

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

| Open Access Journal |

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

Volume (x) - Issue 2 – October 2025

WATER-BIODIVERSITY-CLIMATE'2025



Water-Biodiversity-Climate:

Water resources modeling uses Geographic Information System

Editor-in-Chief: Pr Noureddine Gaaloul

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and
the Environment in Tunisia (*ASTEE.Tunisie*)

International Scientific Committee (ISC-WBC'2025)

Noureddine Gaaloul	Prof. University of Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisia)
Hamadi Habaieb	Prof. University of Carthage – IRESA -INAT (Tunisia)
Zouhaier Hlaoui	Prof. University of Tunis - Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (Tunisia)
Adel Kharroubi	Prof. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)
Rachid Boukchima	M.Cnf. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)
Noureddine Hamdi	Prof. Université de Gabès – ISSTEG (Tunisia)
Taoufik Hermassi	M.Cnf. University of Carthage – IRESA -INRGREF (Tunisia)
Mohamed Habib Sellami	M.Cnf. University of Jendouba – IRESA- ESIM (Tunisia)
Hechmi Belaid	M. Assistant, University of Jendouba -IRESA- ESIM (Tunisia)
Rim Katlane	M.Cnf. University of Manouba - Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités (Tunisia)
Ibrahim Amadou Traoré	Expert Hydrogeologist
Mohamed Meddi	Prof. ENSH, (Algeria)
Azzedine Hani	Prof. Univ. Annaba (Algeria)
Larbi Djabri	Prof. Univ. Annaba (Algeria)
Salah Eddine Ali Rahmani	Prof. University Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algeria)
Saadane Djorfi	Prof. University of Annaba (Algeria)
Mohammed Achite	Prof. University of Chlef (Algeria)
Abdelbalim Yahiaoui	Prof. University of Bechar (Algeria)
Mohamed Bessenasse	Prof. University of Saad Dahlab- Blida (Algeria)
Benabadji Noury	Prof. University of Tlemcen (Algeria)
Abdessamad Merzouk	Prof. University of Tlemcen (Algeria)
Beloindou Laroussi	Prof. University Badji Mokhtar, Annaba (Algeria)
Abdelhalim Yahiaoui	M.Cnf. Univ. Bechar (Algeria)
Guergaz Saâdia	M.Cnf. University of Biskra (Algeria)
Guendouz Abdelhamid	M.Cnf. University of Blida 1 (Algeria)
Khoualdia Wacila	M.Cnf. University of Souk-Abrus (Algeria)
Bekacem Bekhoussa	M.Cnf. University Mustapha Stambouli de Mascara (Algeria)
Ali Essahlaoui	Prof. University Moulay IsmailMeknes ((Morocco))
El Ouali Abdelhadi	Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco))
Abdellah El Hmoudi	Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco))
Imad Mansouri	Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco))
Abdelmajid Moumen	Prof. University Nadour ((Morocco))
Mhamed Amyay	Prof. University ofFès ((Morocco))
Abdelaziz Abdallaoui	Prof. University Moulay Ismail ((Morocco))
Nadia Lahbou	M.Cnf. University Mohamed V Rabat ((Morocco))
Amadou Thierno Gaye	Prof. University Cheikh Anta Diop, Dakar, (Senegal)
Sonou Sambou	Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Senegal)
Diop Ngom Fatou	Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Senegal)
Abdoulaye Faty	Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST ((Senegal))
Soro Nagnin	Prof. UFR STRM (Ivory Coast)
Gnamba Franck Maxime	Prof. UFR STRM (Ivory Coast)
Soro Nagnin	Prof. UFR STRM (Ivory Coast)
Cush Ngongo Lunesi	Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)
Koussohoun A. Leonard	Prof. FLLAC/ UAC (Congo)
Koumassi Dégla Herré	Prof. LACEEDE/UAC (Benin)
Hamma Yacouba	Prof. 2iE (Burkina Faso)
Harouna Karambiri	Prof. 2iE (Burkina Faso)
Lienou Gaston	Prof. Univ. Yaoundé (Cameroun)
Gnandi Kissao	Prof. Univ. Lomé (Togo)
Hamadoun Bakar	Prof. Univ. ENI-abt (Malí)
Salina Sanou	Pan African Climate Justice Alliance (Kenya)
Saeid Eslamian	Prof. University of Isfahan (Iran)
Amadou Gaye	Prof. CR4D (Ethiopia)
Richard Anyab	Prof. CR4D (Ethiopia)
Benjamin Lamprey	Prof. CR4D (Ethiopia)
Aqeel Al-Adili	Prof. Univ. Technology (Iraq)
Mountaz Razack	Prof. University of Poitiers (France)
Lucila Candella	Prof. Univ. Catalonia (Spain)
Fotis K. Plakas	Prof. Univ. Thrace (Greece)
Andreas Kallioras	Prof. Univ. Athens (Greece)
Christoph Schütt	Prof. Tech.Univ. Darmstadt (Germany)
Jean-François Delige	Prof. University of Liège (Belgium)

Preface



L'eau est le principal vecteur par lequel les effets du changement climatique se feront sentir, et la clé de la réussite des stratégies d'adaptation. On observe d'ores et déjà des modifications des systèmes d'eau douce un peu partout dans le monde, et les risques liés à l'eau – pénurie, excès, manque de fiabilité des approvisionnements ou mauvaise qualité – devraient aller en s'amplifiant. Ces modifications, qui peuvent être progressives ou brutales, risquent de compromettre la sécurité de l'eau à long terme et de rendre l'adaptation de plus en plus coûteuse pour les gouvernements à mesure que le temps passe.

La biodiversité fournit des biens et services indispensables à la fois pour s'adapter aux effets du changement climatique (les zones humides constituent une protection naturelle contre les inondations, la végétation permet d'améliorer localement la quantité et la qualité de l'eau, les espaces verts permettent d'améliorer le micro climat et la qualité de l'air dans les villes, etc.) et pour atténuer les changements climatiques, grâce notamment à l'absorption de CO₂ par les écosystèmes marins et terrestres.

L'augmentation des risques liés à l'eau et l'incertitude grandissante qui entoure la situation future ne font qu'amplifier les défis à relever en matière de sécurité de l'eau et compliquer les décisions de planification, de gestion et d'investissement dans le domaine de l'eau. Pour s'adapter à la nouvelle situation, il faudra des stratégies d'investissement mieux étayées et une gouvernance adaptive de l'eau tenant compte de la variabilité du climat et limitant le plus possible les problèmes potentiellement coûteux d'inadéquation entre les hydrossystèmes et le climat futur.

Le changement climatique est en passe de remodeler l'avenir dans le domaine de l'eau. Il agrave les tensions existantes et complique la planification, la gestion et l'investissement futurs dans les infrastructures de l'eau. Pour en limiter les conséquences néfastes et le coût, et pour exploiter les opportunités éventuelles, il faudra tenir compte de cette nouvelle donne, autrement dit s'adapter. L'adaptation exige de la souplesse, or le domaine de l'eau se caractérise par des infrastructures à longue durée de vie dont les coûts irrécupérables sont élevés. Une vision prospective est indispensable, or les projections climatiques relatives aux principaux paramètres concernant l'eau sont peu fiables à l'échelle locale. Une gouvernance adaptive de l'eau est nécessaire, or l'inertie et une gouvernance médiocre sont davantage la norme que l'exception dans le domaine de l'eau.

La biodiversité – la variété de la vie sur Terre – nous fournit des services écosystémiques essentiels à la santé humaine, au bien-être et à l'économie. Pourtant, la biodiversité terrestre, marine et d'eau douce décline rapidement, menaçant sociétés et économies.

Noureddine Gaaloul

Professor of higher education and full Researcher in the National Institute of Research in Rural Engineering of Water and Forestry (University of Carthage- IRESA- INRGREF-Tunis).

Founder and Chief Editor International Journal Water Science and Environment Technologies
President of Scientific and Technical Association for Water and the Environment in Tunisia (ASTEE-Tunisie)

www.jistee.org

Preface



Water is the primary channel through which the effects of climate change will be felt and the key to successful adaptation strategies. Changes in freshwater systems are already occurring around the world, and water-related risks—scarcity, excess, unreliable supply, or poor quality—are expected to increase. These changes, which can be gradual or abrupt, risk compromising long-term water security and making adaptation increasingly costly for governments over time.

Biodiversity provides essential goods and services both for adapting to the effects of climate change (wetlands provide natural protection against flooding, vegetation helps improve the quantity and quality of water locally, green spaces help improve the microclimate and air quality in cities, etc.) and for mitigating climate change, particularly through the absorption of CO₂ by marine and terrestrial ecosystems.

Rising water risks and growing uncertainty about the future only amplify water security challenges and complicate water planning, management, and investment decisions. Adapting to the new situation will require better-informed investment strategies and adaptive water governance that takes into account climate variability and minimizes potentially costly mismatches between hydrosystems and the future climate.

Climate change is reshaping the future of water. It is exacerbating existing tensions and complicating future planning, management, and investment in water infrastructure. Limiting adverse impacts and costs, and seizing potential opportunities, will require adapting to this new reality. Adaptation requires flexibility, and the water sector is characterized by long-lived infrastructure with high sunk costs. A forward-looking approach is essential, and climate projections for key water parameters are unreliable at the local level. Adaptive water governance is needed, and inertia and poor governance are more the norm than the exception in the water sector.

Biodiversity – the variety of life on Earth – provides us with ecosystem services vital for human health, well-being and economies. Yet, terrestrial, marine and freshwater biodiversity is declining rapidly, threatening societies and economies.

Noureddine Gaaloul

Professor of higher education and full Researcher in the National Institute of Research in Rural Engineering of Water and Forestry (University of Carthage- IRESA- INRGREF-Tunis).

Founder and Chief Editor International Journal Water Science and Environment Technologies
President of Scientific and Technical Association for Water and the Environment in Tunisia (ASTEE Tunisia)

www.jistee.org



International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)
Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE)

www.jistee.org

|Open Access Journal|
ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688
10 Volumes, 35 Issues, (435 Papers) and 1 Book

Book (01): Why green water saving is not fully rewarded by farmers in mount kenya region
A research frontier of pure: applied sciences and engineering. 120 pages. August 2022



Volume (x): 4 Issues (33 Papers) Water -Biodiversity-Climate '2025

Issue 1 – March 2025 (10 Papers) *Water Biodiversity and Climate Change*

Issue 2 – October 2025 (6 Papers) *Water-Biodiversity-Climate: Water resources modeling uses Geographic Information System*

Issue 3 – November 2025 (7 Papers) *Water-Biodiversity-Climate: Biodiversity, Sustainable Water Security and Climate Change*

Issue 4 – December 2025 (11 Papers) *Water-Biodiversity-Climate: Sustainable Qualitative and quantitative characterization of water resources*

Volume (ix): 4 Issues (25 Papers) Water -Agriculture-Climate '2024

Issue 1 – July 2024 (6 Papers) *Water Agriculture and Climate Change*

Issue 2 – October 2024 (10 Papers) *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security Qualitative and quantitative characterization of water resources*

Issue 4 – November 2024 (4 Papers): *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing*

Issue 4 – Decembre 2024 (5 Papers) *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security: Water-Agriculture and Food Security and Climate Change*

Volume (viii): 4 Issues (27 Papers) Water -Drought-Climate '2023

Issue 1 – March 2023 (6 Papers) *Water Scarcity, Rising Temperatures. Facing Climate Change, from the Fight to Adaptation?*

Issue 2 – December 2023 (11 Papers) *Water -Drought-Climate '2023 Integrated Water Resources Management*

Issue 4 – December 2023 (6 Papers) *Water -Drought-Climate '2023 Reuse of treated wastewater in agriculture*

Issue 4 – December 2023 (7 Papers) *Water -Drought-Climate '2023 Climate Change and Adaptation*

Volume (vii): 4 Issues (32 Papers) Water -Health-Climate '2022

Issue 1 – March 2022 (7 Papers) *Climate change: What effects on our health?*

Issue 2 – June 2022 (10 Papers) *Impacts of Climate Change on Water, Ecosystems and Human Health*

Issue 4 – September 2022 (7 Papers) *Water, Climate, Health, Disparities: Solutions*

Issue 4 – December 2022 (8 Papers) *Climate Changes Health: Water Quality and Accessibility*

Volume (vi): 4 Issues (31 Papers) Water -Agriculture-Climate '2021

Issue 1 – April 2021 (11 Papers) *Faced with climate and food issues: Reinventing Water-Agriculture-Climate relations*

Issue 2 – June 2021 (6 Papers) *Climate Change, Water, Agriculture - What trajectories?*

Issue 4 – September 2021 (6 Papers) *Climate Change, Water and Agriculture Towards Resilient Systems*

Issue 4 – December 2021 (8 Papers) *Climate Change, Water and Agriculture: What Strategies?*

Volume (v): 2 Issues (27 Papers) Water -Climate '2020

Issue 1 – September 2020 (14 Papers) *Water Resources and Climate Change.*

Issue 2 – Décembre 2020 (13 Papers) *Integrated Water Resources Management and Climate Change*

Volume (iv): 2 Issues (68 Papers) Water -Energy-Climate '2019

Issue 1 – December 2019 (56 Papers) *Integrated Water Resources Management*

Issue 2 – December 2019 (12 Papers) *Renewable Energies and climate change*

Volume (iii): 3 Issues (103 Papers) Water -Environement-Climate '2018

Issue 1 – April 2018 (62 Papers) *Water Resources Management*

Issue 2 – August 2018 (34 Papers) *Environmental Earth Sciences*

Volume (ii): 5 Issues (53 Papers) Water -Society-Climate '2017

Issue 1 – February 2017 (17 Papers) *Qualitative and quantitative characterization of water resources.*

Issue 2 – April 2017 (8 Papers) *Assessment of water resources under pressure from humanity and climate change*

Issue 4 – June 2017 (9 Papers) *Vulnerability of Water Resources to Climate Change.*

Issue 4 – August 2017 (8 Papers) *Modeling the impact of anthropogenic and climatic changes on water resources*

Issue 5 – October 2017 (11 Papers) *Numerical Modeling in Hydraulics, Hydrology and Hydrogeology*

Volume (i): 3 Issues (36 Papers) Water -Climate '2014

Issue 1 – April 2014 (17 Papers) *Surface Water Resources in the Mediterranean Region.*

Issue 2 – August 2014 (8 Papers) *Ground Water Resources in the Mediterranean Region*

Issue 4 – December 2014 (11 Papers) *Climate Change in the Mediterranean Region*

Copyright © 2025 – Jistee Tous droits réservés



Table of Contents

Khaled Taghouti (Département de Génie Civil, Institut Supérieur des études technologiques de Siliana. Tunisie), <i>Arbi Chafai</i> Etude de stabilité d'une retenue collinaire sur Oued Sahbi (Délégation Rouhia- Tunisie)	6
Azzedine Hani (Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable, University Badji Mokhtar Annaba, Algérie) Samir Hani, Nabil Bougerira, Larbi Djabri and Hicham Chaffai (Approvisionnement en eau et prévision de l'offre et de la demande en eau dans une région du Sud de la Méditerranée à l'aide du modèle WEAP	16
Chafai Arbi (Université de Tunis El Manar, Tunis) <i>Khaled Taghouti</i> . Évaluation spatio-temporelle de l'érosivité des pluies (Facteur-R) en utilisant l'indice d'Arnoldus dans le bassin versant d'oued Siliana (Tunisie)	21
Prosper Djoldebne (Univerté de Maroua, Cameroun, Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines, Maroua Cameroun) <i>Lucas Bouba, Felix Zieba Watang, Sylvain Daoua Aoudou</i> . Caractérisation hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du socle du bassin versant du mayo-kani à yolde (extreme-nord) cameroun).	29
Samir Hani (Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable, University Badji Mokhtar Annaba, Algérie) <i>Imad Eddine Bouznad, Noureddine Guezgouz, Nabil Bougerira and Azzedine Hani</i> . Apport du modèle WEAP dans l'étude prospective de la balance offre/demande en eau dans le bassin de la Seybouse Maritime	49
Taha-Hocine Debieche (Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel - Algérie) <i>Drouiche Abdelmalek, Boulatrour Bouchra, Bounneche Ablam and Rouikha Youcef</i> . Caractérisation et modélisation conceptuel du fonctionnement des eaux thermo-minérales. Cas de la région de Mila (NE algérien)	55

www.istee.org

|Open Access Journal|

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688



Etude de stabilité d'une retenue collinaire sur Oued Sahbi (Délégation Rouhia- Tunisie)

Khaled Taghouti ¹, Arbi Chafai ²

¹ Département de Génie Civil, Institut Supérieur des études technologiques de Siliana. Tunisie

² Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunisie

Résumé

Depuis des temps immémoriaux, les hommes ont façonné la terre pour édifier des digues en terre ou en béton le long des cours d'eau dans les parties amont des bassins versants. Ces ouvrages hydrauliques servent à l'alimentation en eau potable, à la production d'énergie électrique et à l'irrigation des cultures.

Les barrages et lacs collinaires sont des constructions particulières qui, en cas de rupture, peuvent entraîner des pertes de vies humaines et causer d'importants dégâts matériels. Afin d'éviter ces dommages, il faut garantir la sécurité de l'ouvrage et prévenir les risques de glissement, de rupture ou d'érosion. Il faut également identifier toute anomalie du comportement des ouvrages ainsi que de leurs fondations et de leurs environs. En effet, la stabilité des digues en terre est influencée par plusieurs facteurs, tels que la géométrie, les propriétés des matériaux utilisés et les forces qu'ils subissent.

Ce travail a pour but d'évaluer la stabilité d'une retenue collinaire sur Oued Sahbi (Délégation Rouhia-Tunisie) à différentes étapes : à la fin de construction, au moment du remplissage et lors de la vidange. Cela est réalisé via une modélisation numérique, en utilisant le logiciel Plaxis.

Mots clés: Retenue collinaire, Stabilité, Digue, Modélisation numérique, Logiciel Plaxis, Tunisie.

Stability study of a hill reservoir on Oued Sahbi (Rouhia delegation - Tunisia)

Abstract

Since time immemorial, man has shaped the earth to build earthen or concrete dykes along watercourses in the upstream parts of watersheds. These hydraulic structures are used to supply drinking water, generate electricity and irrigate crops.

Dams and hill lakes are special constructions, which, in the event of failure, can lead to loss of life and significant material damage. To avoid such damage, it is essential to guarantee the safety of the structure and prevent the risk of slippage, failure or erosion. We must also identify any anomalies in the behavior of the structures, their foundations and their surroundings. The stability of earth embankments is influenced by a number of factors, such as geometry, the properties of the materials used and the forces to which they are subjected.

The aim of this study is to assess the stability of a hill reservoir on Oued Sahbi (Rouhia-Tunisia) at various stages: at the end of construction, during filling and during emptying. This was achieved by means of numerical modelling using Plaxis software.

Keywords: Hill reservoir, Stability, Dike, Numerical modeling, Plaxis software, Tunisia..

¹ Corresponding author: Khaltag@hotmail.fr

I. INTRODUCTION

Une digue est un ouvrage hydraulique longitudinal, le plus souvent constitué en remblai de matériaux terreux ou rocheux, érigé le long d'un cours d'eau, d'un plan d'eau ou du littoral afin de retenir, contenir ou détourner les eaux. Sa fonction principale est d'assurer la protection des terres agricoles, des infrastructures et des populations contre les risques d'inondation, mais elle peut également contribuer à l'aménagement hydraulique, à la gestion des niveaux d'eau et à la régulation des écoulements [1-2-3]. Ce type d'ouvrage est étroitement lié aux enjeux de sécurité hydrique et de développement durable. Toutefois, leur conception et leur exploitation nécessitent une prise en compte rigoureuse des dimensions environnementales, géotechniques et socio-économiques. En effet, bien qu'ils offrent des bénéfices considérables en matière de protection contre les inondations, d'approvisionnement en eau et d'aménagement du territoire, ces ouvrages peuvent également générer des impacts négatifs. Parmi ceux-ci figurent la modification des écosystèmes aquatiques, l'érosion en aval due à l'altération du régime hydrologique, ainsi que le risque de rupture, dont les conséquences peuvent être catastrophiques pour les populations et les infrastructures [4-5]. Ainsi, l'étude de la stabilité des digues repose sur une approche pluridisciplinaire combinant la géotechnique, l'hydraulique et la mécanique des sols. De nombreux travaux scientifiques mettent en évidence la nécessité d'une analyse approfondie des conditions de stabilité afin de prévenir les défaillances. Comme le souligne Fell et al., [6], l'évaluation des risques liés aux digues et barrages doit être systématique et intégrée dans une gestion globale de la sécurité des ouvrages.

Dans ce cadre, cette étude vise à évaluer la stabilité d'une retenue collinaire en terre, implantée sur Oued Sahbi, en s'appuyant sur un modèle de comportement intégré dans le logiciel Plaxis.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Site d'étude : Le site de la retenue collinaire sur Oued Sahbi est situé au Nord-Ouest de la Tunisie dans la zone de Drablia et Foundouk debbiche de la délégation Rouhia du gouvernorat de Siliana. Elle est située à 7 km de la délégation et à 70 km de celui du gouvernorat de Siliana. L'axe de la digue est défini selon la carte la carte topographique du Djebel Barbrou - feuille N° 61 à l'échelle 1/ 50. 000 par les coordonnées Carthage UTM ci-après : X=509869.89 m ; Y= 3947578.55 m. La cuvette du bassin versant, montre la succession lithologique d'un empilement de facies formé par des alternances d'argile à lumachelles et de calcaire gréseux en bancs métriques et demi-métriques. Le pendage des couches est de 20° à 25° vers l'amont (Fig.3)

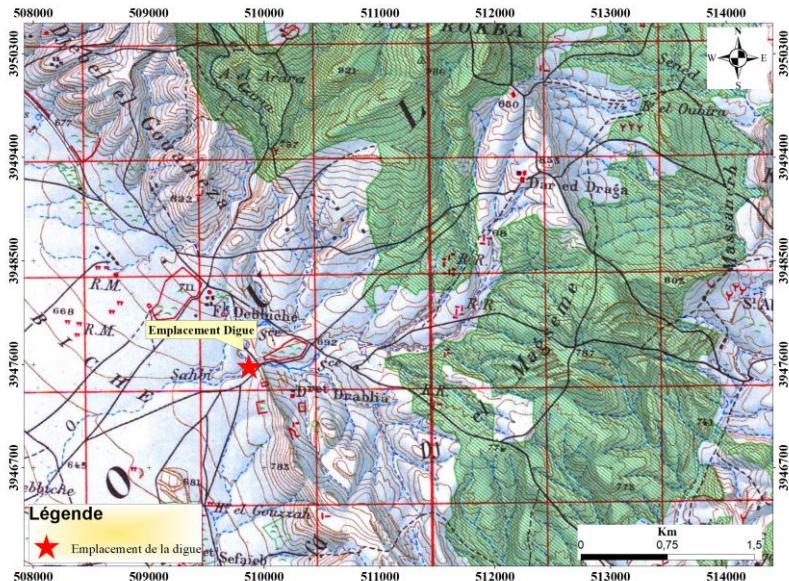


Fig.1 - Situation géographique de la retenue collinaire sur oued Sahbi (Extrait de la carte topographique du Djebel Barbrou, Echelle 1/50 000)

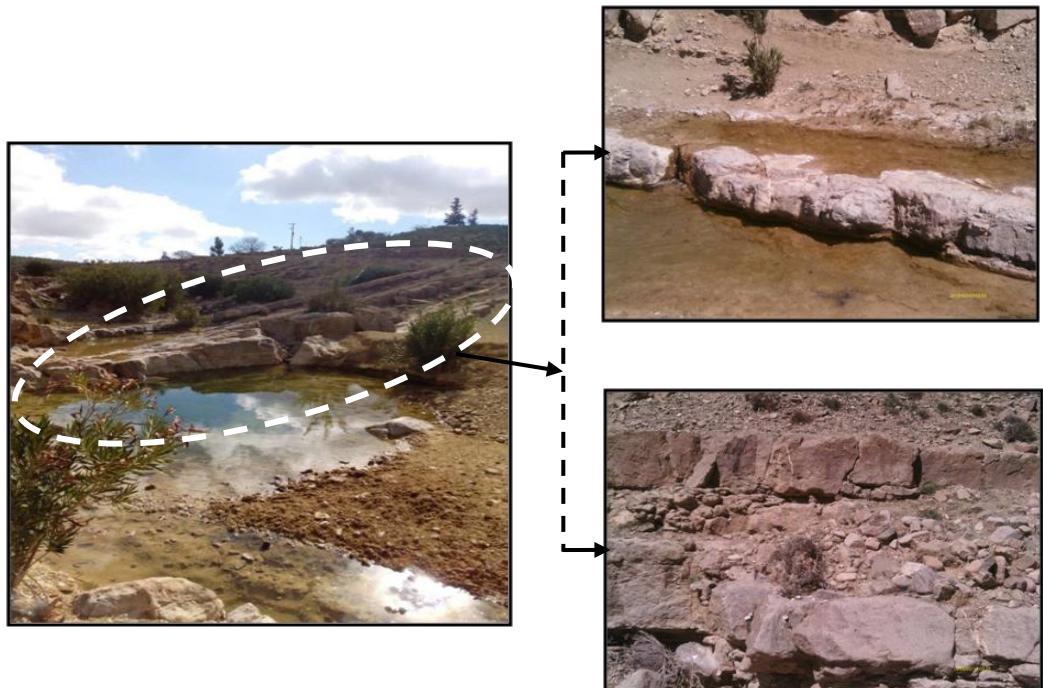


Fig.2 - Alternances d'argile à lumachelles et de calcaire gréseux en bancs métriques et demi-métriques dans la partie aval du bassin versant d'oued Sahbi (Cuvette du bassin**).**

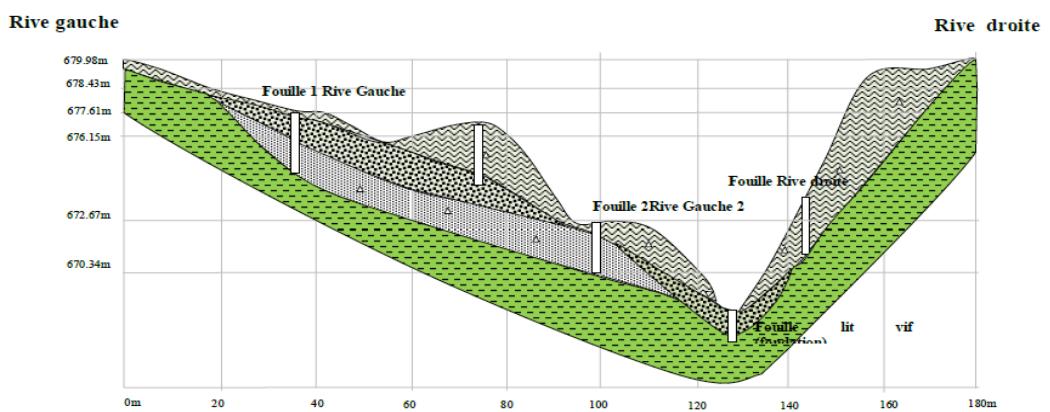


Fig.3 - Coupe géologique au niveau de l'axe de la digue du bassin d'oued Sahbi

La retenue collinaire sur oued Sahbi est un barrage en terre homogène muni d'un drain horizontal pour collecter les eaux d'infiltration dont les caractéristiques géométriques sont :

- Hauteur maximale : 10 m
- Longueur en crête : 185 m
- Largeur en crête : 4,0m
- Pentes extérieures
- Amont : 3H : IV
- Aval : 2,5H : IV
- Volume du remblai HTN : 22 mille m³

Suite à une étude géotechnique menée au niveau de la digue ainsi que sur les deux rives du bassin versant d'oued Sahbi, les caractéristiques mécaniques de la retenue ont été évaluées et sont synthétisées dans le tableau I.

Tab.I- Données mécaniques de la retenue collinaire

	A court terme	A long terme
Angle de frottement φ_u	$\varphi_u = 32^\circ$	$\varphi_u = 20^\circ$
Poids volumique γ_h	$\gamma_h = 16.8 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_h = 16.8 \text{ kN/m}^3$
Cohésion C_u	$C_u = 68 \text{ kN/m}^2$	$C_u = 42 \text{ kN/m}^2$

2.3. Méthodologie

La modélisation par **éléments finis**, réalisée sous **PLAXIS 8.2**, selon le modèle Mohr-Coulomb, permet d'analyser le comportement du barrage, de sa fondation et de la retenue d'eau à travers l'évaluation des contraintes et des déformations.

Plus élaborée que le calcul à l'équilibre limite, cette approche exige une maîtrise rigoureuse des paramètres d'entrée et une validation par des calculs simplifiés.

Le modèle 2D, basé sur un maillage triangulaire adapté et sur les propriétés géomécaniques issues des essais de laboratoire, intègre les différentes phases de construction et la mise en eau, ainsi que les effets liés à l'eau interstitielle.

L'obtention du facteur de sécurité repose sur la réduction progressive des paramètres de résistance jusqu'à perte de convergence, puis sa comparaison avec les coefficients de sécurité usuels.

3. Résultats et discussion

3.1. Procédure de modélisation

L'étude réalisée sur la retenue collinaire d'oued Sahbi a permis d'analyser le comportement géomécanique de l'ouvrage et de sa fondation au cours des différentes étapes de sa vie : état initial, construction, remplissage et vidange rapide. L'ensemble des simulations a été effectué à l'aide du modèle Mohr-Coulomb représentant fidèlement la géométrie du remblai, les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs, ainsi que les conditions hydrauliques aux limites.

Phase 0 : état initial

Cette phase correspond à la condition du sol avant le démarrage des travaux. L'analyse met en évidence la distribution initiale des contraintes et la pression interstitielle au niveau de la fondation (Fig 5 et 6). Ces paramètres traduisent l'état de contrainte en place et servent de référence pour l'interprétation des phases ultérieures. Les pressions interstitielles observées sont faibles et bien réparties, ce qui confirme la stabilité initiale du massif.

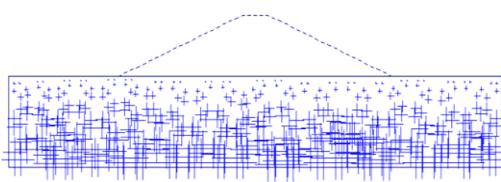


Fig.5 - Distribution des pressions interstitielles au niveau de la fondation

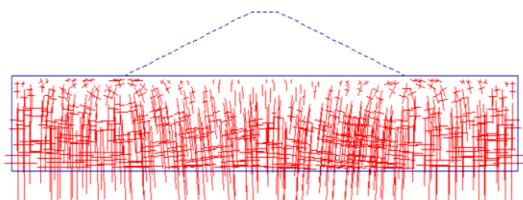


Fig.6 - Distribution des contraintes initiale

Phase I : Construction

Au cours de la phase de construction, l'empilement progressif des couches de remblai induit une augmentation des contraintes effectives, principalement **verticales** dans la partie centrale et **horizontales** au niveau des talus.

Les résultats montrent :

- Un **déplacement vertical maximal de 111,61 mm**, dû au tassemement du remblai sous son propre poids,
- Un **déplacement horizontal de 18,64 mm**, localisé principalement dans les zones latérales,
- Un **déplacement total de 111,66 mm**, correspondant au comportement élastoplastique du sol.

Le facteur de sécurité (**SF = 4,806**) obtenu par la méthode de réduction Φ -C indique une stabilité élevée de l'ouvrage pendant cette phase.

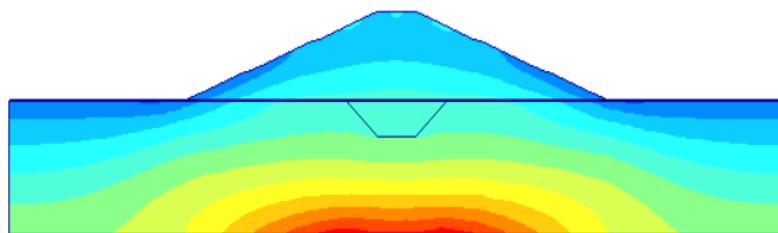


Fig.7- Distribution des contraintes effectives horizontales

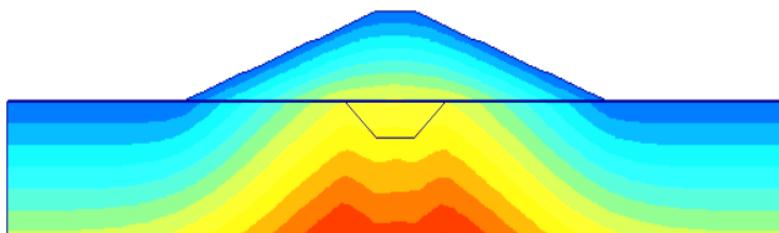


Fig.8- Distribution des contraintes effectives verticales

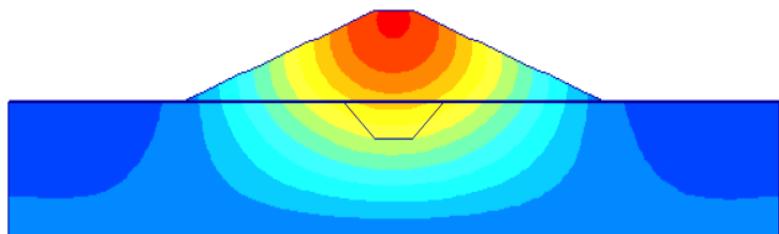


Fig. 9- Déplacements verticaux, cas fin de construction

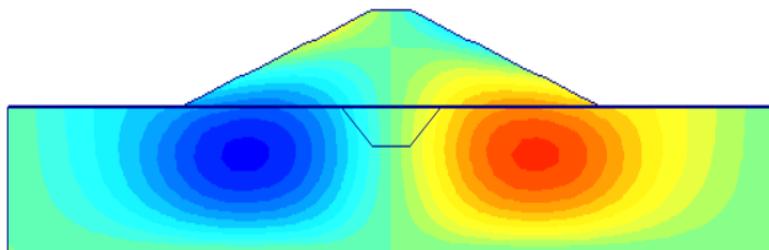


Fig. 10- Déplacements horizontaux, cas fin de construction

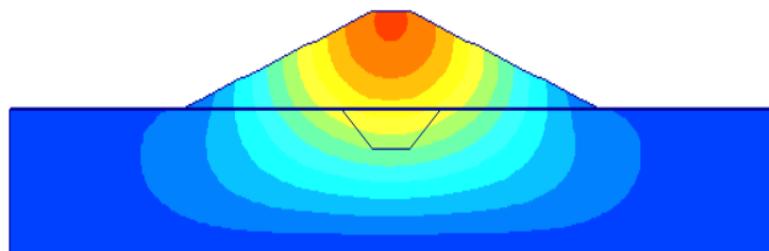


Fig. 11- Déplacements totaux, cas fin de construction

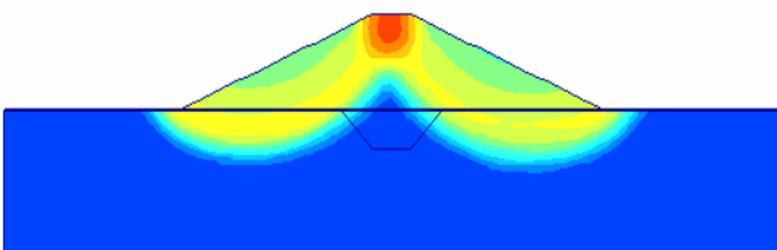


Fig. 12- Surface de glissement – Construction (Phi-C réduction)

Phase 2 : Remplissage (Fonctionnement normal)

La phase de remplissage correspond à la mise en eau du réservoir et au fonctionnement normal du barrage. L’élévation du niveau d’eau engendre une poussée hydrostatique sur le talus amont, provoquant une légère redistribution des contraintes et une augmentation des déplacements horizontaux.

Les résultats montrent :

- Un **déplacement horizontal maximal de 38,38 mm**,
- Un **déplacement vertical de 27,95 mm**,
- Un **déplacement total de 46,10 mm**,
- Un **facteur de sécurité de 4,371**.

L'analyse du champ de déplacement indique une bonne homogénéité du mouvement global du remblai, sans déformation excessive ni rupture localisée. La ligne de saturation se stabilise au sein du corps du barrage, confirmant le bon fonctionnement du système de drainage.

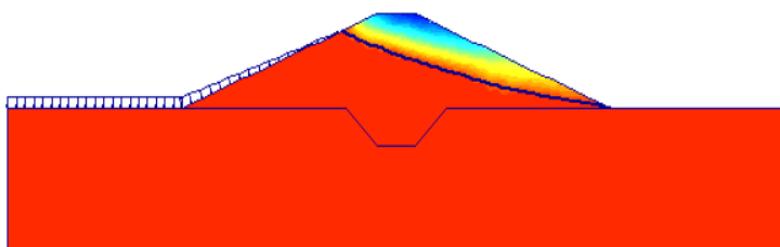


Fig. 13- Ligne de saturation et degré de saturation

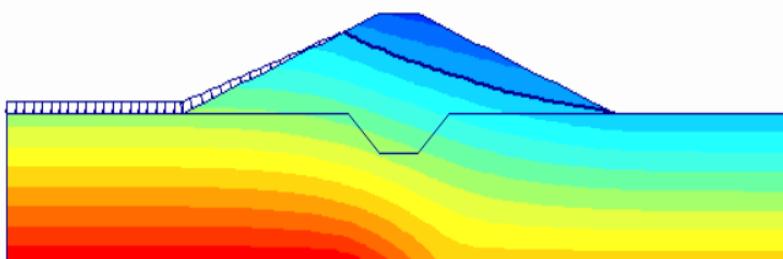


Fig. 14- Pression interstitielle

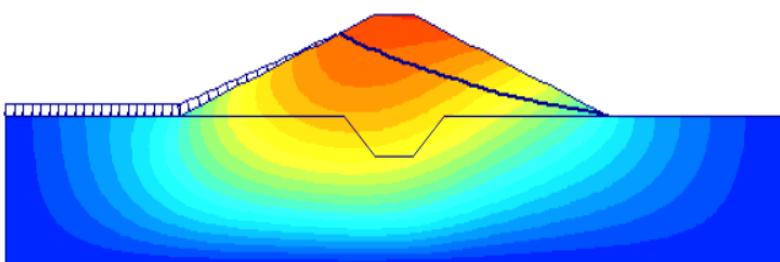


Fig. 15- Répartition des déplacements horizontaux (fonctionnement normale)

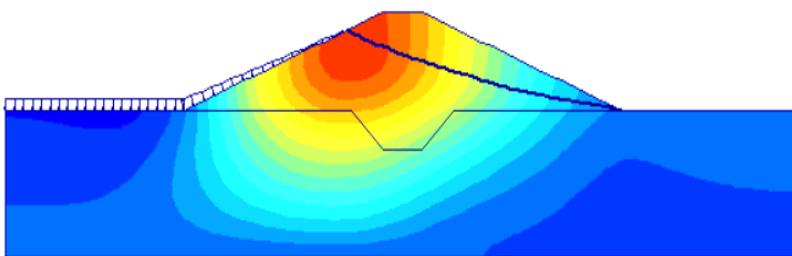


Fig. 16- Répartition des déplacements verticaux (régime permanent)

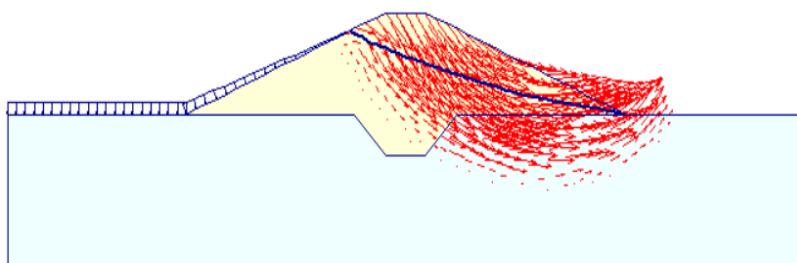


Fig. 17- Concentration des vecteurs de déplacement (Fonctionnement normal)

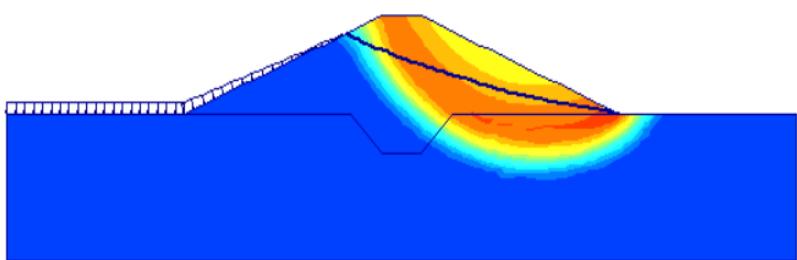


Fig. 18- Surface de glissement (Fonctionnement normal)

Phase 3 : Vidange rapide

La vidange rapide constitue une situation critique, caractérisée par une chute brusque du niveau d'eau. Cette décompression hydraulique engendre un déséquilibre temporaire entre les pressions interstitielles et les contraintes effectives, pouvant favoriser l'apparition de surfaces de glissement sur le talus amont. Les résultats obtenus montrent :

- Un déplacement horizontal de 19,78 mm,
- Un déplacement vertical de 15,79 mm,
- Un déplacement total de 24,27 mm,
- Un facteur de sécurité de 4,739.

Ces valeurs indiquent que malgré la sollicitation rapide, la stabilité globale du barrage reste satisfaisante, aucun signe de rupture ni déformation majeure n'étant observé.

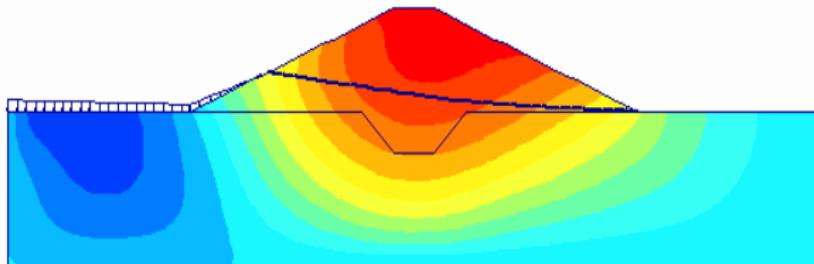


Fig. 19- Répartition des déplacements horizontaux (vidange rapide)

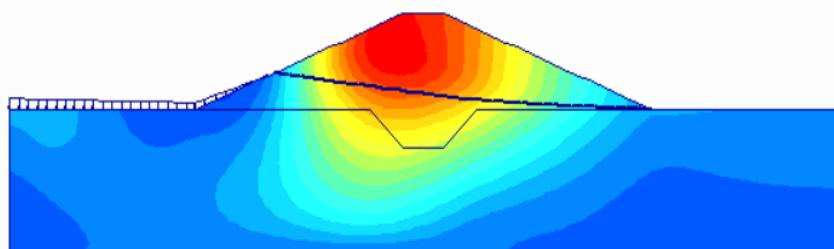


Fig. 20- Répartition des déplacements verticaux (vidange rapide)

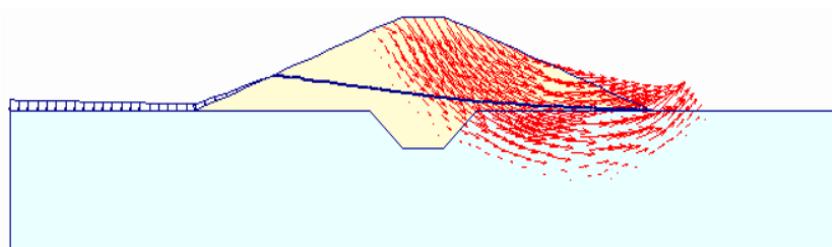


Fig. 21- Concentration des vecteurs de déplacement – vidange rapide

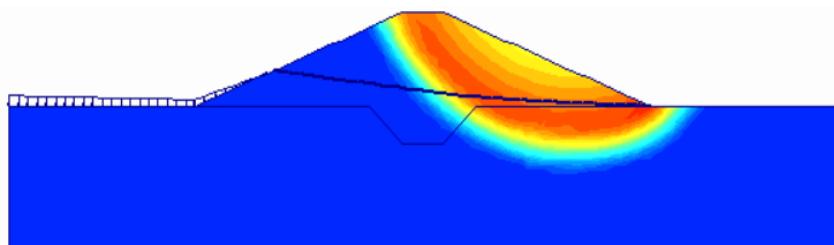


Fig. 22- Surface de glissement – vidange rapide

3.2. Modèle de comportement de Mohr-Coulomb :

Les résultats de simulation en utilisant le modèle de comportement de Mohr-Coulomb sont récapitulés dans le tableau 2.

Tab.2- Résultats de simulation de la retenue collinaire (comportement Mohr-Coulomb)

	Construction	Remplissage	Vidange Rapide
Déplacement Horizontal	18.64 mm	38.38 mm	19.78 mm
Déplacement Vertical (T)	111.61 mm	27.95 mm	15.79 mm
Déplacement Total	111.661 mm	46.1 mm	24.27 mm
Facteur de sécurité (SF)	4.806	4.371	4.739

L'ensemble de ces résultats (Tab.2) met en évidence une bonne performance géotechnique de la retenue d'oued Sahbi dans toutes les phases simulées. Le comportement mécanique est dominé par les tassements pendant la construction et les déformations horizontales durant le remplissage. Les facteurs de sécurité élevés (> 4) confirment que le remblai et sa fondation présentent une stabilité remarquable aussi bien en phase de construction qu'en conditions d'exploitation et de vidange rapide. Ces résultats traduisent la qualité du matériau utilisé, la bonne conception géométrique du remblai et l'efficacité du système de drainage interne, contribuant ainsi à la pérennité de l'ouvrage.

CONCLUSION

L'analyse numérique conduite sur la retenue collinaire d'oued Sahbi a permis d'évaluer de manière approfondie la stabilité et le comportement mécanique de l'ouvrage au cours de ses différentes phases de vie : construction, remplissage et vidange rapide. Les résultats obtenus ont mis en évidence que les déplacements verticaux les plus importants se produisent durant la phase de construction, traduisant le tassement du remblai sous son propre poids, tandis que les déplacements horizontaux dominent lors du remplissage en raison de la poussée hydrostatique exercée sur le talus amont. La vidange rapide, bien qu'étant une situation critique, n'a engendré que des déformations limitées et un comportement globalement stable.

Les facteurs de sécurité supérieurs à 4 pour l'ensemble des scénarios simulés confirment la stabilité satisfaisante de l'ouvrage, aussi bien pendant la mise en œuvre que durant son exploitation. Le bon comportement observé est attribuable à la qualité du matériau constitutif, à une géométrie de remblai bien adaptée et à un drainage efficace qui limite l'accumulation des pressions interstitielles.

En conclusion, la retenue collinaire d'oued Sahbi présente une stabilité globale robuste et un comportement mécanique conforme aux exigences de sécurité. Ces résultats valident la conception géotechnique adoptée et constituent une base fiable pour le suivi et la gestion future de l'ouvrage, notamment face aux variations hydrauliques et climatiques susceptibles d'affecter son équilibre à long terme.

Références

- [1] CIRIA (2007). The International Levee Handbook. London: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- [2] ICOLD (International Commission on Large Dams), 2011. Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century. CRC Press.
- [3] Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. (2017). Hydraulics of Dams and River Structures. CRC Press.
- [4] Fell, R., et al. (2003). Risk Assessment for Dam Safety. John Wiley & Sons.
- [5] Batalla, R. J., Gómez, C. M., & Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290(1–2), 117–136.
- [6] Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). Geotechnical Engineering of Dams. CRC Press.

Apprivoisement en eau et prévision de l'offre et de la demande en eau dans une région du Sud de la Méditerranée à l'aide du modèle WEAP

Azzedine Hani¹, Samir Hani, Nabil Bougerira, Larbi Djabri, Hicham Chaffai

Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable, University Badji Mokhtar Annaba, Algérie

Résumé

La province d'Annaba, située dans le nord-est de l'Algérie, est confrontée à d'importants défis environnementaux, notamment la pénurie d'eau, en raison de la forte croissance démographique et du développement socio-économique, qui entrave la réalisation des objectifs de développement durable liés à l'eau. Dans ces régions, les décideurs ont besoin de méthodologies leur permettant d'élaborer une vision commune de l'avenir des ressources en eau, de se préparer aux incertitudes et de s'adapter à des défis en constante évolution. Cette recherche vise à évaluer la disponibilité et la demande en eau selon plusieurs scénarios susceptibles de se concrétiser à l'avenir, en tenant compte de facteurs certains tels que le changement climatique, les options politiques, le développement technologique et l'évolution des comportements humains, à l'aide du modèle WEAP (Water Evaluation and Planning System). Les résultats de l'étude indiquent un écart important entre l'offre et la demande en eau, entraînant une demande non satisfaite substantielle. De plus, les résultats démontrent que la pénurie d'eau affecte déjà certaines zones agricoles. Ils soulignent la nécessité d'élaborer des stratégies à long terme pour le pire des scénarios et de renforcer la préparation à toutes les mesures d'intervention. Plusieurs solutions adaptatives sont proposées dans le cadre de cette recherche, qui peuvent aider les gestionnaires de l'eau à gérer des défis hydriques complexes et interdépendants.

Mots clés : Offre, Demande en eau, demande non satisfaite, WEAP, Annaba (Algérie)

Water supply and forecasting of water supply and demand in a region of the Southern Mediterranean using the WEAP mode

Abstract

The province of Annaba, located in northeastern Algeria, faces significant environmental challenges, particularly water scarcity, due to rapid population growth and socio-economic development, which hinders the achievement of water-related sustainable development goals. In these regions, policymakers need methodologies that enable them to develop a shared vision for the future of water resources, prepare for uncertainties, and adapt to constantly evolving challenges. This research aims to assess water availability and demand under several scenarios likely to materialize in the future, taking into account uncertain factors such as climate change, policy options, technological development, and evolving human behavior, using the WEAP (Water Evaluation and Planning System) model. The study's results indicate a significant gap between water supply and demand, resulting in substantial unmet demand. Furthermore, the findings demonstrate that water scarcity is already affecting some agricultural areas. They emphasize the need to develop long-term strategies for worst-case scenarios and to strengthen preparedness for all response measures. Several adaptive solutions are proposed in this research, which can help water managers address complex and interconnected water challenges.

Keywords: Water supply, demand, unmet demand, WEAP, Annaba (Algeria)

¹ Corresponding author: . azzedine.hani@univ-annaba.dz

INTRODUCTION

La région d'Annaba est confrontée actuellement à une grave pénurie d'eau. Elle se distingue également par de nombreux conflits d'usage entre les agriculteurs, les industriels et les services de distribution d'eau potable. De plus, la demande en eau ne cesse d'augmenter en raison de sa croissance démographique et socioéconomique importante.

Seule une démarche intégrée offre la possibilité de gérer les ressources hydriques de la région dans le respect du milieu naturel, des intérêts des citoyens et de ceux des acteurs économiques. Les recherches envisagées répondent à cette nécessité d'intégration, depuis la localisation et l'évaluation des ressources souterraines, jusqu'à la protection de leur qualité, mais tout en évaluant les éventuels effets néfastes. Elles contribuent ainsi à la mise en œuvre de la politique actuelle de développement durable, qui se déploie via un certain nombre de directives dont celle sur l'eau. Mais au-delà, elles s'inscrivent dans le plan adopté au sommet du développement durable de Johannesburg.

Dans cette recherche, on envisage d'élaborer un modèle hydrologique (WEAP) qui devrait permettre de représenter la variabilité climatique et les évolutions des usages de l'eau. WEAP permet, en effet, d'établir une relation entre les ressources en eau disponibles et leurs exploitations selon les différentes utilisations. Le modèle permet de prévoir l'impact et l'évolution des paramètres liés à l'eau comme la demande en eau, la demande non satisfaite, La mise en œuvre de ce modèle nécessite, bien entendu, une base de données riche avec une configuration du bassin étudié et ses cours d'eau, des séries de données météorologiques, des débits des oueds, etc....

MATERIELS ET METHODE

Site étudié

D'une superficie de près de 1 439 km², la région d'étude est située dans la partie Nord-Est de l'Algérie. Elle compte 6 Daïra reparties en 12 communes (Figure 1).



Figure 1. Situation de la plaine d'Annaba.

Sur le plan litho-stratigraphique, la région d'Annaba est caractérisée par des formations métamorphiques et sédimentaires allant du quaternaire au primaire. Ce sont essentiellement des graviers, argiles, sables, calcaires, gneiss...

Du point de vue Hydrogéologique, la région d'Annaba est caractérisée par 2 principaux types d'aquifères : l'aquifère superficiel, constitué d'argile sableuse et limon et un aquifère profond constitué par des graviers (Figure 2).

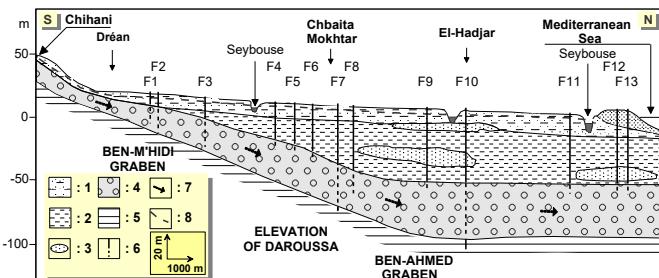


Figure 2. Coupe transversale de la plaine d'Annaba. Légende : 1 : argile sableuse (aquéfère superficiel) ; 2 : argiles détritiques plio-quaternaires ; 3 : sable ; 4 : galets et graviers (aquéfère profond) ; 5 : argile numidienne ; 6 : forage ; 7 : sens d'écoulement des eaux souterraines ; 8 : niveau piézométrique de l'aquéfère profond.

La région est caractérisée par un climat méditerranéen marqué par un hiver doux et humide ainsi qu'un été chaud et sec. Sa pluviométrie annuelle est d'environ 660 mm avec un pic de précipitations en décembre et janvier (90-110 mm). Les mois les plus froids sont Janvier et Février et les mois le plus chauds sont Juillet et Août.

Selon les estimations, la population d'Annaba est d'environ 630 000 habitants en 2010, avec une densité plus élevée dans les communes de l'Est.

La superficie agricole utile de la wilaya d'Annaba s'étend sur 48 177 ha, soit environ 35% de la superficie totale. Les cultures pratiquées comprennent le maraîchage, l'arboriculture, les grandes cultures et les cultures industrielles.

Les industries hautement concentrées de la ville comprennent l'acier, les engrains chimiques, la transformation des tomates, la transformation des métaux, les produits laitiers, ...

WEAP a été utilisé comme outil de modélisation hydrologique visant à promouvoir une gestion des ressources en eau intégrée et durable. Le logiciel permet de confronter les ressources et les besoins en envisageant plusieurs scénarios de gestion. Il est d'accès facile simple à utiliser et nécessite moins de données.

Méthodologie

Il s'agit de i) quantifier les ressources en eau superficielles et souterraines, ii) recenser les besoins en AEP, AEI et IRR, et de, iii) confronter ces ressources et ces demandes en eau à l'aide du modèle WEAP selon plusieurs scénarios sur une période allant de 2010 – 2050.

La numérisation des éléments nécessaires dans le modèle a permis d'obtenir le schéma de la figure 3.

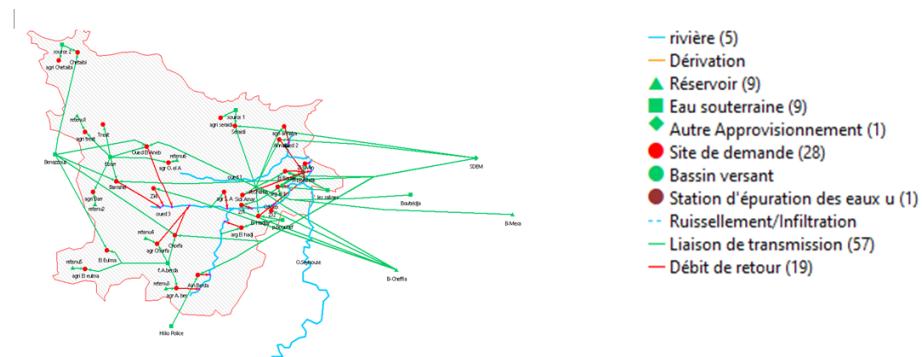


Figure 3. Représentation schématique des sites de demande et des ressources en eau du sous bassin de la basse Seybouse.

L'introduction des données relatives aux sites de demande se fait de la manière suivante :

I) Sites de demande domestique :

- Nombre habitants pour l'année de référence (2010)

- Taux d'accroissement

- Dotation : 150 litres / jour / hab

2) Sites de demande agricole :

- Superficies des terres irriguées (2010)
- Dotation : 5000 m³ / hectare / an

3) Sites de demande industriel :

- Taux de consommation annuelle d'eau des zones industrielles

Les informations liées aux différentes ressources en eau sont assignées au modèle de la manière suivante :

- Ressources en eau superficiels (les barrages (El-Tarf et les retenues collinaires)

- Ressources en eau souterraines (les forages et puits et les sources)

- Ressources en eau non conventionnelles (station de dessalement, SDEM de K. Eddraouche, El-Tarf et la station de traitement des eaux usées, STEP d'Allélick Annaba)

L'élaboration des scénarios et Hypothèses clés est la suivante :

- Scénario de référence (S-R) avec un taux d'accroissement démographique : 1 % et une augmentation des superficies irriguées et des unités Industrielles de 1 %.

- Scénario pression sur la ressource (S-PR) : avec un taux d'accroissement démographique de 3 % puis d'une augmentation de 2 % des superficies irriguées et 2 % des besoins en eau Industrielles.

- Scénario dessalement eau de mer (S-DEM) : un apport de 160.000 m³/j pour AEP dans la région d'Annaba (juillet 2025).

- Scénario Gestion de la Demande(S-GD) : avec une réduction du taux de fuites de 20 %, une économie d'eau de 20 % pour l'AEP et industrie et 30 % dans l'irrigation et réutiliser les eaux de la STEP pour l'Industrie et l'agriculture.

- Scénario Combiné(S-PR-GD-DEM)

RESULTATS ET DISCUSSION

La demande totale en eau par scénario (2050) :

La demande totale en eau par scénario en 2050 serait de 140 millions de m³ pour les scénarios SDEM et de référence (SR), de 98 millions de m³ pour le scénario gestion de la demande (SGD), de 280 millions de m³ pour le scénario pression sur la ressource (SPR) ET DE 227 millions de m³ pour l'ensemble des scénarios pression sur la ressource, gestion de la demande et dessalement (figure 5).

L'eau distribuée globale :

Selon la figure 5, les volumes d'eau distribuées seraient en 2050 de : 111 millions de m³ pour le SDEM, 81 millions de m³ pour le SGD, 110 millions de m³ pour le SPR, 197 millions de m³ pour les SPR-GD-DEM et 107 millions de m³ pour le scénario de référence (SR).

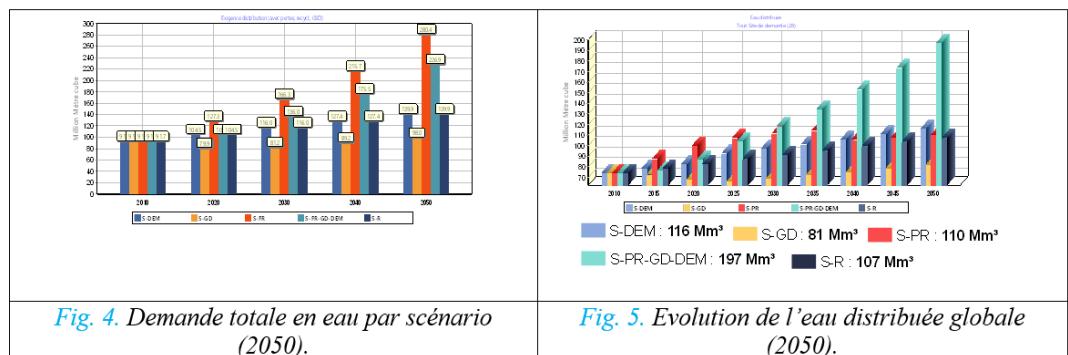


Fig. 4. Demande totale en eau par scénario (2050).

Fig. 5. Evolution de l'eau distribuée globale (2050).

Evolution de la Demande Non Satisfait (DNS) globale :

Si l'on prend la notion de DNS (Demande Non Satisfaire), égale à quantité eau demandée - la quantité distribuée, alors on obtient l'histogramme de la figure 6.

- En 2050, le manque à gagner dans le cadre du SPR serait quatre fois supérieur au scénario de référence.
- Dessalement de l'eau de mer, la réutilisation des eaux usées de la STEP et la gestion efficace de la demande réduiraient d'une manière significative la DNS.

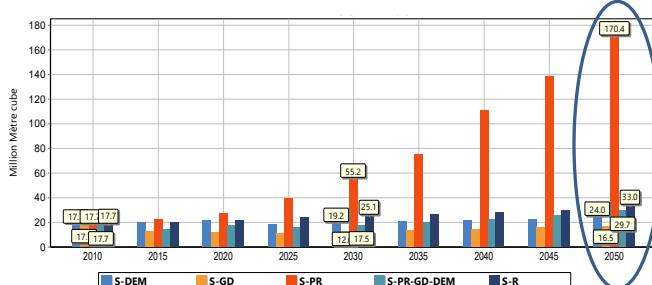


Fig. 6. Evolution de la Demande Non Satisfait (DNS) globale.

CONCLUSIONS

Avec l'apport de la station de dessalement, le problème de l'AEP de la région d'Annaba est pratiquement maîtrisé. Le scénario gestion de demande (S-GD avec utilisation des eaux de la STEP) permet de satisfaire totalement la demande en eau industrielle.

Par contre, pour l'irrigation, l'utilisation des eaux de la STEP ne permet pas de répondre complètement aux besoins. Pour y remédier, un appoint à partir du futur barrage Mahcha est indispensable.

Références

- [1] Bouklia-Hassane R., Djilali Y., El-Bari Tidjania A., 2014. Prospects for a larger integration of the water resources system using WEAP model: a case study of Oran province, Desalination and Water Treatment, Volume 57, Issue 13, March 2016, pages 5971-5980,
- [2] Hani S., 2024. Raréfaction et sécurisation de l'eau dans un bassin méditerranéen sous contraintes de réchauffement climatique et de croissance démographique. Thèse Doct. Univ ; Badji Mokhtar Annaba. 132 p.



Évaluation spatio-temporelle de l'érosivité des pluies (Facteur-R) en utilisant l'indice d'Arnoldus dans le bassin versant d'oued Siliana (Tunisie)

Arbi Chafai¹ and Khaled Taghouti²

¹Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar

²Département de Génie Civil, Institut Supérieur des études technologiques de Siliana

Résumé

L'érosivité des pluies constitue l'un des facteurs naturels les plus déterminants dans le processus d'érosion hydrique des sols. Elle traduit l'énergie cinétique des gouttes de pluie lorsqu'elles frappent la surface du sol, provoquant la désagrégation des agrégats et la dispersion des particules constitutives. Ce phénomène contribue significativement à l'augmentation du taux de sédimentation et, par conséquent, à l'envasement des ouvrages hydrauliques.

Dans ce contexte, la présente étude a été menée dans le bassin versant d'oued Siliana (1039 km^2), situé dans le Nord-ouest de la Tunisie, avec pour objectif d'estimer le facteur d'érosivité R à partir des données annuelles et mensuelles de précipitations. L'indice d'Arnoldus a été retenu pour le calcul, permettant ainsi d'élaborer une carte d'érosivité des pluies destinées à identifier et cartographier les zones sensibles à l'érosion hydrique. L'analyse des données issues des différentes stations pluviométriques révèle que les valeurs du facteur R varient entre $39 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.b^{-1}.an^{-1}$ et $52 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.b^{-1}.an^{-1}$. Sur le plan spatial, les gradients les plus marqués sont observés dans la partie Est et la partie Sud-ouest du bassin, tandis que la zone centrale enregistre des valeurs plus faibles. Le pluviomètre de Bargou indique notamment un taux d'érosivité particulièrement élevé. D'un point de vue temporel, l'érosivité se manifeste principalement au cours des saisons d'automne et d'hiver, périodes caractérisées par des précipitations plus intenses et plus érosives.

Mots clés : Facteur d'érosivité, Pluies, Indice d'Arnoldus, Bassin versant Siliana, Tunisie

Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity (R-factor) using the Arnoldus index in the Siliana River watershed (Tunisia)

Abstract

Rainfall erosion is one of the most significant natural factors in the process of water erosion of soils. It reflects the kinetic energy of raindrops as they strike the soil surface, causing the disintegration of aggregates and the dispersion of constituent particles. This phenomenon contributes significantly to increased sedimentation rates and, consequently, to the silting up of hydraulic structures.

In this context, the present study was conducted in the Siliana River watershed (1039 km^2), located in northwestern Tunisia, with the objective of estimating the erosivity factor R from annual and monthly precipitation data. The Arnoldus index was used for the calculation, enabling the development of a rainfall erosivity map to identify and map areas susceptible to water erosion. Analysis of data from the various rainfall stations reveals that R factor values vary between $39 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.b^{-1}.year^{-1}$ and $52 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.b^{-1}.year^{-1}$. In terms of spatial distribution, the most pronounced gradients are observed in the eastern and southwestern parts of the basin, while the central area records lower values. The Bargou rain gauge in particular indicates a particularly high rate of erosion. From a temporal perspective, erosion occurs mainly during the fall and winter seasons, periods characterized by more intense and erosive precipitation.

Keywords: Erosivity factor, Rainfall, Arnoldus index, Siliana watershed, Tunisia.

¹ Corresponding author: geologue.arbi@hotmail.com

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est l'un des principaux processus de dégradation des sols dans le monde. Elle se définit comme le détachement, le transport et le dépôt des particules du sol sous l'effet de la pluie et du ruissellement [1-2-3-4]. Ce phénomène compromet la fertilité des sols, réduit la productivité agricole et affecte la durabilité des écosystèmes terrestres [5]. Selon la FAO [6], plus de 75 milliards de tonnes de sols sont perdus chaque année par érosion hydrique, représentant une menace majeure pour la sécurité alimentaire et la gestion durable des terres.

Parmi les facteurs déclencheurs, l'érosivité des pluies occupe une place déterminante. Elle exprime l'agressivité des précipitations à provoquer l'érosion, en fonction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et de leur intensité [7]. L'érosivité des pluies traduit l'influence climatique dans le phénomène d'érosion des sols. Ce facteur est nettement lié aux pertes des sols [7-8]. D'après Roose et al., [9], l'érosion est contrôlée par l'évolution des conditions climatiques et lithologiques défavorables (pluies torrentielles, forte vulnérabilité des terrains marneux), auxquelles s'ajoutent des pressions liées à l'utilisation excessive inadaptée des terres agricoles.

Le facteur d'érosivité R est donc un indicateur essentiel pour quantifier le potentiel érosif d'un climat et constitue une variable clé dans les modèles prédictifs tels que l'USLE et le RUSLE [8-10]. Dans les régions méditerranéennes et semi-arides, marquées par des précipitations intenses mais irrégulières, l'érosivité atteint des valeurs particulièrement élevées, ce qui accroît la vulnérabilité des sols aux processus d'érosion [11].

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'évaluation de l'érosivité des pluies, en développant différentes formules. Les plus connues sont celles de Fournier [12], suivie par celle d'Arnoldus [13], puis la formule alternative de Rango-Arnoldus [14]. Ces méthodes permettent de déterminer le facteur d'agressivité des pluies R en se basant uniquement sur les précipitations mensuelles et annuelles [15]. Cependant, l'indice d'érosivité des pluies R de Wischmeier & Smith [7], calculé à partir de l'énergie cinétique des gouttes de pluie durant une intensité maximale sur 30 minutes, présente une contrainte majeure : les stations de notre zone d'étude ne disposent pas de mesures des précipitations maximales à cette échelle de temps. Ceci constitue une limitation importante, surtout dans un contexte méditerranéen caractérisé par des pluies torrentielles et de courte durée, particulièrement agressives pour les sols.

Dans ce cadre, la formule empirique d'Arnoldus [13] a été sélectionnée et appliquée pour le calcul du facteur R, en vue de l'élaboration d'une carte d'érosivité des pluies du bassin versant d'oued Siliana, permettant d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique et nécessitant des mesures d'intervention prioritaires.

Le choix de l'indice d'Arnoldus [13] a été retenu pour sa capacité à refléter la répartition intra-annuelle des précipitations et à identifier les périodes critiques d'agressivité pluviale. Il présente une corrélation significative avec l'indice de Wischmeier et Smith [7], confirmant sa fiabilité pour l'évaluation indirecte de l'érosivité pluviométrique [7]. Cet indice s'avère particulièrement pertinent dans les régions méditerranéennes et semi-arides, où les précipitations sont fortement variables et ponctuées d'épisodes intenses. Plusieurs études menées en Afrique et en Méditerranée ont également validé son efficacité à l'échelle des bassins versants (Apaydin et al., [16] ; Kouli et al., [17] ; Elbouqdaoui et al., [18] ; El Garouani et al., [19] ; Kouri, [20] ; Meddi, [21] ; Andoh et al., [22]) [23].

2. Materials and methods

2.1. Site d'étude

Le bassin versant d'oued Siliana est situé dans le nord-ouest de la Tunisie. Il couvre une superficie d'environ 1039 km² et est drainé principalement par ce cours d'eau (Fig.1). Climatiquement, la région présente un régime contrasté, dominé par deux étages bioclimatiques : le semi-aride supérieur (73 %) et le semi-aride moyen (23,7 %). La température moyenne annuelle enregistrée à Siliana en 2023 est de 18,8 °C, reflétant des conditions typiques des zones semi-arides de la Tunisie.

D'un point de vue géologique, le bassin versant d'oued Siliana est essentiellement composé de formations sédimentaires datant du Paléozoïque au Tertiaire, comprenant calcaires, dolomies, marnes et argiles, ainsi que des grès et conglomérats dans les secteurs de relief modéré. La région est traversée par des failles et fractures orientées nord-ouest – sud-est, héritage de l'activité tectonique alpine, qui structurent le relief et

influencent la répartition des formations géologiques. Les sols sont principalement argilo-limoneux et sableux, et l'agriculture céréalière et arboricole constitue l'usage principal des terres.

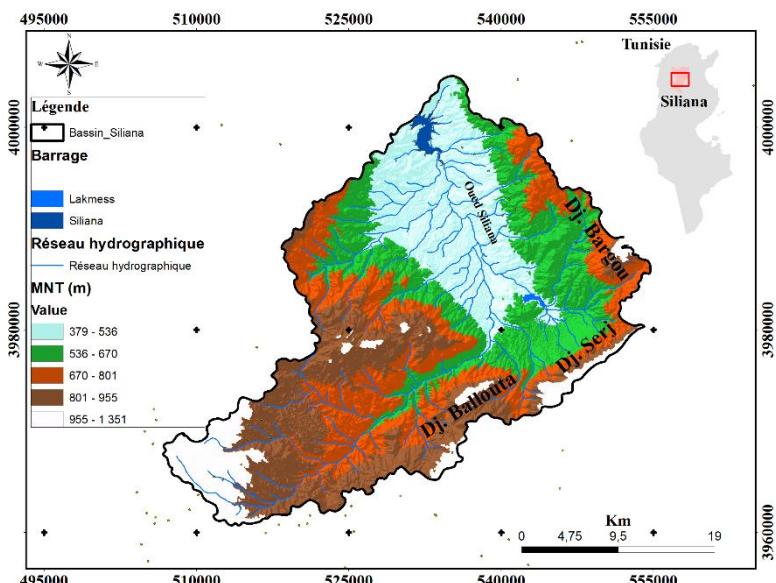


Fig. 1 - Carte de situation et MNT du bassin versant d'oued Siliana

Sur le plan topographique, le bassin présente un relief accidenté marqué par la présence de massifs montagneux et une forte variation altitudinale, allant de 379 m à l'exutoire jusqu'à 1351 m au sommet du Djebel Serj (Fig. 1). L'analyse des classes de pentes du bassin versant d'oued Siliana, met en évidence une prédominance des pentes faibles à modérées dans la zone d'étude (Fig. 2). En effet, les pentes inférieures à 10 % couvrent une superficie de 556 km², soit 53,6 % de la surface totale du bassin versant. Les pentes moyennes, comprises entre 10 et 15 %, occupent une superficie de 197 km² (soit 19 %). Les pentes relativement élevées, variant de 15 à 25 %, représentent 192 km², correspondant à 18,5 % du territoire. Enfin, les pentes fortes, supérieures à 25 %, s'étendent sur 94 km², soit environ 9 % de la superficie totale (Fig. 3). Ces dernières se localisent principalement dans les zones de hauts reliefs situées à l'extrémité orientale du bassin, notamment au niveau du Djebel Serj et du Djebel Bargou.

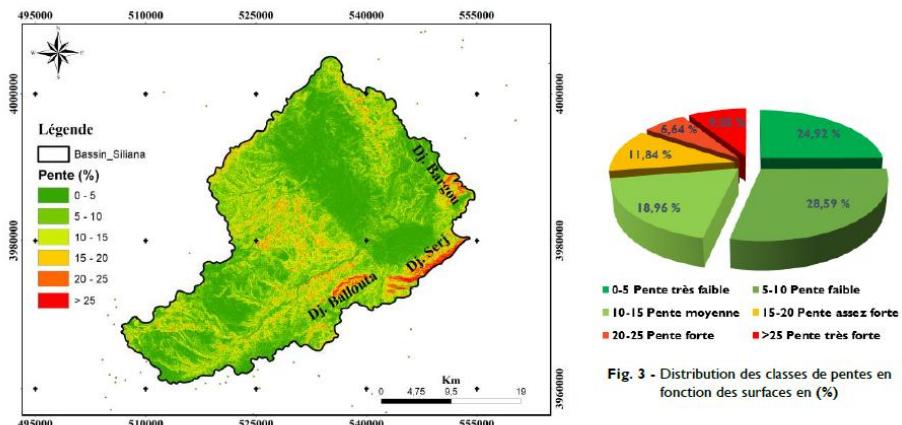


Fig. 2 - Carte des pentes de la zone d'étude

2.3. Méthodologie

Les principales données ayant servi à la réalisation de cette étude sont :

- Une image SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), avec une résolution de 30m disponible sur le site web (<http://opentopo.sdsc.edu/datasets>). Cette image a permis de créer plusieurs cartes thématiques à savoir la carte de délimitation du bassin versant, la carte du réseau hydrographique, la carte des altitudes (MNT) et la carte des pentes.
- Les données de précipitations mensuelles et annuelles sont fournies par le Commissariat Régional au Développement Agricole Siliana (CRDA Siliana) sur une période allant de 1990 à 2022. Ces données ont permis de déterminer le facteur climatique (**R**).
- Afin de déterminer de la répartition géographique des classes d'érosivité dans notre région d'étude, le logiciel **Arc-Gis (10.8)**, a permis de produire la carte d'érosivité des pluies du bassin versant d'oued Siliana. Le facteur d'érosivité **R** a été calculé en se fondant sur la formule de Arnoldus [14] qui tient compte du rapport entre la somme carrée de la pluviosité moyenne mensuelle de chaque mois de l'année à la pluviosité moyenne annuelle. Cette formule a été appliquée sur six (6) pluviomètres installés dans et à l'entour de l'espace cible. Elle est exprimée comme suit

$$IA = \sum_{i=1}^{12} (P_i^2 / P)$$

Avec :

Pi= précipitation moyenne mensuelle (mm), **P** = précipitation moyenne annuelle (mm)

Deux cartes ont été élaborées, la carte de répartition de la pluie moyenne annuelle et la carte de répartition de l'érosivité des pluies selon indice de Arnoldus [14].

3. Résultats et discussion

Les valeurs de l'érosivité des pluies obtenues sont présentées dans le Tableau I pour les six (6) stations pluviométriques installés dans et à l'entour du bassin versant d'oued Siliana. L'indice d'Arnoldus varie de 39,44 MJ.mm. ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ à la station de Siliana nord à 51,89 MJ.mm. ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ à la station de Bargou forêt. Selon la classification proposée par le CEC (1992) et synthétisée dans le Tableau 2, l'ensemble des stations étudiées se situe dans la classe de risque très faible (IA < 60) (Tab.2). Par ailleurs, les valeurs les plus élevées de l'indice d'érosivité sont directement corrélées aux pluviométries importantes. Ainsi, les stations de Bargou Forêt, Gaafour Délégation et Makthar Forêt, caractérisées par des précipitations abondantes, présentent également les indices d'Arnoldus les plus élevés [14] (Fig.4).

Tab. I - Valeurs obtenues de l'érosivité des pluies (Facteur R) selon la formule d'Arnoldus (1980) durant la période 1990-2022

Stations	Code Station	X	Y	Pluviométrie (mm)	Indice d'Arnoldus (IA)
Kesra B9	63664	531500	3964601	439	40,45
Makthar forêt	54102	518163	3967148	485	45,23
Siliana Sud	56763	534968	3991765	442	41,72
Bargou forêt	45416	551245	3994042	530	51,89
Gaafour délégation	52783	528960	4019295	448	47,38
Siliana Nord	56764	532694	3992954	417	39,44

Tab.2 - Classes de l'indice d'Arnoldus (CEC, 1992)

Classes classe	Description	Indice d'Arnoldus (1980)
1	Très faible	< 60
2	Faible	60 – 90
3	Moyenne	90 – 120
4	Elevée	120 – 160
5	Très élevée	> 160

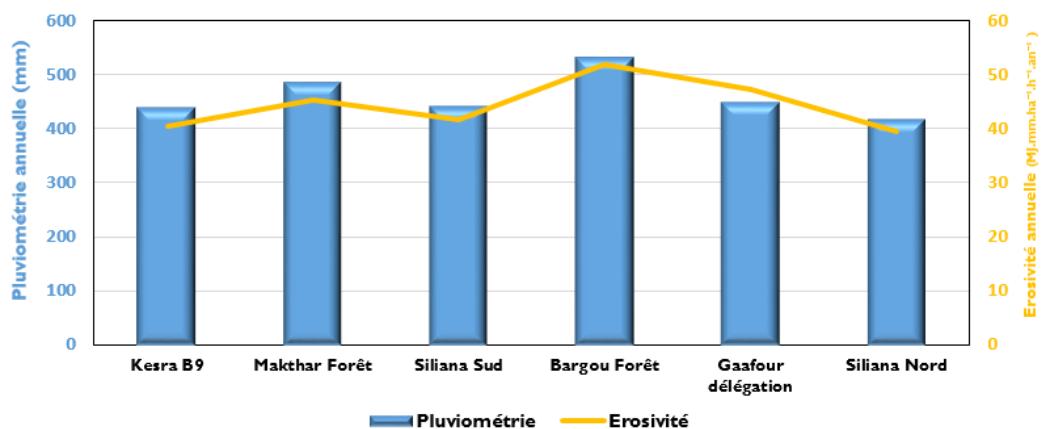


Fig.4 - Variabilité annuelle de la pluviométrie et l'érosivité dans la zone d'étude par délégation (1990-2022)

3.1. Carte de répartition des pluies

La pluviométrie moyenne annuelle dans la région d'étude varie entre 417 mm et 523 mm (Fig.5). La classe dominante, comprise entre 417 et 452 mm, s'étend sur une superficie de 574 km², soit 55,25 % de la surface totale, et se situe principalement dans la partie centrale du bassin selon un axe nord-sud. À l'inverse, la classe la plus élevée, comprise entre 474 et 523 mm, n'occupe que 15,69 % de la superficie. Par ailleurs, une tendance à l'augmentation des précipitations est observée dans les stations situées au sud-ouest et au nord-est, représentées respectivement par les postes pluviométriques de Makthar et de Bargou forêt.

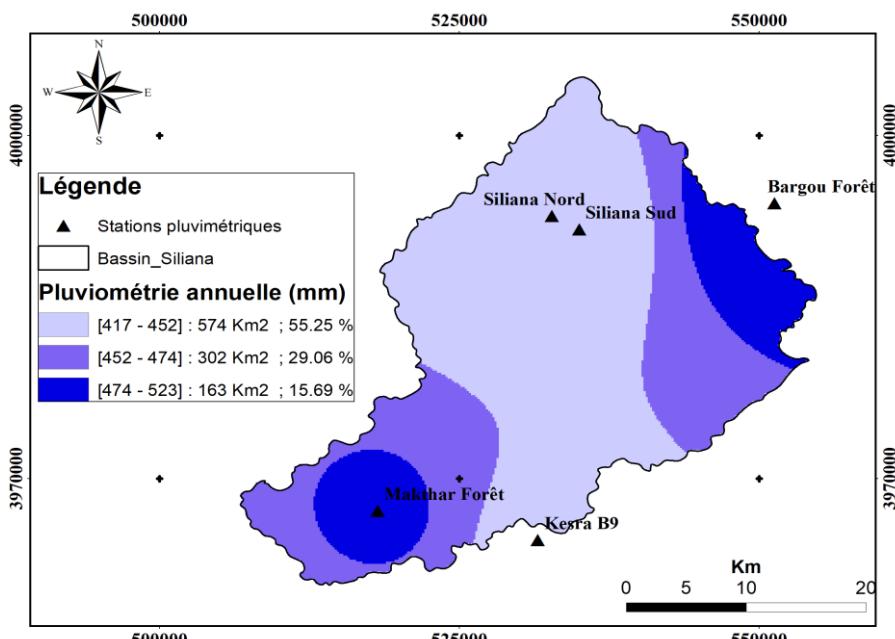


Fig. 5 - Variabilité spatiale des pluies annuelles - bassin versant d'oued Siliana.

3.2. Carte d'érosivité des pluies selon l'indice d'Arnoldus

La carte de répartition spatiale de l'indice d'Arnoldus (Fig.6) met en évidence la présence de trois classes d'érosivité au sein du bassin versant d'oued Siliana. Les stations situées au centre de la région se caractérisent par une érosivité faible appartenant à la classe [39–43], couvrant une superficie de 635 km², soit 61,12 % du bassin. Elles sont suivies par les stations du sud-ouest et du nord-est, qui enregistrent une érosivité moyenne de la classe [43–46], répartie sur 331 km² (soit 31,86 %). Enfin, la station de Bargou se distingue par une érosivité relativement élevée, comprise dans la classe [46–52], couvrant 73 km², soit 7,02 % de la superficie totale. Ces résultats indiquent que l'espace étudié est dominé par une érosivité faible à moyenne, avec une intensification nette aux altitudes élevées, cela explique que l'érosivité des pluies augmente en fonction des altitudes.

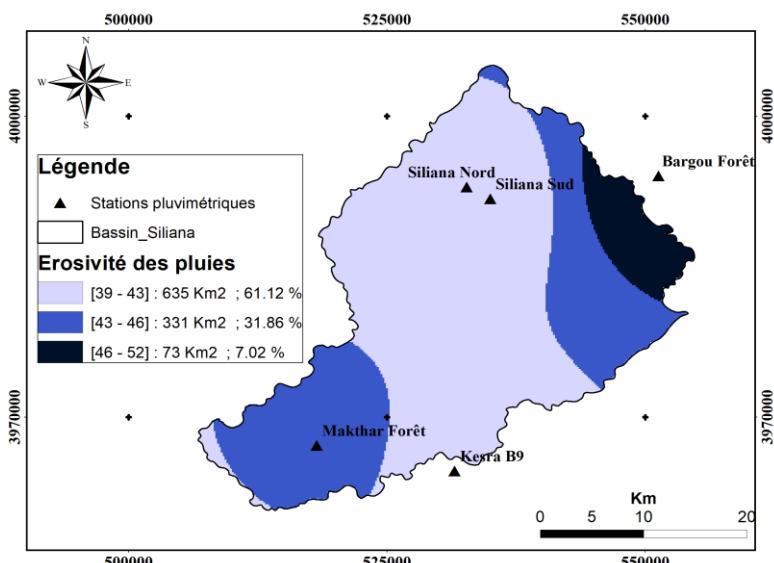


Fig. 6 - Carte de la répartition spatiale de l'érosivité des pluies de la zone d'étude

Selon la classification d'Arnoldus [14], les valeurs obtenues se situent dans la classe d'érosivité inférieure à 60. Sur le plan temporel, l'érosivité des précipitations dans la zone d'étude se manifeste principalement durant les saisons d'automne et d'hiver, périodes marquées par des pluies plus intenses et donc plus érosives (Fig.7).

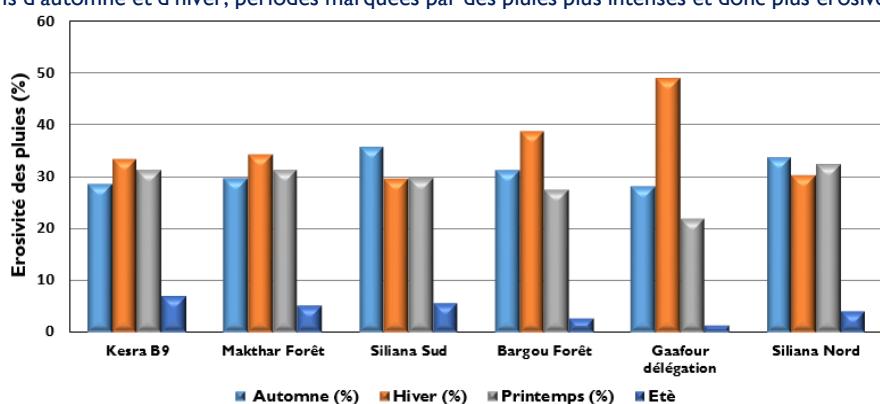


Fig.7 - Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone d'étude par délégation (1990-2022)

4. Conclusion

L'évaluation de l'érosivité des pluies au sein du bassin versant d'oued Siliana met en évidence une variabilité spatio-temporelle marquée, étroitement liée à la distribution des précipitations et aux caractéristiques topographiques de la région. Les valeurs de l'indice d'Arnoldus, oscillant entre 39 et 52 MJ.mm. ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹, indiquent globalement un niveau d'érosivité faible à moyen, correspondant à une classe de risque très faible selon la classification du CEC (1992).

Sur le plan spatial, la cartographie de l'érosivité révèle une prédominance des faibles valeurs dans les zones centrales du bassin, contrastant avec des indices plus élevés localisés dans les secteurs montagneux, notamment au Djebel Serj et au Djebel Bargou. Cette distribution spatiale confirme l'existence d'une corrélation positive entre l'altitude, la pluviométrie et l'intensité érosive des précipitations.

D'un point de vue temporel, l'analyse met en évidence une concentration des phénomènes érosifs au cours des saisons d'automne et d'hiver, périodes caractérisées par des pluies intenses et de forte énergie cinétique. Ces résultats traduisent la forte variabilité intra-annuelle de l'agressivité pluviale typique des milieux méditerranéens semi-arides.

Ces résultats s'avèrent cohérents avec d'autres études menées dans les régions semi-arides de Tunisie. Les valeurs de l'indice d'Arnoldus observées sont comparables à celles rapportées à Kairouan ou Zaghouan, où l'érosivité est également évaluée comme faible à moyenne [23-24]. Cette cohérence confirme la fiabilité de l'indice d'Arnoldus pour estimer l'agressivité pluviale dans les milieux méditerranéens semi-arides, en accord avec l'indice de Wischmeier et Smith [7].

En conclusion, bien que le bassin versant d'oued Siliana soit globalement marqué par une érosivité modérée, les zones de relief accentué et à pluviométrie abondante demeurent particulièrement sensibles aux processus d'érosion hydrique. Ces observations soulignent l'importance d'intégrer les paramètres climatiques et topographiques dans les stratégies de gestion durable des terres et de conservation des sols, afin de limiter la dégradation progressive des ressources naturelles dans cette région.

5. Références

- [1] Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing.
- [2] Antoni, V., Bissonnais, Y.L., Thorette, J., Zaidi N., Laroche, B., Barthès, S., Daroussin, J. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. Etude et Gestion des Sols 22.
- [3] Stitcher, P. (2010). <http://restoringutopia.blogspot.com/2010/07/like-hollow-pointbullets-from-sky.html>. Accessed on 11 August 2019.
- [4] Zhang, K., Yu, Y., Dong, J., Yang, Q., Xu, X. (2019). Adapting & testing use of USLE K 61 factor for agricultural soils in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 269, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.09.033>.
- [5] Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539.
- [6] FAO. (2019). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Managing systems at risk (SOLAW 2019)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [7] Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Handbook No. 537.
- [8] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Handbook No. 703.
- [9] Roose, É., Duchaufour, H., De Noni, G. (2012). Lutte antiérosive: Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12419>.
- [10] Nearing, M. A., Yin, S., Borrelli, P., & Polyakov, V. O. (2017). Rainfall erosivity: An overview of methodologies and applications. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), 2103–2117.

- [11] García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173.
- [12] Fournier, F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses universitaires de France. Paris: 201 p.
- [13] Arnoldus, H.M.J., 1980. Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. Bull. FAO, (34): 39-48.
- [14] Rango, A. & Arnoldus, H.M.J., 1987. Aménagement des bassins versants. Cahiers techniques de la FAO : I-11.
- [15] Maamar-Kouadri, K., 2012. Etude de l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols dans le Tell oranaïs. Thèse de Magister. Université de Mostaganem, Algérie: 132 p.
- [16] Apaydin, H., Erpul, G., Bayramin, I. & Gabriels, D., 2006. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia, Project, Turkey J. Hydrol 328: 726-732.
- [17] Kouli, M., Soupios, P. & Vallianatos, F., 2008. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. Environ Geol (2009) 57: 483-497. Doi: 10.1007/s00254-008-1318-9.
- [18] ELbouqdaoui, K., Ezzine, H., Badraoui, M., Rouchdi, M., Zahraoui, M. & Ozer A., 2005. Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). Geo-Eco-Trop, 29: 25-36.
- [19] EL Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A. & Abharour, M., 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellites et du Sig idrissi au nord-est du Maroc. Télédétection, 8 (3): 193-201.
- [20] Kouri, L., 1993. L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'oued Mina. Etude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 232 p.
- [21] Meddi, M., 2013. Sediment transport and rainfall erosivity evolution in twelve Basins in Central and Western Algeria. Journal of Urban and Environmental Engineering (JUUE), v.7, (2): 253-263. Doi: 10.4090/juee.2013.v7n2.253263.
- [22] Andoh, H.F., Antxi B.O., Wakatsuki, T. & Atakora, E.T., 2012. Estimation of soil erodibility and rainfall erosivity patterns in the agroecological zones of Ghana, Journal of Soil Science and Environmental Management Vol. 3(11): 275-279. Doi: 10.5897/JSEM11.081.
- [23] Maamar-Kouadri, K., Kouri, L., & Chebouli, Y. (2016). Utilisation de l'Indice d'Arnoldus pour cartographier les risques d'érosivité des pluies dans le Tell oranaïs (Algérie). Geo-Eco-Trop, 40(4), 287-296.
- [24] Hachicha, M., Trabelsi, R., & Ben M'barek, S. (2010). Étude de l'érosivité des pluies dans les régions semi-arides de Tunisie. Revue Tunisienne des Sciences de l'Eau, 5(2), 45-58.
- [25] Chaib, A. (2015). Analyse de l'érosivité pluviale et de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Zaghouan. Tunis : Université de Tunis.



Caractérisation hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du socle du bassin versant du Mayo-Kani A Yolde (extreme-nord) Cameroun.

Prosper Djoldebne¹, Lucas Bouba², Felix Zieba Watang ¹ and Sylvain Daoua Aoudou¹

¹Université de Maroua, Cameroun, Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines, BP 46, Maroua Cameroun. Courriels : *;

²Université de Maroua, Cameroun, Faculté des Sciences, BP 814, Maroua, Cameroun. Courriel : @èe

Résumé

L'année hydrologique septembre 2022 à août 2023, une étude ayant pour objectif une caractérisation du comportement hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani a été menée. Les travaux de terrain ont consisté en un suivi piézométrique mensuel des 66 puits expérimentaux et 20 forages d'observation. Les résultats montrent que les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale ; et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m et 13,2 m soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m. Le niveau piézométrique minimal annuel est observé au mois de mai et le niveau maximal est atteint au mois de septembre, la remontée du niveau commence au mois de juin. L'analyse des cartes piézométriques révèle deux grands types de nappe : la nappe peu profonde ou superficielle au Nord-ouest et la nappe profonde et perchée dans la partie Sud-Est et Nord-Est du bassin versant, avec une convergence des lignes de courant d'eau vers le cours d'eau Mayo-Kani selon l'orientation NW-SW qui en est le principal axe de drainage de l'aquifère à nappe. L'analyse de la productivité des forages révèle que les aquifères de socle du bassin versant du Mayo-Kani ont, en général, une faible fonction conductrice. Les résultats de l'analyse statistique des linéaments à l'aide des rosaces directionnelles sont venus confirmer les résultats de l'analyse piézométrique soit une répartition particulière de l'orientation de ces derniers selon la direction préférentielle NW-SW avec 75% de fréquence. La dynamique piézométrique établie, montre que le réservoir d'altérites se recharge au mois d'avril à novembre sous l'action de l'excédent pluviométrique et se vide au mois de décembre à mars lors de l'étiage. Ainsi, le comportement hydrodynamique de la nappe est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques.

Mots clés : Hydrodynamique, Aquifère, niveau piézométrique, Bassin versant, Extrême-nord Cameroun

Hydrodynamic characterization of the unconfined aquifer of the base of the Mayo-Kani watershed in yolde (far north Cameroon).

Abstract

The hydrological year September 2022 to August 2023, a study aimed at characterizing the hydrodynamic behavior of the unconfined aquifer of the Mayo-Kani watershed was conducted. The field work consisted of monthly piezometric monitoring of the 66 experimental wells and 20 observations boreholes. The results show that the piezometric levels vary between 490.44 and 361.24 m during the maximum period; and between 477.66 and 357.02 in the minimum period. The piezometric fluctuations thus vary between -2 m and 13.2 m, i.e. an average annual fluctuation of 3.96 m. The minimum annual piezometric level is observed in May and the maximum level is reached in September, the rise in the level begins in June. The analysis of the piezometric maps reveals two main types of aquifer: the shallow or superficial aquifer in the Northwest and the deep and perched aquifer in the Southeast and Northeast part of the watershed, with a convergence of the water current lines towards the Mayo - Kani watercourse according to the NW-SW orientation which is the main drainage axis of the aquifer with aquifer. The analysis of the productivity of the boreholes reveals that the basement aquifers of the Mayo-Kani watershed have, in general, a weak conductive function. The results of the statistical analysis of the lineaments using directional rosettes confirmed the results of the piezometric analysis, namely a particular distribution of the orientation of the latter according to the preferential NW-SW direction with 75% frequency. The established piezometric dynamics show that the altérite reservoir recharges from April to November under the action of excess rainfall and empties from December to March during low water. Thus, the hydrodynamic behavior of the water table is closely linked to rainfall fluctuations.

Keywords: Hydrodynamic, Aquifer, Piezometric level, Watershed, Far nord, Cameroon.

¹ Corresponding author: prosperdjoldebne5@gmail.com

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle vitale. Elle est à la base du système écologique (SELVAM et al., 2013 ; ABDOU N et al., 2020). Elle contribue significativement pour les êtres vivants notamment dans le développement socioéconomique et les écosystèmes (LACHASSAGNE P. et al. ; 2005 ; AN et al., 2014 ; MA et al., 2014 ; ESHTAWI et al., 2016 ; EWODO M. al. ; 2017). Lors du Sommet Mondial sur le Développement Durable (SMDD) tenu à Johannesburg en 2002, un constat global s'est dégagé à savoir l'amenuisement progressif des ressources en eau disponibles et mobilisables. Cette diminution est liée à une forte croissance démographique, au développement industriel, urbain et agricole auxquels s'ajoutent les aléas de la variabilité et du changement climatiques qui entraînent une augmentation sans cesse des besoins en eau (SANDRA ARDOIN-BARDIN., 2004) ; MINÉE-GWP, 2009 ; LAHCEN ZOUHRI et al., 2010 ; FREUBA., (2015).

L'extrême-nord en général et le bassin versant du Mayo-Kani en particulier, à l'instar de la majorité des villes subsahariennes a été marquée au cours des deux dernières décennies par de grandes mouvances notamment sur le plan démographique et environnemental.

L'exploitation des ressources en eaux souterraines à l'Extrême-nord en général et dans le bassin versant du Mayo-Kani en particulier permet de faire face au problème de l'alimentation en eau potable des populations rurales. Le Gouvernement camerounais, appuyé par les bailleurs de fond, investi de nombreux capitaux à travers divers programmes pour pallier ce problème (DJEUDA TCHAPNGA et al., 2001). En effet, le programme Pays Pauvre Très Endetté (PPTE) et le plan d'urgence ont permis d'accroître le nombre de forages et puits modernes en zones périurbaine et rurale. Malgré ces efforts, le bassin versant du Mayo-Kani au Cameroun connaît toujours des problèmes d'approvisionnement en eau potable surtout dans les localités situées en zone de socle. En effet, comparativement aux milieux sédimentaires où les aquifères sont, en général, continus, l'eau souterraine des régions de socle (métamorphique/plutonique) est localisée dans les aquifères discontinus et compartimentés (DEWANDEL et al.).

Ces aquifères sont isolés les uns des autres et sont associés à des couloirs de fracturation plus ou moins verticaux hérités de l'histoire tectonique de la région (GANDOLFI et al., 2010). La productivité de ces aquifères est liée à la conjonction d'une couverture meuble, à fonction essentiellement capacitive (lorsqu'elle est saturée en eau), et d'un réseau de fissures connectées et ouvertures, drainant les formations meubles sus-jacentes. (DEWANDEL al., 2006 ; LACHASSAGNE et al., 2011).

Dans le cadre des programmes d'hydraulique en zone rurale de l'Extrême Nord, les forages et les puits modernes, implantés en zone de socle, doivent fournir un débit minimum de $1\text{m}^3/\text{h}$ pour être déclaré positif. Cependant, un nombre assez élevé de ces ouvrages sont souvent déclarés négatifs car n'ayant pas atteint ce débit minimum ou abandonnés après leur mise en service pour « tarissement ». Ces constats suscitent beaucoup d'intérêt sur le plan de la recherche hydrogéologique. En effet, les caractéristiques de ces aquifères et les profondeurs optimales productives des formations géologiques sont connues de façon sommaire ou totalement méconnues (TILLEMENT, 1970, DETAY, 1987). Une meilleure connaissance de ces aquifères est nécessaire pour une bonne connaissance hydrodynamique de l'acquière à nappe libre et son fonctionnement. En effet, les ressources en eau dans le bassin versant du Mayo-Kani sont rares, les écoulements des mayos (rivière à écoulements temporaires) sont saisonniers, tarissent à un moment de l'année. De même, les forages et les puits tarissent également. Les mares artificielles en raison des fortes insolations subissent le tarissement sous l'effet des fortes évaporations à une période de l'année (avril-mai). Nous notons également que ce bassin est dominé par des formations du socle cristallin précambrien illustrant un acquière discontinu, lié à l'altération et la fraction sous ces altérites. A cela, s'ajoute les aléas climatiques se caractérisant par une variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le temps et dans l'espace, perturbant les saisons de pluies et affectant significativement les cycles de recharge et de vidange de la nappe. Il faut ajouter en plus de l'augmentation des charges en bétail (cheptels) et la démographie ; A ce titre « **Caractérisation hydrodynamique des aquifères à la nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé** » est une stratégie qui vise non seulement à améliorer des connaissances structurales et piézométriques sur le fonctionnement hydrodynamique des aquifères à nappe libre du bassin versant du Mayo Kani ; mais et surtout permettre aux populations de cette localité d'optimiser la gestion de leurs ressources hydrologiques et hydroagricoles afin de faire face aux divers enjeux de changement climatique planétaire et de lutter contre la pauvreté à L'extrême-nord Cameroun.

DONNEES ET METHODES

DONNES

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé situé entre le 10°19' et le 10°48' de la latitude Nord et entre 14°19' et 14°33' de longitude Est (figure 1).

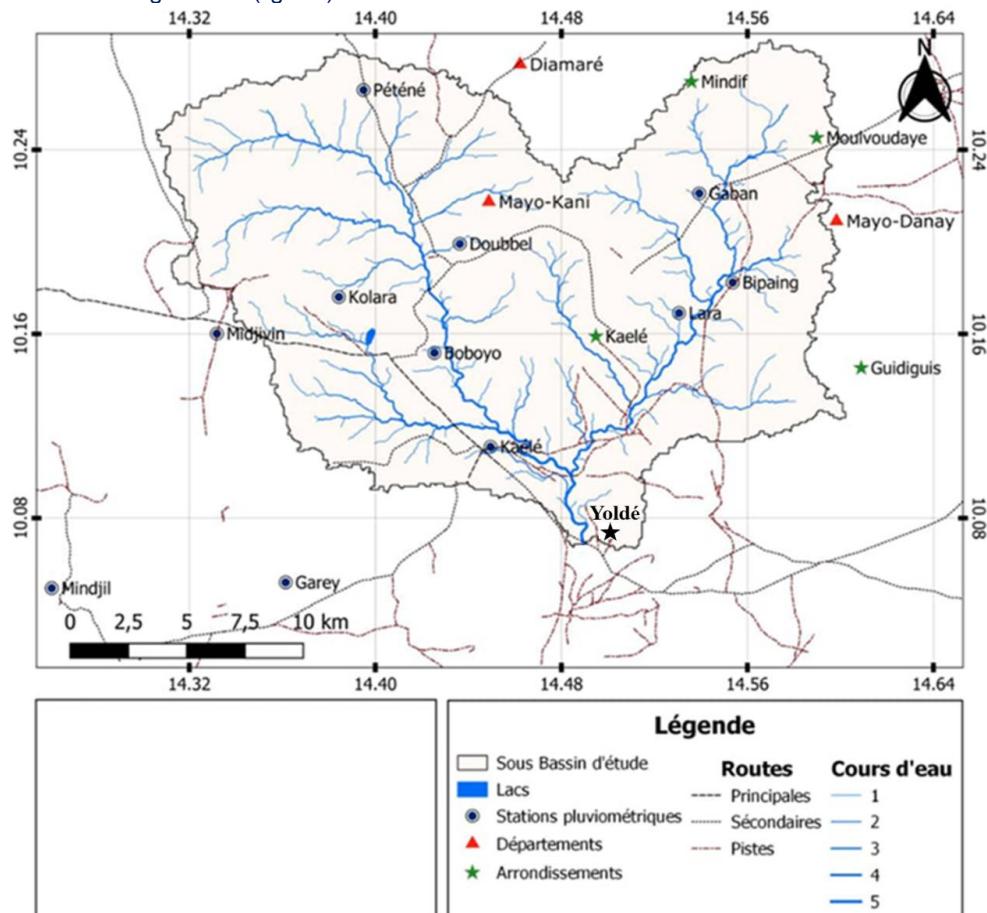


Figure 1- Localisation du bassin versant à Yoldé

Le climat est de type tropical avec une tendance soudano-sahélienne. Celui-ci est caractérisé par deux saisons inégalement réparties : une saison sèche longue d'environ huit (08) mois et va d'Octobre à Mai et une courte saison de pluie de quatre (04) mois qui couvre les mois de Juin à Septembre. Les précipitations varient entre 700mm et 900mm par an.

Le bassin versant du Mayo Kani fait partie d'un grand ensemble hydrologique africain qui est le bassin versant du Niger. Le Mayo Kani constitue un affluent du Mayo Kebi, tributaire de la rivière Bénoué. La Bénoué est une rivière qui constitue directement aux écoulements du Niger. Comme l'ensemble des cours d'eau de l'extrême -Nord Cameroun (excepté le Logone), le Mayo Kani et ses affluents disposent d'un écoulement saisonnier dont la durée et l'amplitude des crues sont intimement liées à l'importance de la pluviométrie (OLIVRY, 1986). La période concernée par les crues est comprise entre juillet et septembre ; tandis que les étiages débutent généralement en octobre après quoi les lits des mayos (rivières à écoulement temporaire) s'assèchent complètement.

L'hydrologie du bassin versant du Mayo Kani est ponctuée par la présence des marécages (Kani, Gadas, Poukiebi) et des lacs artificiels (lacs de Boboyo) qui assurent de nombreuses fonctions touristiques et écosystémiques pendant la durée de leur existence.

La géomorphologie du bassin versant du Mayo Kani est en effet constituée à plus de 95% des plaines, 1% des plateaux et 4% des montagnes (JEBKALBE, 2014). Ce bassin versant forme à peu près un ensemble morphologique homogène. Il s'incline du sud au nord en une pente très faible. L'altitude varie entre 300 et 600m. Or, l'altitude est un paramètre géomorphologique qui est à la base de la typologie et quantités des pluies tombées dans une région donnée (ZWIEBEL, 2015 ; WANG et al., 2023).

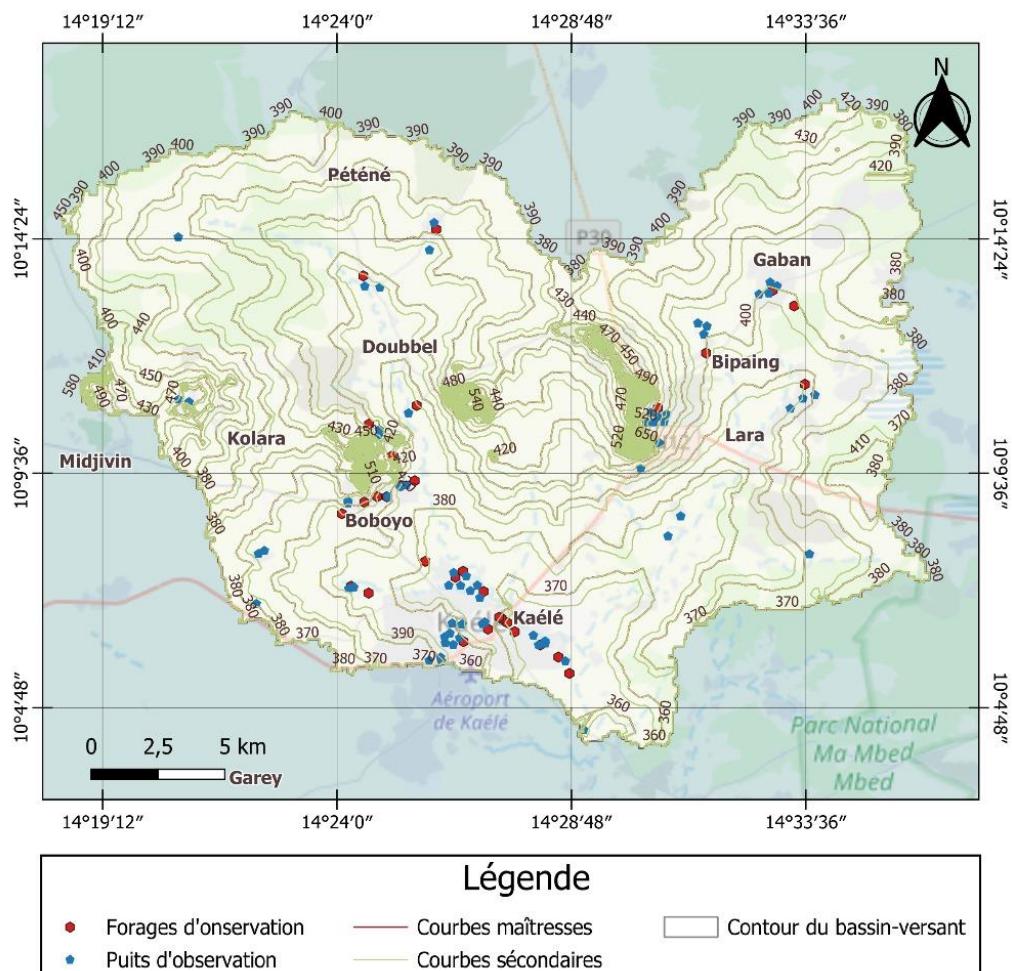


Figure 2- Carte topographique du bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé

La géologie du bassin versant du Mayo Kani est représentée par les formations du socle cristallin précambrien (DUMORT et PERONNE, 1966) et des formations volcaniques. Le socle cristallin précambrien affleure, de façon continue, dans les zones montagneuses. Le bassin versant est dominé majoritairement par le gneiss et la syénite.

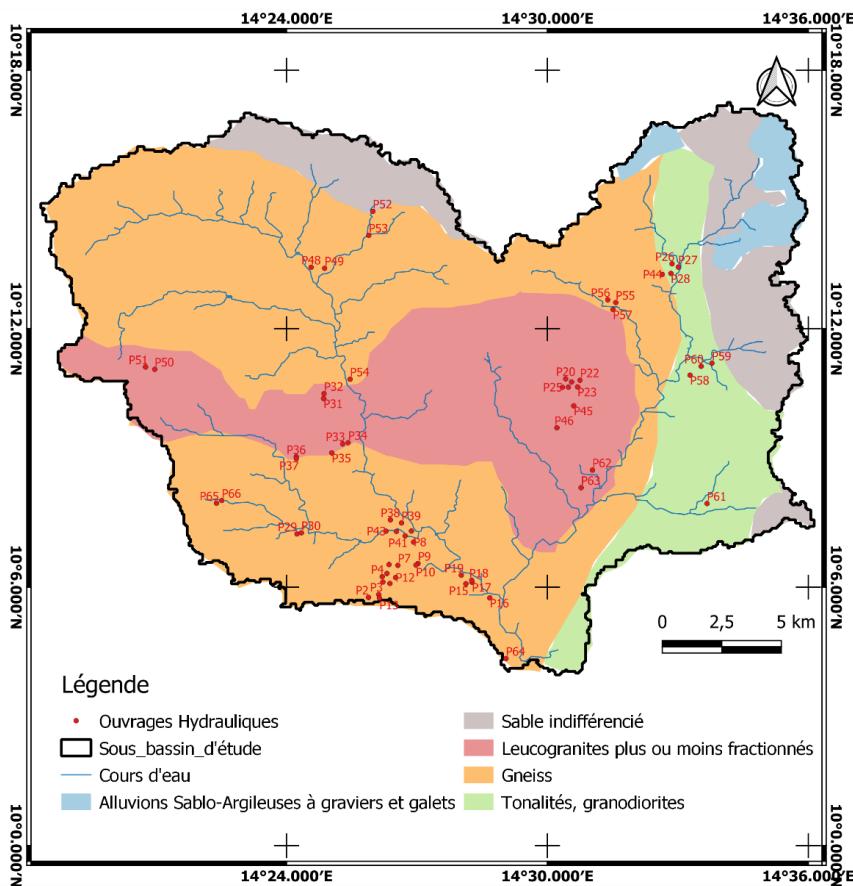


Figure 3- Carte géologique du bassin versant du Mayo-Kani à Yodé

L'hydrogéologie du bassin versant du Mayo-Kani, est caractérisée par un socle cristallin précambrien, des formations infracambréennes et primaires illustrant un aquifère discontinu, lié à l'altération et à la fracturation. Sous ces altérites, on passe progressivement au socle par le biais d'un front d'altération qui dépasse rarement 40 mètres d'épaisseur (TILLEMENT, 1970). Le modèle conceptuel d'aquifère de socle de LACHASSAGNE et WYNS, (2005) peut être admis dans cette zone au vu de conditions environnementales semblables. Ce modèle est constitué d'un recouvrement semi-perméable qui engendre un aquifère d'altérites alimenté par la surface. Cet aquifère surmonte un aquifère de fissures ou de failles, drainant la couverture d'altérité à fonction essentiellement capacitive. Le rôle des altérites saturées est donc primordial.

La population vivant dans ce bassin versant du Mayo Kani a été estimée à 16 millions d'habitants en 2021. Celle-ci est en majorité rurale. Les principales activités humaines sont l'agriculture et l'élevage auxquels s'ajoutent les Petites et Moyennes Entreprises (PME).

MATERIELS ET METHODES

Cette étude est basée sur une approche méthodologique pluridisciplinaire qui consiste conjointement en

- (1) Méthode d'évaluation de la productivité des forages
- (2) un suivi piézométrique des ouvrages hydrauliques (puits choisis) et les données climatologiques ; (3) l'élaboration des cartes piézométriques et (4) les cartes de linéaments.

Données piézométriques et séries pluviométriques

Cette étape a consisté à recenser préalablement à l'aide d'un fond de carte topographique et d'un récepteur GPS (Global Positioning System) les coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude) de tous les ouvrages hydrauliques existants (puits) dans le bassin versant du Mayo-Kani. A l'issu de cette investigation 288 puits ont été recensés. En raison d'une homogénéité dans la répartition des ouvrages hydrauliques, 66 puits ont fait l'objet d'un suivi piézométrique bimensuel. Les critères de choix de ces ouvrages portent sur l'accèsibilité, la représentativité, la répartition spatiale, la topographie, l'accord du propriétaire, le débit relativement élevé et la sollicitation pour des besoins de consommation par la population pour certains ouvrages.

La campagne du suivi piézométrique s'est déroulée durant une année hydrologique allant de septembre 2022 à août 2023 à une cadence mensuelle. Le niveau piézométrique H(m) a été déterminé suivant la formule dans le cas d'une nappe libre (CASTANY, 1998) et la profondeur d'eau (p) dans l'ouvrage a été déterminée à partir d'une sonde électrique sonore. $H = Z - Ns - Hm$ Avec : H= Niveau piézométrique (m) ; Z = altitude de la surface topographique(m) ; Ns = Niveau Statique des puits(m) ; Hm= Hauteur de la Margelle. (m)

En ce qui concerne les données climatologiques, Elles ont été collectées à travers onze stations pluviométriques dont huit stations situées à l'intérieur du bassin versant et trois stations situées dans les localités environnantes. Ces données nous ont été fournies pour l'essentiel, par la Direction Générale de la Société de Développement de Coton (SODECOTON) à Garoua de 1990 à 2022. Celles-ci ont été complétées par les données issues du portail numérique NASA-Power-data-access-viewers, accessibles sur le site internet <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Ces données nous ont permis de mettre en relation la dynamique pluviométrique avec les données piézométriques pour en dégager leur impact.

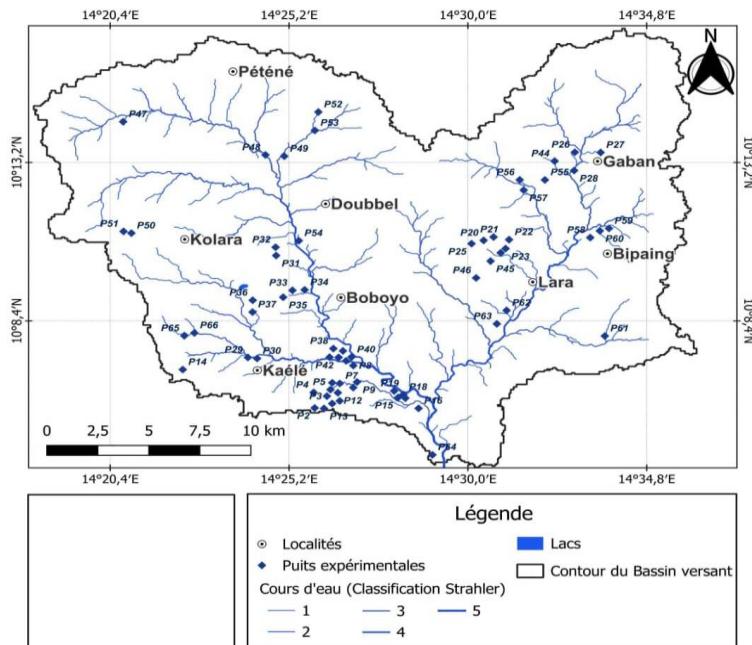


Figure 4 -Localisation des ouvrages d'observation dans le bassin versant du Mayo-Kani à Yolde

METHODES

Méthode d'évaluation de la productivité des forages

La productivité des ouvrages de la zone de socle de la région de l'Extrême Nord a été évaluée à partir d'une analyse comparative entre les débits et les paramètres physiques des forages (profondeur totale, épaisseur d'altérites) d'une part et, d'autre part, entre les débits de forages et les transmissivités. La distribution de ces débits et de ces transmissivités a été faite suivant la classification proposée par divers auteurs (Lasm, 2000 ; Dibi et al., 2004 ; Yao et al., 2010). : Pour les débits :

- de 0 à 1 m³/h : débits très faibles
- de 1 à 2,5 m³/h : débits faibles
- de 2,5 à 5 m³/h : débits moyens
- supérieur à 5 m³/h : débits forts.

Pour la transmissivité :

- classe faible : $T < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Classe moyenne : $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$;
- classe forte : $T > 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Elaboration des cartes piézométriques

L'élaboration des cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani a été faite par la méthode d'interpolation par krigeage. C'est une méthode géostatistique qui permet de réaliser l'interpolation approximative, spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du Vario-gramme expérimental. Le logiciel QGISS 3.12 est utilisé à cet effet. L'établissement de la carte piézométrique aura pour but de déterminer les principales directions de l'écoulement souterrain et les aires d'alimentation de la nappe. Ces cartes schématiseront d'une part les fonctions capacitives et conductrices des réservoirs, et d'autre part le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Les cartes piézométriques minimale, maximale et moyenne annuelle seront ainsi été élaborées correspondant respectivement au mois de l'année ayant les niveaux piézométriques minimale, maximale et du niveau piézométrique moyen de chaque ouvrage hydraulique durant l'année d'étude.

Elaboration des cartes des linéaments

L'élaboration des cartes des linéaments dans le bassin versant du Mayo-Kani a été faite par la méthode géostatistique. Nous avons procédé d'abord par télécharger les Landsat 09 OLI, comprenant 07 bandes ; créer une bande composite à 07 bandes sur ArcGIS ; découper la zone d'étude pour réduire le temps de calcul. Ensuite, par exporter la bande composite découpée au format tif, nous avons également procéder à l'étalonnage directionnel sur Géo-Montaj, exporté la bande sur PCI Géomatica pour procéder à l'extraction des linéaments en reconfigurant les bandes RGB sur 5, 4,3. Les différentes densités sont extraites sur le format shp et le calcul des coordonnées de départ et d'arrivée de chaque ligne sur Argis et la table au format CAD sur ROCKWORKS pour les calculs des directions et la longueur des lignes et sortir la rosace des directions homogènes. La mise en page et le mosaïquage des cartes ont été faites par Ggis.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

RESULTATS

Eléments structuraux

Sur l'ensemble du bassin d'étude, les éléments structuraux les plus évidents qui affectent la roche saine sont les failles, les filons, les diaclases, la foliation et la schistosité. Les principales directions du réseau hydrographique sont similaires à celles de la tectonique (diaclases et foliation principalement). La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments résultant de la superposition de l'information continue dans les trois images filtrées. Elle regroupe au total 720 linéaments. Cette carte de linéaments apparaît polymodale. En effet, elle nous révèle trois familles importantes d'orientation de linéaments : NS-WS ; WE et EW.

L'orientation NS-WS est prédominante, regroupant en elle seule 75% de l'information. Les linéaments appartenant à la famille WE regroupent 6,25%. Quant à la direction EW, elle est représentée à 18,75%. Les

principales directions du réseau hydrographique sont similaires à celles de la tectonique (dioclases et foliation principalement). La figure présente les cartes de linéaments ainsi que la rosace directionnelle.

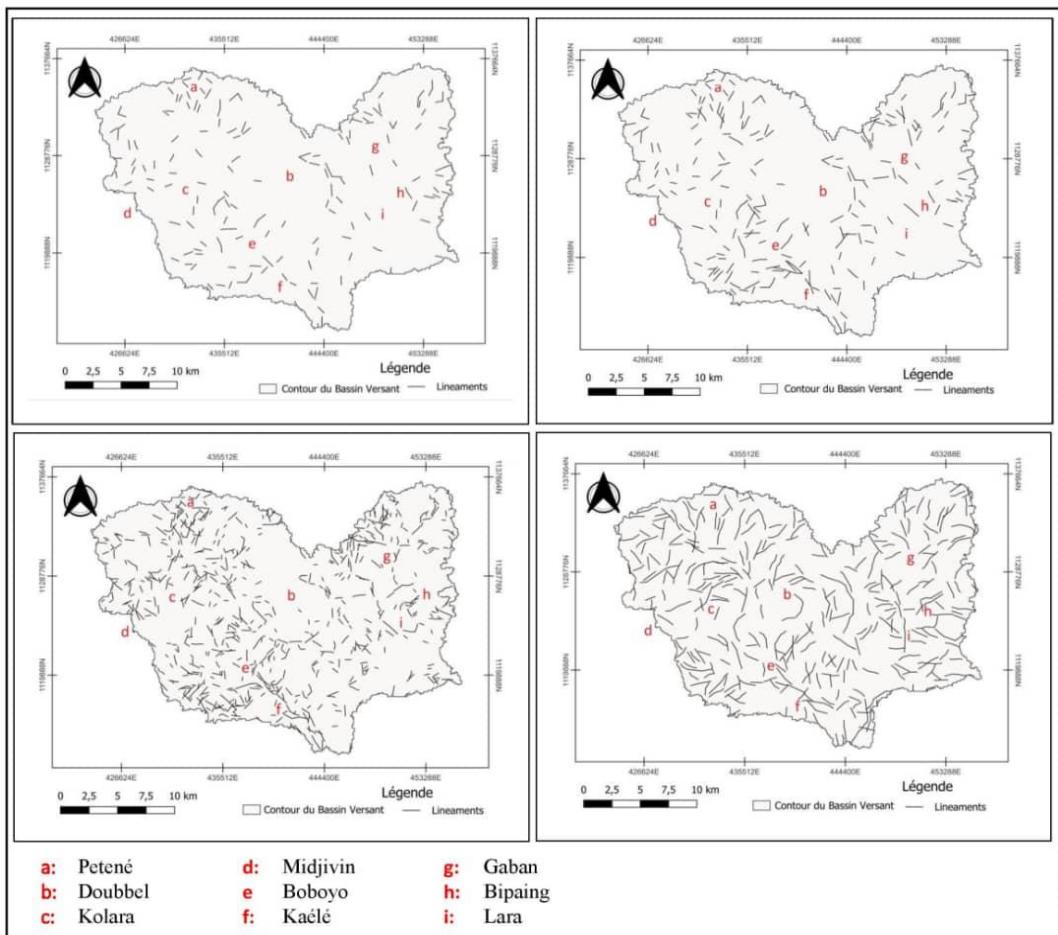


Figure 6- Image du rehaussement et du filtrage directionnel NW-SW, NE, SE et la carte de synthèse des linéaments

Rose Diagram

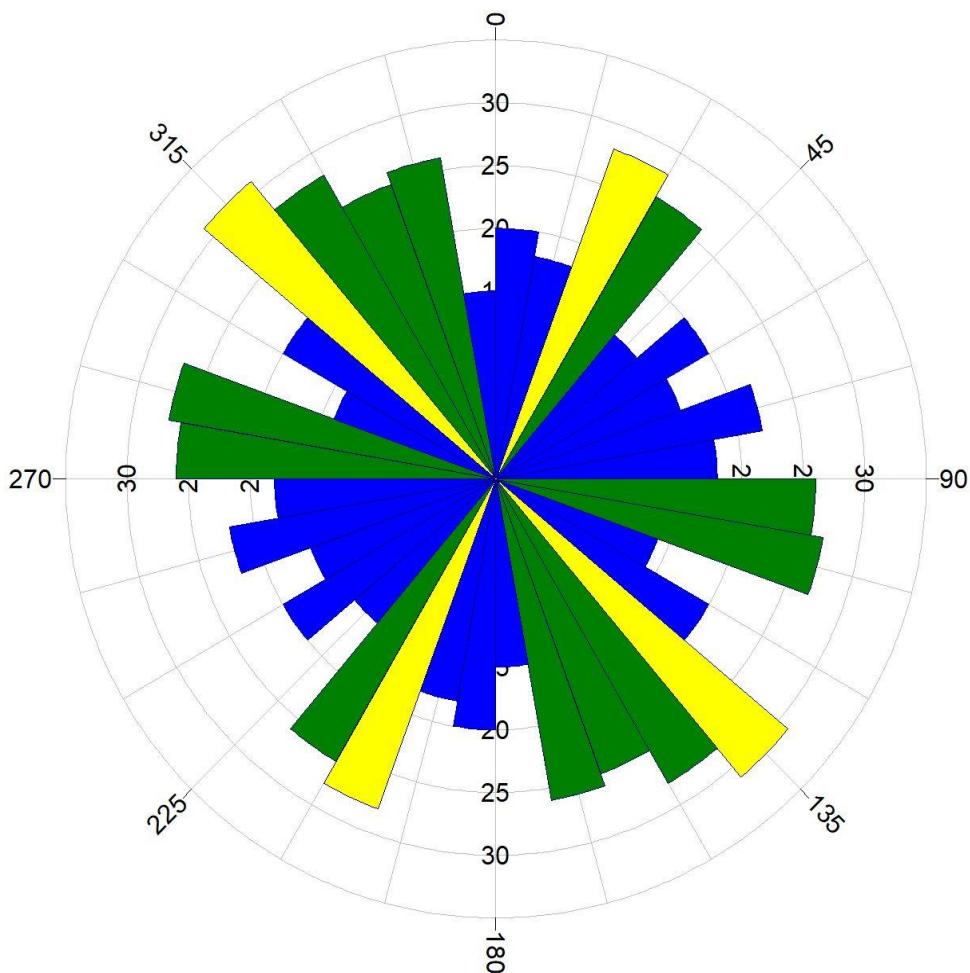


Figure 7 - Rosace directionnelle des linéaments du bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé

Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère à nappe du socle

Lithologie et conductivité hydraulique des produits d'altération

La nature du réservoir latéritique est constituée de gneiss et un petit cordon de sable indifférencié (nord et sud), de leuco granités plus ou moins fractionnés (centre), les tonalités granodiorites, sable indifférencié et un petit cordon des alluvions sablo-argileuses à graviers et galet (est) du bassin versant étudier.

L'analyse de la productivité des forages en fonction des paramètres hydrodynamiques montre que les débits spécifiques dans cette zone de socle varient de 1,02 à 2,09 m³/h, la moyenne est de 1,59 m³/h, l'écart type de 0,28 m³/h. Dans cette zone de socle, les valeurs de transmissivité varient entre 0,75x10⁻⁷ m²/s et 2,29x10⁻⁴ m²/s avec une moyenne de 1,44x10⁻⁵ m²/s. L'écart type est de 1,14x10⁻⁴ m²/s et le coefficient de variation est de 2,27 (Tab I). Ces résultats montrent que les transmissivités sont hétérogènes dans cette zone de socle. Tous les forages de ce bassin versant appartiennent à la classe faible, ce qui témoigne que ces forages ont un faible taux de transmissibilité. Ceci illustre que les aquifères de socle du bassin versant du Mayo-Kani ont, en général, une faible fonction conductrice.

Le tableau I. Caractérisation de la productivité des forages du socle du bassin versant du Mayo-Kani.

Ouvrages	Prof T (m)	Ep alt (m)	Q/S en m ² /h	T en m ² /S	Qexp m ³ /h
F1	61,8	8	1,95	1,08	1,85
F2	59,17	9	1,33	0,37	2,83
F3	52,95	11	1,89	0,49	2,23
F4	75	10	2,09	2,24	3,35
F5	45	9	1,78	1,38	1,36
F6	65	10	1,8	1,76	1,07
F7	60	7	1,02	1,23	1,92
F8	47	6	1,14	1,61	2,18
F9	58	9	1,66	2,11	1,28
F10	60	8	1,28	2,18	3,03
F11	55	7	2,01	2,08	2,46
F12	50	7	1,68	1,44	2,69
F13	68	10	1,16	0,97	3,17
F14	62	9	1,93	1,46	2,78
F15	59	9	1,43	1,93	3,46
F16	54	7	1,69	1,78	3,01
F17	63	8	2	0,95	3,05
F18	55	6	1,18	1,2	2,16
F19	51	7	1,53	1,58	2,3
F20	53	8	1,25	1,14	3,63
Moy	57,69	8,25	1,59	1,44	2,49
Max	75	11	2,09	2,29	3,46
Min	47	6	1,02	0,37	1,07
Ecart-type	8,13	1,14	0,28	0,75	0,78

Caractérisation piézométrique

Les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale, et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m et 13,2 m soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m (Tableau II).

Tableau II. Synthèse des données piézométriques du bassin versant du Mayo-Kani

Ouvrages	NPMA(m)	NPC(m)	NPE(m)	VNP(m)
P1	362,4	362,78	361,24	1,5
P2	362,31	363,63	361,16	2,4
P3	366,27	367,08	364,96	2,1
P4	366,11	366,68	364,84	1,8
P5	361,43	364,56	362,31	2,2
P6	365,15	365,88	364,4	1,4
P7	366,82	367,52	365,42	2
P8	359,59	360,53	358,46	2
P9	366,76	367,62	365,57	2
P10	368,33	369,1	366,97	2,1
P11	375,02	376,09	373,22	2,8
P12	378,68	378,7	378,47	0,2
P13	389,71	390,05	390,27	-0,2
P14	355,96	357,39	354,81	2,5
P15	357,71	358,2	356,6	1,6
P16	356,06	357,37	354,49	2,8
P17	358,685	360,52	357,47	3
P18	361,06	362,33	359,14	3,1
P19	359,3	360,46	358,15	2,3
P20	400,47	412,01	398,78	13,2
P21	402,88	403,55	400,75	2,8
P22	393,75	392,98	388,79	4,1
P23	396,21	398,95	392,25	6,7
P24	403,04	404,89	399,32	5,5
P25	396,54	397,66	393,47	4,1
P26	381,39	383,09	379,91	3,1
P27	396,41	400,58	390,69	9,8
P28	402,82	403,26	401,42	1,8
P29	394,27	397,68	393,28	4,3
P30	382,98	385,66	380,72	4,9
P31	386,11	389,43	382,15	7,2
P32	383,34	389,03	379,3	9,7
P33	367,43	368,46	364,53	3,9
P34	371,1	372,8	370,05	2,7
P35	371,19	373,91	365,82	8
P36	383,78	384,86	381,86	2,9
P37	384,59	389,44	380,21	9,2
P38	359,49	360,63	358,36	2,2
P39	355,36	356,4	354,13	2,2
P40	356,17	357,75	354,32	3,4
P41	358,97	360,46	357,25	3,2
P42	363,99	364,02	362,98	1

P43	362,98	362,77	361,88	0,8
P44	391,44	392,86	390,14	2,7
P45	391,1	392,41	389,25	3,1
P46	396,99	404,56	393,13	11,4
P47	420,7	423,25	417,77	5,4
P48	402,66	406,1	399,47	6,6
P49	429,6	432,92	426,63	6,2
P50	481,68	485,25	477,84	7,4
P51	478,61	481,52	475,37	6,1
P52	436,74	437,37	436,61	0,7
P53	432,61	434,97	428,68	6,2
P54	419,76	417,49	419,55	-2
P55	402,98	406,11	400,89	5,2
P56	402,88	402,77	401,85	0,9
P57	413,25	415	412	2,9
P58	387,21	384,16	374,88	9,2
P59	380,25	381,66	378,37	3,2
P60	382,2	383,12	381,89	1,2
P61	375,18	378,81	370,97	7,8
P62	388,97	390,11	387,1	3
P63	368,3	370,01	366,1	3,9
P64	355,71	355,75	353,43	2,3
P65	369,28	374,78	364,94	9,8
P66	397,37	399,39	394,91	4,4
Moy.	384,81	386,62	382,6	3,96
'Méd.	381,79	383,1	378,88	3
Max.	481,68	485,25	477,84	13,02
Min.	355,41	354,27	355,4	-2
Ecart-T.	2,3	1,87	1,88	0,35
CV.	0,006	0,005	0,005	-0,175

NPMA : Niveaux piézométriques moyens annuels ; NPC : Niveaux piézométriques de crue ; NPE : Niveaux piézométriques d'étiage ; VNP : Variations des niveaux piézométriques ; Moy. Moyenne ; Méd. : Médiane ; Max. Maximum ; Min. : Minimum ; ET. Ecart-Type ; CV. Coefficient de Variation.

L'évolution des niveaux piézométriques mensuels en fonction des pluies montre que le mois de septembre représente la période des hautes eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani et mai celle des basses eaux (Figure 12, 13, 14, 15 et 16). Les cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani montre un écoulement uniforme des eaux souterraines. Cela est caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont convergentes (Figures 8, 9 et 10).

L'analyse des cartes piézométriques porte sur l'orientation des lignes de courant et la courbure des arcs des cercles. Ces cartes révèlent ainsi des zones à arc de cercle concentrique portant des lignes de courant convergentes. Ces zones constituent respectivement des zones de stockage et d'alimentation de l'aquifère à nappe du bassin versant du Mayo-Kani. Il faut noter que les zones de stockage de l'aquifère constituent des zones propices à l'implantation des ouvrages hydrauliques. D'une manière générale les lignes de courant convergent vers le cours d'eau Mayo-Kani qui constitue à cet effet le principal axe de drainage de l'aquifère à nappe du bassin versant du Mayo-Kani. Ce cours d'eau peut donc être alimenté par la nappe en période d'étiage.

La différence d'altitude entre les données piézométriques maximale (27 septembre 2022) et minimale (31 mai 2023) a permis de tracer la carte de fluctuation annuelle de la surface piézométrique. Cette dernière montre que les puits localisés sur les flancs de collines ont des fluctuations plus importantes que ceux situés dans les bas-fonds près du lit du cours d'eau Mayo-Kani. C'est l'exemple des puits P20 (13,2 m) P46 (11,4 m) situés à Lara ; le P32 avec 9,7m à Kassilé ; le P37 avec 9,2m à Boboyo ; le P58 avec 9, 2 m à Bipaing et le P65 avec 9, 8 m à Poudama. Cela s'expliquerait par la présence d'une matrice argileuse présente dans les bas-fonds qui réduit par ses propriétés de rétention et d'imperméabilité l'infiltration efficace. Cette zone est caractérisée par l'occupation pérenne de la nappe à faible profondeur.

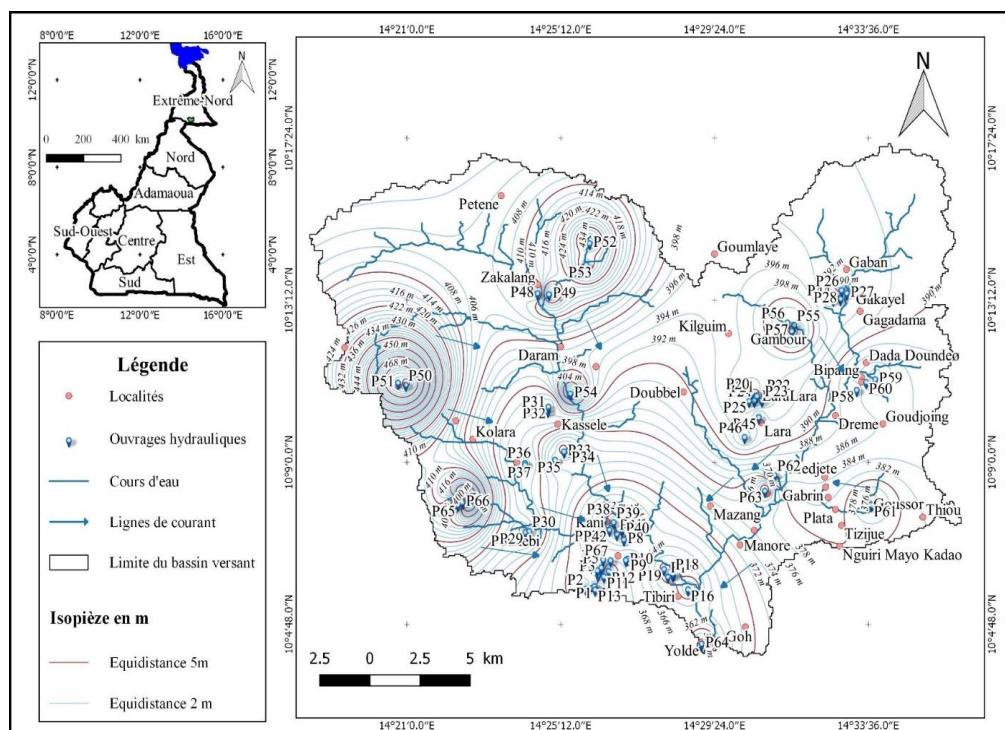


Figure 8 -Carte piézométrique minimale du bassin versant du Mayo-Kani

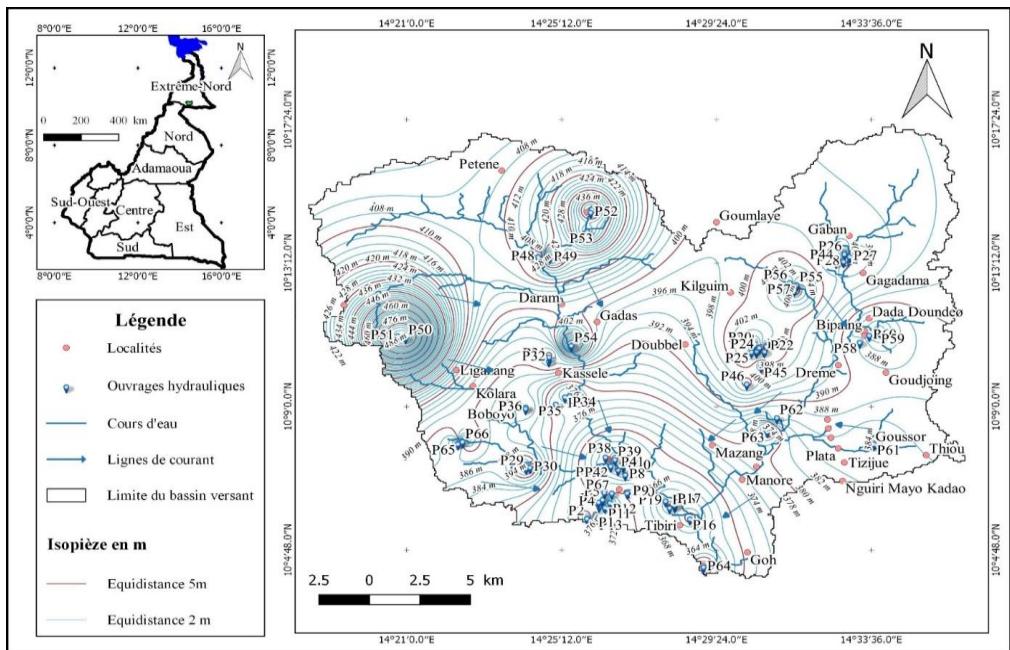


Figure 9- Carte piézométrique maximale du bassin versant du Mayo-Kani

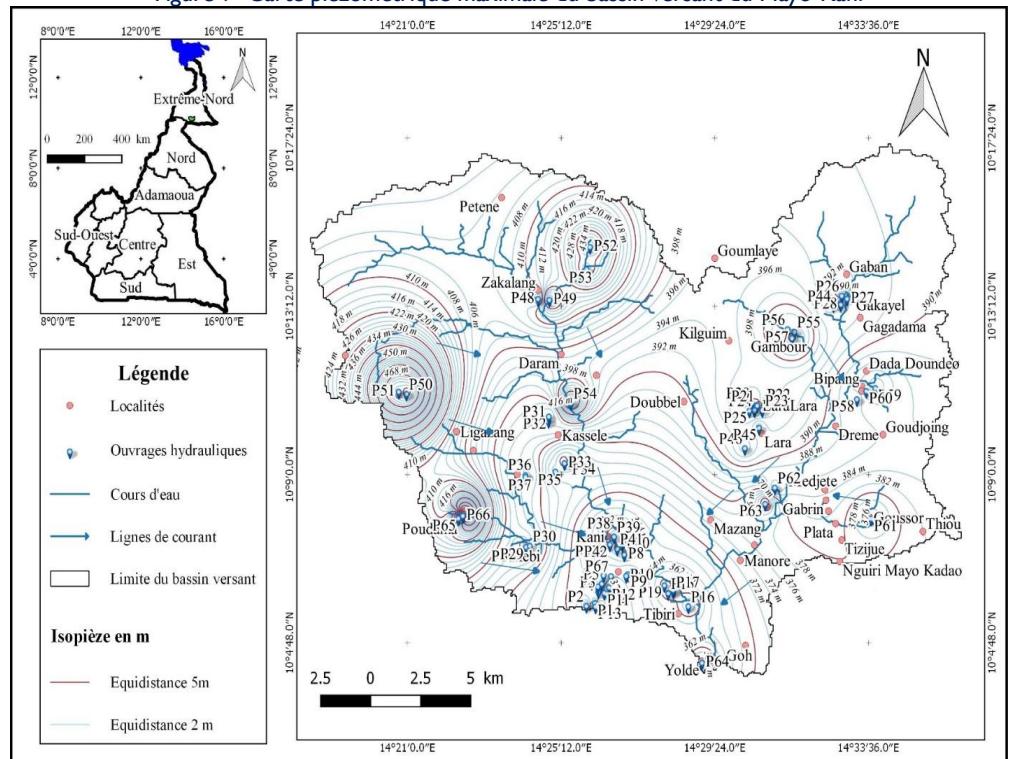


Figure 10- Carte piézométrique moyenne annuelle du bassin versant du Mayo-Kani

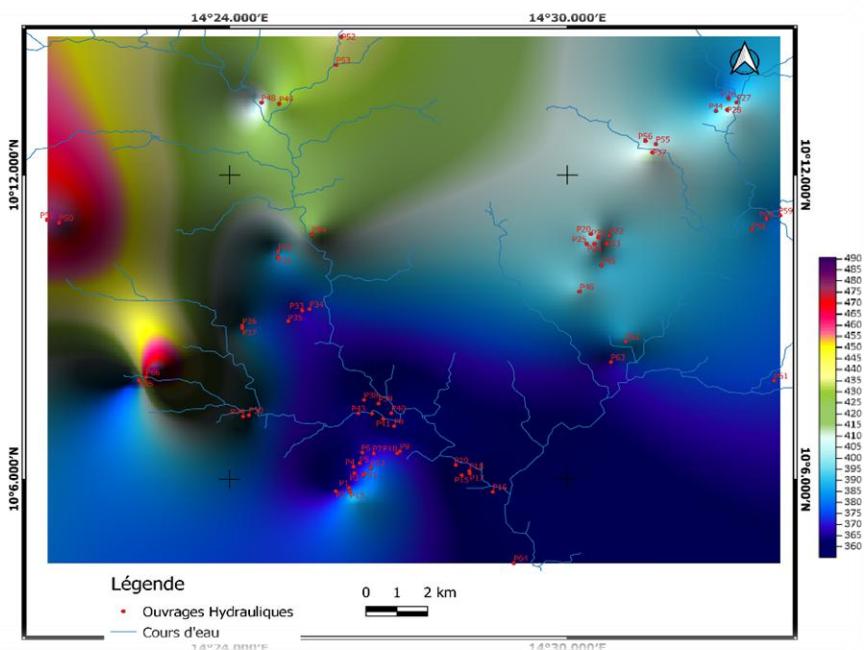


Figure 11- carte piézométrique du bassin versant du Mayo-Kani

L'analyse de la figure 11 présente la carte piézométrique avec une emphase sur les différentes nappes du bassin versant du Mayo-Kani. Le bassin versant est caractérisé par une alternance de la période sèche et de pluie saisonnières. La géologie étant dominée par les formations cristallines et des recouvrement sédimentaire variés, influençant la distribution et la nature des nappes aquifères. Cette figure permet de distinguer deux types de nappe dans ce bassin versant. La première est la nappe de profonde et perchée. Elles sont souvent confinées et leur recharge est moins directe, se produisant principalement lors des périodes de crues ou par infiltration latérale depuis les nappes superficielles. Ces nappes sont généralement moins vulnérables à la pollution, mais leur exploitation nécessite des infrastructures adaptées. Nous pouvons observer cette nappe vers le Sud-Est et Nord-Est du bassin versant avec une valeur de 360 à 400 m du niveau piézométrique. Plus de 96% de nos puits expérimentaux ce retrouvent dans ce type de nappe. La deuxième, c'est la nappe peu profonde ou superficielle. Elles sont alimentées par les précipitations et les eaux de surface, notamment lors des saisons des pluies. La recharge de ces nappes est influencée par l'infiltration directe des eaux de surfaces. Nous les observons vers le Nord-Ouest et le nord du bassin versant avec une hauteur du niveau piézométrique de 400 à 500 m. Elle représente environ 4% des puits d'observation.

Relation pluie-niveau piézométrique

Les précipitations influencent directement le niveau piézométrique en rechargeant les nappes phréatiques. En période de fortes pluies, les sols saturés limitent l'infiltration, favorisant le ruissellement. Cependant, une partie de l'eau s'infiltra et contribue à la recharge des nappes. La nature argileuse des sols dans certains zones réduit les zones d'infiltration, concentrant les apports dans les principaux axes d'écoulement. Les figures 12, 13, 14, 15 et 16 présentent la relation pluie-niveaux piézométriques dans les espaces du bassin versant du Mayo-Kani

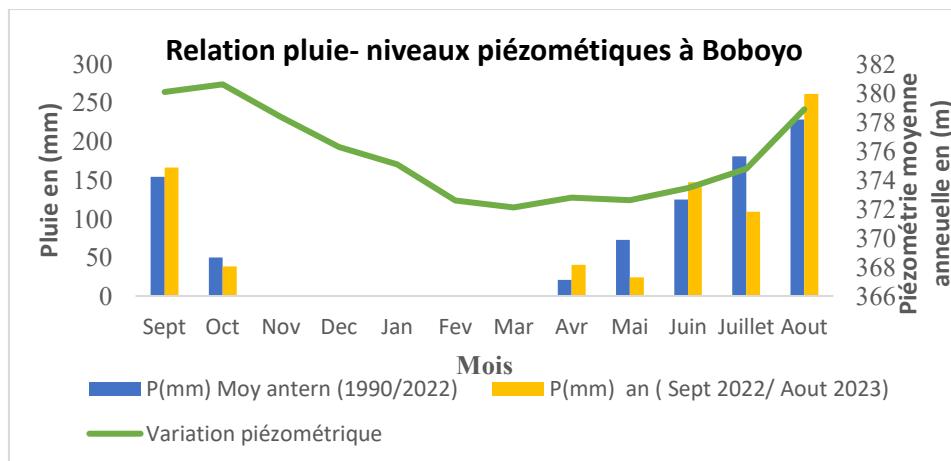


Figure 12- Relation pluie- niveaux piézométrique mensuels à Boboyo

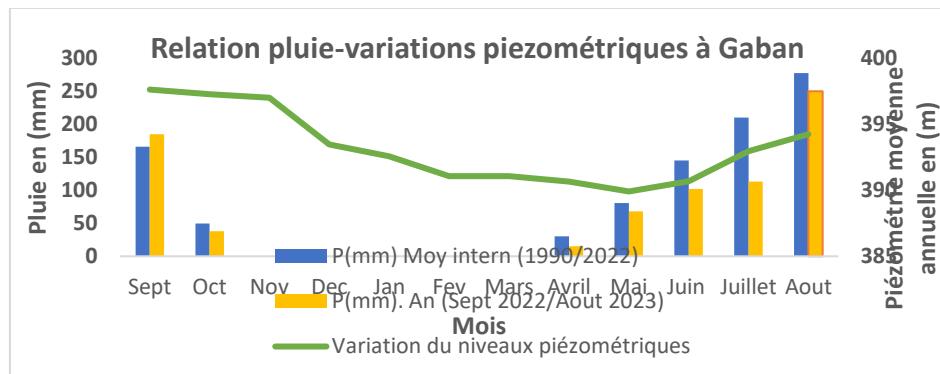


Figure 13 -Relation pluie- niveaux piézométriques mensuels à Gaban

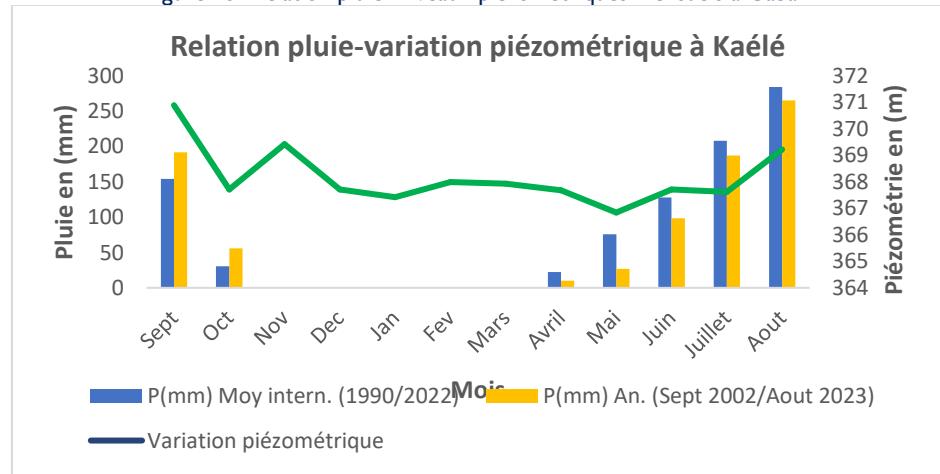


Figure 14- Relation pluie- niveaux piézométriques mensuels à Kaélé

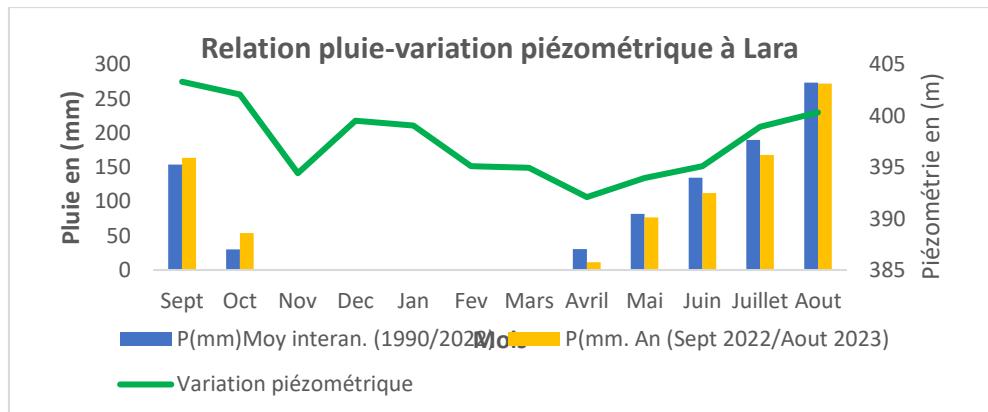


Figure 15 - Relation pluie- niveaux piézométriques mensuels à Lara

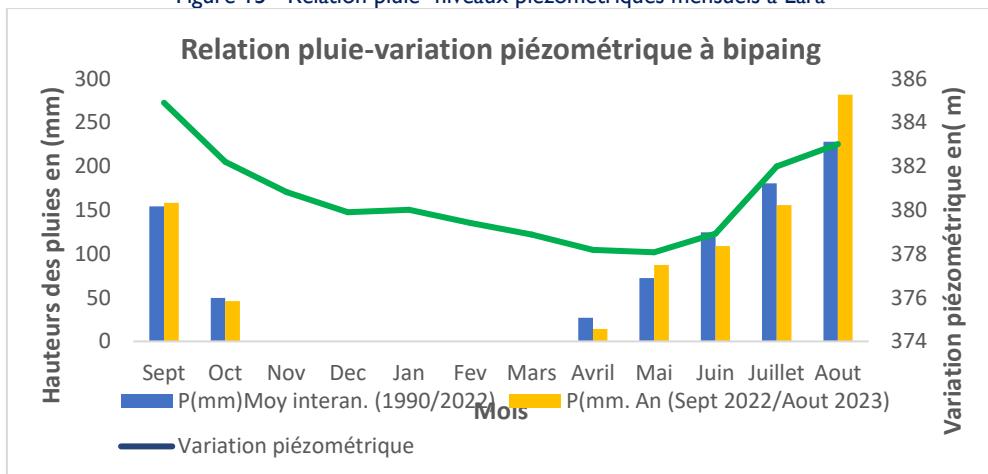


Figure 16 - Relation pluie-variation piézométrique à bipaing

L'analyse de la figure 12, 13, 14, 15 et 16 mettent en lumière le lien qui existe entre la pluviométrie et les fluctuations piézométriques dans le bassin versant du Mayo-Kani. Les figures révèlent un diagramme ombrothermique présentant d'une part les hauteurs de pluies de 1990 à 2022 à travers histogramme en jaune, de septembre 2022 à août 2023 à travers l'histogramme en bleue. D'autre part, une courbe de variation du niveau piézométrique en couleur verte. Il ressort que non seulement les pluies mensuelles ont connues une diminution dans le temps et dans l'espace dans presque toutes les stations présentées ; mais et surtout le caractère tributaire du niveaux piézométriques par les pluies dans le sens où ces dernières participent fortement à la recharge de la nappe à travers l'infiltration et de la percolation. Les figures 12, 13, 14, 15 et 16 démontrent à suffisance ce caractère tributaire du niveau piézométriques par la pluviométrie. En effet, nous observons dans toutes les stations évoquées que la nappe se recharge à partir du mois de juin à septembre avec les crues prononcées ; et se vide partir d'octobre à mai pendant l'étiage. Le caractère singulier de la variation piézométrique des localités étudiées dépend de la structure géologique et de la topographie de ces milieux. Nous notons ici les écarts de la variation piézométrique annuelle sont les suivants : Kaélé (4,06 m) ; Lara (9,38 m) ; Gaban (7,72 m) ; Bipaing (5,87 m) et Boboyo (7,45 m). Alors que la pluviométrie annuelle enregistrée dans les stations est la suivante : Kaélé (835mm) ; Lara (859,1mm) ; Gaban (771mm) ; Bipaing (852mm) et Boboyo (785mm). Les fluctuations du niveaux piézométriques sont fortement liées à la dynamique spatio-temporelle de la pluviométrie dans ce bassin versant.

DISCUSSIONS

La région de l'extrême-nord en générale et le bassin versant du Mayo-Kani en particulier n'a pas assez fait l'objet véritable des études hydrogéologiques. Les résultats des analyses piézométriques révèlent que les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale, et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m et 13,2 m soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m (Tableau 1). Cette fluctuation est relativement supérieure à celles trouvées dans d'autres bassins hydrographiques du mfoudi comme ceux de l'Ekozoa (FEUMBA, 2005) soit 0,55 à 1,65m. ; de Ntem (KALLA, 2007) soit 0,1 à 1,91m ; de l'Ebogo-Ewé (PRISO, 2007) soit 0,08 à 0,88m ; de Nkié (ABDOU, 2020) soit 0,1 à 7,48 m. L'analyse des cartes piézométriques nous présente un écoulement uniforme des eaux souterraines, caractérisé par une direction variée des lignes de courant qui sont convergentes. Les résultats de (ABDOU, N. et al., 2020) sur « Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun) » nous démontre au contraire l'analyse cartes piézométriques, le bassin versant du Nkié présentant un écoulement non uniforme des eaux souterraines, caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont soit convergentes soit divergentes similaires à celles généralement observées au sein de la majorité des nappes d'altérites des formations de socle, sous-climat tropical humide.

La nature du réservoir latéritique est constituée de gneiss et un petit cordon de sable indifférencié (nord et sud), de leuco granités plus ou moins fractionnés (centre), les tonalités granodiorites, sable indifférencié et un petit cordon des alluvions sablo-argileuses à graviers et galet (est) du bassin versant étudier. Cette constatation confirmerait la répartition des éléments structuraux selon deux secteurs tectoniques d'apparence morphologique différentes : l'axe NS-WS représentant l'étiement de la chaîne dominée par les structures souples marquée par la quasi-totalité des linéaments. L'axe WE et EW représentant la compression dominée par des structures fragiles (SAINT-JEAN, 1991). De ces analyses, il ressort que nous pouvons associer une bonne partie de nos observations à des structures déjà existantes avec une plus grande précision.

Les résultats sur la productivité des forages en fonction des paramètres hydrodynamiques montrent que les débits spécifiques dans cette zone de socle varient de 1,02 à 2,09m³/h, la moyenne est de 1,59 m³/h, l'écart type de 0,28 m³/h. Dans cette zone de socle, les valeurs de transmissivité varient entre 0,75x10-7 m²/s et 2,29x10-4 m²/s avec une moyenne de 1,44x10-5 m²/s. L'écart type est de 1,14x10-4 m²/s et le coefficient de variation est de 2,27. Ces résultats sont inférieurs à ceux de Ewodo et al, (2017) sur la caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la région de (l'Extrême-nord- Cameroun) soit 0,04 m³/h et 4m³/h avec une moyenne de 1,66 m³/h, avec une épaisseur d'altérite qui varie entre 1 et 14 m ; une profondeur totale comprise entre 30 et 75 m. Par ailleurs, Les travaux de André Firmin et al, (2015) dans le bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé ont souligné les facteurs à l'origine des écoulements souterraines qui sont influencé par les facteurs physiques et hydrauliques des terrains, c'est la même réalité dans le bassin versant du Mayo-Kani. Par contre, Adua kopa et al. (2012), dans le bassin sédimentaire de Douala mettent l'accent sur la lithologie dont la profondeur varie entre 0 et 100 m qui présente deux principaux aquifères : les nappes superficielles (de 0 à 17m) et les nappes profondes (de 20 à 73 m).

CONCLUSION

Le présent travail avait pour objectif d'effectuer, une caractérisation hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre, Les principaux résultats sont les suivants :

Les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale, et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m (zone de bas-fond) et 13,2 m (pour P3 situé au sommet des versants), soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m. Les cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre montre un écoulement non uniforme des eaux souterraines. Cela est caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont soit divergentes soit convergentes. Ces cartes révèlent ainsi des zones à arc de cercle concentrique portant des lignes de

courant convergentes et celles à arc de cercle concentrique et portant des lignes de courant divergentes. Ces zones constituent respectivement des zones de stockage et d'alimentation de l'aquifère à nappe.

La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments résultant de la superposition de l'information continue dans les trois images filtrées. Elle regroupe au total 720 linéaments. Cette carte de linéaments apparaît polymodale. En effet, elle nous révèle trois familles importantes d'orientation de linéaments : NW-SW ; NE et SE.

L'orientation NW-SW est prédominante, regroupant en elle seule 75% de l'information. Les linéaments appartenant à la famille NE regroupent 6,25%. Quant à la direction SE, elle est représentée à 18,75%.

En perspective, au regard des résultats obtenus, la dynamique piézométrique dans les aquifères du socle libre sont en lien direct avec la dynamique pluviométrique notamment le cycle de recharge et de vidange. Compte-tenu du contexte hydrogéologique de la zone, il est impératif qu'une étude doive faire sur la qualité de l'eau dans ce bassin versant.

REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES

- [1] ABDOU, N.N., (2020). Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun) : European Scientific Journal May 2020 edition vol. No.15ISSN : 1857-7881 (Print) e-ISSN1857-7431 ;
- [2] AN, T.D., TSUJIMURA, M., LE-PHU, V., KAWACHI, A., HA, D.T. (2014). Chemical characteristics of surface water and groundwater in coastal watershed, Mekong Delta, Vietnam. Procedia Environ Sci 20 :712–721. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.085>.
- [3] A ZGHIBI, J TARHOUNI, L ZOUHRI, (2013). Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of cap-Bon (Nord-east of Tunisia) : Journal of African Earth Sciences 87, 1-12p ;
- [4] BON, A. F., NDAM NGOUPAYOU, J. R., EWODO MOUDOU, G. & EKODECK, G. E. (2016). Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 29(2), 149–166. <https://doi.org/10.7202/1036545ar>
- [5] CASTANY, G. (1998). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Éd. Dunod, Paris V, 236p
- [6] DETAY M., (1987). Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non numériques et modélisation de la connaissance en hydrogéologie subsahélienne – Application au Nord Cameroun. Univ. De Nice, Thèse de doct. Ès-sciences, 456 p.,
- [7] DETAY M. (2000). Hydrogéologie : Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun, Minrest, INC, IRD, Paris, pp 30-37
- [8] DUMORT J-C ET PERONNE Y., (1966). Notice explicative sur la feuille de Maroua. 67p
- [9] DEWANDEL B., P. LACHASSAGNE, R. WYNS, J.C. MARECHAL ET N.S. KRISHNAMURTHY (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Hydrology J., 330, 260-284.
- [10] DJEUDA-TCHAPNGA, H.B., TANAWA, E., NGNIKAM, E. (2001). L'eau au Cameroun : Tome I : Approvisionnement en eau. Éd. Press. Univ.de Yaoundé, 356 p.
- [11] ESHTAWI, T., EVERS, M., TISCHBEIN, B. (2016). Quantifying the impact of urban area expansion on groundwater recharge and surface runoff. Int Assoc Sci Hydrol Bull 61(5) :826–843.<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.1000916>.
- [12] EWODO M. et al (2017). Caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la Région de l'Extrême-Nord, Cameroun : JOURNAL OF THE CAMEROON ACADEMY OF SCIENCES vol. 14 No.1 (2017) ;
- [13] FEUMBA, R. (2005). Hydrogéologie en zone de socle cristallin : Cas du bassin versant de l'Ekozoa, secteur nord de la ville de Yaoundé – Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 94p.
- [14] FREUBA, R. (2015). Hydrogéologie et évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke (Douala Cameroun), Thèse de Doctorat/phD en Sciences de la Terre ;
- [15] GANDOLFI J.M., Wynd R. et Damy P.C. (2010). Diagnostic des potentialités aquifères des formations de socle en région Mid-Pyrénées. Rapport BRGM/RP-58808-FR. 141p

- [16] JEBKALBE P. (2010). Les agriculteurs face aux enjeux de la conservation de l'environnement dans la région de l'Extrême-Nord du Cameroun. ISDA, Montpellier, 10p
- [17] KALLA-MPAKO, F. (2007). Caractérisation physique et hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de Ntem à Yaoundé Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 99 p
- [18] MA, F.S., WEI, A.H., DENG, Q.H., ZHAO, H.J. (2014). Hydrochemical characteristics and the suitability of groundwater in the coastal region of Tangshan, China. *J Earth Sci* 25(06) :1067–1075.<https://doi.org/10.1007/s12583-014-0492-9>
- [19] MINEE-GWP, (2009). Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau : Etat des lieux du secteur de l'eau au Cameroun, p 213.
- [20] LACHASSAGNE P. et Wyns R. (2005). Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences*, 2, 32-37.
- [21] OLIVRY, J.C. (1986). Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM, n° 9, 733 p.
- [22] SAMIRA et SAÏD (2014). Hydrodynamique et minéralisation des eaux de la nappe plio-quaternaire du plateau TIMAHDITE-Alnus GUIGOU (Moyen Atlas, Maroc. European Scientific Journal July 2014 edition vol. 10, No.20 ISSN :1857(Print) C-ISSN 1857-7431.
- [23] SANDRA ARDOIN-BARDIN. (2004). Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. *Hydrologie*. Université Monpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.
- [24] SELVAM, S., Iruthayajeba Dhana Mala R., Muthukakshmi V. (2013). A hydrochemical analysis and evaluation of groundwater quality index in Thoothukudi district, Tamilnadu, South India. *Int J Adv Eng Appl* 2(3) :25–37.
- [25] TILLEMENT B. (1970) : Hydrogéologie du NordCameroun. Bull. Dir. Mines et Géol., Cameroun.
- [26] WANG L., NIU H., CHEN R., SUN W., HUAI B., HAN C., ZHAO Y. (2023) - Different maximum precipitation altitudes and precipitation gradient characteristics of different basins in the Third Pole region. *Journal of hydrology*, vol. 626 (2023) 130343.
- [27] ZWIEBEL J. (2015) - Etude de l'impact orographique sur la structure microphysique horizontale et verticale des précipitations. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal – UFR Sciences et Technologie. 179p.



Apport du modèle WEAP dans l'étude prospective de la balance offre/demande en eau dans le bassin de la Seybouse Maritime

Samir Hani¹, Imad Eddine Bouznad², Noureddine Guezgouz³, Nabil Bougherira¹ and Azzedine Hani¹

¹ Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable, University Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

² Université 8 May 1945 Guelma, Algérie

³ Université Mohamed Cherif Mesaidia Souk Ahras, Algeria

Résumé

Il s'agit d'élaborer une étude prospective de l'offre et de la demande en eau dans le bassin versant de la Seybouse maritime. Ce dernier, situé dans le Nord-Est de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen à semi-aride avec des potentialités en eau assez importantes. Néanmoins, la situation dans ce bassin reste alarmante avec un manque récurrent pour répondre aux besoins en eau de l'agriculture, de l'industrie et des populations. Cette situation serait liée à la croissance démographique, au développement socio-économique et aux changements climatiques.

Les données relatives à la gestion de l'eau dans le bassin, récoltées au niveau de l'Agence de Gestion Intégrée des Ressources en Eau d'Annaba ont permis de quantifier les différentes ressources en eau dans la région et d'appréhender la demande actuelle et future selon plusieurs scénarios d'exploitation. La confrontation de l'offre et de la demande en eau à l'aide d'un modèle de planification intégrée des ressources en eau, en l'occurrence WEAP, a permis de déterminer le manque à gagner pour satisfaire les besoins des différents utilisateurs à l'horizon 2050.

L'élaboration du modèle et sa validation permettent aux gestionnaires de prévoir différents scénarios (croissance démographique, augmentation des activités économiques, changement climatique, construction de station de dessalement, réutilisation des eaux usées) et de mettre en place les mesures appropriées pour sécuriser l'alimentation en eau des différents usagers jusqu'en 2050.

Mots clés : Gestion intégrée, Demande, Offre, Modèle WEAP, Seybouse...

Contribution of the WEAP model to the prospective study of the water supply/demand balance in the Seybouse Maritime basin

Abstract

The aim is to develop a prospective study of water supply and demand in the Seybouse Maritime watershed. Located in northeastern Algeria, this watershed benefits from a Mediterranean to semi-arid climate with significant water potential. Nevertheless, the situation in this basin remains alarming, with a recurring shortage to meet the water needs of agriculture, industry, and the population. This situation is linked to population growth, socio-economic development, and climate change. Data on water management in the basin, collected by the Annaba Integrated Water Resources Management Agency, has made it possible to quantify the various water resources in the region and to assess current and future demand under several exploitation scenarios. Comparing water supply and demand using an integrated water resource planning model, specifically WEAP, made it possible to determine the shortfall in meeting the needs of different users by 2050. The development and validation of this model allow managers to anticipate various scenarios (population growth, increased economic activity, climate change, construction of desalination plants, wastewater reuse) and to implement appropriate measures to secure the water supply for different users until 2050.

Keywords: Integrated management, Demand, Supply, WEAP model, Seybouse...

¹ Corresponding author: samir.hanidz@gmail.com

INTRODUCTION

L'Algérie, comme l'ensemble des pays du Sud de la Méditerranée, est confrontée depuis plusieurs décennies à une baisse de ses ressources en eau se traduisant par une fragilité de l'ensemble des secteurs dépendant de cette ressource (Hani, 2024). L'AEP et l'agriculture représentent les secteurs les plus touchés en ce sens qu'il s'agit d'une région avec une démographie galopante et d'une agriculture essentiellement extensive, largement dominée par les cultures pluviales.

Après les différents épisodes de sécheresse qui ont frappé le pays, des investissements colossaux ont permis de construire de nombreux barrages, des STEP et dernièrement des usines de dessalement des eaux marines. Malgré ces investissements les difficultés pour répondre aux différents besoins en eau persistent d'où la nécessité de mettre en place une vraie politique de gestion intégrée des ressources en eau (Boukla et al., 2014 ; Hamlat et al., 2012). C'est dans ce contexte que cette recherche, utilisant le modèle WEAP, a été appliquée à la région d'Annaba en vue de contribuer à l'amélioration de la gestion des ressources en eau.

MATERIELS ET METHODE

Site étudié :

La région est limitée au Nord, par la mer méditerranée, à l'Ouest, par le massif de l'Edough et le bassin fermé du lac Fetzara, à l'Est, par le prolongement oriental du système aquifère Annaba-Bouteldja, au Sud-Est, par le Djebel Beni Salah et au Sud, par la chaîne numidique de la Cheffia et d'El-Kala.

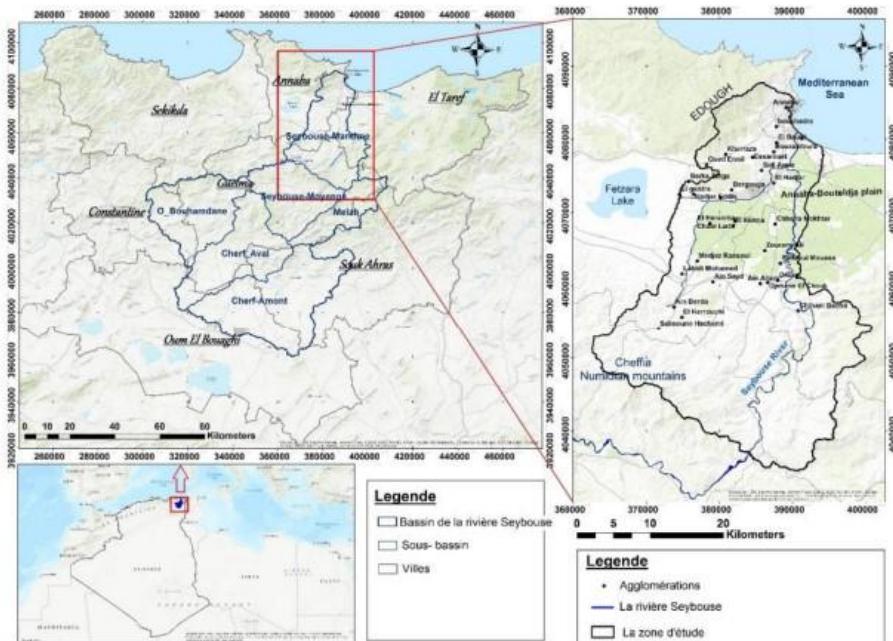


Fig. 1. Situation géographique du bassin de la basse Seybouse.

D'un point de vue lithologique, la région est constituée par des formations mio-plio quaternaire, constituées par des argiles, sables, graviers.... Il y a trois nappes différentes : la nappe superficielle d'Annaba constitué par des sables et limons, la nappe de Bouchegouf au sud et la nappe profonde d'Annaba constituée par des graviers et galets. Par rapport au grand bassin de la Seybouse dans son ensemble, la basse Seybouse est la région où il y a le plus d'industrie (Sider El-Hadjar, Ferrovial, Fertial,).

Beaucoup de périmètres d'irrigation se sont développés ces dernières années :

- le périmètre de Bouchegouf
- le périmètre de Bounamoussa .

La région connaît une augmentation significative de sa population qui a atteint près de 700 000 ha en 2010. Le climat est d'une manière générale de type méditerranéen avec une saison sèche en été qui commence à partir de Mai jusqu'à Octobre et une saison humide à partir de Novembre jusqu'à Avril. La région reçoit en moyenne près de 595 mm/an de pluie au niveau de la station de Belkheir et 654 mm/an aux Salines. La température moyenne observée est de 18°C pour les deux stations (Belkheir et Salines). L'oued Seybouse est jaugé au niveau de la station de Mirbeck située à l'amont de la plaine d'Annaba. La station ne fonctionne plus mais le débit est de 15,25 m³/s (1984-1996).

METHODOLOGIE :

Pour analyser la situation actuelle et future, nous avons essayé, de quantifier :

- les ressources en eau superficielles et souterraines,
- les besoins pour l'AEP, l'Agriculture et l'Industrie,
- de confronter les ressources et les besoins à l'aide du logiciel WEAP

Le modèle WEAP représente une nouvelle génération de logiciels de planification de l'eau qui utilise la puissante capacité des ordinateurs personnels d'aujourd'hui pour donner aux professionnels de l'eau partout l'accès à des outils appropriés. Il permet de confronter les ressources et les besoins et permet aussi d'envisager plusieurs scénarios de gestion.

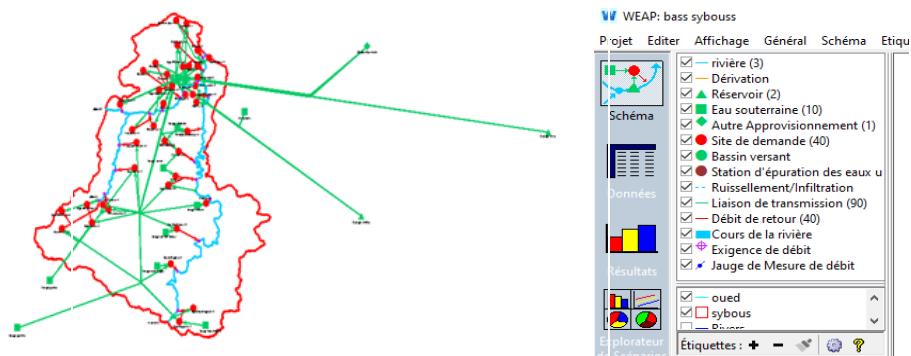


Fig. 2. Schématisation de l'offre, de la demande et des liens de transmission.

L'introduction des données se fait en créant le compte actuel et la demande en eau. Les informations relatives à la demande en eau domestique (nombre d'habitants pour année de référence, le taux d'accroissement et la dotation) sont assignées au modèle. Pour l'irrigation, les superficies agricoles, le taux d'accroissement et la dotation sont nécessaires alors que pour l'industrie les besoins en eau des différentes unités sont à renseigner. L'élaboration des scénarios futurs est effectuée de la manière suivante :

RESULTATS

Si l'on reprend la notion de Demande Non Satisfait (DNS) qui correspond à la quantité d'eau demandée - la quantité distribuée, on constate alors :

La DNS par scénario (Fig. 3) : la demande en eau non satisfaite passerait de 194 millions de m³ dans les conditions de pression sur la ressource et de changement climatique à près de 24 voire 22 millions de m³ dans le cas où l'usine de dessalement est mise en route et une politique de gestion de la ressource est appliquée.

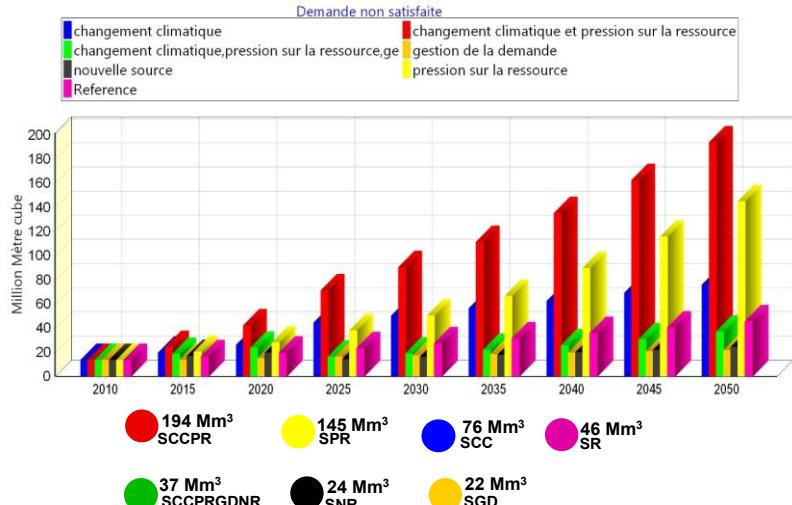


Fig. 3. Evolution de la demande en eau non satisfaite par scénario.

La DNS en eau potable (Fig. 4) : en mode changement climatique et pressions sur la ressource passerait de 115 millions de m³ à seulement 8 millions de m³ voire 0 m³ respectivement dans le cas d'une gestion rigoureuse de la ressource et de la mise en marche de l'usine de dessalement.

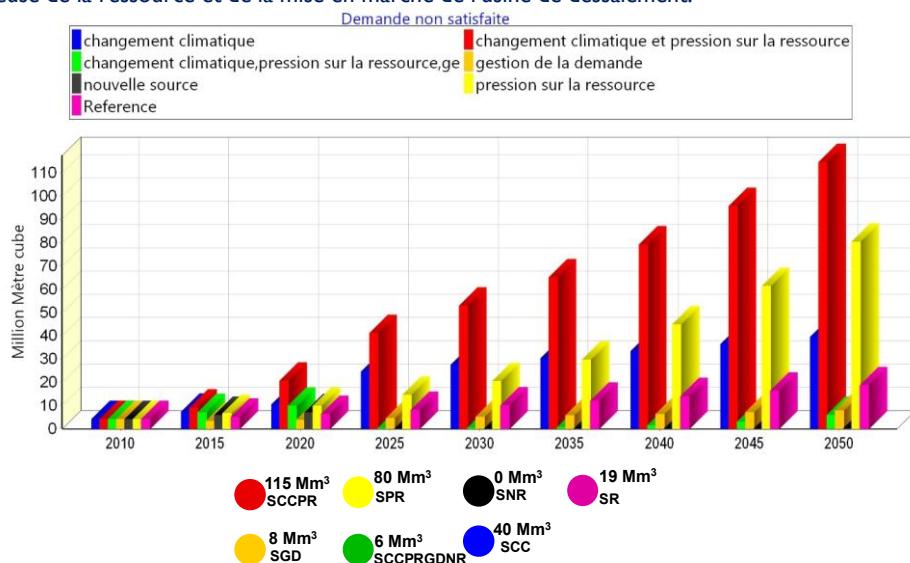


Fig. 4. Evolution de la demande en eau non satisfaite en eau potable.

La DNS eau d'irrigation (Fig. 5) : la gestion de la demande apparaît comme le moyen le plus efficace pour répondre aux besoins du secteur agricole.

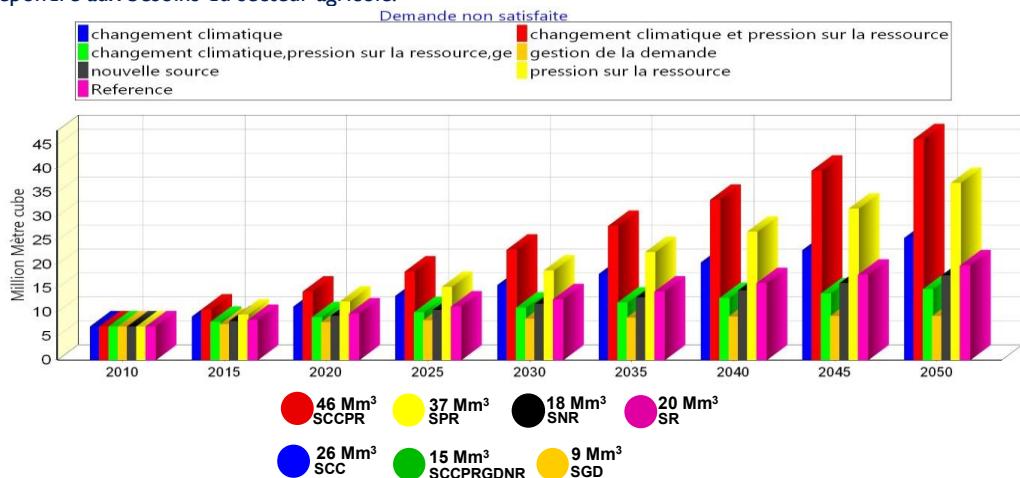


Fig. 5. Evolution de la demande en eau non satisfaite en eau d'irrigation.

La DNS eau industrielle (Fig. 6) : la gestion de la demande s'avère, là également, la politique la plus pertinente pour répondre aux besoins des unités industrielles. Avec le démarrage de la station de dessalement, l'eau qui était, à priori, destinée à l'alimentation en eau potable peut être réaffectée à l'industrie, car le dessalement augmente la disponibilité de l'eau potable.

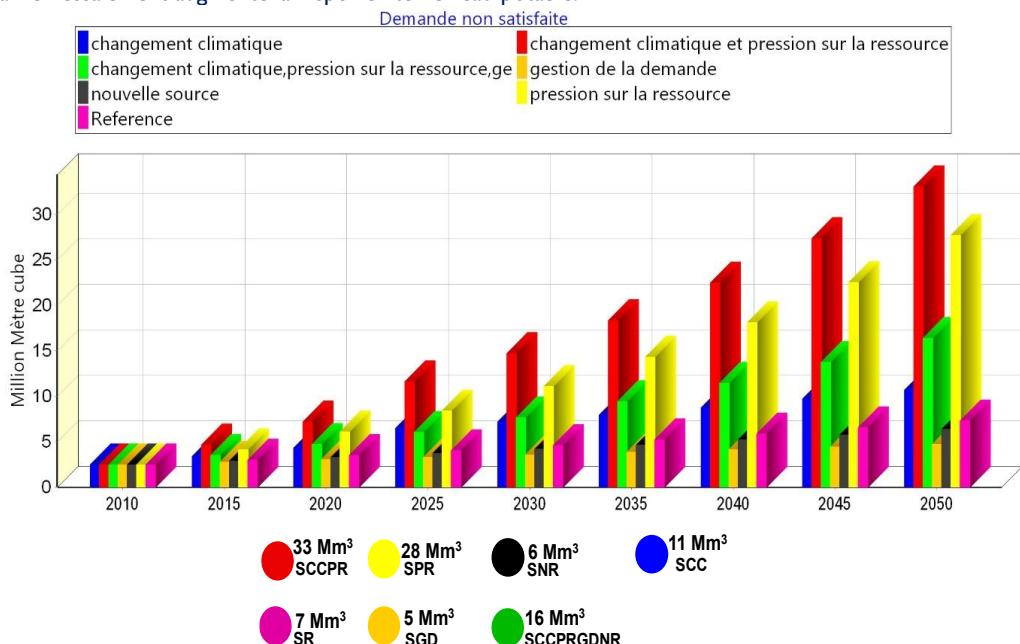


Fig. 6. Evolution de la demande en eau non satisfaite en eau industrielle.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATION

La basse Seybouse est confrontée à des défis importants pour répondre aux besoins en eau actuels et futurs en raison de ressources en eau limitées et de l'augmentation de la population et de la croissance économique. Les résultats des simulations réalisées à l'aide du modèle WEAP montrent qu'il est toujours possible d'atténuer les impacts du manque d'eau en apportant des solutions concrètes telles que l'utilisation d'une station de dessalement et la réutilisation des eaux usées traitées.

D'autres solutions sont encore envisageables, nous pouvons citer à titre d'exemples, la réduction progressive des pertes d'eau, la réutilisation et le recyclage de l'eau et la recharge artificielle des aquifères. La déminéralisation des eaux des forages est également souhaitée. La combinaison de ces mesures pourrait entraîner des réductions significatives de la demande non satisfaite, soulignant l'importance d'une approche globale de la gestion de l'eau.

Références

- [1] Bouklia-Hassane R., Djilali Y., El-Bari Tidjania A., 2014. Prospects for a larger integration of the water resources system using WEAP model: a case study of Oran province, Desalination and Water Treatment, Volume 57, Issue 13, March 2016, pages 5971-5980,
- [2] Hamlat A., Errih M., Guidoum A., 2012. Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. Arabian Journal of Geosciences. Volume 6, Issue 7, pp 2225-2236.
- [3] Hani S., 2024. Raréfaction et sécurisation de l'eau dans un bassin méditerranéen sous contraintes de réchauffement climatique et de croissance démographique. Thèse Doct. Univ ; Badji Mokhtar Annaba. 132 p.



Caractérisation et modélisation conceptuel du fonctionnement des eaux thermo-minérales. Cas de la région de Mila (NE Algérien)

Taha-hocine Debieche¹, Abdelmalek Drouiche², Bouchra Boulatrous², Ahlam Bounneche², Youcef Rouikha²

^{1,2} Équipe de recherche Eau et Environnement, Laboratoire de Génie Géologique (LGG), Faculté SNV, Université de Jijel, Algérie

Résumé

L'Algérie compte plus de 200 sources thermo-minérales, dont une forte concentration à l'Est du pays et la température de leur eau varie entre 22 et 97°C. La région de Mila est un exemple type de ces eaux du NE algérien, où environ 20 sources émergent, mais peu étudiées. Ce travail de recherche a pour but de caractériser chimiquement ces eaux et de montrer leur fonctionnement hydrodynamique. Pour atteindre cet objectif une campagne d'échantillonnage a été effectuée le 10/04/2021 sur 3 localités où huit sources thermales émergent dans trois localités à formations géologiques différentes : carbonatées (Béni-Haroun), triasique (Béni-Guechat) et alternées (carbonatées - marnaise) d'Ouled Achour – Zouaoui. Des mesures in-situ des paramètres physico-chimiques (Γ , pH et conductivité) et des analyses au laboratoire (éléments majeurs) ont été effectuées. Les résultats obtenus montrent que la température des sources des ces trois localités oscillent entre 36,9 et 53,1°C, les conductivités entre 4900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 27600 $\mu\text{s}/\text{cm}$, le pH entre 7.04 (neutral) et 5.97 (acide) et l'existence de deux faciès chimiques (selon la classification de Piper) : bicarbonate sodique et potassique pour Béni Guechat et chlorure sodique et potassique ou sulfaté sodique pour Béni Haroun et Ouled Achour-Zouaoui. La combinaison des résultats chimiques et des données géologiques et structurelles, nous a permis d'estimer la profondeur originale d'eau de ces sources (470 à 827 m) et de dresser 3 modèles conceptuels qui expliquent le fonctionnement hydrodynamique de ces sources thermo-minérales.

Mots clés : Eau Thermo-Minérale, Hydrochimie, Gradient Géothermique, Modèle Conceptuel

Characterization and conceptual modeling of the functioning of thermo-mineral waters. Case of the Mila region (NE Algeria)

Abstract

Algeria has more than 200 thermal mineral springs, with a high density in the east of the country and the temperature of their water varies between 22 and 97°C. The Mila region is a typical example of these waters in northeastern Algeria, where around 20 springs emerge, but little studied. The aim of this research is to chemically characterize these waters and demonstrate their hydrodynamic functioning. To achieve this aim, a sampling campaign was carried out on April 10, 2021, at three locations where eight thermal springs emerge in three localities with different geological formations: carbonate (Béni-Haroun), Triassic (Béni-Guechat), and alternating carbonate-marl (Ouled Achour – Zouaoui). In-situ measurements of physico-chemical parameters (Γ , pH, and conductivity) and laboratory analyses (major elements) were carried out. The results obtained show that the temperature of the springs in these three locations ranges from 36.9 to 53.1°C, conductivity from 4900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ to 27600 $\mu\text{s}/\text{cm}$, pH between 7.04 (neutral) and 5.97 (acidic), and the existence of two chemical facies (according to Piper's classification): sodium and potassium bicarbonate for Béni Guechat and sodium and potassium chloride or sodium sulfate for Béni Haroun and Ouled Achour-Zouaoui. The combination of chemical results and geological and structural data has enabled us to estimate the original depth of the water in these springs (470 to 827 m) and to draw up three conceptual models that explain the hydrodynamic functioning of these thermal mineral springs.

Keywords: Thermomineral Water, Hydrochemistry, Geothermal Gradient, Conceptual Model.

¹ Corresponding author: debieche_taha-hocine@univ-jijel.dz

I. INTRODUCTION

Les eaux thermo-minérales sont des eaux d'origine souterraine, caractérisées par leur température élevée, supérieure à la température moyenne du milieu environnant (20°C) [1], et leur richesse en minéraux et oligo-éléments. Le Nord-Est algérien possède une potentialité importante en eau thermo-minirale, où plus de 50 sources d'eau émergent d'une manière naturelle et avec des températures de 22 à 98°C [2], lié au gradient thermique (2.5 à $4.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) [3]. Les faciès chimiques de ces eaux thermales sont présentés principalement par trois familles : chloruré, sulfaté et bicarbonaté [4]. Ils sont dus principalement à la dissolution des formations gypseuses et carbonatées lors du parcours des eaux en profondeur. La région de Mila est caractérisée par la présence de plusieurs sources thermales, mais peu étudiées, d'où l'intérêt de cette étude qui a pour objectif de caractériser et d'illustrer le fonctionnement hydrodynamique de quelques de ses sources thermo-minirales.

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude se trouve dans la wilaya de Mila (NE algérien) (Figure 1A) et occupe sa partie Nord (Figure 1B). Elle se caractérise par des précipitations élevées et qui varient entre 500 et 1200 mm/an [5]. La wilaya de Mila se caractérise par une richesse en eaux thermale, où plus de 20 sources thermales ont été recensées (Figure 1B), dont trois émergent dans notre zone d'étude (Figure 1C). Cela est lié principalement à la tectonique intense et profonde de la région qui favorise la remonté rapide des eaux en gardant des températures élevées.

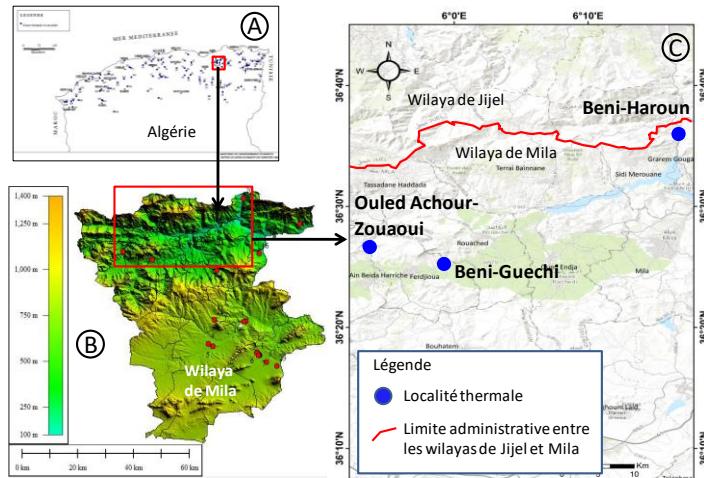


Fig. I - Situation de la zone d'étude. A) Inventaire des sources thermo-ménirales du Nord Algérien [4] ; **B)** Inventaire des sources dans la wilaya de Mila ; **C)** Inventaire des localités thermales de la zone d'étude
Dans cette étude, nous nous concentrons sur trois localités thermales, à formations géologiques différentes, de la partie nord de la wilaya (Figure I C) : la première est celle de Beni-Haroun et qui se caractérise par des formations carbonatées ; la deuxième est celle de Beni-Guécha et qui se caractérise par des formations triasiques ; et la troisième est celle Ouled Achour-Zouaoui et qui se caractérise par un contact calcaire-marne.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour étudier les sources thermales de ces trois localités, une campagne de prélèvement a été réalisée le 10/04/2021, où 8 sources ont été échantillonnées : deux dans la localité de Beni-Haroun (BH1 et BH2) et espacées par une distance de 50 m, trois dans la localité de Beni-Guécha (BG1, BG2 et BG3) et espacées par des distances de 60 m (BG1 - BG2) et de 70 m (BG2 et BG3) et trois dans la localité d'Ouled Achour-Zouaoui (OA1, OA2 et ZI) et espacées par des distances de 125 m (OA1 - OA2) et de 350 m (OA1 - ZI).

Les paramètres physico-chimiques (pH, Température et conductivité) ont été mesurés in-situ à l'aide d'un multiparamètre de marque Hanna. L'analyse des éléments majeurs a été faite au laboratoire de Génie Géologique (LGG) en utilisant trois méthodes : titrimétrique pour le dosage de Ca^{2+} , TH, Cl^- et HCO_3^- ; spectrophotométrique d'absorption moléculaire, en utilisant l'appareil VWR - UV 1600 PC, pour le dosage de SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et PO_4^{3-} ; spectrophotométrique d'absorption atomique, en utilisant le photomètre de flamme AFP 100, pour le dosage de Na^+ et K^+ .

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Caractérisation physico-chimique des eaux thermo-minérales

Les résultats des mesures in-situ (Figure 2A) montre que la température maximum (53.1°C) est enregistrée dans la source de Béni-Guechat 2 et la température minimale (37.8°C) est enregistrée dans la source d'Ouled Achour 1. Selon la classification des eaux thermales (Verdeil 1982), les eaux de ces trois localités varient entre deux classes : la classe des eaux chaudes ($30 - 50^\circ\text{C}$) présentée par la localité de Beni-Haroun et la localité d'Ouled Achour - Zouaoui et la classe des eaux très chaude ($50-100^\circ\text{C}$) indiquent la zone de Béni-Guechat. Les valeurs mesurées de la conductivité varient entre 4900 et 27 600 $\mu\text{s/cm}$, indiquent une forte minéralisation. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les sources de la localité de Beni-Guechat (26 100 à 27600 $\mu\text{s/cm}$), puis les sources de la localité de Beni-Haroun (6400 $\mu\text{s/cm}$) et les plus basses sont celle de la localité Ouled Achour – Zouaoui (4900 – 5090 $\mu\text{s/cm}$). Ces valeurs indiquant que les sources de Beni-Guechat sont les plus chargées, sûrement dû à la dissolution des formations triasiques où les sources émergent. Le potentiel hydrogène (pH) mesuré sur les trois localités montre un pH neutre dans les sources de Béni-Haroun (7 ± 7.04) et un pH légèrement acide dans les autres localités avec des valeurs les plus faible (5.97 à 6.24) aux sources de Béni-Guechat.

Pour les cations (Figure 2 B et C), on observe une dominance du sodium (418 – 4890 mg/L), puis le calcium (75 – 473 mg/L) et puis le potassium (12 – 120 mg/L). Les autres cations présentent des concentrations inférieures à 120 mg/L. Les teneurs les plus élevées en calcium et en sodium sont observées au niveau des sources de la localité de Beni-Guechat.

Concernant les anions (Figure 2D), on observe que l'anion le plus abondant est les bicarbonates (335 – 1799 mg/L), puis les chlorures (124 – 298 mg/L), et puis les sulfates (113 – 237 mg/L). Les autres anions présentent des concentrations inférieures à 12 mg/L. Les fortes concentrations en bicarbonates et en sulfates sont observées dans les sources de la localité de Beni-Guechat. Les chlorures sont observés dans les 3 localités avec des concentrations maximums qui varient entre 273 et 298 mg/L. On constate aussi l'existence des nitrates (9 – 12 mg/L) dans les eaux thermo-minérales de Beni-Haroun (Figure 2E), cela peut être expliqué par un contact entre les eaux thermales (origine profonde) et les eaux de la nappe superficielle qui peuvent contenir des nitrates.

Cette évolution chimique montre que les sources liées aux formations triasiques sont plus chargées en éléments chimiques et plus chaude, due surement à la tectonique intense de la remonté du trias et à la présence des formations à forte solubilité, tel que l'halite et le gypse.

La représentation de ces 8 échantillons sur le diagramme de piper a indiquée l'existante de deux faciès chimiques : bicarbonatée sodique et potassique (Béni Guechat 1, 2 et 3) et chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique (Béni Haroun 1 et 2, Ouled Achour 1 et 2 et Zouaoui 1).

4.2. Profondeur des eaux thermo-minérales

Les eaux thermo-minérales du nord-est algérien sont d'origine météorique et l'augmentation de la température des eaux est liée essentiellement au gradient thermique [6]. Selon la carte du gradient géothermique de Kazi Tani [7], la région de Mila a un gradient d'environ 4°C par 100 m. En partant d'une température moyenne des nappes superficielle (20°C) et de la température la plus élevée de chaque localité : Ouled Achour – Zouaoui (38.8°C), Béni-Haroun (39.7°C) et Béni-Guechat (53.1°C), on constate que la température liée au gradient thermique de chaque localité est la suivante : Ouled Achour – Zouaoui (18.8°C), Béni-Haroun (19.7°C) et Béni-Guechat (33.1°C). En appliquant la règle de trois par rapport au gradient géothermique on peut déduire que la profondeur originale des eaux de chaque localité est la suivante : Ouled Achour – Zouaoui (470 m), Béni-Haroun (492.5m) et Béni-Guechat (827.5m).

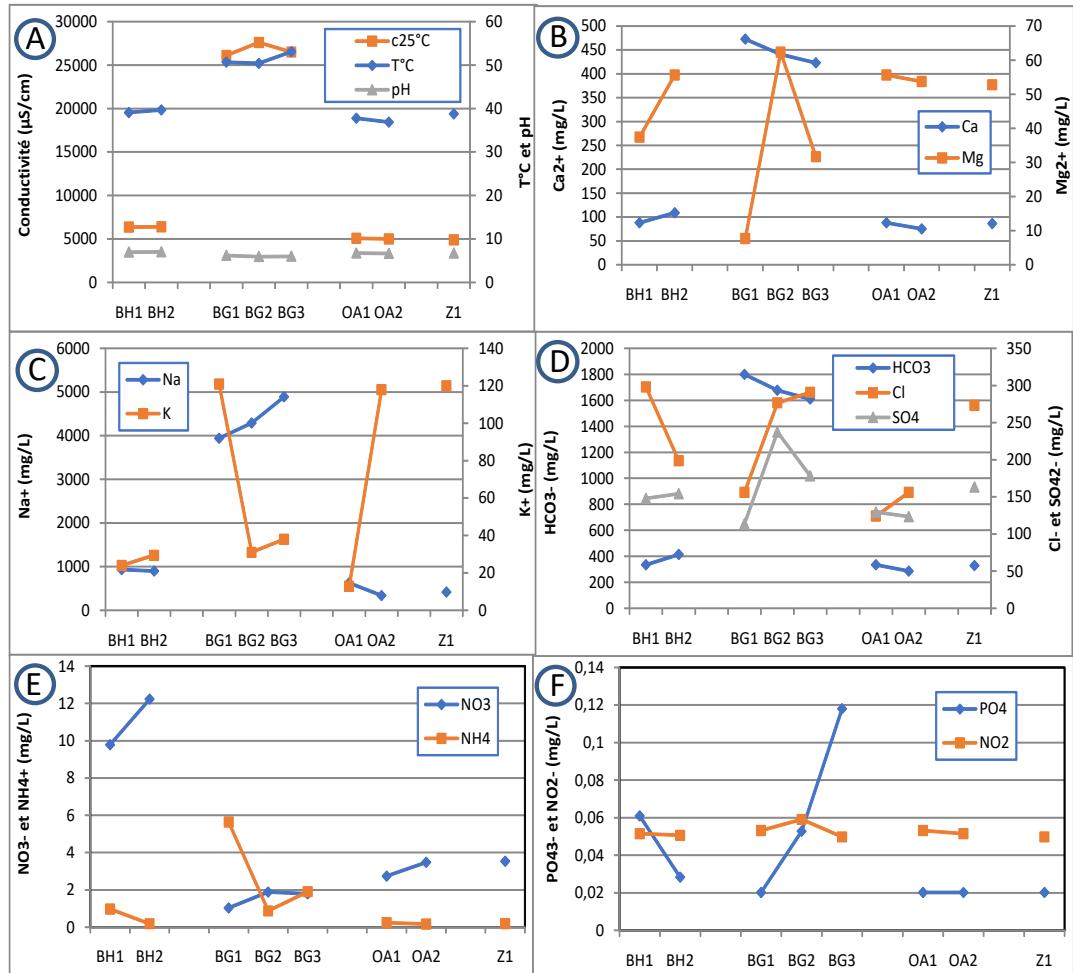


Fig. 2 – Composition chimique des eaux thermo-ménirale des localités de Béni Haroun (BH), Béni Guechat (BH), Ouled Achour (OA) - Zouaoui (Z)

4.3. Modèle conceptuel du fonctionnement des eaux thermo-minérales

En se basant sur le contexte géologique de la zone d'étude et les réponses hydrochimiques des sources thermo-minérales, nous proposons ces 3 schémas conceptuels qui schématisent le fonctionnement hydrodynamique des sources des trois localités de la zone d'étude (figure 3) :

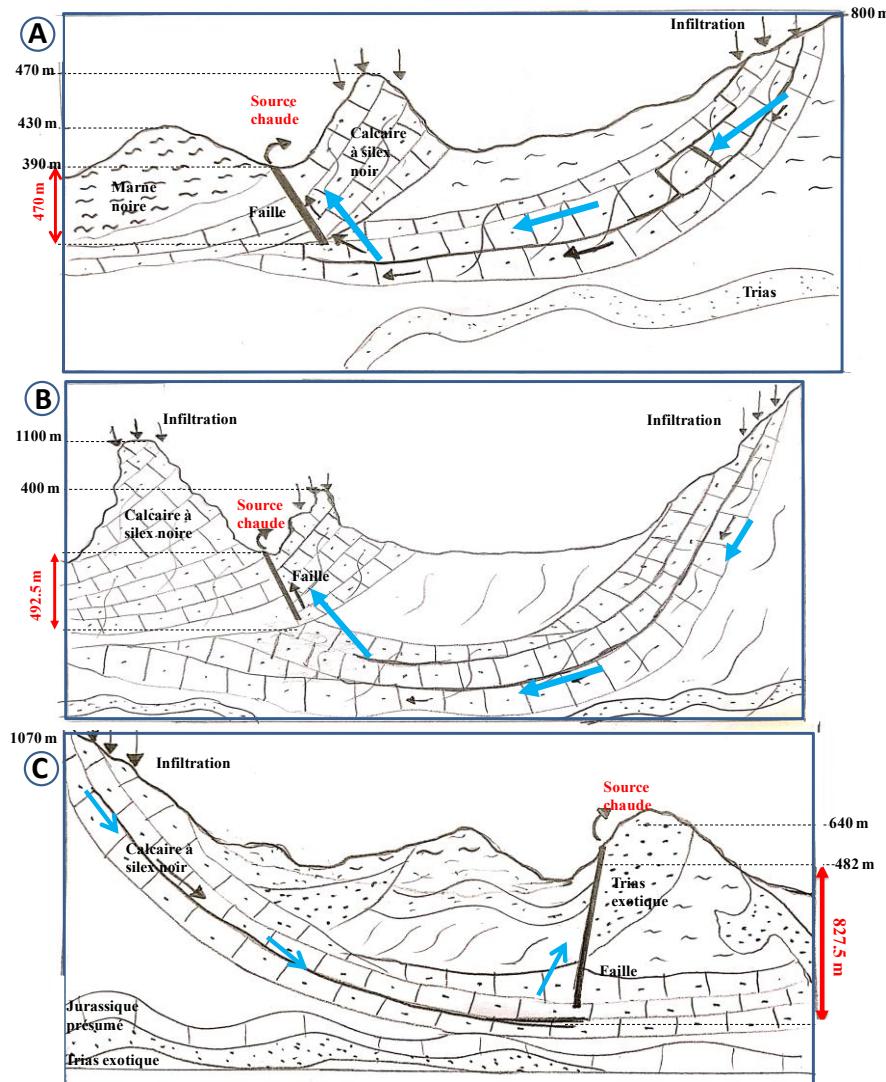


Fig. 3 - Modèle conceptuel du fonctionnement des eaux thermo-minérales dans les localités de : A) Ouled Achour-Zouaoui, B) Béni-Haroun et C) Béni-Guechat.

- La localité d'Ouled Achour – Zouaoui (figure 3A) : l'émergence des eaux thermo-minérales se fait dans un contact entre les marnes et les calcaires. L'origine de ces eaux est liées aux eaux d'infiltration dans des montagnes de voisinage ou lointaine, où l'eau s'infiltra progressivement en profondeur, jusqu'au moment où elle rencontre une faille profonde, puis elle remonte rapidement en conservant une grande partie de sa température.
- La localité de Béni Haroun (figure 3B) : le cheminement des eaux est comparable à celui de la localité d'Ouled Achour – Zouaoui, sauf que l'émergence se fait à travers une faille dans les formations carbonatées.
- La localité de Béni Guechat (figure 3C), le cheminement des eaux est comparable aux précédents, sauf que l'émergence se fait dans un contact anormal des formations gypsifères.

CONCLUSION

Cette étude montre l'importance de la combinaison des approches géologique et hydrochimique dans la compréhension du fonctionnement des sources thermales. Les résultats obtenus illustrent le rôle de la température et du gradient thermique dans la détermination de la profondeur des eaux, le rôle de la combinaison entre la chimie (paramètres physico-chimique et éléments majeurs) et la géologie pour la schématisation du cheminement des eaux, et le rôle de la tectonique profonde dans l'émergence des sources thermales. Malgré les résultats obtenus, cette étude reste incomplète et nous recommandons de la compléter par des analyses plus détaillées et continues de la chimie (éléments traces, isotopes...) et du débit pour connaître l'effet de la pluie sur ces eaux ainsi que ses zones d'alimentation.

Références

- [1] M. Morgane, Source thermale : qu'est-ce que c'est ?. Futura Sciences. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-source-thermale-1620/> (2022), consulté 31/7/2025
- [2] Djorfi, S. Djorfi, M. Djidjel 2014, Les sources thermominérales du Nord-Est Algérien. Influence des conditions lithologiques et structurales. Proceeding du 1^{er} colloque International : L'hydrogéologie et la géothermie, Université de Guelma, du 11 au 12 novembre (2014) 20-26
- [3] F.-Z. Bouchareb-Haouchine, A. Issadi, H. Ben Dhia. Estimation et interprétation du gradient géothermique en Algérie du Nord. Bulletin du Service Géologique de l'Algém, 5 (1994), n°1, 69-74.
- [4] CDER, Cartes du Gisement Géothermique, <https://www.cder.dz/vlib/carte/ima/carte10.jpg>. Consulté le 31/7/2025
- [5] A.N.R.H., Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (2 feuilles, une notice de 49 p.). Ministère de l'Equipement, Alger, Ed. I.N.C. (1993)
- [6] G. Féneyrou, La Vie des eaux thermominérales, Edition Eres, 1989, 197 p.
- [7] N. Kazi-Tani, Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine : le domaine intraplaque nord-algérien : approche megaséquentielle. Thèse de doctorat, Université de Pau, (1986), 784 p.

Lien d'inscription Colloque Eau-Trame bleue verte-Climat'2026
<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfGBsVFyrsqHcRzzGsiwAS7GLxXj7zNWKIFVB1am3h4vrY4bw/viewform?usp=dialog>



REPUBLIQUE TUNISIENNE

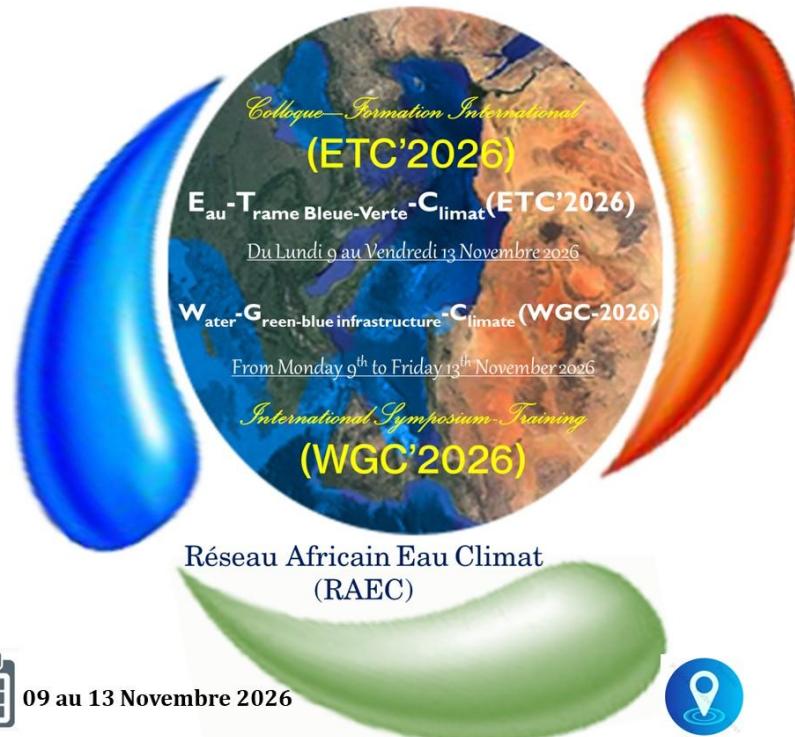


Colloque–Formation International (ETC'2026)

Indexation : e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688

Réseau Africain Eau Climat (RAEC)

Ressources en Eau, Trame Bleue Verte et Changement Climatique



09 au 13 Novembre 2026

Pour plus d'informations veuillez contacter

Pr. Noureddine GAALOUL

eauclimat@iresa.agrinet.tn et en Cc eauclimat@yahoo.com



Hammamet (Tunisie)



Université de Carthage



Lien d'inscription Formulaire Formation Eau-Trame bleue verte-Climat'2026

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSclJLJkuyRY7pkPmXIENfr6UETqw3pBbnE15j4ZpMJFhTbYwg/viewform?usp=dialog>



Réseau Africain Eau Climat (RAEC)



du Jeudi 12 au Vendredi 13 Novembre 2026



Hammamet (Tunisie)

Formation Internationale

|Indexation| e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688

Neuf modules au choix des formations au profit des Ingénieurs, Jeunes Doctorants et chercheurs seront animés par des Experts Internationaux:

Module 1 : Modélisation des Ressources en Eaux de Surface et Hydro chimie des eaux

Module 2 : Modélisation mathématique des écoulements et du transport de polluants dans les sols et les nappes souterraines

Module 3 : Système D'Information Géographique et Géomatique

Module 4: Q SIG et Modélisation Hydro-Agro-Climatologique SWAT

Module 5 : Modélisation d'un réseau d'AEP à l'aide du logiciel Epanet

Module 6 : Intelligence Artificielle un outil pour l'Ingénieur en Eau, Énergie Et Environnement

Module 7 : Anglais Scientifique; Comprendre et communiquer et Rédiger et publier un article scientifique

Module 8 : Formation : leadership durable : Gérer les talents pour construire un avenir vert

Module 9: Smart Agriculture: L'agriculture intelligente face au climat

www.jistee.org

|Open Access Journal|

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

eauclimat@yahoo.com

eauclimat@iresa.agrinet.tn



Géosciences pour une Terre durable





Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Mars 2026
Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE – March 2026

- ✓ Open-access Journal
- ✓ Double-anonymous Peer Reviewing
- ✓ Fast Publication: 20-30 Days

<http://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Mars 2026

Le thème retenu pour 2026 est “**Eau- Trame Bleue Verte – Climat**”, en vous rappelant, si besoin en était, que le changement global couvre à la fois le changement climatique et les changements anthropiques (variations d’occupation des sols et aménagements des bassins versants, prélèvements, etc.).

Nous lançons donc un appel à contributions pour des articles (articles longs, courts, encadrés) qu'il vous paraîtrait intéressant de voir figurer dans ce numéro de la revue Scientifique : Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE).

Les contributions seront attendues pour le courant du mois de Février 2026 afin de pouvoir être révisées par le Comité Scientifique International et que la mise en forme du numéro ait lieu en Mars 2026 au plus tard.

Visiter notre site : <https://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

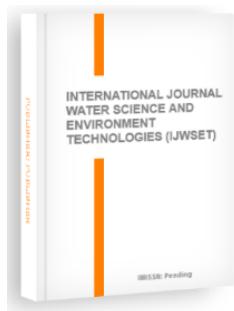


Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE – Mars 2026
International Journal of Water Science and Environment Technologies

Open access Journal are freely accessible via the internet for immediate worldwide. This Journal is an Open Access International Journal and will accept research and review manuscripts ranging from, Basic research on Water, Climate, Environment, Hydrology; hydrogeology and management of water resources; Agricultural hydraulics (Irrigation, Drainage, etc.), Modeling of Water Resources (Hydraulics, Hydrology, Hydrogeology), Physico-chemical quality of Surface and groundwater; Hydrobiology, microbiology, toxicology and ecotoxicology; the structure and function of aquatic ecosystems; Water quality, wastewater treatment and drinking water; Municipal and industrial wastewater treatment; Management of water resources (quantitative, socio-economic and legal aspects) ...

The manuscript/ paper can be submitted via email to jistee@iresa.agrinet.tn
or jistee@yahoo.com

to our online direct submission area, located here: <http://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>



Invitation for Research Article – March 2026

Submit Your Paper

WWW.JISTEE.org

e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688, | Open Access Journal |
Volume (xi) - Issue 1 – March 2026

Dear Researcher

We are happy to inform you that the International Journal Water Sciences and Environment Technologies of Current Advanced Research print and online journal, e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688, | Open Access Journal | is launching its next issue (September 2022). We would like to invite you to contribute your Research Article for publication in IJWSET.

We publish

- Original papers,
- Theory-based Empirical Papers,
- Review Papers,
- Case Reports,
- Conference Reports/Papers,
- Technology Reports,

Description :

- **Area of concentration:** Basic research on Water, Climate, Environment, Hydrology; hydrogeology and management of water resources; Agricultural hydraulics (Irrigation, Drainage, etc.), Modeling of Water Resources (Hydraulics, Hydrology, Hydrogeology), Physico-chemical quality of Surface and groundwater; Hydrobiology, microbiology, toxicology and ecotoxicology; the structure and function of aquatic ecosystems; Water quality, wastewater treatment and drinking water; Municipal and industrial wastewater treatment; Management of water resources (quantitative, socio-economic and legal aspects)
- **Frequency of publishing:** quaternar.: March; June, September and December
- **Mode of publishing:** Print and online
- **Language of publication:** English and French

We invite you to submit your manuscript(s) to jistee@iresa.agrinet.tn (and CC jistee@yahoo.com) , for publication. Our objective is to inform authors of the decision on their manuscript(s) within 24h of submission. Following acceptance, a paper will be published in the Current issue.

With Warm Regards
Editor-In-Chief
IJWSET Journals
International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

[Open Access Journal]

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

Volume (x) - Issue 2 - October 2025

W_{ater}-B_{iodiversity}-C_{limate'2025}



Water-Biodiversity-Climate:

Water resources modeling uses Geographic Information System

Editor-in-Chief: Pr Noureddine Gaaloul

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and
the Environment in Tunisia (ASTEE)