dans la région Itasy.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La présente section décrit le cadre spatial de l'étude, les données climatiques utilisées ainsi que les méthodes mises en œuvre pour l'estimation du bilan hydrique et de ses différentes composantes. Elle précise également les hypothèses retenues pour la partition de l'excédent hydrique entre ruissellement de surface et infiltration, dans le but d'analyser la recharge potentielle des aquifères à l'échelle de la commune d'Anosibe Ifanja.

1. Zone d'étude

La commune rurale d'Anosibe Ifanja est située dans le district de Miaryinarivo, au sein de la région Itasy, dans les Hautes Terres centrales de Madagascar. Elle présente un relief globalement vallonné, avec des altitudes comprises entre environ 1 200 et 1 600 m. Le climat est de type tropical d'altitude, caractérisé par une saison humide relativement courte, s'étendant principalement de novembre à mars, et une longue saison sèche d'avril à octobre. Les activités socio-économiques de la population reposent majoritairement sur l'agriculture pluviale, rendant la disponibilité en eau étroitement dépendante du régime des précipitations.

Sur le plan géologique et hydrogéologique, la commune d'Anosibe Ifanja est dominée par des formations volcaniques anciennes altérées, reposant localement sur un socle cristallin fracturé. Ces unités lithologiques présentent des propriétés hydrodynamiques contrastées, influençant directement les processus d'infiltration, de ruissellement et de recharge des aquifères. Les formations volcaniques altérées et les zones fracturées du socle constituent des milieux favorables à l'infiltration des eaux de pluie et à l'alimentation des nappes souterraines, tandis que certaines unités superficielles plus compactes peuvent localement favoriser le ruissellement de surface.

La répartition spatiale de ces unités géologiques et hydrogéologiques, ainsi que la localisation des principales sources et zones potentiellement favorables à la recharge (Figure 1), qui illustre la carte géologique et hydrogéologique simplifiée de la commune rurale d'Anosibe Ifanja. Cette configuration géologique constitue un élément clé pour l'interprétation du bilan hydrique et pour l'analyse de la partition de l'excédent hydrique entre infiltration et ruissellement, développée dans les sections suivantes.

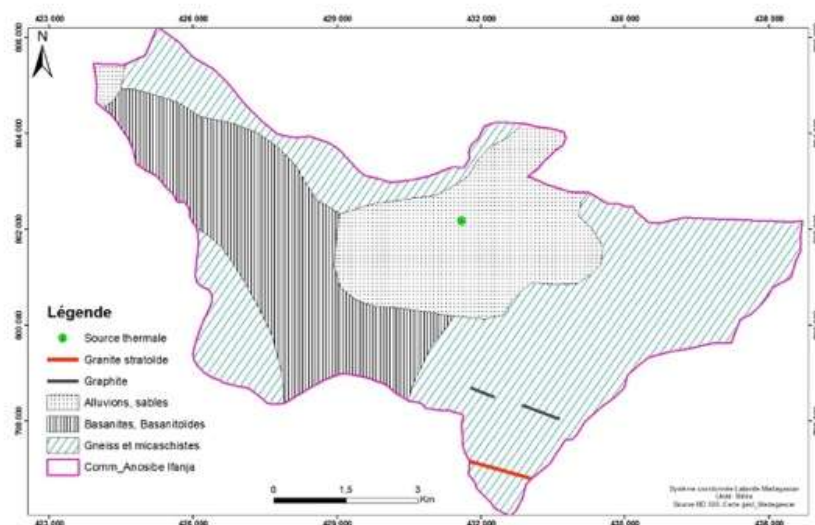


Figure 1: Carte géologique et hydrogéologique simplifiée de la commune rurale d'Anosibe Ifanja

Source : Données géologiques et hydrogéologiques existantes, compilation et traitement par les auteurs.

2. Données climatiques

L'évaluation du bilan hydrique repose sur l'utilisation de données climatiques mensuelles couvrant la période 2009–2018. Les variables prises en compte sont les précipitations mensuelles (P) et les températures moyennes mensuelles (T), issues de la station météorologique d'Anosibe Ifanja.

Ces données ont été soumises à un contrôle de cohérence afin de vérifier leur continuité temporelle et leur plausibilité climatique. Les valeurs mensuelles moyennes ont ensuite été calculées sur l'ensemble de la période étudiée, afin de caractériser le régime climatique moyen et de limiter l'influence des anomalies interannuelles. Ce choix méthodologique permet une analyse représentative du fonctionnement hydrologique moyen de la commune.

3. Méthodologie de calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique a été établi selon l'approche classique proposée par Thornthwaite, largement utilisée dans les régions où les données climatiques disponibles sont limitées. Cette méthode permet d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique à partir des précipitations et des températures moyennes mensuelles.

2.3.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) a été estimée à partir de la température moyenne mensuelle, en utilisant la formule proposée par Thornthwaite [1] (équation 1). Cette méthode permet d'évaluer la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée et transpirée par la végétation lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant et est largement utilisée dans les régions à données climatiques limitées [2].

$$ETP_m = 16 \left(\frac{10 T_m}{I} \right)^a \quad (1)$$

où ETP_m est l'évapotranspiration potentielle du mois m , T_m la température moyenne mensuelle (°C), I l'indice thermique annuel et a l'exposant climatique.

L'indice thermique annuel I est calculé comme la somme des indices thermiques mensuels, selon l'équation (2) :

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

L'exposant climatique a , fonction de l'indice thermique annuel, est déterminé à l'aide de l'équation empirique (équation 3) suivante :

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,492 \quad (3)$$

Cette approche repose sur l'hypothèse que la température constitue le principal facteur de contrôle de l'évapotranspiration, ce qui rend la méthode de Thornthwaite particulièrement adaptée aux régions disposant de données climatiques limitées.

2.3.2. Réserve en eau utile du sol (RFU)

La réserve en eau utile du sol (RFU) correspond à la quantité maximale d'eau que le sol peut stocker et rendre disponible pour les plantes [3] (équation 4).

$$RFU_m = \min(RFU_{max}, RFU_{m-1} + P_m - ETR_m) \quad (4)$$

Dans cette étude, la RFU maximale a été fixée à 100 mm, valeur couramment utilisée pour les sols agricoles des Hautes Terres centrales de Madagascar. La variation mensuelle de la RFU dépend du bilan entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle.

2.3.3. Evapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle (ETR) représente la quantité d'eau effectivement consommée par l'évaporation et la transpiration des plantes. Elle est égale à l'ETP lorsque les précipitations et la réserve en eau du sol sont suffisantes. En revanche, lorsque l'eau devient limitante, l'ETR est réduite et dépend directement des précipitations disponibles et du stock d'eau contenu dans le sol (équation 5)

$$ETR_m = \begin{cases} ETP_m, & \text{si } P_m \geq ETP_m \\ P_m + \min(RFU_{m-1}, ETP_m - P_m), & \text{si } P_m < ETP_m \end{cases} \quad (5)$$

Où P_m représente la précipitation mensuelle du mois m .

2.3.4. Excédents et déficit hydriques

L'excédent hydrique correspond à la fraction des précipitations excédant les besoins en évapotranspiration et la capacité de stockage du sol. Il apparaît lorsque la réserve en eau utile est saturée. À l'inverse, un déficit hydrique se produit lorsque les précipitations sont insuffisantes pour satisfaire l'évapotranspiration potentielle, entraînant une diminution progressive de la réserve en eau du sol.

4. Partition de l'excédent hydrique

L'excédent hydrique généré au cours des périodes humides a été réparti entre ruissellement de surface et infiltration, cette dernière étant assimilée à la recharge potentielle des aquifères. La partition a été réalisée à l'aide d'un coefficient de ruissellement (Cr) fixé à 0,20 [4], valeur cohérente avec les caractéristiques topographiques, pédologiques et géologiques de la zone d'étude.

Ainsi, 20 % de l'excédent hydrique mensuel ont été attribués au ruissellement de surface, tandis que 80 % ont été considérés comme infiltrés dans le sol et participant à la recharge des aquifères. Cette approche simplifiée permet d'obtenir une estimation quantitative des flux de recharge, tout en tenant compte des limitations liées à l'absence de mesures hydrologiques directes.

5. Limites méthodologiques

Il convient de souligner que la méthode de Thornthwaite repose principalement sur la température et ne prend pas explicitement en compte d'autres facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire, le vent ou l'humidité relative. De plus, l'utilisation d'un coefficient de ruissellement constant constitue une simplification des processus hydrologiques réels, qui peuvent varier en fonction de l'intensité des précipitations, de l'occupation des sols et de l'état d'humidité préalable.

Malgré ces limites, l'approche adoptée demeure pertinente pour une analyse à l'échelle communale et fournit une base solide pour la compréhension du fonctionnement hydrologique saisonnier et de la recharge des aquifères à Anosibe Ifanja.

III. RÉSULTATS ET ANALYSES

La présente section expose les principaux résultats issus du calcul du bilan hydrique et en propose une analyse descriptive. Les résultats sont présentés de manière progressive, en commençant par les caractéristiques climatiques, puis par l'analyse du bilan hydrique et de ses composantes, avant d'aborder la partition de l'excédent hydrique entre ruissellement de surface et infiltration.

1. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Les paramètres climatiques moyens calculés sur la période 2009–2018 mettent en évidence un régime pluviométrique fortement saisonnier à Anosibe Ifanja. La pluviométrie annuelle moyenne est de **1638,4 mm**, avec une répartition très inégale au cours de l'année. Les précipitations sont principalement concentrées entre les mois de **décembre et mars**, qui correspondent à la saison humide, tandis que la période d'avril à octobre est marquée par de faibles apports pluviométriques.

Les températures moyennes mensuelles présentent une variabilité saisonnière modérée, caractéristique d'un climat tropical d'altitude. Les valeurs les plus élevées sont observées durant la saison chaude et humide, tandis que les températures les plus basses correspondent à la saison sèche.

Tableau I: Précipitations et températures moyennes mensuelles à Anosibe Ifanja (2009–2018)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc	Ensemble
P (mm)	422,4	352,4	304,2	59,7	8,8	1,5	0,2	1,5	7,2	78,2	114,7	287,6	136,5
T (°C)	21,6	21,7	21,9	21,6	20,8	19,1	18,3	19,7	21,8	22,9	22,4	21,8	21,1

Source : Données de la station météorologique d'Anosibe Ifanja, traitement par les auteurs – 2018 à 2022

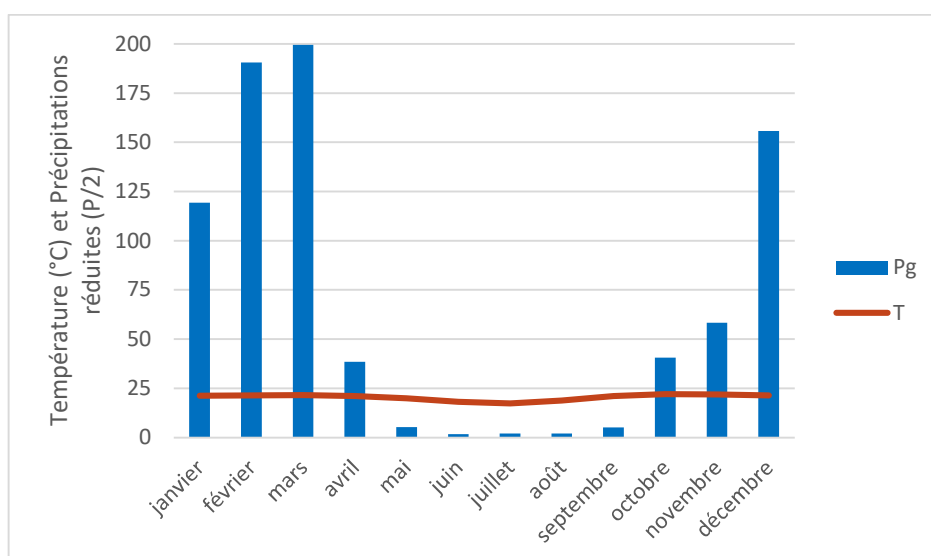


Figure 2 : : Climogramme Gaussen étendue d'Anosibe Ifanja ($P_g=P/2$)

Source : Données de la station météorologique d'Anosibe Ifanja, traitement par les auteurs – 2018 à 2022

Cette distribution saisonnière des précipitations constitue un facteur déterminant du fonctionnement hydrologique local et conditionne directement la dynamique du bilan hydrique.

2. Résultats du bilan hydrique climatique

Les résultats du bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite montrent un fonctionnement hydrologique fortement contrasté entre la saison humide et la saison sèche (Tableau 2). L'évapotranspiration potentielle annuelle est estimée à **environ 1030 mm**, tandis que l'évapotranspiration réelle atteint 673,9 mm, soit 41 % des précipitations annuelles.

Tableau II : Bilan hydrique mensuel moyen calculé selon la méthode de Thornthwaite à Anosibe Ifanja (2009-2018)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P (mm)	422,4	352,4	304,2	59,7	8,8	1,5	0,2	1,5	7,2	78,2	114,7	287,6	1638,4
T (°C)	21,6	21,7	21,9	21,6	20,8	19,1	18,3	19,7	21,8	22,9	22,4	21,8	
ETP (mm)	83,5	84,5	86,8	83,8	77,1	63	57,1	67,4	85,2	95,6	91,3	85,2	960,4
RFU (mm)	100	100	100	71,5	14,5	0	0	0	0	5,5	33,4	100	
ETR (mm)	83,5	84,5	86,8	83,8	65,7	16	0,2	1,5	7,2	72,7	86,8	85,2	673,9
Ex (mm)	338,9	267,9	217,4	4,4	0	0	0	0	0	0	0	135,8	964,5

Source : Données de la station météorologique d'Anosibe Ifanja, traitement par les auteurs – 2018 à 2022

La réserve en eau utile du sol atteint sa valeur maximale durant la saison humide, traduisant une saturation progressive du sol. À l'inverse, durant la saison sèche, la RFU diminue rapidement, entraînant l'apparition d'un déficit hydrique prolongé. Cette dynamique saisonnière est typique des régions tropicales d'altitude soumises à une forte concentration des précipitations sur une courte période [5][6].

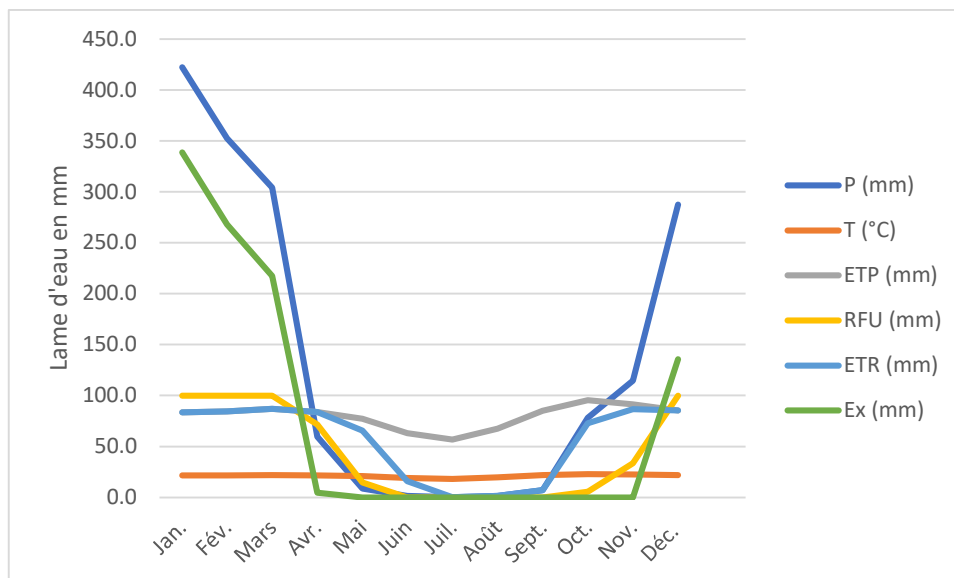


Figure 3 : Bilan hydrique mensuel moyen d'Anosibe Ifanja illustrant la succession d'une courte période excédentaire (décembre à mars) et d'un long déficit hydrique (avril à novembre)

Source : Données de la station météorologique d'Anosibe Ifanja, traitement par les auteurs – 2018 à 2022

3. Excédents et déficits hydriques

L'excédent hydrique annuel moyen (Ex) est estimé à 964,5 mm, et se concentre essentiellement entre janvier et mars, période durant laquelle les précipitations excèdent largement les besoins en évapotranspiration et la capacité de stockage du sol. En revanche, un déficit hydrique marqué s'installe de mai à octobre, période pendant laquelle l'évapotranspiration potentielle dépasse les précipitations disponibles.

Cette alternance nette entre excédent et déficit hydrique reflète le caractère saisonnier du climat et confirme la dépendance des activités agricoles aux pluies de la saison humide. Des comportements hydrologiques similaires ont été observés dans d'autres régions tropicales soumises à un régime pluviométrique saisonnier comparable [3][5].

4. Partition de l'excédent hydrique : ruissellement et infiltration

La partition de l'excédent hydrique annuel a permis d'estimer les flux de ruissellement de surface (R) et d'infiltration (I), cette dernière étant assimilée à la recharge potentielle des aquifères. Sur les 964,5 mm d'excédent hydrique annuel, 192,9 mm (12 %) sont attribués au ruissellement de surface, tandis que 771,6 mm (47 % des précipitations annuelles) correspondent à l'infiltration.

Tableau III : Partition annuelle de l'excédent hydrique entre ruissellement et infiltration à Anosibe Ifanja entre 2009 et 2018

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P (mm)	422,4	352,4	304,2	59,7	8,8	1,5	0,2	1,5	7,2	78,2	114,7	287,6	1638,4
ETR (mm)	83,5	84,5	86,8	83,8	65,7	16	0,2	1,5	7,2	72,7	86,8	85,2	673,9
Ex (mm)	338,9	267,9	217,4	4,4	0	0	0	0	0	0	0	135,8	964,5
R (mm)	67,8	53,6	43,5	0,9	0	0	0	0	0	0	0	27,2	192,9
I (mm)	271,1	214,3	173,9	3,6	0	0	0	0	0	0	0	108,6	771,6

Source : Données de la station météorologique d'Anosibe Ifanja, traitement par les auteurs – 2018 à 2022

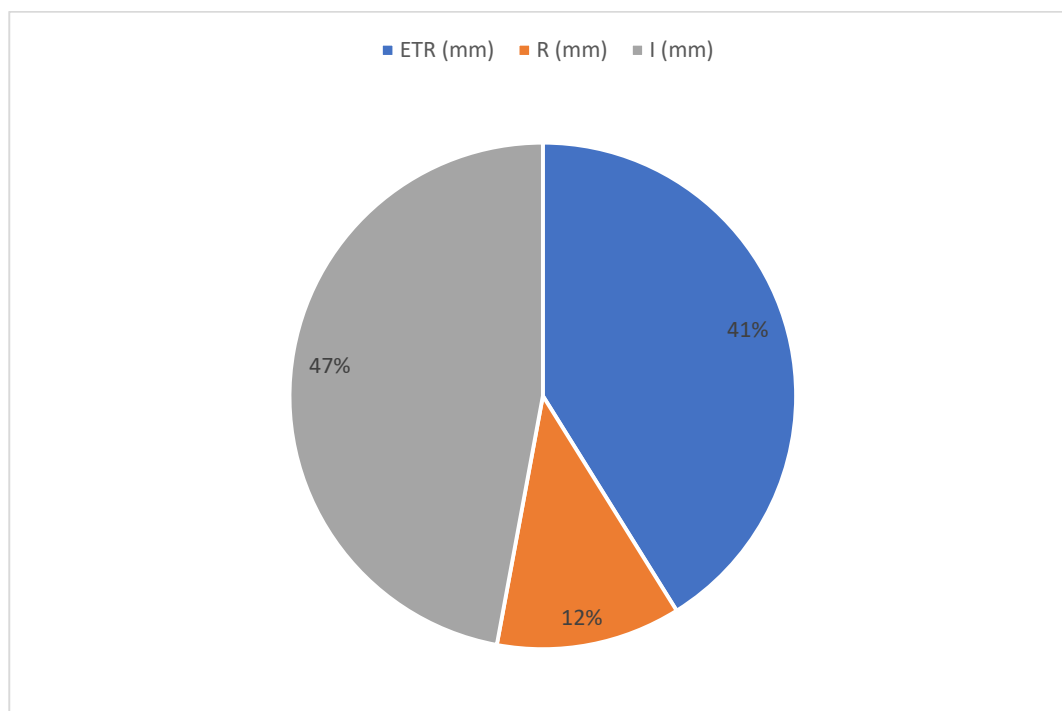


Figure 4 : Répartition de l'excédent hydrique entre ruissellement et infiltration

Source : Données de la station météorologique d'Anosibe Ifanja, traitement par les auteurs – 2018 à 2022

La dominance de l'infiltration s'explique par la nature des formations géologiques locales, caractérisées par des formations volcaniques altérées et un socle cristallin fracturé, favorables à la percolation des eaux de pluie. Des résultats comparables ont été rapportés dans des contextes hydrogéologiques similaires en milieux volcaniques tropicaux [6][7].

5. Implications hydrologiques

Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle majeur de la saison humide dans la recharge des aquifères et soulignent la vulnérabilité du système hydrologique durant la saison sèche. La forte contribution de l'infiltration à l'excédent hydrique suggère que les nappes souterraines constituent une ressource stratégique pour l'approvisionnement en eau, à condition que les zones de recharge soient préservées.

Ces résultats fournissent une base quantitative essentielle pour la gestion intégrée des ressources en eau et pour l'identification des périodes et des zones favorables à la recharge des aquifères dans la région Itasy.

IV. DISCUSSION

L'analyse du bilan hydrique de la commune rurale d'Anosibe Ifanja met en évidence un fonctionnement hydrologique fortement contrôlé par la saisonnalité climatique, caractéristique des régions tropicales d'altitude. La concentration des précipitations sur une courte période de l'année, combinée à une longue saison sèche, conditionne l'ensemble des composantes du bilan hydrique et explique la succession marquée de phases excédentaires et déficitaires observées.

1. Influence du régime climatique sur le fonctionnement hydrologique

La pluviométrie annuelle moyenne relativement élevée (1638,4 mm) pourrait, à première vue, suggérer une disponibilité en eau satisfaisante. Toutefois, la forte concentration des précipitations entre décembre et mars limite cette disponibilité dans le temps. Cette configuration entraîne une saturation rapide des sols en saison humide, suivie d'un épuisement progressif de la réserve en eau utile au cours de la saison sèche. Des régimes hydrologiques similaires ont été décrits dans d'autres contextes tropicaux soumis à une forte saisonnalité pluviométrique, où la durée de la saison sèche constitue un facteur limitant majeur pour l'agriculture pluviale et l'alimentation en eau [3][5].

La variabilité saisonnière modérée des températures, typique d'un climat tropical d'altitude, influence directement les flux d'évapotranspiration. L'évapotranspiration potentielle annuelle (environ 960–1030 mm) demeure inférieure à la pluviométrie annuelle, ce qui explique l'apparition d'excédents hydriques importants durant la saison humide, conformément aux principes du bilan hydrique climatique [1][3].

2. Pertinence et limites de la méthode de Thornthwaite

L'application de la méthode de Thornthwaite s'est révélée adaptée au contexte de l'étude, marqué par une disponibilité limitée des données climatiques. La proportion relativement faible de l'évapotranspiration réelle par rapport aux précipitations annuelles (41 %) reflète la forte contrainte hydrique durant la saison sèche, lorsque les précipitations ne suffisent plus à satisfaire la demande évaporative.

Toutefois, comme souligné dans la littérature, la méthode de Thornthwaite repose principalement sur la température et ne prend pas explicitement en compte d'autres facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire, le vent ou l'humidité relative [2][6]. Cette simplification peut conduire à une sous-estimation ou une surestimation ponctuelle de l'évapotranspiration, notamment en conditions climatiques extrêmes. Néanmoins, dans une approche à l'échelle communale et sur une période pluriannuelle, cette méthode demeure pertinente pour analyser les tendances générales du fonctionnement hydrologique [2][5].

3. Excédent hydrique et recharge potentielle des aquifères

L'excédent hydrique annuel moyen estimé à 964,5 mm constitue un indicateur majeur du potentiel de recharge des aquifères dans la zone d'étude. La forte dominance de l'infiltration par rapport au ruissellement (environ 80 % de l'excédent hydrique) suggère que la recharge souterraine joue un rôle central dans le fonctionnement hydrologique local.

Cette prédominance de l'infiltration peut être expliquée par le contexte géologique et hydrogéologique d'Anosibe Ifanja, caractérisé par des formations volcaniques altérées et un socle cristallin fracturé, favorables à la percolation des eaux de pluie. Des études menées dans des environnements volcaniques tropicaux comparables ont mis en évidence des mécanismes de recharge similaires, avec une contribution significative des excédents hydriques saisonniers à l'alimentation des nappes souterraines [6][7].

4. Implications pour la gestion des ressources en eau

Les résultats soulignent la vulnérabilité du système hydrologique durant la saison sèche, période au cours de laquelle la disponibilité en eau de surface devient très limitée. Dans ce contexte, les eaux souterraines constituent une ressource stratégique pour l'approvisionnement en eau domestique et agricole. La préservation des zones de recharge identifiées, notamment dans les secteurs favorables à l'infiltration, apparaît ainsi essentielle pour assurer une gestion durable des ressources en eau.

Par ailleurs, la forte dépendance de la recharge des aquifères aux précipitations de la saison humide rend le système hydrologique sensible aux variations climatiques interannuelles. Une modification du régime pluviométrique, liée notamment aux changements climatiques, pourrait affecter significativement les volumes de recharge et accentuer les déficits hydriques en saison sèche, comme cela a été observé dans d'autres régions tropicales [4][6].

Bilan de la discussion

Dans l'ensemble, l'analyse du bilan hydrique d'Anosibe Ifanja met en évidence un système hydrologique dominé par une forte saisonnalité climatique, une recharge des aquifères concentrée sur une courte période de l'année et une vulnérabilité marquée en saison sèche. Ces résultats confirment la pertinence de l'approche par bilan hydrique climatique pour caractériser le fonctionnement hydrologique des zones rurales tropicales d'altitude et fournir des éléments d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau.

V. CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif d'évaluer le bilan hydrique de la commune rurale d'Anosibe Ifanja sur la période de 2009 à 2018, dans un contexte marqué par une forte dépendance à l'agriculture pluviale et une variabilité saisonnière prononcée des précipitations. L'application de la méthode de Thornthwaite a permis de quantifier les principales composantes du bilan hydrique et d'analyser la dynamique saisonnière des ressources en eau.

Les résultats montrent que, malgré une pluviométrie annuelle moyenne relativement élevée (1638,4 mm), la disponibilité en eau reste fortement contrainte par la concentration des précipitations sur une courte saison humide, s'étendant principalement de décembre à mars. L'évapotranspiration réelle représente environ 41 % des précipitations annuelles, tandis que l'excédent hydrique atteint 964,5 mm, traduisant un potentiel important de recharge des aquifères durant la saison des pluies. À l'inverse, la longue saison sèche est caractérisée par un déficit hydrique marqué et un épuisement progressif de la réserve en eau utile du sol.

La partition de l'excédent hydrique met en évidence une nette dominance de l'infiltration par rapport au ruissellement de surface, en lien avec les caractéristiques géologiques locales, dominées par des formations volcaniques altérées et un socle cristallin fracturé. Cette configuration confère aux eaux souterraines un rôle stratégique dans l'approvisionnement en eau de la commune, en particulier durant la saison sèche.

Ces résultats soulignent l'importance de préserver les zones favorables à l'infiltration et à la recharge des aquifères, afin d'assurer une gestion durable des ressources en eau à l'échelle locale. Ils mettent également en évidence la vulnérabilité du système hydrologique face à d'éventuelles modifications du régime pluviométrique, notamment dans un contexte de changements climatiques. Des travaux complémentaires intégrant des données hydrogéologiques détaillées, des mesures de débits et des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration plus élaborées permettraient d'affiner les estimations de recharge et de renforcer les stratégies de gestion intégrée des ressources en eau dans la région Itasy.

Perspectives de recherche

Cette étude ouvre plusieurs pistes de recherche à approfondir :

- Une comparaison méthodologique entre la méthode de Thornthwaite et des approches plus complètes d'estimation de l'évapotranspiration, telles que la méthode de Penman–Monteith, afin d'évaluer l'influence du choix méthodologique sur l'estimation du bilan hydrique et de la recharge des aquifères.
- Une validation hydrogéologique des résultats, par l'intégration de mesures de terrain (suivi piézométrique, essais de pompage, mesures de débits de sources), permettant de confronter les estimations issues du bilan hydrique climatique aux observations réelles du fonctionnement des aquifères.
- Une analyse spatialisée du bilan hydrique, en mobilisant des données d'occupation du sol, de topographie et de télédétection, afin d'identifier plus précisément les zones préférentielles de recharge et les secteurs vulnérables au déficit hydrique.
- Une évaluation prospective des impacts du changement climatique, à travers l'analyse de scénarios climatiques futurs, pour anticiper l'évolution de la disponibilité en eau et renforcer les stratégies locales d'adaptation et de gestion durable des ressources hydriques.

En définitive, cette étude constitue une première étape vers une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique de la commune rurale d'Anosibe Ifanja. Elle met en évidence la nécessité de combiner approches climatiques et hydrogéologiques afin d'accompagner les décideurs locaux dans la planification et la gestion durable des ressources en eau dans la région Itasy.

REFERENCES

- [1] C. W. Thornthwaite, An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, 38 (1948) 55–94.
- [2] [C.-Y. Xu and V. P. Singh, Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation, *Hydrological Processes*, 15 (2001) 305–319.
- [3] L. Turc, Le bilan d'eau des sols, *Annales Agronomiques*, 6 (1955) 5–33.
- [4] J.-L. Perrin, *Hydrologie de surface*, Presses de l'ENPC (2003).
- [5] P. Girard, J. Rodier, *Hydrologie appliquée*, Dunod, Paris (1984).
- [6] M. Réménieras, *L'hydrologie de l'ingénieur*, Eyrolles, Paris (1972).
- [7] J. A. Cherry, E. C. Freeze, *Groundwater*, Prentice Hall, New Jersey (1979)