

Approche Intégrée Combinant Cartographie, Interpolation Spatiale Et Modélisation Hydroclimatique Pour L'analyse Du Système Hydroélectrique De Mantasoa–Mandraka

Haja Nirina RAVELOALISON¹, Hanitrinivony ANDRIANOMENTSOA BEZANAHARY¹, Volana RAOELJAONA MANANJO¹, Hantaniaina RAHARINIERANA², Laza ANDRIAMPANARIVO³

¹Ecole Doctorale : Ingénierie et Géosciences (ED-INGE), Equipe d'Accueil Doctorale Hydraulique et Environnement, [École Supérieure Polytechnique | Université d'Antananarivo] Madagascar.

²Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED-STII), Equipe d'Accueil Doctorale Valorisation des Ressources Propres [École Supérieure Polytechnique | Université d'Antananarivo] Madagascar.

³Ecole Doctorale Physique et Applications, Equipe d'Accueil Doctorale Physique Nucléaire Appliquée et Environnement [Sciences et Technologies | Université d'Antananarivo | Madagascar.

Auteur Correspondant : Haja Nirina RAVELOALISON, raveloalisonh@gmail.com



Résumé : Cette étude propose une analyse multidimensionnelle des déterminants de la production. Cette étude propose une approche intégrée combinant cartographie, interpolation spatiale et modélisation hydroclimatique afin d'analyser le fonctionnement du système hydroélectrique de Mantasoa–Mandraka. L'analyse spatiale met en évidence une organisation structurée du bassin versant, caractérisée par un réseau hydrographique dense et des formations géologiques dominées par des gneiss et migmatites. L'interpolation altimétrique révèle un gradient significatif d'environ 500 m, avec des altitudes variant de 1395 m à plus de 1900 m, favorisant la concentration des écoulements vers les zones basses. L'analyse hydroclimatique montre une forte variabilité interannuelle des précipitations, allant de 693 mm en 2019 à 1625 mm en 2018, influençant directement les débits disponibles. Le débit total varie entre 1,50 m³/s en 2017 et 6,91 m³/s en 2011, tandis que les écarts entre débit et consommation oscillent entre -1,36 m³/s et +2,52 m³/s. Les résultats révèlent une alternance de périodes déficitaires et excédentaires, traduisant la sensibilité du système aux fluctuations climatiques. Cette approche permet ainsi de mieux comprendre les interactions entre climat, hydrologie et production hydroélectrique.

Mots clés : variabilité hydroclimatique ; bassin versant ; modélisation spatiale ; hydroélectricité ; Mantasoa–Mandraka

Abstract: This study proposes an integrated approach combining mapping, spatial interpolation, and hydroclimatic modelling to analyze the functioning of the Mantasoa–Mandraka hydroelectric system. The spatial analysis highlights a well-structured watershed organization, characterized by a dense hydrographic network and geological formations predominantly composed of gneiss and migmatites. Altimetric interpolation reveals a significant gradient of approximately 500 m, with elevations ranging from 1395 m to over 1900 m, promoting the concentration of flows toward lowland areas. The hydroclimatic analysis indicates strong interannual variability in precipitation, ranging from 693 mm in 2019 to 1625 mm in 2018, directly influencing available discharge. Total discharge varies between 1.50 m³/s in 2017 and 6.91 m³/s in 2011, while the differences between discharge and consumption fluctuate between -1.36 m³/s and +2.52 m³/s. The results reveal an alternation between deficit and surplus periods, reflecting the system's sensitivity to climatic fluctuations. This integrated approach therefore provides a better understanding of the interactions between climate, hydrology, and hydroelectric production.

Keywords : hydroclimatic variability; watershed; spatial modeling; hydroelectricity; Mantasoa–Mandraka.

INTRODUCTION

Les ressources en eau constituent un facteur déterminant dans le développement énergétique, en particulier dans les systèmes hydroélectriques fortement dépendants des conditions climatiques. Dans les régions tropicales comme Madagascar, la variabilité climatique se traduit par des fluctuations importantes des précipitations et des débits, influençant directement la disponibilité en eau et la production énergétique [1]. Les changements observés au cours des dernières décennies, notamment en termes d'irrégularité des pluies et d'intensification des épisodes extrêmes, rendent les systèmes hydrologiques plus instables et difficilement prévisibles [2]. Le bassin versant de Mantsoa, qui alimente la centrale hydroélectrique de Mandraka, représente un exemple typique de système sensible à ces variations. Ce bassin, caractérisé par une superficie d'environ 87,55 km² et un relief marqué, joue un rôle clé dans la régulation des écoulements et dans l'alimentation en eau du complexe hydroélectrique. Toutefois, les données récentes montrent une variabilité significative des apports hydriques, avec des précipitations annuelles variant entre 693 mm et 1625 mm, et des débits oscillant entre 1,50 m³/s et 6,91 m³/s, entraînant des situations alternées de déficit et d'excédent hydraulique. Dans ce contexte, l'intégration des outils de cartographie, d'analyse spatiale et de modélisation devient essentielle pour mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant et anticiper les impacts de la variabilité climatique [3]. Les techniques d'interpolation spatiale permettent notamment de reconstituer les surfaces topographiques et d'analyser les gradients altimétriques influençant les écoulements [4], tandis que les approches de modélisation hydroclimatique offrent une vision globale des interactions entre les variables climatiques et hydrologiques [5]. Par ailleurs, l'analyse combinée des données hydrologiques et climatiques à travers des méthodes graphiques avancées, telles que les heatmaps et les surfaces 3D, permet de mettre en évidence les tendances et les anomalies du système [6]. Ces outils facilitent l'identification des périodes critiques et contribuent à une meilleure gestion des ressources en eau dans un contexte de variabilité accrue. Ainsi, cette étude propose une approche intégrée combinant cartographie, interpolation spatiale et modélisation hydroclimatique pour analyser le fonctionnement du système hydroélectrique de Mantsoa–Mandraka. L'objectif est de caractériser la dynamique du bassin versant, d'évaluer la variabilité des ressources en eau et d'identifier les impacts potentiels sur la production hydroélectrique, afin de contribuer à une gestion plus durable et résiliente du système [7].

MATÉRIELS ET MÉTHODES

1- Matériels utilisés et Méthodes adoptées

L'approche adoptée dans cette étude repose sur une combinaison de travaux de terrain, d'analyses géospatiales et de modélisations numériques afin de caractériser la dynamique hydroclimatique du bassin versant de Mantsoa et son influence sur le système hydroélectrique de Mandraka. Les données de terrain ont été acquises à l'aide d'un système GNSS différentiel de type Leica GPS 1200, reconnu pour sa précision centimétrique dans les levés topographiques. Le levé RTK (Real Time Kinematic) a été utilisé, nécessitant au minimum deux récepteurs GNSS, dont un récepteur de base fixe et un récepteur mobile. Cette méthode permet d'obtenir des coordonnées tridimensionnelles (X, Y, Z) en temps réel avec une grande précision, essentielle pour la stéréo-préparation et la modélisation altimétrique [8]. Dans les zones difficiles d'accès, notamment au niveau du lac Mantsoa, les relevés ont été complétés à l'aide d'un petit bateau de pêche en bois, facilitant l'acquisition des points situés en milieu aquatique. Les données collectées ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG) pour leur traitement et leur analyse spatiale. Les logiciels et outils numériques utilisés reposent principalement sur l'environnement Python, avec plusieurs bibliothèques spécialisées. La bibliothèque GeoPandas a permis la manipulation des données vectorielles, tandis que Rasterio a été utilisé pour le traitement des données raster, notamment les modèles numériques de terrain. Matplotlib a servi à la visualisation graphique, et NumPy a permis les calculs numériques et la gestion des matrices de données. Par ailleurs, des techniques d'interpolation spatiale ont été appliquées à l'aide de méthodes telles que les fonctions de base radiale (RBF), afin de reconstituer les surfaces altimétriques et hydrologiques à partir des points mesurés [9]. La modélisation des surfaces 2D et 3D a été réalisée en interpolant les données d'altitude et les variables hydroclimatiques, permettant ainsi de visualiser les gradients topographiques et les variations spatio-temporelles. Les courbes de niveau ont été générées à partir des surfaces interpolées afin d'analyser la structure du relief. Les analyses hydroclimatiques ont été conduites en exploitant des séries de données annuelles et saisonnières, incluant les précipitations, les débits entrants et sortants, ainsi que les volumes stockés. Les représentations graphiques ont été produites à l'aide de techniques avancées de visualisation, notamment les heatmaps, les diagrammes à bulles et les surfaces tridimensionnelles. Les heatmaps ont

permis de mettre en évidence les variations normalisées des variables hydroclimatiques, tandis que les diagrammes à bulles ont servi à analyser la relation entre la pluviométrie, les débits et les déficits hydrauliques. Les surfaces 3D ont offert une représentation synthétique des interactions entre les variables dans le temps et dans l'espace [10]. Enfin, l'analyse des résultats repose sur une approche intégrée combinant les données de terrain, les traitements SIG et les modèles graphiques, afin d'identifier les tendances, les anomalies et les périodes critiques du système hydroélectrique. Cette méthodologie permet d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur la disponibilité des ressources en eau et sur la performance énergétique du système étudié [11].

2- Localisation des points de mesure et Cartographie détaillée de la zone d'étude située dans la région de Mantsoa

La figure ci-dessous présente une représentation cartographique détaillée de la zone d'étude située dans la Région de Mantsoa, mettant en évidence l'organisation spatiale des principaux éléments physiques et anthropiques du milieu. Elle combine une vue d'ensemble de l'emprise étudiée avec un zoom spécifique sur la localisation des points de contrôle au sol (GCP), permettant ainsi une lecture multi-échelle du territoire analysé. À l'échelle globale, la carte montre la structuration du paysage à travers la distribution du réseau hydrographique, des axes routiers et des formations géologiques. Le réseau hydrographique apparaît relativement dense et hiérarchisé, traduisant une organisation du drainage influencée par la topographie locale et les caractéristiques lithologiques. Les cours d'eau semblent converger vers des zones de collecte, suggérant un fonctionnement hydrologique typique d'un bassin versant structuré. Par ailleurs, la présence du lac constitue un élément majeur du système hydrique, jouant un rôle central dans la régulation des écoulements et dans l'alimentation du réseau hydroélectrique. La composante géologique met en évidence la prédominance de formations anciennes, notamment les gneiss, migmatites et granites, caractéristiques du socle cristallin des hautes terres centrales de Madagascar. Ces formations influencent directement les propriétés hydrodynamiques du milieu, notamment en termes d'infiltration, de ruissellement et de stockage des eaux. La répartition de ces unités lithologiques, associée à la topographie, contribue à expliquer la configuration du réseau hydrographique et les conditions d'écoulement observées dans la zone. Le zoom cartographique permet quant à lui de visualiser la répartition des points GCP, utilisés comme références pour le calage et la validation des données spatiales. Ces points sont répartis de manière relativement homogène dans la zone d'étude, assurant une couverture spatiale suffisante pour garantir la précision des analyses géospatiales. Leur positionnement à proximité des éléments hydrographiques et des zones d'intérêt renforce leur pertinence dans l'étude des interactions entre le relief, les écoulements et les infrastructures hydroélectriques.

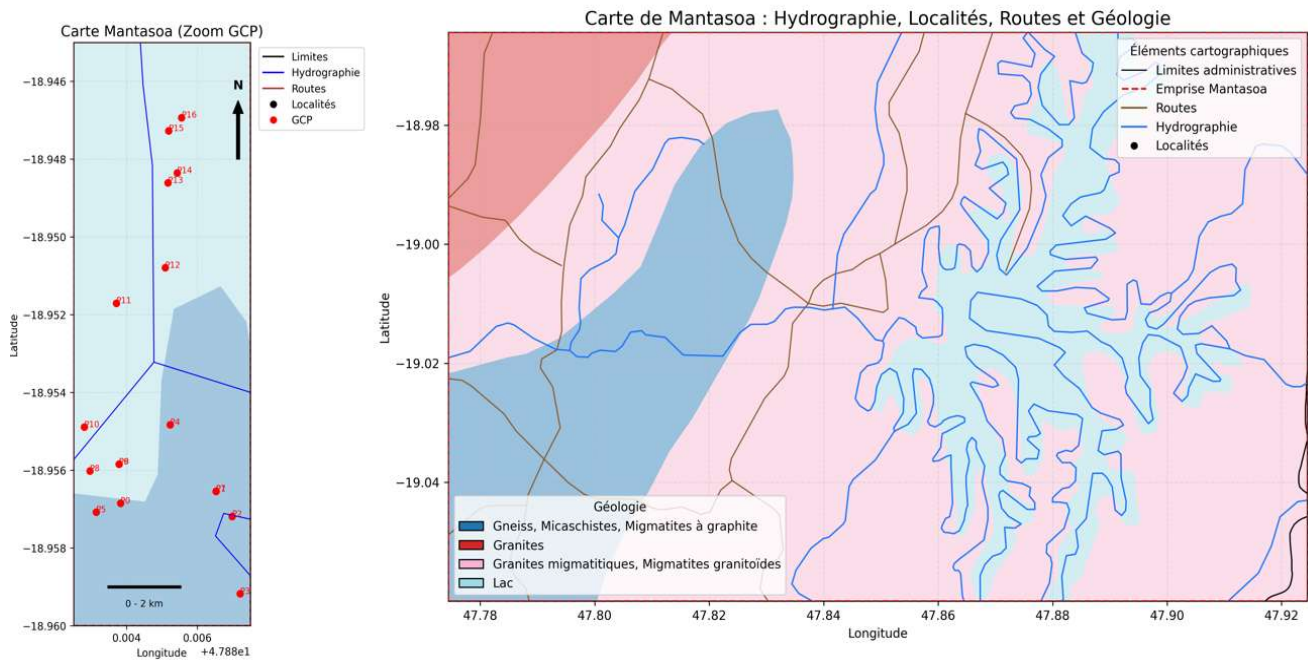


Figure n° 1: Localisation des points de mesure et Cartographie détaillée de la zone d'étude située dans la Région de Mantsoa

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1- Courbes de niveau et modèle 3D de la surface interpolée de l'altitude dans la zone d'étude de Mantsoa

La figure ci-dessous présente la modélisation spatiale de la surface topographique de la zone d'étude à partir des points d'altitude mesurés sur le terrain. Elle est composée d'une représentation bidimensionnelle sous forme de courbes de niveau interpolées, associée à une visualisation tridimensionnelle permettant d'appréhender la morphologie du relief. Cette double approche facilite la compréhension de la distribution altimétrique et de l'organisation spatiale du terrain dans le secteur étudié.

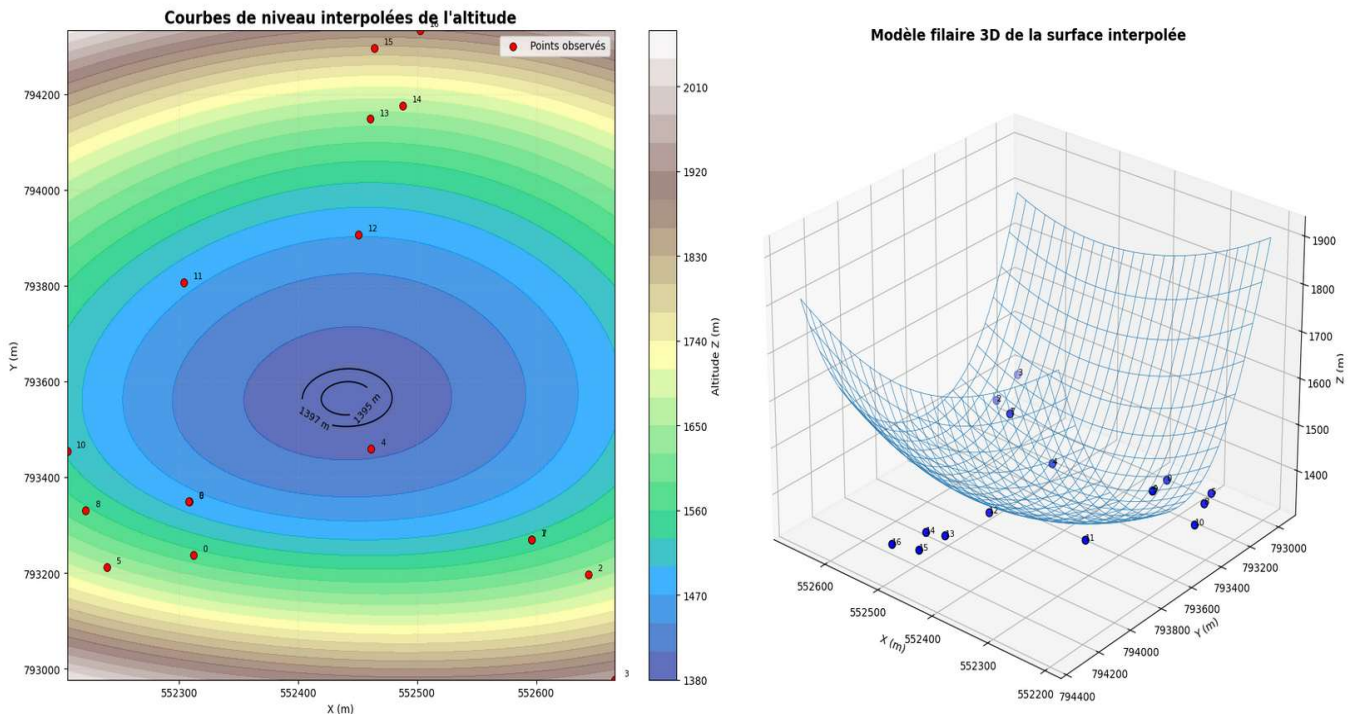


Figure n° 2 : Courbes de niveau et modèle 3D de la surface interpolée de l'altitude dans la zone d'étude de Mantasoa

Source : Auteur

Interprétation

L'analyse des courbes de niveau montre une organisation concentrique des isohypses autour d'une zone centrale caractérisée par des altitudes relativement faibles, avoisinant 1395 à 1397 mètres. Cette configuration traduit l'existence d'une dépression topographique ou d'un fond de vallée au centre de la zone, vers lequel convergent progressivement les pentes environnantes. En s'éloignant de cette zone centrale, l'altitude augmente de manière continue pour atteindre des valeurs supérieures à 1900 mètres en périphérie, ce qui met en évidence un gradient altimétrique significatif de l'ordre de 500 mètres entre les zones les plus basses et les plus élevées. La représentation tridimensionnelle confirme cette organisation morphologique en illustrant une surface globalement concave, assimilable à une cuvette topographique. Les points observés, utilisés pour l'interpolation, s'inscrivent de manière cohérente dans cette structure et permettent de valider la tendance générale du modèle. La forme de la surface suggère une concentration potentielle des écoulements vers la zone centrale, ce qui est en accord avec les principes hydrologiques selon lesquels l'eau suit les lignes de plus grande pente. Du point de vue hydrologique, cette configuration du relief joue un rôle déterminant dans le fonctionnement du bassin versant. La présence d'un point bas central favorise l'accumulation des eaux de ruissellement, ce qui peut correspondre à une zone d'exutoire ou de stockage temporaire. Les pentes relativement régulières observées autour de cette zone indiquent une organisation structurée du drainage, susceptible d'influencer les débits et les temps de concentration des écoulements. Enfin, cette modélisation altimétrique constitue un support essentiel pour les analyses ultérieures relatives à la dynamique hydrologique et aux impacts de la variabilité climatique. Elle permet notamment d'identifier les zones sensibles aux accumulations d'eau, aux phénomènes d'érosion ou aux variations de débit, éléments fondamentaux dans l'étude du fonctionnement du système hydroélectrique de Mantasoa à Mandraka.

2- Heatmap normalisée des variables hydroclimatiques du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

La figure ci-dessous présente une représentation synthétique des principales variables hydroclimatiques caractérisant le fonctionnement du système hydrologique et hydroélectrique de Mantasoa–Mandraka sur la période 2010–2020. Les valeurs ont été normalisées afin de permettre une comparaison directe entre des paramètres de nature différente, notamment les précipitations, les débits entrants et sortants, ainsi que la consommation de la centrale. Cette approche facilite l'identification des tendances interannuelles et des relations entre les différentes composantes du système.

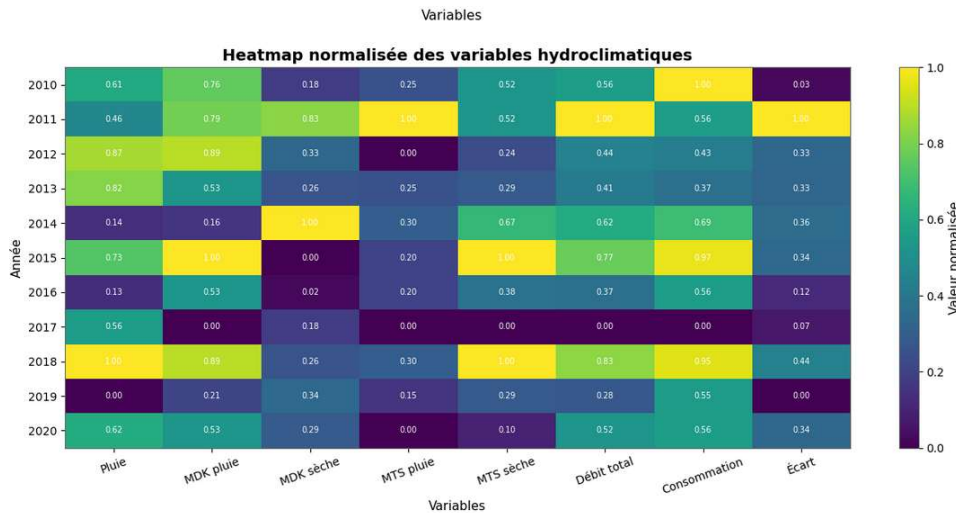


Figure n° 3 : Heatmap normalisée des variables hydroclimatiques du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

Source : Auteur

Interprétation

L'analyse de la variabilité des précipitations montre des contrastes marqués entre les années. Les valeurs les plus élevées sont observées en 2018 avec une valeur normalisée de 1,00, suivie de 2012 et 2013 avec respectivement 0,87 et 0,82, traduisant des années relativement humides. À l'inverse, l'année 2019 présente une valeur minimale de 0,00, indiquant un déficit pluviométrique significatif. Cette variabilité des apports atmosphériques constitue un facteur déterminant dans le comportement hydrologique du bassin versant. Les débits liés à Mandraka (MDK) et à Mantasoa (MTS) présentent également des fluctuations importantes en fonction des saisons et des années. Par exemple, le débit MDK en saison des pluies atteint une valeur élevée de 0,89 en 2012 et 2018, tandis qu'il chute à 0,00 en 2017, illustrant une année particulièrement déficitaire. De même, les débits MTS en saison des pluies montrent un maximum en 2011 avec une valeur normalisée de 1,00, alors qu'ils sont nuls en 2012 et 2017. Ces variations traduisent une forte dépendance des écoulements aux conditions climatiques annuelles et saisonnières. Le débit total du système reflète directement ces fluctuations, avec des valeurs maximales observées en 2011 (1,00) et 2018 (0,83), correspondant à des périodes de forte disponibilité en eau. En revanche, l'année 2017 se distingue par une valeur nulle (0,00), confirmant une situation de déficit hydrique extrême. Cette variabilité influence directement la capacité de production hydroélectrique, comme le montre la variable de consommation. La consommation énergétique présente une certaine stabilité relative, bien qu'elle atteigne son maximum en 2010 avec une valeur normalisée de 1,00. Cependant, les écarts entre le débit total disponible et la consommation mettent en évidence des déséquilibres importants. L'année 2011 présente un excédent marqué avec une valeur d'écart de 1,00, traduisant une

disponibilité en eau supérieure aux besoins énergétiques. À l'inverse, l'année 2019 affiche une valeur nulle, indiquant une situation critique où les ressources hydriques sont insuffisantes pour satisfaire la demande.

3- Heatmap du déficit et de l'excédent hydraulique du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

La figure suivante présente une analyse comparative entre le débit total disponible et la consommation de la centrale hydroélectrique sur la période 2010–2020, permettant de mettre en évidence les situations de déficit et d'excédent hydraulique. Cette représentation met en relation directe les ressources en eau mobilisables et les besoins énergétiques, offrant ainsi une lecture synthétique du fonctionnement du système hydroélectrique dans un contexte de variabilité climatique.

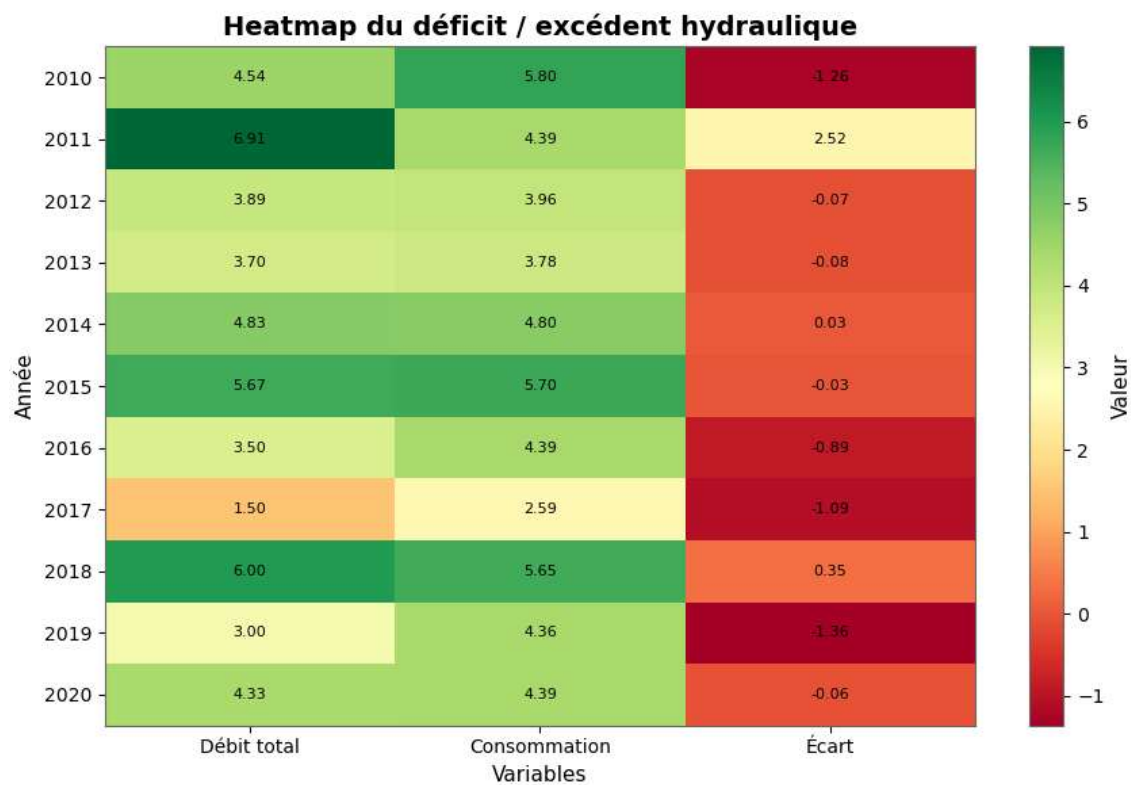


Figure n° 4 : Heatmap du déficit et de l'excédent hydraulique du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

Source : Auteur

Interprétation

L'examen des valeurs montre que certaines années sont caractérisées par un excédent hydrique notable. L'année 2011 constitue le cas le plus significatif avec un débit total de 6,91 m³/s pour une consommation de 4,39 m³/s, soit un excédent de +2,52 m³/s, traduisant une disponibilité en eau largement suffisante pour satisfaire la demande énergétique. De même, l'année 2018 présente un excédent de +0,35 m³/s avec un débit total de 6,00 m³/s contre une consommation de 5,65 m³/s, confirmant une situation globalement favorable en termes de ressources hydriques. À l'inverse, plusieurs années révèlent des déficits marqués, témoignant d'un déséquilibre entre l'offre et la demande en eau. L'année 2019 se distingue par le déficit le plus important, avec un débit total

de 3,00 m³/s pour une consommation de 4,36 m³/s, soit un écart de -1,36 m³/s. Cette situation traduit une insuffisance notable des apports hydriques, probablement liée à une faible pluviométrie observée cette année-là. De manière similaire, les années 2010 et 2017 présentent des déficits respectifs de -1,26 m³/s et -1,09 m³/s, indiquant des conditions hydrologiques défavorables pour la production hydroélectrique. Certaines années se rapprochent d'un état d'équilibre, comme en 2014 où le débit total de 4,83 m³/s est légèrement supérieur à la consommation de 4,80 m³/s, générant un faible excédent de +0,03 m³/s. D'autres années, telles que 2012, 2013, 2015 et 2020, présentent des écarts faibles, respectivement de -0,07 m³/s, -0,08 m³/s, -0,03 m³/s et -0,06 m³/s, traduisant un équilibre relatif mais fragile entre les ressources disponibles et les besoins énergétiques.

4- Modélisation de la relation entre la pluviométrie annuelle, le débit total et le déficit/excédent hydraulique du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

La figure ci-après illustre la relation entre la pluviométrie annuelle, le débit total lâché et le bilan hydraulique du système Mantasoa–Mandraka à travers une représentation de type diagramme à bulles. Chaque point correspond à une année donnée, positionnée en fonction de la pluviométrie (en mm) en abscisse et du débit total (en m³/s) en ordonnée, tandis que la taille et la couleur des bulles traduisent respectivement l'intensité et le signe du déficit ou de l'excédent hydraulique.

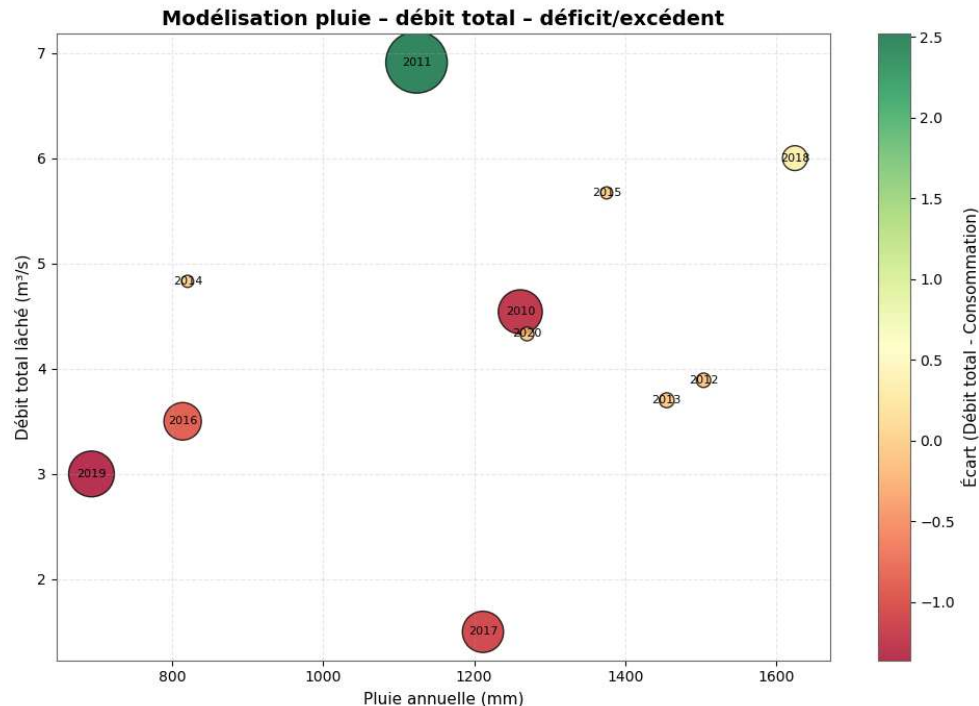


Figure n° 5 : Approche intégrée de modélisation statistique et d'analyse multidimensionnelle des plantations de pins : régression OLS, ACP, classification et dynamique de croissance

Source : Auteur

Interprétation

L'analyse met en évidence une relation globale positive entre la pluviométrie et le débit total, bien que celle-ci ne soit pas strictement linéaire. Les années à forte pluviométrie, telles que 2018 avec environ 1625 mm, correspondent à des débits élevés de l'ordre de 6,00 m³/s, traduisant une réponse hydrologique importante du bassin versant. Toutefois, cette relation présente des variations significatives, comme le montre l'année 2011, caractérisée par une pluviométrie intermédiaire d'environ 1124 mm mais un débit maximal de 6,91 m³/s, suggérant l'influence d'autres facteurs tels que les conditions initiales du bassin, le stockage ou la dynamique des écoulements. Les situations de déficit hydraulique apparaissent clairement pour certaines années marquées par des précipitations faibles ou modérées. L'année 2019, avec une pluviométrie d'environ 693 mm, présente un débit total de 3,00 m³/s et un déficit important, ce qui traduit une insuffisance des apports hydriques pour satisfaire la demande énergétique. De même, l'année 2017, malgré une pluviométrie relativement correcte d'environ 1212 mm, se caractérise par un débit très faible de 1,50 m³/s et un déficit marqué, indiquant un dysfonctionnement hydrologique lié probablement à des pertes, à une mauvaise rétention ou à une forte variabilité intra-annuelle des précipitations. À l'opposé, certaines années présentent des situations excédentaires, notamment 2011 avec un excédent de +2,52 m³/s, où le débit total dépasse largement les besoins de consommation. L'année 2018 montre également un léger excédent, confirmant que les périodes de forte pluviométrie peuvent engendrer des conditions favorables à la production hydroélectrique, bien que cet excédent reste modéré.

5- Surface 3D de modélisation hydroclimatique du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

La figure ci-dessous présente une modélisation tridimensionnelle des principales variables hydroclimatiques caractérisant le fonctionnement du système Mantasoa–Mandraka sur la période 2010–2020. Cette représentation met en relation l'évolution temporelle des variables, la nature des paramètres étudiés et leurs valeurs normalisées, permettant ainsi une lecture globale et continue des interactions entre les composantes hydrologiques et climatiques.

Surface 3D de modélisation hydroclimatique

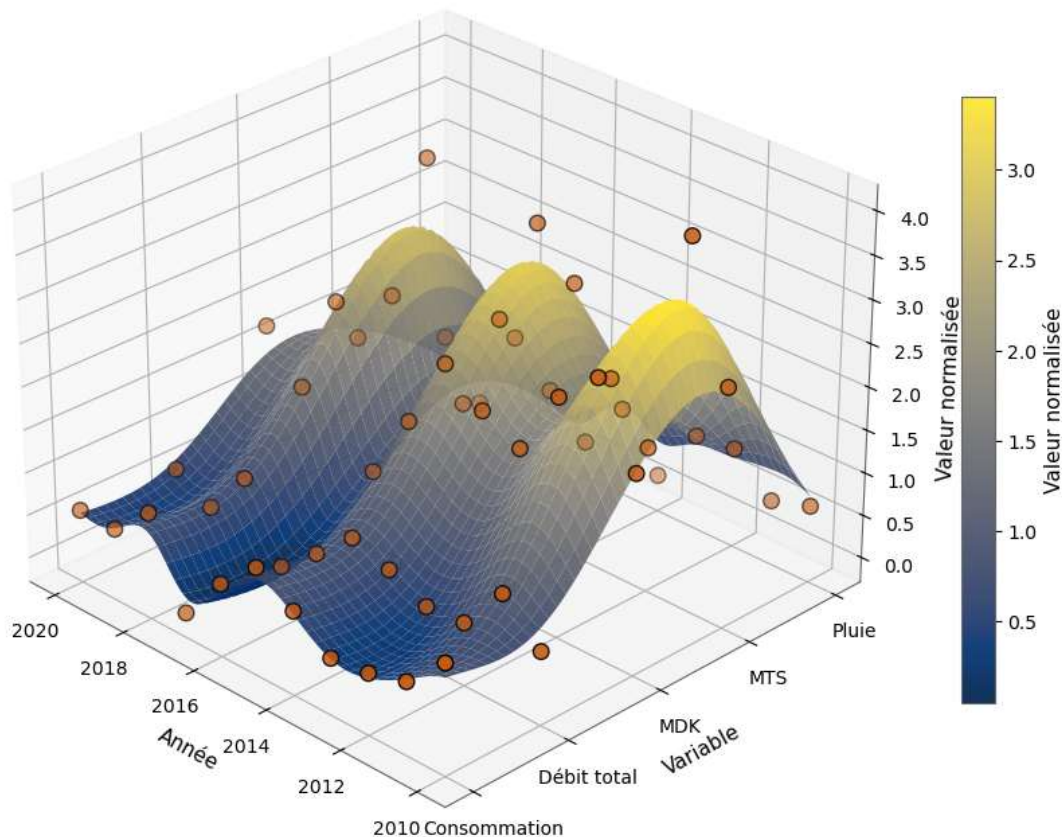


Figure n° 6 : Surface 3D de la modélisation hydroclimatique du système Mantasoa–Mandraka (2010–2020)

Interprétation

L'analyse de la surface met en évidence une variabilité marquée des différentes variables selon les années. Les zones de crêtes observées sur la surface correspondent à des valeurs élevées des variables, notamment pour la pluviométrie et les débits associés, tandis que les zones déprimées traduisent des périodes de faibles apports hydriques ou de diminution des débits disponibles. Cette organisation ondulée de la surface traduit la dynamique fluctuante du système, caractérisée par une alternance de phases excédentaires et déficitaires. Les observations montrent que certaines périodes, notamment autour des années 2011 et 2018, se distinguent par des valeurs élevées, correspondant à des conditions hydrologiques favorables. Ces périodes sont caractérisées par une augmentation simultanée de la pluviométrie et des débits, ce qui se traduit par une élévation de la surface dans ces zones. À l'inverse, les années telles que 2017 et 2019 apparaissent comme des zones de creux sur la surface, indiquant des valeurs faibles pour plusieurs variables, notamment les débits, traduisant des conditions hydriques défavorables. La répartition des points observés sur la surface interpolée montre une cohérence globale entre les données mesurées et la modélisation, bien que certaines dispersions traduisent la complexité du système. Cette dispersion reflète l'influence de facteurs non directement intégrés dans le modèle, tels que la variabilité intra-annuelle des précipitations, les caractéristiques du bassin versant ou encore les pratiques de gestion des

ressources en eau. D'un point de vue scientifique, cette surface 3D met en évidence l'interdépendance entre les variables climatiques et hydrologiques. Elle confirme que la pluviométrie constitue un facteur déterminant dans la disponibilité en eau et dans la dynamique des débits, mais elle montre également que la réponse du système n'est pas uniforme. Les variations observées suggèrent l'existence de mécanismes de régulation interne du bassin, notamment liés au stockage, à l'infiltration et à la restitution progressive de l'eau.

DISCUSSIONS

Les résultats obtenus mettent en évidence une forte variabilité spatio-temporelle des paramètres hydroclimatiques au sein du bassin versant de Mantasoa, confirmant la sensibilité du système hydroélectrique de Mandraka aux fluctuations climatiques. L'analyse combinée des représentations cartographiques, des interpolations spatiales et des modèles graphiques permet d'apporter une compréhension intégrée du fonctionnement hydrologique du bassin. Sur le plan morphologique, l'analyse des surfaces interpolées et des courbes de niveau révèle un gradient altimétrique important, avec des variations d'altitude de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Cette structuration du relief favorise la concentration des écoulements vers les zones basses, influençant directement la dynamique du ruissellement et les temps de concentration. La forme allongée du bassin versant, caractérisée par un indice de compacité de Gravelius supérieur à 1 ($KG = 1,98$), confirme une organisation hydrologique propice à une réponse différée des écoulements, mais susceptible d'amplifier les débits en période de fortes précipitations. L'analyse des données hydroclimatiques met en évidence une variabilité interannuelle marquée des précipitations, comprises entre 693 mm et 1625 mm sur la période étudiée. Cette variabilité se répercute directement sur les débits observés, qui varient de 1,50 m³/s à 6,91 m³/s. Toutefois, la relation entre pluviométrie et débit n'est pas strictement proportionnelle, ce qui traduit l'influence de facteurs supplémentaires tels que la capacité de stockage du bassin, l'état du couvert végétal et les caractéristiques géologiques. En particulier, les formations ferritiques et les substrats cristallins (gneiss et migmatites) limitent l'infiltration et favorisent le ruissellement superficiel, accentuant la variabilité des débits. Les analyses graphiques, notamment les heatmaps et les diagrammes à bulles, mettent en évidence une alternance de périodes excédentaires et déficitaires. Les années 2011 et 2018 apparaissent comme des périodes favorables, caractérisées par des excédents hydrauliques, tandis que les années 2017 et 2019 présentent des déficits significatifs, avec des écarts pouvant atteindre -1,36 m³/s entre le débit disponible et la consommation. Ces déséquilibres traduisent une inadéquation entre les ressources hydriques et les besoins énergétiques, soulignant la vulnérabilité du système face à la variabilité climatique. Par ailleurs, l'analyse des débits sortants vers la centrale de Mandraka montre une fluctuation importante des volumes disponibles, influençant directement la capacité de production énergétique. Le fait que certaines années présentent des débits insuffisants pour satisfaire la consommation met en évidence la nécessité d'une gestion optimisée des ressources en eau. De plus, le temps de concentration estimé à environ 6,086 heures indique une réponse relativement rapide du bassin aux événements pluvieux, ce qui peut accentuer les risques de crues soudaines en période humide et de déficit en période sèche. Enfin, la modélisation tridimensionnelle met en évidence la complexité des interactions entre les variables climatiques et hydrologiques. Elle montre que la réponse du système n'est pas uniforme dans le temps, mais dépend d'une combinaison de facteurs, incluant la variabilité des précipitations, la morphologie du bassin et les conditions initiales du milieu. Ces résultats confirment que la variabilité climatique constitue un facteur majeur de perturbation du fonctionnement du système hydroélectrique de Mantasoa–Mandraka. Ainsi, cette étude souligne l'importance d'une approche intégrée combinant données de terrain, analyses spatiales et modélisation pour mieux comprendre les dynamiques hydroclimatiques. Elle met également en évidence la nécessité de développer des stratégies de gestion adaptative afin d'optimiser l'exploitation des ressources en eau et de renforcer la résilience du système hydroélectrique face aux changements climatiques.

CONCLUSION

Cette étude a permis d'analyser de manière intégrée les interactions entre la variabilité climatique, le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Mantasoa et la performance du système hydroélectrique de Mandraka. L'approche adoptée, combinant cartographie, interpolation spatiale et modélisation hydroclimatique, a offert une vision globale et cohérente des

dynamiques spatio-temporelles du système étudié. Les résultats ont mis en évidence une forte variabilité interannuelle des précipitations, avec des valeurs comprises entre 693 mm et 1625 mm, influençant directement les débits disponibles qui varient de 1,50 m³/s à 6,91 m³/s. Cette variabilité se traduit par une alternance de périodes excédentaires et déficitaires, avec des écarts entre débit disponible et consommation pouvant atteindre respectivement +2,52 m³/s et -1,36 m³/s. Ces fluctuations confirment la sensibilité du système hydroélectrique aux conditions climatiques et soulignent les contraintes liées à la disponibilité irrégulière des ressources en eau. L'analyse morphologique du bassin versant, caractérisé par une forme allongée (KG = 1,98) et un relief contrasté, met en évidence une organisation favorable à la concentration des écoulements, influençant les temps de réponse hydrologique et les régimes de débit. Par ailleurs, les caractéristiques géologiques et pédologiques contribuent à accentuer le ruissellement, limitant les capacités de stockage naturel et amplifiant la variabilité des apports. Les outils de modélisation et de visualisation graphique, tels que les heatmaps, les diagrammes et les surfaces 3D, ont permis d'identifier clairement les tendances, les anomalies et les périodes critiques du système. Ces analyses montrent que la relation entre précipitations et débits reste complexe et dépend de multiples facteurs, incluant la structure du bassin et les conditions environnementales.

RÉFÉRENCE

- [1] - IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [2] - Trenberth, K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), pp. 123–138.
<https://doi.org/10.3354/cr00953>
- [3] - Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley-Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- [4] - Li, J. & Heap, A.D. (2014). Spatial interpolation methods applied in environmental sciences. *Environmental Modelling & Software*, 53, pp. 173–189.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- [5] - Sivapalan, M., et al. (2003). IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), pp. 857–880.
<https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.857.51421>
- [6] - Wilks, D.S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-00258-8>
- [7] - Kundzewicz, Z.W., et al. (2007). *Freshwater resources and their management*. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013.003>
- [8] - Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Waskle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
- [9] - Li, J. & Heap, A.D. (2014). Spatial interpolation methods applied in environmental sciences. *Environmental Modelling & Software*, 53, pp. 173–189.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- [10] - Ware, C. (2012). *Information Visualization: Perception for Design*. Morgan Kaufmann.
<https://doi.org/10.1016/C2010-0-66988-1>

- [11] - Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. Wiley-Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- [12] - Hunter, J.D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), pp. 90–95.
<https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- [13] - McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. Proceedings of the Python in Science Conference.
<https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>
- [14] - Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods, 17, pp. 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- [15] - Gillies, S., et al. (2013). Rasterio: geospatial raster I/O for Python.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1333416>