

RESSOURCES EN EAUX DU BASSIN DE MANGOKY FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Auteurs :

RAMAMINAINA Florica Ormilla Rothschild¹

RAMANAKOTO Toky Nandrasana²

Affiliations des auteurs

- ¹Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience, Laboratoire Hydrodynamique, Université d'Antananarivo Madagascar
- ²Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience

Résumé

Le changement climatique constitue un défi majeur de l'humanité et affecte nombreux secteurs du pays surtout en ce qui concerne le secteur agricole et la ressource en eau nécessaire pour ces activités. Afin d'assurer un développement durable à Madagascar, il est impératif de veiller à une meilleure gestion des fluctuations des eaux. L'étude de la sensibilité des ressources en eau du bassin versant de Mangoky, contribue à l'amélioration de la gestion des ressources en eau du pays, car c'est l'un des plus grands bassins versant de Madagascar. La spécificité de cette étude est l'intégration des scénarios du changement climatique (RCP4.5 et RCP8.5) faites par les experts internationaux en climatologie dans la projection future du comportement hydrométéorologique de la zone d'étude. L'analyse et les tests statistiques des données de précipitations et de température de 1988 à 2018 ont permis de définir le trait climatique et de faire une projection à l'horizon de 2060. Le climat se dégrade progressivement avec une précipitation annuelle allant de 1200mm à 800mm entre 1950 à 2018. Le changement climatique est surtout marqué par le changement brusque des températures maximales et minimales, -5,09°C en 1993 et +2,4°C en 1998. A l'horizon de 2060, le scénario climatique optimiste prévoit une montée de la température minimale jusqu'à 0,1°C et d'une diminution de la pluviométrie jusqu'à 1,40mm. Ces variations des paramètres présentent des fluctuations relatives au dérèglement du cycle de l'eau.

Mots-clés

Changement climatique, Bassin Versant de Mangoky, Sensibilité hydrologique, scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5, projection climatique

1. Introduction

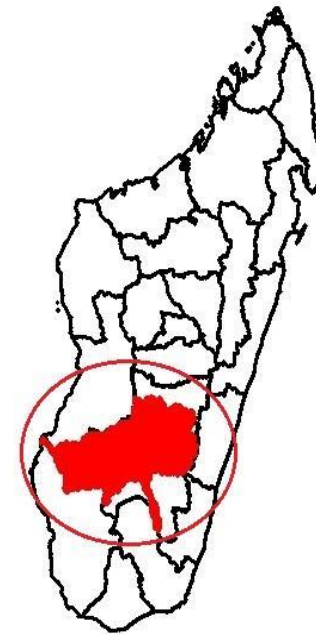
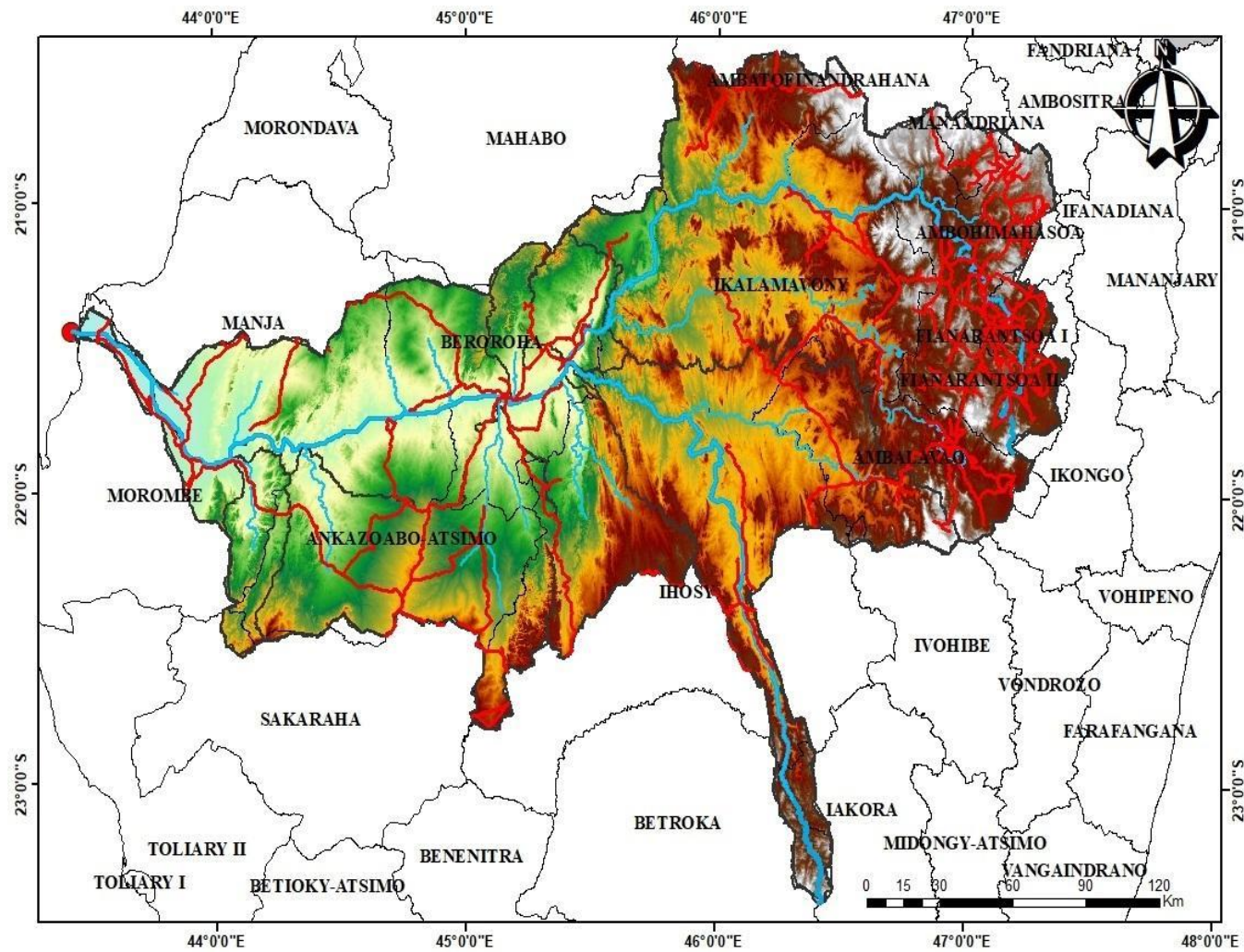
Le dérèglement climatique est une réalité incontournable de nos jours. Les changements climatiques exacerbent la dégradation des terres, en particulier dans les zones côtières de faible élévation, les deltas fluviaux, les zones arides et les zones de pergélisol (GIEC, 2019) Le changement climatique a des impacts directs sur les ressources naturelles, les écosystèmes. Le secteur de l'eau est sans aucun doute parmi les secteurs les plus affectés comme le démontrent les observations et les projections des experts scientifiques (Ministère Délégué chargé de l'eau La Réunion et al, 2016). Du fait de sa situation géographique et de la dépendance de sa population aux ressources naturelles, Madagascar est particulièrement vulnérable aux impacts du changement climatique d'après le GIEC. En plus de cette vulnérabilité du pays, sa partie Sud est la première zone où les effets du changement climatique se sont fait ressentir dans les années 1950 avant de se répartir partout dans le pays (Raholijao N. et al, 2019). Une augmentation de la température minimale allant jusqu'à 3°C est perçue selon la projection climatique à l'horizon 2060 avec des variations de la pluviométrie. L'observation de tous ces facteurs ajoutés à la raréfaction des ressources en eau dans le Sud de Madagascar fut la raison d'entamer l'étude dans la partie Sud-Ouest de l'île.

Le delta de Mangoky est un cas intéressant du fait de sa situation climato-géographique et la présence d'une vaste plaine.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est l'analyse de la sensibilité du cycle hydrologique du bassin de Mangoky face au changement climatique. L'approche adoptée est le couplage de quatre techniques dont **l'étude hydrologique**, **l'analyse des anomalies standards**, la **tendance climatique** et l'**analyse par courbes ombrothermiques** avec les cartes de **projection climatique en fonction des scénarios RCP4.5 et RCP8.5**

2. Présentation du site et des caractéristiques

Le Mangoky est le plus grand fleuve malgache par la superficie du bassin versant de 55 750 km² avec une altitude maximale de 2 611 m. Le bassin versant se localise depuis les Hautes Terres Centrales de Madagascar vers la partie Sud-Ouest du pays où ses confluences sont la MATSIATRA, la MANANANTANANA et le ZOMANDAO (figure 1). Ces affluents se rejoignent dans la zone de contact cristallin-sédimentaire à 300 km environ avant de se jeter dans le canal de Mozambique au Sud-Ouest du pays (Pierre Chaperon et al., , , date).



Légendes

- Infrastructures routières
- Régions
- Limite Bassin versant
- Districts
- Exutoire
- Cours d'eaux

Figure 1: Localisation du bassin versant de Mangoky
 [Source : Investigation personnelle, 2019]

3. Présentation des scénarios de projection climatique RCP4.5 et RCP8.5

La projection climatique est la réponse du climat à un changement externe donné. La projection climatique RCP utilise 4 scénarios de trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2100 (GIEC, 2014).

Les prévisionnistes du cinquième rapport d'évaluation, publié en 2013 et en 2014, ont utilisé des « profils représentatifs d'évolution de concentration », aussi appelés scénarios RCP, afin de déterminer à quoi ressemblera le climat. Dans ces profils, ce qui change la donne, ce sont les efforts faits par l'humanité pour limiter le dérèglement climatique ; cela va du scénario RCP-2,6 où l'on parvient à réduire drastiquement les émissions et à limiter les effets au scénario inverse, le RCP-8,5. Le chiffre qui caractérise chaque scénario indique le « forçage radiatif », soit le supplément énergétique que nos émissions ajouteront au système Terre d'ici à 2100, qu'on exprime en watts par mètre carré. Quand la Terre capte plus d'énergie qu'elle ne peut en relâcher à cause du forçage radiatif, les températures augmentent (GIEC, 2014). Un scénario RCP permet de modéliser le climat futur.

Tableau 1: Résumé des profils d'évolution, concentrations en gaz à effet de serre, et augmentation de la température moyenne mondiale par rapport à 2000, pour les quatre trajectoires RCP pour l'année 2100 (réalisé à partir de Ouzeau, et al. 2014).

Trajectoire	Profil d'évolution	Concentration en gaz à effet de serre en 2100 (éqCO ₂ ppm)	Augmentation de la température moyenne mondiale en 2100
RCP 2.6	Pic puis déclin	475 ppm	≈ + 1°C
RCP 4.5	Stabilisation avant 2100	630 ppm	≈ + 2°C
RCP 6.0	Stabilisation après 2100	800 pmm	≈ + 2,5°C
RCP 8.5	Croissant (sans politique climatique)	1 313 ppm	≈ + 4°C

[Source : Ouzeau, et al. 2014]

- RCP 2.6

RCP 2.6, le scénario d'émissions faibles, nous présente un futur où nous limitons les changements climatiques d'origine humaine. Le maximum des émissions de carbone est atteint rapidement, suivi d'une réduction qui mène vers une valeur presque nulle bien avant la fin du siècle.

- RCP 4.5 : Scénario d'émissions modérées

RCP 4.5, un scénario d'émissions modérées, nous présente un futur où nous incluons des mesures pour limiter les changements climatiques d'origine humaine. Ce scénario exige que les émissions mondiales de carbone soient stabilisées d'ici la fin du siècle.

- RCP 8.5 : Scénario d'émissions élevées

4. RCP 8.5, le scénario d'émissions élevées, nous présente un futur où peu de restrictions aux émissions ont été mises en place. Les émissions continuent d'augmenter rapidement au cours de ce siècle, et se stabilisent seulement après 2250.

Méthodologie
Le climat d'une Région donnée peut-être défini par la courbe ombrothermique sur une période de 30 ans ou plus. Les données météorologiques utilisées sont celles de 1988-2018 et proviennent :

- En partie, des trois stations synoptiques couvrant la zone d'étude localisée à Ranohira, Fianarantsoa et Morombe (;
- Et l'autre partie des données satellitaires venant de Climate Information Portal sur une période de 1971 à 2060 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.
- Les données hydrologiques proviennent de la banque de données de la Direction des Recherches Hydrométéorologiques et de Base de données à Ampandrianomby de 1991 à 2001.

La figure 02 ci-après représente le diagramme représentant l'approche méthodologique utilisée.

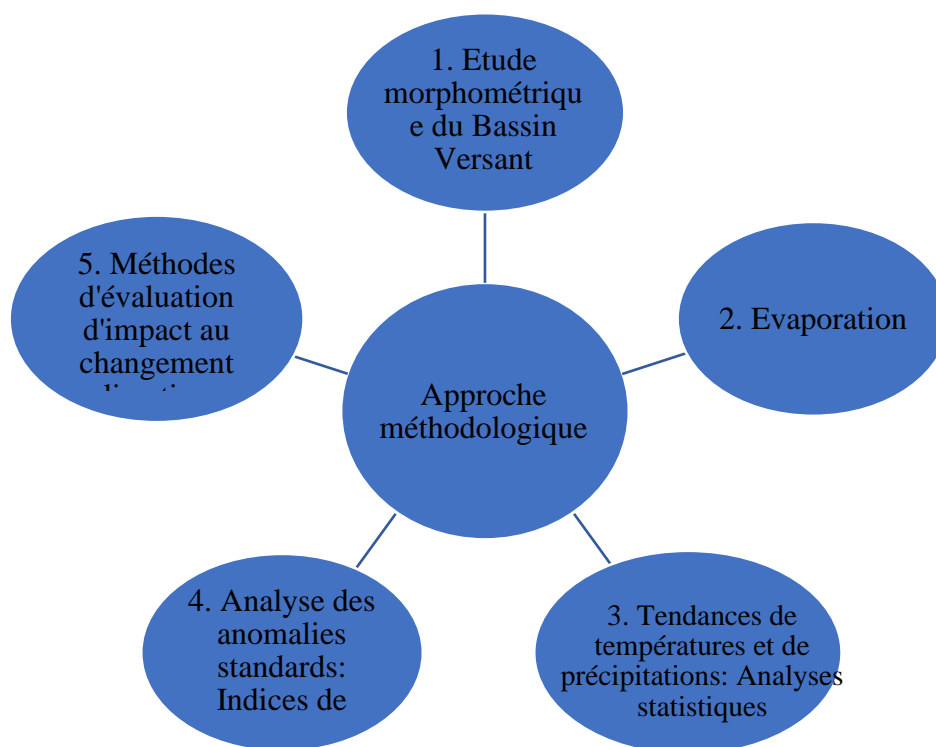


Figure 2: Diagramme représentant l'approche méthodologique

4.1. Etude morphométrique du bassin versant

L'étude morphométrique est caractérisée par l'analyse des paramètres physiques et des paramètres topographiques :

Tableau 1 : Paramètres morphométrique

Paramètres physiques	Paramètres topographiques
La superficie S du bassin versant : $S = L * l$ en [km ²] (1)	Altitudes caractéristiques : altitude maximale Z _{max} et altitude minimale Z _{min}
Le périmètre P du bassin versant : $P = \frac{K*\sqrt{S}}{0,28}$ en [Km] (2)	Altitude moyenne Z _{moy}
Où $L = \frac{K\sqrt{S}}{1.12} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right]$ (3)	$Z_{moy} = \sum \frac{S_i * z_i}{S}$ (5)
$l = \frac{P}{2} - L$ (4)	Avec : Z _{moy} : Altitude moyenne du bassin [m], S _i : Surface comprise entre deux courbes de niveaux [Km ²],

<p>Avec :</p> <p>L : Longueur du rectangle équivalent [Km] ;</p> <p>l : Largeur du rectangle équivalent [Km]</p>	<p>zi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m],</p> <p>S : Surface totale du bassin versant [Km²]</p> <p>Courbe hypsométrique ;</p>
<p>K : Coefficient de compacité de GRAVELIUS</p> $K = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \approx 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (6)$ <p>Avec :</p> <p>K : Indice de compacité de GRAVELIUS ;</p> <p>P : Périmètre du bassin versant en Km ;</p> <p>S : Superficie du bassin versant, en Km².</p> <p>GRAVELIUS (1914)</p>	<p>Inde de pente de la Roche I_p :</p> $I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} * \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i(Z_i - Z_{i-1})} \quad (7)$ <p>S_i : représente la surface du bassin comprise entre les côtes Z_i et Z_{i-1},</p> <p>L : longueur du rectangle équivalent,</p> <p>(Z_i - Z_{i-1}) : Dénivelé entre deux courbes de niveau voisines.</p>
	<p>Indice de pente globale (I_g) donné par la relation :</p> $I_g = \frac{(Z_{5\%} - Z_{95\%})}{L} \quad (8)$

La dénivelée spécifique est donnée par la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{S} = \frac{D}{L} \sqrt{L \cdot l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (9)$$

L'influence du relief sur l'écoulement est perceptible par la variation de nombreux paramètres hydrométéorologiques avec l'altitude (précipitations, températures...), la morphologie du terrain et la pente qui influe sur la vitesse de l'écoulement.

Tableau 2 : Paramètres de l'étude hydrologique (Récapitulation des caractéristiques du bassin versant de Mangoky)

4.2. L'évaporation

L'évaporation est, le paramètre qui intervient directement dans un bilan hydrologique, assez difficile à chiffrer en valeur absolue. A Madagascar, la variation de l'évaporation est le plus couramment utilisée. En effet, l'évaporation croît avec la température et la hauteur de précipitations donc décroît avec l'altitude et quand l'humidité relative augmente (PELLERAY H., 1954). Dans la partie Sud de l'île, l'évaporation est importante durant les courtes périodes de pluie (source).

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donné :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S) \quad (10)$$

Où P : Précipitations [mm], S : Ressources disponible à la fin de la période précédente [mm], R : Ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm], E : Evaporation (y compris l'évapotranspiration) et $(S \pm \Delta S)$: Ressources accumulées à la fin de la période étudiée [mm]

Les données climatiques utilisées pour l'analyse de l'évaporation, l'écoulement et son déficit sont la pluviométrie annuelle et la température moyenne annuelle de trois stations : Fianarantsoa, Morombe et Ranohira.

L'évaporation est fonction du déficit d'écoulement par la relation suivante :

$$E = I - O \pm \Delta S \text{ si } \Delta S = 0 \quad (11)$$

Et que le bassin versant naturel soit imperméable. Alors,

$$I - O = D = E \quad (12)$$

Formule de Turc :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ où } L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (13)$$

Où D : Déficit d'écoulement du bassin et T : température en °C

Le déficit d'écoulement présente des facteurs qui le caractérisent :

- Facteurs principaux : évaporation et régime pluviométrique
- Facteurs secondaires : pente, forme du réseau hydrographique, nature de la couverture végétale, constitution géologique du sol

Un bassin versant naturel est imperméable s'il présente un sol à forte teneur en argile et s'il y a une présence d'affleurements rocheux.

La pédologie de Mangoky présente une grande proportion de sol argileux, soit 72. Compte tenu du taux d'argile dans le bassin, le Mangoky est un bassin versant naturel imperméable.

4.3. Tendances des températures et des précipitations

Les données de températures et de précipitation ont été traitées dans le but d'assurer l'homogénéité et la stabilité avant son exploitation par le test non paramétrique de Pettitt (1979) et l'Analysis Of Variance (ANOVA).

Le test statistique de Student a été appliqué aux séries qui contiennent une ou des ruptures détectées par le test de Pettitt. Les formules statistiques employées sont les suivantes :

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(s^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)\right)}} \quad (14)$$

$$s^2 = \frac{\sum (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 + \sum (x_{2i} - \bar{x}_2)^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (15)$$

Avec :

t = la valeur de Student ;

s^2 : la variance pondérée entier des deux périodes ;

\bar{x}_1 : la moyenne de la période 1 (avant rupture) ;

\bar{x}_2 : la moyenne de la période 2 (après rupture) ;

x_{1i} et x_{2i} sont les variables des deux périodes (1 et 2) ;

n_1 et n_2 sont les effectifs respectifs des périodes.

La valeur absolue de t obtenue est comparée à la valeur lue sur la table de Student-Fisher (1973) pour le nombre de degré de liberté v , tel que $v = n_1 + n_2 - 2$.

La différence entre les moyennes des deux périodes est dite significative si la valeur absolue obtenue de t est supérieure à la valeur lue sur la table de Student-Fisher au seuil de 0,05, elle est dite très significative si elle est supérieure au seuil de 0,1.

4.4. Analyse des anomalies standards (Indices de Lamb)

Les périodes excédentaires ou déficitaires sont déterminées par rapport à la normale 1971-2001 par l'intermédiaire de l'indice de Lamb (Lamb, 1982) en utilisant :

$$I = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (16)$$

Où I est l'anomalie standardisée (indice de Lamb), X_i est la variable étudiée pour le temps (i), \bar{X} est la moyenne de la période de référence considérée et σ est l'écart-type de la période de référence.

- ❖ Si $I > 0$, la période est dite excédentaire, humide et chaude ;
- ❖ Si $I < 0$, la période est dite déficitaire, sèche, froide/ fraîche.

Une classification proposée par McKee et al. (1993) répartit les périodes selon les valeurs de Standardized Precipitation Index (SPI) ou Indices Normalisées de Précipitations dans le tableau 5 (Bergaoui M. et Alouini A., 2001).

❖ **Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle interannuelle ou SPI-12**

Le SPI-12 n'est autre que la comparaison de cumul des précipitations des 12 mois consécutifs avec celle de la moyenne du même mois sur toutes les années de la série temporelle des données disponibles. Les SPI à cette échelle de temps sont probablement liés au débit d'écoulement, au niveau du lac (Bergaoui M. et Alouini A., 2001).

❖ **Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle saisonnière ou SPI-6**

Le SPI-6 mois compare la précipitation de cette période avec la même période de 6 mois sur toutes les années de la série temporelle. Le SPI reflète le modèle de précipitation à moyen terme. Les informations des SPI-6 sont probablement liées au débit d'écoulement, au niveau du fleuve, de même pour le niveau de l'eau souterraine à long terme. Pour la saison chaude et pluvieuse (Novembre à Avril), l'utilisation du SPI-6 de la fin du mois d'Avril permet de comparer le cumul des précipitations de Novembre à Avril de l'année examinée au cumul de précipitations de cette même période pour toutes les années écoulées et celle de la saison fraîche et sèche (Mai à Octobre) en Octobre, d'où la prise en compte du SPI-6 de la fin du mois d'Octobre (Bergaoui M. et Alouini A., 2001).

4.5. Méthodes d'évaluation d'impact aux changements climatiques

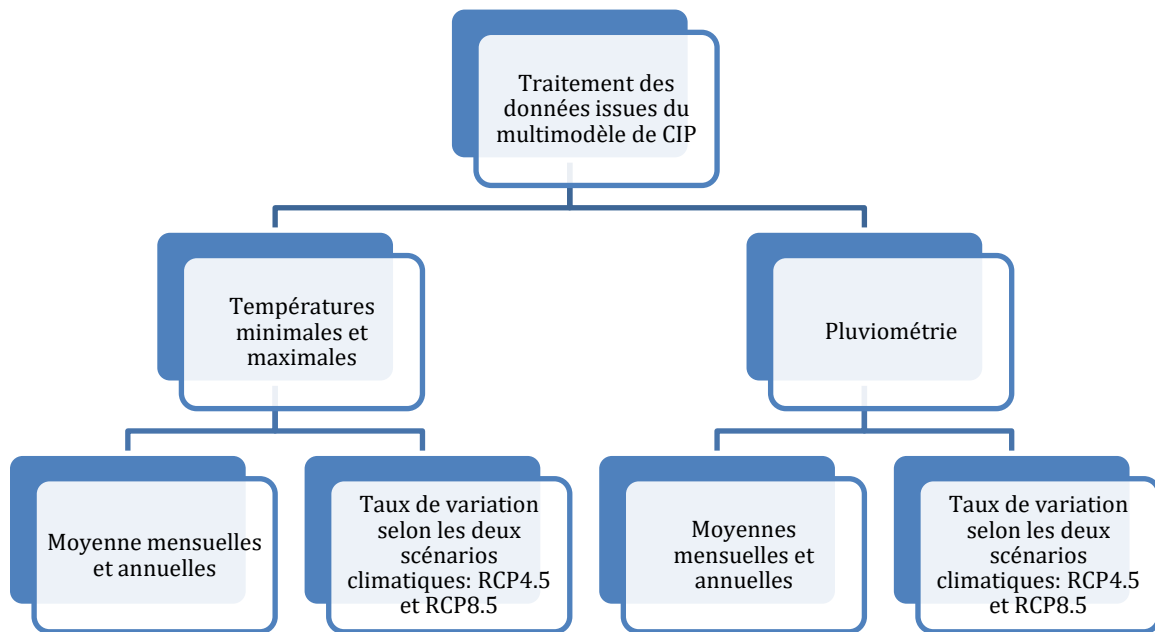


Figure 3: Organigramme de l'évaluation d'impact au changement climatique en fonction des températures et de la pluviométrie selon les scénarios RCP 4.5 et RCP8.5 : 2025-2060

5. Résultats

5.1. Etude hydrologique du bassin versant de Mangoky

La courbe hypsométrique (figure 04) est un élément clé dans le comportement hydrologique d'un bassin et représente son relief. Elle représente la répartition de la surface du bassin en fonction de son altitude où la surface est exprimée en % . .

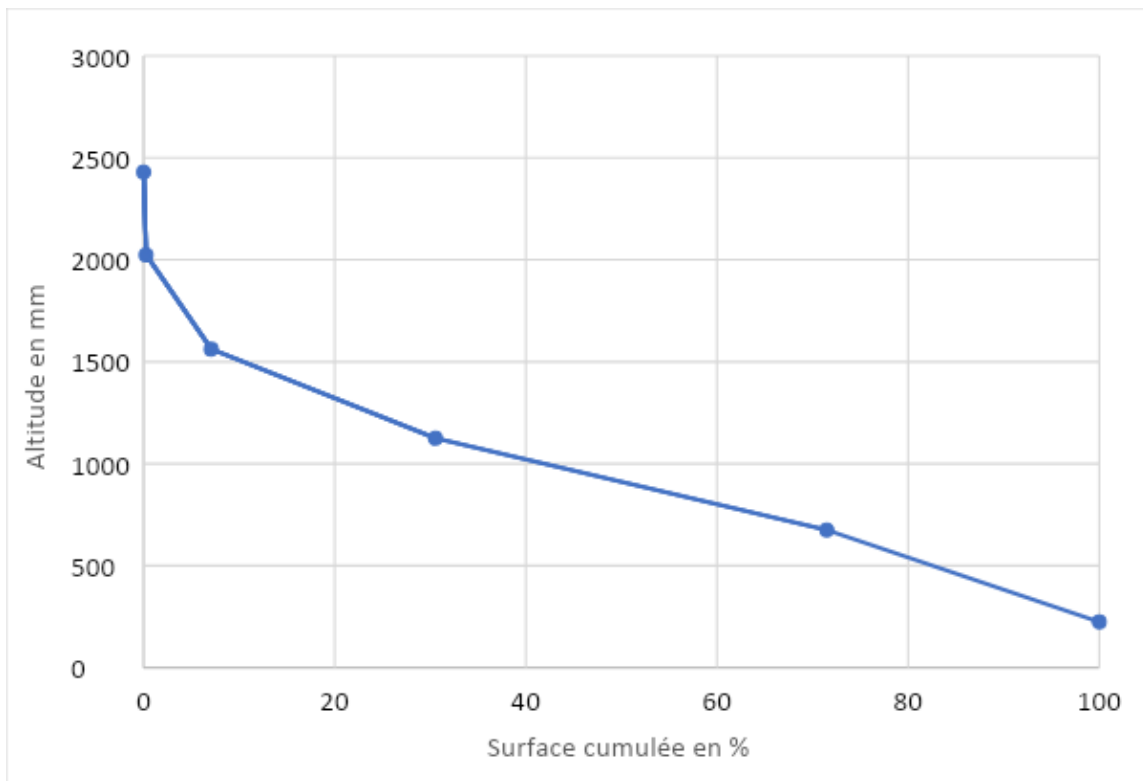


Figure04: Courbe hypsométrique de Mangoky

Le bassin versant est de forme allongée ($K=1,79$) avec un relief de forte pente $I= 2$ (Tableau 2) selon ORSTOM.

Tableau 2 : Paramètres de l'étude hydrologique (Récapitulation des caractéristiques du bassin versant de Mangoky)

Paramètres	Surface [km ²]	Périmètre [Km]	Longueur [Km]	Zmax [m]	Zmi n [m]	Ig [m/Km]	K	Z5% (m)	Z95% (m)	Z5% - Z95% (m)
Valeur numérique	55 750	1 498	663,5	2 611	0	2	1,79	1650	300	1350

[Source : Investigation personnelle, 2019]

5.2. Evaporation

Dans la partie Sud de l'île, l'évaporation est importante durant les courtes périodes de pluie. La figure 5 montre que le déficit d'écoulement d dans les 3 stations : Fianarantsoa, Ranohira et Morombe tend à augmenter surtout celui de Ranohira.

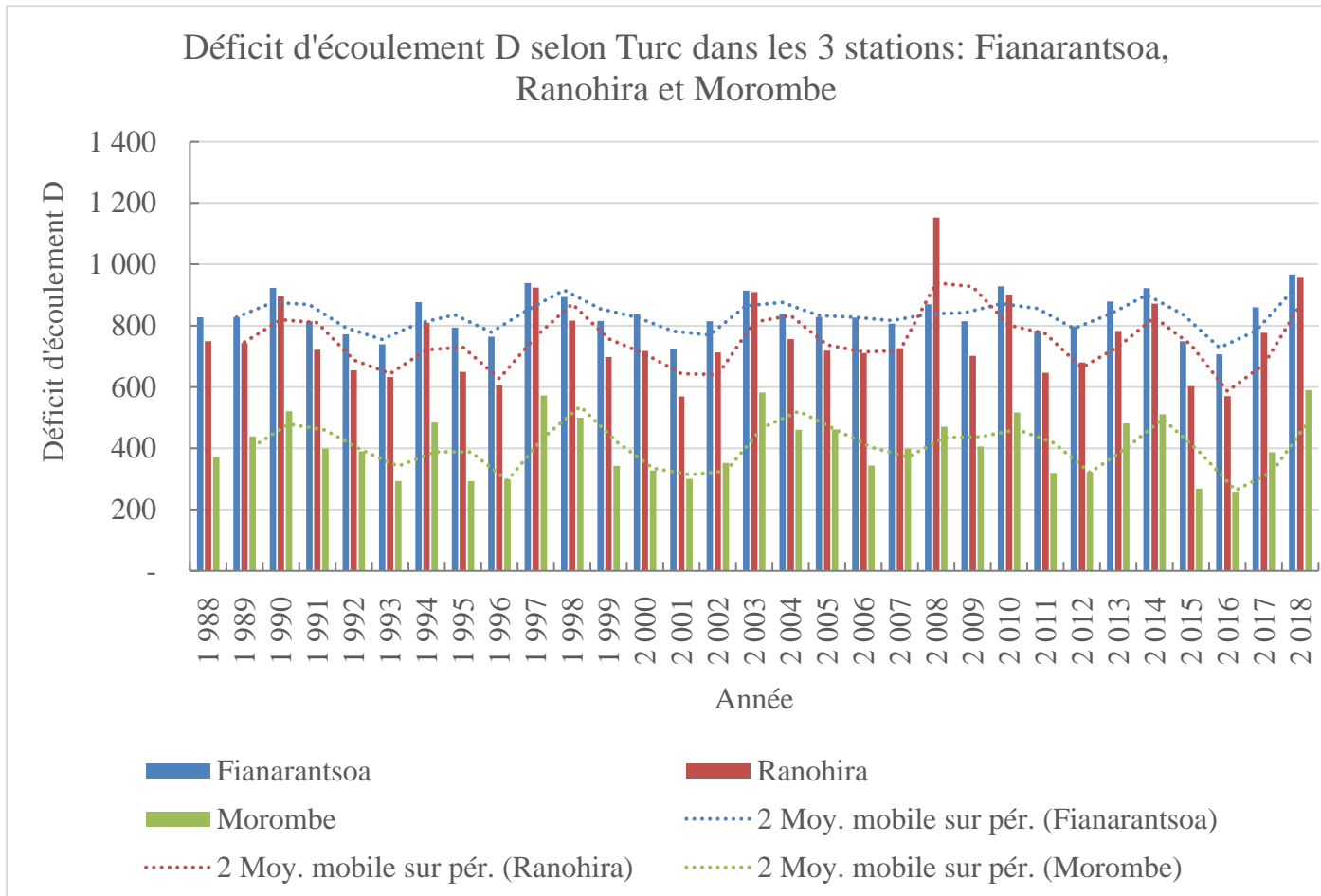


Figure 5: Déficit d'écoulement D dans les 3 stations de Fianarantsoa, de Ranohira et de Morombe

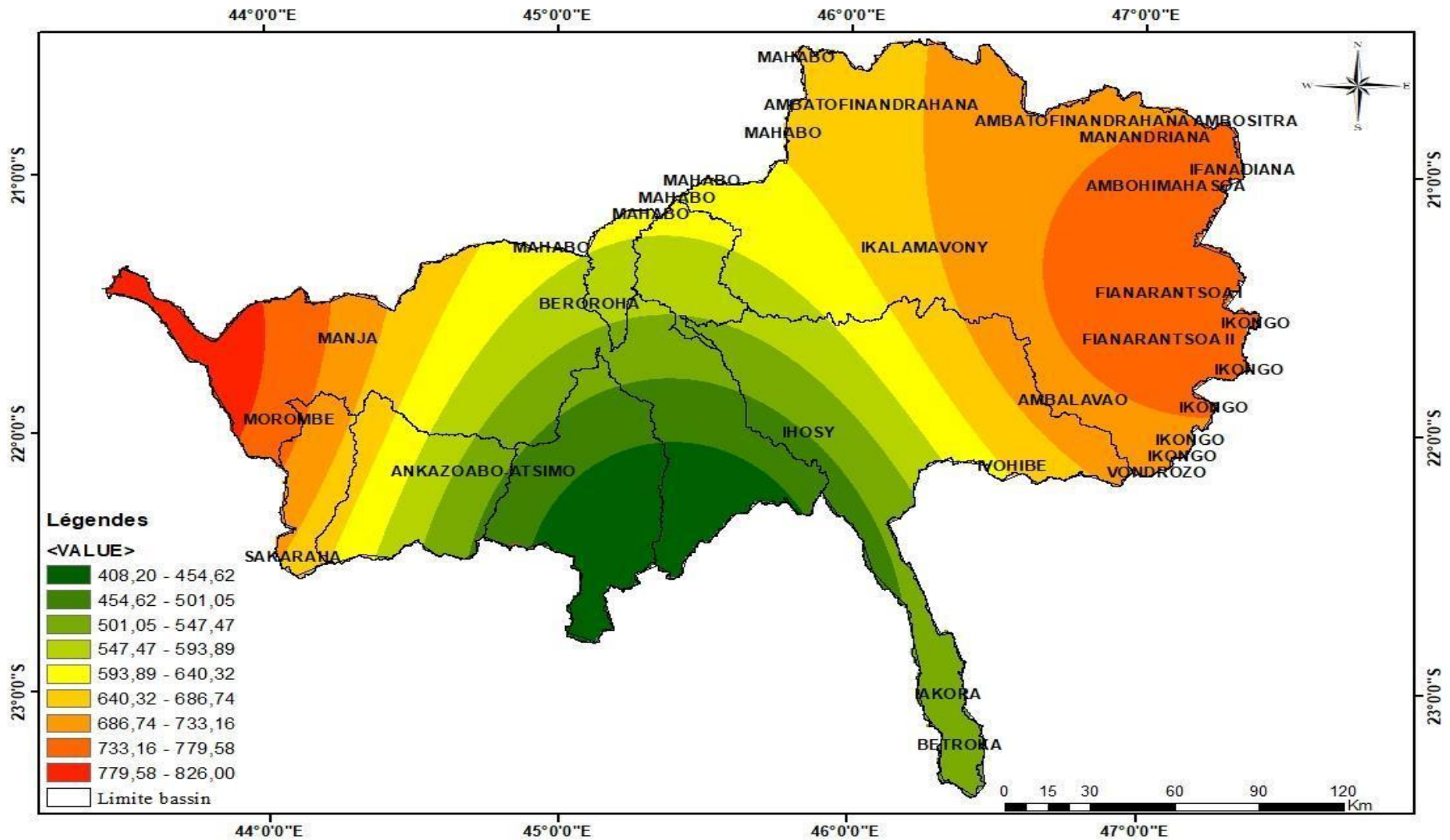


Figure 6 : Carte montrant le déficit d'écoulement le long du bassin versant de Mangoky (1988-2018)

5.3. Tendances climatiques : températures et pluviométrie

5.3.1. Courbe ombrothermique

Par l'étendue de la superficie de Mangoky, son climat est diversifié allant d'un climat typique des Hautes Terres, climat frais tout au long de l'année, au climat de la Région du Sud-Ouest, climat chaud et sub-aride.

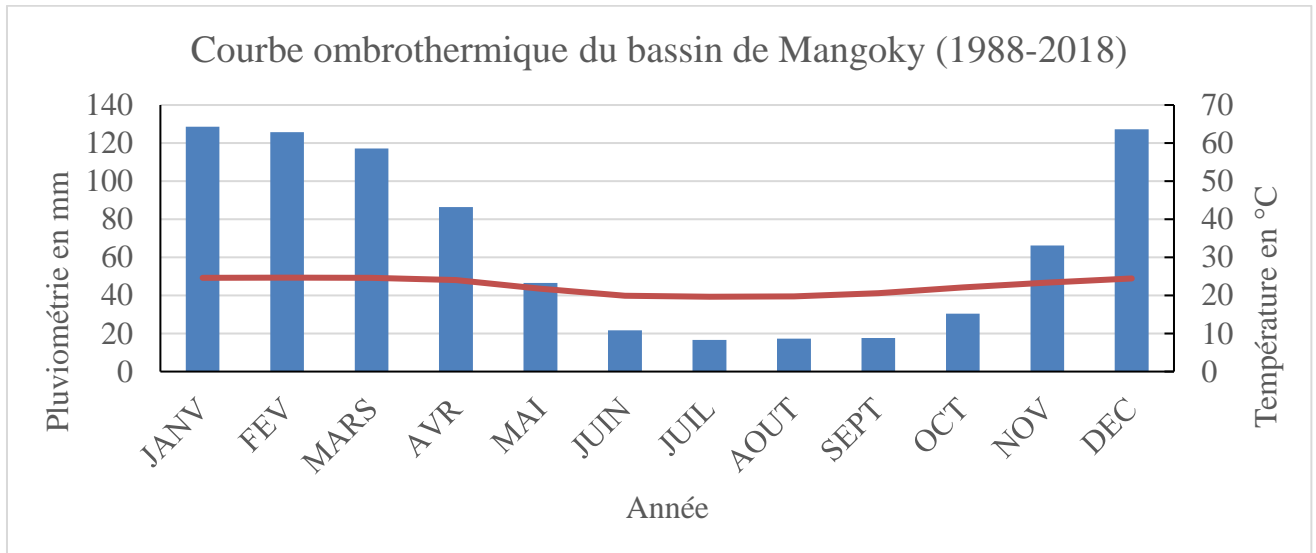


Figure 7: Courbe ombrothermique du bassin de Mangoky (1988-2018)

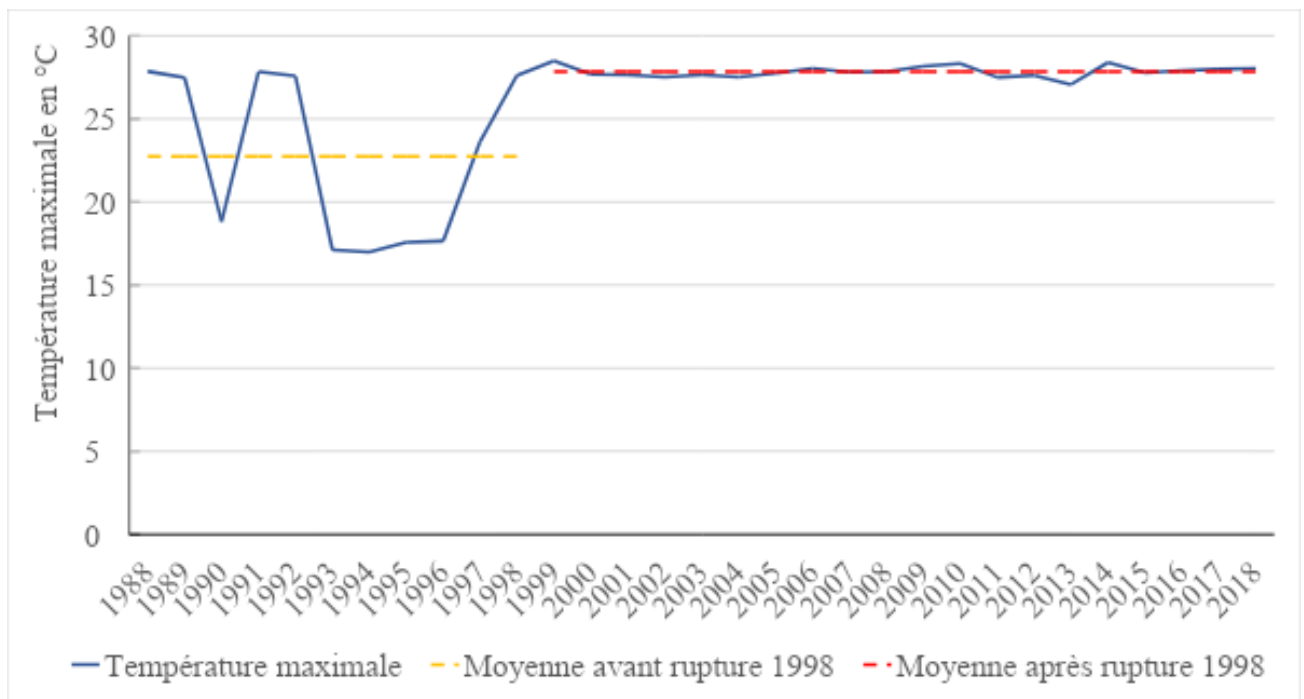


Figure 8: Tendance de la température maximale (1988-2018)

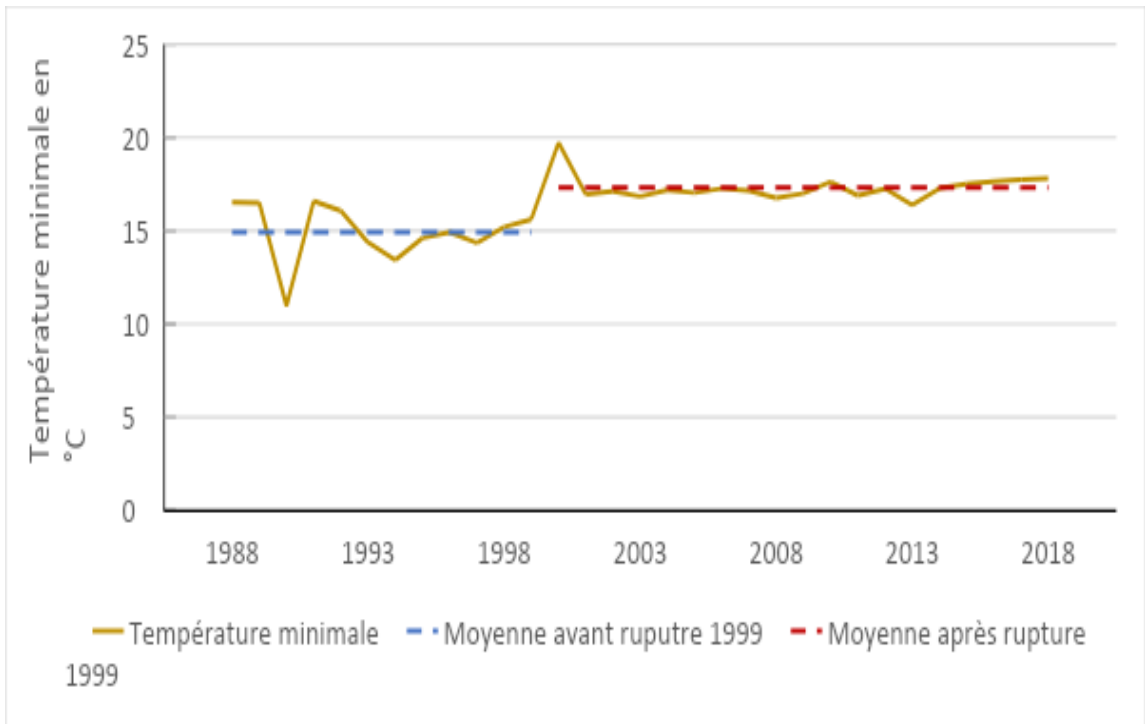


Figure 9: Tendence de la température minimale (1988-2018)

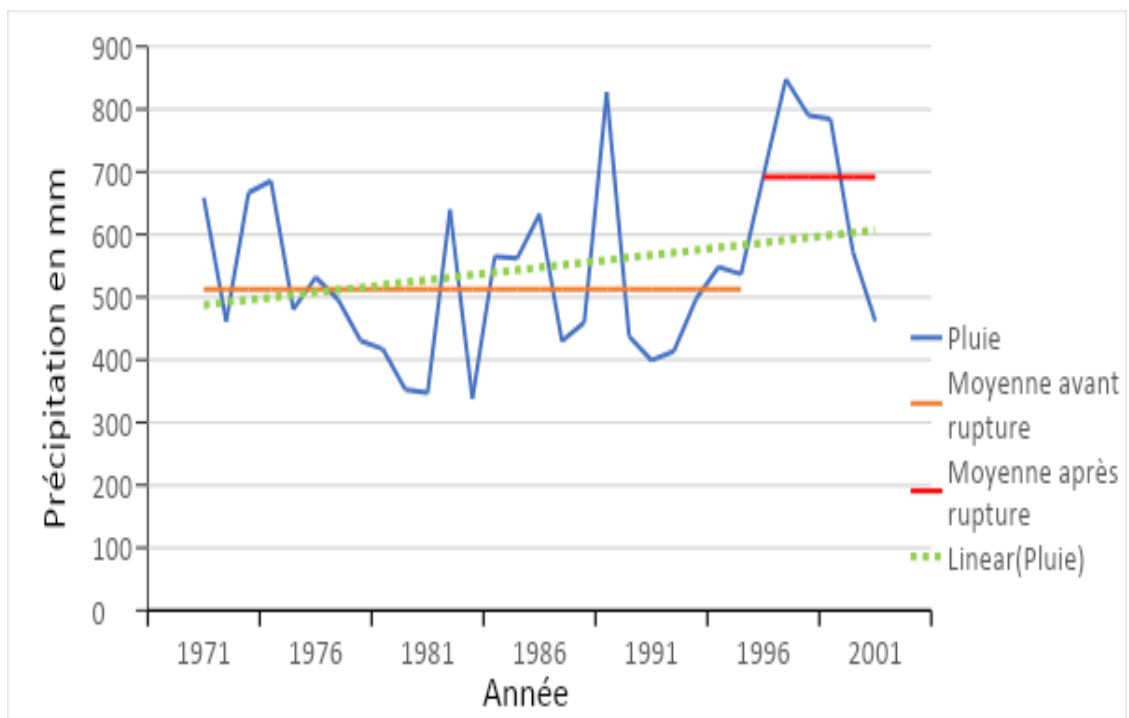


Figure 10: Tendence de la pluviométrie (1971-2001)

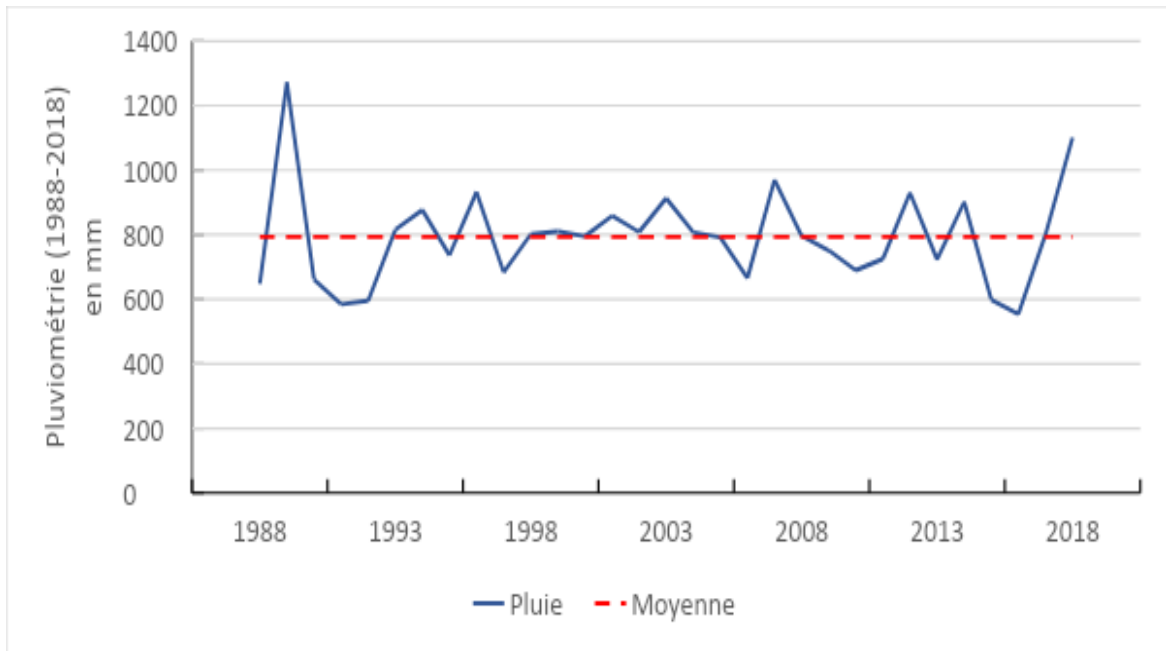


Figure 11: Évolution de la pluviométrie de 1988-2018

5.3.2. Analyse des anomalies standards : indices de Lamb

Les années humides et sèches s'alternent avec une périodicité (figure 12). Cependant, l'observation des anomalies standards amène à conclure qu'il y a deux périodes selon la série de données :

- ❖ Une période déficitaire entre 1988-1995 ;
- ❖ Une période excédentaire ou humide entre 1996-2008 ;
- ❖ Une période normale entre 2009-2018.

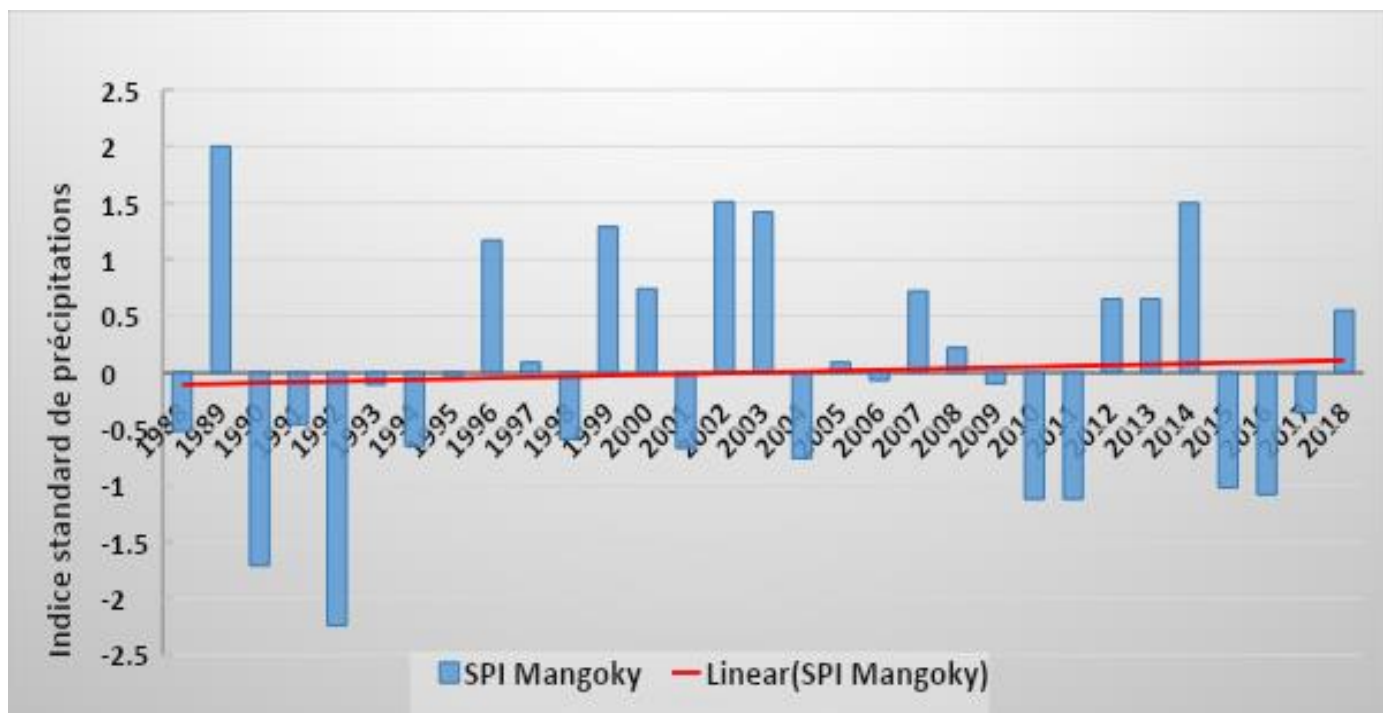


Figure 12 : Anomalies Standards de précipitations de Mangoky (1988-2018)

5.4. Evaluation d'impact au changement climatique

❖ Etude historique de la climatologie de Mangoky : 1950-2018

✓ Température

Durant les années 1951 à 1980, la variation de la température moyenne (minimale et maximale) dans tout Mangoky, dans les trois stations Fianarantsoa, Ranohira et Morombe, est presque linéaire avec un accroissement moyen de 1,5°C à 2°C par mois dans la partie centrale (Aldegheri M., 1967).

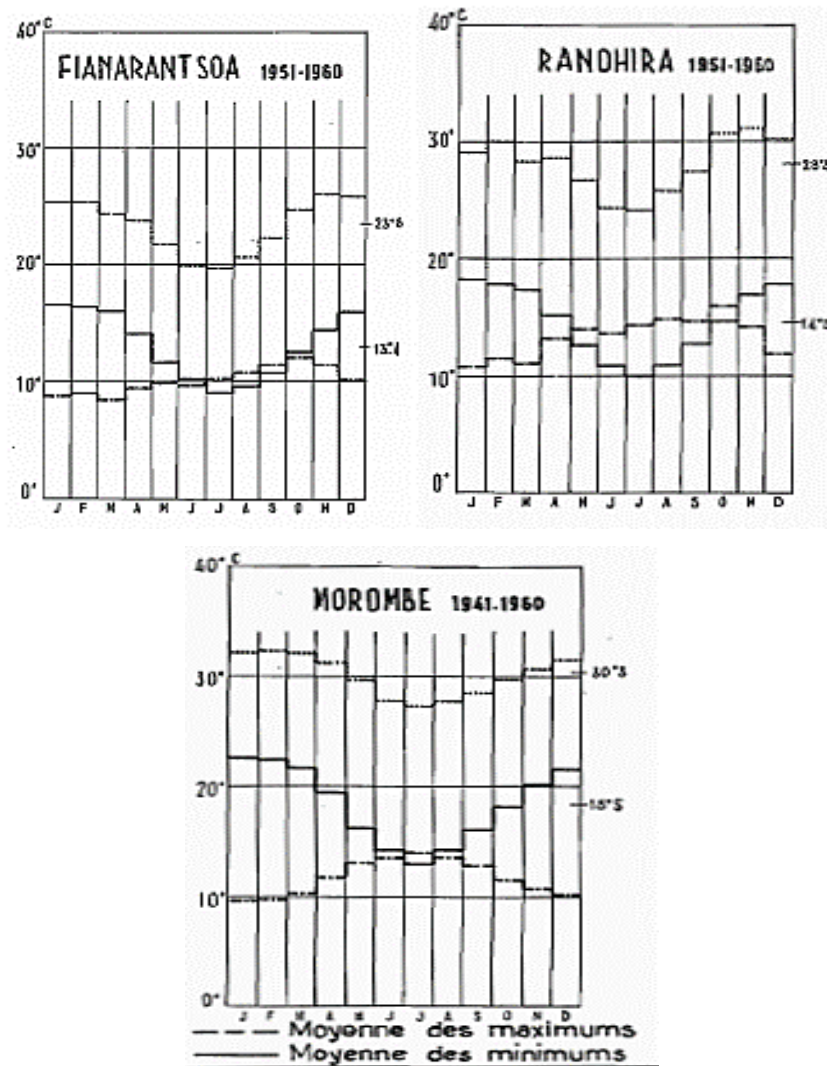


Figure 13 : Variation des températures moyennes maximale et minimale à Mangoky (1951-1960)

[Source : Monographie hydrologique du Mangoky, 1967]

✓ Pluviométrie

La pluviométrie diminue dans l'ensemble en allant de l'Est vers l'Ouest. La partie EST du bassin est la mieux arrosée du fait de son emplacement dans la région des Hautes Terres Centrales. Dans la partie orientale, la pluviométrie moyenne passe de 1 200 mm à 3 000 mm (Aldegheri M., 1967).

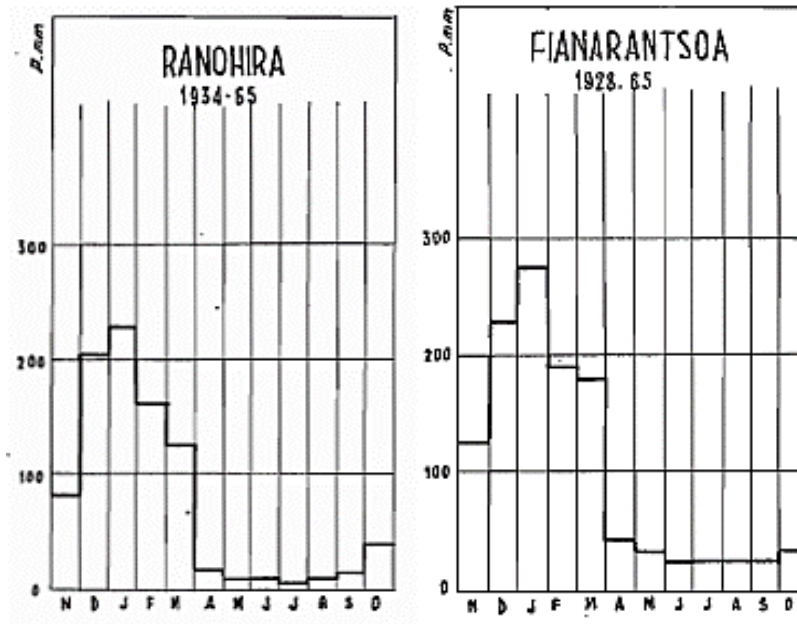


Figure 14 : Variations saisonnières de la pluviométrie de Mangoky (1928-1965 et 1934-1965)

[Source : Monographie hydrologique du Mangoky, 1967]

❖ Projection climatique selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à l'horizon de 2060

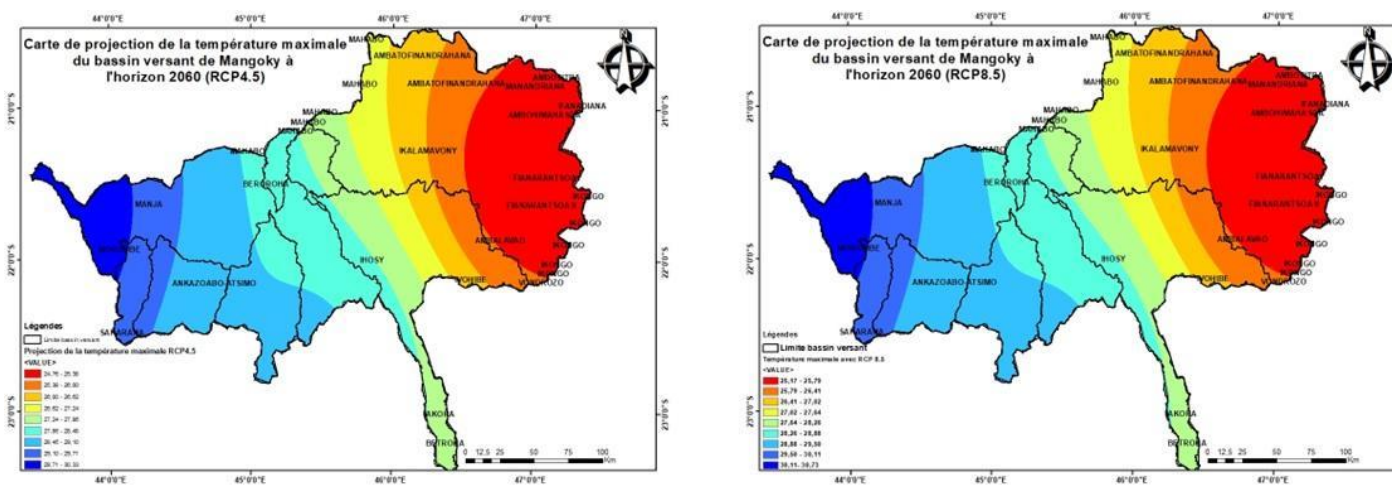


Figure 15: Carte de la projection future des températures maximale de Mangoky à l'horizon 2060 selon les scénarios RCP4.5 (à droite) et RCP8.5 (à gauche)

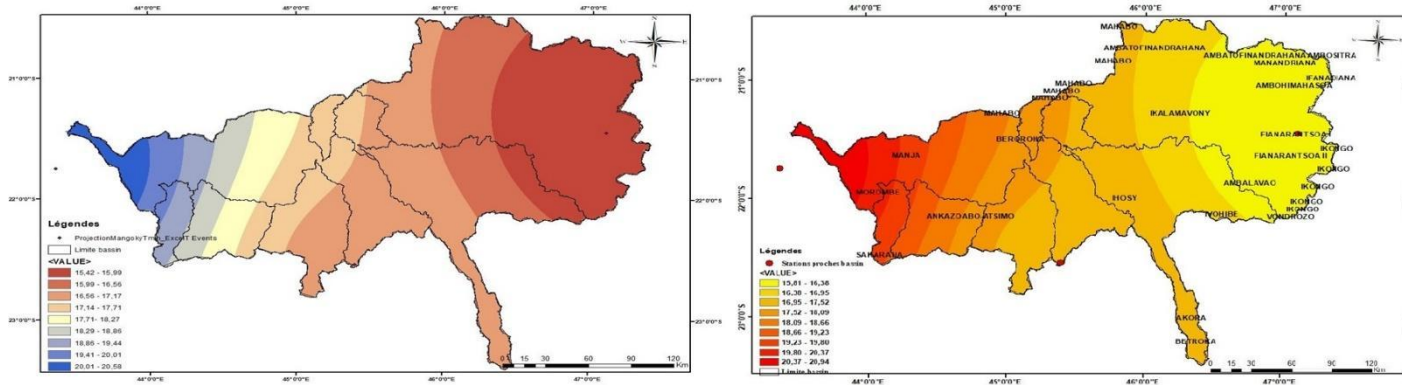


Figure 16: Carte de la projection future des températures minimale de Mangoky à l'horizon 2060 selon les scénarios RCP4.5 (à droite) et RCP8.5 (à gauche)
[Source: DGM, traité par l'auteur, 2019]

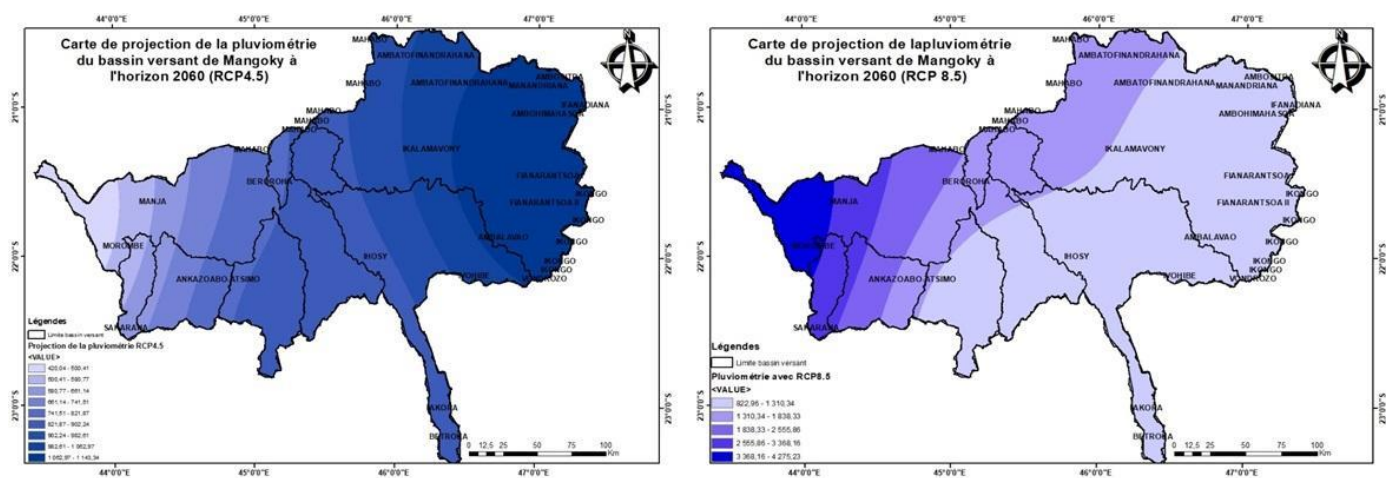


Figure 17: Carte de projection de la pluviométrie sur le bassin à l'horizon 2060 selon les scénarios RCP4.5 (à droite) et RCP8.5 (à gauche)

6. Discussion

Mangoky présente un climat variable mais en se basant sur la courbe ombrothermique (1988-2018) (Figure 7), le climat est de type tropical chaud et humide presque toute l'année. La température moyenne annuelle observée est de 24°C avec une saison humide s'étalant de Novembre à Mai contre une saison sèche de Juin à Octobre (figure 7).

Historiquement (1950-2018), la température dans le bassin versant de Mangoky est presque linéaire avec un accroissement moyen de 1,5 à 2°C par mois surtout dans la partie centrale. La température minimale la plus faible est localisée au Sakaraha avec une valeur de 8,3°C, tandis que la température maximale moyenne la plus forte est observée à Beroroha avec 36,8°C (Aldegheri M., 1967). Cette température maximale apparaît entre le mois d'Octobre et Novembre. Durant ces deux mois, l'évaporation est très importante dans la partie supérieure et inférieure du bassin et atteint une moyenne voisine de 2035 mm. Cette forte évaporation entraîne en conséquence une forte humidité de l'air qui est pratiquement proche de 100%. En revanche, la partie centrale enregistre une humidité minimale plus faible comprise entre 18% en Décembre et 23% en Août (Aldegheri M., 1967). Durant l'analyse de températures de 1988 à 2018 (figure 9), une légère hausse de températures minimales aux environs de +0,4°C est observée aux alentours du bassin.

Par rapport à la période de 1950-2018, la température dans le Sud de Madagascar où se situe le bassin versant présente une augmentation de 1°C à 2,9°C jusqu'aux environs des années 2080 selon le scénario RCP8.5 et 0,9°C à 1,7°C (Raholijao N., 2019). Cette augmentation de températures dans le Sud de Madagascar est perçue durant la projection sur le bassin versant de Mangoky (figures 15 et 16).

Selon le scénario RCP4.5, la température varie de 0,10°C à l'horizon de 2060 en moyenne. Durant la période de 1971 à 2001, la température minimale dans le bassin versant est de 15,44°C en moyenne. Or pendant la projection climatique, une augmentation d'environ 3°C de cette température minimale est observée, d'où 18°C en moyenne à l'horizon de 2060. La projection de la température minimale à l'horizon 2060 montre une augmentation en allant près de l'exutoire de Mangoky (figure 16) selon le scénario RCP8.5. De 1971 à 2001, la température maximale moyenne observée est de 26,4°C. Mais en observant la projection climatique, une légère hausse de cette température est observée, d'où une température maximale avoisinant les 27,9°C (figure 15).

Selon la courbe ombrothermique (figure 7), le bassin versant présente deux saisons bien distinctes : saison humide et saison sèche avec une pluviométrie de 128,54 mm en Janvier

(1988-2018). Historiquement, la pluviométrie diminue dans l'ensemble en allant de l'Est vers l'Ouest. Dans la partie orientale, la pluviométrie moyenne passe de 1 200 mm à 3 000 mm (Aldegheri M., 1967). L'influence du relief est fortement constatée dans la partie centrale du bassin : à Ranohira et sur le plateau d'Ihorombe, ainsi qu'à l'Ouest d'Ankazoabo, il y a deux noyaux de précipitations plus fortes (Aldegheri M., 1967). La pluviométrie moyenne interannuelle sur les différents bassins est les suivants selon Aldegheri M., 1967 :

- Matsiatra à Malakialina : 1 217 mm ;
- Mananantanana : 1 063 mm ;
- Zomandao : 1 077 mm ;
- Ihosy : 829 mm ;
- Mangoky au Banian : 948 mm.

De Mai à Septembre, les précipitations ne représentent qu'un très faible pourcentage du total annuel. Sur tout le bassin, la saison des pluies débute entre Octobre – Novembre et s'installe définitivement à toutes les stations en Novembre. Les précipitations moyennes dans le bassin versant sont de l'ordre de 993,8 mm. La plus grande hauteur mensuelle est recueillie en Janvier. Les précipitations du mois d'Avril sont très faibles de l'ordre de 2 mm. Celles recueillies durant la période sèche (Avril à Octobre) vont en décroissant de l'Est vers l'Ouest. Le mois de Juillet est le mois le plus sec sur la partie moyenne et inférieure du bassin versant (Monographie hydrologique du Mangoky, 1967). La baisse de débits s'effectue à partir de la fin du mois de Janvier et peut aller jusqu'en Février (Aldegheri M., 1967).

De 1971 à 1995, la précipitation moyenne annuelle recueillit au niveau du bassin versant de Mangoky est de 512,65 mm environ. Pendant la période 1995 à 2001, elle est de 691,67 mm avec un écart de 179,05 mm en plus. La pluviométrie présente donc une tendance à la hausse à partir de 1995. La précipitation tend à la baisse en allant vers l'Ouest aux alentours de 2060 avec une variation de 420 à 1143,34 mm selon le scénario RCP4.5 (figure 17 à droite).

Ainsi, la température au niveau du bassin versant tend à augmenter alors que la précipitation est très variable selon l'endroit à l'horizon de 2060 selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cette variation de précipitation risque de changer le comportement du bassin au fil du temps avec l'augmentation perpétuelle de la température comme l'évaporation qui est fonction du déficit d'écoulement.

Le déficit d'écoulement est influencé par les paramètres morphologiques du bassin versant ainsi que les paramètres météorologiques (températures et précipitations). Le déficit est d'une part fonction des températures moyennes plus faibles et d'autre part à une couverture

végétale beaucoup moins dense (Rodier J. et Roche M., 1955). En se référant au déficit d'écoulement dans le Bassin Versant de Mangoky faite par Rodier J. et Roche M., (1955) avec une valeur de 800mm, 1955, en moyenne, il se trouve que le déficit d'écoulement du Bassin versant de Mangoky a diminué entre 1988-2018 avec une valeur de 665,30mm en 30 ans. Entre 1955 à 2018, le déficit d'écoulement a connu une diminution avec un écart de -134,7 mm. La diminution s'explique par le fait que la tendance à la baisse de la précipitation annuelle durant cette période dans la zone étudiée. En effet, l'évaporation diminue aussi quand le déficit d'écoulement diminue.

En plus du déficit d'écoulement, les anomalies standards dépendent aussi de la pluviométrie. Durant cette analyse, les années humides et sèches s'alternent avec une périodicité (fig.12) de 3 ans. Cependant, l'observation des anomalies standards amène à dire qu'il y a deux périodes selon la série de données :

- Une période déficitaire entre 1988-1995 ;
- Une période excédentaire ou humide entre 1996-2008 ;
- Une période normale entre 2009-2018.

Une tendance à la hausse est perçue dans cette figure 12 montrant que la précipitation va augmenter dans le bassin versant. Les indices standards de précipitations tendent vers la baisse ainsi l'écoulement rencontre une diminution durant 1988-2018.

La variation de la température et de la précipitation influent sur les ressources en eau surtout sur la gestion de l'eau au niveau agricole. L'augmentation de la température ainsi que la diminution de la précipitation dans la partie Ouest du bassin vers l'exutoire présentent des conséquences significatives pour l'agriculture. La gestion des ressources en eau dans la partie Ouest du bassin versant de Mangoky risque d'être difficile à cause de l'augmentation de la température et de la diminution de la précipitation. Le climat est plus chaud et plus sec. Par contre, pour la partie Est du bassin, la température augmente mais la précipitation augmente de plus en plus ce qui peut favoriser une inondation et une mauvaise gestion de l'eau. La situation risque d'entraîner des problèmes d'irrigation au niveau de l'agriculture.

Dans tous les cas, les scénarios présents dans le bassin versant démontrent un épuisement des ressources en eau pouvant entraîner des problèmes du niveau économique notamment sur le secteur agricole. Des mesures d'atténuation ou d'adaptation sont à prendre en compte afin de limiter les dégâts causés par ces changements par rapport aux ressources en eau en même temps que dans l'agriculture.

7. Conclusion

Les ressources en eau à Madagascar rencontrent un grand problème depuis de nombreuses années et aggravées par les effets du changement climatique. Différentes analyses ont été faites auparavant afin d'essayer de résoudre ce problème. La présente étude contribue à l'analyse de la sensibilité du bassin versant de Mangoky afin d'améliorer la gestion des ressources en eau du pays. L'étude hydrologique combinée avec la pluviométrie a permis d'étudier le déficit d'écoulement en fonction de l'évaporation. L'approche hydrométéorologique combinée avec la projection climatique par interpolation en utilisant le logiciel SIG, les analyses des anomalies standards de précipitations et la courbe ombrothermique ont mis en exergue l'augmentation de la température et la variation de la précipitation par endroit au niveau du bassin versant à l'horizon 2060, d'où la vulnérabilité du cycle hydrologique.

L'analyse des températures présente une légère augmentation à l'horizon de 2060 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. De ce fait, l'évaporation est en hausse vu qu'elle est fonction de la température et de la forme du bassin. Pendant la période de 1971-2001, l'analyse des anomalies standards de la précipitation montre une tendance à la hausse.

L'augmentation de la température ainsi que la variation de la précipitation seront les conséquences prévisibles des impacts du changement climatique. Ces conséquences influent sur les ressources en eau en causant l'augmentation de l'évaporation, la variation du déficit d'écoulement et donc la modification du cycle hydrologique..

De ce fait, la gestion en eau devient très difficile surtout pour les agriculteurs devenus les plus vulnérables à ce fléau. Afin de s'adapter à ce dérèglement climatique, des mesures d'adaptation sont à entreprendre dans la gestion des ressources en eau proprement dit ainsi que dans l'agriculture.

8. Remerciements

Arrivée au terme de cet article, nous remercions tous ceux qui ont contribué à sa réalisation, plus particulièrement Monsieur RAMANAKOTO Toky Nandrasana, Maître de Conférences, Enseignant-Chercheur et Responsable de la Mention Météorologie à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et tous les personnels se trouvant au sein du Ministère de l'Eau, de l'Energie et des Hydrocarbures pour leur soutien et la Direction Générale de la Météorologie d'Antananarivo.

9. Références

ALDEGHERI M., Monographie hydrologique du Mangoky, 1967.

BEAVOGUI M. Impacts du changement climatique sur la culture du riz pluvial en Haute Guinée et proposition de stratégies d'adaptation.

BEAVOGUI M., ALOUINI A. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie IRESA, 30, rue Alain-Savary, 1002 Tunis, Tunisie.

GIEC ou IPCC « Intergovernmental Panel on Climate Change pour son cinquième rapport, AR5, Cinquième rapport d'évaluation du GIEC, 2014.

LABORBE J.P., Elément d'Hydrologie de Surface, Edition 2009, 1645, Route des Lucioles – 06410 BIOT, France.

Ministère Délégué chargé de l'Eau. Eau et climat, Royaume du Maroc et al. ; 2016. ; Livre bleu. Marrakech, COP22.

Pierre Chaperon, Joël D. et Luc Ferry. Fleuves et rivières de Madagascar, Edition cédéron 2005, Paris 1993, p.58-62.

RATSIFARITANA M. Perception paysanne sur les exploitations des terrains en pente face au changement climatique : Cas du District d'Ikongo, 30 Août 2016.

RODIER J. et ROCHE M. Annual flow deficit in tropical countries, 1995

RABEFITIA Z. et al. Le changement climatique à Madagascar, Mars 2008.

RAHOLIJAO N. et al. Les tendances climatiques et les futurs changements climatiques à Madagascar, 2019.

ANNEXE1 : Tableaux

Tableau 3 : La classification du relief selon l'indice de pente donnée par l'O.R.S.T.M.

Classe	Type de relief	Indice de pente globale
1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
2	Faible	$0.002 < I_g < 0.005$
3	Assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
4	Modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
5	Assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
6	Fort	$0.05 < I_g < 0.5$
7	Très fort	$0.5 < I_g$

[Source : J.P LABORBE, *Élément d'Hydrologie de Surface*, 2009]

Tableau 4: Classifications de la dénivelée spécifique donnée par l'O.R.S.T.M.

$D_s < 10$ m	Relief très faible
$10 \text{ m} < D_s < 25$ m	Relief faible
$25 \text{ m} < D_s < 50$ m	Relief assez faible
$50 \text{ m} < D_s < 100$ m	Relief modéré
$100 \text{ m} < D_s < 250$ m	Relief assez fort
$250 \text{ m} < D_s < 500$ m	Relief fort
$D_s > 500$ m	Relief très fort

[Source : J.P LABORBE, *Élément d'Hydrologie de Surface*, 2009]

Tableau 5: Classification du SPI

Classe de SPI (Xi)	Interprétation
$SPI > 2$	Extrêmement humide
$1,5 < SPI < 1,9$	Très humide
$1 < SPI < 1,49$	Modérément humide
$-0,99 < SPI < 0,99$	Modéré
$-1,49 < SPI < -1$	Modérément sèche
$-1,9 < SPI < -1,5$	Très sèche
$SPI < -2$	Extrêmement sèche

[Source : McKee et al., 1993]

Annexe 2 : Figures



Figure 18 : Tendence annuelle de la pluviométrie (1984-2018)
[Source : DGM/Maproom, Octobre 2019]