

Optimisation Et Modélisation Des Eaux Minerales Et Eaux Thermo Minerales Dans La Region De Sava Et Diana

RAMALANJAONA Maminiaina Andriantsoa¹¹, RAKOTOSON Tolontsoa.^{1,2}, TOVONIRINA Mamiharizo. Jackie.¹³, Rondro Nirina RAVAOARINORO^{1,4}, RAHARIMALALA Laurence¹⁵

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université d'Antananarivo

Auteur correspondant : RAMALANJAONA Maminiaina Andriantsoa



Résumé : Cette étude vise à caractériser l'évolution géochimique et la classification hydro chimique des eaux minérales et eaux thermo minérales dans la partie nord de Madagascar à partir d'analyses physico-chimiques, de diagrammes hydrochimiques et d'approches statistiques multivariées. Plusieurs paramètres majeurs ont été analysés, notamment les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}), ainsi que le résidu sec à 105 °C et le pH. Les concentrations observées montrent une variabilité importante entre les différentes sources étudiées. Les teneurs en sodium atteignent en moyenne 256 mg/L dans certaines stations, tandis que les chlorures varient entre environ 15 mg/L et 400 mg/L. Les valeurs du résidu sec indiquent une minéralisation comprise entre environ 480 mg/L et 1480 mg/L. Les diagrammes de Schoeller et de Piper mettent en évidence une dominance des faciès hydrochimiques de type sodique chloruré et bicarbonaté dans plusieurs stations. L'analyse de la relation entre les chlorures et les solides dissous totaux montre une corrélation positive traduisant une contribution significative des chlorures à la minéralisation globale des eaux. L'analyse statistique multivariée, incluant l'analyse en composantes principales et la classification K-means, permet d'identifier trois groupes hydrochimiques distincts reflétant l'influence combinée des processus d'altération des roches, des interactions eau-roche et des conditions hydrogéologiques locales.

Mots clés : Hydrochimie, géochimie, analyse, eaux, thermale

Abstract: This study aims to characterize the geochemical evolution and hydrochemical classification of thermalwaters and hydrothermal in the northern part of Madagascar based on physicochemical analyses, hydrochemical diagrams, and multivariate statistical approaches. Several major parameters were analyzed, including cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) and anions (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}), as well as the dry residue at 105 °C and pH. The observed concentrations show significant variability among the different sampled sources. Sodium concentrations reach an average of 256 mg/L at some stations, while chloride levels range from approximately 15 mg/L to 400 mg/L. The dry residue values indicate a mineralization ranging from about 480 mg/L to 1480 mg/L. The Schoeller and Piper diagrams highlight a predominance of sodium-chloride and sodium-bicarbonate hydrochemical facies in several stations. The analysis of the relationship between chlorides and total dissolved solids reveals a positive correlation, indicating a significant contribution of chlorides to the overall mineralization of the waters. Multivariate statistical analysis, including principal component analysis (PCA) and K-means clustering, identifies three distinct hydrochemical groups, reflecting the combined influence of rock weathering processes, water-rock interactions, and local hydrogeological conditions.

Keywords: Hydrochemistry, geochemical, analysis, water, thermal.

INTRODUCTION

Les eaux souterraines constituent une ressource essentielle pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et le développement socio-économique dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les zones tropicales où elles représentent souvent la principale source d'approvisionnement en eau [1]. La qualité chimique de ces eaux est généralement contrôlée par plusieurs facteurs naturels et anthropiques, notamment la lithologie des formations géologiques, les processus d'altération des roches, les interactions

eau-roche, les conditions climatiques et les activités humaines [2]. L'étude hydrochimique des eaux souterraines permet ainsi de mieux comprendre les mécanismes géochimiques qui gouvernent leur composition chimique et leur évolution au sein des aquifères. Dans les régions tropicales comme Madagascar, les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines sont fortement influencées par les processus d'altération chimique intense des roches, favorisés par les conditions climatiques chaudes et humides [3]. Ces processus conduisent à la libération progressive des ions majeurs dans les eaux circulant dans les aquifères et contribuent à leur minéralisation. L'analyse des principaux paramètres physico-chimiques, notamment les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et les anions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-}), constitue une approche fondamentale pour déterminer les faciès hydrochimiques et identifier les processus géochimiques responsables de la composition des eaux souterraines [4]. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées en hydrochimie, les diagrammes géochimiques tels que ceux de Piper et de Schoeller permettent de représenter graphiquement la composition ionique des eaux et de classifier les différents types d'eaux selon leur faciès hydrochimique [5]. Le diagramme de Piper permet notamment d'identifier les faciès hydrochimiques dominants et de mettre en évidence les processus d'évolution chimique des eaux, tandis que le diagramme de Schoeller facilite la comparaison des concentrations ioniques entre différents échantillons d'eau [6]. Par ailleurs, l'utilisation des méthodes statistiques multivariées, telles que l'analyse en composantes principales (ACP) et les techniques de classification, constitue un outil efficace pour interpréter les données hydrochimiques complexes et identifier les relations entre les différentes variables physico-chimiques [7]. Ces approches permettent de réduire la dimension des ensembles de données et de mettre en évidence les facteurs dominants contrôlant la composition chimique des eaux souterraines. Malgré l'importance des ressources en eaux souterraines dans plusieurs régions de Madagascar, les études détaillées sur leur évolution géochimique et leur classification hydrochimique restent relativement limitées, notamment dans la partie nord du pays. Dans ce contexte, la présente étude vise à analyser les caractéristiques physico-chimiques des eaux minérales et thermo minérales de ces deux régions afin de déterminer les faciès hydrochimiques dominants et de mieux comprendre les processus géochimiques responsables de leur minéralisation. Pour atteindre cet objectif, une approche intégrée combinant les diagrammes hydrochimiques de Piper et de Schoeller ainsi que des méthodes statistiques multivariées a été appliquée aux données analytiques collectées.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les eaux minérales et thermo minérales étudiées proviennent de plusieurs sources localisées dans la partie nord de Madagascar, notamment dans les localités d'Antsiafapiana, Andranomandevy Migioky, Sambirano, Beangona, Bejofo, Bekipay et Mangindrano Sud. Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène préalablement lavés et rincés avec l'eau du site afin d'éviter toute contamination. Après prélèvement, les échantillons ont été conservés à basse température et transportés au laboratoire pour les analyses physico-chimiques. Les paramètres étudiés comprennent la température, le pH et le résidu sec à 105 °C, utilisé comme indicateur des solides dissous totaux et du degré de minéralisation des eaux. Les analyses chimiques ont porté sur les principaux ions majeurs, notamment les cations calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) et potassium (K^+), ainsi que les anions chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}) et carbonate (CO_3^{2-}). Les concentrations ioniques ont été exprimées en mg/L afin de faciliter la comparaison entre les différentes stations d'échantillonnage. Les données analytiques obtenues ont été organisées sous forme de tableaux numériques afin de permettre leur traitement statistique et leur interprétation. La gestion et la structuration des données ont été réalisées à l'aide de la bibliothèque pandas, largement utilisée pour l'analyse de données scientifiques et environnementales [8]. Les calculs numériques nécessaires au traitement des variables, notamment les opérations matricielles et les transformations statistiques, ont été effectués avec la bibliothèque NumPy, reconnue pour ses performances dans le calcul scientifique sous Python [9]. Une analyse statistique descriptive a d'abord été réalisée afin de déterminer les valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres physico-chimiques étudiés, ce qui permet d'apprécier la variabilité spatiale des caractéristiques hydrochimiques entre les différentes sources d'eau. L'interprétation hydrochimique a ensuite été réalisée à l'aide de représentations graphiques couramment utilisées en hydrogéochimie. Les diagrammes hydrochimiques et les différentes représentations graphiques ont été produits à l'aide de la bibliothèque Matplotlib, qui constitue un outil de référence pour la visualisation scientifique des données [10].

Le diagramme de Schoeller a été utilisé pour comparer les profils ioniques des différents échantillons sur une échelle logarithmique et mettre en évidence les dominances relatives des ions majeurs entre les stations. Le diagramme de Piper a également été utilisé afin de classer les eaux selon leurs faciès hydrochimiques en fonction des proportions relatives des cations et des anions majeurs. Afin d'améliorer la visualisation statistique et la représentation graphique des données, la bibliothèque Seaborn a été utilisée pour produire certaines figures, notamment les cartes thermiques et les représentations statistiques avancées [11]. Afin d'examiner les relations entre certains paramètres chimiques, une analyse bivariée a été réalisée entre les concentrations en chlorures et le résidu sec à 105 °C. Cette relation a été représentée sous forme de nuage de points accompagné d'une régression linéaire afin d'évaluer la contribution des ions chlorure à la minéralisation globale des eaux et de mieux comprendre les processus hydrochimiques susceptibles de contrôler la salinité des eaux souterraines. En complément des analyses graphiques, une analyse statistique multivariée a été appliquée afin d'explorer les relations entre les différentes variables physico-chimiques et de mettre en évidence les structures hydrochimiques des eaux étudiées. Les données ont d'abord été standardisées par transformation en z-score afin de rendre comparables les variables exprimées dans des unités différentes. Une classification hiérarchique ascendante a ensuite été réalisée afin de regrouper les stations présentant des caractéristiques hydrochimiques similaires. Cette classification a été effectuée à l'aide des fonctions du module SciPy, qui propose plusieurs algorithmes dédiés au calcul scientifique et à l'analyse statistique avancée [12]. Une analyse en composantes principales (ACP) a également été réalisée afin de réduire la dimension du jeu de données et d'identifier les principaux facteurs contrôlant la composition chimique des eaux. Les deux premières composantes principales ont été retenues pour représenter la distribution des échantillons dans l'espace factoriel et mettre en évidence les gradients hydrochimiques dominants. Afin d'améliorer l'interprétation des résultats, une classification de type K-means a été appliquée afin de regrouper les échantillons en différents groupes hydrochimiques présentant des caractéristiques similaires. Ces méthodes de réduction de dimension et de classification ont été implémentées à l'aide de la bibliothèque scikit-learn, largement utilisée dans l'analyse statistique et l'apprentissage automatique appliqués aux données environnementales [13].

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1-Hydrochimie et caractérisation physico-chimique des eaux dans la partie nord de Madagascar : analyse comparative à partir du diagramme de Schoeller

Le diagramme de Schoeller présenté ci-dessous illustre la distribution des principaux ions majeurs mesurés dans les différentes stations d'échantillonnage situées dans la partie nord de Madagascar. Cette représentation graphique, réalisée en échelle logarithmique (mg/L), permet de comparer simultanément les concentrations en cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et en anions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) dans les différentes localités étudiées, notamment Antsifapiana, Andranomandevy Migioky, Sambirano, Beangona, Bejofo, Bekipay et Mangindrano Sud. L'utilisation de ce type de diagramme facilite l'identification des similitudes hydrochimiques entre les eaux ainsi que la mise en évidence des processus géochimiques dominants contrôlant la composition ionique.

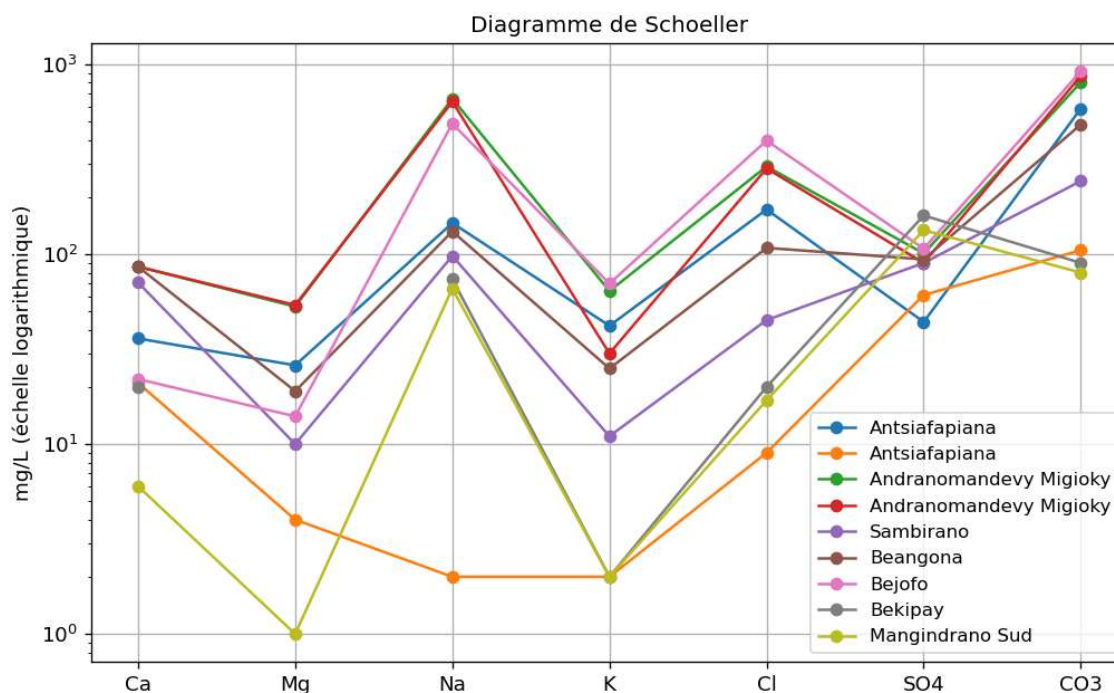


Figure 1: Hydrochimie et caractérisation physico-chimique des eaux dans la partie nord de Madagascar : analyse comparative à partir du diagramme de Schoeller

Interprétation

L'analyse du diagramme montre que le sodium constitue généralement l'ion dominant dans plusieurs stations. Les concentrations en Na⁺ atteignent environ 600 mg/L dans les eaux d'Andranomandevy Migioky, près de 500 mg/L à Bejofo et environ 150 mg/L à Antsiafapiana, ce qui traduit une minéralisation relativement élevée et suggère une interaction prolongée entre l'eau et les formations géologiques environnantes. À Sambirano et Beangona, les teneurs en sodium sont plus modérées, respectivement autour de 90 mg/L et 130 mg/L. Les concentrations en calcium présentent des variations notables selon les sites. Les valeurs les plus élevées sont observées à Andranomandevy Migioky et à Beangona, atteignant environ 90 mg/L, tandis que les eaux de Mangindrano Sud présentent les valeurs les plus faibles, proches de 6 mg/L. Les teneurs en magnésium restent globalement modérées, avec des valeurs comprises entre environ 1 mg/L à Mangindrano Sud et près de 50 mg/L à Andranomandevy Migioky. Cette variabilité reflète probablement l'influence lithologique locale et la dissolution différentielle des minéraux carbonatés et silicatés. Les concentrations en potassium sont relativement faibles dans l'ensemble des échantillons, variant entre environ 2 mg/L à Mangindrano Sud et Antsiafapiana et près de 70 mg/L à Bejofo et Andranomandevy Migioky. Cette faible abondance du potassium est généralement attribuée à son incorporation rapide dans les minéraux argileux et à sa mobilité limitée dans les systèmes aquifères. Concernant les anions, le chlorure montre des valeurs élevées dans certaines stations, notamment à Bejofo où il atteint environ 350 mg/L et à Andranomandevy Migioky avec des concentrations proches de 250 mg/L. Les teneurs en sulfate varient entre environ 40 mg/L à Antsiafapiana et près de 160 mg/L à Bekipay, indiquant une contribution possible des processus d'oxydation des sulfures ou de dissolution de minéraux sulfatés. Enfin, les concentrations en carbonates sont particulièrement élevées dans plusieurs stations, atteignant environ 900 mg/L à Bejofo, 800 mg/L à Andranomandevy Migioky et près de 600 mg/L à Antsiafapiana, ce qui suggère une forte influence des processus de dissolution des formations carbonatées et une alcalinité importante des eaux étudiées.

2- Détermination des faciès hydrochimiques des eaux souterraines du nord de Madagascar à partir du diagramme de Piper

La figure ci-dessous présente le diagramme de Piper utilisée pour déterminer le faciès hydrochimique des eaux échantillonnées dans plusieurs localités de la partie nord de Madagascar, notamment Antsiafapiana, Sambirano, Beangona, Andranomandevy Migioky, Bekipay et Mangindrano Sud. Ce type de représentation est largement utilisé en hydrochimie pour analyser la distribution relative des principaux ions majeurs et identifier les types d'eaux dominants. Le diagramme est constitué de deux triangles représentant respectivement la composition relative des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$) et des anions majeurs ($\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-}$, SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_3^{2-}$), dont la projection dans le losange central permet de caractériser le faciès hydrochimique global des eaux.

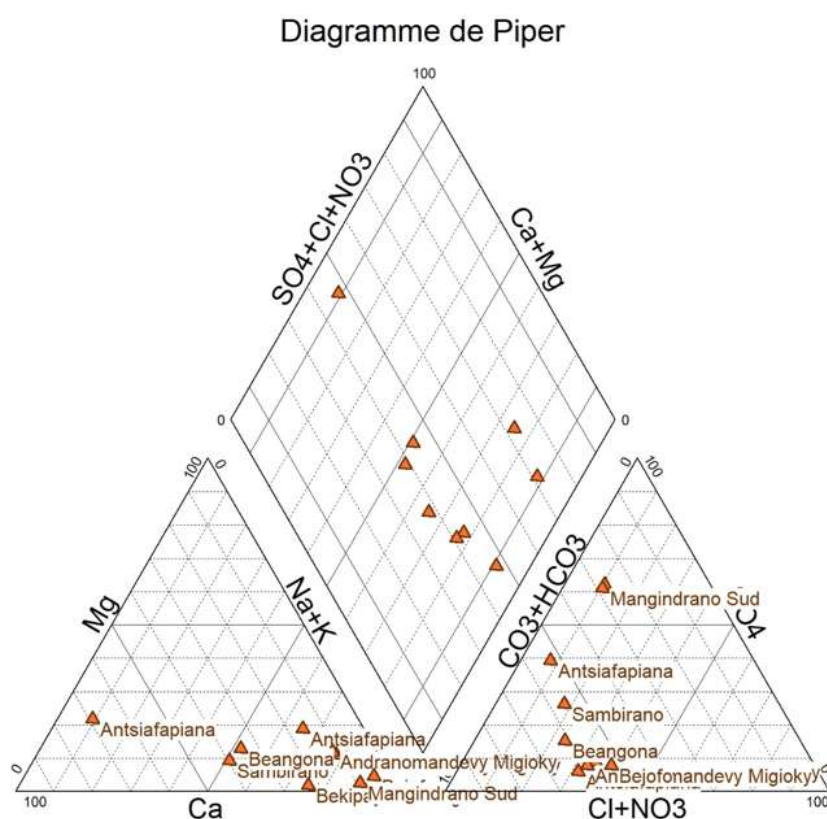


Figure 2: Détermination des faciès hydrochimiques des eaux souterraines du nord de Madagascar à partir du diagramme de Piper

Interprétation

L'examen du triangle des cations montre que plusieurs échantillons se concentrent vers la base du triangle entre les pôles Ca^{2+} et $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$. Les eaux de Bekipay et de Mangindrano Sud sont relativement proches du pôle sodique, indiquant une dominance du sodium dans la composition cationique. À l'inverse, les eaux d'Antsiafapiana, de Sambirano et de Beangona présentent une contribution plus importante du calcium, ce qui suggère l'influence de la dissolution de minéraux carbonatés ou silicatés présents dans les formations géologiques locales. La contribution du magnésium reste relativement faible dans la majorité des échantillons, ce qui indique que les processus de dissolution des minéraux magnésiens jouent un rôle secondaire dans la minéralisation des eaux.

étudiées. Dans le triangle des anions, la majorité des échantillons se situent vers le pôle chlorure–nitrate ($\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$), indiquant que ces anions dominent dans la composition chimique de plusieurs eaux étudiées. Les eaux de Beangona et de Sambirano se positionnent clairement dans cette zone, tandis que l'échantillon de Mangindrano Sud se rapproche davantage du pôle bicarbonate–carbonate ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), ce qui traduit une influence plus marquée des processus de dissolution des carbonates et une interaction importante avec les formations géologiques carbonatées. La projection des points dans le losange central met en évidence une prédominance des faciès mixtes avec une tendance vers le faciès sodique chloruré. La position de plusieurs échantillons dans la partie centrale du losange suggère des eaux résultant de mélanges hydrochimiques et d'interactions complexes entre différents processus géochimiques. Cette distribution indique que la composition chimique des eaux est probablement contrôlée par l'altération des roches, les échanges ioniques entre l'eau et les minéraux argileux ainsi que par la circulation prolongée des eaux dans les aquifères. Ainsi, l'analyse du diagramme de Piper montre que les eaux souterraines du nord de Madagascar présentent une variabilité hydrochimique notable, avec une dominance générale des eaux à tendance sodique et chlorurée, tout en conservant localement des caractéristiques bicarbonatées calciques. Cette diversité chimique reflète l'influence combinée des conditions lithologiques, des processus d'altération géochimique et de la dynamique hydrogéologique qui caractérisent les aquifères de cette région.

3- Relation hydrochimique entre la concentration en chlorures et les solides dissous totaux (TDS) dans les eaux du nord de Madagascar

La figure ci-dessous illustre la relation hydrochimique entre la concentration en ions chlorure (Cl^-) et les solides dissous totaux (TDS) mesurés dans les différentes sources d'eau étudiées dans la partie nord de Madagascar. Le TDS, exprimé ici comme résidu sec à 105 °C, représente l'ensemble des sels minéraux dissous dans l'eau et constitue un indicateur global du degré de minéralisation des eaux. L'analyse de la relation entre le chlorure et le TDS permet d'identifier les processus hydrochimiques responsables de la minéralisation des eaux souterraines et d'évaluer l'influence relative des apports salins dans la composition chimique des eaux.

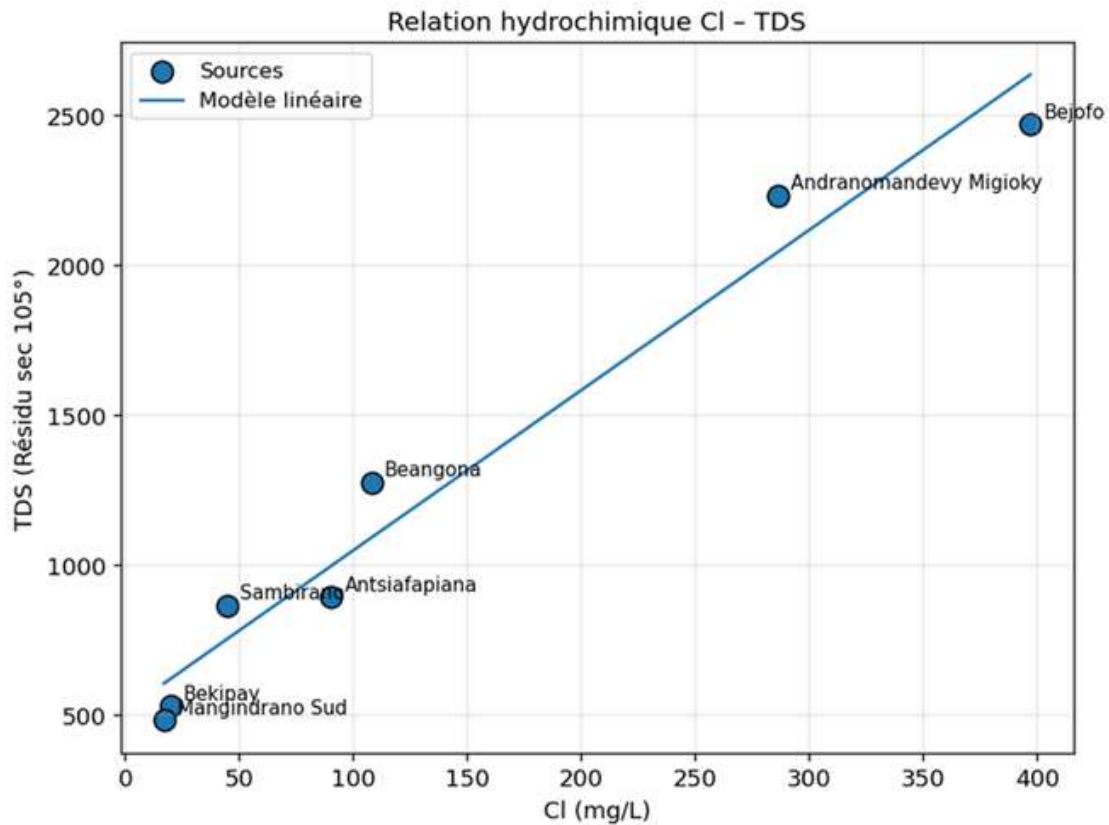


Figure 3: Relation hydrochimique entre la concentration en chlorures et les solides dissous totaux (TDS) dans les eaux du nord de Madagascar

Interprétation

L'observation du graphique montre une corrélation positive nette entre la concentration en chlorures et les valeurs de TDS, comme l'indique la tendance linéaire représentée par le modèle de régression. Cette relation suggère que les chlorures contribuent de manière significative à la minéralisation globale des eaux étudiées. Les échantillons présentant les concentrations les plus élevées en chlorures correspondent également aux valeurs les plus importantes de TDS. Par exemple, l'eau de Bejfo présente une concentration en chlorures d'environ 400 mg/L associée à un TDS proche de 2450 mg/L, ce qui indique une forte minéralisation. De même, l'échantillon d'Andranomandevy Migioky présente une teneur en chlorures d'environ 290 mg/L et un TDS avoisinant 2200 mg/L. À l'inverse, certaines stations présentent des concentrations plus faibles en chlorures et des niveaux de minéralisation plus modérés. Les eaux de Bekipay et de Mangindrano Sud montrent des concentrations en chlorures relativement faibles, de l'ordre de 15 à 20 mg/L, associées à des valeurs de TDS comprises entre environ 480 mg/L et 540 mg/L. Ces valeurs indiquent des eaux moins minéralisées, probablement issues d'une recharge plus récente ou d'une interaction plus limitée avec les formations géologiques environnantes. Les stations de Sambirano, Antsiafapiana et Beangona occupent une position intermédiaire dans le graphique, avec des concentrations en chlorures respectivement d'environ 50 mg/L, 90 mg/L et 110 mg/L et des TDS variant entre environ 850 mg/L et 1250 mg/L. Ces résultats suggèrent une minéralisation progressive des eaux liée à l'augmentation de la concentration des ions dissous le long du trajet hydrogéologique.

4- Analyse statistique multivariée des paramètres physico-chimiques des eaux minérales et thermo minérales du nord de Madagascar par classification hiérarchique et carte thermique

La figure ci-après présente une carte thermique (heatmap) associée à une classification hiérarchique des principaux paramètres physico-chimiques mesurés dans les différentes sources d'eau étudiées dans la partie nord de Madagascar. Cette approche statistique multivariée permet de visualiser simultanément les variations relatives des paramètres hydrochimiques et de mettre en évidence les similarités ou les différences entre les sites d'échantillonnage. Les valeurs représentées correspondent aux scores standardisés (z-score), permettant de comparer les variables ayant des unités et des amplitudes différentes. La classification hiérarchique, représentée par les dendrogrammes, permet de regrouper les stations présentant des caractéristiques hydrochimiques similaires.

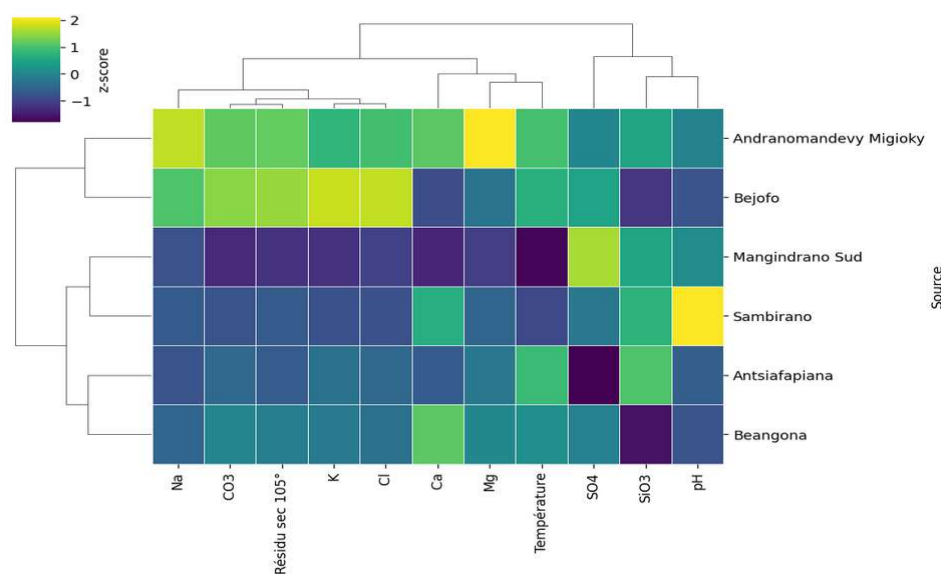


Figure 4: Analyse statistique multivariée des paramètres physico-chimiques des eaux du nord de Madagascar par classification hiérarchique et carte thermique

Interprétation

L'analyse de la carte thermique met en évidence une forte variabilité des concentrations ioniques et des paramètres physico-chimiques entre les différentes sources étudiées. Les eaux d'Andranomandevy Migioky se caractérisent par des valeurs élevées en sodium, magnésium et carbonates, ce qui traduit une minéralisation relativement importante et suggère une interaction marquée entre l'eau et les formations géologiques environnantes. La présence simultanée de fortes concentrations en ions majeurs indique que ces eaux ont probablement subi un temps de résidence plus long dans l'aquifère, favorisant les processus d'altération des minéraux. Les eaux de Bejofo présentent également des valeurs élevées pour plusieurs paramètres, notamment les carbonates, le potassium et les chlorures, ainsi que pour le résidu sec à 105 °C, ce qui confirme une forte minéralisation globale. Cette signature hydrochimique pourrait être liée à des processus de dissolution des roches carbonatées et à une concentration progressive des sels dissous au cours de la circulation souterraine des eaux. À l'inverse, les eaux de Mangindrano Sud montrent globalement des valeurs plus faibles pour la majorité des ions majeurs, en particulier pour le sodium, les carbonates, le potassium et les chlorures. Cette faible minéralisation suggère une recharge plus récente ou une interaction plus limitée avec les formations géologiques de l'aquifère. Cependant, cette station présente une valeur relativement élevée en sulfates, ce qui pourrait être associé à la dissolution de minéraux sulfatés présents dans l'environnement géologique local. Les eaux de Sambirano se distinguent par une valeur relativement élevée du pH ainsi que par des concentrations modérées en silice (SiO₃), indiquant une possible interaction avec des roches silicatées. Cette

caractéristique pourrait refléter des processus d’altération des minéraux silicatés présents dans les formations géologiques de la région. Les stations d’Antsiafapiana et de Beangona présentent des caractéristiques intermédiaires et se regroupent dans le dendrogramme, ce qui suggère des conditions hydrochimiques relativement similaires. Ces eaux présentent des concentrations modérées pour la plupart des ions majeurs, indiquant un degré de minéralisation intermédiaire entre les eaux fortement minéralisées et celles relativement diluées. La classification hiérarchique met ainsi en évidence plusieurs groupes hydrochimiques distincts reflétant la diversité des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la région étudiée. Ces résultats suggèrent que la composition chimique des eaux souterraines dans le nord de Madagascar est contrôlée par une combinaison de processus naturels, notamment l’altération des roches, les interactions eau-roche, les échanges ioniques et les différences dans les conditions de recharge et de circulation des eaux au sein des aquifères.

5- Analyse en composantes principales (ACP) et classification des eaux du nord de Madagascar par regroupement K-means

La figure suivante présente les résultats de l’analyse en composantes principales (ACP) appliquée aux paramètres physico-chimiques mesurés dans les différentes sources d’eau étudiées dans la partie nord de Madagascar. Cette méthode statistique multivariée permet de réduire la dimension du jeu de données tout en conservant l’essentiel de l’information contenue dans les variables initiales. La projection des échantillons sur les deux premiers axes principaux, PC1 et PC2, permet d’explorer les relations entre les différentes sources et de mettre en évidence les groupes hydrochimiques présentant des caractéristiques similaires. L’axe principal PC1 explique 55,3 % de la variance totale tandis que l’axe PC2 en explique 16,1 %, soit un total cumulé de plus de 71 % de la variabilité des données, ce qui indique que ces deux composantes résument efficacement la structure hydrochimique du système étudié.

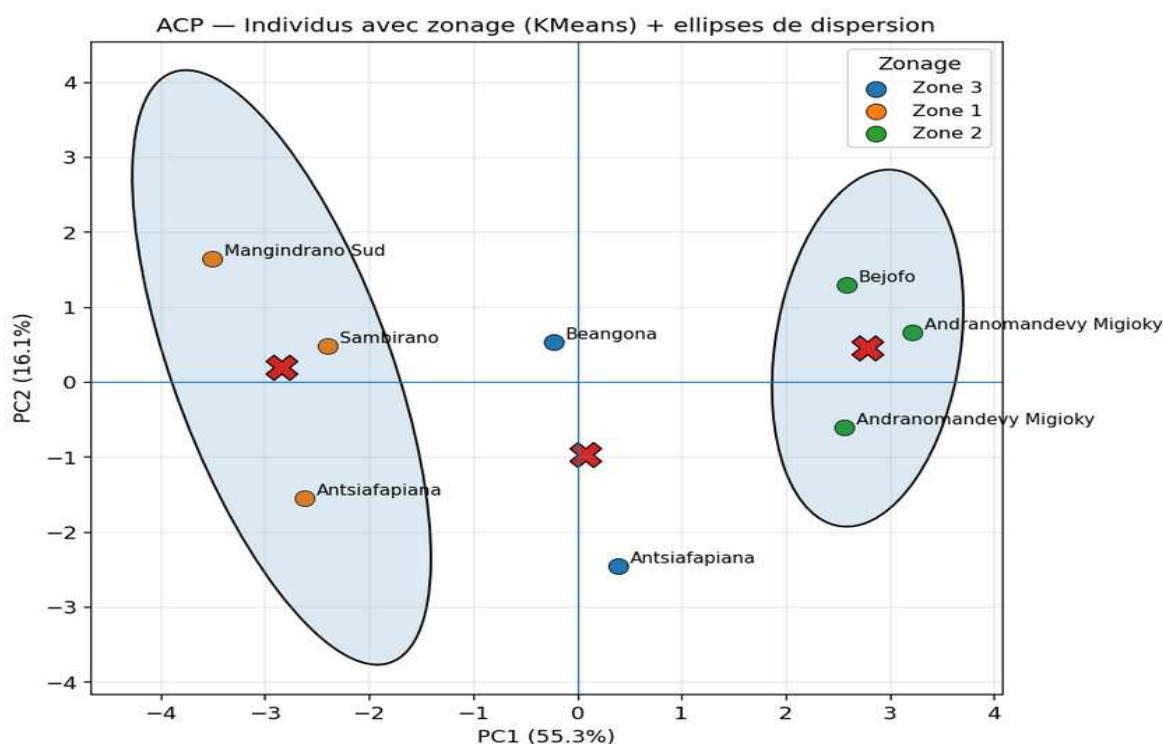


Figure 5: Analyse en composantes principales (ACP) et classification des eaux du nord de Madagascar par regroupement K-means

Interprétation

L'intégration de la méthode de classification K-means permet de regrouper les échantillons en trois zones hydrochimiques distinctes. La première zone regroupe les stations de Mangindrano Sud, Sambirano et Antsiafapiana, qui se situent principalement dans la partie négative de l'axe PC1. Ce regroupement suggère que ces eaux partagent des caractéristiques chimiques relativement similaires, probablement associées à une minéralisation plus modérée et à une influence plus marquée des processus de recharge récente et d'interaction limitée avec les formations géologiques profondes. La deuxième zone comprend principalement les stations d'Andranomandevy Migioky et de Bejofo, qui se situent dans la partie positive de l'axe PC1. Ces échantillons sont caractérisés par des valeurs plus élevées de certains ions majeurs, ce qui indique une minéralisation plus importante des eaux. Cette signature chimique pourrait être liée à des interactions eau-roche plus prolongées, favorisant la dissolution des minéraux présents dans les formations géologiques locales et entraînant une augmentation progressive des concentrations ioniques. La troisième zone correspond à un groupe intermédiaire représenté principalement par la station de Beangona et certains échantillons d'Antsiafapiana. La position de ces points près de l'origine des axes principaux suggère des caractéristiques hydrochimiques intermédiaires entre les deux groupes précédents. Cette situation pourrait refléter des conditions hydrogéologiques mixtes ou des processus de mélange entre différentes sources d'eau. La présence d'ellipses de dispersion autour des groupes identifiés met en évidence la variabilité interne de chaque zone hydrochimique et confirme l'existence de regroupements distincts entre les stations étudiées. Ces résultats montrent que la composition chimique des eaux du nord de Madagascar est influencée par plusieurs facteurs, notamment les interactions eau-roche, les conditions de circulation des eaux souterraines et les caractéristiques géologiques locales.

DISCUSSION

La composition chimique des eaux étudiées dans la partie nord de Madagascar met en évidence une variabilité hydrochimique notable entre les différentes stations d'échantillonnage. Les concentrations observées pour les principaux ions majeurs indiquent des différences significatives dans le degré de minéralisation des eaux, ce qui reflète l'influence combinée des conditions géologiques, hydrologiques et géochimiques locales. Les teneurs relativement élevées en sodium observées dans certaines stations, atteignant en moyenne environ 256 mg/L, suggèrent une contribution importante des processus d'altération des roches silicatées et des échanges ioniques entre l'eau et les minéraux argileux présents dans les formations géologiques de la région. De tels processus sont fréquemment responsables de l'enrichissement progressif des eaux souterraines en ions alcalins au cours de leur circulation dans les aquifères [14]. Les concentrations en chlorures, variant entre environ 15 mg/L et 400 mg/L, traduisent également des différences importantes dans la salinité des eaux étudiées. Les stations présentant des concentrations élevées en chlorures correspondent également aux valeurs les plus importantes du résidu sec à 105 °C, ce qui indique une contribution significative de cet ion à la minéralisation globale des eaux. La relation positive observée entre les chlorures et les solides dissous totaux confirme que l'augmentation de la salinité est en partie contrôlée par l'accumulation progressive des sels dissous au cours du temps de résidence des eaux dans l'aquifère. Des relations similaires entre chlorures et minéralisation ont été observées dans plusieurs études hydrochimiques réalisées dans des environnements tropicaux, où les processus d'évaporation, de dissolution des minéraux et de circulation prolongée des eaux contribuent à l'enrichissement en sels dissous [15]. L'interprétation des diagrammes hydrochimiques permet également d'identifier les faciès dominants des eaux étudiées. Les diagrammes de Piper et de Schoeller montrent une prédominance des faciès sodiques chlorurés et bicarbonatés dans plusieurs stations. Cette configuration hydrochimique indique généralement des eaux ayant subi une évolution géochimique relativement avancée, caractérisée par des interactions prolongées entre l'eau et les roches encaissantes. Les faciès bicarbonatés sont souvent associés à la dissolution des minéraux carbonatés et à l'influence des processus d'altération chimique, tandis que les faciès chlorurés sodiques peuvent résulter de phénomènes d'échanges ioniques ou d'une concentration progressive des ions dissous [14]. Les résultats de l'analyse statistique multivariée apportent un éclairage complémentaire sur la structuration hydrochimique des eaux étudiées. L'analyse en composantes principales montre que les deux premiers axes factoriels expliquent une part importante de la variance totale des données, ce qui indique que les principales variations hydrochimiques peuvent être décrites par un nombre réduit de facteurs géochimiques. Le regroupement des échantillons obtenu par la classification K-means met en évidence l'existence de trois groupes hydrochimiques distincts. Ces groupes reflètent

probablement des conditions hydrogéologiques différentes, notamment en termes de lithologie, de temps de résidence des eaux et de degré d'interaction eau-roche. La classification hiérarchique et la carte thermique confirment également cette structuration des données en mettant en évidence des similitudes hydrochimiques entre certaines stations. Les eaux caractérisées par des concentrations plus élevées en ions majeurs se distinguent clairement des eaux moins minéralisées, ce qui suggère l'existence de différents stades d'évolution géochimique au sein du système aquifère. Cette diversité hydrochimique peut être liée à la variabilité des formations géologiques traversées par les eaux souterraines, ainsi qu'aux conditions de recharge et de circulation des eaux dans la région étudiée. Dans l'ensemble, les résultats obtenus indiquent que la composition chimique des eaux souterraines dans le nord de Madagascar est principalement contrôlée par des processus naturels tels que l'altération des roches, les interactions eau-roche et les échanges ioniques. La combinaison des approches hydrochimiques classiques et des méthodes statistiques multivariées permet ainsi de mieux comprendre les mécanismes géochimiques responsables de la minéralisation et de la classification hydrochimique des eaux dans cette région. Ces résultats confirment l'intérêt d'une approche intégrée combinant analyses chimiques, représentations graphiques et outils statistiques pour l'étude des systèmes aquifères complexes [16].

CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser l'évolution géochimique et la classification hydrochimique des eaux minérales et thermo minérales dans la partie nord de Madagascar à partir d'analyses physico-chimiques, de diagrammes hydrochimiques et d'approches statistiques multivariées. Les résultats obtenus montrent une variabilité notable de la composition chimique des eaux entre les différentes stations étudiées, traduisant l'influence des conditions géologiques, hydrologiques et géochimiques locales. Les analyses physico-chimiques mettent en évidence des concentrations variables en ions majeurs, notamment en sodium, calcium, magnésium, chlorures et carbonates, indiquant des degrés de minéralisation différents selon les sites. Les valeurs du résidu sec à 105 °C, comprises entre environ 480 mg/L et 1480 mg/L, confirment cette variabilité de la minéralisation des eaux souterraines. L'analyse de la relation entre les chlorures et les solides dissous totaux révèle une corrélation positive, suggérant que les ions chlorure contribuent de manière significative à la salinité globale des eaux. Les diagrammes hydrochimiques de Schoeller et de Piper ont permis d'identifier les faciès hydrochimiques dominants et de mieux comprendre les processus géochimiques responsables de la composition des eaux. Les résultats indiquent une prédominance des faciès sodiques chlorurés et bicarbonatés dans plusieurs stations, ce qui reflète l'influence des interactions eau-roche, de l'altération des formations géologiques et des processus d'échanges ioniques au sein des aquifères. L'application des méthodes statistiques multivariées, notamment la classification hiérarchique, l'analyse en composantes principales et l'algorithme de classification K-means, a permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs groupes hydrochimiques distincts. Ces regroupements reflètent des différences dans les conditions hydrogéologiques, le temps de résidence des eaux et les processus géochimiques contrôlant leur évolution. Dans l'ensemble, cette étude souligne l'importance d'une approche intégrée combinant analyses chimiques, représentations hydrochimiques et outils statistiques pour comprendre la dynamique géochimique des eaux souterraines. Les résultats obtenus apportent ainsi une contribution à la connaissance des caractéristiques hydrochimiques des ressources en eau dans le nord de Madagascar et constituent une base scientifique utile pour la gestion durable et la protection de ces ressources hydriques.

Référence

- [1] Freeze, R.A. & Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, New Jersey.
- [2] Appelo, C.A.J. & Postma, D., 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd ed. CRC Press, Rotterdam.
- [3] Edmunds, W.M. & Smedley, P.L., 2000. Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. *Applied Geochemistry*, 15, pp.737–752.
- [4] Hem, J.D., 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper.
- [5] Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of the American Geophysical Union*, 25, pp.914–928.
- [6] Schoeller, H., 1962. Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique. Paris: Masson.
- [7] Shrestha, S. & Kazama, F., 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji River basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22, pp.464–475.
- [8] McKinney, W., 2010. Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp.56–61.
- [9] Harris, C.R. et al., 2020. Array programming with NumPy. *Nature*, 585, pp.357–362.
- [10] Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science and Engineering*, 9(3), pp.90–95.
- [11] Waskom, M.L., 2021. Seaborn: statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, 6(60), p.3021.
- [12] Virtanen, P. et al., 2020. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, pp.261–272.
- [13] Pedregosa, F. et al., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, pp.2825–2830.
- [14] Appelo, C.A.J. & Postma, D., 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd ed. CRC Press, Rotterdam.
- [15] Edmunds, W.M. & Smedley, P.L., 2000. Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. *Applied Geochemistry*, 15, pp.737–752.
- [16] Shrestha, S. & Kazama, F., 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji River basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22, pp.464–475.