

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688
Open Access Journal

Volume (viii) - Issue 2 – December 2023

Water - **D**rought - **C**limate'2023



Integrated Water Resources Management

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

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

International Scientific Committee (ISC-WDC'2023)

<i>Nouredine Gaaloul</i>	<i>Prof. University of Carthage – IRESA - INRREGREF (Tunisia)</i>
<i>Hamadi Habaieb</i>	<i>Prof. University of Carthage – IRESA -IN-AT (Tunisia)</i>
<i>Zouhaier Nasr</i>	<i>Prof. University of Carthage -IRESA- INRREGREF (Tunisia)</i>
<i>Mohamed Hachicha</i>	<i>Prof. University of Carthage -IRESA- INRREGREF (Tunisia)</i>
<i>Zouhaier Hlaoui</i>	<i>Prof. University of Tunis - Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (Tunisia)</i>
<i>Adel Kbarraoui</i>	<i>Prof. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Rachid Boukchicha</i>	<i>M.Conf. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Nouredine Hamdi</i>	<i>Prof. Université of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Taojifik Hermassi</i>	<i>M.Conf. University of Carthage – IRESA -INRREGREF (Tunisia)</i>
<i>Mohamed Habib Sellami</i>	<i>M.Conf. University of Jendouba – IRESA- ESIM (Tunisia)</i>
<i>Hechmi Belaid</i>	<i>M. Assistant. University of Jendouba -IRESA- ESIM (Tunisia)</i>
<i>Rim Katlane</i>	<i>M.Conf. University of Manouba - Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités (Tunisia)</i>
<i>Ibrahimia Amadou Traoré</i>	<i>Expert Hydrogeologist</i>
<i>Mohamed Meddi</i>	<i>Prof. ENSH, (Algeria)</i>
<i>Azgedine Hani</i>	<i>Prof. Univ. Annaba (Algeria)</i>
<i>Larbi Djabri</i>	<i>Prof. Univ. Annaba (Algeria)</i>
<i>Salah Eddine Ali Rahmani</i>	<i>Prof. University Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algeria)</i>
<i>Saadane Djorji</i>	<i>Prof. University of Annaba (Algeria)</i>
<i>Mohammed Achite</i>	<i>Prof. University of Chlef (Algeria)</i>
<i>Abdelhalim Yabiaoui</i>	<i>Prof. University of Bechar (Algeria)</i>
<i>Mohamed Bessenasse</i>	<i>Prof. University of Saad Dahlab- Blida (Algeria)</i>
<i>Benabadjji Nonry</i>	<i>Prof. University of Tlemcen (Algeria)</i>
<i>Abdessamad Merzouk</i>	<i>Prof. University of Tlemcen (Algeria)</i>
<i>Beloulou Laroussi</i>	<i>Prof. University Badji Mokhtar, Annaba (Algeria)</i>
<i>Abdelhalim Yabiaoui</i>	<i>M.Conf. Univ. Bechar (Algeria)</i>
<i>Gnergazji Saadia</i>	<i>M.Conf. University of Biskera (Algeria)</i>
<i>Gwendouaz Abdelhamid</i>	<i>M.Conf. University of Blida1 (Algeria)</i>
<i>Khoulalia Wacila</i>	<i>M.Conf. University of Souk-Abras (Algeria)</i>
<i>Belkacem Bekkoussa</i>	<i>M.Conf. University Mustapha Stambouli de Mascara (Algeria)</i>
<i>Ali Essahlaoui</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>El Ouali Abdelhadi</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Abdellah El Hmadi</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Imad Manssour</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Abdelmajid Mounen</i>	<i>Prof. University Nadour ((Morocco)</i>
<i>Mbamed Anyay</i>	<i>Prof. University of Fès ((Morocco)</i>
<i>Abdelaziz Abdallaoui</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail ((Morocco)</i>
<i>Nadia Lablou</i>	<i>M.Conf. University Mohamed V Rabat ((Morocco)</i>
<i>Amadou Thierno Gaye</i>	<i>Prof. University of Cheikh Anta Diop, Dakar, (Senegal)</i>
<i>Sousou Sambou</i>	<i>Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Senegal)</i>
<i>Diop Ngom Fatou</i>	<i>Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Senegal)</i>
<i>Abdoulaye Faty</i>	<i>Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST ((Senegal)</i>
<i>Soro Nagnin</i>	<i>Prof. UFR STRM (Ivory Coast)</i>
<i>Gnamba Franck Maxime</i>	<i>Prof. UFR STRM (Ivory Coast)</i>
<i>Soro Nagnin</i>	<i>Prof. UFR STRM (Ivory Coast))</i>
<i>Cish Ngongzo Lwesi</i>	<i>Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)</i>
<i>Koussoubon A. Leonard</i>	<i>Prof. FLLAC/ UAC (Congo)</i>
<i>Koumassi Dègla Hervé</i>	<i>Prof. LACEEIDE/UAC (Benin)</i>
<i>Hamma Yaconba</i>	<i>Prof. 2iE (Burkina Faso)</i>
<i>Harouna Karambiri</i>	<i>Prof. 2iE (Burkina Faso)</i>
<i>Lienou Gaston</i>	<i>Prof. Univ. Yaoundé (Cameroun)</i>
<i>Gnandi Kissao</i>	<i>Prof. Univ. Lomé (Togo)</i>
<i>Hamadou Bokar</i>	<i>Prof. Univ. ENI-abt (Mali)</i>
<i>Salina Sanou</i>	<i>Pan African Climate Justice Alliance (Kenya)</i>
<i>Saeid Eslamian</i>	<i>Prof. University of Isfahan (Iran)</i>
<i>Amadou Gaye</i>	<i>Prof. CR4D (Ethiopia)</i>
<i>Richard Anyah</i>	<i>Prof. CR4D (Ethiopia)</i>
<i>Benjamin Lamptey</i>	<i>Prof. CR4D (Ethiopia)</i>
<i>Aqeel Al-Adili</i>	<i>Prof. Univ. Technology (Iraq)</i>
<i>Moumtaz Razack</i>	<i>Prof. University of Poitiers (France)</i>
<i>Lucila Candella</i>	<i>Prof. Univ. Catalonia (Spain)</i>
<i>Fotis K. Pliakas</i>	<i>Prof. Univ. Thrace (Greece)</i>
<i>Andreas Kallioras</i>	<i>Prof. Univ. Athens (Greece)</i>
<i>Christoph Schüth</i>	<i>Prof. Tech.Univ. Darmstrad (Germany)</i>
<i>Jean-François Deliege</i>	<i>Prof. University of Liège (Belgium)</i>

Preface



W

ater – at the center of the climate crisis

Climate change is exacerbating both water scarcity and water-related hazards (such as floods and droughts), as rising temperatures disrupt precipitation patterns and the entire water cycle. Water and climate change are inextricably linked. Climate change affects the world's water in complex ways. From unpredictable rainfall patterns to shrinking ice sheets, rising sea levels, floods and droughts – most impacts of climate change come down to water (UN Water). Climate change is exacerbating both water scarcity and water-related hazards (such as floods and droughts), as rising temperatures disrupt precipitation patterns and the entire water cycle (UNICEF). Get more facts on climate and water below.

Water scarcity: *About two billion people worldwide don't have access to safe drinking water today (SDG Report 2022), and roughly half of the world's population is experiencing severe water scarcity for at least part of the year (IPCC). These numbers are expected to increase, exacerbated by climate change and population growth (WMO). Only 0.5 per cent of water on Earth is useable and available freshwater – and climate change is dangerously affecting that supply. Over the past twenty years, terrestrial water storage – including soil moisture, snow and ice – has dropped at a rate of 1 cm per year, with major ramifications for water security (WMO). Water supplies stored in glaciers and snow cover are projected to further decline over the course of the century, thus reducing water availability during warm and dry periods in regions supplied by melt water from major mountain ranges, where more than one-sixth of the world's population currently live (IPCC). Sea-level rise is projected to extend salinization of groundwater, decreasing freshwater availability for humans and ecosystems in coastal areas (IPCC). Limiting global warming to 1.5°C compared to 2°C would approximately halve the proportion of the world population expected to suffer water scarcity, although there is considerable variability between regions (IPCC). Water quality is also affected by climate change, as higher water temperatures and more frequent floods and droughts are projected to exacerbate many forms of water pollution – from sediments to pathogens and pesticides (IPCC). Climate change, population growth and increasing water scarcity will put pressure on food supply (IPCC) as most of the freshwater used, about 70 per cent on average, is used for agriculture (it takes between 2000 and 5000 liters of water to produce a person's daily food) (FAO).*

Water-related hazards: *Climate change has made extreme weather events such as floods and droughts more likely and more severe (IPCC). Rising global temperatures increase the moisture the atmosphere can hold, resulting in more storms and heavy rains, but paradoxically also more intense dry spells as more water evaporates from the land and global weather patterns change. (World Bank). Drought and flood risks, and associated societal damages, are projected to further increase with every degree of global warming (IPCC). The frequency of heavy precipitation events will very likely increase over most areas during the 21st century, with more rain-generated floods. At the same time, the proportion of land in extreme drought at any one time is also projected to increase (IPCC). Water-related disasters have dominated the list of disasters over the past 50 years and account for 70 per cent of all deaths related to natural disasters (World Bank). Since 2000, flood-related disasters have risen by 134 per cent compared with the two previous decades. Most of the flood-related deaths and economic losses were recorded in Asia (WMO). The number and duration of droughts also increased by 29 per cent over this same period. Most drought-related deaths occurred in Africa (WMO).*

Water solutions: *Healthy aquatic ecosystems and improved water management can lower greenhouse gas emissions and provide protection against climate hazards (Water and Climate Coalition). Wetlands such as mangroves, seagrasses, marshes and swamps are highly effective carbon sinks that absorb and store CO₂, helping to reduce greenhouse gas emissions (UNEP). Wetlands also serve as a buffer against extreme weather events (UNEP). They provide a natural shield against storm surges and absorb excess water and precipitation. Through the plants and microorganisms that they house, wetlands also provide water storage and purification. Early warning systems for floods, droughts and other water-related hazards provide a more than tenfold return on investment and can significantly reduce disaster risk: a 24-hour warning of a coming storm can cut the ensuing damage by 30 per cent (WMO). Water supply and sanitation systems that can withstand climate change could save the lives of more than 360,000 infants every year (New Climate Economy report). Climate-smart agriculture using drip irrigation and other means of using water more efficiently can help reduce demand on freshwater supplies (UNEP).*

Nouredine 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.iistee.org



International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)

Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE)

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

Open Access

08 Volumes, 27 Issues, (404 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 (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 (13 Papers) *Water -Drought-Climate'2023 Integrated Water Resources Management*

Issue 3 – December 2023 (6 Papers) *Water -Drought-Climate'2023 Reuse of treated wastewater in agriculture*

Issue 4 – December 2023 (4 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 3 – 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 3 – 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 -Environnement-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 3 – 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 3 – December 2014 (11 Papers) *Climate Change in the Mediterranean Region*

Copyright © 2022 – Jistee Tous droits réservés



Table of Contents

Kheloufi Attou Ahmed (Département des Sciences de la Nature et de la vie, Sciences de la Terre et de l'Univers. Faculté Sciences de la Terre et de l'Univers-Université de Tlemcen, Algérie) <i>Baba-Hamed Kamila, Bouanani Abderrazak</i> : Homogénéisation des séries pluviométriques dans le cadre de l'évaluation de la Sécheresse 1982-2022 (Nord-Algérie)	6
Traore Ibrahima Amadou (Tunisie) : De la possibilité d'amélioration de l'estimation des valeurs de l'infiltration efficace à l'entrée des modèles de bilan hydrogéologique des nappes aquifères superficielles – Exemple de la nappe de Takelsa dans la région du Cap Bon -Tunisie	17
Belaïd Hechmi (ESIM - Tunisie). Dam Siltation in northern tunisian semi-arid environment case of Nebhana Dam and Siliana Dam	28
Latifa Ait Dhmane (Geo-Resources, Geo-Environment and Civil Engineering Laboratory, Cadi Ayyad University, Marrakesh - Maroc) <i>Jalal Moustadraf, Mariame Rachdane, Mohamed Elmehdi Saïdi, Khalid Benjmel, Fouad Amraoui, Mohamed Abdellah Ezzaoui, Abdelaziz Ait Sliman and Abdessamad Hadri</i> : Évaluation statistique des réanalyses et des produits satellitaires de précipitations en milieu méditerranéen semi aride. Cas du bassin versant de Bouregreg (Maroc).	33
Abdessalam Laoufi (Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie), <i>Abderrazak Boudjemaa, Sabrina Guettaia</i> : Évaluation de la qualité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation, en utilisant l'Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IQWI) et des méthodes statistiques dans la plaine de Hennaya (nord-ouest de l'Algérie)	48
Larbi Djabri (Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie) <i>Hamza Bouguerra, Azzedine Hani, Nabil Bougherira, Hicham Chaffai, Linda Achou, Assia Kellil</i> : Les eaux embouteillées et leurs incidences sur la santé humaine	58
Rabah Menasri (Laboratory of Biomaterial and Transport Phenomena, University of Médéa, Médéa Algeria) <i>Mibarki Navel, Zakaria Triki, Yabia Menasri</i> : Energy and Exergy Analysis of the Solar Membrane Distillation System for Seawater Desalination	63
Hamza Bouguerra (Water Resources and Sustainable Development Laboratory, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Badji Mokhtar - Annaba University, Annaba, Algeria) <i>Tachi Salab Eddine, Bouchebed Hamza, Derdous Oussama, Benamara Abdelvabeh</i> : Study of the spatio-temporal variation of climatic variables in the CSM basin - Eastern Algeria	72
Fabienne Fadia Notario Gafsi (GRED Université Montpellier 3 – Saint Charles Montpellier – Département de géographie, Université d'Angers ESO - UMR 6590 CNRS Espaces et Sociétés, Université d'Angers, France) La pénurie d'eau dans le Sahel tunisien : une question structurelle, ou conjoncturelle	77



Table of Contents

Habiba Majour (Université Badji Mokhtar Annaba - Algérie): l'impact des fertilisants sur la contamination des eaux souterraines de la plaine de Boumaiza, en vue d'une préservation durable	83
Nawel. Nedjah (National Higher School of Technology and Engineering, Annaba, Algeria) <i>Slimane. Niou, Naouem. Boudinar, Nour El Honda. Arabi and Mounir. Nessaib</i> : Etude de la performance d'un distillateur solaire à cascade	89
Azzedine Hani (Université de Annaba - Algérie): Multi-criteria analysis and characterization of the integrated water resources management model in the Annaba region	96
Samir Hani (Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable (REDD), Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie) <i>Nabil Bougherira, Noureddine Guezgouz, Azzedine Hani, Larbi Djabri, Hicham Chaffai</i> : Utilisation des méthodes géostatistiques et des réseaux neuronaux pour aider à la simulation des écoulements souterrains. Cas de la nappe côtière de la fosse Ben Ahmed (Algérie)	100
Mouhamadou Mansour Nguirane (Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)/Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usages de l'Eau (EDEQUE) – Sénégal) <i>Ana Niang Fall Nathalie Pottier, Wally Faye Coura Kane, Abdoulaye Faty, Birane Cisse</i> : Agriculture et gestion des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : quel est l'impact du système transfert d'eau potable du Notto-Diosmone-Palmarin (NDP) dans la résilience des activités maraichères dans le bassin arachidier (Sénégal)	105

www.jistee.org

jistee@iresa.agrinet.tn
jistee@yahoo.com

Homogénéisation des séries pluviométriques dans le cadre de l'évaluation de la Sécheresse 1982-2022 (Nord-Algérie)

Kheloufi Attou Ahmed¹; Baba-Hamed Kamila, Bouanani Abderrazak

^{1,2,3} Laboratoire promotion des ressources hydriques, minières et pédologiques – Législation de l'environnement et choix technologiques – Université de Tlemcen - Algérie

Résumé

Dans le but de l'analyse de la fluctuation de la sécheresse dans le Nord algérien, deux méthodes d'homogénéisation des précipitations annuelles ont été utilisées, la première dite absolue est appliquée sur chaque série d'observation, en utilisant quatre tests statistiques paramétriques et non paramétriques respectivement, test de Buisband, test d'Alexandersson, test de Pettitt et le test de Von Neumann. Le test de Shapiro-Wilk pour tester la normalité de la distribution au niveau de signification 5%. La deuxième dite relative est appliquée en utilisant la méthode d'Alexandersson basée sur le degré de corrélation entre la série étudiée et la série de référence. Les données disponibles sont des observations journalières provenant de 32 stations pluviométriques à partir desquelles les précipitations annuelles ont été calculées. Les données couvrent quatre décennies, allant de 1982 à 2022. Le résultat d'homogénéisation absolue montre que trois stations sont présentées par des ruptures significatives, station de Jijel, Miliana et la station d'Arzew, tandis que la méthode relative ne dévoile que deux stations : station de Jijel et celle de Miliana. L'indice pluviométrique moyen calculé sur la période de référence montre la fluctuation de la sécheresse. L'analyse de l'évolution temporelle met en évidence les stations présentant un régime déficitaire. Nous constatons que 58% des stations étaient en déficit entre 1982 et 1991, et 60% entre la période 1992 et 2001. Le maximum a été observé en 1983 et en 2000 où 100% des stations étudiées sont en déficit. À partir de l'année 2000, Nous avons remarqué une tendance à la baisse pour le régime déficitaire avec un pourcentage moins de 33% dans la période 2002-2011, et inférieur à 57% sur la décennie 2012-2021.

Mots clés : Sécheresse, Homogénéisation, Tests statistiques, Ruptures, Nord algérien

Homogenization of rainfall series in the Context of the Drought Evaluation 1982-2022 (Northern Algeria)

Abstract

In the order to analyze the drought fluctuations in northern Algeria, two methods of homogeneity the annual rainfall are used. The first so-called absolute method is applied to each series of rainfall observation, using (04) four parametric and non-parametric statistical tests successively, Buisband test, Alexandersson test, Pettitt test and Von-Neumann test. A normality test was performed using Shapiro-Wilk tests for the distribution type at a 5% significance level. The second so-called relative method is applied using the Standard normal homogeneity test (SNHT) with a correlation coefficient greater than 80% between the studied series and the reference series. The data available are daily observations from 32 meteorological Stations, from which the annual rainfall was calculated. The data covers four decades from 1982 to 2022. The result of the absolute method showed that three stations are presented by significant breaks (Jijel Station, Milianna Station and Arzew Station), while the relative method revealed that only two stations (Jijel Station and Milianna Station). The average precipitation index calculated over the reference period shows drought variability. The analysis of the temporal evolution of drought shows the stations which have a rainfall deficit. We have noted that 58% of the stations were in deficit between the period 1982 and 1991, and 60% between the period 1992 and 2001. The maximum was observed in 1983 and in 2000 when 100% of stations studied were in deficit. The analysis revealed a decrease in the number of deficit stations from the year 2000, with a lower than 33% for the decade 2002-2011 and less than 57% for the decade 2012-2021.

Key Words: Drought, Homogeneity, Breaks, Statistical tests, Northern Algeria

¹ Corresponding author: ahmedgeoran2014@gmail.com

1. INTRODUCTION

Un défi actuel dans la lutte contre le changement climatique concerne la gestion rationnelle des ressources en eau. Cependant, cette gestion est étroitement liée à une bonne connaissance des facteurs climatiques, dans lesquels les précipitations jouent un rôle important. Malheureusement, la collecte de données climatiques est sujette aux erreurs, ce qui se reflète dans la quantité souvent incertaine de ces données d'une part, et leur couverture spatiale et temporelle limitée, d'autre part [1]. Les problèmes qui se présentent dans un réseau de surveillance des précipitations sont très divers, il existe des problèmes liés aux erreurs causées par des appareils tels que l'absence d'étalonnage, remplacement d'un appareil de mesure, problèmes liés au site de mesure, tels que les modifications dans l'environnement de la station de mesure, déplacement ou un changement de la hauteur de l'appareil de mesure [2] [3] [4]. Ces différents problèmes introduisent le plus souvent des ruptures artificielles au sein des séries pluviométriques [5] [6]. L'homogénéisation des données de précipitations est absolument nécessaire pour avoir une image claire de la variabilité de l'évolution des précipitations [7]. Plusieurs techniques ont été établies pour homogénéiser les séries climatiques afin de déterminer et corriger les ruptures d'origine non climatique [8]. Ces techniques, sont classées en deux catégories principales, 1- des approches subjectives où l'emplacement d'une rupture est détecté à l'œil nu sur un graphique tel que la méthode des doubles accumulations [9], 2- des approches objectives qui peuvent se classer en trois modèles selon la nature des ruptures dans la série de base à savoir : A- des modèles de régression linéaire avec un ou plusieurs changements de paramètre, tel que le changement de moyenne [10] [11] [12] [13]. B- Des modèles avec une forme paramétrique différente de la régression linéaire telle que la méthode qui a été développée par Thompson (1984) [14] basée sur un processus aléatoire de Poisson, ainsi que la méthode d'analyse des ondelettes [15]. C- Des modèles qui se basent sur l'application successive des tests statistiques paramétriques et non-paramétriques [16] [17] [18]. La présente étude vise à évaluer la sécheresse en homogénéisant trent-deux (32) séries pluviométriques dans le Nord algérien. Nous avons utilisé deux méthodes pour détecter les ruptures dans les séries pluviométriques. La première méthode consiste à appliquer des tests statistiques paramétriques (test de Buishand, et test d'Alexandersson) et des tests non-paramétriques (test de Pettitt et test de Von-Neumen). Ces tests ont été appliqués à chaque série de précipitations au seuil de signification de 1%. La deuxième se résume à utiliser des séries de références pour homogénéiser des séries de bases en appliquant le test Standard Normal Homogeneity (SNHT) [10] [12]. Caractérisé par un climat semi-aride à aride, le bassin méditerranéen est soumis à des fluctuations pluviométriques, entraînant souvent des régimes déficitaires dans la région [19] [20]. En Algérie, plusieurs études ont montré que le régime pluviométrique déficitaire s'est étendu sur le territoire algérien à partir de la moitié des années 70, et est plus remarquable dans la partie occidentale [21] [22] [23] [24]. Suite à ces études, nous avons calculé les indices pluviométriques qui permettent d'étudier la fluctuation pluviométrique [25] [26] et sa répartition spatio-temporelle afin d'identifier les zones de fortes précipitations et celles plus arides.

1.2. Zone d'étude

L'étude porte sur le nord de l'Algérie et couvre quatre (04) unités hydrologiques (fig. 1), il s'agit de la région Oranie Chott Chargui, la région de Cheliff-Zahrez, la région d'Algerois-Hodna-Soummam et la région de Constantinois-Seybouse-Mellegue.

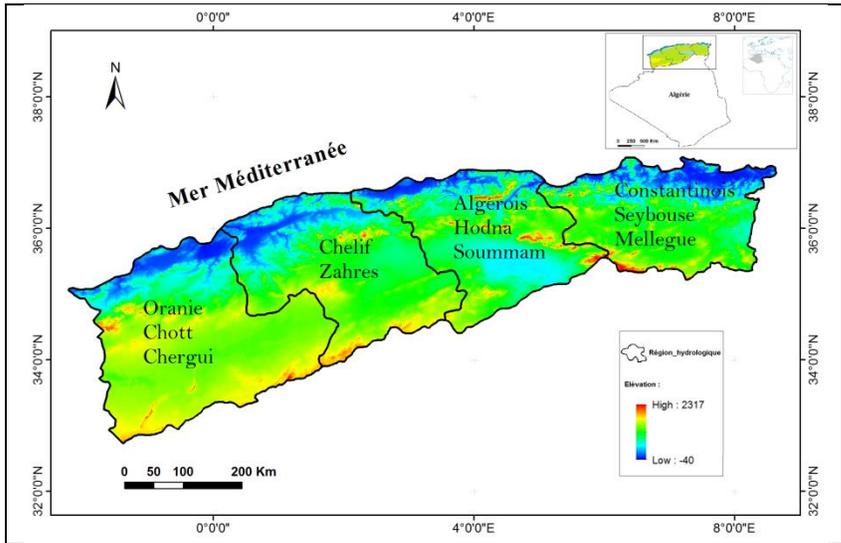


Fig. 1 – Région d'étude avec les quatre unités hydrologiques (Nord algérien)

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Données

Les précipitations annuelles ont été calculées à partir des données journalières qui s'étendent sur une période de 41 ans (1982 à 2022). Ces données couvrent 32 stations pluviométriques réparties sur le Nord algérien (fig. 2), elles sont répertoriées dans le tableau 1. Ces stations sont gérées par l'Office national de météorologie (ONM) ainsi que l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH). Les stations ont été choisies car elles sont représentées par des lacunes n'excédant pas 7% (Tableau 1), et il n'y a pas eu des années d'arrêt durant la période d'étude.

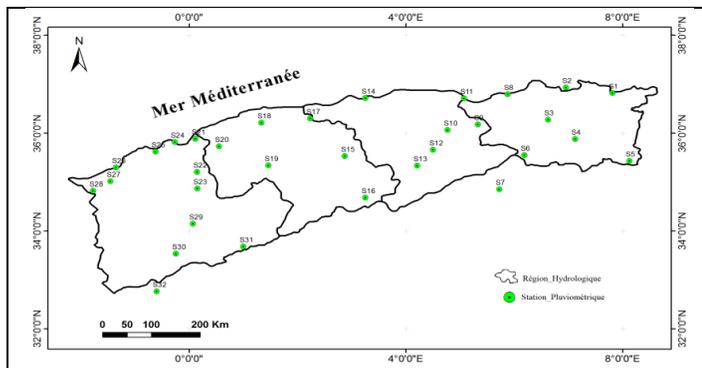


Fig. 2 – Répartition les stations pluviométriques sur la zone d'étude

Tableau 1 : Stations pluviométriques (1982-2022)

Station	Code	Coordonnées			% Valeurs Manquantes
		Latitude	Longitude	Z (m)	
Annaba	S1	36,82 N°	7,81 E°	5	0.41
Skikda	S2	36,93 N°	6,95 E°	7	4.91
Constantine	S3	36,28 N °	6,62 E°	690	0.20

Oum_EL_Bouaghi	S4	35,88 N°	7,12 E°	891	0,96
Tebessa	S5	35,43 N°	8,12 E°	811	1,05
Batna	S6	35,55 N°	6,18 E°	1052	4,06
Biskra	S7	34,85 N°	5,72 E°	38	0,73
Jijel	S8	36,80 N°	5,87 E°	10	3,25
Setif (Ain_Arnat)	S9	36,18 N°	5,32 E°	1050	1,02
Bordj_Bou_Arreidj	S10	36,07 N°	4,77 E°	930	3,85
Soummam	S11	36,71 N°	5,07 E°	7	1,08
M_Sila	S12	35,66 N°	4,50 E°	442	0,61
Bou_Saâda	S13	35,33 N°	4,21 E°	461	0,00
Dar_EL_Beida (Alger)	S14	36,72 N°	3,25 E°	7	0,00
Ain_Oussara	S15	35,53 N°	2,87 E°	697	0,00
Djelfa	S16	34,68 N°	3,25 E°	1144	6,10
Miliana	S17	36,30 N°	2,23 E°	721	0,00
Cheliff	S18	36,21 N°	1,33 E°	141	0,00
Bou_Chekif	S19	35,34 N°	1,46 E°	989	0,00
Relizane	S20	35,73 N°	0,55 E°	75	0,00
Mostaghanm	S21	35,88 N°	0,12 E°	138	0,15
Ghriss	S22	35,21 N°	0,15 E°	514	0,94
Saida	S23	34,87 N°	0,15 E°	752	0,00
Arzew	S24	35,82 N°	-0,27 O°	4	0,59
Es_Senia (Oran)	S25	35,62 N°	-0,62 O°	90	0,00
Beni_Saf	S26	35,30 N°	-1,35 O°	70	0,00
Zenata	S27	35,02 N°	-1,45 O°	248	0,00
Maghnia	S28	34,82 N°	-1,78 O°	426	3,90
EL_Kheiter	S29	34,15 N°	0,07 E°	1001	1,04
Mecheria	S30	33,54 N°	-0,24 O°	1175	0,89
EL_Bayadh	S31	33,68 N°	1,00 E°	1347	0,03
Ain_Sefra	S32	32,77 N°	-0,60 O°	1059	1,64

2.2 Méthodes

Deux méthodes ont été utilisées pour identifier les ruptures significatives ayant affecté les séries de précipitations au cours de la période d'étude (1982 à 2022), une de ces méthode dite « Absolue » et l'autre dite « Relative », et cela pour détecter un grand nombre de séries hétérogènes. Le processus d'homogénéisation est suivi par une détermination de l'indice annuel des précipitations (indice de Lamb) [25] [26] à chaque station pluviométrique pour une analyse spatio-temporelle.

2.2.1 Tests statistiques (Méthode Absolue)

La méthode consiste à appliquer séquentiellement (04) quatre tests statistiques au niveau de signification (α) = 1%, nous avons appliqué des tests paramétriques comme le test Buishand, et le test d'Alexandersson qui demandent une distribution normal prédéterminée, nous avons appliqué aussi des tests non-paramétriques, comme le test de Pettitt et test de Von-Neumen. Le test de Shapiro-Wilk pour tester la normalité de la distribution au niveau de signification (α) = 5%. En appliquant ces tests statistiques, des ruptures au sein des séries pluviométriques peuvent être détectées, puis la série analysée est classée dans une, des trois (03) classes suivantes.

Classe 1 : la série y est classée lorsqu'un (1) ou aucun test n'est significatif,

Classe 2 : les séries sont classées dans cette catégorie, lorsque (2) deux tests rejettent l'hypothèse nulle H_0 .

Classe 3 : les séries sont classées dans cette catégorie, lorsque (3) trois ou (4) quatre tests sont significatifs (rejetent l'hypothèse nulle H_0).

Les séries appartenant à la classe 1 sont homogènes, par contre, celles des classes 2 et 3 sont hétérogènes.

2.2.2 Méthode Relative

La méthode SNHT (*Standard Normal Homogeneity Test*) a été appliquée aux séries pluviométriques en comparant une série avec d'autres séries voisines, elles doivent être corrélées. Nous avons utilisé l'outil Climatol version 3.1.2 (<http://www.climatol.eu/>) pour effectuer cette méthode [27].

2.2.3 Indice pluviométrique (Indice de Lamb)

La fluctuation pluviométrique annuelle est déterminée à l'aide de l'indice de Lamb. Cet indice est calculé à partir du rapport de la différence entre la précipitation annuelle d'une année (X_i) et la moyenne de la série (\bar{X}), centré autour de l'écart-type σ . L'indice de Lamb permet de déterminer le régime déficitaire ainsi que le régime excédentaire [25] [26]. Il est défini par la relation suivante :

$$IP = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}$$

IP Indice de Lamb

X_i Pluviométrie annuelle pendant l'année i

\bar{X} Moyenne de la série pluviométrique (période d'étude)

σ Ecart-type de la série pluviométrique

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Homogénéité des séries pluviométriques

3.1.1 Méthode Absolue

Les résultats de l'application de tests statistiques paramétriques et non-paramétriques pour détecter les ruptures dans les séries pluviométriques pendant la période d'étude, sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

Une rupture est probablement significative lorsqu'elle est détectée par au moins 2 tests statistiques. Le tableau 3 montre que 91% des stations étudiées sont homogènes, en revanche, 9% de l'ensemble des stations se caractérisent par des ruptures significatives. Les stations représentées par des ruptures significatives, sont réparties sur trois (03) bassins hydrologiques, la station de Jijel se trouvant dans le bassin versant des Côtiers Constantinois, la station de Miliana se situe dans le bassin versant Côtiers Algerois et celle d'Arzew fait partie du bassin versant de Côtiers Oranais, chacun de ces bassins est caractérisé par un régime climatique différent des autres.

Tableau 2 : Résultat des tests statistiques

Station	Tests statistiques					
	Pettitt	SNHT	Buishan	Von_Neuman	Mann_Kendall	
			d	n	Z_{mk}	p-value
			p-value			
Maghnia	0.137	0.207	0.075	0.162	0.798	0.428
Zenata	0.215	0.229	0.281	0.090	0.483	0.631
Beni_Saf	0.011	0.046	0.016	0.009	2.280	0.022
Es_Senia	0.827	0.329	0.796	0.610	0.236	0.815
Ain_Sefra	0.069	0.240	0.083	0.007	1.269	0.206
Arzew	0.007	0.006	0.003	0.003	2.415	0.015
Mecheria	0.570	0.600	0.633	0.195	-0.146	0.885
Mostaghanm	0.178	0.120	0.141	0.155	1.764	0.078
Ghriss	0.280	0.001	0.130	0.042	-1.629	0.104
Saida	0.233	0.237	0.287	0.161	0.685	0.496
El_Bayadh	0.676	0.683	0.591	0.312	0.213	0.832
Cheliff	0.188	0.009	0.173	0.066	-1.359	0.175
Bou_Chekif	0.129	0.225	0.313	0.226	-1.404	0.161
Miliana	0.003	0.005	0.003	0.002	2.168	0.030
Djelfa	0.646	0.145	0.891	0.626	-0.798	0.428
Dar_El_Beida	0.579	0.555	0.680	0.162	0.303	0.763

Bordj_Bou_Arreridj	0.382	0.636	0.550	0.033	-0.685	0.496
Soummam	0.459	0.610	0.302	0.115	0.101	0.920
Setif_Ain_Arnat	0.348	0.568	0.288	0.276	0.213	0.832
Biskra	0.343	0.135	0.258	0.089	-0.640	0.525
Jijel	0.001	0.002	0.000	< 0,0001	2.887	0.003
Batna	0.492	0.654	0.385	0.199	0.461	0.647
Mohamed_Boudiaf_Intl	0.417	0.314	0.634	0.588	-1.067	0.288
Skikda	0.892	0.067	0.776	0.291	-0.371	0.713
Annaba	0.926	0.214	0.676	0.482	-0.539	0.590
Cheikh_Larbi_Tebessi	0.324	0.653	0.359	0.106	0.775	0.441
Relizane	0.498	0.054	0.255	0.224	0.685	0.496
El_Kheiter	0.032	0.085	0.015	0.373	2.213	0.026
Ain_Oussara	0.361	0.225	0.447	0.252	0.685	0.496
Bou_Saada	0.797	0.565	0.899	0.536	-0.315	0.753
M_Sila	0.538	0.120	0.487	0.304	-0.034	0.973
Oum_EL_Bouaghi	0.223	0.241	0.269	0.319	0.932	0.354

N.D : les valeurs en gras indiquent que le test rejette l'hypothèse nulle H₀.

Tableau 3 : Classification des séries pluviométriques

Période	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Total
1982-2022	29 (91%)	0 (0%)	3 (9%)	32 (100%)

3.1.2 Méthode Relative

L'homogénéisation des séries pluviométriques par la méthode relative s'appuie sur la comparaison des séries pluviométriques, l'une par rapport à l'autre en fonction du degré de corrélations, qui doivent être positifs, le corrélogramme (fig. 3) montre la relation des coefficients de corrélations en fonction de la distance, nous remarquons que les stations séparées de moins de 100km de distance sont mieux corrélées entre elles. Avec l'augmentation de la distance, une diminution du coefficient est perceptible, les corrélations négatives entre certaines stations peuvent indiquer des régimes pluviométriques opposés [27].

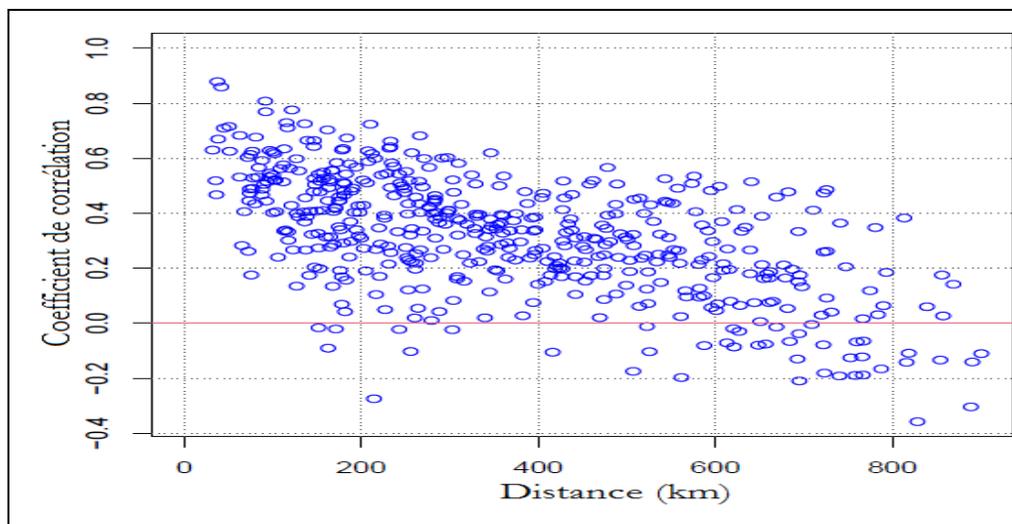


Fig. 3 – Corrélogramme des séries (Corrélation en fonction de la distance)

L'application de la méthode *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT), offre une occasion de détecter des ruptures au sein des séries pluviométriques à l'échelle annuelle, cela permet de distinguer deux (02) ruptures distinctes de la moyenne, l'une affectant la série pluviométrique de la station de Jijel et l'autre la série de la station de Miliana. La figure 4 montre les deux séries qui sont clairement hétérogènes avec respectivement un SNHT maximum de 17,50 et 18,07 pour la station de Jijel et celle de Miliana.

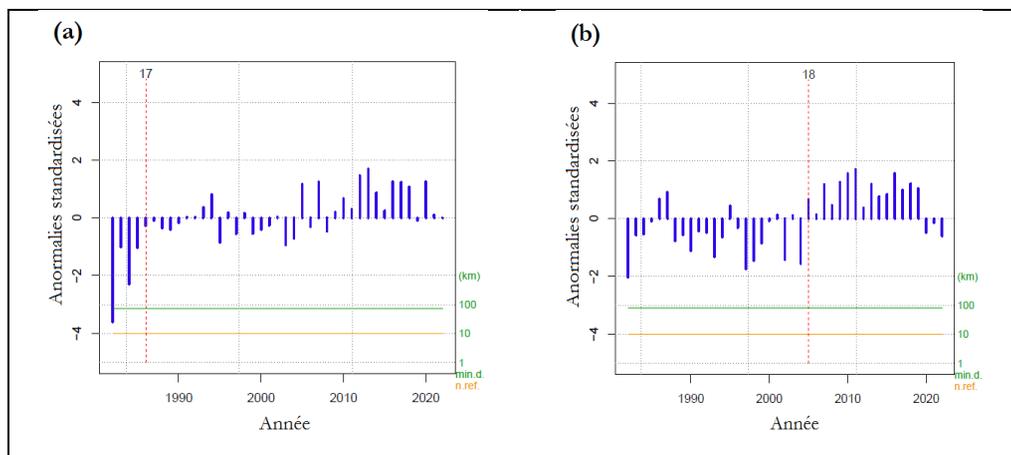


Fig. 4 – Détection d'un décalage de la moyenne (a) Station de Jijel, (b) Station de Miliana

L'analyse temporelle montre que les discontinuités distinguées par la méthode relative concernent seulement deux décennies. La rupture dans la série de la station de Jijel marque la décennie 1982-1991, elle se déroule en 1986, en revanche celle de Miliana est enregistrée sur la décennie 2001-2011, se manifestant en 2005. Sur le plan hydrologique, l'une de ces ruptures caractérise le bassin Côtiers Constantinois dont fait partie la station de Jijel et l'autre rupture détermine le bassin Côtiers Algerois où se situe la station de Miliana.

Tableau 4 : Ruptures indiquées dans les séries pluviométriques

N°	Code Station	Date de rupture	Valeur SNHT
Jijel	60419	01/01/1986	17.50
Miliana	60434	01/01/2005	18.07

3.1.3 Comparaison entre les observations homogènes et hétérogènes

La comparaison des moyennes mensuelles, entre les données brutes et celles homogénéisées montre la distribution temporelle qui s'exprime par une forte relation linéaire, cette distribution a été largement préservée malgré le processus de l'homogénéisation.

La différence entre les valeurs de précipitations moyennes mensuelles des deux types de données ne dépassent pas le maximum de 1.26 mm au cours des mois de Mars et Novembre, suivi de 1,24 mm et 1,10 mm pour les mois de Décembre et Janvier respectivement (fig. 5). Les autres valeurs varient entre des minima de 0,14 mm pour le mois de Juillet et de 0,18 pour le mois d'Août et 0,30 mm pour le mois de Juin, l'écart absolu entre les moyennes saisonnières des données brutes et celles homogénéisées reste très faible, 0,57 mm au maximum en hiver et 0,52 mm au printemps. La relation entre les moyennes annuelles des données brutes et les données homogénéisées est illustrée à la figure 6.

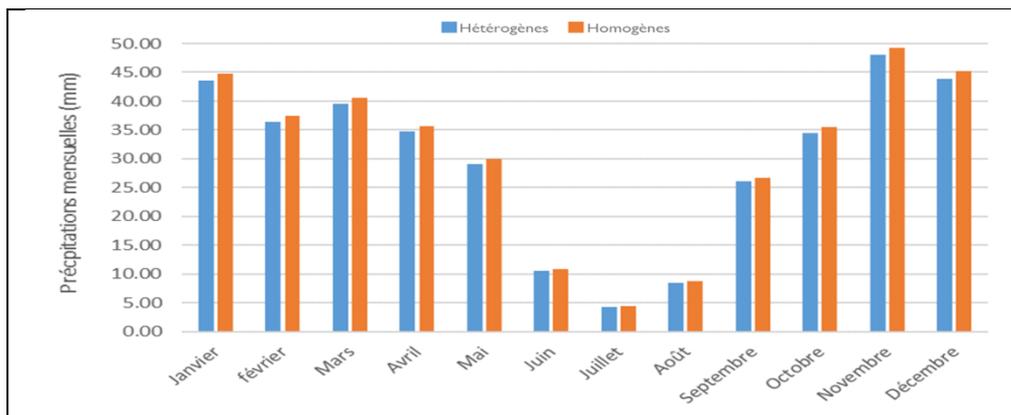


Fig. 5 – Précipitations moyennes mensuelles avant et après l'homogénéisation (1982-2022)

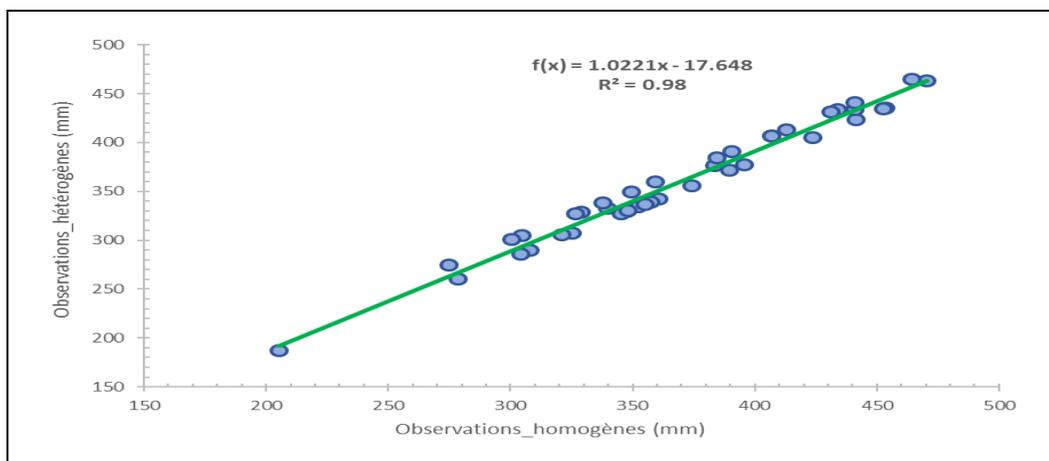


Fig. 6 – Corrélation entre les précipitations moyennes annuelles homogènes et hétérogènes (1982-2022)

3.2. Analyse spatiale de la sécheresse

L'interpolation des indices pluviométriques annuels sur la zone d'étude permet l'analyse spatio-temporelle des séries pluviométriques sur les quatre (04) décennies.

3.2.1 Décennie 1982-1991

Le régime déficitaire a été évalué dans la partie extrême ouest de la zone d'étude couvrant une partie de la région Oranie Chott Chargui. Cette partie concerne le bassin versant de la Tafna, une partie du bassin versant Côtiers Oranais, une partie du bassin Plateaux Oranais et de la Macta. Dans l'Est algérien, le régime déficitaire est aussi bien marqué sur une grande partie de la région de Constantinois-Seybouse-Mellegue, le régime est accentuée sur le bassin versant de Kébir Rhumel, le bassin Seybouse, le bassin de Medjerdah, par contre, le bassin versant de Côtiers Constantinois et le bassin Haute plateau Constantinois sont moins touchés par le régime déficitaire

3.2.2 Décennie 1992-2001

Durant cette période, le régime déficitaire a été étendu à la plupart des unités hydrologiques, la figure de la décennie 1992-2001, montre que la région de Cheliff-Zahrez, et la région d'Algerois-Hodna-Soummam sont moins touchées, surtout le bassin versant de Chélif, le bassin versant de Chott Melghir ainsi que le bassin des Côtiers Constantinois.

3.2.3 Décennie 2002-2011

La décennie a été caractérisée par une réduction de régime déficitaire sur la majorité des régions hydrologiques, excepté la partie ouest de la zone d'étude, qui a été affectée par le régime déficitaire, cela est concentrée dans le bassin versant de la Macta et le bassin versant du Chott Hodna, le bassin versant de chélif est moyennement affecté.

3.2.4 Décennie 2012-2022

Nous remarquons que la partie ouest est moins affectée par le régime déficitaire. Le bassin versant d'Isser, et le bassin versant des Côtiers Algérois ont été affectés par un régime excédentaire. En revanche, les parties orientale et centrale de la zone d'étude, notamment le bassin versant Chott-Hodna, sont les plus touchées par le régime déficitaire.

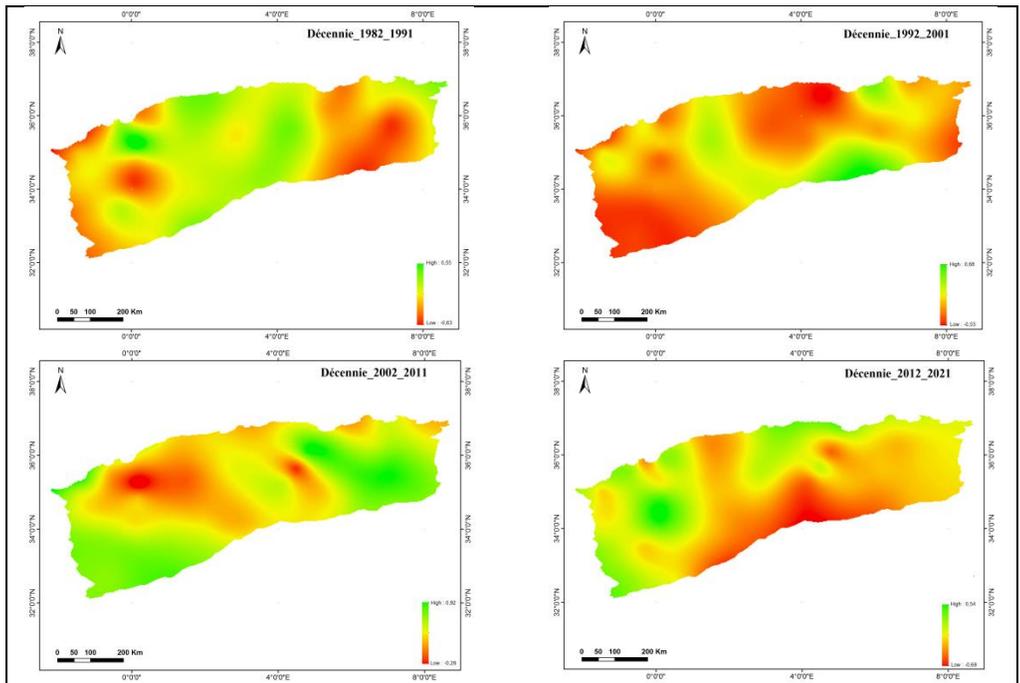


Fig. 7 – Évaluation des indices pluviométriques décennaux de 1982 à 2022 (Nord algérien)

L'indice pluviométrique moyen calculé sur la période de référence 1982-2021 montre la fluctuation de la sécheresse dans la partie nord algérienne, et cela à travers l'évolution temporelle des stations qui ont des régimes déficitaires (fig. 8). Nous remarquons que le nombre des stations déficitaires entre la période 1982-1991 dépasse le pourcentage de 58%, et arrive à 60% durant la période 1992-2001, le maximum est observé en 1983 et en 2000 où 100% des stations étudiées sont déficitaires. A partir de l'année 2000, nous constatons que 67% des stations sont excédentaires, ce qui montre une tendance à la baisse caractrisant la décennie 2002-2011, et 43% des stations sont excédentaires dans la décennie 2012-2021.

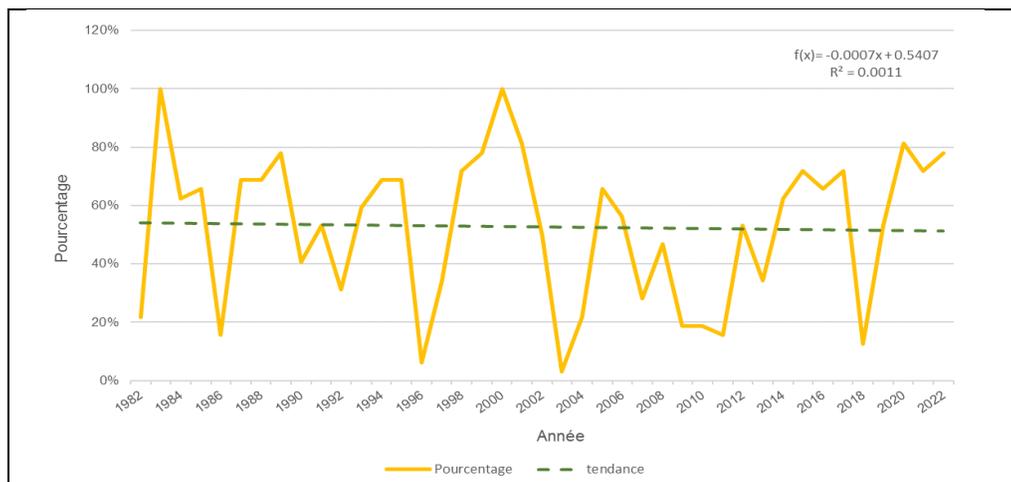


Fig. 8 – Pourcentage des stations déficitaires par rapport à la période de référence 1982–2022

CONCLUSION

L'analyse spatio-temporelle de la variabilité pluviométrique par l'utilisation de l'indice de Lamb qui consiste en l'application des tests statistiques paramétriques et non paramétriques a dévoilé trois séries hétérogènes, cela concerne la série de la station de Jijel, la station de Miliana et la série de la station d'Arzew. Aussi, l'application de la méthode SNHT (*Standard Normal Homogeneity Test*) qui se base sur l'homogénéisation de la série cible en fonction des séries voisines, a mis en évidence l'existence de deux séries différentes à savoir celle de la station de Jijel et celle de la station de Miliana. L'analyse spatio-temporelle des indices pluviométriques annuels montre que le régime déficitaire s'est développé aussi bien dans la partie orientale que dans la partie occidentale de la zone d'étude, dans la décennie 1982-1991, après la période des années 1970 caractérisée par une tendance à la baisse des précipitations. Nous avons distingué que la décennie 1992-2001 est la plus affectée par le régime déficitaire (67% des stations sont déficitaires), par contre, durant la décennie 2002-2011, la plupart des stations pluviométriques ont observé un régime excédentaire (67% des stations sont excédentaires), c'est la période la plus arrosée durant la période d'observation. Après la période excédentaire (décennie 2002-2011), le régime déficitaire est réapparu pour caractériser la période 2012-2022. Ce scénario se reflète sur la productivité des ressources en eau superficielle ainsi que les ressources souterraines.

Références

- [1] D. R. Easterling, L. V. Alexander, A. Mokssit, V. Detemmerman, CCI/CLIVAR workshop to develop priority climate indices. Bull. American Meteorological Society, October 84 (2003), 1403-1407.
- [2] J. P. BRUNEL, Comparaison instrumentale des précipitations en climat méditerranéen semi-aride, in *Hydrologie Continentale*, vol. 1, n° 2 (1986), p. 87-93.
- [3] P. L. Goulven, M. A. Aleman, I. Osorno, Homogénéisation et régionalisation pluviométrique par la méthode du vecteur régional. Congrès d'Hydraulique de l'Equateur, 5. Quito (ECU), Novembre 23-26 (1988), 95-118.
- [4] C. Beaulieu, T.B.M.J. Ouarda, O. Seidou. Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations. Hydrological Sciences Journal, 52 :1 (2010), 18-37, DOI : 10.1623/hysi.52.1.18
- [5] OMM, Directives sur l'homogénéisation. Organisation météorologique mondiale OMM-N° 1245 (2020), pp 1-57
- [6] J. C. ONDO, O. Tahar B. M. J., B. BOBEE, Revue bibliographique des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations. Rapport de recherche N° R-811, INRS-ETE, Québec (2005), pp 01-67
- [7] M. Lakatos, T. Szentimrey, Z. Bihari, S. Szalai. Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, World Meteorological Organization (WMO), Budapest, Hungary, 29 May – 2 June (2006), 1-203

- [8] C. Beaulieu, Homogénéisation des séries de précipitations : identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements. Thèse de doctorat en sciences de l'eau, Université de Québec 2009.
- [9] M. A. Kohler. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustment. *bull. American Meteorological Society*, 30 (1949), 188-189
- [10] H. Alexandersson. A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.* 6 (1986), 661-675
- [11] H. Alexandersson, A. Moberg. Homogenization of Swedish temperature data. Part 1: homogeneity test for linear trends. *International journal of climatology*, vol.17(1997), 25–34
- [12] M. N. Khaliq, T.B.M.J. Ouarda. A note on the critical values of the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT). *International journal of climatology* (2006), doi : 10. 1002/joc. 1438
- [13] A. F. S. Lee, S. M. Heghinian. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables : a Bayesian approach. *Technometrics* 19 (1977), 503-506
- [14] C. S. Thompson. Homogeneity analysis of rainfall series: an application of the use of a realistic rainfall model. *Journal of climatology*, 4 (1984), 609-619
- [15] N. M. Datsenko, A. Moberg, D. M. Sonechkin. Objective time-scale-dependent homogenization of early instrumental temperature series. *Theor. Appl. Climatol.* 72 (2002), 103-126
- [16] A. N. Pettitt. A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol. 28, No. 2(1979), pp. 126-135
- [17] C. Boroneant, R. Tomozeiu. Experience with homogeneity testing of temperature data at Bucuresti Filaret station. *Proc. Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data Budapest, Hungary*. WMO-TD no.962 (1999), 113-123
- [18] J. B. Wijngaard, A. M. G. Klein Tank, G. P. Können. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International journal of climatology*. 23(2003). 679–692. Doi: 10.1002/joc.906
- [19] C. Norrant. Relationships between the North hemisphere 500hPa geopotential height and the rainfall in the Mediterranean Basin (1950-2000). *Climatologie v. 4* (2007), 91-104
- [20] F. Raymond, A. Ullmann, P. Camberlin. Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen : quelles tendances entre 1950 et 2013 ? , *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 760 (2016), Doi : 10.4000/cybergeo.27410
- [21] A. Demmak, A. Ould Amara. La sécheresse en Algérie des années 1970/1999 et son impact sur les ressources en eau. *Table ronde : sécheresse-changement climatique-désertification*, 10p
- [22] M. Meddi, J. Humbert. Variabilité pluviométrique dans l'Ouest Algérien durant les cinq dernières décennies. *Association internationale de climatologie*, Vol. 13(2000).
- [23] J. P. Laborde, P. Goubesville, M. Assaba, A. Demmak, L. Belhouli. Climate evolution and possible effects on surface water resources of North Algeria. *Current Science*, V.98, N° 8 (2010).
- [24] S. Taïbi, M. Meddi, D. Souag, G. Mahe. Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*, Gothenburg, Sweden, July. 359 (2013). 191-197
- [25] P. J. Lamb, Persistence of Subsaharan drought. *Nature* 299 (1982). 46 - 47.
- [26] P. J. Lamb, Rainfall in Subsaharan West Africa during 1941–83. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.* 21(1985) 131 - 139.
- [27] J. A. Guijarro. Daily series homogenization and gridding with *Climatol v.3*. In *Proceedings of the Ninth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and Fourth Conference on Spatial Interpolation Techniques in Climatology and Meteorology*, Budapest, Hungary, 3–7 April (2017); WMO: Geneva, Switzerland, 2017; Volume 85, pp. 175–180.

De la possibilité d'amélioration de l'estimation des valeurs de l'infiltration efficace à l'entrée des modèles de bilan hydrogéologique des nappes aquifères superficielles – Exemple de la nappe de Takelsa dans la région du Cap Bon -Tunisie

Ibrahima Amadou Traoré¹

(1) Expert Hydrogéologue

Résumé

La recharge des aquifères par les pluies est soumise à des variations très importantes dans l'espace et dans le temps. Cet élément très important du bilan d'eau des nappes aquifères, à savoir sa partie renouvelable, est souvent estimé uniquement à partir des modèles hydrologiques. Pour différentes raisons (écoulement latéral sur les lentilles de couches peu perméables, reprise de l'eau infiltrée par l'évaporation), ces valeurs de l'infiltration efficace vers les nappes sont surestimées. Des méthodes d'estimation de l'infiltration, issues de plusieurs approches, devraient permettre d'améliorer cette situation. Cela est illustré sur l'exemple de la nappe de Takelsa, dans la région du Cap Bon, au Nord-est de la Tunisie. La méthodologie adoptée se subdivise en trois étapes : (i) une première étape est celle de la cartographie complétée par l'Analyse multicritère Analytical Hierarchy Process (AHP) de Saaty afin de définir les différentes zones potentielles d'infiltration dans le bassin considéré ; (ii) le modèle conceptuel global de bilan hydrologique pluie-débit GARDENLA, qui permet de déterminer l'infiltration moyenne sur un bassin versant considéré ; et (iii) l'estimation de l'infiltration efficace des eaux de pluies au niveau d'un piézomètre en zone de fluctuation naturelle du niveau de la nappe captée, sur la base de l'équation de diffusivité monodimensionnelle en différences finies, le modèle INF1.

La valeur de l'infiltration moyenne déterminée par GARDENLA sur une période de 35 ans, de 1987 à 2021, est d'environ 81 mm. Celle définie par INF1 sur une période de 10 ans, de 2010 à 2020, est de 57 mm. La méthode AHP devait permettre de faire un croisement entre ces valeurs et les zones potentielles d'infiltration, afin de procéder à une répartition spatiale des valeurs de l'infiltration. L'expérience de la nappe de Takelsa a montré que le suivi de la nappe au niveau du Piézomètre et des puits particuliers choisis ne permettait pas ce rapprochement.

Mots clés : hydrogéologie, méthode AHP, modélisation, Corrélation

The possibility of improving the estimation of effective infiltration values at the input of hydrogeological balance models of superficial aquifers – Example of the Takelsa aquifer in the Cap Bon region – Tunisia

Abstract:

The recharge of aquifers by rainfall is subject to very significant variations in space and time. This very important element of the water balance of aquifers, namely its renewable part, is often estimated solely on the basis of hydrological models. For various reasons (lateral flow over lenses of low-permeability layers, recovery of infiltrated water by evaporation), these values of effective infiltration towards the water table are overestimated. Methods for estimating infiltration, based on several approaches, should make it possible to improve this situation.

This is illustrated by the example of the Takelsa aquifer, in the Cap Bon region of north-eastern Tunisia. The methodology adopted is divided into three stages: (i) the first stage involves mapping, supplemented by Saaty's Analytical Hierarchy Process (AHP) multi-criteria analysis, in order to define the various potential infiltration zones in the basin under consideration; (ii) the GARDENLA global conceptual rainfall-runoff balance model, which makes it possible to determine the average infiltration over the catchment area under consideration ; and (iii) the estimation of the effective infiltration of rainwater at the level of a piezometer in a zone of natural fluctuation of the level of the water table tapped, on the basis of the one-dimensional diffusivity equation in finite differences, the INF1 model. The average infiltration value determined by GARDENLA over a 35-year period, from 1987 to 2021, is approximately 81 mm. The value defined by INF1 over a 10-year period, from 2010 to 2020, is 57 mm. The AHP method was designed to cross-reference these values with potential infiltration zones, in order to produce a spatial distribution of infiltration values. Experience with the Takelsa water table has shown that monitoring the water table at the Piezometer and at the selected individual wells did not allow this comparison to be made.

Key Words: hydrogeology, AHP method, modeling, Correlation.

¹ Corresponding author: poulo.sinde@gmail.com

INTRODUCTION

La schématisation hydrogéologique pour la conception de modèles numériques fiables et robustes comporte encore aujourd'hui des défis importants. La définition du schéma hydrogéologique de « départ » ainsi que des valeurs initiales des paramètres hydrogéologiques à l'entrée du calage de ces modèles par essais et erreurs, font partie de ces défis. En effet, les problèmes inverses à la base de ce calage étant par nature « incorrects », à savoir leur solution n'a pas d'unicité- différentes combinaisons des valeurs des paramètres du modèle pourraient aboutir à un même résultat, il est important d'approcher, au mieux possible, les valeurs initiales des paramètres hydrogéologiques pour obtenir au final des modèles plus fiables et plus robustes. Cette tâche est souvent rendue ardue par le manque ou l'insuffisance des informations requises, notamment l'insuffisance des tests in situ ou du suivi du régime des eaux souterraines.

Cet article se concentre sur la définition de l'infiltration efficace vers une nappe d'eau souterraine et la répartition de sa valeur initiale pour la définition du bilan de cette nappe.

Différents experts (agronomes, hydrologues, hydrogéologues, géotechniciens, etc.) tentent, par diverses méthodes, de déterminer le pourcentage de la pluie « infiltrée » dans le sol. Leurs objectifs étant parfois différents, par exemple définition de l'humidité du sol, ruissellement des eaux de surface et/ou recharge des nappes d'eaux souterraines, la lame d'eau à laquelle ils s'intéressent n'est pas toujours la même. Le cloisonnement et le manque de collaboration entre ces différents experts ne permet pas, souvent, de mettre en cohérence le résultat de leurs travaux.

Les auteurs de cet article pensent que la confrontation des différentes méthodes de détermination de l'infiltration pourrait améliorer sa définition, en particulier à l'entrée des modèles de bilan hydrogéologique. Cela est illustré dans ce qui suit.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Zone d'étude

Situation géographique

L'Oued El Abid se situe au Centre du Cap Bon. Cette région est une presqu'île située à l'extrême Nord Est de la Tunisie. Orientée Sud-ouest à Nord-est, elle forme une avancée de 90 km vers le NE et s'étend sur 300 Km de côtes, ce qui représente le 1/5 du littoral tunisien. Le bassin versant de l'Oued El Abid est situé au NE du synclinal de Takelsa et il est drainé vers la mer. L'Oued étant compris entre les latitudes $36^{\circ}45'43.77''$ N et $36^{\circ}52'52.66''$ N et les longitudes $10^{\circ}41'7.20''$ E et $10^{\circ}43'31.16''$ E. Son bassin versant est limité au Nord par la Méditerranée et Djebel Ben Oulid, à l'Est par Djebel Abderrahmène, à l'Ouest par Djebel El Abid et Henchir Chedly et au Sud par les massifs d'Argoub El Menngoub.

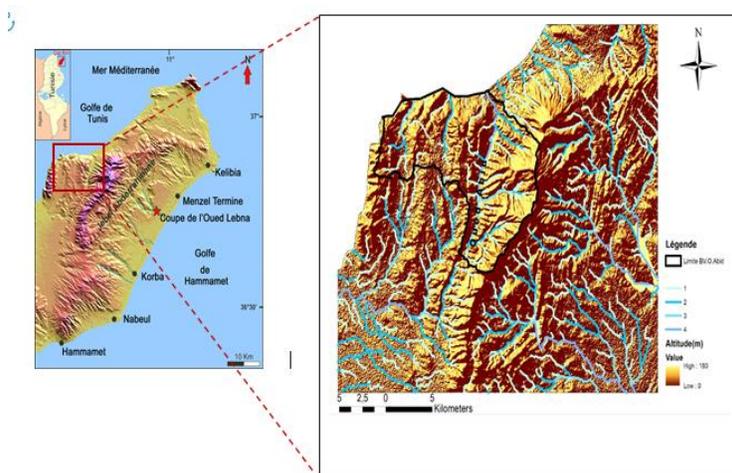


Fig. 1 - localisation de la zone d'étude

Reliefs et géomorphologie

La région du Cap Bon se caractérise par un relief assez accidenté. Les Djebels couvrent le tiers de la superficie de la péninsule avec des structures plissées. Les reliefs de la zone d'étude, situés principalement à l'Est sont les prolongements de Djebel Abderrahmène, présentent aussi des dépressions et des plaines. L'altitude moyenne du bassin versant est de 326 m (Trabelsi, 2005). Le point culminant de ce bassin versant atteint 637 m d'altitude à Djebel Abderrahmène.

Lithologie

Le bassin de l'Oued Abid est essentiellement constitué de grès avec alternance de marnes. La partie Sud-Est est formée par l'Oligocène supérieur (grès). Le reste du versant est pratiquement du Vindobonien (grès et marnes). Le lit de l'Oued Abid repose sur des alluvions du quaternaire ancien (CTV Grombalia, 2020).

Hydrogéologie

Le réservoir des six nappes du Cap Bon (Grombalia, Côte orientale, Takelsa, Tazoghane, El Houaria, Hammamet-Nabeul) est constitué par des sédiments du Quaternaire, reposant par endroits sur des formations détritiques du Pliocène (Gaaloul et al. 2008). L'aquifère multicouche de Takelsa possède une structure complexe qui est fortement affectée par plusieurs fractures et failles en sous-surface.

L'aquifère multicouche de Takelsa est formé par l'aquifère phréatique contenu dans les dépôts quaternaires et dans la première couche de grès de Saouaf et par les aquifères profonds contenus dans les grès du Miocène et de l'Oligocène (Ghouli et al. 2017).

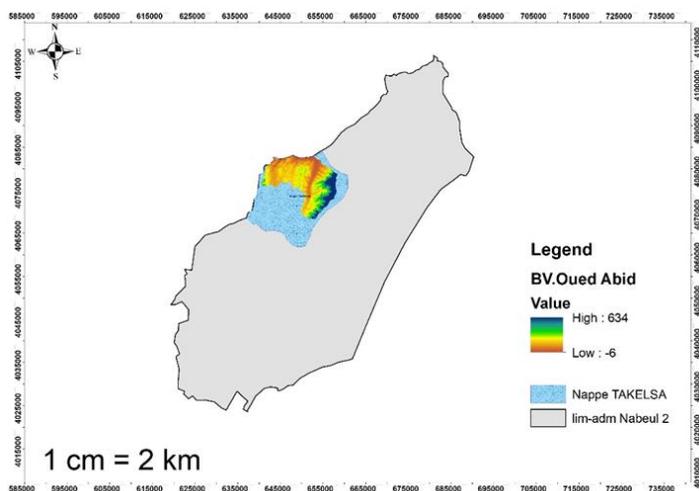


Figure : localisation de la nappe de Takelsa

Données climatiques

La zone d'étude est caractérisée par un climat subhumide à semi-aride supérieur. Le bassin versant de l'Oued Abid appartient à une zone considérée comme relativement pluvieuse. Celle-ci reçoit une moyenne annuelle qui varie de 600 mm/an à 700 mm/an. L'analyse des données pluviométriques, relatives aux différentes périodes d'observations, fait apparaître une variabilité interannuelle importante

Approche méthodologique

Dans cet article les méthodes adoptées pour approcher la valeur de l'infiltration sont :

- L'analyse multicritère « Analytical Hierarchy Process » (AHP) de Saaty.
- Le modèle conceptuel global de bilan hydrologique « GARDENIA »
- L'estimation de l'infiltration au niveau d'un piézomètre par le modèle INF1

1. Analyse multicritères Analytical Hierarchy Process (AHP) de Saaty

La première méthode adoptée dans cette étude est l'approche cartographique par analyse multicritère dans l'objectif de déterminer les zones favorables à la recharge de la nappe de Takelsa. Elle consiste à un croisement des informations spatiales relatives aux différents paramètres régissant la recharge qui sont exprimés en cartes thématiques.

Quatre étapes sont nécessaires dans le processus à savoir : 1) l'identification des paramètres, 2) la cartographie et la reclassification des paramètres, 3) la pondération par analyse multicritère de Saaty, et 4) la détermination des zones potentiellement favorables à la recharge.

Dans notre cas d'étude, les paramètres adoptés pour définir les zones potentiellement favorables à l'infiltration sont : les types de sols, les types d'occupation du sol, la Lithologie, la pente et la densité de drainage.

La catégorisation des paramètres suivant une échelle proposée par HAOUCHINE a permis d'obtenir les cotes de chaque classe, (Tab 1).

Afin de déterminer les poids des différents paramètres on a fait appel à l'analyse multicritère Analytic Hierarchy Process (AHP) de SAATY (1980), La matrice issue de la comparaison des paramètres deux à deux est consignée au tableau (Tab 2).

Tab 2- Matrice issue de la comparaison des différents paramètres (matrice originale).

Colonne1	Occupation du sol (OS)	Type du sol (S)	Pente (P)	Densité (D)	Géologie (G)	Poids (Moyenne)
Occupation du sol (OS)	0,519159456	0,633802817	0,46875	0,348837209	0,333333333	0,460776563
Type du sol (S)	0,173053152	0,211267606	0,3515625	0,348837209	0,238095238	0,264563141
Pente (P)	0,129789864	0,070422535	0,1171875	0,209302326	0,238095238	0,152959493
Densité (D)	0,103831891	0,042253521	0,0390625	0,069767442	0,142857143	0,079554499
Géologie (G)	0,074165637	0,042253521	0,0234375	0,023255814	0,047619048	0,042146304
Total	1	1	1	1	1	1

Le calcul des coefficients de pondération (Cp) à partir des vecteurs propres de la matrice de hiérarchisation révèle que la valeur minimale de 0,04 correspond au poids des entités lithologiques (donc moins importante dans le processus de recharge) et la valeur maximale de 0,47 correspond au poids de l'occupation du sol (Tab 2).

À la suite des comparaisons binaires, une vérification de la cohérence des jugements a été faite. Cette vérification permet la construction de la matrice de hiérarchisation, à travers le calcul du ratio de cohérence :

$$Rc = \frac{Ic}{Ia}$$

I_a est l'indice aléatoire qui, dans notre cas, est égal à 1,12 puisque la méthode est appliquée avec cinq critères.

Le calcul de l'indice de cohérence I_c donne dans notre cas $I_c = 0,08$.

SAATY (1980) a défini la valeur du ratio de cohérence, dans le cas où la valeur du ratio de cohérence dépasse 10 %, les appréciations peuvent exiger certaines révisions. Dans notre cas : $Rc = 0.07422561$. Avec un Rc égal à 7 %, la matrice de hiérarchisation présentée est considérée comme cohérente.

La cartographie a été effectuée par la superposition de l'ensemble des cartes paramétriques élaborées en format raster avec une taille de 30 x 30 m. La probabilité que la recharge dans une zone soit élevée sera liée aux valeurs des classes des paramètres qui se croisent suivant l'équation 2.

Ainsi, le calcul de l'indice de recharge (I_r) effectué dans le SIG est le suivant :

$$I_r = 0,47[OS] + 0,27[S] + 0,15[P] + 0,07[D] + 0,04[G] \quad (2)$$

I_r correspond à la somme des cotes pondérées calculées pour chaque pixel du raster à partir de la cote des cinq paramètres. Les valeurs d'indice de recharge obtenues varient entre 0,48 et 7,5.

Tab 3 - Classes des zones favorables à l'infiltration de la nappe de Takelsa.

Classe	I_r
Classe 1	703 - 2,833756924
Classe 2	925 - 4,129261971
Classe 3	972 - 5,026824474
Classe 4	475 - 5,948377609
Classe 5	61 - 7,461397648

Tab 4 - Cotes attribuées aux paramètres de recharge de la nappe de Takelsa

Paramètres de recharge de la nappe	Classes des paramètres	Degré d'infiltration	Cote
Occupation du sol	Reliefs et Garrigues : (végétations caractéristiques des zones calcaires).	-	-
	Végétation dense	Moyenne	6
	Zones urbaines	Faible	4
	Mer	-	-
	Forêt dense	Forte	8
	Cultures	Très forte	10
	Végétation moyennement dense	Moyenne à Forte	6
	Sol nu	Faible	4
Pente (%)	Sable du littorale	Forte	10
	Faible : [0 – 8,297818322]	Forte	8
	Moyenne : [8,297818323 – 17,31718606]	Moyenne	6,5
	Forte : [17,31718607 – 29,22275148]	Faible	2
	Très Forte : [29,22275149 – 91,99755096]	Très faible	1
Type de sols (Pédologie)	INCEPTISOLS	-	-
	MOLLISOLS	Moyenne à faible	3,5
	ENTISOLS	Forte à moyenne	6,5
Densité de drainage (D) (km/km²)	Faible : [0,274015784 – 0,924713993]	Très forte	10
	Moyenne à faible : [0,924713993 – 1,273869129]	Forte	8
	Forte : [1,27386913 – 1,678571673]	Moyenne	6
	Très forte : [1,678571674 – 2,297528505]	Très faible	2
Formation géologique	Quaternaire (Holocène) : Alluvions	Forte à Moyenne	6,5
	Miocène Supérieure (α_{M1}) : Alternance de grès et de Marnes	Forte à moyenne	6,5
	Miocène inférieur et moyen (M1-2) : Lumachelles (roche calcaire) et argiles vertes	Très Faible	1
	Oligocène-Miocène (Alternance argilo-gréseuse couvert par du grès grossier)	Moyenne à faible	3,5

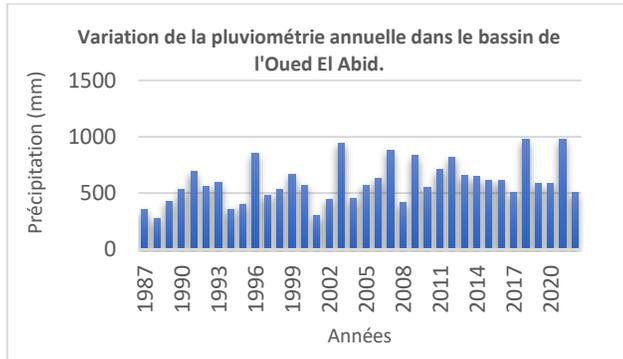
2. Modèle conceptuel global « GARDENIA »

Il existe une multitude de modèles hydrologiques adaptés aux différents calculs du bilan hydrologique. Dans notre travail, on a utilisé un modèle à réservoirs, GARDENIA (Gaaloul....) pour simuler les débits à l'exutoire du bassin versant d'oued Abid.

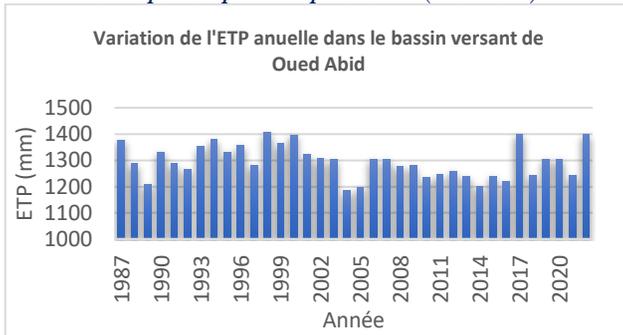
Nous avons sélectionné une période de 35 années, de 1987 à 2021, pour modéliser le débit à l'exutoire du bassin versant.

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

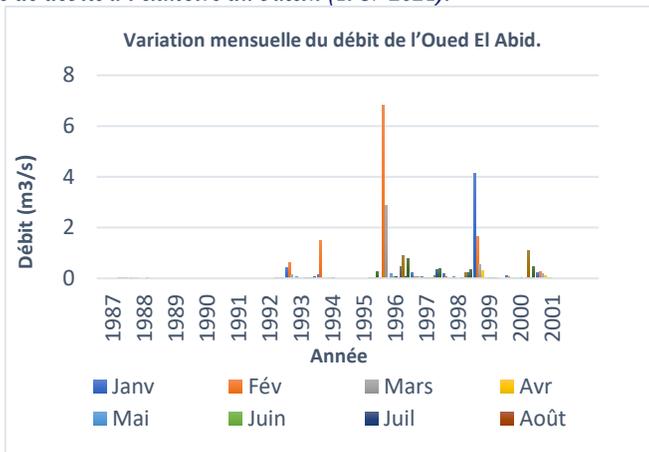
- Une série continue de précipitations (1987-2021).



□ Une série continue d'évapotranspiration potentielle (1987-2021).



□ Une série de débits à l'exutoire du bassin (1987-2021).



Calage et validation du modèle GARDÉNIA

La série de débits de la station a été calée sur la période 1987-2021 avec des pas du temps annuels, avec une période d'initialisation de 2 ans (années hydrologiques 1987/89).

La validation du modèle vise à vérifier si le modèle calé simule correctement les séries de données de référence, non utilisées lors du calage.

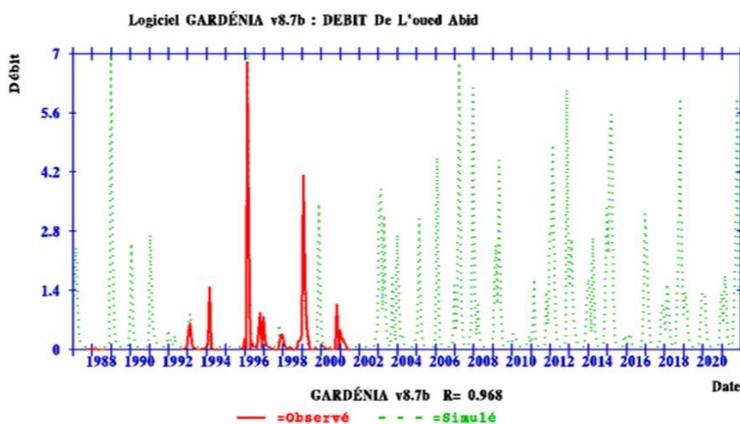
Dans le tableau (Tab 5), sont consignés les principaux résultats des paramètres de calage et les paramètres du bilan hydrologique.

Tab 5 - Paramètres hydrologiques

Nom de l'Oued	El Abid
Superficie du BV (Km ²)	81
Période d'étude	1987-2022
Nombre d'années de démarrage	2
Pluie efficace pour initialisation (mm/an)	0
Débit extérieur éventuel (m ³ /s)	0,106
Correction globale de la Pluie (%)	0
Correction globale d'ETP (%)	0
Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm)	10.6
Capacité du réservoir sol progressif (mm)	200
Facteur d'échange souterrain (%)	0

Simulations

Un jeu de paramètres a été réalisé afin d'avoir le meilleur calage. En effet après plusieurs essais de calage la simulation de l'Oued El Abid a donné un coefficient d'ajustement de **0.968**.



Les courbes des débits simulés ont généralement une allure qui semble proche de celles des débits observés particulièrement pendant la période de calage.

Durant certaines périodes de l'année, nous remarquons que la simulation des débits présente des imperfections due probablement à la difficulté que semble rencontrer le modèle à simuler les petites crues pendant la période de reprise des écoulements en automne : cas des précipitations hivernales importantes de (1995-1996 et 1998-1999).

3. Estimation de l'infiltration au niveau d'un piézomètre

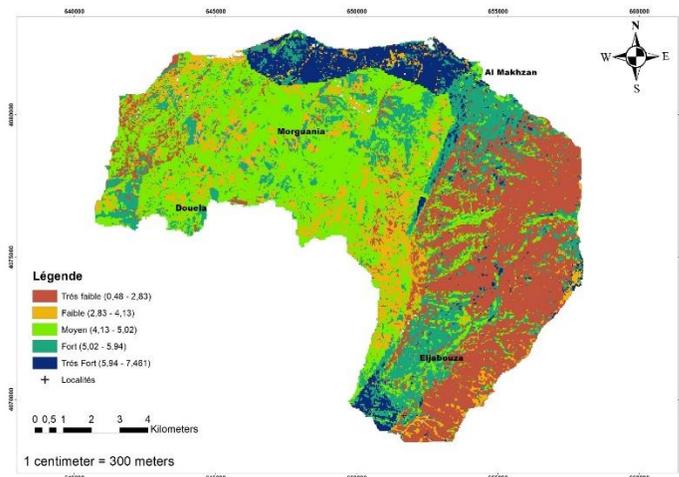
L'observation des fluctuations piézométriques est l'une des méthodes dites "classiques" pour estimer la recharge naturelle des nappes. Traditionnellement, l'estimation de l'infiltration des eaux de pluies vers les nappes aquifères se base sur les méthodes hydrologiques analytiques, en particulier celles de Turc, Coutagne, Thornthwait, Penman, etc.) ou sur la base de d'autres modèles hydrologiques plus complexes. Des essais d'eau in situ sont également utilisés. Sans s'étendre sur toutes les difficultés d'ordre théorique et pratique d'application de ces méthodes, il y a lieu de s'arrêter sur trois contraintes liées à leur utilisation : (i) l'impossibilité de prendre en compte l'hétérogénéité de la zone d'aération ; (ii) la difficulté de prendre en compte la variation spatiale et temporelle de l'infiltration et son déphasage par rapport à celle des pluies dans un cycle annuel ; et (iii) l'ambiguïté du choix d'une valeur concrète d'infiltration estimée par les différentes méthodes de bilan hydrologique. Dans le but de pallier à ces difficultés, il est recommandé d'associer à ces différentes méthodes classiques, celle basée sur l'équation de continuité du bilan d'une nappe, dès l'instant où l'information hydrogéologique nécessaire (suivi piézométrique suffisant en zone de fluctuation naturelle, transmissivité et emmagasinement) est disponible sur cette nappe.

Les données piézométriques pour une période prise de 2010-2020 sont scindés, en deux catégories : les hautes eaux et les basses eaux. Les hautes eaux correspondent aux maximums observés dans les niveaux piézométriques

en fin de saison des pluies (Février-Mars), tandis que les basses eaux correspondent aux minimums observés en pleine saison sèche (Août-Septembre).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Carte des zones potentielles de recharge de la nappe de Takelsa



Les plus fortes valeurs sont répandues au nord et au sud essentiellement. Une bonne partie des indices faibles se retrouve à l'est avec quelques petits îlots à l'ouest au niveau du flanc Ouest de Djébel Abderrahmène.

La carte des zones potentielles de recharge, présente cinq classes :

Très faible : (0,48 - 2,83) elle représente 28 % des zones cartographiées. Elle est située à l'Est de la zone étudiée, le long du flanc Ouest du massif de Djébel Abderrahmène. On trouve ces zones également dans les bordures ouest et est du bassin versant. Ces secteurs sont d'altitude très élevées, formés par des niveaux gréseux, des niveaux calcaires et argileux. Les pentes sont fortes > 25 %, favorisant ainsi l'écoulement au détriment de l'infiltration.

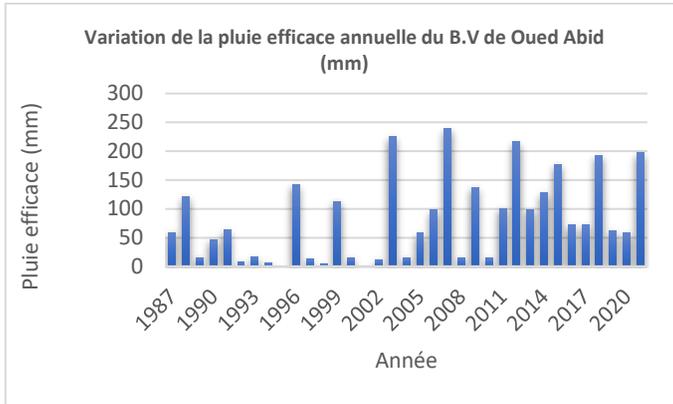
Faible : (2,83 - 4,13) elle ne représente que 12 % de la zone étudiée, et est disséminée au Nord, au centre et à l'Est de la zone étudiée avec quelques petits îlots au Sud-Est du bassin versant. Bien que la nature lithologique (alternance argilo-gréseuses) favorise l'infiltration, le réseau hydrographique est dense et développé, avec une pente relativement élevée (17-29 %), ce qui favorise le ruissellement par rapport à l'infiltration.

Moyen : (4,13 - 5,02) elle couvre 34 %, plus du tiers de la zone d'étude. C'est la classe dominante. Elle est répartie du centre vers l'Ouest en passant par les localités telles Morguania et Douela. Ce degré moyen de recharge peut être la conséquence de la faible pente (0-8 %), la faible densité de drainage (0,92 - 1,27 km/km²) et d'un usage modéré du sol, pendant que la classe lithologique de l'Oligocène -Miocène favorise l'infiltration.

Fort : (5,02 - 5,94) elle ne représente que 19 % de la zone étudiée, se localise au Nord et dans les bordures Est, Ouest et Sud-Est de la région ; on rencontre des îlots isolés de cette classe au Nord-Nord-Ouest sur le cordon littoral où la lithologie est caractérisée par les sables du cordon marin. La nature lithologique ainsi que les valeurs et la direction du pendage, avec l'écoulement qui sera freiné par le couvert végétal dense qui couvre ces secteurs, favorisent une forte infiltration.

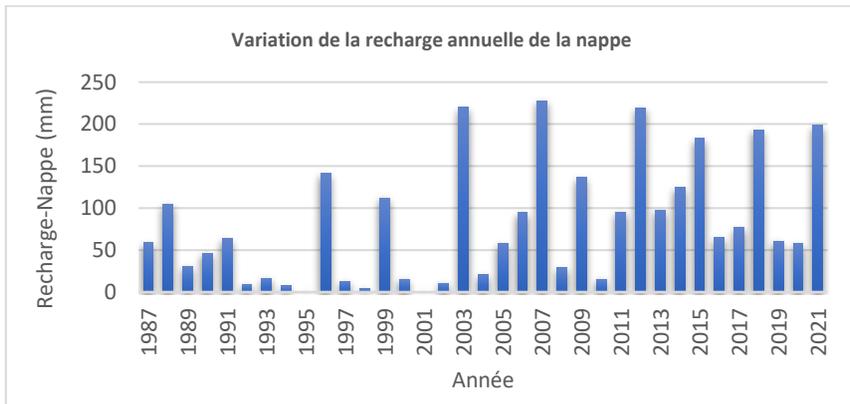
Très fort : (5,94 - 7,46) elle n'occupe que 7% de l'espace étudié, majoritairement localisée au Nord, et située dans le Quaternaire dont la lithologie est formée par des alluvions de sables et des grès. Une partie se trouve au Sud avec des îlots isolés qu'on rencontre au centre et à l'Est de la zone d'étude. Dans ces zones, la pente est relativement faible (0-8 %) et litho stratigraphie favorise une bonne infiltration.

Evaluation de la pluie efficace (modèle GARDENIA)



D'après la courbe de la variation de la pluie efficace annuelle dans le bassin d'Oued Abid, les valeurs de celle-ci fluctuent entre et 0,319 et 238,722 mm enregistrées respectivement durant les années 2001 et 2007. la moyenne de la pluie efficace annuelle dans est **80,5 mm**.

Evaluation de la recharge moyenne annuelle (modèle GARDENIA)

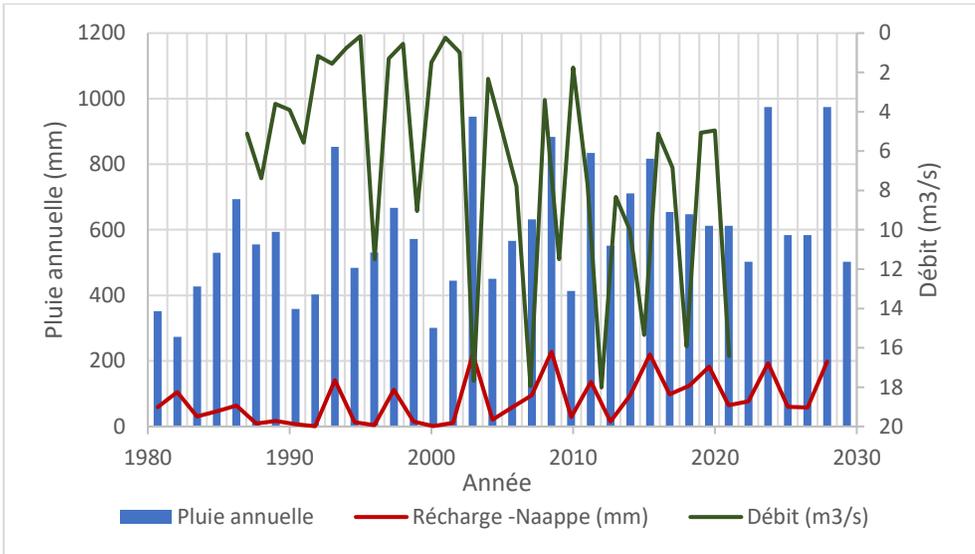


La recharge simulée dans le bassin versant de Oued El Abid durant la période allant de janvier 1987 jusqu'à Décembre 2021 est irrégulière à l'échelle interannuelle.

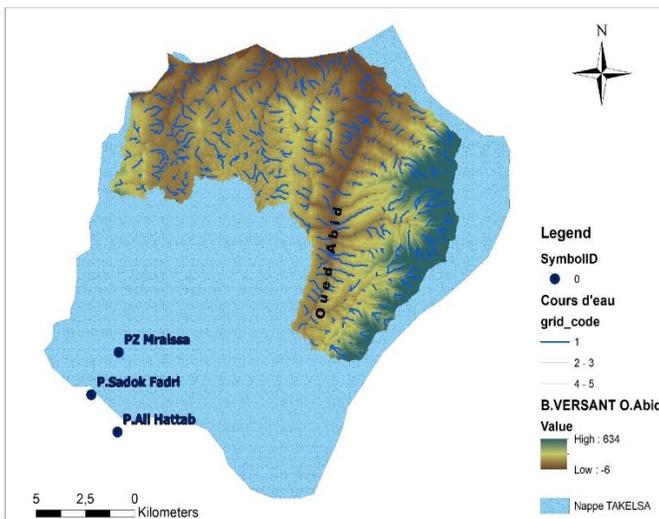
La recharge moyenne de la nappe sur une période de 35 ans est d'environ **80,5 mm/an** pour une pluviométrie de 596,972 mm/an.

Corrélation entre recharge, pluie et débit

L'analyse de la relation entre la pluie et la recharge de la nappe (Fig...), montre bien que pour une pluie inférieure à 500 mm, la recharge naturelle est faible. Aussi en comparant les années 1990 et 2003 où les pluies respectivement sont de 530,3 mm et 945,5 mm ont induit une recharge de 46,60 mm et 220,12 mm. De là, nous déduisons qu'une quantité de 415.2 mm (pluie) de plus peut provoquer une recharge de 173.52 mm. Ces résultats confirment le lien étroit entre la recharge de la nappe et les quantités de pluie. La recharge de la nappe n'intervient qu'à partir d'une valeur minimale de pluie, puis s'intensifie.



Résultats de l'estimation de l'infiltration au niveau d'un piézomètre



Le modèle INF1 a permis de calculer, sur la base de l'équation de diffusivité monodimensionnelle en différences finies, la valeur de l'infiltration efficace, à savoir celle qui contribue à recharger effectivement la nappe, au niveau d'un Piézomètre et de deux puits privés, suivis par la Direction des Ressources en Eau. La position de ces points d'eau est indiquée sur la carte ci-dessus.

Résultats du calcul de l'infiltration efficace par INF1

Point d'eau	Infiltration (mm)
PZ Mraissa	56,63
ts Sadok Fadri	85,13

DISCUSSION

Le cloisonnement des différents experts qui s'intéressent à la détermination de l'infiltration des eaux de pluies vers le sol et les nappes, ne permet pas d'améliorer l'estimation de ce facteur du bilan par une confrontation des résultats des différentes méthodes (agronomique, hydrologique, hydrogéologique, entre autres).

Le croisement de la valeur de l'infiltration au niveau du bassin versant de l'Oued Abid déterminée par GARDENIA et de la carte de répartition des zones potentiellement favorables à l'infiltration (fonctions distributives) d'une part et la valeur de l'infiltration efficace déterminée par INF1 au niveau d'un Piézomètre (valeur ponctuelle) d'autre part, devait permettre l'amélioration de la répartition spatiale de l'infiltration efficace.

On constate que la collecte de l'information sur le terrain ne permet pas de mettre à profit cette possibilité.

Pour ne pas surestimer la valeur des ressources renouvelables des nappes aquifères, il y a lieu de disposer de piézomètres en zones d'influence naturelle de ces nappes. La valeur de l'infiltration efficace déterminée par INF1, qui constitue la ressource renouvelable, est plus faible que celle définie par GARDENIA.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

En conclusion, il y a une réelle possibilité d'améliorer la détermination de l'infiltration efficace des eaux de pluie vers les nappes aquifères, par conséquent de la valeur des ressources en eau souterraines renouvelables. Un des freins est la méthodologie inadaptée de la collecte de données de terrain.

Il est recommandé de reprendre ce même travail : (i) soit sur un nouveau territoire où la collecte des données répond aux critères de fonctionnement de INF 1 et GARDENIA ; soit (ii) de suivre des points d'eau sur le bassin versant de l'Oued ABID qui puissent permettre le croisement des résultats des méthodes AHP, GARDENIA et INF1.

Références

1. Ghouili N., Jarraya Horriche F., Zammouri M. (2017). Groundwater modelling of Takelsa multilayer aquifer (Northeastern Tunisia). 1st AGIC. ORAL T3).
2. Gaaloul N. (2008). Gestion intégrée des ressources en eaux souterraines : Cas de la plaine du Cap Bon. La Houille Blanche, (5). Pp. 38-44.
3. Trabelsi Rim. (2005). Mémoire de Mastère. Aperçu sur la Paléogéographie du Cap Bon : Le Bilan des niveaux phréatiques de Takelsa. Laboratory of Radio Analyses and Environment. Global Nuclear Safety and Security Network, 145 p

Envasement des barrages au nord semi-aride tunisien cas des barrages Nebhana et Siliana

Belaid Hechmi¹

¹ ESIM – IRESA. Route du Kef Medjez El Bab.

Résumé

La quantification des sédiments piégés se base soit sur les bilans de matière solide à l'échelle d'une retenue, soit sur des levés bathymétriques ou topographiques. Ce phénomène naturel enregistre les valeurs les plus élevées dans les régions arides et semi arides en particulier au niveau des barrages Nebhana et Siliana. La mobilisation et l'exploitation des eaux de surface sont des pratiques anciennes en Tunisie. Les aménagements réalisés les dernières années sont exposés à un alluvionnement plus ou moins accéléré. La capacité de stockage des retenues des barrages est sujette à une réduction progressive au cours du temps. Cette perte de capacité, parfois élevée, dépasse les prévisions des études de l'alluvionnement de la retenue.

L'objectif de ce travail est d'étudier de près le phénomène d'envasement dans ces deux barrages et d'investiguer ce qui se passe au niveau du bassin versant.

En faisant une liaison avec ce qui se passe sur terrain les deux barrages sont envasés à plus que 25% et 55% respectivement, on peut dire que l'envasement des deux barrages revêt une importance dont il faut la prendre en compte pour réduire ce fléau et faire des aménagements appropriés.

La connaissance des pertes en terres dans un bassin versant revêt une importance cruciale par conséquent, les mesures d'adaptation à ces conditions extrêmes doivent être entreprises à l'échelle de la parcelle ou à celle des cours d'eau.

Key Words: envasement, érosion, barrages, Nebhana, Siliana, adaptation

Dam Siltation in northern tunisian semi-arid environment case of Nebhana Dam and Siliana Dam

Abstract

Quantification of sediments in dams is based either on particles budget of a reservoir, or on bathymetric survey. Such natural phenomena register very high values in arid and semi-arid regions and in particular in Nebhana and Siliana dams. Water mobilization and operating are in fact old practices in Tunisia. The realized managements in the last years are exposed to an accelerated siltation. Storage capacity of dam reservoir is subjected to a progressive reduction over time. This loss in capacity is sometimes high, and it exceed the forecasts of the reservoir siltation studies. The objective of this research work is to study closely the siltation phenomena of this dam and to investigate what happens at the watershed scale. By making a link with what happens in the field both dams are silted at around 32% and 55% respectively, we can say that both dam siltation has such importance that we should take into account to reduce this phenomena and overtake the necessary and appropriate managements. The knowledge of soil loss in the watershed is crucially important and by consequence the adaptation measures to these conditions have to be undertaken at the field scale and water bodies.

Mots clés : siltation, érosion, dam, Nebhana, Siliana, adaptation

¹ Corresponding author: belaidhfr@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'agressivité et l'irrégularité des pluies qui caractérisent le climat méditerranéen semi-aride font que ces zones sont sujettes à une érosion hydrique forte et parfois grave ainsi qu'à des inondations fréquentes. Les pertes de la couche arable ou du sol de surface par l'érosion sont en grande partie responsables de l'envasement des barrages du milieu semi-aride tunisien (Belaïd et Habaieb, 2017). En fait le phénomène de l'envasement des barrages est l'aboutissement d'un processus naturel d'érosion des bassins versants et du sapement des berges des cours d'eau (Remini et Ben Safia, 2016). Ce phénomène naturel enregistre les valeurs les plus élevées dans les régions arides et semi arides comme le Maghreb et plus particulièrement la Tunisie et l'Algérie. L'envasement qui représente les dépôts successifs des sédiments, pose des problèmes de quantité et de qualité des eaux des barrages. Les barrages réalisés au cours du siècle dernier sont exposés à un alluvionnement plus ou moins accéléré à cause de l'érosion. Il est à noter que selon plusieurs sources les retenues des barrages tunisiens perdent annuellement 0,86 % de leur capacité par alluvionnement. D'après l'ONAGRI (2018) la confrontation des 2168.99 Mm³ de capacité actuelle pour les barrages en exploitation à la capacité initiale de 2787.97 Mm³, atteste d'une perte de 22.2% de capacité soit une perte d'environ 619 Mm³ qui correspond au volume de vases dans les barrages.

L'objectif de ce travail est d'étudier le phénomène d'envasement des barrages Nebhana et Siliana et d'étudier le rythme de leur envasement.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude concerne les barrages Nebhana et Siliana (Figures 1 et 2), les deux bassins versants concernés appartiennent à un bioclimat semi-aride respectivement inférieur et supérieur.

Le bassin versant de Nebhana, à l'Est de la Tunisie centrale, s'étend sur quatre gouvernorats (Sousse, Kairouan, Siliana et Zaghuan). Sa superficie est d'environ 3983 km². Il transporte les apports de la dorsale Tunisienne vers Sebket El Kelbia au Nord-Est de Kairouan. Le barrage Nebhana est créé en 1965 le bassin versant du barrage occupe une superficie de 855 km². L'apport moyen annuel au niveau du barrage est de 23.3 Mm³/an avec une capacité initiale de la retenue de 86.5 Mm³. La capacité utile actuelle à la retenue normale est de 58.76 Mm³. Le volume régularisé calculé est de 15 Mm³. Le débit maximum évacué est de 4000 m³/s. Le bassin versant est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride où les étés sont chauds et secs et les hivers humides et frais. Les précipitations sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace. L'été est la saison la plus chaude avec des moyennes supérieures à 30°C. L'hiver enregistre des moyennes inférieures à 10°C, avec un minimum pour le mois de février de 7°C (Nouiri et al, 2015). Les précipitations sont irrégulières généralement de courtes périodes et de fortes intensités. La région connaît une fluctuation dans la pluviométrie d'une année à une autre mais la moyenne est autour de 300 mm.

Le bassin versant de Siliana, au Nord Ouest de la Tunisie, s'étend sur les gouvernorats de Siliana et Béja. Il constitue un affluent rive droite de la Medjerda avec une superficie de 2066 km². Le barrage Siliana est créé en 1987 le bassin versant du barrage occupe une superficie de 1040 km². L'apport moyen annuel au niveau du barrage est de 36.39 Mm³/an avec une capacité initiale de la retenue de 70 Mm³. La capacité utile actuelle est de 31 Mm³. Le débit d'évacuation est estimé à 3230 m³/s. Le bassin versant est caractérisé par un climat aussi semi-aride avec des étés chauds et secs et des hivers humide et froid. La moyenne de température de l'été est autour de 27°C et l'hivers est entre 9 et 14°C (Chabaane, 2016). Les précipitations sont irrégulières et connaissent aussi des fluctuations mais la moyenne est autour de 500 mm.

Les méthodes utilisées dans ce travail reposent sur l'analyse des données d'envasement des deux barrages disponibles actuellement (ONAGRI, 2023) et l'étude de l'érosion spécifique au niveau des deux bassins versants.

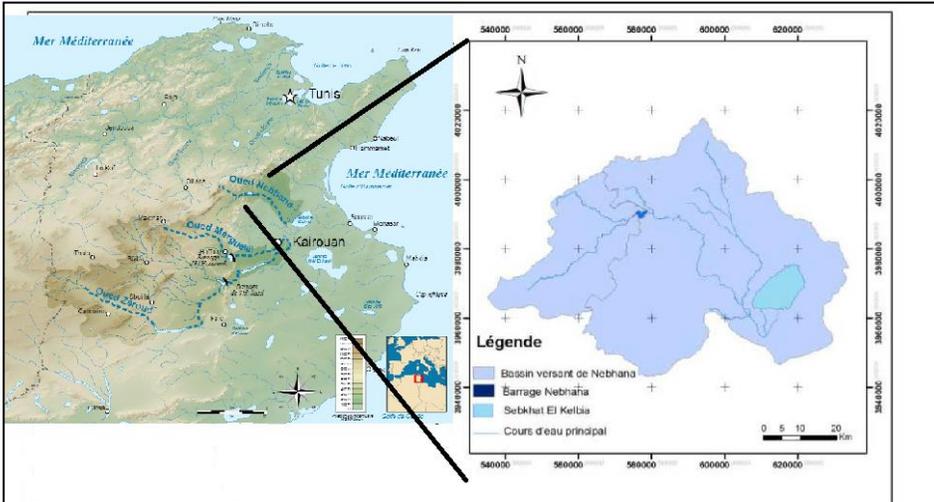


Fig. 1 - Localisation géographique du barrage Nebhana.

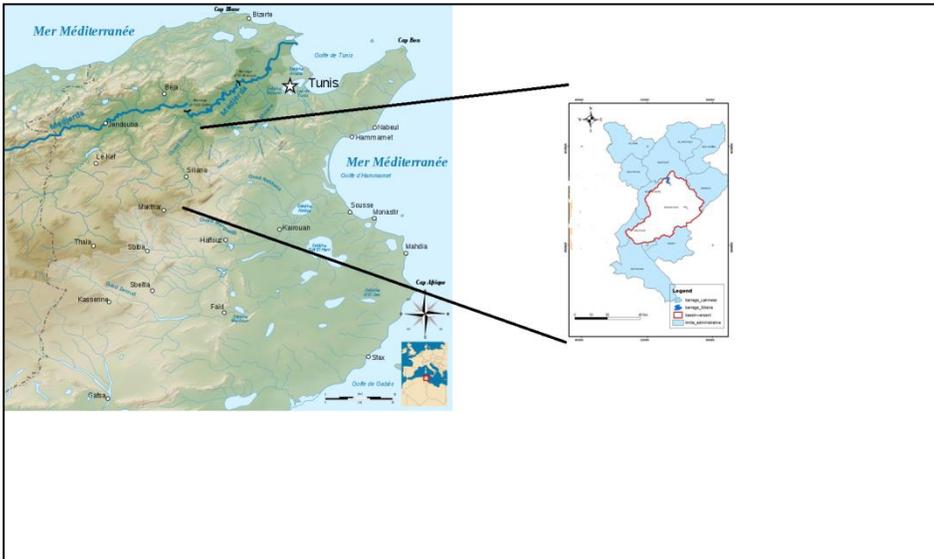


Fig. 2 - Localisation géographique du barrage Siliaana.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Etat d'envasement actuel

Les résultats montrent que le barrage Nebhana est actuellement envasé à environ 25% de sa capacité totale et que la dégradation spécifique est de l'ordre de l'ordre de 4.5 m³/ha/an. Sachant que l'érosion spécifique a passé de 15.09 m³/ha/an dans la période 1965-1975 à 4.5 m³/ha/an actuellement et c'est probablement suite aux travaux de conservation des eaux et du sol qui se sont multipliés sur le bassin versant.

Les résultats pour le barrage Siliana montrent que le barrage est actuellement envasé à environ 55.7% de sa capacité totale. L'érosion spécifique moyenne calculée à l'échelle du bassin versant est donc de 11.4 m³/ha/an. Sachant que l'érosion spécifique a passé de 22 m³/ha/an dans la période 1987-2002 à 11.4 m³/ha/an actuellement et c'est aussi suite aux travaux de conservation des eaux et du sol qui se sont multipliés sur le bassin versant.

3.2. Rythme et scénarios d'envasement des barrages

Le rythme d'envasement calculé pour le barrage Nebhana varie entre 0.86 et 1.4% par an (figure 3). Si on suppose que le barrage s'envase totalement à un seuil de 70% (cas de Mellègue par exemple), pour les deux scénarios on aura une durée qui reste pour le barrage de 42 ans et 22 ans respectivement pour les deux scénarios.

Le rythme d'envasement calculé pour le barrage Siliaana varie entre 1.69 et 3.2% par an. Si on suppose de même que le barrage s'envase totalement à un seuil de 70% (cas de Mellègue par exemple), pour les deux scénarios on aura une durée qui reste pour le barrage de 09 ans et 05 ans respectivement pour les deux scénarios.

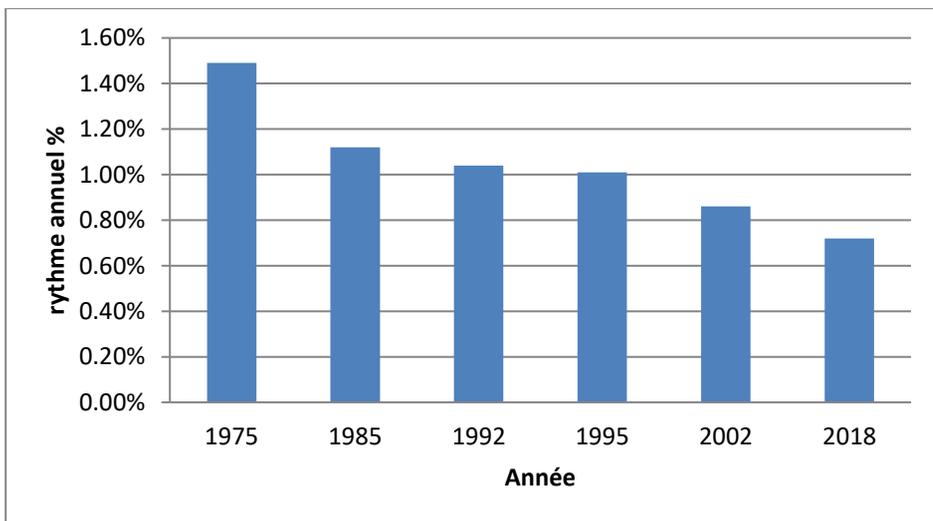


Fig. 3 – Rythme d'envasement du barrage Nebhana.

3.3. Mesures d'adaptation

La première mesure concerne le choix de site de remplacement pour les deux barrages généralement à l'amont des barrages actuels ou sur l'un des affluents les plus importants de leurs oueds.

La deuxième mesure concerne les travaux de conservation des eaux et des sols (CES) qu'il faut multiplier sur les deux bassins versant afin de retenir le maximum de sédiments et de pouvoir prolonger par conséquent la durée

de vie des barrages. Ces travaux concernent aussi bien les parcelles que les voies d'eaux. Particulièrement les ouvrages de protection en gabions constituent un moyen efficace de rétention des sédiments.

CONCLUSION

Le phénomène d'érosion représente un problème environnemental majeur qui exige des mesures d'adaptation adéquates compte tenu des changements climatiques actuels.

L'envasement des barrages Nebhana et Siliana est devenu un problème pertinent qui a des effets sur la quantité et la qualité des eaux surtout pour Siliana avec un taux qui dépasse les 50%.

Les scénarios des rythmes d'envasement surtout pour Siliana montrent un envasement total très précoce.

Les travaux de conservations des eaux et des sols qui existent déjà au niveau du bassin versant que ce soit au niveau de la parcelle ou au niveau des voies d'eaux doivent être renforcés et multipliés. Dans le même temps, des mesures de vulgarisation et de sensibilisation auprès de la société civile doivent être menées et encouragées.

Références

1. Belaid et Habaieb, 2017. Etude de l'érosivité des pluies et de l'érosion spécifique, répercussions sur les pertes en terres et mesures d'adaptation en milieu semi-aride Tunisien. 7^{ème} séminaire du réseau eau et climat. Comment gérer la ressource en eau dans un contexte de changement climatique global. Université Rouen Normandie France 20 21 décembre 2017.
2. Chaabane, C. 2016. Modélisation de l'érosion hydrique par le modèle SEAGIS. Cas du bassin versant du barrage Siliana. Mémoire de Master de recherche en sciences de la terre. Faculté des sciences Tunis.
3. Nouiri, I. Saidi, F., Romdhane, A., Brini, R., Bouslama, A., Elbeji R., Ayoub, T. et Tarhouni, J. 2015. Modélisation par WEAP des ressources en eau et des usages du système Nebhana en Tunisie. Colloque Eau Climat 2015, 24 et 25 novembre 2015, Constantine. Algérie.
4. ONAGRI, 2018. Observatoire National de l'Agriculture Tunisie. Problème de l'envasement des barrages. ONAGRI vigilance no 48.
5. ONAGRI, 2023. Observatoire National de l'Agriculture Tunisie. Situation des barrages.
6. Remini, B. et Ben Safia, D. 2016. Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens. *Larhyss Journal*. n°27, Sept 2016, pp. 63-90.

Évaluation statistique des réanalyses et des produits satellitaires de précipitations en milieu méditerranéen semi-aride, avec un focus sur le bassin versant de Bouregreg au Maroc

Latifa Ait Dhmane¹, Jalal Moustadraf¹, Mariame Rachdane¹, Mohamed Elmehdi Saidi¹, Fouad Amraoui² and Abdessamad Hadri³.

¹ Geo-Resources, Geo-Environment and Civil Engineering Laboratory, Cadi Ayyad University, Marrakesh, Morocco

² Laboratory of Geosciences Applied to Engineering Development (GALA), Faculty of Science Ain-Chock, Hassan II University of Casablanca, Maarif, Casablanca, Morocco

³ International Water Research Institute, Mohammed VI Polytechnic University (UM6P), Benguerir, Morocco

Résumé

Des données de précipitations précises et spatialement bien réparties sont cruciales pour une gestion efficace des ressources en eau dans les régions arides et semi-arides. Au Maroc, le bassin versant du Bouregreg fait face à des défis de gestion hydro-climatique en raison des régimes de précipitations irréguliers et des stations pluviométriques limitées. Cette étude vise à évaluer quatre produits maillés de précipitations (Les ensembles de données IMERG-V06: GPM-E, GPM-L et GPM-F et les réanalyses ERA5) à l'aide de 11 stations pluviométriques sur une période de 20 ans. Les métriques d'apprentissage automatique sont utilisées pour l'évaluation à différentes échelles temporelles. Les résultats montrent que les produits GPM présentent une grande précision avec de faibles erreurs, tandis que ERA5 fonctionne mieux pour identifier les modèles spatiaux et montre une corrélation plus forte. Ces produits maillés fonctionnent bien pour capturer diverses intensités de précipitations, en particulier des pluies légères. Cependant, des améliorations sont nécessaires pour perfectionner leur précision. A cet effet, l'étude utilise un modèle de réseau neuronal artificiel (ANN) pour corriger les biais et perfectionner les estimations du produit GPM-F. Ceci s'est traduit par une corrélation améliorée et une réduction des erreurs. Dans l'ensemble, cette recherche appuiera donc l'applicabilité des données GPM-F dans le bassin versant du Bouregreg.

Mots clés : Maroc ; Produits de précipitations maillées ; GPM ; ERA5 ; Réseau pluviométrique clairsemé ; Réseau neuronal artificiel.

Spatial and Temporal Evaluation of Gridded Precipitation Products and Adjustment of GPM-F in Bouregreg Watershed Morocco

Abstract:

Accurate and spatially well-distributed precipitation data are crucial for effective water resource management in arid and semi-arid regions. In Morocco, the Bouregreg watershed faces challenges in hydro-climatic management due to irregular precipitation patterns and a sparse rain-gauge network. This study aims to evaluate four precipitation gridded products (IMERG-V06 datasets: GPM-E, GPM-L, and GPM-F, and ERA5 reanalysis) using 11 rainfall stations over a 20-year period. Machine learning metrics are used for evaluation at different temporal scales. The results show that GPM products exhibit high accuracy with low errors, while ERA5 performs better in identifying spatial patterns and shows a stronger correlation. These gridded products work well in capturing various precipitation intensities, especially light rains. However, improvements are needed to refine their accuracy. To this end, the study employs an Artificial Neural Network (ANN) model to correct biases and refine the estimates of the GPM-F product. This resulted in improved correlation and reduced errors. Overall, this research supports the applicability of GPM-F data in the Bouregreg watershed.

Key Words: Morocco; Gridded Precipitation Products; GPM; ERA5; Sparse rain-gauge network; Artificial Neural Network.

¹ Corresponding author: aitdhmane.latifa@gmail.com

1. INTRODUCTION

La disponibilité et l'accès à l'eau représentent l'un des défis majeurs de l'humanité au cours du siècle à venir, en particulier dans la région méditerranéenne, considérée comme l'une des plus sensibles aux changements climatiques [1]. Les modèles climatiques suggèrent une tendance à la baisse des précipitations en Méditerranée au cours des prochaines décennies [2]. Dans ce contexte, l'accès à l'eau constitue un défi majeur pour le développement durable, avec des enjeux environnementaux importants liés à la préservation de cette ressource menacée en termes de quantité et de qualité [3].

Les méthodes traditionnelles de mesure des précipitations, telles que les pluviomètres et les radars météorologiques, présentent des limites en termes de qualité des données et de coûts de maintenance [4,5]. Cependant, grâce aux avancées des simulations numériques et des techniques d'observation de la Terre, l'utilisation de méthodes basées sur les satellites et les modèles s'est révélée être une approche efficace pour collecter des données précises sur les précipitations avec une continuité spatio-temporelle satisfaisante. Les produits satellitaires d'estimation des précipitations utilisent les observations météorologiques étendues par satellite, en combinant des données visibles, infrarouges, micro-ondes ou multi-capteurs [6]. D'autre part, l'approche basée sur la réanalyse combine les données d'observation sur le terrain avec les prévisions des modèles climatiques, en utilisant un système d'assimilation de données pour estimer les précipitations de surface [7].

L'utilisation d'Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) et de la Cinquième Génération de Réanalyse atmosphérique d'ECMWF (ERA5) est justifiée par leurs capacités à intégrer des capteurs multi-satellites, offrant une résolution spatio-temporelle élevée et un accès en temps quasi réel. IMERG utilise des techniques avancées d'assimilation de données en combinant différentes sources, ce qui améliore la précision des estimations des précipitations [8]. De son côté, ERA5 dispose d'un ensemble de données à long terme et de procédures rigoureuses de contrôle de la qualité pour filtrer les observations incorrectes. Il utilise des modèles numériques avancés pour générer des estimations cohérentes des précipitations basées sur la physique [9].

Les données provenant des produits de précipitations satellitaires IMERG et de Réanalyse ERA5 ont été largement examinées et comparées à des données observées, tant à l'échelle mondiale [4,10,11,12,13], qu'à l'échelle nationale dans le bassin versant de l'Oued Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali [14]. Pour simuler des inondations [15,16] et étudier les changements climatiques dans le sous-bassin de Tensift [17], ainsi que pour applications pluviométriques dans le Maroc Subsaharien [18].

L'évaluation des produits de précipitations dans le bassin versant de Bouregreg est actuellement limitée. Cette étude vise à évaluer la robustesse et la précision des produits de précipitations IMERG V06 et ERA5 pour estimer les précipitations dans cette région en utilisant des métriques d'apprentissage automatique pour évaluer la classification et la régression. Lorsqu'il s'agit d'évaluer la capacité d'un produit à estimer les précipitations, le choix de la bonne métrique est crucial. L'étude a examiné plusieurs scores d'évaluation recommandés par l'Organisation météorologique mondiale, tels que le coefficient de corrélation (Corr), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), la probabilité de détection (POD) et le taux de fausses alarmes (FAR). Ces paramètres permettent de mesurer à la fois la précision et la capacité de détection du produit de précipitation. L'étude a également pris en compte d'autres métriques d'apprentissage automatique.

Les produits de précipitations sont une source de données avantageuse en raison de leur couverture mondiale et de leur résolution spatio-temporelle élevée. Cependant, leur utilisation dans les applications hydrologiques est limitée en raison des biais associés. Ces biais peuvent être causés par des erreurs de mesure des précipitations, des variations des propriétés de la surface terrestre, ainsi que des variations des régimes climatiques, des saisons et des altitudes [19,20,21]. Pour remédier à ces problèmes, cette étude propose un cadre de correction des biais de précipitation.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Zone d'étude et données pluviométriques

Cette étude se concentre sur le bassin versant du Bouregreg, situé dans le centre-ouest du Maroc, couvrant une superficie d'environ 9462 km². Le bassin versant est bordé par les fossés de Saiss et de Ghareb au nord, le plateau des phosphates au sud, les montagnes du Moyen Atlas à l'est et l'océan Atlantique à l'ouest (Fig.1). Dans cette étude, les données journalières de 11 stations pluviométriques ont été utilisées pour évaluer les produits de précipitations maillées (PPMs). Pour garantir la fiabilité de l'évaluation, un seuil de 20% de données manquantes a été fixé, au-delà duquel les enregistrements se seront pas pris en compte [22].

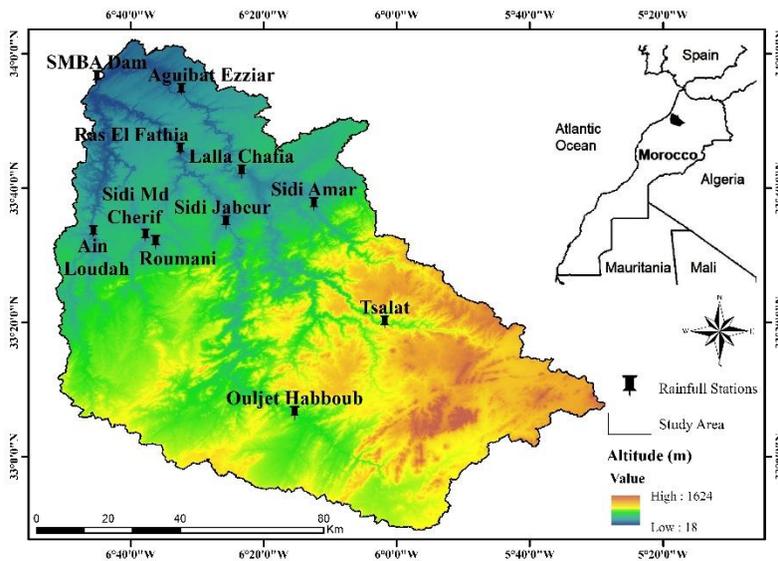


Fig. 1 - Geographical location of the Bouregreg watershed and rain gauges network.

2.2 Produits de précipitations maillées

ERA5 est la cinquième version des données de réanalyse atmosphérique fournies par l'ECMWF, qui couvrent la période à partir de 1940. Elle remplace la version précédente, ERA-Interim, qui ne couvrait que la période à partir de 1979 et a été mise en place en 2006. ERA5 a été développée sur la base du système de prévision intégré Cy41r2, qui est en service depuis 2016, et bénéficie ainsi de plus de dix ans de travaux en physique des modèles, dynamique des noyaux et assimilation de données [9]. Le produit ERA5 se réfère à la version à haute résolution de ces données, avec une résolution spatiale de $0,25^\circ$ et une résolution temporelle de 1h. Dans la présente étude, l'évaluation des produits de réanalyse a été effectuée en utilisant l'ensemble de données avancé ERA5.

Trois produits IMERG V06 ont été utilisés dans la présente analyse. IMERG représente la plus récente collection de précipitations par satellite de la NASA, avec une résolution spatiale fine de $0,1^\circ$ et une résolution temporelle de 0,5h [8]. Il continue non seulement les services TMPA (couvrant de juin 2000 à aujourd'hui), mais a également une plus grande couverture spatiale (60° N– 60° S). Ce produit satellitaire comporte trois passages : Early Run (ER), Late Run (LR) et Final Run (FR), publiés respectivement 4h, 12h et 3,5 mois après les observations [23]. En conséquence, les deux premiers sont des produits en temps quasi réel, la principale différence étant qu'ER utilise uniquement le morphing vers l'avant, tandis que LR utilise à la fois le morphing vers l'avant et vers l'arrière. Le FR au niveau de la recherche est calibré à l'aide des données GPCC mensuelles et fournit ainsi des informations plus précises sur les précipitations [4].

2.3 Méthodologie

En classification, l'objectif est de prédire le résultat à partir d'un ensemble fini de valeurs catégorielles [24]. La matrice de confusion est une représentation tabulaire spécifique qui fournit une représentation visuelle de la performance d'un modèle [25]. La matrice de confusion se compose de deux dimensions, "Réelle" et "Prédite", avec des "Classes" représentées le long de chaque dimension. Diverses mesures du rendement peuvent être dérivées de la matrice de confusion. Une métrique couramment utilisée est la précision de classification (ACC), qui calcule le rapport entre les prédictions correctes et le nombre total de prédictions [26]. La précision mesure la fraction des vrais positifs parmi toutes les prédictions positives, tandis que le rappel représente le rapport des vrais positifs à la somme des vrais positifs et des faux négatifs [27]. Optimiser à la fois la précision et le rappel peut être difficile en raison du compromis entre eux. Le score F1, qui est la moyenne harmonique de la précision et du rappel, est souvent utilisé pour trouver un équilibre entre les deux [27]. La courbe AUC-ROC (Area Under the Curve of the Receiver Operating Characteristic) est un outil visuel utile pour évaluer la performance d'un modèle de classification [28]. La courbe ROC est construite en traçant le Taux de Vrais Positifs (TPR) en fonction du Taux de Faux Positifs (FPR). La valeur AUC représente l'aire sous cette courbe, et une valeur AUC plus élevée, plus proche de 1, indique des performances supérieures du modèle. De plus, le Taux de fausses découvertes (FDR) quantifie la proportion de prédictions fausses positives parmi toutes les prédictions positives faites par le modèle [29].

Table 2: Confusion Matrix for binary classification.

Predicted Value	Actual Value		
		Positive	Negative
	Positive	TP (True Positive)	FP (False Positive)
Negative	FN (False Negative)	TN (True Negative)	

Table 3: Summary of classification metric formulas.

$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	$TPR = Specificity = \frac{TN}{TN + FP}$
$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$	$FPR = 1 - Specificity = \frac{FP}{FP + TN}$
$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$	$FDR = \frac{FP}{FP + TP}$
$F1_Score = \frac{2 (Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} = \frac{2 TP}{2 TP + FP + FN}$	

Avec : (a) Vrai positif (TP): Il indique le nombre de jours pendant lesquels l'observation au sol et le satellite présentent l'apparition de précipitations. (b) Vrai négatif (TN): Ce paramètre signifie l'absence de précipitations, car ni le satellite ni l'observation n'ont enregistré de précipitations. (c) Faux positif (erreur de type I) (FP) : Il désigne les cas où le satellite identifie incorrectement un événement pluvieux qui n'est pas présent dans les données observées. (d) Faux négatif (erreur de type II) (FN): Il représente le nombre de jours pendant lesquels le satellite ne détecte pas un événement pluvieux enregistré par le pluviomètre.

En régression, d'autre part, il s'agit de prédire une valeur continue [24]. La régression se distingue de la classification, qui consiste à prédire une étiquette de classe. Contrairement à la classification, la précision est légèrement plus difficile à illustrer et impossible de prédire la valeur exacte, mais plutôt à quel point la prédiction est proche de la valeur réelle [30].

La RMSE (Root Mean Square Error) et la MAE (Mean Absolute Error) sont deux mesures couramment utilisées pour évaluer la performance des modèles de régression. RMSE et MAE, ces deux indices sont similaires ou, plutôt, ont les mêmes objectifs. Ils mesurent l'ampleur moyenne de l'erreur entre les précipitations estimées et observées. La RMSE est très sensible aux valeurs aberrantes, tandis que la MAE est moins sensible aux valeurs extrêmes [31]. Le biais est l'une des métriques les plus utilisées pour mesurer la performance des modèles. Les valeurs de biais négatives indiquent une sous-estimation des précipitations, tandis que les valeurs positives indiquent une surestimation. Le coefficient de corrélation de Pearson [32] a été utilisé pour mesurer la qualité de l'ajustement et l'association linéaire entre le produit des précipitations par satellite et les précipitations observées. Il est compris entre 0 et 1 ce qui correspond au score parfait. A la fin, pour une analyse statistique spatiale et afin de mieux caractériser la capacité des produits à saisir les schémas spatiaux des précipitations, le coefficient de corrélation spatial Spearman a été utilisé pour évaluer la cohérence des distributions spatiales des produits et des stations [11]. Ce coefficient est une méthode de corrélation de rang qui peut fournir une meilleure mesure des similitudes de tendances spatiales. Il a été calculé pour chaque jour, mois et année afin de représenter les performances des produits sur différentes échelles temporelles.

Table 4: Summary of regression metric formulas.

$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}$	$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i - X_i$
$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i - Y_i $	$Spearman\ Corr = 1 - \frac{(r_i - s_i)^2}{N^3 - N}$
$Pearson\ Corr = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$	

Avec X: l'observation de jauge ; Y: l'estimation des précipitations par satellite ; X: l'observation de jauge moyenne ; Y: l'estimation moyenne des précipitations par satellite ; r_i et s_i représentent le numéro de séquence correspondant des enregistrements de produit et de référence après le tri par quantité de précipitations de la plus petite à la plus grande, respectivement ; N : la taille de l'échantillon.

L'influence de l'intensité des précipitations sur la précision des valeurs de précipitations estimées par les satellites d'observation de la Terre ont attiré l'attention au cours de la dernière décennie. En plus de la performance globale, une évaluation a également été effectuée pour différentes intensités de précipitations. Cinq classes d'intensité des précipitations, issues de l'Organisation météorologique mondiale [33], ont été modifiées et adaptées au climat de notre étude (Table 5).

Table 5: Ranking of rainfall events based on their daily intensity. [a, b] : The interval includes values greater than or equal to a and strictly less than b.

Rainfall Event	Intensity in mm/d
light rain	[0, 1[
moderate rain	[1, 5[
medium rain	[5, 20[
heavy rain	[20, 40[
extreme rain	≥ 40

Pour comparer les produits avec différentes résolutions spatiales, de nombreuses études antérieures ont interpolé les observations au sol sur des grilles et effectué une validation pixel par pixel [34,35]. Cependant, en raison de la rareté des stations, ainsi que leur dispersion dans la zone d'étude, les données d'interpolation des stations ne peuvent pas représenter avec précision la situation réelle des précipitations sur le bassin de Bouregreg [36]. Donc, Il est nécessaire de faire correspondre spatialement les mesures ponctuelles de la station et les estimations maillées. À cette fin, les estimations de précipitations maillées pour les stations correspondantes ont été extraites avec une interpolation simple dans le but d'effectuer une évaluation pixel à point [37]. En outre, des recherches antérieures ont comparé les techniques d'interpolation pixel à pixel et pixel à point et a constaté qu'elles conduisaient à des conclusions similaires [38].

La variabilité spatiale des précipitations dans le bassin versant de Bouregreg a fait l'objet de peu analyses. Cependant, la répartition clairsemée et inhomogène des pluviomètres ne permet pas de garantir la fiabilité des méthodes d'interpolation spatiale utilisées (pondération inverse de la distance et krigeage ordinaire, etc.) [39]. Dans cette étude, une méthode avancée de correction de biais est appliquée au modèle le plus approprié basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour régression. ANN est un système de traitement de l'information distribué massivement en parallèle ayant certaines caractéristiques de performance ressemblant aux réseaux de neurones biologiques du cerveau humain [40]. Contrairement aux techniques classiques, elles ne nécessitent aucune hypothèse sur les variables et sont bien adaptées aux problèmes complexes non structurés. Ils sont également robustes aux erreurs de spécification et se révèlent être des approximateurs universels particulièrement parcimonieux [41].

Le modèle créé est une pile linéaire de couches. Sa première couche est une couche dense entièrement connectée avec une fonction d'activation et une forme d'entrée déterminée. Les couches suivantes sont des couches cachées pour transformer l'entrée de manière non-linéaire en sortie. Sa dernière couche est également une couche dense mais sans fonction d'activation spécifiée, ce qui en fait une couche de sortie pour une régression. Le modèle défini utilise une approche d'apprentissage par rétropropagation pour minimiser une fonction de perte qui mesure l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs réelles de la variable dépendante. Plus précisément, pour une observation i , la prédiction \hat{y}_i est obtenue par la formule ci-dessous. La fonction de perte utilisée dans votre code est l'erreur quadratique moyenne (MSE) qui mesure la moyenne des carrés des différences entre les prédictions et les valeurs réelles. En résumé, le modèle utilise une combinaison de multiplication matricielle, addition, activation non-linéaire et optimisation pour apprendre une fonction qui prédit la variable dépendante à partir de la variable indépendante.

$$\hat{y}_i = f(w^T x_i + b) \quad MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{y}_i)^2$$

Où: x_i est le vecteur d'entrée ; w est un vecteur de poids ; b est le biais (une constante) appris par le modèle pendant l'entraînement ; f est la fonction d'activation de chaque couche ; N est le nombre total d'observations dans l'ensemble de données d'entraînement ; Y_i est la valeur réelle de la variable dépendante pour l'observation i ; \hat{y}_i est la prédiction du modèle pour l'observation i .

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Echelle de pixel

L'accuracy mesure la proportion de prévisions correctes par rapport au nombre total de prévisions effectuées. Le produit GPM-L et F ainsi que le produit GPM-E ont des valeurs médianes d'accuracy de 0.75 et 0.74 respectivement, indiquant une performance relativement bonne. En revanche, le produit ERA5 a une accuracy de 0.46, ce qui indique une performance. La précision évalue la proportion de prédictions positives correctes par rapport à l'ensemble total des prédictions positives et négatives. Les produits GPM-F et GPM-L ont des valeurs médianes de précision de 0.38, GPM-E de 0.37 et l'ERA5 de 0.22. Cela suggère une capacité relativement faible des produits GPM à prédire les données positives, tandis que l'ERA5 présente une performance encore plus faible. Le recall mesure la proportion de données positives réellement détectées par le modèle

par rapport au nombre total de données positives dans le jeu de données. Les valeurs médianes de rappel varient de 0.81 pour GPM-F et GPM-L, 0.80 pour GPM-E et 0.98 pour l'ERA5. Bien que l'ERA5 ait une meilleure capacité à détecter les données positives, cela se fait au détriment d'un nombre plus élevé de fausses alertes (faux positifs). Le F1-score est une mesure combinée de la précision et du rappel. Les valeurs médianes de F1-score varient de 0.52 pour GPM-F et GPM-L, 0.50 pour GPM-E et 0.36 pour l'ERA5, indiquant une performance légèrement meilleure des produits GPM en termes de classification binaire. L'AUC-ROC évalue la capacité du modèle à distinguer entre les classes positives et négatives. Les valeurs de l'AUC-ROC varient de 0.78 pour GPM-F et GPM-L, 0.77 pour GPM-E et 0.67 pour l'ERA5, suggérant une performance nettement meilleure des produits GPM dans cette distinction. Le taux de fausses découvertes (FDR) évalue la proportion d'erreurs de type I parmi les prédictions positives d'un modèle. Les produits GPM ont un FDR relativement faible (0.62 pour GPM-F et GPM-L, 0.63 pour GPM-E) par rapport à l'ERA5 (0.78), ce qui indique une meilleure capacité des produits GPM à limiter les prédictions positives fausses (Fig.2).

Dans cette étude, l'évaluation des produits de précipitation (ERA5, GPM-F, GPM-L et GPM-E) à différentes échelles temporelles (quotidienne, mensuelle et annuelle) a révélé une tendance générale à surestimer les précipitations. Les biais médians variaient pour les estimations journalières entre 1.30 et 0.28, pour les estimations mensuelles entre 39.69 et 8.99, et pour les estimations annuelles entre 476.27 et 107.84. Les produits GPM ont montré les biais les plus faibles par rapport à ERA5. Les corrélations les plus faibles étaient observées à l'échelle journalière, mais s'amélioraient à l'échelle mensuelle et annuelle. Les corrélations de Spearman suivaient une tendance similaire. ERA5 était le plus corrélé avec les données observées à l'échelle journalière et annuelle, tandis que GPM-F présentait une meilleure corrélation à l'échelle mensuelle. Les schémas spatiaux d'ERA5 et de GPM-F étaient cohérents avec les stations, avec de meilleures performances d'ERA5 à l'échelle quotidienne et de GPM-F aux échelles mensuelles et annuelles. Les résultats montraient également que les performances de GPM-L et GPM-E étaient relativement bonnes aux échelles mensuelles et annuelles, mais moins bonnes à l'échelle quotidienne. En ce qui concerne les erreurs RMSE et MAE, ERA5 présentait les valeurs les plus élevées, tandis que GPM-F était le produit le plus performant à toutes les échelles temporelles, suivi de GPM-L et GPM-E. Malgré les bonnes corrélations, ERA5 avait des erreurs et des biais plus élevés (Fig.3).

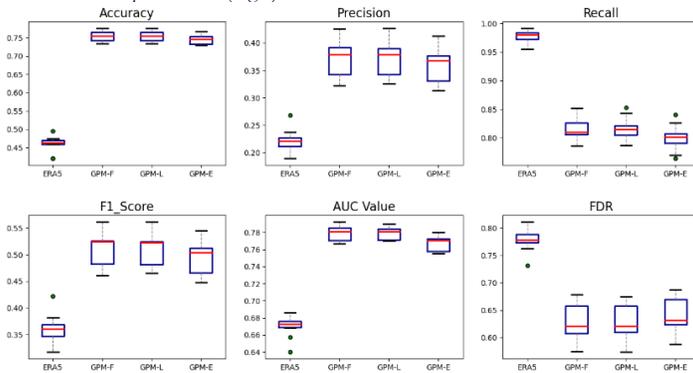


Fig. 2 - Boxplots of classification metrics at the daily scale of IMERG and ERA5 pre-cipitation products.

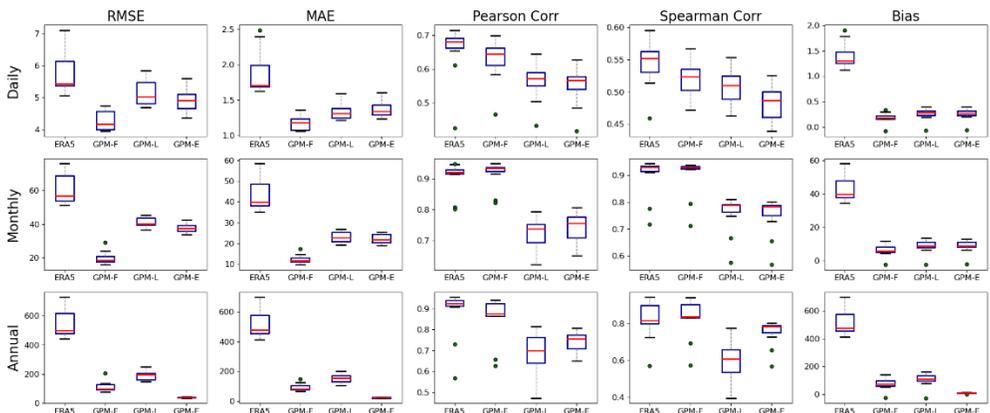


Fig. 3 - Boxplots of regression metrics at daily, monthly and annual time scales of IMERG and ERA5 precipitation products.

3.2. Evolution des métriques en fonction de l'altitude

Pour comprendre l'effet de la topographie sur la performance des produits de précipitations IMERG et ERA5, les différentes métriques utilisées dans cette étude ont été représentées en fonction de l'altitude. Les altitudes des stations pluviométriques varient quant à elles entre 67 et 687 mètres, et ont été extraites à l'aide d'une MNT. Les résultats ont montré que l'altitude n'avait pas d'effet significatif sur les métriques de classification des produits, probablement en raison de la faible amplitude d'altitudes des stations (Fig.4). Cependant, l'analyse des métriques de régression a révélé que l'altitude influençait différemment les performances des produits. L'ERA5 surestimait les précipitations à des altitudes élevées, avec une surestimation plus marquée pour les stations en haute altitude par rapport aux stations en basse altitude. En revanche, les produits GPM ne montraient pas d'effet significatif de l'altitude. Les résultats suggèrent que l'ERA5 est plus sensible à l'altitude que les produits GPM dans la région d'étude. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la surestimation des précipitations dans l'ERA5, tels que les processus dynamiques et thermodynamiques [42], la résolution spatiale [43], une représentation inadéquate des processus de nuages et de précipitations [44], ainsi que la présence d'aérosols atmosphériques [45]. Pour les produits satellitaires, la surestimation peut être attribuée à des facteurs tels que l'évaporation sous-nuageuse [46] et la présence de nuages froids [47]. Les tendances des erreurs RMSE et MAE ont montré une augmentation des basses aux hautes altitudes pour l'ERA5, tandis que l'effet de l'altitude était moins prononcé pour les produits GPM. Les coefficients de corrélation ont également diminué avec l'augmentation de l'altitude, notamment à l'échelle journalière pour l'ERA5 (Fig.5).

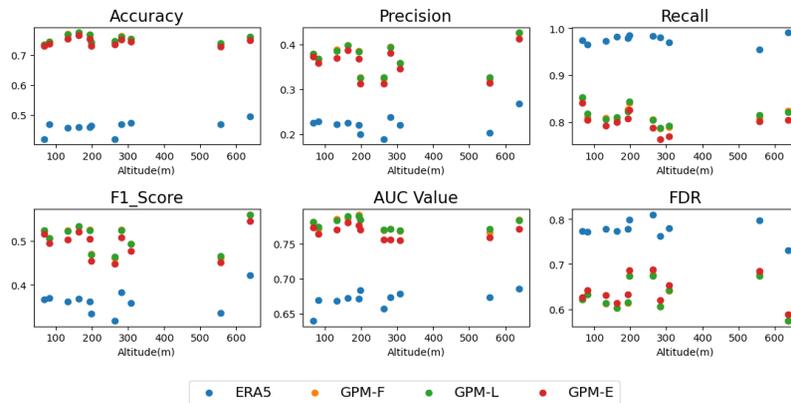


Fig. 4 - Evolution of classification metrics as a function of altitude.

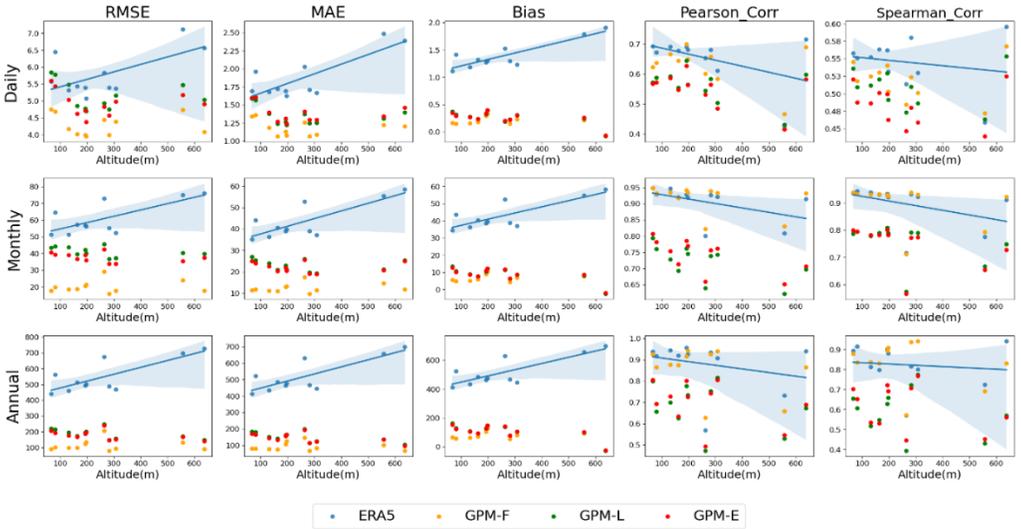


Fig. 5 - Evolution of the regression metrics as a function of altitude for the daily, monthly and annual scales.

3.3. Évaluation basée sur l'intensité des précipitations

L'évaluation visait à comparer les performances des produits de précipitations IMERG et ERA5 dans la détection des différentes intensités de précipitations. Les produits GPM-F, GPM-L et GPM-E ont montré des performances similaires, avec une précision élevée (valeur médiane d'accuracy de 0,88 à 0,89) et un bon équilibre entre la recall et la precision (F1_score de 0,94). Le produit ERA5 a une précision plus élevée (0,98) mais une recall légèrement plus faible (0,82), ce qui conduit à un F1_score inférieur (0,89). Cela suggère que le produit ERA5 prédit correctement les valeurs positives mais peut en manquer certaines. Les résultats pour la première classe indiquent que tous les produits ont des performances solides, avec une bonne précision et capacité à détecter les données positives et un faible taux de fausses découvertes. Pour les autres classes, tous les produits ont des performances relativement faibles, avec des difficultés à prédire avec précision les données positives. Les valeurs de recall sont faibles pour la deuxième classe, indiquant un manque important de données positives. Cependant, il y a une amélioration pour les classes suivantes, avec des valeurs de recall qui augmentent. Les valeurs de precision sont également faibles, indiquant un grand nombre de faux positifs, et le taux de faux positifs est élevé pour tous les produits. Le F1_score est également faible pour tous les produits.

Les résultats des biais indiquent que tous les produits surestiment les précipitations pour la première classe, avec des biais plus faibles pour les modèles GPM (médiane de 0,03) par rapport à ERA5 (médiane de 0,07). Pour la deuxième classe, ERA5 surestime les précipitations (médiane de 0,32) tandis que les modèles GPM les sous-estiment (valeurs de médiane allant de -0,19 à -0,25). Pour les classes suivantes, ERA5 et certains modèles GPM surestiment les précipitations, tandis que GPM-E les sous-estime. Pour la dernière classe, tous les produits surestiment les précipitations, avec GPM-F ayant le biais le plus faible. Les erreurs RMSE et MAE montrent que GPM-E et GPM-L ont les valeurs les plus faibles pour les premières classes, suivis de près par GPM-F et ERA5. Les valeurs augmentent avec les classes supérieures, indiquant que les modèles s'éloignent de la réalité. Les coefficients de corrélation sont très faibles pour la plupart des classes, sauf pour la dernière classe où une amélioration de la cohérence est observée. Le coefficient de corrélation de Spearman est également très faible, avec des améliorations uniquement pour la cinquième classe. Cela indique que les produits ont du mal à suivre les schémas spatiaux des précipitations, en particulier pour les premières classes.

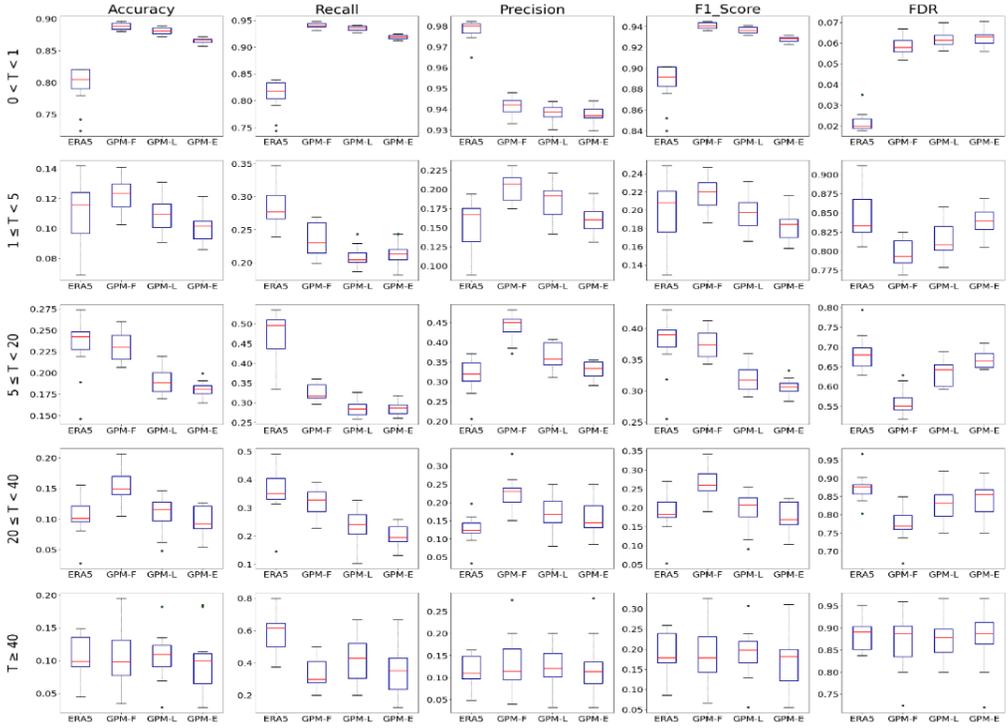


Fig. 6 - Boxplots of classification metrics for the different intensity classes.

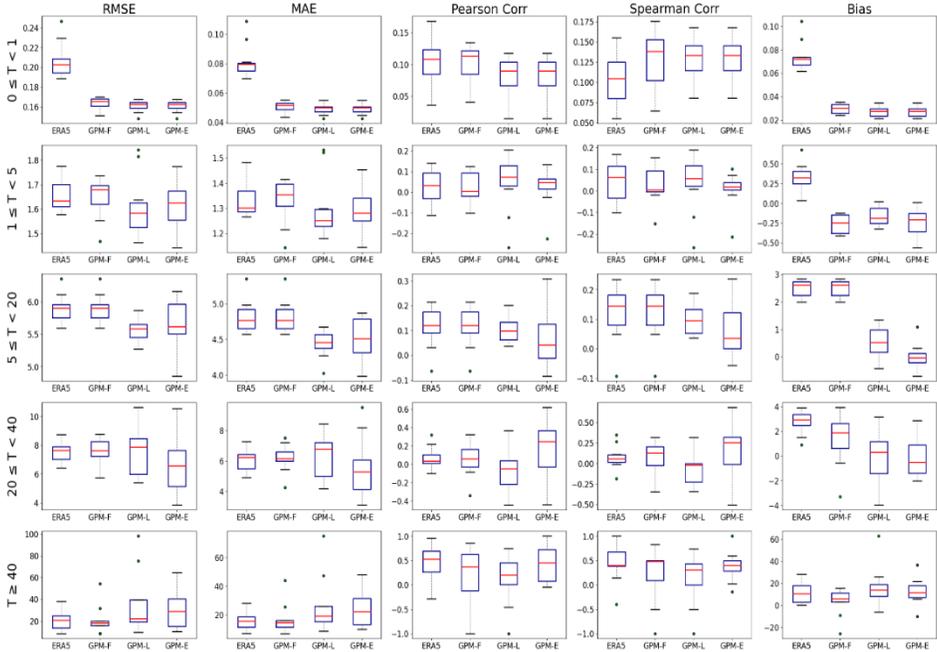


Fig. 7 - Boxplots of regression metrics for the different intensity classes.

3.4. Évaluation basée sur les mois pluvieux et mois d'été

L'étude actuelle a réalisé une évaluation saisonnière basée sur les mois pluvieux et les mois d'été. Dans la région d'étude, la saison humide coïncide avec la saison froide, elle s'étale habituellement entre Novembre et Mars. L'été est la saison sèche et les pluies d'été, généralement orageuses, comptent ordinairement pour moins de 10% du total annuel des précipitations. Les résultats de la figure 8 montrent que tous les produits surestiment les précipitations mensuelles d'octobre à décembre, à l'exception de GPM-L qui les sous-estime légèrement en octobre. Cette surestimation persiste pour GPM-F et ERA5 de janvier à avril, tandis que GPM-L et GPM-E les sous-estiment pour ces mois. En termes de cohérence, ERA5 est le plus corrélé avec les données observées, suivi de près par GPM-F, GPM-L et GPM-E. Cependant, ERA5 présente les erreurs RMSE et MAE les plus élevées parmi les quatre produits, tandis que GPM-F a les erreurs les plus faibles pour les mois d'octobre à décembre, et GPM-L pour les mois de janvier à avril.

Les résultats affichés dans la figure 9 indiquent que le produit GPM-F avait le biais le plus faible par rapport aux précipitations mensuelles des mois d'été, suivi par GPM-L et GPM-E. Cependant, comme cela a été constaté depuis le début de l'étude, l'ERA5 présentait de grandes variations d'intervalles, à l'exception du mois d'août où elle a montré des biais inférieurs à ceux de GPM-L et GPM-E. Les erreurs RMSE et MAE étaient également plus faibles pour GPM-F, suivies de GPM-E, GPM-L et ERA5 respectivement. Les valeurs de corrélation de Pearson et de Spearman étaient relativement faibles. De manière générale, les résultats indiquent que depuis le début de l'étude, l'ERA5 a montré une cohérence et une capacité supérieure à saisir les schémas spatiaux des précipitations des mois d'été, suivie par GPM-F, GPM-L et GPM-E respectivement. Dans l'ensemble, les produits de précipitations présentent des biais ainsi que des erreurs RMSE et MAE peu élevés pour les mois d'été en comparaison aux mois pluvieux. Toutefois, ils présentent des corrélations plus élevées pour les mois pluvieux que pour les mois d'été.



Fig. 8 - Boxplots of rainy month regression metrics.

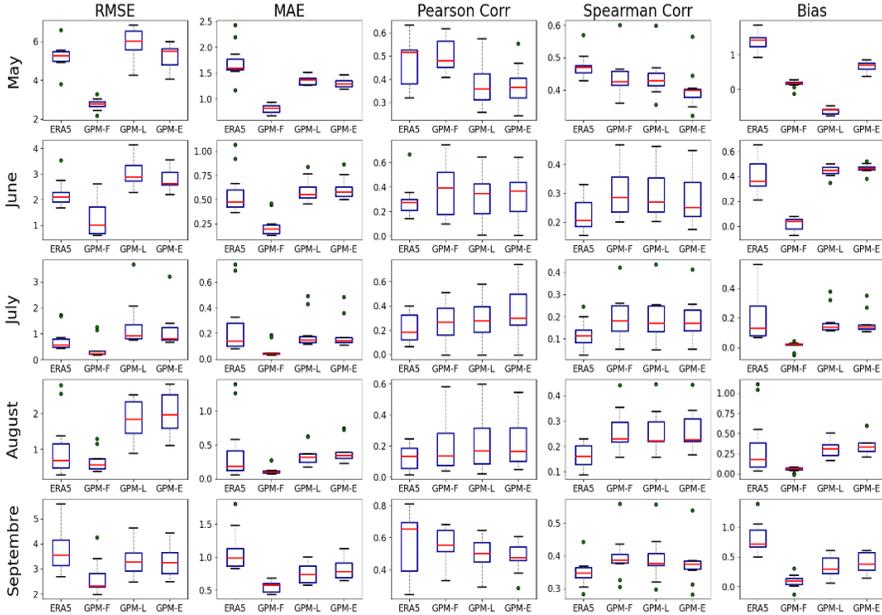


Fig. 9 - Boxplots of summer months regression metrics.

3.5. Evaluation basée sur la moyenne des pixels

Dans le cadre de cette étude, une évaluation a été réalisée en utilisant la moyenne des stations pluviométriques et la moyenne des pixels pour tous les produits de précipitations. Parmi les quatre produits de précipitations étudiés, le modèle GPM-F est celui qui offre la meilleure description du cycle saisonnier. En ce qui concerne l'ampleur des précipitations, il a été observé que le produit ERA5 surestime de manière significative les précipitations par rapport aux autres produits, ce qui se traduit par une amplitude élevée. Cette surestimation excessive explique pourquoi ERA5 présente constamment les biais et les erreurs RMSE et MAE les plus élevées tout au long de l'étude. De plus, il est clairement visible que les modèles GPM-L et GPM-E sous-estiment les précipitations pour les mois de janvier à avril, ce qui est cohérent avec les résultats des métriques de régression pour les mois pluvieux (Fig.10.a). En ce qui concerne la fréquence, les modèles GPM ont montré une grande capacité à refléter les fréquences de chaque classe. En revanche, ERA5 a tendance à sous-estimer les fréquences de la classe ($0 \leq T < 1$), qui représente la majorité des précipitations dans la zone d'étude, et à surestimer les fréquences des autres classes (Fig. 10.b et 11). Depuis le début de l'étude, le modèle GPM-F présente le biais le plus faible pour toutes les échelles temporelles, suivi par GPM-L, GPM-E et ERA5. Les erreurs RMSE et MAE sont également les plus faibles avec le modèle GPM-F, suivi de GPM-E, GPM-L et ERA5. En termes de cohérence, ERA5 reste le produit le plus corrélé avec les données de référence, suivi par GPM-F, GPM-L et GPM-E dans cet ordre (Fig.12).

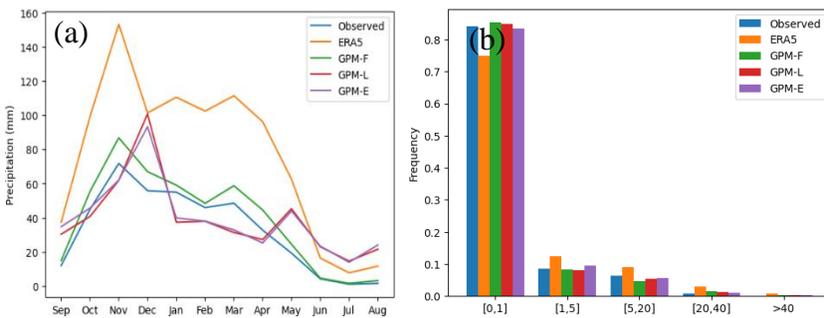


Fig. 10 - (a) Ability of each product to describe precipitation cycles for the pixel average. (b) Frequencies of the different intensity categories of each precipitation product for the pixel average.

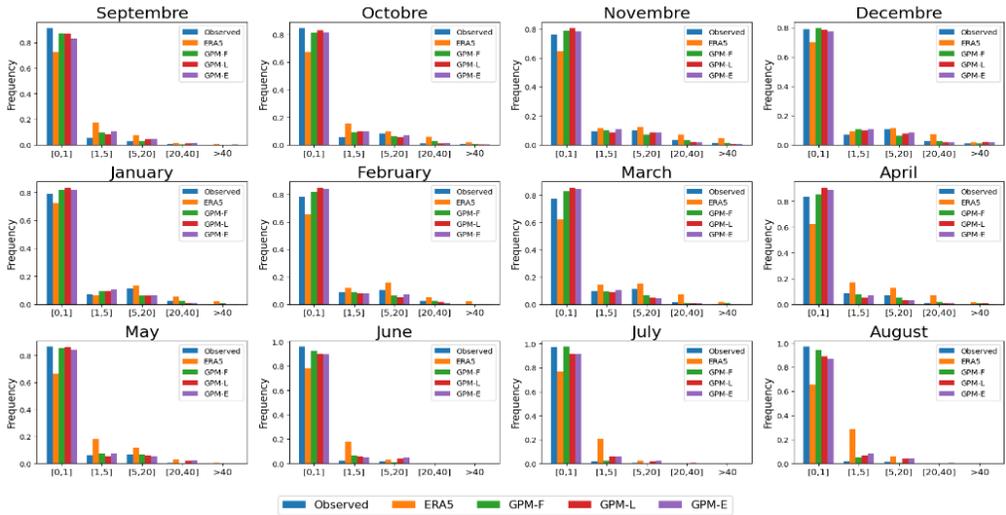


Fig. 11 - Frequencies of the different intensity categories for each month and each precipitation product for the pixel average.

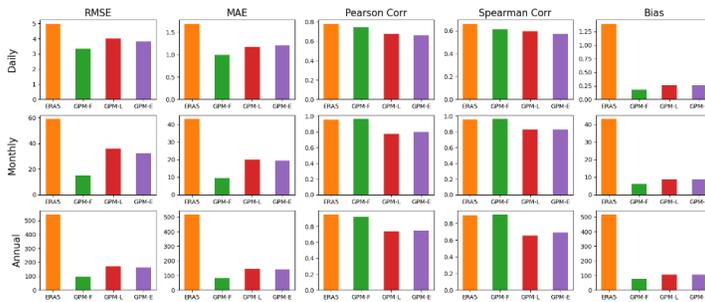


Fig. 12 - Pixel mean regression metric barplots for all precipitation products.

3.6. Résultats de correction de biais

Selon les résultats obtenus à partir des métriques de régression et de classification, le produit GPM-F est le plus performant parmi tous les produits de précipitations examinés à différentes échelles. Des études antérieures ont également montré que le produit GPM-F surpassait les autres produits [5,18,48,49,50]. Afin d'améliorer la précision du modèle GPM-F, une correction de biais a été appliquée. Les figures 13 et 14 illustrent les métriques de régression et de classification du modèle GPM-F avant et après la correction de biais. Ces résultats sont issus d'un test effectué sur le modèle ANN construit et entraîné pour cette étude. Les résultats de la correction montrent une réduction significative des biais et des erreurs RMSE et MAE à toutes les échelles temporelles. En outre, une légère amélioration des coefficients de détermination R^2 et de corrélation a été observée à l'échelle quotidienne, tandis que cette amélioration était plus importante à l'échelle annuelle, mais insignifiante à l'échelle mensuelle (Fig.13). De plus, la correction a conduit à une amélioration globale des performances du modèle de classification, avec une augmentation de l'accuracy, de la précision et du $F1_score$, mais une légère diminution de l'AUC-ROC. En outre, le FDR a également diminué, indiquant une meilleure capacité du modèle à minimiser les faux positifs (Fig.14).

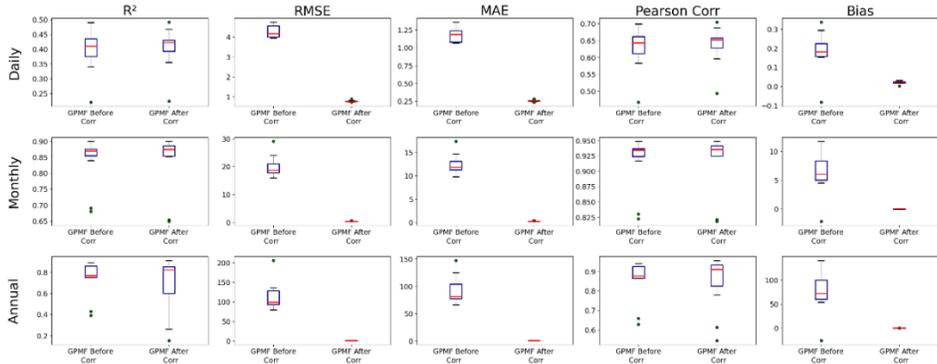


Fig. 13 - Boxplots of regression metrics before and after bias correction.

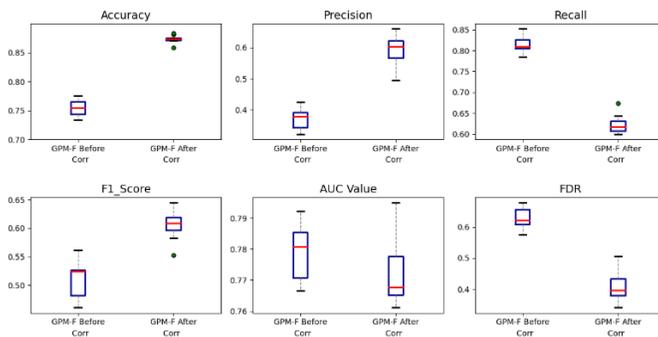


Fig. 14 - Boxplots of classification metrics before and after bias correction.

CONCLUSION

Comme toutes zones arides ou semi-arides, le bassin versant du Bouregreg est sensible aux impacts du changement climatique. Des données précises sur les apports pluviaux sont essentielles pour son développement. Mais en raison du nombre limité de stations de mesure, les réanalyses et les données satellitaires, telles que les ensembles de données IMERG et ERA5, seraient une bonne alternative. Une évaluation complète de ces produits a été réalisée dans le bassin versant en utilisant des observations au sol sur une période de septembre 2000 à août 2020. Les principaux résultats indiquent que le produit GPM-F présente les meilleures performances à différentes échelles temporelles et spatiales, suivi par les produits GPM-L et GPM-E. En revanche, le produit ERA5 a montré les performances les plus faibles lors de l'évaluation à l'échelle des pixels. Les modèles GPM ont montré une bonne capacité de détection, de précision et d'exactitude, en particulier pour des intensités de précipitations inférieures à 1 mm par jour. Cependant, ERA5 était plus performant pour des intensités plus élevées (≥ 40 mm/jour). Dans l'ensemble, les quatre ensembles de données ont réussi à reproduire les cycles saisonniers et les distributions spatiales. GPM-F a montré une performance supérieure dans la capture des cycles saisonniers, tandis qu'ERA5 était cohérent dans la distribution spatiale. Les produits ont présenté des biais élevés pendant les mois pluvieux et de faibles biais pendant les mois d'été. Les résultats suggèrent que les produits de précipitation, en particulier GPM-F, conviennent aux environnements arides et semi-arides et peuvent être utilisés pour une gestion efficace des ressources en eau. L'amélioration de la capacité de détection des événements est cruciale pour améliorer les produits de précipitation. Après correction des biais à l'aide d'un modèle ANN, GPM-F a montré des améliorations significatives dans plusieurs indices des précipitations journalières. Cependant, il existe encore un potentiel d'amélioration, notamment en termes de rappel, de valeur de l'ASC et de coefficient de détermination, pour des estimations plus précises des précipitations dans le bassin versant du Bouregreg et des régions similaires.

Références

- [1] MassonDelmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. and Zhou, B. (Eds.). IPCC, 2021: Summary for policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution

- of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <http://hdl.handle.net/10204/12710>
- [2] Ouhamdouch S. Climate change impact and vulnerability of water resources in the Essaouira basin, Doctoral thesis. Cadi Ayyad University, Marrakech, 2020, p 222p
 - [3] Kourgialas NN, Anyfanti I, Karatzas GP, Dokou Z. An integrated method for assessing drought prone areas—Water efficiency practices for a climate resilient Mediterranean agriculture. *Sci Total*, 625 (2018) 1290–1300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.051>
 - [4] Chiaravalloti, F.; Brocca, L.; Procopio, A.; Massari, C.; Gabriele, S. Assessment of GPM and SM2RAIN-ASCAT Rainfall Products over Complex Terrain in Southern Italy. *atmosphere. Res*, 206 (2018) 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.019>
 - [5] Shen, Z.; Yong, B.; Yi, L.; Wu, H.; Xu, H. From TRMM to GPM, How Do Improvements of Post/near-Real-Time Satellite Pre-cipitation Estimates Manifest. *Atmosphere. Res*, 268 (2022): 106029. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106029>
 - [6] Joyce, RJ, Janowiak, JE, Arkin, PA & Xie, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeorol*, 5 (2004) 487–503.
 - [7] Lakew, HB. Semu Ayalew Moges, Dereje Hailu Asfaw. Hydrological performance evaluation of multiple satellite precipitation products in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27 (2020): 100664. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100664>
 - [8] Hou, AY, Ramesh K, Kakar, Steven Neeck, Ardeshir A, Azarbarzin, Christian D, Kummerow, Masahiro Kojima, Riko Oki, Kenji Nakamura & Toshio Iguchi. The global precipitation measurement mission. *Bull. Am. Meteorol. Soc*, 95 (2014) 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
 - [9] Hersbach, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *QJR Meteorol. Soc*, 146 (2020) 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
 - [10] Shuai Xiao, Lei Zou, Jun Xia, Zhizhou Yang, Tianci Yao. Bias correction framework for satellite precipitation products using a rain/no rain discriminative model. *Science of the Total Environment*, 818 (2022): 151679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151679>
 - [11] Ying Xin, Yaping Yang, Xiaona Chen, Xiafang Yue, Yangxiaoyue Liu & CongYin. Evaluation of IMERG and ERA5 precipitation products over the Mongolian Plateau. *Scientific Reports*, 12 (2022): 21776. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26047-8>
 - [12] Moura Ramos Filho, G.; Hugo Rabelo Coelho, V.; da Silva Freitas, E.; Xuan, Y.; Brocca, L.; das Neves Almeida, C. Region-al-Scale Evaluation of 14 Satellite-Based Precipitation Products in Characterizing Extreme Events and Delineating Rainfall Thresholds for Flood Hazards. *atmosphere. Res*, 276 (2022): 106259. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106259>
 - [13] Helmi AM and Abdelhamed MS. Evaluation of CMORPH, PERSIANN-CDR, CHIRPS V2.0, TMPA 3B42 V7, and GPM IMERG V6 Satellite Precipitation Datasets in Arabian Arid Regions. *Water*. 15(1) (2022), 92. <https://doi.org/10.3390/w15010092>
 - [14] El Orfi T., Mohamed El Ghachi, Sebastien Lebaud. Comparison of satellite precipitation data with data measured in the Oued Oum Er Rbia watershed upstream of the Ahmed El Hansali dam (Morocco): XXXIII Colloquium of the International Association of Climatology: Climate Change and Territories, Rennes, France, Jul 2020., pp.271-276.
 - [15] Saouabe , T.; El Khalki, EM; Saidi, MEM; Najmi, A.; Hadri, A.; Rachidi, S.; Jadoud, M.; Trambly, Y. Evaluation of the GPM-IMERG Precipitation Product for Flood Modeling in a Semi-Arid Mountainous Basin in Morocco. *Water*, 12 (2020): 2516. <https://doi.org/10.3390/w12092516>
 - [16] Ouaba, M.; El Khalki, EM; Saidi, ME; Alam, MJ. Bin Estimation of Flood Discharge in Ungauged Basin Using GPM-IMERG Satellite-Based Precipitation Dataset in a Moroccan Arid Zone. *Earth Syst, Approximately*. 6 (2022) 541–556. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00296-z>
 - [17] Salih, W. ; Chehbouni, A.; Epule, TE. Evaluation of the Performance of Multi-Source Satellite Products in Simulating Observed Precipitation over the Tensift Basin in Morocco. *Remote Sens*, 14 (2022) 1171. <https://doi.org/10.3390/rs14051171>
 - [18] Rachdane, M., El Mahdi El Khalki, Mohamed Elmehdi Saidi, Mohamed Nehmadou, Abdellatif Ahbari & Yves Trambly. Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products in Sub-Saharan Morocco. *Water*, 14 (2022) 3336. <https://doi.org/10.3390/w14203336>
 - [19] Villarini G, Krajewski WF, Smith JA. New paradigm for statistical validation of satellite precipitation estimates: application to a large sample of the TMPA 0.25° 3-hourly estimates over Oklahoma. *J Geophys Res Atmos*, 114 (2009). <https://doi.org/10.1029/2008JD011475>
 - [20] Rafik A, Bahir M, Beljadid A, Ouazar D, Chehbouni A, Dhiba D, Ouhamdouch S. Surface and groundwater characteristics within a semi-arid environment using hydrochemical and remote sensing techniques. *Water*, 13(3) (2021): 277. <https://doi.org/10.3390/w13030277>

- [21] Chen , H.; Yong, B.; Kirstetter, PE; Wang, L.; Hong, Y. Global Component Analysis of Errors in Three Satellite-Only Global Precipitation Estimates. *Hydrol. Earth Syst. Science.* 25 (2021) 3087–3104. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3087-2021>
- [22] Zhanming, W.; Ke, Z.; Xianwu, X.; Hong, Z.; Yang, H.; Jonathan, JG. Water Balance-Based Actual Evapotranspiration Re-construction from Ground and Satellite Observations over the Conterminous United States. *Water Resource. Res.* 64 (2015) : 929. <https://doi.org/10.1029/EO064i046p00929-04>
- [23] Li , X., Chen, Y., Wang, H. & Zhang, Y. Assessment of GPM IMERG and radar quantitative precipitation estimation (QPE) products using dense rain gauge observations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *atmosphere. Res.* 236 (2020) 104834.
- [24] Rätsch G. A Brief Introduction into Machine Learning. Friedrich Miescher Laboratory of the Max Planck Society. Friedrich Miescher Laboratory of the Max Planck Society, Spemannstrasse, Tübingen, Germany 37 (2004): 72076. <http://www.tuebingen.mpg.de/~raetsch>
- [25] Demir F. Deep autoencoder-based automated brain tumor detection from MRI data. *Artificial Intelligence-Based Brain-Computer Interface*, 14 (2022) 317-351. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91197-9.00013-8>
- [26] Grandini M., Bagli E., Visani G. Metrics for multi-class classification: an overview. arXiv, 2020, preprint arXiv:2008.05756. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05756>
- [27] Lipton ZC. Thresholding Classifiers to Maximize F1 Score. arXiv, (2014), preprint arXiv:1402.1892. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1402.1892>
- [28] Rachakonda AR. & Bhatnagar A. A Ratio: Extending area under the ROC curve for probabilistic labels. *Pattern Recognition Letters*, 150 (2021) 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.06.023>
- [29] Marandon A., Lihua Lei , David Mary , Etienne Roquain. Machine Learning Meets False Discovery Rate. arXiv, (2022), preprint arXiv:2208.06685. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.06685>
- [30] Botchkarev A. A New Typology Design of Performance Metrics to Measure Errors in Machine Learning Regression Algorithms. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, 14 (2019) 045-076. <https://doi.org/10.28945/4184>
- [31] Li, J.; Heap, AD. A Review of Comparative Studies of Spatial Interpolation Methods in Environmental Sciences: Performance and Impact Factors. *School. Inform.* 6 (2011) 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>
- [32] Ly A, Marsman M, Wagenmakers EJ. Analytic posteriors for Pearson's correlation coefficient. *StatNeerl*, 72(1) (2017) 4–13. <https://doi.org/10.1111/stan.12111>
- [33] WMO (World Meteorological Organization). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-8, Updated 2018); WMO: Geneva, Switzerland. 2014, ISBN 9789263100085.
- [34] Tang, G., Clark, MP, Papalexiou, SM, Ma, Z. & Hong, Y. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sens. Approximately.* 240 (2020) : 111697. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>
- [35] Saemian, P. Seyed-Mohammad Hosseini-Moghari, Iman Fatehi, Vahid Shoarinezhad, Ehsan Modiri, Mohammad J. Tourian, Qihong Tang, Wolfgang Nowak, András Bárdossy c, Nico Sneeuw. Comprehensive evaluation of precipitation datasets over Iran. *J. Hydrol.* 603 (2021) 127054. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127054>
- [36] Li, J.; Heap, AD A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *August. geol. Surv. Organ.*, 68 (2008): 154. Available online: https://planet.uwc.ac.za/nisl/BCB_BIM_honours/Course_Documents_2016/Spatial_Interpolation_statistics_method.pdf (ac-cessed on 15 June 2022)
- [37] Zhou , Z.; Guo, B.; Xing, W.; Zhou, J.; Xu, F.; Xu, Y. Comprehensive Evaluation of Latest GPM Era IMERG and GSMaP Pre-cipitation Products over Mainland China. *atmosphere. Res.* 246 (2020): 105132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105132>
- [38] Tan , ML; Samat, N.; Chan, NW; Roy, R. Hydro-Meteorological Assessment of Three GPM Satellite Precipitation Products in the Kelantan River Basin, Malaysia. *Remote Sens.* 10 (2018): 1011. <https://doi.org/10.3390/rs10071011>
- [39] El Alaoui El Fels A. ; Mohamed Elmehdi Saidi ; Md Jobair Bin Alam. Rainfall Frequency Analysis Using Assessed and Cor-rected Satellite Precipitation Products in Moroccan Arid Areas. The Case of Tensift Watershed. *Earth Systems and Environ-ment*, 6 (2021) 391–404. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00290-x>
- [40] Krogh A. What are artificial neural networks. *Nat Biotechnol*, 26 (2008) 195–197. <https://doi.org/10.1038/nbt1386>
- [41] Dreyfus G. Neural networks: methodology and application. Springer Science & Business Media, (2005), Berlin
- [42] Ou T, Chen D, Tang J, Lin C, Wang X, J Kukules & Hui-Wen Lai. Wet bias of summer precipitation in the northwestern Ti-betan Plateau in ERA5 is linked to overestimated lower-level southerly wind over the plateau. *Climate Dynamics*, (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06672-3>
- [43] Kendon E.J., Nikolina B., Nigel M. Roberts, Hayley J. Fowler, Malcolm J. Roberts, Steven C. Chan, Jason P. Evans, Georgia Fosser, and Jonathan M. Wilkinson. Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipi-tation change? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3) (2019), 413-431. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-0004.1>

- [44] Jiang Q., Weiyue Li, Zedong Fan, Xiaogang He, Weiwei Sun, Sheng Chen, Jiahong Wen, Jun Gao, Jun Wang. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland. *Journal of Hydrology*, 595 (2020) 125660. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660>
- [45] Rangwala, I., Miller, JR, Russell, GL, & Xu, M. Using a global climate model to evaluate the influences of water vapor, snow cover and atmospheric aerosol on warming in the Tibetan Plateau during the twenty-first century. *Climatic Change*, 116(2) (2013), 479-495. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0515-5>
- [46] Dinku, T.; Ceccato, P.; Connor, S.J. Challenges of Satellite Rainfall Estimation over Mountainous and Arid Parts of East Africa. *Int.J. Remote Sens*, 32 (2011) 5965–5979. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.499381>
- [47] Hussain, Y.; Satgé, F.; Hussain, M.B.; Martínez-Carvajal, H.; Bonnet, M.P.; Cárdenas-Soto, M.; Roig, H.L.; Akhter, G. Performance of CMORPH, TMPA, and PERSIANN Rainfall Datasets over Plain, Mountainous, and Glacial Regions of Pakistan. *Theor. Appl. Climatol.*, 131 (2017) 1119–1132. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2027-z>
- [48] Mohammed SA, Mohamed A. Hamouda, Mohammed T. Mahmoud & Mohamed M. Mohamed. Performance of GPM-IMERG precipitation products under diverse topographical features and multiple-intensity rainfall in an arid region. *Hydrology and Earth System Sciences*, (2020). <https://doi.org/10.5194/hess-2019-547>
- [49] Leong, M.; Santo, H. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR Satellite Precipitation Products over Malaysia. *atmosphere. Res*, 202 (2018) 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006>
- [50] Anjum, MN; Ding, Y.; Shangquan, D.; Ahmad, I.; Ijaz, MW; Farid, HU; Yagoub, E.; Zaman, M.; Adnan, M. Performance Evaluation of Latest Integrated Multi-Satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the Northern Highlands of Pakistan. *atmosphere. Res*, 205 (2018) 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.010>

Évaluation de la qualité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation, en utilisant l'Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IQWI) et des méthodes statistiques dans la plaine de Hennaya (nord-ouest de l'Algérie)

Abdessalam Laoufi¹, Abderrezak Boudjema and Sabrine Guettaia,

¹ Laboratoire n°25 : "Promotion de l'eau, pédologie et ressources minières, législation environnementale et choix technologiques", Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie

Résumé

Les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement en eau pour les activités d'irrigation agricole dans la plaine de Hennaya. Cependant, elles font actuellement face à une grave détérioration en raison de la pollution, notamment par des polluants organiques. Cette étude a été réalisée dans le but d'estimer le niveau de contamination des eaux souterraines destinées à l'irrigation. Les résultats préliminaires de l'analyse physico-chimique de 19 échantillons montrent des concentrations élevées de nitrates (de 97,99 à 217,26 mg.L⁻¹; moyenne : 144,39 mg.L⁻¹), ce qui s'explique par l'utilisation excessive d'agrochimiques (engrais azotés, NPK, etc.). Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQWI) varient entre 56,85 et 69,04, ce qui indique que tous ces échantillons d'eaux souterraines ont une qualité moyenne pour l'irrigation et qu'ils conviennent uniquement à l'irrigation de certaines plantes ayant une grande tolérance au sel et nécessitant des pratiques spéciales de contrôle de la salinité. Les résultats du diagramme de Gibbs montrent une prédominance des eaux souterraines entre le domaine des roches et des eaux salines, ce qui peut s'expliquer par les valeurs élevées de conductivité électrique (CE) (de 1366 à 1630 µS.cm⁻¹) et indique qu'elles nécessitent un prétraitement avant leur utilisation agricole. Le Système d'Information Géographique (SIG), à l'aide du logiciel QGIS, offre une cartographie des distributions spatiales des différents paramètres et indices, ce qui permettra aux gestionnaires de prendre les meilleures décisions pour la réhabilitation des ressources en eaux souterraines dans cette région.

Mots clés : Plaine d'Hennaya, Irrigation, Pollution, IQWI, SIG.

Groundwater quality assessment used for irrigation, using IWQI, and statistical methods in the Hennaya plain (NW Algeria)

Abstract:

Groundwater is the main source of water supply for agricultural irrigation activities in the Hennaya plain. However, it is currently suffering from severe deterioration because of pollution, in particular with organic pollutants. This study was conducted with the aim of estimating the level of contamination of the groundwater destined for irrigation. The preliminary results of the physico-chemical analysis of 19 samples shows high concentrations of nitrates (97.99 to 217.26 mg.L⁻¹; average : 144.39 mg.L⁻¹), which is explained by the excessive use of agrochemicals (Nitrogen fertilizers, NPK ...). The values of the irrigation quality water index (IQWI) ranged between 56.85 and 69.04, which indicates that all of these groundwater samples are of medium quality for irrigation and that they are only suitable for irrigation of certain plants with high salt tolerance with special salinity control practices. The results of the Gibbs plot show the groundwater dominance between rocks and salt water, which can be explained by the high values of CE (1366 to 1630 µS.cm⁻¹) and that they need pre-treatment before agricultural use. The Geographic Information System (GIS), we have offered through the QGIS software, a mapping of spatial distributions of various parameters and indices, which will allow managers to make the best decisions for the rehabilitation of groundwater resources in this region.

Key Words: Hennaya plain, Irrigation, Pollution, IQWI, GIS

¹ Corresponding author: abdessalamlaoufi42@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les eaux souterraines sont une ressource naturelle précieuse qui est cruciale à de nombreuses utilisations humaines, mais ces activités peuvent l'affecter en termes de quantité et de qualité [1-2].

Actuellement, la contamination des eaux souterraines destinées à l'irrigation est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale [2], car l'irrigation avec l'eau polluée est considérée comme une menace pour les cultures agricoles ainsi que pour les propriétés des sols, ce qui réduit sa fertilité. Souvent, la pertinence de l'eau souterraine pour l'irrigation est déterminée par les éléments minéraux qui y sont présents et leur effet sur le sol et les cultures [3].

Dans la plaine d'Hennaya, les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement en eau à des fins d'irrigation [4-5]. Cependant, ces ressources souffrent d'une dégradation de qualité ces dernières années en raison de l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides dans l'agriculture.

Au cours de cette étude, nous avons évalué la qualité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation dans la zone d'étude d'abord en comparant les concentrations de divers éléments physico-chimiques avec le guide des normes de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), puis en calculant l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI). Tous les paramètres liés à la qualité de l'eau d'irrigation sont intégrés tels que le Rapport d'Adsorption de Sodium (SAR), la Conductivité Electrique (CE), les concentrations des ions de sodium (Na^+), chlorure (Cl^-) et bicarbonate (HCO_3^-).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La plaine d'Hennaya est située au nord de la ville de Tlemcen (nord-ouest de l'Algérie), s'étendant sur une superficie de 28 km², délimitée au nord par l'Oued Isser, au sud par la ville de Tlemcen, à l'est par l'Oued Sikkak et à l'ouest par l'Oued Khallouf (Fig. 1). Cette plaine est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride, sec et chaud en été et pluvieux en hiver, avec des précipitations moyennes annuelles de 464.4 mm par an et des températures de 17.12 à 18.86° C (moy : 18.11 °C). Les activités agricoles sont très importantes dans la zone d'étude, où la culture des agrumes est répartie sur de grandes surfaces en plus des activités d'élevage.

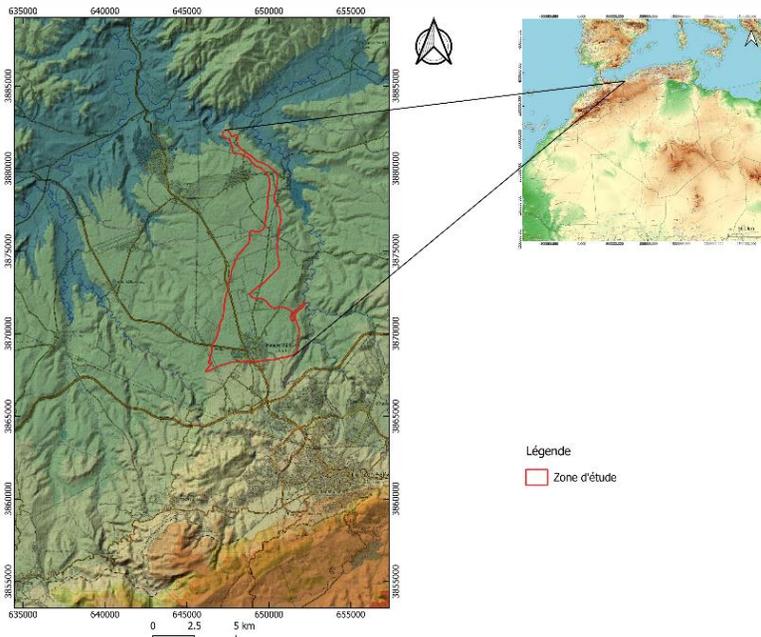


Fig.1 – Situation géographique de la zone d'étude.

2.2. Echantillonnage et analyses

Dix-neuf points d'eau ont été prélevés et analysés durant le mois de mars 2018, principalement destinés à l'irrigation des terres agricoles dans la zone d'étude (**Fig. 2**). Les mesures analytiques ont été portées sur 10 paramètres physico-chimiques qui sont le pH, la conductivité électrique (CE), solides totaux dissous (TDS), le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), chlorure (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}), le bicarbonate (HCO_3^-) et les nitrates (NO_3^-).

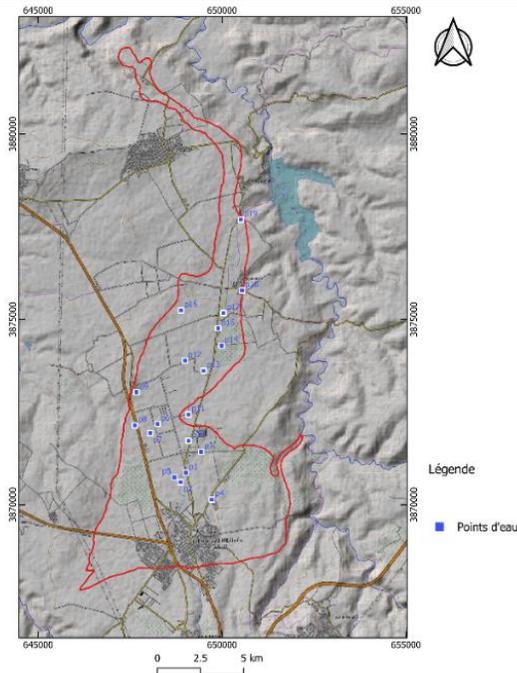


Fig. 2 – Répartition des points d'eau prélevés.

A travers les résultats de l'analyse, une caractérisation préliminaire a été faite en comparant les valeurs et les concentrations de différents paramètres avec les normes de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) (**Tab. 1**), afin d'estimer dans un premier temps le degré de pollution des eaux souterraines à l'échelle spatiale.

Table 1 – Guide de la FAO pour l'interprétation de la qualité de l'eau d'irrigation [6].

Problèmes d'Irrigation potentiels		Unité	Aucun	Léger à modéré	Sévère
Salinité	EC	$\mu\text{S cm}^{-1}$	<70	700-3000	>3000
	TDS	mg l ⁻¹	<45	450-2000	>2000
Infiltration	SAR 0-3	EC ^{-1/2}	>70	700-2000	<200
	SAR 3-6	EC ^{-1/2}	>120	1200-3000	<300
	SAR 6-12	EC ^{-1/2}	>190	1900-5000	<500
	SAR 12-20	EC ^{-1/2}	>290	2900-13000	<1300
	SAR 20-40	EC ^{-1/2}	>500	5000-29000	<29000
Toxicité ionique spécifique	Sodium	SAI	<3	3-9	>9
	Chlorure	mg l ⁻¹	<14	140-350	>350
Effets divers	Nitrate	mg l ⁻¹	<5	5-30	>30
	Bicarbonate	mg l ⁻¹	<91	91.5-518	>518.5
	pH	Plage normale		6.5-8.5	

Le taux d'adsorption du sodium (SAR) est un indicateur utile pour évaluer les problèmes causés par le sodium dans l'eau d'irrigation, il est calculé par la relation suivante :

$$SAR = \frac{Na +}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$$

2.3. Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IWQI)

Les exigences en matière de qualité des eaux souterraines peuvent varier d'un champ à l'autre en fonction du caractère agricole ainsi que des conditions pédoclimatiques régionales. Cependant, l'Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IWQI) est largement utilisé pour déterminer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation [7]. Cet indice est calculé à l'aide de l'équation (1) [2-8] sur la base d'un ensemble de facteurs physico-chimiques qui influents de manière significative la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation.

$$IWQI = \sum_{i=1}^n qiwi \tag{1}$$

Le facteur (qi) représente l'effet de chaque paramètre, il est calculé sur la base des limites des paramètres indiquées dans le tableau 2 par l'équation (2) [2-8].

$$qi = (qi)max - \left[(xij - xinf) \times \frac{(qi)amp}{x amp} \right] \tag{2}$$

Où : (qi) max est la valeur maximale de (qi) pour la classe, (xij) est la valeur observée pour le paramètre, ($xinf$) est la valeur correspondant à la limite inférieur de la classe à laquelle appartient le paramètre, (qi amp) est l'amplitude de la classe, ($x amp$) est l'amplitude de la classe à laquelle appartient le paramètre.

Table 2 – Valeurs limites des paramètres pour le calcul de la mesure de la qualité (qi) [2-8-9]..

qi	EC ($\mu S\ cm^{-1}$)	SAR ($meq\ L^{-1}$) ^c	Na ⁺	Cl ⁻ ($meq\ L^{-1}$)	HCO ₃ ⁻
85-10	200 ≤ EC < 750	SAR < 3	2 ≤ Na < 3	Cl < 4	1 ≤ HCO ₃ < 1.5
60-8	750 ≤ EC < 1500	3 ≤ SAR < 6	3 ≤ Na < 6	4 ≤ Cl < 7	1.5 ≤ HCO ₃ < 4.5
35-6	1500 ≤ EC < 3000	6 ≤ SAR < 12	6 ≤ Na < 9	7 ≤ Cl < 10	4.5 ≤ HCO ₃ < 8.5
0-3	EC < 200 ou EC ≥ 300	SAR ≥ 12	Na < 2 ou Na ≥ 9	Cl ≥ 10	HCO ₃ < 1 ou HCO ₃ ≥ 8.5

Le coefficient (wi) est défini comme la pondération du paramètre dans l'effet, le tableau 3 représente la pondération de chaque paramètre de l'IWQI.

Table 3 – Pondération des paramètres de l'IWQI [9].

Paramètres	Coefficient wi
EC	0.211
SAR	0.204
Na ⁺	0.202
Cl ⁻	0.194
HCO ₃ ⁻	0.189
Total	1

L'IWQI est un paramètre sans dimension allant de 0 à 100 qi , divisé en 5 classes de qualité de l'eau. La classification est basée sur le risque de salinité pour les sols, ainsi que sur la toxicité pour les plantes.

Le tableau 4 montre la classification des restrictions sur les catégories d'utilisation de l'eau pour l'irrigation.

Table 4 – Caractéristiques de PIWQI [9].

IWC	Restrictions relatives à l'utilisation de l'eau	Recommandations	
		Plante	Sol
85-10	Aucune restriction	Pas de risque de toxicité pour la plupart des plantes	Peut être utilisé pour la majorité des sols présentant une faible probabilité de problèmes de salinité et de sodicité, recommandant le lessivage dans le cadre des pratiques d'irrigation, à l'exception des sols suivants pour lesquels la faible perméabilité.
70-8	Faible restriction	Éviter les plantes sensibles au sel	Recommandé pour les sols irrigués à texture légère ou à perméabilité modérée, le lessivage des sels étant recommandé. La sodicité du sol peut se produire dans les sols à texture lourde. Il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols à forte teneur en argile.
55-7	Modérée restriction	Les plantes présentant une tolérance modérée au sel peuvent être cultivées	Peut être utilisé dans des sols avec des valeurs de perméabilité modérées à élevées, étant donné que l'irrigation suggère un lessivage modéré des sels.
40-5	Haute restriction	Doit être utilisé avec des plantes présentant une tolérance moyenne aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité, à l'exception de l'eau contenant de faibles valeurs de Na^+ , Cl^- et HCO_3^-	Peut être utilisé dans les sols à haute perméabilité sans couches compactes. Il convient d'adopter un calendrier d'irrigation à haute fréquence pour les eaux dont la CEC est supérieure à 2000 uS cm^{-1} et le SAR supérieur à 7 .
0-4	Restriction sévère	Seules les plantes à faible tolérance au sel, à l'exception des eaux présentant des valeurs extrêmement faibles de Cl^- et HCO_3^-	Il faut éviter de l'utiliser pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas particuliers, il peut être utilisé occasionnellement. Les eaux à faible teneur en sel et à haute teneur en sel, les sols doivent être très perméables et l'irrigation d'eau doit être appliquée à la terre pour éviter l'accumulation de sel.

2.4. Apport des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Le SIG fournit, dans ce type d'application, une cartographie de la répartition spatiale des éléments physico-chimiques et l'indice de la qualité des eaux pour l'irrigation. Dans cette étude, une carte d'IWQI a été produite à l'aide du logiciel QGIS (version 3.30.2) en superposant des cartes thématiques de différents facteurs (EC, SAR, Na^+ , Cl^- , HCO_3^-) d'influence. Ces derniers sont créés sur la base d'une analyse géostatistique, qui consiste à effectuer la méthode d'interpolation par pondération de la distance inverse (IDW).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques hydrochimiques générales

Table 5, présentant les valeurs de l'analyse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées de la plaine d'Hennaya, telles que les valeurs maximales, les valeurs minimales, les moyennes, les écart-types et les coefficients de variation.

Table 5 – Analyse statistique des paramètres hydrochimiques des échantillons.

Paramètre:	max	min	Moyenne	Ecart-typ	Coefficient de variat
pH	7.62	7.17	7.27	0.11	2%
TDS	1271.4	1060.02	1146.11	45.30	4%
CE	1630	1359	1469.37	58.08	4%
Na ⁺	150.2	120.15	138.37	8.01	6%
Ca ²⁺	247.25	120.23	147.97	24.85	17%
Mg ²⁺	98.45	52.6	74.95	12.70	17%
Cl ⁻	545.6	185.47	301.44	86.37	29%
SO ₄ ²⁻	178.77	84.57	125.45	27.22	22%
HCO ₃ ⁻	512.2	360.5	424.17	45.00	11%
NO ₃ ⁻	217.26	97.99	144.39	33.81	23%
SAR	3.62	2.78	3.28	0.24	7%

Remarque : les unités de tous les paramètres sont en mg L⁻¹, sauf la CE est en (µS cm⁻¹), le SAR est en (meq L⁻¹)^{0.5} et le pH (sans unité).

Généralement, la région d'étude connaît des valeurs moyennes de facteurs de salinité par rapport aux recommandations de la FAO, mais elle souffre de problèmes liés à la toxicité ionique spécifique, car les échantillons connaissent des concentrations moyennes à élevées de chlorure, alors que les concentrations de nitrates à tous les points de prélèvement dépassent largement les normes de qualité d'irrigation. Les valeurs de SAR comprises entre 2.78 et 3.62 indiquent une teneur de sodium faible à moyenne.

De ce fait, on peut dire que la zone est affectée principalement par un excès de nitrates ions, ce que peut indiquer que la pollution est probablement due aux activités anthropogéniques, y compris les pratiques agricoles à travers l'utilisation excessive des produits agrochimiques ainsi que les rejets de eaux usées.

En outre, il est évident que les éléments des chlorures et des nitrates présentent un coefficient de variation supérieur à 20%, indiquant une variabilité spatiale et une hétérogénéité significative dans leur répartition. Cette distribution confirme l'hypothèse que la contamination est d'origine humaine.

3.2. Evaluation de la qualité de l'eau sur la base de l'Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IWQI)

Grâce aux résultats de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation pour la plaine d'Hennaya présentés dans le tableau 6 et la figure 3, et sur la base des recommandations du tableau 4, il est démontré que ces ressources en eaux souterraines soient de qualité moyenne à des fins d'irrigation et ne conviennent qu'à l'irrigation des cultures présentant une tolérance modérée aux sels, et aux sols de perméabilité moyenne.

Table 6 – Valeurs IWQI calculés dans les points d'eau analysés.

Points d'eau	IWQI	Point d'ea	IWQI	Point d'ea	IWQI
P1	69.04	P8	63.92	P14	64.30
P2	68.68	P9	67.48	P15	64.36
P3	67.47	P10	67.04	P16	56.85
P4	64.65	P11	59.38	P17	60.76
P5	65.17	P12	61.56	P18	65.14
P6	64.69	P13	67.72	P19	61.90
P7	66.08				

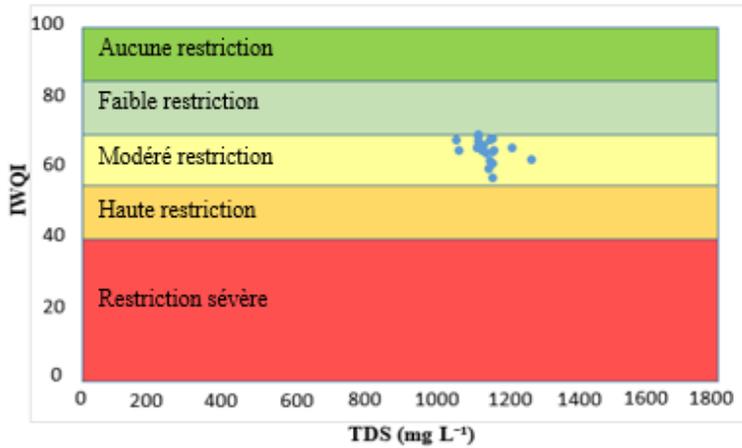


Fig. 3 – Diagramme de dispersion de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) en fonction de TDS.

3.3. Analyse des sources d'ions

Le diagramme de Gibbs est un outil utile pour déterminer la corrélation entre la lithologie de l'aquifère et les compositions minéralogiques de l'eau souterraine [2]. Dans la zone d'étude, ce diagramme (Fig. 4) suggère que l'interaction qui contribue à la formation de la chimie des eaux souterraines médiate la dominance des roches et la dominance de l'eau salée, ce qui peut expliquer par les fortes valeurs de la conductivité électrique (CE).

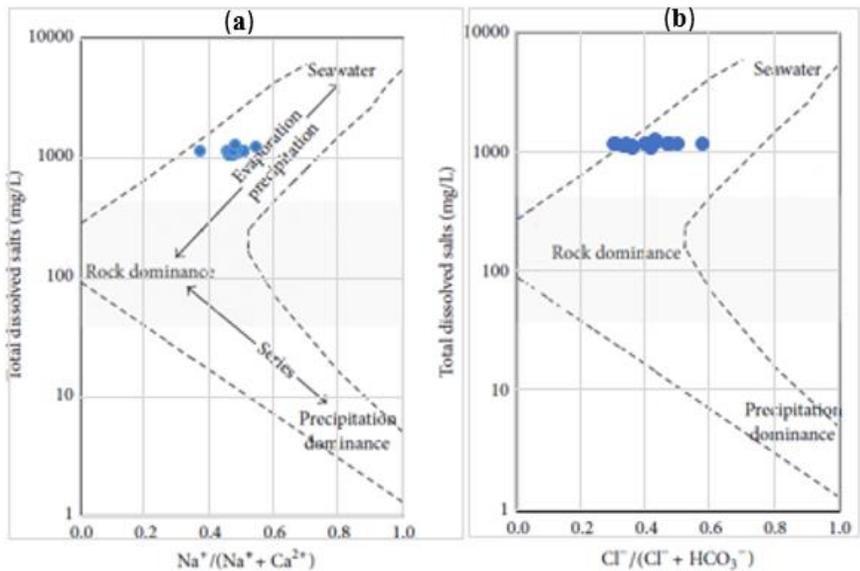


Fig. 4 – Processus hydrogéochimique basée sur le diagramme de Gibbs pour (a) les cations et (b) les anions.

3.4. Cartographie de la qualité des eaux souterraines

Les figures ci-dessous (fig 5, 6, 7 et 8) montrent la répartition spatiale des différents facteurs physico-chimiques, ainsi que l'indice de pollution (IWQI), il est évident que les valeurs maximales sont concentrées au milieu de la plaine, qui est la zone agricole plus intensive. Ces cartes contribuent à savoir que la source des polluants des eaux souterraines est les activités agricoles de la région, où les décideurs doivent sensibiliser et éduquer les agriculteurs sur les dangers de l'utilisation aveugle des engrais et des pesticides pour limiter l'aggravation de la pollution à l'avenir.

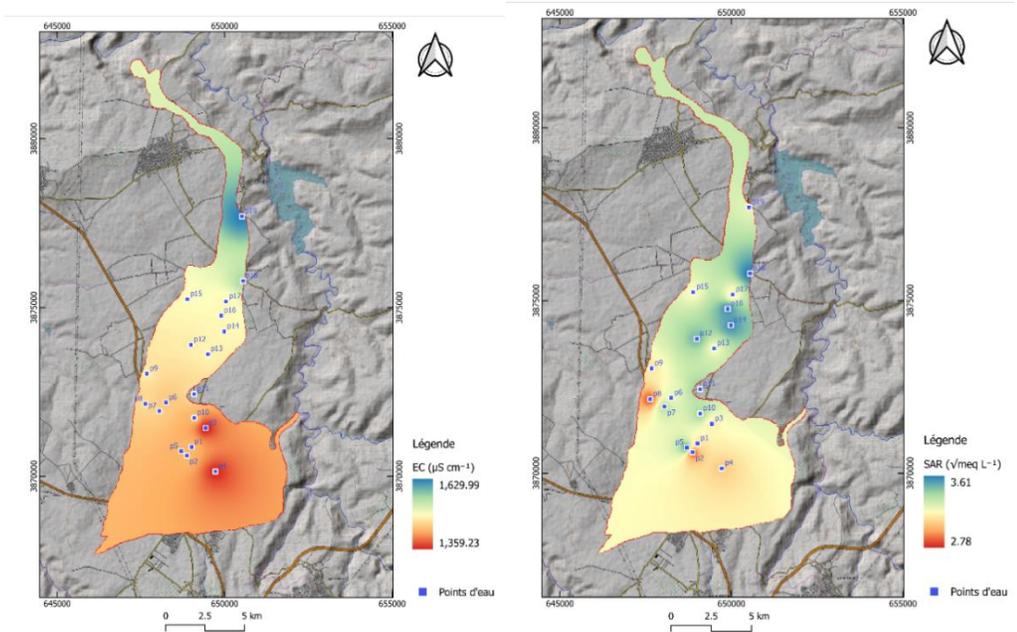


Fig. 5 – Répartition spatiale de EC et SAR.

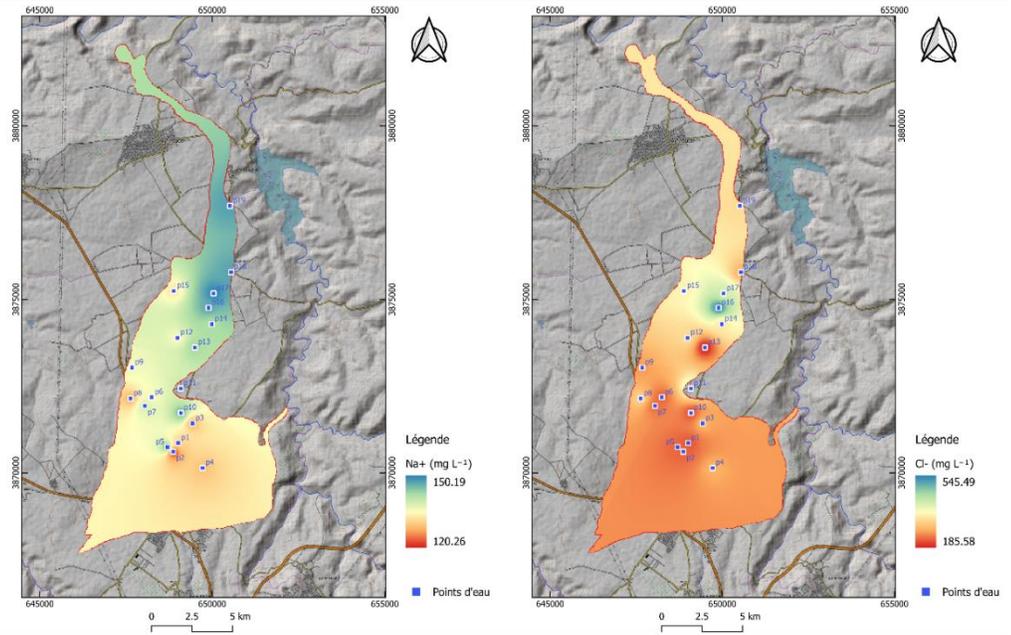


Fig. 6 – Répartition spatiale de Na^+ et Cl^- .

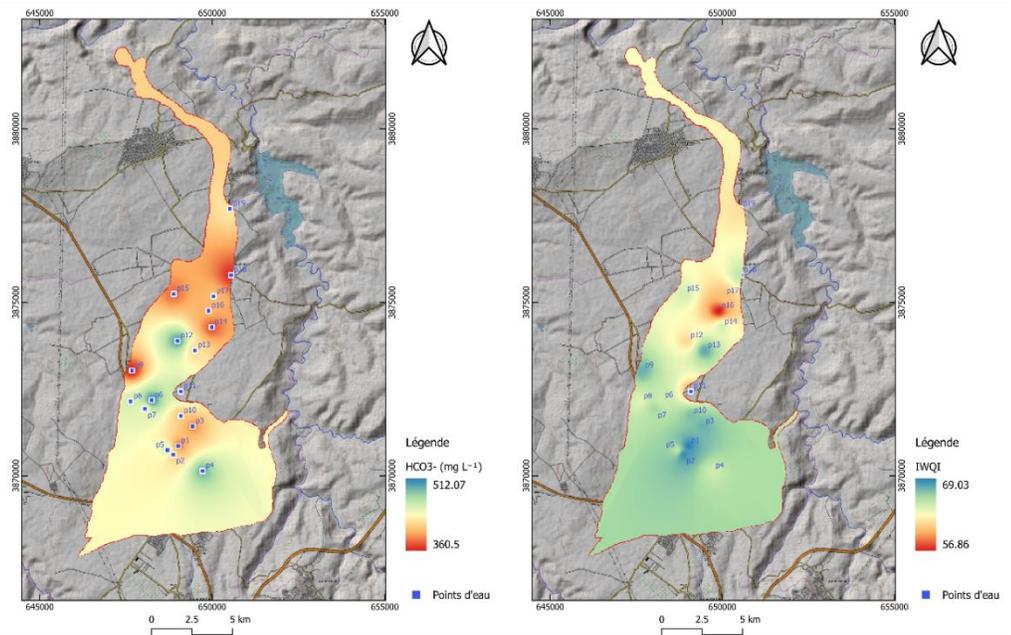


Fig. 7 – Répartition spatiale de HCO_3^- et IWQI.

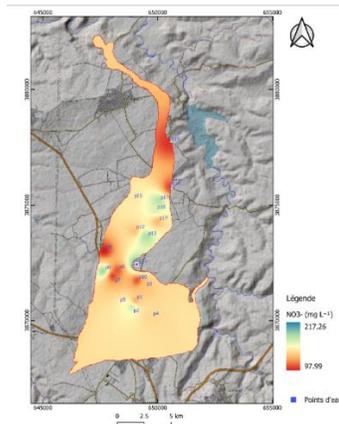


Fig. 8 – Répartition spatiale de NO₃⁻.

4. CONCLUSION

Dans la présente étude nous avons été amenés à réaliser une évaluation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation dans la plaine d'Hennaya par l'utilisation de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI), le diagramme de Gibbs et le système d'information géographique (SIG).

L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) a été développé afin d'évaluer les ressources en eaux souterraines pour leur adéquation à l'irrigation. Par ailleurs, une analyse hydrogéochimique a été effectuée à l'aide de diagramme de Gibbs pour déterminer la source des ions dans les eaux souterraines.

Les cartes obtenues par le SIG ont permis de déterminer la répartition spatiale des zones les plus exposées à la pollution.

Cette étude, nous a permis de mettre en évidence les faits suivants :

- l'IWQI montre une qualité moyenne des eaux souterraines est moyenne, adaptée à l'irrigation des plantes à moyenne tolérance au sel et des sols de perméabilité moyenne ;

- la source des ions des eaux souterraines dans la région est l'échange d'ions avec les roches et l'interaction d'évaporation ;

- les plus grandes valeurs de pollution de l'eau souterraine sont concentrées au milieu de la plaine où s'exerce une intense activité agricole, ce qui confirme que la principale source de pollution est l'utilisation irrégulière des agrochimiques.

Enfin, en guise de recommandations, les décideurs devraient agir rapidement avant que la situation ne s'aggrave, en mettant en place des stations de traitement de l'eau et en sensibilisant les agriculteurs aux dangers de l'utilisation excessive des agrochimiques.

Références

- [1] Abbasnia, N. Yousefi, A. H. Mahvi, R. Nabizadeh, M. Radfard, M. Yousefi, M. Alimohammadi, Evaluation of Groundwater Quality Using Water Quality Index and Its Suitability for Assessing Water for Drinking and Irrigation Purposes: Case Study of Sistan and Baluchistan Province (Iran), *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.*, 25 (2018), 988-1005.
- [2] Y. Wang, R. Li, X. Wu, Y. Yan, C. Wei, M. Luo, Y. Xiao, Y. Zhang, Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes Using GIS-Based IWQI, EWQI and HHR Model, *Water*, 15 (2023), 2233. <https://doi.org/10.3390/w15122233>
- [3] M. k. Rasul, H. H. Waqed, Evaluation of Irrigation water quality index (IWQI) For Al-Dammam confined aquifer in the west and southwest of Karbala city, Iraq, *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 2 (2013), 21-34.
- [4] A. Bemoussat, M. adjim, F. Bensaoula, Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines dans la plaine d'Hennaya (Nord-ouest Algérie) : Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE Ouargla, (2013) 367-370.
- [5] N. Bentekhici, S. A. Bella, Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par l'application de la méthode DRASTIC et les SIG, cas de la plaine alluviale d'Hennaya (wilaya de Tlemcen, Nord-ouest Algérien). *Environmental and Water Sciences, Public Health and Territorial Intelligence Journal*, 2 (2018), 38-45.
- [6] R. S. Ayers, D. W. Westcot Water quality for agriculture, FAO irrigation and drainage. Food and Agriculture Organization, Rome 1985.
- [7] I. S. Babiker, M. M. A. Mohamed, T. Hiyama, Assessing groundwater quality using GIS, *Water Resources Management*, 21 (2007) 699-715.
- [8] M. E. Osta, M. Masoud, A. Alqarawy, S. Elsayed, M. Gad, Groundwater Suitability for Drinking and Irrigation Using Water Quality Indices and Multivariate Modeling in Makkah Al-Mukarramah Province, Saudi Arabia, *Water*, 14 (2022), 483. <https://doi.org/10.3390/w14030483>
- [9] Meireles, E. M. Andrade, L. Chaves, H. Frischkorn, L. A. Crisostomo, A new proposal of the classification of irrigation water, *Revista Ciência Agronômica*, 41 (2010), 349-357.

Les eaux embouteillées et leurs incidences sur la santé humaine : cas des eaux Algériennes

Larbi Dajbri¹, Hamza Bouguerra¹, Azzedine Hani¹, Nabil Bougherira¹, Hicham Chaffai¹, Linda Achou², Assia Kellil³

¹Laboratoire Ressource en Eau & Développement Durable Université Badji Mokhtar Annaba.

²Laboratoire de Physique des Matériaux, Département de Matériaux et Composants, Faculté de physique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene-USTHB, Alger, Algeria

³- Service des eaux de la wilaya d'Annaba.

Résumé

Cette étude a pour but la caractérisation physico-chimique et la classification d'eaux embouteillées de l'Algérie, par la comparaison des analyses recueillis des étiquetages, la classification par la méthode de Stuyfzand, l'analyse de la matrice de corrélation, la classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Les résultats de ces différentes investigations empiriques, graphiques et statistiques multivariées ont permis de caractériser les eaux embouteillées de l'Algérie à savoir eaux de sources et minérales, et de contribuer à l'établissement de la classification de ces différentes eaux embouteillées.

L'utilisation des techniques multivariées en combinaison avec les techniques empiriques et graphiques a permis de classer les eaux embouteillées de l'Algérie en deux groupes homogènes. Les eaux du premier groupe sont très minéralisées, alors que les eaux du deuxième groupe sont moins minéralisées

Mots clés : Eau embouteillée, maladie, Algérie, facteurs anthropiques, analyses statistiques.

Bottled water and its impact on human health: the case of Algerian water

Abstract

This study has aimed the physicochemical characterization and classification of Algerian waters bottled, by comparing the analyses collected of the labeling, the classification by the method of Stuyfzand, the matrix of correlation analysis, hierarchical Ascendante Classification (CHA) and principal components analysis (ACP).

The results of these different empirical, graphic and statistical investigations Multivariable helped characterize the waters bottled from the Algeria namely water sources and mineral, and contribute to the establishment of the classification of these various bottled waters.

The use of multivariate techniques in combination with empirical and graphic techniques allowed classifying water bottled in Algeria in two homogeneous groups. The waters of the first group are much mineralized, while waters in the second group are less mineralized.

Key Words: Bottled water, disease, Algeria, anthropogenic factors, climatic factors, Statistical analysis.

¹ Corresponding author: djabri_larbi@yahoo.fr

1-INTRODUCTION

L'eau minérale naturelle est une ressource renouvelable dont la pérennité nécessite une gestion rigoureuse. Les minéraliers respectent leurs sources, ils sont attentifs à préserver la qualité et la pureté de l'eau, et à protéger l'équilibre des écosystèmes locaux. Ce soin est d'autant plus important que l'eau minérale naturelle est un produit du " terroir " qui fait partie de l'identité territoriale et s'inscrit dans l'histoire de la région depuis parfois plusieurs centaines d'années. Le cycle de l'eau est respecté, la mesure des paramètres hydrodynamiques du gisement (niveau piézométrique, débits) permet de surveiller l'évolution du gisement et d'adapter la production aux fluctuations naturelles du cycle hydrologique. L'exploitation d'une source minérale naturelle se fait dans le respect de la nature. Il n'est pas prélevé plus que ce qu'est capable de fournir le système hydrominéral. La quasi-totalité des eaux minérales a une origine météorique suite à l'infiltration des eaux de pluie

Situation géographique des eaux embouteillées en Algérie :

La figure suivante (N°1), montre l'emplacement des eaux embouteillées à travers le pays. La grande partie est située dans la zone Seybouse-Mellgue avec 36% de site (in 1).

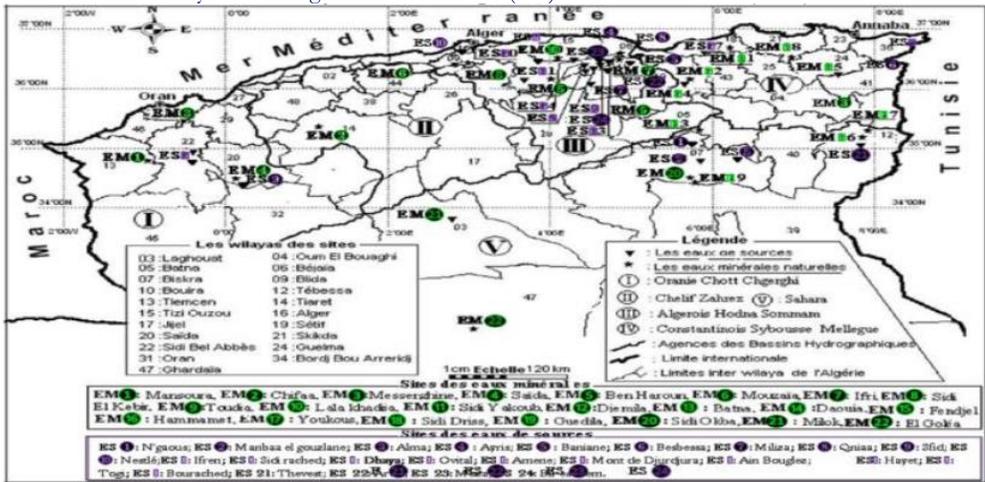


Fig.1 : Emplacement des eaux embouteillées.

2-MATERIELS ET METHODES :

Pour réaliser notre travail, nous avons pris en considération la composition chimique des eaux figurant sur les étiquettes des bouteilles après calcul du bilan ionique de chaque eau que nous avons considéré comme bon car de l'ordre de 6%, nous avons choisis deux méthodes pour le traitement des données récoltées. Ainsi une avons réalisé une ACP et une classification hiérarchique en utilisant des logiciel (statistica). La seconde méthode est appelée de Stuyfzand, qui utilise les paramètres suivants (2):

* Les types principaux: la détermination du type principal est basée sur la concentration des chlorures.

*La dureté totale (T.H) est la somme du Ca et du Mg. Elle est exprimée en degré français selon la formule suivante: $TH = 5 (Ca + Mg)$ avec Ca et Mg (en meq/l).

*Le faciès chimique: Code d'échange de cations: la somme des cations Na, K et Mg (meq/l) est corrigée par rapport à la contribution de l'eau de mer dont le rapport est :

$$\frac{Na + K Mg}{Cl} = 1.061$$

(Na+K+Mg)c = (Na+K+Mg)m - (1.061.Cl) avec c=corrigé et m=mesuré.

On suppose ici que tous les ions Cl proviennent de la mer; la valeur de la somme corrigée et comparée à la quantité $(0.5 * Cl)^{1/2}$ qui est une marge d'erreur.

Le symbole « - » indique l'infiltration d'eau salée dans un environnement d'eau douce.

Le symbole « + » indique l'infiltration d'eau douce dans un environnement marin.

Le symbole « 0 » indique l'absence d'échange de cations.

3.2 Classification des eaux embouteillées en utilisant la méthode STUYFZAND (1986) :

* Les types principaux :

La détermination du type principal est basée sur la concentration des chlorures. Nous remarquons que seules deux eaux (Djemila et Benharoun) présentent des concentrations importantes en chlorures (1)

*La dureté totale (T.H) :

Tableau (1) : Différentes classes de la dureté :

Type de dureté	CODE	TH (°F)	Eaux considérées :
Très douce	*	< 5	Mont de Djurdgura, Mouzaia, Daouia, Sidi El Kebir, Moza, Sidi Driss
Douce	0	5-10	El Goléa
Dure modérée	1	10-20	Ayris, Besbassa, Lala Khedidja, Milok
Très dure	2	20-40	Manbaa El Gouzlen, Ifri, Alma Batna, Djemila, Fenjel, Guedila Miliza, Messerghine, Qniaa Youkous, Toudja, Sfid, Nestlé Ifren, Sidi Rached, Dhaya, Ovital, Ain Bouglez, Togi, Benharoun, Fezguia Hammamet, Sidi Okba, Thevest, Sidi Yakoub, Arwa, Chiffa
Extrêmement dure	3	40-80	Saida, Baniane, Amene, Hayet, Mansora

L'observation du tableau précédent, montre que les eaux considérées se répartissent en cinq (05) classes, allant de très douce jusqu'à extrêmement dure. La majorité des eaux appartiennent à la classe très dure. Les eaux extrêmement dures sont les plus riches en calcium et magnésium.

*Le faciès chimique : la somme des cations Na, K et Mg (meq/l) est corrigée par rapport à la contribution de l'eau de mer dont le rapport est :

Il nous permet d'avoir un aperçu sur le type d'eau présent.

* Le faciès chimique: Code d'échange de cations: la somme des cations Na, K et Mg (meq/l) est corrigée par rapport à la contribution de l'eau de mer dont le rapport est :

$$Cl = \frac{Na + K + Mg}{Cl} = 1.061$$

$$(Na + K + Mg)_c = (Na + K + Mg)_m - (1.061 \cdot Cl)$$

Avec :

- c = corrigé et m = mesuré.

On suppose ici que tous les ions Cl proviennent de la mer; la valeur de la somme corrigée et comparée à la quantité $(0.5 \cdot Cl)^{1/2}$ qui est une marge d'erreur.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau N°2 suivant :

Tableau N°2 : Détermination du code d'échanges de cations.

Condition	Symbole	Signification	Eau considérées
$(Na + K + Mg)_c < -(0.5 \cdot Cl)^{1/2}$	« - »	Déficit	Aucune eau
$-(0.5 \cdot Cl)^{1/2} < (Na + K + Mg)_c < (0.5 \cdot Cl)^{1/2}$	« 0 »	Equilibre	Ifri, Besbassa, Djemila, Sidi Rached, Sidi Driss
$(Na + K + Mg)_c > (0.5 \cdot Cl)^{1/2}$	« + »	Excès	N'gaous, Manbaa El Gouzlen, Saida, Alma, Ayris, Baniane, Batna, Fenjel, Guedila, Lala Khedidja, Miliza, Messerghine, Qniaa, Youkous, Toudja, Sfid, Nestlé, Ifren, Dhaya, Ovital, Amene, Mont de Djurdgura, Ain Bouglez, Hayet, Togi, El Goléa, Benharoun, Bourached, Fezguia Hammamet, Milok, Mouzaia, Sidi Okba, Thevest, Sidi Yakoub, Arwa, Mansora, Chiffa, Daouia, Sidi El Kebir, Moza, Bir Essalem

L'observation du précédent tableau, montre que les eaux se concentrent au niveau de deux familles:

-la première, caractérisée par un symbole nul, mettant en évidence l'absence d'échanges de cations.

-la seconde, caractérisée par une valeur du symbole positive, montrant un excès de chlorures, c'est le cas de la majeure partie des eaux considérées. Le faciès chimique, la majorité des eaux embouteillées présentent un excès de chlorure, les autres eaux (Ifri, Besbassa, Djemila, Sidi rached, Sidi driss) montrent l'absence d'échange de cation.

4. Effets thérapeutiques des eaux embouteillées Algériennes :

L'eau dénommée Benharoun, présente un résidu sec important et se détache des autres eaux (fig.3), présente une forte minéralisation et de ce fait, elle ne convient pas aux personnes souffrantes d'hyper tension. Le reste des eaux est moins minéralisé mais doivent être prises avec précaution.

Les eaux suivantes (N'gaous, Manbaa El Gouzlen, Saida, Alma, Ayris, Baniane, Batna, Fenjel, Guedila, Lala Khedidja, Miliza, Messerghine, Qniaa, Youkous, Toudja, Sfid, Nestlé, Ifren, Dhaya, Ovital, Amene, Mont de Djurdgura, Ain Bouglez, Hayet, Togi, El Goléa, Benharoun, Bourached, Fezguia Hammamet, Milok, Mouzaia, Sidi Okba, Thevest, Sidi Yakoub, Arwa, Mansora, Chiffa, Daouia, Sidi El Kebir, Moza, Bir Essalem), sont riches en sodium et doivent être consommées par des personnes non hyper-tendues.

Les eaux (Ifri, Besbassa, Djemila, Sidi Rached, Sidi Driss), ne présentent aucun danger vis à vis de l'hyper tension.

CONCLUSION :

La présente étude a été réalisée avec l'objectif de mettre en évidence les éventuels dangers que peuvent présenter les eaux embouteillées sur la santé humaine. Dans un premier stade, nous avons identifié les eaux selon leur emplacement géographique et on a déduit que la plus grande partie de ces eaux se localise au Nord du pays et particulièrement à l'Est où on retrouve 36% des marques. L'étude de la qualité des eaux embouteillées, nous a permis de conclure selon les différentes méthodes les résultats qui suit :

-La minéralisation est très influencée par les Bicarbonates et le sodium à l'exception du Mg et K selon l'ACP.
-L'eau Benharoun, se classe dans la première classe, cette dernière est caractérisée par les eaux fortement minéralisées (TDS=3869mg/l).

-La méthode STUYFZAND, montre que Djemila (170 mg/l) c'est une eau douce saumâtre, Benharoun (400 mg/l) eau saumâtre, de ce fait elles ne peuvent être consommées par les individus hyper-tendus

Références

1. Stuyfzand P.J. (1986). A new hydrochemical classification of water types, Regional Characterization of Water Quality, Proceedings of the Baltimore Symposium, IAHS, Publ. N° 182
2. Sekiou Fateh a Kellil A (2014) : Caractérisation et classification empirique graphique et statistique multivariable d'eaux de source embouteillées de l'Algérie. LARHYSS Journal. Volume 11, N°4, pages 225-246.
3. Hazzab A. (2011) Eaux minérales naturelles et eaux de source en Algérie, C. R., Géoscience, 343, 20-31
4. L. Djabri, A. Hani, R. Laouar, T. Serradj, I. Guasmi & C. Lamouroux (2005) : Qualité des eaux des oueds et des nappes de l'Est Algérien : cas des wilayas d'Annaba, Skikda, El-Tarf, Souk-Ahras et Tébessa. *EWRA 2005*, Menton, France, Septembre 2005.
5. Kellil A (2017) : Caractéristiques physico-chimique des eaux embouteillées en Algérie-Master 2 Hydrogéologie. UBMA. 79P

Energy and Exergy Analysis of the Solar Membrane Distillation System for Seawater Desalination

Rabah Menasri¹, Mibarki Nawel², Zakaria Triki³, Yahia Menasri⁴

^{1,2,3} Laboratory of Biomaterial and Transport Phenomena, University of Médéa, Médéa, Algeria

⁴ Laboratory of Industry, organizational Evolution of Enterprises and Innovation, University of kbmis miliana, Algeria

Abstract

Electricity–water cogeneration power plants are an important tool for advancing sustainable water treatment technologies because they provide a cost-effective and environmentally friendly solution for meeting the energy and water needs of communities. By integrating power and water production, these technologies can reduce carbon emissions and help mitigate the impact of climate change. This work deals with the energy and exergy analysis of a cogeneration plant for electrical power generation and water desalination using real operational data. The power side is a solar energy installation (flat plate collector and Photovoltaic panel), while the desalination side the system of air gap membrane distillation (AGMD). A mathematical model was implemented in MATLAB software and validated through a comparison with previously published research. The exergy analysis was carried out based on the second law of thermodynamics to evaluate the irreversibility of the plant and the subsystems. In this study, the components of the sub-systems were analyzed separately to identify and quantify the component that has a high loss of energy and exergy, and moreover, a parametric study was conducted. According to the energy and exergy analyses, the highest source of irreversibility occurs in the flat plate collector with 50% of the total exergy destruction. However, PV, AGMD, and condensers also contribute to energy loss. Further, the thermodynamic efficiency of the cogeneration plant was obtained as 51.38%, which is more effective than other systems. The obtained results from this study can be employed as a guide to reduce exergy destruction in the whole solar AGMD desalination system

Key Words: Solar desalination, Desalination, AGMD, Plant solar collector, Photovoltaic panel, Exergy

Analyse énergétique et exergetique du système de distillation à membrane solaire pour le dessalement de l'eau de mer

Résumé

Les centrales électriques de cogénération électricité-eau sont un outil important pour faire progresser les technologies durables de traitement de l'eau, car elles offrent une solution rentable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins en énergie et en eau des communautés. En intégrant la production d'électricité et d'eau, ces technologies peuvent réduire les émissions de carbone et contribuer à atténuer l'impact du changement climatique. Ce travail porte sur l'analyse énergétique et exergetique d'une centrale de cogénération pour la production d'électricité et le dessalement de l'eau à l'aide de données opérationnelles réelles. Le côté alimentation est une installation d'énergie solaire (capteur plan et panneau photovoltaïque), tandis que le côté dessalement est constitué d'un système de distillation par membrane à entrefer (AGMD). Un modèle mathématique a été implémenté dans le logiciel MATLAB et validé par une comparaison avec des recherches précédemment publiées. L'analyse exergetique a été réalisée sur la base de la deuxième loi de la thermodynamique pour évaluer l'irréversibilité de l'installation et des sous-systèmes. Dans cette étude, les composants des sous-systèmes ont été analysés séparément pour identifier et quantifier le composant qui présente une perte d'énergie et d'exergie élevée, et de plus, une étude paramétrique a été menée. D'après les analyses énergétiques et exergetiques, la source d'irréversibilité la plus élevée se produit dans le collecteur plan avec 50 % de la destruction totale de l'exergie. Cependant, le photovoltaïque, l'AGMD et les condenseurs contribuent également à la perte d'énergie. De plus, le rendement thermodynamique de la centrale de cogénération a été obtenu à 51,38 %, ce qui est plus efficace que les autres systèmes. Les résultats obtenus de cette étude peuvent être utilisés comme guide pour réduire la destruction exergetique dans l'ensemble du système de dessalement solaire AGMD.

Mots clés : Dessalement solaire, Dessalement, AGMD, Capteur solaire végétal, Panneau photovoltaïque, Exergy.

¹ Corresponding author: menasri.rabah@univ-medea.dz

INTRODUCTION

Exergy refers to the amount of energy that is available for use within a system from a thermodynamic perspective. It represents the useful and usable portion of energy. The exergy analysis takes into consideration the quality and quantity of the energy exchange processes with the environment. This analysis helps to uncover the underlying reasons for any energy system malfunctions. Energy analysis is based on the first law of thermodynamics and is only concerned with energy conversion. It does not show how and where irreversibility or losses occur in the system. Exergy analysis goes beyond this by pointing to the association of extreme irreversibility or destruction with processes and helps identify pathways to sustainability. Unlike energy, external energy is destroyed and can only be conserved when all processes that occur in the system and its surrounding environment are reversible. Therefore, exergy is a useful tool for determining the location, type, and true magnitude of energy loss, which manifests as waste energy destruction or emission [1–2].

Table1 summarizes the values of the exergy efficiencies obtained in the most common desalination technologies. To confirm the choice of AGMD, a comparison of desalinated water production costs is presented. The energy consumption and final water production cost of desalination systems depend on the nature of the processes, the type of energy used and their drinking water production capacity. The specific energy consumption by RO is between 2 and 3 kWh.m⁻³ [3], while that of MED varies from 5 to 10.33 kWh.m⁻³ and 14.56 kWh.m⁻³ for the MSF [4]. The energy consumption and water cost of DM systems vary respectively from 1 to 9000 kWh.m⁻³ and from 0.3 to 130 \$/m³ depending on the configurations used [5]. Guillén-Burrieza et al. [6] carried out the technical and economic analysis of a 100 m³/day project for a desalination unit based on membrane distillation technology associated with a field of solar collectors. During their in-depth economic assessment, the cost of water was estimated at between 10.6 and 12 \$.m⁻³.

Table 1. Summary of exergy efficiency for different MD configurations from the literature.

Type	Capacity (m ³ /Day)	Exergy Efficiency (%)	Reference
RO	7250	4.3	[5]
MD on RO retentate	22,344	19.1–21.9	[6]
MED-TVC	4,802,976	3.6	[7]
MD	0.31	0.3	[8]
DCMD with HR	24,000	28.3	[9]
DCMD without HR	24,000	25.6	[9]
AGMD (Xzero)	0.22–0.73	8.54–19.32	[10]
AGMD (Elixir500)	0.1–0.17	18.3–26.5	[10]

Accurately assessing the performance of separation systems that employ solar energy and MD relies heavily on the evaluation of exergy. The major goal of this research is to undertake a thermodynamic analysis of a desalination system using solar energy and AGMD, with an emphasis on performance parameters. The solar AGMD desalination system was modeled using MATLAB software 2013b, and a series of mathematical calculations were carried out based on previously described design parameters to assess the system's performance under varying operating conditions. The proposed system consists of an AGMD desalination unit and a solar thermal collector, and the analysis of the system is performed by examining variations in energy efficiency and exergy efficiency.

System description

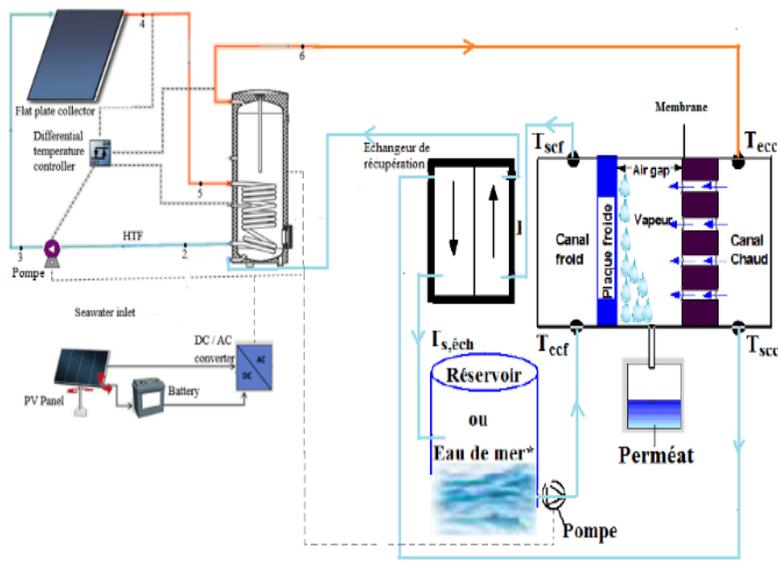


Figure 1. Schematic diagram of a SFPC-AGMD system

Figure 1 is a schematic diagram showing a process aimed at producing high-quality distilled water while conserving energy. The system is made up of a solar flat plate collector paired with an AGMD unit. The brine's heat is recovered by preheating the feed solution, and the feed temperature is maintained by a pump that circulates the solution through the AGMD unit's cold and hot channels. The combination of the flat plate collector provides the system with self-sufficiency. The solar collector utilizes sunlight to extract heat, and the absorber inside the collector converts the sun's radiation into heat. This type of installation, combining these advanced technologies, can have practical applications in sectors such as the navy, emergency medical aid, or enhancing the living conditions in remote areas.

2. Mathematical modelling

2.1. Thermodynamic Analysis

A mathematical representation of the AGMD desalination system combined with solar energy has been established utilizing the principles of the first and second laws of thermodynamics. The model incorporates equations for determining the physical characteristics of seawater and brine as well as heat transfer coefficients (Table 2).

To simplify the developed model, the following assumptions and hypotheses were considered:

- The system runs at a dynamic state throughout;
- Thermal losses have been studied;
- Kinetic and potential exergies are ignored;
- An average pump efficiency of 75% is estimated;
- Dead state properties for fluids are evaluated at $T_0 = 25\text{ °C}$ and the dead state salinity $X_0 = 35\text{ g.kg}^{-1}$.

Table2.Mathematical model equations

AGMD unit		
Heat transfer		
Parameter	Equation	No
Energy conservation	$\Phi_h = \Phi_m = \Phi_{ag} = \Phi_p = \Phi_c$	(01)
Heat flux in the hot channel	$\Phi_h = hC_h(T_h - T_{hm})$	(02)
Heat flux from the surface of the membrane to the condensate	$\Phi_m = \frac{1}{R_{mT}}(T_{hm} - T_{mg}) + J_w \cdot \Delta H_v$	(03)
Heat flux through the air gap	$\Phi_{ag} = \frac{1}{R_{ag}}(T_{mg} - T_p)$	(04)
Heat flux in the boundary layer of the cold channel	$\Phi_c = h_{cc}(T_p - T_c)$	(05)
Mass transfer		
Permeate flux	$J_w = B_w(\alpha\beta P_{hm} - P_p)$	(06)
Antoine equation	$P = \exp(23,1964 - \frac{3816,44}{T-46,13})$	(07)
Permeability of the membrane	$B_w = \frac{\varepsilon M P D_{va}}{R * T_m (\delta_{mt} + \delta_{ag}) P a _{ln,a}}$	(08)
Heat exchangers		
Heat exchanged	$\Phi = F \times U \times A \times LMDT$	(09)
	$\Phi = \dot{m}_{so} * C_{pso} * A * \Delta T_{so}$	(10)
	$\Phi = \dot{m}_r \times \Delta H_r$	(11)
Solar Flat Plate Collector		
Energy gained by the absorber	$Q_r = (\alpha\tau)_{eff} IT$	(12)
Quantity of solar radiation received by the collector	$Q_i = IT \times A_c$	(13)
Energy gained by the absorber	$Q_0 = U_L A_c (T_c - T_a)$	(14)
useful energy absorbed by the collector	$Q_u = Q_r - Q_0 = (\alpha\tau)_{eff} IT A_c - U_L A_c (T_c - T_a)$	(15)
Collector heat removal factor	$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_0 - T_i)}{(\alpha\tau)_{eff} IT A_c - U_L (T_i - T_a)}$	(16)
Real useful energy gain	$Q_u = F_R A [(\alpha\tau)_{eff} IT - U_L (T_i - T_a)]$	(17)
Ratio of useable energy gain	$\eta = F_R A [(\alpha\tau)_{eff} - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{IT}]$	(18)

GOR can be mathematically represented by equation 19. For a desalination system, the Performance Ratio (PR) is defined as the ratio of distillate mass to energy input. It can be expressed by Equation 20.

$$GOR = \frac{\dot{m}_p \times \Delta h_v}{\dot{m}_{sw} \times C_{p,sw} \times (T_{h,in} - T_{h,out})} \quad (19)$$

$$PR = \frac{\dot{m}_p}{Q_h} \quad (20)$$

3.2. Exergy Analysis

There are four main parts to the overall energy rate: physical (E_{ph}), chemical (E_{ch}), kinetic (E_{ke}), and potential (E_{pe}). The general energy balance can be obtained by the following equation:

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_{ke} + \dot{E}_{pe} \quad (21)$$

The values for both physical and chemical exergy are calculated as follows:

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m} e_{ph} = \dot{m} [(h_s - h_0) - T_0 (s_s - s_0)] \quad (22)$$

$$\dot{E}_{ch,w} = \dot{m} e_{ch} = \dot{m} \sum \omega_k (\mu_k^s - \mu_{0k}^0) \quad (23)$$

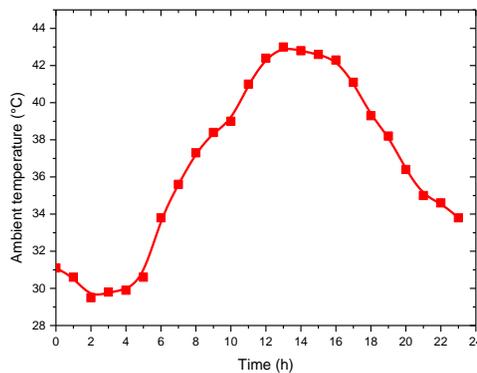
A system's exergy efficiency is the ratio between the minimum separation work and the fuel energy:

$$\eta_{ex} = \frac{W_{min}}{\dot{E}_f} \quad (24)$$

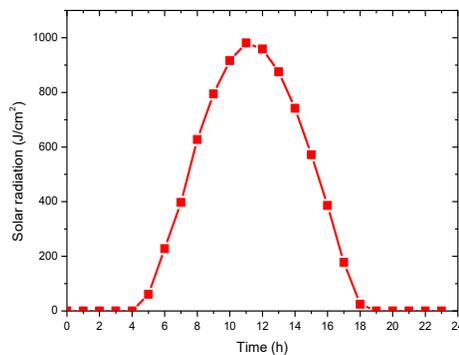
Minimum work to separate (W_{min}) is the energy of the product in the desalination process, while fuel energy (E_f) is the thermal energy provided to the system.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The solar radiation data utilized in this study were obtained with high accuracy from a radiometric station located on the roof of the applied research unit for renewable energies (URAER) building in Ghardaia. Figure 2 shows the global solar irradiation evolution with daytime for the month of July. The irradiation has a bell-shaped profile that is consistent with the prediction of well-known semi-empirical models from the literature. It is also noted that the highest temperature and solar radiation values are recorded on July 21, which is the most appropriate day to be considered in the present work.



(a)



(b)

Figure 2. Environmental conditions on 21 July (Ghardaia site).

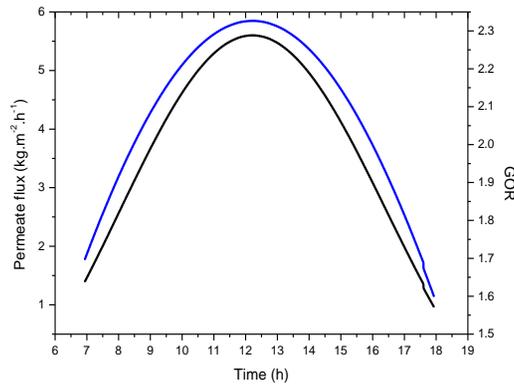


Figure3. Variation of permeate flux and GOR over the local time.

Figure 3 shows the permeate flux and GOR as a function of the local time. It can be seen that the permeate flux increases at the beginning of the day to reach about $5.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ at a feed temperature of $62 \text{ }^\circ\text{C}$ and a flow rate of $0.01 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ as the maximum value is obtained at 12:00 h. The obtained results show a good agreement with the results provided in the literature. The main performance parameters for thermal desalination system evaluation are gained output ratio (GOR). The larger GOR is, the higher the thermal energy utilized efficiency is [8]. Figure 4 shows that the PR increases as the inlet temperature of the hot fluid increases in the same way as for the GOR and reaches its maximum PR = 0.98 at around 12:00 h. A high PR means that a high flow rate of distillate is obtained for a given thermal energy input. Usually, high PR can be achieved by using well-designed system components with high energy efficiency and good insulation material.

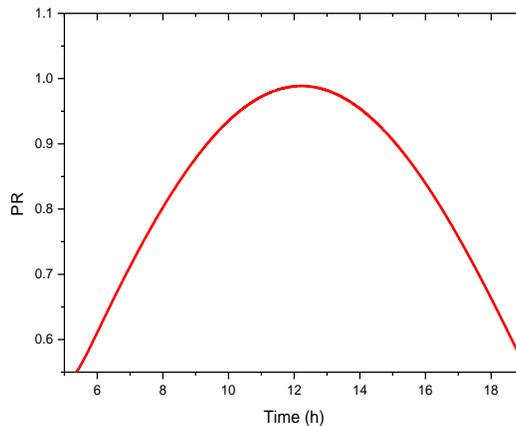


Figure 4. Variation of performance ratio over the local time.

To assess irreversibility in a system, the exergy analysis was conducted using the second law of thermodynamics. This later refers to the equivalent amount of mechanical work that can be produced from other forms of energy. The exergetic analysis was conducted using data from July 21, which corresponds to the day when the collector field received the highest solar flux density. The minimum work of separation W_{min} represents the product exergy in the desalination process. Figure 5 shows the minimum work of separation and exergy efficiency of AGMD according to local time. The maximum value of W_{min} is 0.17 kW and is recorded at 12:00 h for a feed temperature of $62 \text{ }^\circ\text{C}$ and flow rate of $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Hence, low-temperature vapor could be employed to improve

minimum work. The obtained values are comparable to those obtained by Miladi et al. [8], where it is revealed that the highest values for exergetic efficiency were recorded at 0.116%. Additionally, it is evident that the overall exergy efficiency calculated for the AGMD system has a maximum value of 56.3% at 12:00 h at a cold channel inlet temperature of 29.5 °C. However, the obtained value is similar to that reported in the literature for other AGMD, ranging between 52.1% and 55.4% for a cold channel inlet temperature $T_{c,in}$ varies from 33.8 °C to 36.2 °C and for a flow rate of 2 L.min⁻¹ [9].

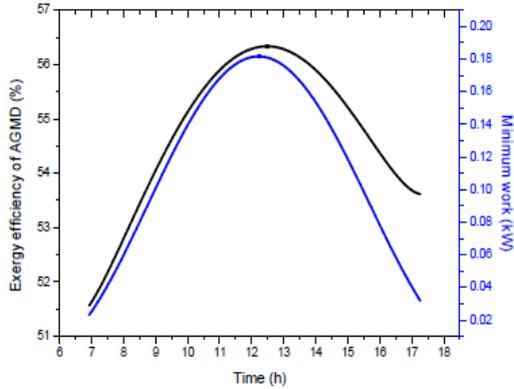


Figure 5. Variation of exergy efficiency of AGMD and the minimum separation work with time.

Figures 6 and 7 illustrate the performance curves of the solar collectors that were tested during the study. It is important to note that the exergetic efficiency recorded was notably lower than the energy efficiency, with the highest energy yield recorded at 52% and the maximum exergy efficiency at 4.45%. Energy efficiency solely measures the quantity and does not provide a thorough evaluation of the various losses that may occur in solar collectors. The results obtained in this study are similar to those found by Banat and Jwaied [9] and Miladi et al. [10], who recorded maximum exergetic efficiency values of 6.5% and 5.03%, respectively, and maximum energetic efficiency values of 55% and 48.12%, respectively. The energy forms indicated that the solar collector field is effective from an energy perspective but not from an exergy perspective. According to the energy profile, the solar collector field is efficient from an energy viewpoint and inefficient from an exergy viewpoint. Hence, performing an exergetic analysis of other solar field elements would provide the opportunity to make decisions that are more efficient and prevent membrane degradation.

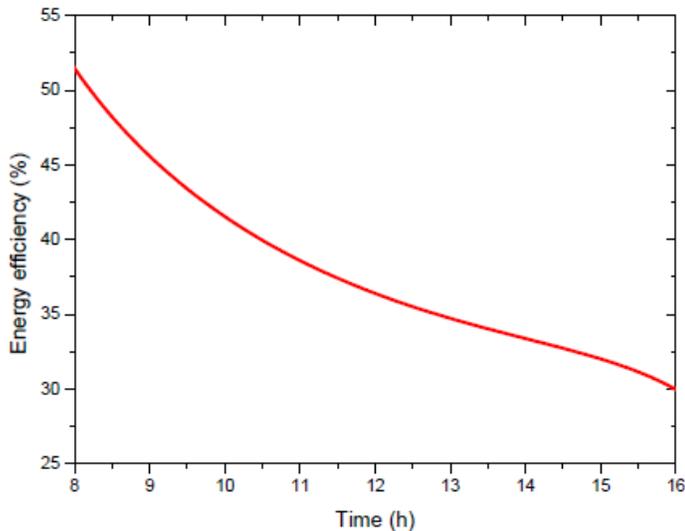


Figure 6. Variation of the collector energy efficiency variation with a solar with time.

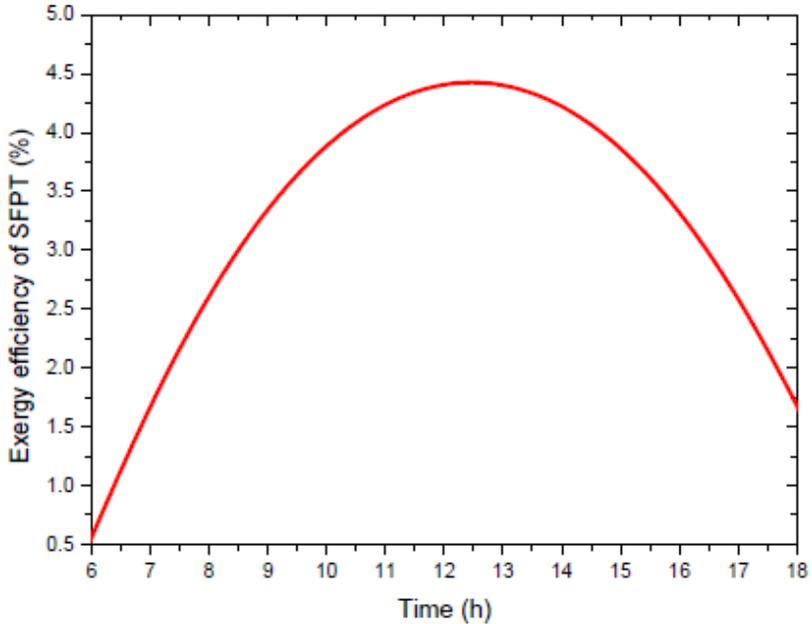


Figure 7. Variation of the collector exergy efficiency variation with a solar with time

Figure 13 displays the distribution of exergy destruction in the AGMD, heat exchanger pumps, and flat plate collector. It can be observed that the majority of the total exergy loss, 95%, takes place in the solar collectors. However, the heat exchanger is the next significant source of exergy destruction, accounting for 2.55% of the total exergy loss, while the AGMD contributes to only 1.44% of the total energy loss. This disparity is primarily due to the different temperature values between the flat plate collector, heat exchanger, AGMD, and pumps.

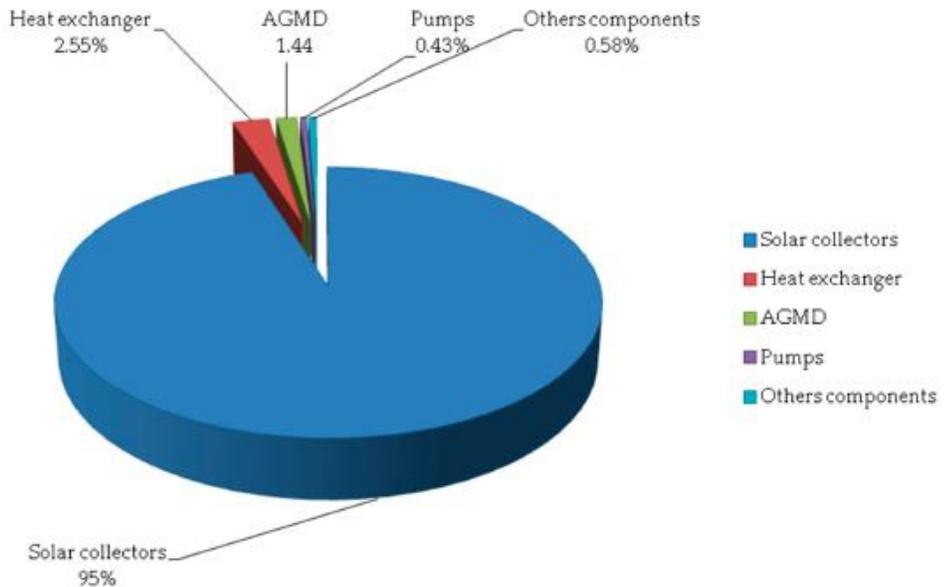


Figure 13. Rates of exergy destruction in the solar AGMD system components.

CONCLUSION

In this study, detailed energy and exergy analysis of a solar-powered AGMD system for saline water desalination in the Gherdaïa region, Algeria, was conducted. A one-dimensional dynamic model was developed to analyze the heat and mass transfer processes in the AGMD system combined with a flat plate collector in order to predict water production and flux. The model was validated using previously reported flux data and used to examine the impact of various parameters on the efficiency of the solar AGMD desalination system. In addition, both energy and exergy analyses were conducted to evaluate the overall thermodynamic behavior of the solar AGMD desalination system. The main conclusions are summarized as follows:

- The exergy efficiency for the AGMD system is found to be 56.3%, which indicates that the AGMD module of the current design is moderately efficient, and large amounts of energy can be saved. It is important to highlight that all desalination processes have very low energy efficiencies. However, what distinguishes AGMD is that it operates at a lower temperature compared to other thermal distillation processes. This facilitates its coupling with solar energy;
- The maximum exergy destruction occurs in the solar collector (95%) because of the large temperature difference between solar heat and the coolant fluid in the collector field, which results in high irreversibilities. Hence, effort should be made to reduce this exergy loss. Potential improvement of the solar collector field might be achieved by maximizing the collector's optical efficiency as well as minimizing the overall heat losses of the collector area;
- The two main sources of exergy destruction are the solar thermal collector and the desalination unit 95% of the total exergy loss is destroyed in the collector, while 2.55% of the loss of total exergy is destroyed in the heat exchanger and only 1.44% of the total exergy loss is destroyed in the desalination system;

Références

- [1] Kanoglu, M.; Dincer, I.; Rosen, M.A. Understanding Energy and Exergy Efficiencies for Improved Energy Management in Power Plants. *Energy Policy* 2007, 35, 3967–3978. [CrossRef]
- [2] Kerme, E.D.; Orfi, J.; Fung, A.S.; Salilih, E.M.; Khan, S.U.-D.; Alshehri, H.; Ali, E.; Alrasheed, M. Energetic and Exergetic Performance Analysis of a Solar Driven Power, Desalination and Cooling Poly-Generation System. *Energy* 2020, 196, 117150. [CrossRef]
- [3] Macedonio, F.; Drioli, E. An Exergetic Analysis of a Membrane Desalination System. *Desalination* 2010, 261, 293–299. [CrossRef]
- [4] Macedonio, F.; Curcio, E.; Drioli, E. Integrated Membrane Systems for Seawater Desalination: Energetic and Exergetic Analysis, Economic Evaluation, Experimental Study. *Desalination* 2007, 203, 260–276. [CrossRef]
- [5] Wang, Q.; Hu, M.; Yang, H.; Cao, J.; Li, J.; Su, Y.; Pei, G. Energetic and Exergetic Analyses on Structural Optimized Parabolic Trough Solar Receivers in a Concentrated Solar–Thermal Collector System. *Energy* 2019, 171, 611–623. [CrossRef]
- [6] Choi, J.; Choi, Y.; Lee, J.; Kim, Y.; Lee, S. Exergy Analysis of a Direct Contact Membrane Distillation (DCMD) System Based on Computational Fluid Dynamics (CFD). *Membranes* 2021, 11, 525. [CrossRef] [PubMed]
- [7] Miladi, R.; Frikha, N.; Gabsi, S. Exergy Analysis of a Solar-Powered Vacuum Membrane Distillation Unit Using Two Models. *Energy* 2017, 120, 872–883. [CrossRef]
- [8] Guillén-Burrieza, E.; Alarcón-Padilla, D.-C.; Palenzuela, P.; Zaragoza, G. Technoeconomic assessment of a pilot-scale plant for solar desalination based on existing plate and frame MD technology. *Desalination* 2015, 374, 70–80. [CrossRef]
- [9] Saffarini, R.B.; Summers, E.K.; Arafat, H.A.; Lienhard, J.H. Economic evaluation of stand-alone solar powered membrane distillation systems. *Desalination* 2012, 299, 55–62. [CrossRef]
- [10] Banat, F.; Jwaied, N. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. *Desalination* 2008, 220, 566–573. [CrossRef]

Study of the spatio-temporal variation of climatic variables in the CSM basin - Eastern Algeria

Bouguerra Hamza¹, Tachi Salah Eddine², Bouchehed Hamza², Derdous Oussama³, Benamara Abdelwaheb⁴

¹ Water Resources and Sustainable Development Laboratory, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Badji Mokhtar - Annaba University P.O. Box 12, Annaba, 23000, Algeria.

² Laboratoire de recherche des sciences de l'eau, Department of Hydraulics, National Polytechnic School, 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200, Algiers, Algeria.

³ Laboratoire de recherche des sciences de l'eau, Department of Civil and Hydraulic Engineering, Faculty of Applied Sciences, University of Kasdi Merbah, Ouargla, 30000, Algeria.

⁴ Laboratoire de recherche des sciences de l'eau, Department of Civil Engineering, Ziane Achour - Djelfa University, 17000, Algeria.

Abstract

Due to climate change, Algeria has experienced frequent droughts in most of its regions in recent years, including the Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) basin, which is the subject of our study and spans across 14 provinces of the national territory. Due to rapid population growth, increased air temperature, and decreased precipitation in the CSM hydrographic basin, there has been a decrease in static water table levels and the drying up of several wadis, especially during the summer period. Therefore, Algerian authorities are resorting to the search for the best water management strategies in the face of climate change. That is why it is necessary to understand the spatio-temporal evolution of meteorological variables in order to assess climate-induced changes and develop appropriate strategies. In the present work, a spatio-temporal study of the evolution of aridity in the CSM basin was conducted using monthly data of precipitation and temperatures recorded at 10 meteorological stations during the period 1960/61-2019/20. The analyses of time series data were conducted based on the De-Martonne Aridity Index (LADM), the Emberger Aridity Index (LAE), and the FAO Aridity Index (LFAO). The values of the three indicators LADM, LAE and LFAO were studied at two time scales; seasonal and annual. Furthermore, the statistical tests of Pettitt and Buishand were performed to assess the homogeneity of the data series, and the Mann-Kendall test was used to identify trends in the variables at the selected stations. In the majority of the stations studied, the statistical tests for trends revealed significant trends towards increasing air temperatures and decreasing annual precipitation during the study period. In general, the evolution of the three considered aridity indices (LADM, LAE and LFAO) shows a clear upward trend regarding aridity in the CSM basin. These results reflecting the negative effects of recent climate change on water availability must be taken into consideration in the planning and management of water resources in northeastern Algeria.

Key Words: Climate change, CSM Basin, Aridity Index, Statistical tests

Étude de la variation spatio-temporelle des variables climatiques dans le bassin versant CSM - Algérie orientale

Résumé

Suite aux changements climatiques, l'Algérie a connu ces dernières années des sécheresses fréquentes dans la majorité de ses régions, y compris le bassin Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) objet de notre étude qui s'étend sur 14 wilayas du territoire national. À l'essor démographique rapide, l'augmentation de la température de l'air et la diminution de la précipitation dans le bassin hydrographique CSM ont provoqué une baisse des niveaux statiques des nappes d'eau et l'assèchement de plusieurs oueds notamment en période estivale. Par conséquent, les autorités algériennes ont recours à la recherche des meilleures stratégies de gestion de l'eau face aux changements climatiques. C'est pourquoi il est nécessaire de comprendre l'évolution du régime spatio-temporel des variables météorologiques afin d'évaluer les changements induits par le climat et de parvenir à des stratégies appropriées. Dans le présent travail, une étude spatio-temporelle de l'évolution de l'aridité dans le bassin CSM a été faite à l'aide de données mensuelles des précipitations et des températures enregistrées dans 10 stations météorologiques durant la période 1960/61-2019/20. Les analyses des séries chronologiques de données ont été effectuées en se basant sur l'Indice d'Aridité de De-Martonne (LADM), l'Indice d'Aridité d'Emberger (LAE) et l'Indice d'Aridité FAO (LFAO). Les valeurs des trois indicateurs LADM, LAE et LFAO, ont été étudiées à deux échelles de temps ; saisonnière et annuelle. De plus, les tests statistiques de Pettitt et Buishand ont été réalisés pour évaluer l'homogénéité des séries de données et le test de Mann-Kendal a été utilisé pour identifier les tendances des variables dans les stations sélectionnées. Dans la plupart des stations étudiées, les tests statistiques des tendances ont révélé des tendances significatives à l'augmentation des températures de l'air et la diminution des précipitations annuelles au cours de la période d'étude. En général, l'évolution des trois indices d'aridité considérés (LADM, LAE et LFAO) montre une nette tendance à la hausse quant à l'aridité dans le bassin CSM. Ces résultats reflétant les effets négatifs du récent changement climatique sur la disponibilité en eau doivent être pris en considération dans la planification et la gestion des ressources en eau dans le nord-est algérien.

Mots clés : Changements climatiques, bassin CSM, Indice d'Aridité, tests statistiques.

¹ Corresponding author: bouguerrahamza23@gmail.com

1. INTRODUCTION

Climate variations, such as alterations in local rain patterns, have altered hydrologic processes and will persistently remodel the hydrology [1]. Rainfall holds significance as a meteorological factor and plays a crucial role in regional hydrologic processes [2,3]. Aridity has emerged as a significant environmental concern in numerous regions across the globe, presenting potential risks to human populations. Arid regions accommodate more than 38% of the world's population and stand out as some of the most vulnerable areas to climate change and anthropogenic activities [4-6]. According to Milly and Dunne [7], Huang et al. [8], Lickley and Solomon [9], and Islam et al. [10], global warming-induced simultaneous decrease in precipitation, coupled with a sharp increase in temperature and potential evapotranspiration (PET), leads to drier conditions in arid and semi-arid regions worldwide [6]. Aridity is a intricate and multifaceted occurrence caused by the interplay between various atmospheric, surface, vegetation, and human-related elements [6,11].

As per the Oxford Advanced Learner's Dictionary, a drought refers to an extended duration lacking significant rainfall, while arid pertains to land or a climate exhibiting minimal or no rainfall. To clarify, drought characterizes the juxtaposition of various historical periods, whereas aridity pertains to the comparison of different geographical regions [12]. For this, a great number of aridity indices, mostly based on the combination of temperature and precipitation data, have been proposed so far. Donat et al. [13] highlighted that the Aridity Index (AI) can be employed in arid regions. However, the results' uncertainty is considerable due to limited observed coverage in most arid regions worldwide. The previous research findings mentioned above demonstrate significant variations in the impacts of global climate change on dry-wet climate changes across different regions. The interactions are intricate, and numerous uncertainties persist concerning the mechanisms driving regional-scale impacts. Therefore, investigating aridity at a regional scale necessitates the use of an appropriate aridity index, which accurately represents the measure of water deficiency in a specific location [14].

In the present study, the De-Martonne index, the Emberger index, and the FAO index are used for aridity classification in northeastern Algeria, across five basins. The main objectives of this study were to (1) generate accurate aridity classification maps in the northeastern part of Algeria according to each index, and (2) compare the spatial patterns of the three aridity indices.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Study area

This study concerns the Constantinois-Seybouse-Mellegue hydrologic unit located in the northeastern part of Algeria, which covers an area of 44,438 km² between the latitudes 35°12'08"N and 37°05'06"N and the longitudes 4°58'19"E and 8°40'43"E. It is limited to the north by the Mediterranean Sea, to the west by Chott El Hodna and Soumam Basins, to the east by Tunisia, and to the south by Chott Melhrir Basin (Figure 1).



Fig. 1 - Location map of the study area.

The study area is mostly dominated by a Mediterranean climate, which is a temperate climate characterized by a cold and humid season and a hot and dry season. The main crops cultivated in the study area are cereals, vegetable crops, and arboriculture.

2.2. Methodology

Among the climatic parameters, rainfall, air temperature, and potential evapotranspiration were obtained from ten meteorological stations. Therefore, in this study, we used three aridity indices based on their popularity in the literature and the ability to calculate them with the available data from the National Office of Meteorology. These indices are: (1) De-Martonne's aridity index [15], (2) Emberger's aridity index [16], and (3) FAO aridity index [17]. All these aridity indices have subtle differences; thus, their consideration has introduced substantial diversity into this study. The following indices are presented in the table 1.

Table 1 - Methods of calculating aridity indices used in this study.

Index formula	Description	Value	Climate
$AI_{DM} = \frac{P_a}{T_a + 10}$	AI_{DM} : De-Martonne aridity index P_a : annual precipitation in mm T_a : mean annual air temperature in °C	$AI_{DM} < 10$	Dry
		$10 \leq AI_{DM} < 20$	Semi-dry
		$20 \leq AI_{DM} < 24$	Mediterranean
		$24 \leq AI_{DM} < 28$	Semi-humid
		$28 \leq AI_{DM} < 35$	Humid
		$35 \leq AI_{DM} < 55$	Very-humid
		$AI_{DM} > 55$	Extremely-humid
$AI_E = \frac{2000 * P_a}{M^2 - m^2}$	AI_E : Emberger's aridity index P_a : annual precipitation in mm M : average temperature of the warmest month in K m : average temperature of the coldest month in K $1K = T^{\circ}C + 273$	$AI_E < 10$	Per-arid
		$AI_E < 30$	Arid
		$30 \leq AI_E < 65$	Semi-arid
		$65 \leq AI_E < 120$	Sub-humid
		$120 \leq AI_E < 170$	Humid
$AI_{FAO} = \frac{P_a}{ET_0}$	AI_{FAO} : FAO aridity index P_a : annual precipitation in mm ET_0 : reference evapotranspiration in mm	$AI_{FAO} < 0.05$	Hyper-arid
		$0.05 \leq AI_{FAO} < 0.20$	Arid
		$0.20 \leq AI_{FAO} < 0.50$	Semi-arid
		$0.50 \leq AI_{FAO} < 0.65$	Dry sub-humid
		$0.65 \leq AI_{FAO} < 0.75$	Wet sub-humid
		$AI_{FAO} \geq 0.75$	Humid

Homogeneity tests of the climatic parameters, including Rainfall, Temperature, and Reference Evapotranspiration, were performed to define the change points and trends at the annual scale using the following methods: (i) the Pettitt test, (ii) Mann-Kendall test, and (iii) Sen's slope.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

The results obtained by the three aridity indices showed that the De-Martonne aridity index varies between 16.04 at the Cheikh Larbi Tebessi station and 28.09 at the Skikda station, indicating a variation in climate from semi-dry to humid in the CSM basin (Table 2). The meteorological stations of Annaba, Constantine, and Guelma are characterized by a Mediterranean climate. The stations of Bejaia airport, Jijel, and Cheffia Dam are classified as Semi-humid, while the station of Batna indicates a Semi-dry climate. While the Emberger aridity index varies between 68.97 at the Batna station and 189.20 at the Bejaia airport station, the results indicate a variation in climate between Sub-humid and Per-humid in the studied area. The results obtained by the FAO aridity index indicate only two climatic classes in the presented area, namely: Semi-arid and Dry sub-humid (Table 2).

Table 2 - Annual precipitation, mean temperature, reference evapotranspiration and aridity indices during the following period 1960/61-2019/20.

Station name	P (mm/year)	T _{mean} (°C)	ET ₀ (mm/year)	AI _{DM} (Climate)	AI _E (Climate)	AI _{FAO} (Climate)
Annaba	638.24	17.55	1270.20	23.12 (Mediterranean)	152.95 (Humid)	0.50 (Dry sub-humid)
Constantine	509.55	15.38	1257.07	20.06 (Mediterranean)	93.39 (Sub-humid)	0.41 (Semi-arid)
Skikda	734.18	16.11	1285.28	28.09 (Humid)	161.91 (Humid)	0.57 (Dry sub-humid)
Bejaia airport	764.06	17.61	1211.49	27.56 (Semi-humid)	189.20 (Per-humid)	0.63 (Dry sub-humid)
Batna	410.70	14.43	1450.90	16.78 (Semi-dry)	68.97 (Sub-humid)	0.32 (Semi-arid)
Cheikh Larbi Tebessi	402.70	15.12	1532.80	16.04 (Semi-dry)	69.63 (Sub-humid)	0.28 (Semi-arid)
Setif Ain Arnat	432.87	15.06	1332.00	17.22 (Semi-dry)	73.40 (Sub-humid)	0.33 (Semi-arid)
Guelma	592.15	16.05	1474.90	22.69 (Mediterranean)	115.77 (Sub-humid)	0.43 (Semi-arid)
Jijel	739.81	16.67	1592.70	27.41 (Semi-humid)	164.87 (Humid)	0.54 (Dry sub-humid)
Cheffia Dam	717.92	20.00	1290.10	24.12 (Semi-humid)	137.04 (Humid)	0.58 (Dry sub-humid)

The results of the Pettit test show that the annual precipitation of Annaba, Batna, Jijel, and Cheffia Dam stations has significant change points that occurred during 1978/79, 2004/05, 2001/02, and 1977/78, respectively (Table 3). The hypothesis of homogeneity is rejected for these stations at the 5% level of significance. On the other hand, the test also indicated that the hypothesis of homogeneity is valid in the other stations, as non-significant change points were detected in their rainfall series (p value ≥ 0.05). Moreover, the results of the Pettit test indicate that the temperature of all stations, except the Setif Ain Arnat station, has significant change points (Table 3).

Table 3 - Results of Pettit's and Mann-Kendall's statistical tests at the weather stations studied.

	Station name	Pettitt	Mann-Kendall (P-value < 5%)	Sen's slope	Average before rupture	Average after rupture	Difference
Precipitation (P)	Annaba	1978/79	S (0.0206)	2.5300	555.31	676.67	121.36
	Constantine	-	NS (1.0000)	-0.0054	-	-	-
	Skikda	-	NS (0.6123)	0.4950	-	-	-
	Bejaia airport	-	NS (0.8134)	0.3803	-	-	-
	Batna	2004/05	S (0.0008)	-2.4893	445.09	307.53	-137.56
	Cheikh Larbi Tebessi	-	NS (0.1152)	-1.1803	-	-	-
	Setif Ain Arnat	-	S (0.0206)	-1.3448	-	-	-
	Guelma	-	NS (0.5790)	0.5387	-	-	-
	Jijel	2001/02	S (< 0.0001)	9.4191	606.15	1052.00	445.85
	Cheffia Dam	1977/78	NS (0.0794)	2.5938	609.30	764.47	155.17
Temperature (T _{mean})	Annaba	1981/82	S (< 0.0001)	0.0164	17.06	17.83	0.77
	Constantine	1993/94	S (< 0.0001)	0.0194	15.03	15.83	0.80
	Skikda	1986/87	S (< 0.0001)	0.0569	15.06	16.98	1.92
	Bejaia airport	1982/83	S (< 0.0001)	0.0199	17.15	17.90	0.75
	Batna	1993/94	S (< 0.0001)	0.0422	13.82	15.24	1.42
	Cheikh Larbi Tebessi	1992/93	S (< 0.0001)	0.0546	14.21	16.22	2.01
	Setif Ain Arnat	-	NS (1.0000)	-0.0001	-	-	-
	Guelma	1986/87	S (< 0.0001)	0.0832	14.10	17.64	3.54
	Jijel	1993/94	S (< 0.0001)	0.0661	15.77	17.84	2.07
	Cheffia Dam	1979/80	S (0.0002)	0.1351	14.54	22.73	8.20
Reference evapotranspiration (ET ₀)	Annaba	1993/94	S (< 0.0001)	2.6920	1224	1331	107
	Constantine	1992/93	S (< 0.0001)	3.1300	1204	1321	117
	Skikda	1992/93	S (< 0.0001)	4.0885	1221	1363	142
	Bejaia airport	1992/93	S (< 0.0001)	5.2374	1121	1322	201
	Batna	1993/94	S (< 0.0001)	3.9000	1247	1387	140
	Cheikh Larbi Tebessi	1992/93	S (< 0.0001)	4.2614	1374	1530	156
	Setif Ain Arnat	-	NS (0.9288)	0.0482	-	-	-
	Guelma	1986/87	S (< 0.0001)	7.8885	1219	1538	319
	Jijel	1992/93	S (< 0.0001)	5.2483	1282	1446	164
	Cheffia Dam	1992/93	S (< 0.0001)	2.0780	1198	1279	81

The results of the Mann-Kendall test indicated that the null hypothesis Ho is accepted for Constantine, Skikda, Bejaia airport, Cheikh Larbi Tebessi, Guelma, and Cheffia Dam stations (p-value > 0.05), with magnitudes of trends

equal to 1.0000, 0.6123, 0.8134, 0.1152, 0.5790, and 0.0794, respectively (Table 3). The mentioned stations present certain homogeneity of annual precipitation data at the 5% level of significance.

On the other hand, the probability of the null hypothesis is rejected for Annaba, Batna, Setif Ain Arnat, and Jijel stations, with magnitudes of trends equal to 0.0206, 0.0008, 0.0206, and 0.00001, respectively. According to Sen's slope estimates at the 5% level of significance, it can be noticed that the stations of Constantine, Batna, and Setif Ain Arnat are indicating negative trends with -0.0054, -2.4893, and -1.3448, respectively. The Jijel station showed a highly significant positive trend of 9.4191 (Table 3).

CONCLUSION

In this study, we aimed to assess the spatio-temporal evolution of the climate in the CSM basin (northeastern Algeria), a region of great importance for managing water resources and other activities affected by climate change. To achieve this, we conducted an analysis of the variability and homogeneity of precipitation, temperature, and reference evapotranspiration data on an annual scale using statistical tests. Subsequently, we calculated three aridity indices based on the data collected from the meteorological stations in the study area. The results of the three aridity indices clearly indicate a noticeable trend towards increased aridity in the CSM basin. These findings underscore the negative impact of recent climate change on water availability in the region. As such, it is imperative to consider these results in the planning and management of water resources in northeastern Algeria. Proper management strategies and mitigation measures need to be implemented to address the challenges posed by the changing climate and ensure sustainable water availability for the region's diverse needs.

Références

- [1] B. Guo, J. Zhang, X. Meng, T. Xu, Y. Song, Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN, *Scientific Reports*, 10 (2020) 81.
- [2] P.Y. Groisman, T.R. Karl, D.R. Easterling, R.W. Knight, P.F. Jamason, K.J. Hennessy, et al., Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change, *Weather and climate extremes: changes, variations and a perspective from the insurance industry*, (1999) 243-283.
- [3] F.C. Ljungqvist, P.J. Krusic, H.S. Sundqvist, E. Zorita, G. Brattström, D. Frank, Northern Hemisphere hydroclimate variability over the past twelve centuries. *Nature*, 532 (2016) 94-98.
- [4] O. Derdous, H. Bouguerra, S.E. Tachi, A. Bouamrane, A monitoring of the spatial and temporal evolutions of aridity in northern Algeria, *Theoretical and Applied Climatology*, 142 (2020) 1191-1198.
- [5] O. Derdous, S.E. Tachi, H. Bouguerra, Spatial distribution and evaluation of aridity indices in Northern Algeria, *Arid Land Research and Management*, 35 (2021) 1-14.
- [6] S. Ullah, Q. You, D.A. Sachindra, M. Nowosad, W. Ullah, A.S. Bhatti, et al., Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: An assessment based on the CRU data, *Atmospheric Research*, 268 (2022) 105998.
- [7] P.C. Milly, K.A. Dunne, Potential evapotranspiration and continental drying, *Nature Climate Change*, 6 (2016) 946-949.
- [8] J. Huang, Y. Li, C. Fu, F. Chen, Q. Fu, A. Dai, et al., Dryland climate change: Recent progress and challenges, *Reviews of Geophysics*, 55 (2017) 719-778.
- [9] M. Lickley, S. Solomon, Drivers, timing and some impacts of global aridity change, *Environmental Research Letters*, 13 (2018) 104010.
- [10] A.R.M.T. Islam, H.T. Islam, S. Shahid, M.K. Khatun, M.M. Ali, M.S. Rahman, et al., Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change, *Journal of Environmental Management*, 289 (2021) 112505.
- [11] S.C. Herring, M.P. Hoerling, T.C. Peterson, P.A. Stott, Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95 (2014) Si-S97.
- [12] H. Yu, L. Wang, J. Zhang, Y. Chen, A global drought-aridity index: The spatiotemporal standardized precipitation evapotranspiration index, *Ecological Indicators*, 153 (2023) 110484.
- [13] M.G. Donat, O. Angéil, A.M. Ukkola, Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions, *Environmental Research Letters*, 14 (2019) 065003.
- [14] F.J. Moral, F.J. Rebollo, L.L. Paniagua, A. García-Martín, F. Honorio, Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain, *Theoretical and Applied Climatology*, 126 (2016) 801-814.
- [15] E. De-Martonne, *Traité de Géographie Physique, Vol I: Notions générales, climat, hydrographie*. Geographical Review, 15 (1925) 336-337.
- [16] E. Emberger, Sur une formule climatique et ses applications en botanique, *La Météorologie*, 92 (1932) 423-432.
- [17] R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith, *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*, FAO, Rome, 300 (1998) D05109.

La pénurie d'eau dans le Sahel tunisien : une question structurelle, ou conjoncturelle

Fabienne Fadia Notario Gafsi ^{1,2,3}

1 GRED Université Montpellier 3 – Saint Charles Montpellier

2 Département de géographie, Université d'Angers

3 ESO - UMR 6590 CNRS Espaces et Sociétés, Université d'Angers, France

Résumé

En Tunisie, comme ailleurs, l'eau est considérée comme un « pivot de développement » [Miossec, 1996]. Sa rareté a provoqué depuis plusieurs années un discours, relayé par les médias (la radio en particulier), et accompagné la réalisation de grandes ouvrages hydrauliques. Cette politique de mobilisation de l'eau, basée sur la gestion de l'offre, a été considérée comme une réponse aux demandes en eau (de tous les usagers), sans jamais les adapter à la pression démographique, aux changements climatiques, ou encore à la situation politique qu'a traversé la Tunisie depuis 2011.

Les thèmes de la pénurie, de la sécheresse et de l'aridité sont utilisés comme armes de propagande au service d'une politique de gestion de l'offre d'eau.

Dans ce contexte, la région du Sahel tunisien, notamment le Sahel de Sousse et Monastir, est à plusieurs titres une illustration de la question de la pénurie physique et socio-économique de l'eau dans un contexte politique instable qui vient amplifier les tensions sur cette « Or bleu » [Notario Gafsi, 2017].

Dans cet article, nous tentons, dans la mesure du possible, de dresser un portrait de la situation de l'eau dans le Sahel de Sousse et de Monastir qui apparaît, plus que jamais, comme une terre assoiffée d'eau et manquant de perspectives claires et optimistes.

C'est au niveau de la politique que se posent aujourd'hui les questions les plus graves et les plus urgentes : d'une part, en raison des problèmes de gouvernance et de la gestion intégrée des ressources ; et d'autre part, en raison des mentalités et des pratiques sociales largement insuffisantes en termes de gestion.

Par ailleurs, ce travail de recherche propose un examen détaillé des différentes interactions entre les facteurs de pénurie et les indicateurs de risque (sociaux, économiques, climatiques, ou encore géopolitique), d'une part, et nos enquêtes de terrain, d'autre part, afin de décrire l'évolution des pénuries dans le temps (à court, à moyen et à long terme) et dans l'espace (à l'échelle locale).

Mots clés : eau, pénurie, gestion, transfert, adaptation.

Water shortage in the Tunisian Sahel: a structural or cyclical question

Abstract

In Tunisia, as in other regions, water is recognized as a crucial element for development, a concept initially posited by Miossec in 1996. The scarcity of water has, over the years, fostered a discourse heavily propagated by media outlets, particularly radio. This discourse has accompanied the construction of significant hydraulic structures. The prevailing water mobilization policy, primarily supply-oriented, has been adopted as a solution to meet the water demands of all user groups. However, this policy has not been adapted to consider demographic pressures, climate change, or the political turmoil Tunisia has experienced since 2011.

This article explores how themes of scarcity, drought, and aridity have been employed as propaganda tools to support water supply management policies. The Sahel region of Tunisia, particularly the Sahel of Sousse and Monastir, exemplifies the physical and socio-economic water scarcity within an unstable political context, exacerbating tensions over this 'Blue Gold,' [Notario Gafsi, 2017].

Our study aims to provide a comprehensive overview of the water situation in the Sousse and Monastir Sahel. This region is increasingly perceived as a land desperately in need of water and lacking clear, optimistic future prospects. The most critical and urgent issues are identified at the policy level, stemming from governance problems and integrated resource management, as well as from inadequate social attitudes and practices regarding water management.

Furthermore, this research offers a detailed examination of the various interactions between scarcity factors and risk indicators (social, economic, climatic, and geopolitical) and our field surveys. This approach aims also to describe the evolution of water scarcities over time (short, medium, and long-term) and space (on a local scale).

Key Words: Water, shortage, management, transfer, adaptation.

¹ Corresponding author: fabienne.ng@yahoo.com

1-INTRODUCTION

Comme d'autres pays méditerranéens, la gestion durable des ressources en eau est l'un des défis environnementaux les plus urgents du 21ème siècle en Tunisie. De nombreux problèmes et obstacles à l'amélioration de la situation des ressources en eau peuvent être attribués à des échecs en matière de la gouvernance plutôt qu'à la disponibilité de la ressource elle-même.

Le stress, la pénurie d'eau ou encore la sécurité hydrique dépendent de facteurs hydrologiques et anthropiques. De ce fait, autant le changement climatique, que les mutations socio-économiques et politiques doivent être pris en compte pour choisir et mettre en place les mesures adéquates afin de bien gérer l'eau dans le présent et dans le futur proche à l'échelle locale, régionale ou encore nationale.

Dans cet article, nous nous intéressons, en effet, aux questions de la pénurie d'eau structurelle et conjoncturelle qui présentent des contraintes de développement socio-économique et d'environnement spécifique dans le contexte sahelien. La fragilité de ces zones mais, également leur capacité d'adaptation, la dépendance de leurs populations vis-à-vis de l'état de la ressource en eau, leur croissance anticipée face aux effets du changement climatique et des mutations politiques rendent en effet, nécessaires, la recherche de solutions de gestion de ces ressources en eau et leur intégration dans des stratégies d'adaptation. Dans un premier temps, est abordée la question des eaux « exogènes » et les problématiques associées aux transferts de cette eau. Dans un deuxième temps, est analysée la crise de l'eau et sont exposés les éléments qui structurent la question de l'eau et de sa gestion en nous appuyant sur les enquêtes de terrain menées dans la zone d'étude.

Enfin, des cartes « d'évolution » de la pénurie d'eau dans le temps et dans l'espace sont élaborées.

APPROCHE METHODOLOGIQUE

Pour mener ce travail de recherche, nous nous sommes basés sur une combinaison de méthodes ou de phases permettant de mieux aborder le sujet des impacts de la pression anthropique, des changements climatiques, ou encore des mutations politiques sur la ressource dans la Tunisie post-révolutionnaire, et en particulier dans le Sahel de Sousse et Monastir.

Parmi ces méthodes employées, figurent : la revue documentaire, l'analyse rétrospective et prospective.

Ensuite, pour compléter cette source d'information, des enquêtes ont été menées auprès des différents acteurs publics et privés notamment les usagers.

Pour décrire les tensions sur la ressource,, nous avons élaboré une base de données qui rassemblent les données statistiques et les documents officiels (dont la plupart ne sont pas publiés) collectés auprès des différents acteurs et institutions tels que la société nationale d'exploitation de distribution et des eaux (SONED) et les commissariats régional de développement agricole (CRDA) de Sousse et Monastir.

Pour appréhender la réalité de la pénurie d'eau en Tunisie et dans le Sahel de Sousse et Monastir en particulier, nous nous sommes basés sur une approche multi-source en croisant l'analyse des données collectées avec les enquêtes de terrain. Ces enquêtes de terrain ont été conduites à partir des entretiens semi-structurés (les entretiens avec les gestionnaires, des spécialistes et universitaires) et des questionnaires (auprès des citoyens, des agriculteurs et des étudiants).

Le deuxième volet de ce travail de recherche vise à évaluer la capacité d'adaptation individuelle et collective et fait l'objet d'un autre article publié antérieurement (F Notario Gafsi, 2020).

LE SAHEL DE SOUSSE ET MONASTIR COMME « UN TERRITOIRE ASSOIFFE »

Situé au Centre-Est du pays, notre périmètre d'étude qui apparaît, plus que jamais, comme une terre assoiffée d'eau, est caractérisée par un potentiel très limité compte tenu des conditions climatiques caractérisées par des pluviométries modestes et des contrastes saisonniers [Notario Gafsi, 2017, 2020], de la pression des activités anthropiques (domestiques, agricoles, industriels que touristiques), ou encore la vague de changements politiques qu'a traversé la Tunisie depuis 2011 et qui ne cesse d'aggraver les tensions sur cette ressource.

Face à une telle pression, nous assistons, par conséquent, à la dégradation progressive de l'« Or bleu » dans cette région qui est déjà dépendante en termes de ressource en eau [CRDA, 2014, FAO, 2016, Notario Gafsi, 2017-2021], surtout qu'elle s'approvisionne depuis longtemps à partir de ressources externes que nous qualifions de « ressources exogènes » (Notario Gafsi, 2016, 2017).

Pénurie structurelle ou conjoncturelle

Selon les données collectées par nos soins, ou encore nos enquêtes sur le terrain, le Sahel tunisien est marqué par une pénurie structurelle qui est le résultat d'une part, d'une insuffisance ou d'une inadéquation du système hydraulique au niveau du réseau d'interconnexion et de transfert d'eau externe depuis le Nord et le contre, d'autre part, d'un phénomène naturel provoquant la réduction des réserves d'eau très limité tels que l'envasement des retenues des barrages [Saadaoui, 1995 & Abid, 1998 ; Ben Mammou et Louati, 2007], et au réseau

hydrographique moyennement dense, etc. Cette pénurie d'eau accentuée depuis quelques années, est le constat d'un échec de l'augmentation de l'offre et du modèle de gestion de l'eau mis en place pour s'adapter au déficit hydrique..

Notre zone d'étude est marquée également par une pénurie conjoncturelle qui est due essentiellement aux : 1) sont dus essentiellement aux 1) défaillances techniques ; des pannes au niveau des ouvrages de stockage, de transfert ou de distribution des ressources en eau 2) grandes tensions qui s'exercent sur la ressource notamment, la dynamique des populations, l'intensification de l'urbanisation, ou encore les aléas climatiques et politiques. 3) phénomènes exceptionnels, notamment la succession des années de sécheresse, ou les inondations peuvent être la cause de pénurie conjoncturelles d'eau en provoquant des dégâts matériels considérables au niveau des infrastructures hydrauliques. 4) aléas politiques; notamment l'insécurité dans le pays avant 2015 et la faiblesse de l'état induisent des dépassements et l'utilisation anarchique de la ressource précieuse, des conflits d'usages, ou encore des conflits interrégionaux.

L'évaluation de ces risques structurels et conjoncturels doit être étudiée en tenant compte des composantes et de l'état des ressources externes et des infrastructures hydrauliques existantes. Cette évaluation doit se référer aux plusieurs paramètres et/ ou indicateurs tels que les fréquences des casses, l'approvisionnement des habitants et des activités socio-économiques, des pannes et des coupures d'eau, etc.

Les ressources « exogènes »

La région du Sahel s'est depuis longtemps adaptée à une gestion de la ressource en eau complexe, à travers ses aménagements hydro-agricoles et au terme d'une histoire très riche. Mais, le contraste est fort entre un potentiel en eau très limité, et la frange longeant le littoral, qui attire de plus en plus des populations dans un contexte de sécheresse souvent marquée. Ce constat a conduit à des transferts d'eau majeurs ; les grands canaux ont été mis en place afin de dériver l'eau du Nord et du Kairouanai vers le littoral.

Depuis plusieurs années, la région s'approvisionne à partir des eaux du Nord acheminées via le canal Mejerda-Cap Bon (adduction alimentée principalement par les eaux des barrages Sidi Salem, Joumine et Sejnane), des eaux de la nappe profonde de Kairouan réseau de Nebhana [Gafsi, 2015 ; Gafsi, 2016 ; Notario Gafsi, 2017] où la SONEDE exploite une série de forages et aussi à partir des ressources locales limitées. Les eaux des différentes sources externes sont affectées à des usages différents ; eau potable, domestique, industrie et tourisme pour les eaux du Nord et du centre et eau d'irrigation (30 Mm3 par an en 2014) pour celles du Nebhana (DGAT, 2009) Toutefois, l'utilisation de ces ressources « exogènes » et la mobilisation de quantités supplémentaires pour améliorer la sécurité d'approvisionnement en eau potable et satisfaire la demande à moyen et à long terme posent beaucoup de problèmes.

Le schéma suivant illustre bien le processus d'alimentation du Sahel à partir de différents systèmes de transfert et d'interconnexion du Nord et du Centre.

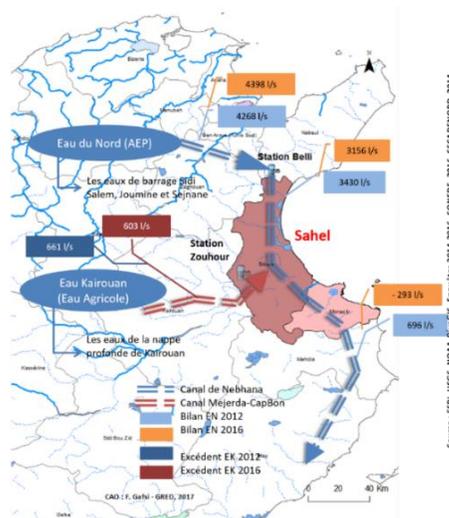


Figure 1: Schéma du transfert d'eau du Nord et du Nebhana vers le Sahel [Notario Gafsi, 2017]

Les limites du transfert d'eau dans le Sahel tunisien

Ces transferts d'eau dans le Sahel de longue date avaient joué parfaitement leur rôle. Toutefois, dans le même temps, des localités dans le Sahel, situées au cœur de la Tunisie orientale, devaient faire face à une crise de l'eau qui devient de pire en pire avec les différentes mutations qu'elles soient économique, climatique, ou encore politique surtout que leur ressource locale était tarie comme nous l'avons décrit auparavant dans cet article [Notario Gafsi, 2016].

Malgré ces transferts, la région est ainsi confrontée à de nouvelles crises : les problèmes de pénurie d'eau sur certains secteurs à certaines périodes de l'année, en particulier pendant les étés chauds et secs apparaissent et pourraient s'amplifier, du fait d'une inégale répartition des ressources, de l'accroissement de la population, du développement urbain, de l'instabilité politique ou encore de l'évolution du climat.

Il importe de mentionner aussi, que depuis les années 1980, ce modèle a été confronté à une crise croissante et sans précédent. D'une part, les infrastructures vétustes de l'eau doivent être renouvelées. D'autre part, les hausses des consommations de l'eau, ne cessent d'augmenter sur ce littoral tunisien.

De ce fait, le déficit hydrique ne cesse de s'amplifier dans la région pour atteindre 34 l/s en 2015 selon l'analyse des données collectées par nos soins auprès de la SONEDE. Il devrait atteindre 4,7 m³/s en 2030 (figures 2).

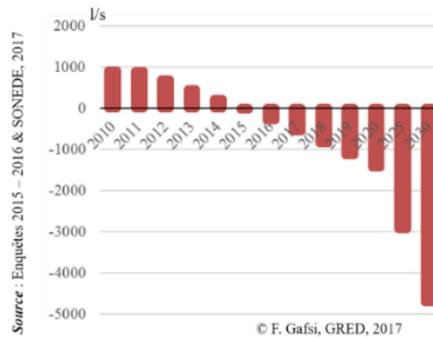


Figure 2 : Estimation du bilan d'eau du Sahel entre 2010 et 2030 [F. Notario Gafsi, 2017]

Les tensions sur les ressources dans le Sahel

Cette section décrit la situation de crise d'eau que traverse le Sahel de Sousse et Monastir en mettant l'accent sur les régions les plus à risque à connaître une pénurie.

Avant toute chose, il importe de rappeler quelques statistiques générales sur la situation de l'eau de notre région d'étude.

Il faut d'abord rappeler que cette région consomme beaucoup d'eau chaque année, soit une consommation spécifique d'environ 99 l/hab./j en 2007, contre une moyenne nationale de 78l/hab./j [SONEDE, 2009 ; F. Notario Gafsi]. C'est la consommation la plus élevée des régions tunisiennes derrière Grand Tunis. D'autre part, à cause de la dynamique démographique de la région, la disponibilité de la ressource en eau par habitant se situe à moins de 400m³ /hab./an, soit environ huit fois moins qu'en France (Boyer, 2008) et six fois moins qu'en Espagne, loin au-dessous du seuil de pénurie chronique qui est de 1000 m³ /hab./an mais aussi celui de pénurie absolue avec des disponibilités inférieures de 500 m³ /hab./an.

Ces statistiques éloquentes se doivent cependant d'être prises avec beaucoup de prudence. En effet, ces dernières ne reflètent en rien les disparités internes liées à la répartition spatiale de la ressource ainsi qu'aux taux de consommation. La situation des ressources en eau se doit d'être analysée à plus petite échelle afin de bien cibler les zones qui souffrent déjà d'une situation de pénurie ou encore les zones plus à risque de tomber en situation de pénurie dans un futur rapproché.

Par ailleurs, les analyses des données collectées par nos soins auprès des CRDA de Sousse et Monastir montrent également que le niveau des nappes est de plus en plus influencé par le climat, la géographie de la zone ou encore des prélèvements.

selon la DGRE et les CRDA de Sousse et Monastir, environ la moitié des nappes de la zone d'étude sont surexploitées à plus de 100 % et plus des deux-tiers exploitées à plus de 50% depuis 2010 [CRDA, 2014, F. Notario Gafsi, 2017].

Les nombreuses données sur l'eau ainsi recueillies dans ce travail de recherche ont permis d'assurer un suivi de l'évolution de la situation hydrique ayant cours dans plusieurs délégations, tout en fournissant plusieurs cartes sur plusieurs aspects de la ressource, dont la surexploitation des nappes souterraines, la consommation de tous les usagers (domestique, industrielle et touristique, etc.), l'état des sécheresses, ou encore les effets catastrophiques de la révolution de 2011 qui ont littéralement asséché tous les secteurs et affaibli l'administration.

La pression climatique

La sécheresse en Tunisie n'est pas un phénomène nouveau ni exceptionnel. Dans ce cadre, le Sahel de Sousse et Monastir est marqué par l'intensification des périodes de sécheresse [Maher, M., 2009]. Plusieurs faits ont gravement touché notre zone d'étude pendant plusieurs années ; 1940 (concerne toute la Tunisie), 1988, 1989, 1994 et 1995, 1997, 1999, 2000, 2010-2016. Mais depuis cinq ans, comme plusieurs d'autres régions tunisiennes, notre zone d'étude fait face à une sécheresse sans équivoque qui ne cesse de s'aggraver.

Ces faits s'accroissent, d'une part, avec le changement climatique qui se manifeste surtout avec une augmentation des températures moyennes de 8 à 10% par rapport au siècle dernier, soit une élévation de 1,5 à 2,5 à 2°C dans notre zone d'étude selon les projections publiée par le Ministère de l'agriculture Tunisienne et des ressources hydrauliques, la réduction et la variabilité des pluies (-12% à l'horizon 2050), d'autre part, avec la pression anthropique sur ce milieu fragile menacé déjà par une « hyperaridité » imminente qui caractérise particulièrement le sud-ouest de la région ou encore par une « aridité » à l'est de la zone littorale.

Suite à un été très sec, les précipitations ont chuté de 30% en 2016, le stock d'eau se trouve encore très limité et cela se voit dans les barrages vides et dans les phénomènes des coupures d'eau, qui sont devenus récurrents dans plusieurs villes tunisiennes depuis 2012, notamment dans le Sahel de Sousse et Monastir.

Le problème des coupures d'eau

L'instabilité sécuritaire, économique et politique n'est pas uniquement ce qui angoisse les tunisiens depuis le printemps arabe. Les coupures d'eau viennent, également, s'ajouter à la liste des ennuis observés depuis 2011. Depuis plus de 25 ans, la Tunisie dispose de moins de 500 m³/hab./an pour atteindre 419 m³/hab./an en 2015 [FAO, 2016] internationale et vit sous un stress hydrique. Ce stress hydrique est ressenti ces dernières années, car il a été accompagné par des coupures d'eaux récurrentes surtout pendant l'été dans plusieurs régions, notamment le Sahel de Sousse et Monastir [F Notario Gafsi, 2017].

Nous avons utilisé ce phénomène des coupures d'eau comme indicateur de pénurie conjoncturelle pour décrire l'état de la ressource dans le Sahel tunisien dans un contexte post-révolutionnaire. Il a fait l'objet d'une partie de notre enquête de perception des citoyens vis-à-vis de l'« Or bleu » et de sa gestion [F. Gafsi Notario, 2017 ; F. Notario Gafsi, 2020].

En effet, depuis 2012, des perturbations de l'approvisionnement en eau potable continuent à être enregistrées dans plusieurs régions tunisiennes, notamment dans les villes côtières et touristiques de Sousse et Monastir.

Mais qu'elles sont les raisons de ces coupures non prévenues ?

Concernant les coupures enregistrées pendant les mois de janvier (2012-2013-2014-2015-2016-2017) ou encore en août 2022, la SONEDE justifie ces perturbations par : 1) des manques des ressources hydriques, 2) l'entretien annuel du Canal Mejerda-Cap Bon. 3) la gestion la pénurie d'eau dans ces zones côtières.

Ces coupures généralisées depuis l'été 2016 presque à toutes les villes côtières en raison de la hausse de la demande, elles touchent mêmes les zones touristiques notamment Sousse, Kantaoui, Skanes, Bekalta ainsi que la zone touristique de Monastir.

Selon nos enquêtes de terrain, depuis 2012, les cassures au niveau de grandes vannes et de grandes conduites de transfert d'eau sont multipliées, surtout avec l'instabilité politique et les turbulences qu'a traversé la Tunisie entre 2011 et 2015 (Entretien avec Oueslati¹ en novembre 2015).

¹ S. Oueslati : ingénieure au sein de la SONEDE de Sousse

Selon les spécialistes, le phénomène des coupures d'eau est dû à l'incapacité de la SONEDE à répondre aux besoins de ses clients [Gafrej, 2016, Notario Gafsi, 2017]² en. Ceci est la conséquence de nombreuses raisons notamment la défaillance économique de la société.

Sur notre terrain d'étude, plus de 60 % de personnes enquêtées ont lié ces coupures d'eau en premier lieu à la gestion défaillante de la ressource et aux changements climatiques (les sécheresses depuis plus de 5ans). La deuxième raison évoquée par les enquêtés est liée aux conflits d'eau avec les autres régions (plus de 50 %), surtout que notre zone d'étude est dépendante des autres régions comme décrit plus haut.

Une géographie de la pénurie dans le Sahel de Sousse et Monastir

A la lumière des chiffres mentionnés plus haut offrant un portrait plutôt général de la situation, l'eau, en termes de quantité, semble donc constituée une ressource naturelle très limitée dans le Sahel de Sousse et Monastir.

En effet, malgré les lacunes, à l'instar des nombreuses informations utiles retrouvées dans les bases de données provenant de nos enquêtes de terrain, des entretiens avec les gestionnaires, les parties prenantes concertés de la gestion de l'eau, une couverture moyennement, étendue des données hydrogéologiques couvrant une partie du territoire sahélien est en voie d'être complétée. Ces données sont très importantes, surtout pour des questions d'aménagement et de gestion de l'eau dans ce territoire. Toutefois, plusieurs efforts restent encore à être réalisés afin de pouvoir obtenir une couverture géographique complète de la totalité de la zone d'étude.

Par ailleurs, à travers ces données et sources, un seul constat semblait ressortir : 19 délégations souffrent déjà d'une pénurie très intense en 2017 contre 25 délégation en 2020, ce nombre devrait augmenter dans les prochaines années, pour atteindre 28 délégations aux horizons 2030, causée par l'augmentation de la température, la sécheresse prolongée, la dynamique démographique,, les pertes d'eaux et les excès de consommation, les changements politiques, etc. S'ajoute à cela le phénomène des coupures d'eau récurrents depuis 2012 dans cette zone que nous avons utilisé aussi comme indicateur pour décrire cette situation de pénurie [F. Notario Gafsi, 2017]. Les résultats de ce travail de recherche se basent d'une part, sur un croisement de plusieurs types d'indicateurs socio-économiques, environnementaux ou encore géopolitiques ; et d'autre part, sur les entretiens, c'est-à-dire sur le jugement de la personne responsable de la gestion de l'eau qui a répondu à nos questions. La surestimation ou la sous-estimation de l'état réel de la situation de pénurie est alors possible à l'intérieur des limites de l'étude.

CONCLUSION

A la lumière des analyses mentionnés plus haut, comme d'autres villes côtières tunisiennes, la stratégie politique traditionnelle de mobilisation et de transferts des ressources est désormais insuffisante dans la région du Sahel de Sousse et Monastir. En effet, l'accroissance de la population, les tensions sur la ressource en eau, ainsi que la concurrence entre les différents usages (agriculture, domestique, industrie, tourisme) conduisent à des défis et à des coupures récurrentes d'eau dans la zone depuis 2012.

De plus, l'analyse des données collectées par nos soins auprès du CRDA de Sousse et du CRDA de Monastir montre que la succession des années sèches et l'impact des prélèvements engendrent une augmentation de la salinité suite au rabattement de la piézométrie des aquifères, notamment de certaines nappes littorales tel que la nappe de Teboulba dans le gouvernorat de Monastir et celle de Chott Mariem dans le gouvernorat de Sousse.

Par ailleurs, l'analyse critique de différentes interactions entre, les facteurs de pénurie et les indicateurs de risque (environnementaux, socio-économiques, ou encore géopolitique), d'une coté et des investigations (des entretiens et des questionnaires) d'une autre, témoignent d'une situation très délicate surtout après la Révolution, avec des niveaux de pénurie qui varient dans le temps (2017, 2020 et 2030) et dans l'espace (d'une délégation à une autre) même si le phénomène de stress hydrique est généralisé au Sahel tunisien.

Pour ce faire, il convient de mettre l'accent sur le renforcement des capacités des acteurs publics (représentants de l'Etat) et privés (usagers en particuliers) en matière d'adaptation individuelle et collective, ou encore de gouvernance durable des ressources en eau [F. Notario Gafsi, 2017].

² Cet article fait suite à ma thèse de doctorat et applique les méthodologies de recherche sur le terrain

Références

- [1] Abid Mohamed, 1998. *Envasement des barrages en Tunisie, Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH)*, ministère de l'Agriculture, Tunisie, 69 p.
- [2] Miossec Jean-Marie, 1996, Le tourisme en Tunisie, Un pays en développement dans l'espace touristique international, Université de Tours, 1333 p.
- [3] Miossec Jean-Marie, 2011, *Le développement local, entre mondialisation et promotion des territoires: de la gouvernance à l'articulation des pouvoirs et des territoires*.
- [4] Notario Gafsi, F.F, 2015, Le problème de l'eau dans les gouvernorats de Sousse et Monastir, *IM2E*, Montpellier.
- [5] Notario Gafsi, F.F. 2017. Géopolitique de l'eau au Sahel dans la Tunisie postrévolutionnaire. Contexte de crise: tension sur la ressource, réponses institutionnelles et sociétales. Université de Montpellier 3: Thèse de doctorat, Géographie et aménagement de l'espace.
- [6] Noatrio Gafsi, F.F. 2016. Analyse rétrospective de la tension sur l'eau dans le Sahel tunisien. *La Houille Blanche*, n°5, pp. 45-50. Notario Gafsi, F.F. 2017. *Géopolitique de l'eau au Sahel dans la Tunisie postrévolutionnaire. Contexte de crise: tension sur la ressource, réponses institutionnelles et sociétales*. Université de Montpellier 3: Thèse de doctorat, Géographie et aménagement de l'espace,
- [7] Notario Gafsi, F.F. 2018. Vers une nouvelle gestion de ressource en eau adaptée aux risques climatiques et politiques dans le Sahel de Sousse et Monastir, *Journal International Sciences et Techniques de l'Eau & de l'Environnement: Ressources en Eau & Changement Climatique en Région Méditerranéenne*, N° 1.
- [8] Notario Gafsi, F.F. 2020. L'eau un enjeu géo-perceptif dans la Tunisie postrévolutionnaire. Cas d'étude : le Sahel de Sousse et Monastir, *Colloque UNESCO-SHF : « Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019 »*.
- [9] Saadaoui M, 1995, Érosion et transport solide dans les bassins versants et l'envasement dans les retenues des barrages. Sol de Tunisie. *Bulletin. De la direction des sols*, n°17, pp.12-36.
- [10] FAO, 2016. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/wrs/readPdf.html?f=AFG-WRS_fra.pdf
- [11] SONEDE. 2014. Les fiches techniques de volume d'eau consommé facturé par usage et par localités dans Grand Sousse et Grand Monastir 1969-2012.
- [12] SONEDE. 2016. Rapport des statistiques 1990-2013, *Direction Centrale de la Planification et des Etudes Générales*, Division Statistique, Sousse.
- [13] Notario Gafsi, F.F. 2017. Géopolitique de l'eau au Sahel dans la Tunisie postrévolutionnaire. Contexte de crise: tension sur la ressource, réponses institutionnelles et sociétales. Université de Montpellier 3: Thèse de doctorat, Géographie et aménagement de l'espace.

L'impact des fertilisants sur la contamination des eaux souterraines de la plaine de Boumaiza, en vue d'une préservation durable

Habiba Majoura¹

1 GRED Université Montpellier 3 – Saint Charles Montpellier

2 Département de géographie, Université d'Angers

3 ESO - UMR 6590 CNRS Espaces et Sociétés, Université d'Angers, France

Résumé

En Tunisie, comme ailleurs, l'eau est considérée comme un « pivot de développement » [Miossec, 1996]. Sa rareté a provoqué depuis plusieurs années un discours, relayé par les médias (la radio en particulier), et accompagné la réalisation de grandes ouvrages hydrauliques. Cette politique de mobilisation de l'eau, basée sur la gestion de l'offre, a été considérée comme une réponse aux demandes en eau (de tous les usagers), sans jamais les adapter à la pression démographique, aux changements climatiques, ou encore à la situation politique qu'a traversé la Tunisie depuis 2011.

Les thèmes de la pénurie, de la sécheresse et de l'aridité sont utilisés comme armes de propagande au service d'une politique de gestion de l'offre d'eau.

Dans ce contexte, la région du Sabel tunisien, notamment le Sabel de Sousse et Monastir, est à plusieurs titres une illustration de la question de la pénurie physique et socio-économique de l'eau dans un contexte politique instable qui vient amplifier les tensions sur cette « Or bleu » [Notario Gafsi, 2017].

Dans cet article, nous tentons, dans la mesure du possible, de dresser un portrait de la situation de l'eau dans le Sabel de Sousse et de Monastir qui apparaît, plus que jamais, comme une terre assoiffée d'eau et manquant de perspectives claires et optimistes. C'est au niveau de la politique que se posent aujourd'hui les questions les plus graves et les plus urgentes : d'une part, en raison des problèmes de gouvernance et de la gestion intégrée des ressources ; et d'autre part, en raison des mentalités et des pratiques sociales largement insuffisantes en termes de gestion.

Par ailleurs, ce travail de recherche propose un examen détaillé des différentes interactions entre les facteurs de pénurie et les indicateurs de risque (sociaux, économiques, climatiques, ou encore géopolitique), d'une part, et nos enquêtes de terrain, d'autre part, afin de décrire l'évolution des pénuries dans le temps (à court, à moyen et à long terme) et dans l'espace (à l'échelle locale).

Mots clés : eau, pénurie, gestion, transfert, adaptation.

Water shortage in the Tunisian Sahel: a structural or cyclical question

Abstract

In Tunisia, as in other regions, water is recognized as a crucial element for development, a concept initially posited by Miossec in 1996. The scarcity of water has, over the years, fostered a discourse heavily propagated by media outlets, particularly radio. This discourse has accompanied the construction of significant hydraulic structures. The prevailing water mobilization policy, primarily supply-oriented, has been adopted as a solution to meet the water demands of all user groups. However, this policy has not been adapted to consider demographic pressures, climate change, or the political turmoil Tunisia has experienced since 2011.

This article explores how themes of scarcity, drought, and aridity have been employed as propaganda tools to support water supply management policies. The Sabel region of Tunisia, particularly the Sabel of Sousse and Monastir, exemplifies the physical and socio-economic water scarcity within an unstable political context, exacerbating tensions over this 'Blue Gold,' [Notario Gafsi, 2017].

Our study aims to provide a comprehensive overview of the water situation in the Sousse and Monastir Sabel. This region is increasingly perceived as a land desperately in need of water and lacking clear, optimistic future prospects. The most critical and urgent issues are identified at the policy level, stemming from governance problems and integrated resource management, as well as from inadequate social attitudes and practices regarding water management.

Furthermore, this research offers a detailed examination of the various interactions between scarcity factors and risk indicators (social, economic, climatic, and geopolitical) and our field surveys. This approach aims also to describe the evolution of water scarcities over time (short, medium, and long-term) and space (on a local scale).

Key Words: Water, shortage, management, transfer, adaptation.

¹ Corresponding author: yah_majour@yahoo.fr

1-INTRODUCTION

L'application de fertilisants azotés répond aux demandes de productivité des agriculteurs en améliorant la qualité et le rendement des récoltes. Cependant, l'utilisation abusive et anarchique de ces produits peut avoir des effets néfastes sur l'eau et sur l'atmosphère suite au lessivage des nitrates et à la dénitrification. Ce travail entre dans cette thématique. En effet la zone de Boumaïza est une région à vocation essentiellement agro-pastorale. De ce fait, elle est une grande consommatrice d'eau. A ces besoins, s'ajoute également la demande en eau pour les agglomérations et les activités industrielles. Donc il est impérativement nécessaire de protéger les ressources en eaux existantes contre toutes pollutions liées aux différentes activités anthropiques, mais préalablement il faudrait d'abord déterminer les facteurs et les mécanismes de contaminations de ces ressources.

1. Présentation du site d'étude

L'agriculture et l'élevage sont les occupations essentielles de la population de la région de Boumaïza, La superficie agricole représente 80 % de la zone d'étude. L'activité principale est la tomate industrielle. Cette région est formée par un groupe de roches métamorphiques et des roches ignées peu ou pas métamorphisées. La plaine de Boumaïza reçoit une précipitation moyenne annuelle de plus de 600 mm. Le système aquifère comprend deux nappes : l'une superficielle et l'autre captive et qui sont exploitées pour divers usages (AEP, AEI, et abreuvement).

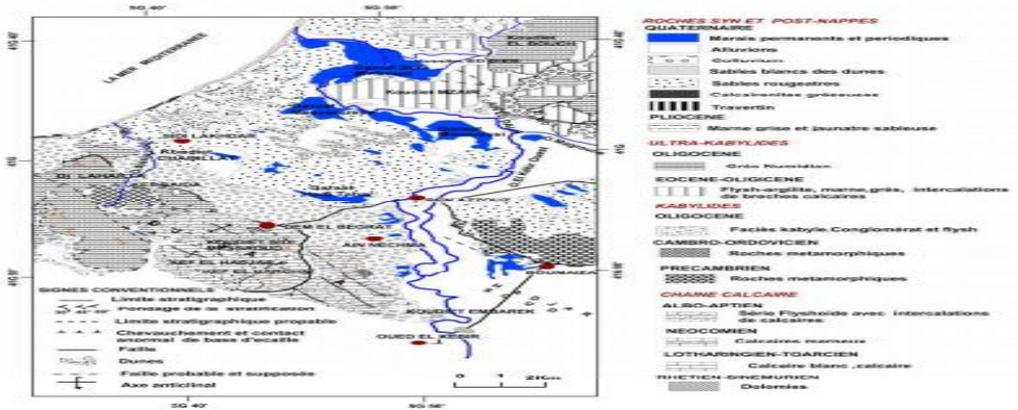


Fig. 1 : Carte géologique de la région d'étude (d'après J.M. Vila, 1980)

3. Matériels et méthodes

La campagne a regroupé l'eau de puits et de forages. Les analyses ont porté sur les éléments majeurs ainsi que sur les nutriments. Les paramètres physiques, associée à l'oxygène dissout ont été mesurés in situ à l'aide d'une valise multi-paramètres.

2. Résultats et interprétation

Les mesures de la conductivité électrique des eaux des puits et les forages de la zone de Boumaïza ont une valeur minimale de 1237 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une concentration maximale de 2196 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.2). L'oxygène dissout des eaux analysées fluctue entre une valeur minimale de 1,23 mg/O_2 et une valeur maximale de 8,94 mg/O_2 (Fig.3).

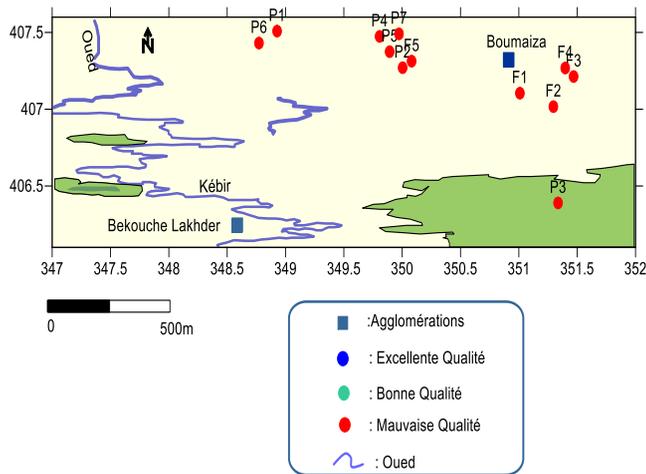


Fig. 2 : Variations de la conductivité

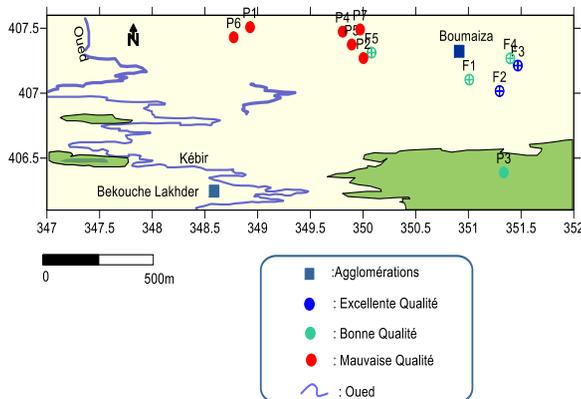


Fig. 3 : Variations de l'oxygène dissous

Les concentrations en ammonium des eaux analysées varient entre un minimum de 0,1 mg/l forage 1 et un maximum de 0.6 mg/l, avec une moyenne de 0.31 mg/l (Fig.4). Les teneurs en nitrates dans les points d'eaux analysées, fluctuent entre une concentration maximale de 2,003 mg/l enregistrée dans le puits 3 et une minimale de 0,12 mg/l marquant le forage 3, avec une moyenne de 1.12 mg/l. L'historique et la carte des variations des nitrates illustrés sur la figure 5 montrent que les eaux prélevées de tous les puits ne répondent pas aux directives de potabilité de l'OMS.

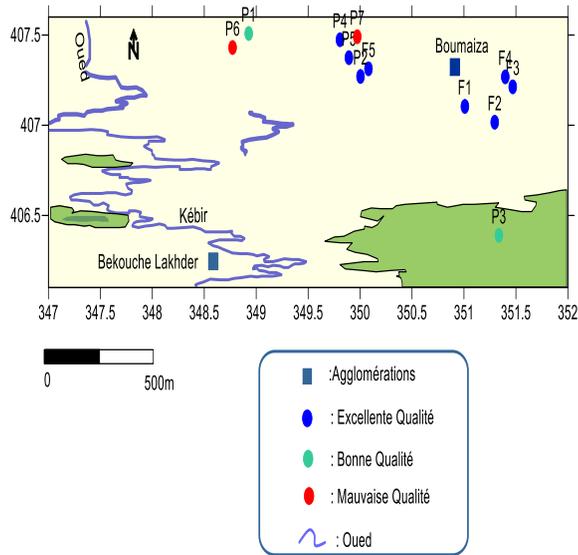


Fig.4 : Variations de l'ammonium.

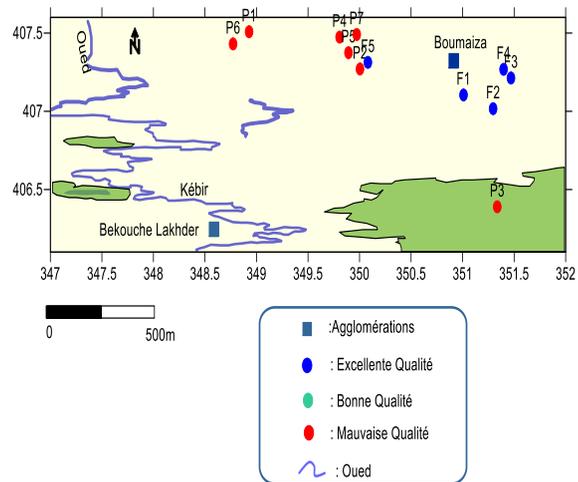


Fig.5 : Variations des nitrites

La répartition des variables dans le plan factoriel F1-F2, (Fig.6 et 7), montre que le facteur F1 avec 68,35% de la variance totale est fortement corrélé dans sa partie positive à la majorité des variables, notamment, la conductivité électrique, calcium, magnésium, TH, bicarbonates, et oxygène dissout, et à un degré moindre au sodium. Cependant, les éléments qui définissent ce facteur proviennent d'une mise en solution et de l'hydrolyse des minéraux qui constituent la roche magasin qui abrite les eaux, suite au contact eau-roche (Daifi et al 2014 ; Elbouqdaoui et al, 2009). En effet, la dissolution et l'hydrolyse étant un processus lent, il revient que le facteur F1 rend compte des dans sa partie positive des conditions d'acquisition du chimisme de l'eau. Par conséquent ce facteur F1 exprime donc le phénomène de minéralisation-temps de séjour. Par ailleurs, l'opposition de ces éléments aux variables nitrites, nitrites, chlorures, sulfates, ammonium et potassium met en évidence un autre mécanisme intervenant dans la minéralisation des eaux qui est régi par les apports d'eaux superficielles des surfaces agricoles et l'intrusion des eaux usées domestiques riches en matières organiques (Regle. 2001 ; Guechi. 2004)

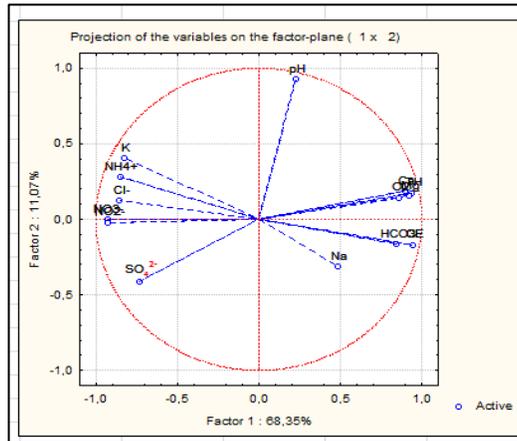


Fig.6 : Cercle de corrélation F1-F2.

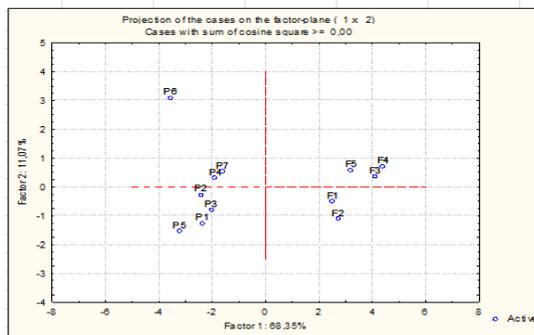


Fig.7 : Cercle des individus F1-F2.

CONCLUSION

Les résultats analytiques obtenus ont mis en évidence une pollution des eaux souterraines liée essentiellement à l'activité agro-pastorale et urbaine. En effet, l'impact de l'activité agricole sur ces eaux est mis en évidence par l'évaluation des teneurs relativement élevées des nutriments, notamment (NO_2^- , NH_4^+). Par ailleurs, les eaux des puits présentent les concentrations les plus importantes en ces éléments comparativement aux forages. Ceci est lié à leur faible profondeur. Il est donc impérativement nécessaire de réduire au maximum le lessivage des nitrates vers l'eau de surface et souterraine en optimisant l'utilisation des fertilisants azotés et d'adopter une agriculture biologique.

Références

- [1] Regle M. (2001) – La contamination des eaux souterraines destinées à la consommation humaine par les pesticides dans le département de la Seine-maritime. Mém. Stage, D.E.S.S. « Qualité et Gestion de l'Eau », Fac. Sci., Amiens, 66 p.
- [2] Guechi Salima l'impacte de la pollution agricole et industrielle sur la nappe aquifère de la région de boumaiza - benazouz Skikda 2004.
- [3] Daifi H., Alemad A., Kherrati I., Elkharrim K., Khadmaoui A., Dlimi L., Lhoussin F., Belghyti D. (2014) : Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique de la Nappe Maâmora (Kenitra-Maroc). Science Lib Editions Mersenne: Volume 6, N°140902.
- [4] Elbouqdaoui K., Aachib M., Blaghen M. et Kholtei S. (2009) : Modélisation de la pollution par les nitrates de la nappe de Berrechid, au Maroc, *Afrique Sciences*, 5(1), pp. 99-113, 2009.

Etude de la performance d'un distillateur solaire à cascade

Nawel. Nedjah¹ Slimane. Niou¹, Naouem. Boudinar¹, Nour El Houda. Arabi² and Mounir .Nessaib¹

¹National Higher School of Technology and Engineering, 23005, Annaba, Algeria,

² Physical Metallurgy and Materials Properties Laboratory (LM 2 PM), Badji Mokhtar University – Annaba/Algeria,

Résumé

La consommation d'eau douce ne cesse d'augmenter à travers le monde. Selon les estimations des Nations Unies, la demande excédera l'offre de 40% d'ici 2030. La croissance démographique dans le monde, les changements climatiques et la pollution de l'environnement ne sont que quelques facteurs responsables de l'augmentation constante de la pression qui s'exerce sur les réserves hydriques. La pénurie croissante de l'eau peut être réduite grâce à l'utilisation d'équipements de dessalement solaire, fournissant ainsi de l'eau potable pour la consommation humaine, l'évaporation et la condensation sont les principes de base de son fonctionnement. Ces systèmes peuvent être fabriqués avec des matériaux que l'on trouve facilement sur le marché local et ne nécessitent absolument aucun entretien ni aucun coût permanent. Les différents modèles des distillateurs solaires sont utilisés pour augmenter l'efficacité et la productivité du distillat. Notre étude consiste à une réalisation et une conception numérique d'un distillateur solaire à cascade, les résultats trouvés sont satisfaisants et meilleurs par rapport à un distillateur simple, nous avons observé une augmentation plus importante de la température de l'eau, passant de 25°C à 46°C sur la même période. De plus, nous avons constaté une humidité relative de l'air à l'intérieur de notre distillateur à cascade des variations significatives de l'humidité relative selon les axes x et z , mettant en évidence l'influence du changement de phase évaporation-condensation. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour la conception, l'optimisation et la mise en œuvre de distillateurs solaires, contribuant ainsi au développement de technologies durables de production d'eau potable.

Mots clés : eau, pollution, dessalement, distillateurs solaires, optimisation.

Study of the performance of a solar cascade distiller

Abstract

Consumption of fresh water continues to increase around the world. According to United Nations estimates, demand will exceed supply by 40% by 2030. Global population growth, climate change and environmental pollution are just a few factors responsible for the constant increase in the pressure exerted on water reserves. The increasing scarcity of water can be reduced through the use of solar desalination equipment, thereby providing potable water for human consumption; evaporation and condensation are the basic principles of its operation. These systems can be made with materials that are easily found in the local market and require absolutely no maintenance or ongoing costs. The different models of solar stills are used to increase the efficiency and productivity of the distillate. Our study consists of a realization and a digital design of a solar cascade distiller, the results found are satisfactory and better compared to a simple distiller, we observed a greater increase in the water temperature, going from 25 °C to 46 °C over the same period. Additionally, we found significant variations in relative humidity along the x and z axes in the relative humidity of the air inside our cascade distiller, highlighting the influence of the evaporation-condensation phase change. . The results obtained provide valuable information for the design, optimization and implementation of solar stills, thus contributing to the development of sustainable technologies for the production of drinking water.

Key Words: water, pollution, desalination, solar stills, optimization.

¹ Corresponding author: n.nedjah@ensti-annaba.dz

1-INTRODUCTION

Algeria is ranked among the 13 African countries which suffer the most from lack of water. (National Meteorological Office) [2] and also classified among the water-poor countries and very close to a crisis situation. [1]. The largest solar deposit in the Mediterranean basin is located locally in Algeria. The Mediterranean basin is afflicted with poor physical and hydro-climatic characteristics which make it difficult to use solar energy for uses such as desalination. Solar distillation of brackish water and seawater can provide potable water, especially in dry or semi-arid regions, on a household or even a small town scale. The city of Annaba is supplied mainly from two water transfer systems from the Cheffia and Mexa dams in the city of El Tarf, ensuring the needs of 84% of the population. The remaining 16% is supplied by independent systems. But the drop in the level of the Cheffia dam has significantly affected the food supply of part of the population of Annaba. The Cheffia dam with a capacity of 155 million m³ is currently 10% full and is intended to supply the great Annaba via the Chaiba treatment station (Sidi Amar), the Mexa and Bougous dams are respectively at a filling rate of 76% and 55%. [2].

In isolated places where sunlight is abundant and thanks to the use of solar desalination equipment, we can offer a simple and economical solution for producing clean water, this is the solar distiller, it is a still device that uses thermal energy from sunlight for water distillation based on evaporation and condensation phenomena. Solar energy is used to heat liquid water to evaporate it and produce steam then the steam is allowed to condense on an inclined glass lid. The condensate is then collected as drinking water. With this in mind, we present the creation and digital design of a solar cascade still. According to an analysis of the thermal behavior of the distiller, the production of distilled water depends on the incident solar energy, the absorbent surface, the ambient temperature and wind speed [2].

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Solar still is an insulated, airtight basin containing brackish water and covered with a transparent material. The basin is usually made of galvanized iron sheet and the top cover is usually made of transparent glass or plastic. The glass lid is tilted and a drain pan is placed at the base of the tilted glass lid to collect the distillate. The operating principle of solar still is exactly the same as the hydrological cycle found in nature. The sun's rays falling on the transparent glass cover pass through it and strike the inner surface of the basin. The interior surface of the pool is blackened so as to absorb most of the radiation. The salt water contained in the pool heats up and begins to evaporate. The vapors begin to rise, leaving behind salt and impurities. When the steam reaches the inclined glass cover, it condenses on the inner surface of the glass and the condensed water flows by gravity into the collecting channel. Distilled water is then extracted from the system for direct use illustrate in the Fig.1 - [3].

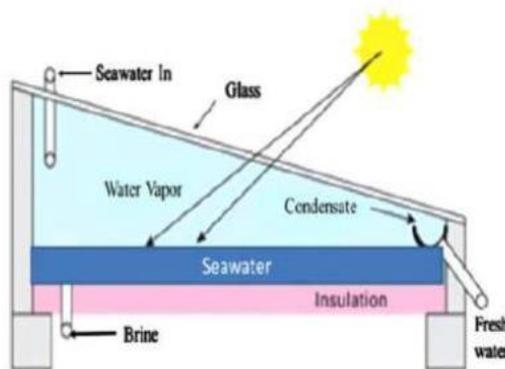


Fig. 1 - Principle operating of solar stills.

Parameters influencing the operation of a distiller

There are a lot of types of parameters influencing the solar still;

a) External parameters[4]:

- Geographic parameters:
 - Longitude
 - Latitude

- The height of the sun
- Weather parameters:
 - Wind speed: The convective effect on the face of the window plays an important role such that the speed intervenes in the convective exchange between the external face and the external environment.
 - The intensity of solar radiation: This is the essential factor in this study. It is a radiant energy of short lengthwave (0.17 to 4 μm).
 - Ambient temperature: The value of this temperature helps us determine the thermal exchanges between the external face and the external environment.
 - Cloud intermittency: The amount of solar energy received by a surface depends on the nature of the sky, i.e. the passage of clouds reduces the average effective absorption.

b) Internal parameters [5]:

- Construction parameters:
 - The cover: The glass cover must: transmit the maximum amount of solar radiation, opaque to infrared, non-hydrophobic, and it must resist attacks from wind and particles solid.
 - The distance between the evaporation surface and the condensation surface: Studies have shown when the distance between the brine and the glass decreases, the performance of the distiller increases.
 - Insulation of the distiller: Insulation is important to eliminate thermal losses (heat transfer with the outside environment).
 - Level height of the water mass: The thickness of the water is very important in the solar distillation procedure; more than the thickness is low; more than the production is high.

• Position parameters:

- The orientation of the distiller: The orientation of the distiller depends on its operation during the day. Three operating modes can be determined depending on the time of day:
 - Operation throughout the day: South orientation.
 - Operation during the morning: East orientation.
 - Operation during the afternoon: West orientation
- The location of the distiller: The location is also linked to the geometric parameters and is taken into consideration the location; it must not contain any type of obstacle which would prevent solar radiation from reaching the collection surface.
- The inclination: It depends on the operation of the distiller during the year:

c) Brine parameters:

- The thickness of the brine to be distilled: This parameter plays an important role in production, when the thickness is low the production is high, if the thickness is large the distillation will be hard.
- Brine temperature: When the brine temperature increases, a white deposit is observed on the surface free from water due to the formation of insoluble carbonates in the brine.
- The quality of water which feeds the distiller: Research has shown when the concentration increases, the production of the distiller decreases.

d) Optical parameters:

- Emissivity
- Absorptivity
- Reflectivity
- Transitivity

e) Thermo-physical parameter:

- Thermal conductivity
- Specific heat
- Kinematic viscosity.
- Dynamic viscosity.

Operation of a solar cascade still (see the Fig. -2):

The principle of distillation is the same in all distillers but the shape of each distiller plays a very important role. The distillation system operates on two scientific principles: evaporation and condensation. The absorber in this system is a cascade, black-bottomed container, filled with seawater and topped with transparent glass. The amount of heat that comes from solar radiation is absorbed by the black material which will accelerate the rate of

evaporation and because of the waterfall shape of the absorber the water heats up more quickly. The production is high when the mass of water evaporated is low. The condensed steam forms water droplets [4], [5].

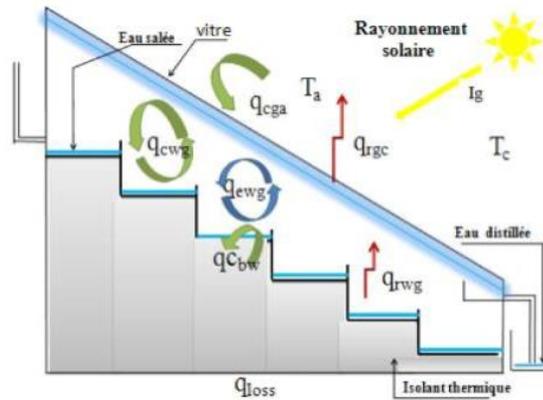


Fig. 2 - Principles operations of solar cascade still [5].

Digital design of a solar cascade still

This part of our work is devoted to the digital design of a solar cascade still using SolidWorks software. We describe the key stages of the design, starting with the creation of an accurate 3D model of the still. We will explore SolidWorks features used to integrate specific parameters, simulate thermal performance, and optimize the design. Numerical modeling will allow us to visualize and evaluate different configurations of the solar cascade still, providing a valuable guide for the realization of a physical prototype [6], [7]. The following Fig.3- describes the design by SolidWorks of solar cascade still:

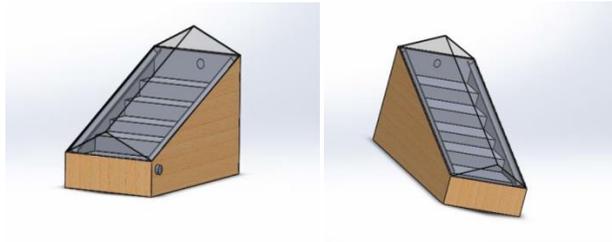


Fig.3- Solar cascade still

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Mesh geometry

In our case, we chose a triangular geometry, because it offers better calculation results in terms of meshing. This meshing step makes it possible to divide the continuous medium into a finite number of elements, thus facilitating subsequent calculations, the following fig.4- describe the mesh geometry.

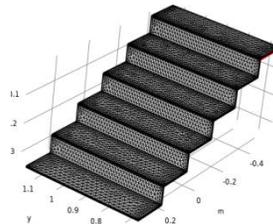


Fig.4- Mesh geometry

Temperature distribution

In the case of the solar cascade still, the simulations revealed a variation in water and air temperature inside the system over a period of 12 hours. During this period, the water temperature gradually increased from 25°C to 46°C.

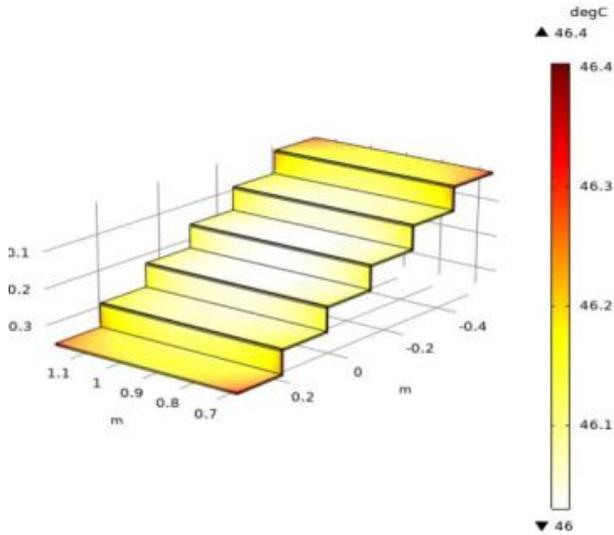


Fig.5- Water temperature distribution(3D OUTLINES)

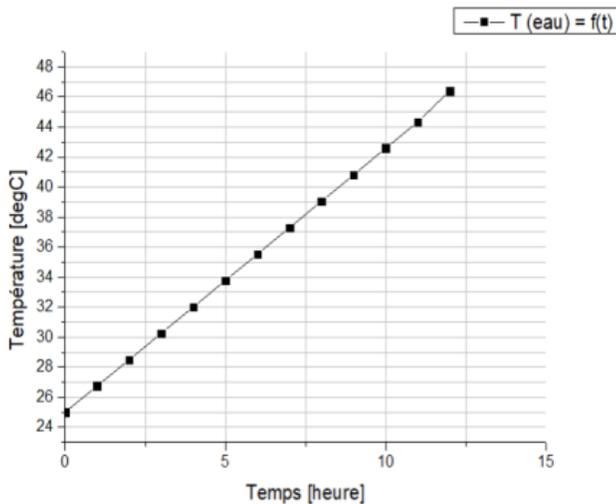


Fig.6- Evolution of water temperature as a function of time

The rise in water temperature is the result of successive exposure to the different heat capture zones of the cascade distiller. Each stage of the distiller helps increase the temperature of the water as it flows through the system. This gradual increase in temperature promotes water evaporation and the production of water vapor at higher temperatures, which is essential for distillation.

Air temperature distribution

Concerning the air inside the distiller, we also observed a significant temperature variation (figure 0 10 a, b and c). The air temperature also varies from 24°C to 47°C during the 12 hours of simulation.

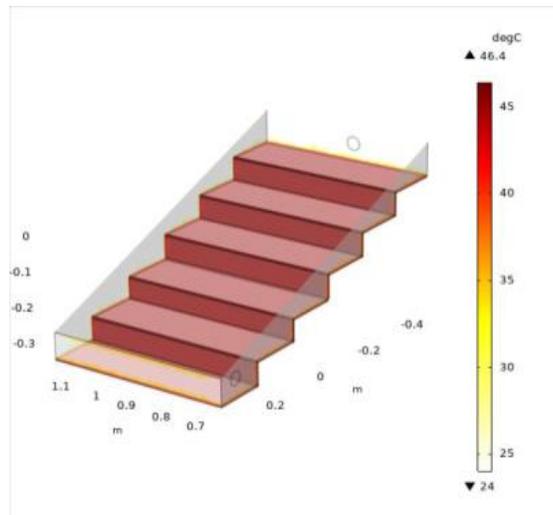


Fig.7- Air temperature distribution inside the distiller

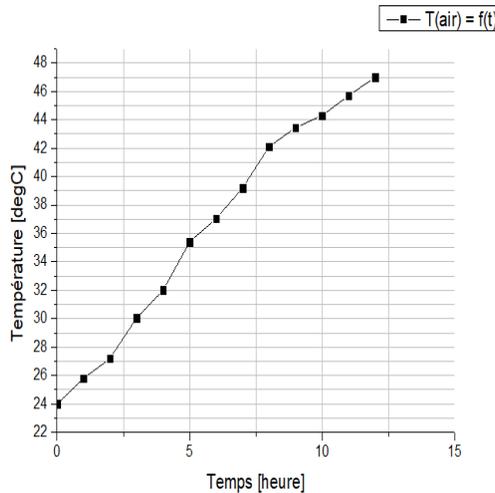


Fig.8 Evolution of Air temperature as a function of time

CONCLUSION

The approach adopted in this work is distinguished by its focus on the digital design of the distiller using SolidWorks software and the simulation of thermo-fluidic phenomena inside the distiller using COMSOL Multiphysics software. This combined methodology allowed us to analyze in detail the performance of the distiller and to interpret the results obtained in a solar cascade still, we saw a greater increase in water temperature, from 25°C to 46°C over the same period. This increased significant increase can be attributed to the cascade effect, which improves heat absorption and promotes a faster increase in water temperature.

Références

- [1] « L'innovation une problématique de la gestion de l'eau en Algérie Innovation a problem of water management in Algeria » ElWahat pour les Recherches et les Etudes Vol.13 (N°1) (2020) :1264-1285.
- [2] « Economies d'eau: une nouvelle stratégie face à une situation "préoccupante" » Article d'un journal d'Algérie presse service, mercredi, 28 avril 2021.
- [3] Peter H. Gleick ET Meena Palaniappan, Peak water limits to freshwater withdrawal and use, Proceedings of the National Academy of Science (2010) 107 11155–11162.
- [4] Semiat, R., 2008. Energy issues in desalination processes. Environ. Sci. Technol. 42 (22), 81–93.
- [5] Sengar, S.H., Khandetod, Y.P., Mohod, A.G., 2012. New innovation of low cost solar still. Eur. J. Sustain. Dev. 1 (2), 315–352.
- [6] Kabeel, A.E., 2017. Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study. Appl. Therm. Eng. 113, 684–693. Semiat, R., 2008. Energy issues in desalination processes. Environ. Sci. Technol. 42 (22),81–93.
- [7] Sharshir, S.W., Penga, G., Wu, L., Yang, N., Essa, F.A., Elsheikh, A.H., Mohamed, S.I.T., Kabeel, A.E., 2017. Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study. Appl. Therm. Eng. 113, 684–693.

Analyse multicritère et caractérisation du modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans la région d'Annaba

Azzedine Hani¹, Samir Hani¹, Nabil Bougherira¹, Isam Shahrour², Larbi Djabri¹ and Hicham Chaffai¹

¹Water Resources and Sustainable Development Laboratory, Badji Mokhtar Annaba University, Annaba, Algeria.

²Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, France.

Résumé

La rareté des ressources en eaux conventionnelles, constitue un défi majeur pour le vingt-et-unième siècle et représente pour les pays à climat méditerranéen un souci majeur et une importante préoccupation qui affecte négativement le bien-être des citoyens et menacent l'avenir des générations futures. L'Algérie est classée dans la catégorie « pays en pénurie d'eau ». La gestion intégrée des ressources en eau dans la région d'Annaba, objet de cette recherche, vise à assurer le développement et la gestion coordonnée de l'eau, des territoires et des ressources qui s'y rapportent afin de maximiser le bien-être économique et social de manière équitable et sans toutefois compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux. Le modèle DPSIR (Forces motrices, Pressions, États, Impacts, Réponses) a été sélectionné pour répartir les variables en 5 catégories : socio-économiques ; pressions de pollution ; qualité de l'eau ; impacts écologique et sur la santé de l'homme et la réponse des gestionnaires. Les variables les plus influentes ont été caractérisées et hiérarchisées à l'aide des réseaux de neurones artificiels et des techniques d'évaluation des risques. Les variables sélectionnées ont été classées à l'aide des techniques multivariées, de l'analyse factorielle, des composantes principales et de l'analyse de classification. Ainsi, il a été démontré qu'une combinaison de mesures pratiques est nécessaire pour assurer la gestion durable de l'eau. Cette démarche peut être utilisée pour étudier d'autres systèmes hydrogéologiques du bassin méditerranéen où la ressource en eau subit une pression anthropique inquiétante.

Mots clés : Réseaux de neurones artificiels ; Gestion intégrée de l'eau; Socio-économiques; Annaba.

Multi-criteria analysis and characterization of the integrated water resources management model in the Annaba region

Abstract

The scarcity of conventional water resources is a major challenge for the twenty-first century, and for countries with a Mediterranean climate it represents a major concern that adversely affects the well-being of citizens and threatens the future of generations to come. Algeria is classified as a "water-scarce country". The integrated management of water resources in the Annaba region, the subject of this research, aims to ensure the coordinated development and management of water, territories and related resources in order to maximize economic and social well-being in an equitable manner, without compromising the sustainability of vital ecosystems. The DPSIR model (Driving Forces, Pressures, States, Impacts, Responses) was selected to divide the variables into 5 categories: socio-economic; pollution pressures; water quality; ecological and human health impacts; and management response. The most influential variables were characterized and prioritized using artificial neural networks and risk assessment techniques. Selected variables were classified using multivariate techniques, factor analysis, principal component analysis and classification analysis. In this way, it was demonstrated that a combination of practical measures is needed to ensure sustainable water management. This approach can be used to study other hydrogeological systems in the Mediterranean basin where water resources are under worrying anthropogenic pressure

Key Words: Artificial neural networks; Integrated water management; Socio-economic; Annaba.

¹ Corresponding author: haniazzedine@yahoo.fr

1-INTRODUCTION

Un nouveau modèle conceptuel de gestion intégrée de l'eau est proposé pour la gestion de l'eau de la région d'Annaba. Les variables pertinentes de la gestion de l'eau sont caractérisées et les zones géographiques en situation de pénurie d'eau sont définies [1], [2], [3]. Le but est de savoir comment établir les relations de cause à effet à utiliser comme outils d'aide à la décision. Le modèle adopté intègre à la fois des données socio-économiques (population, revenu, occupation du sol, tourisme taux de raccordement, fuites, ...), des données relatives aux pressions de pollution (déchets solides, génération des eaux usées domestiques, pesticides, fertilisants Chimiques, stations-service, ...), à la qualité de l'eau (Nitrates, Chlorures, nitrites, ...), à la santé publique, aux impacts écologiques (mortalité, perte de productivité, ...) et aux réponses des décideurs (dessalement de l'eau de mer, stockage des eaux pluviales, traitement de l'eau, ...). Il implique le passage d'une approche par l'offre à une approche par la demande pour la gestion des ressources en eau. Les approches intégrées, préventives et éco systémiques ont été introduites. Nous appliquons le développement de la méthodologie de recherche et la validation du modèle adopté à la gestion durable des ressources en eau. Nous analysons les méthodes de l'opinion des experts pour le développement et la validation du modèle et des variables et nous les comparons avec des modèles de gestion bien établis.

2. MATERIELS ET METHODES

Les variables pertinentes ont été caractérisées en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA), l'évaluation du risque sur la santé humaine et de l'opinion des experts. Les variables choisies seront classées en utilisant l'analyse statistique multivariée, l'analyse factorielle et l'analyse en composantes principales ainsi que la classification hiérarchique. Sur la base des résultats de cette recherche de nouvelles recommandations seront élaborées pour assurer la gestion durable de l'eau et maximiser le bien-être économique et social de manière équitable et sans toutefois compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux. Dans cette recherche, un modèle de gestion intégrée de l'eau basé sur la relation de cause à effet abordant le cycle entier de l'eau est utilisé. Des variables hydrologiques ont été développées et classées en 5 catégories qui sont d'ordre socio-économique, des contraintes de pollution, de qualité de l'eau, de l'opinion des experts, d'impact de l'activité humaine, l'évaluation du risque sur la santé humaine [2]. Les variables pertinentes ont été caractérisées en utilisant les Réseaux de Neurones Artificiels. Les variables choisies seront classées en utilisant l'analyse statistique multivariée, l'analyse factorielle et l'analyse en composantes principales ainsi que la classification hiérarchique. La région d'Annaba, située au Nord Est de l'Algérie, est confrontée à une grave pénurie d'approvisionnement en eau de bonne qualité. Les prélèvements d'eau actuels sont très loin de satisfaire la demande en termes de quantité et de qualité : l'approvisionnement en eau domestique est à seulement 100 litres/habitant/jour, comparativement aux 150 l/h/j recommandé par [4]. La surexploitation de l'aquifère a conduit à la baisse des niveaux de l'eau et à la détérioration de la qualité de l'eau en raison de l'intrusion saline. Les teneurs en Chlorures et en Nitrates sont très élevées. Le système aquifère couvre une superficie totale de 760 km². Dans cette recherche, la zone d'étude a été divisée en 21 agglomérations.



Figure 1. Situation géographique la région d'Annaba.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les réseaux neuronaux artificiels (RNA) : les variables socio-économiques : population, revenu par habitant, occupation des sols, tourisme, accès à l'eau potable, le système des eaux usées, la couverture des eaux pluviales, la consommation d'eau par habitant, le prix de l'eau, l'efficacité dans la collecte des recettes, la consommation d'eau pour l'agriculture, l'emploi des femmes, la sensibilisation sont considérés comme des variables d'entrée possible et le captage de l'eau comme variable de sortie. Le meilleur modèle optimal trouvé est un perceptron multicouche MLP (3 couches) avec 7 nœuds cachés et une erreur minimale de 0,089. Le modèle présente de très bonnes performances en termes de vérification, avec un ratio SD de 0,045. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) pour l'apprentissage, la vérification et la validation sont faibles. En outre, le coefficient de corrélation est supérieur à 99% pour l'apprentissage, la vérification et de test, ce qui indique un excellent accord entre les prélèvements d'eau observés et calculés. L'analyse de la sensibilité dans la phase de vérification indique que le revenu par habitant est le facteur socio-économique le plus pertinent, suivi par le tourisme. Les facteurs les plus influents sont dans l'ordre : la consommation d'eau pour l'agriculture, la consommation d'eau par habitant, la population, l'occupation des postes par les femmes, l'approvisionnement en eau, la couverture des eaux usées, le prix de l'eau, la couverture des eaux pluviales, eau non comptabilisée et l'occupation des sols. Le modèle RNA rejette la variable efficacité du recouvrement des recettes. Les résultats des RNA et des avis des experts sont identiques pour la variable approvisionnement en eau et ils diffèrent dans le classement des variables restantes.

La matrice de corrélation : elle montre que le log népérien de l'abstraction de l'eau présente une relation linéaire significative positive avec le ln (couverture des eaux pluviales), le revenu par habitant, ln (consommation d'eau pour l'agriculture), ln (population), ln (eau non comptabilisées) et ln (tourisme). La corrélation positive est plus grande entre les captages et les eaux pluviales, et la plus basse avec le tourisme. L'augmentation du revenu par habitant, l'intensification de la consommation d'eau pour l'agriculture, la croissance de la population et la hausse du nombre de touristes sont des facteurs importants qui influencent la demande en eau. Les prélèvements d'eau augmentent avec les quantités d'eau non comptabilisées. Le ln (captage d'eau) a également une relation linéaire négative avec la sécurité d'accès à l'approvisionnement en eau. Si les prélèvements d'eau augmentent alors que la salinité augmente ceci réduit les possibilités pour les utilisateurs d'accéder à une eau de qualité. Il existe une relation linéaire positive entre ln (population) et ln (tourisme), ln (couverture des eaux pluviales), le revenu par habitant, ln (eau non comptabilisées) et ln (occupation des sols). Le revenu par habitant présente des relations linéaires positives avec ln (couverture des eaux pluviales), ln (tourisme), ln (consommation d'eau pour l'agriculture) et ln (eau non comptabilisée). Le ln (utilisation des terres) présente des relations linéaires positives significatives avec le ln (couverture des eaux usées) et le ln (tourisme), et une relation linéaire négative avec ln (consommation d'eau pour l'agriculture). Le ln (tourisme) présente des relations linéaires positives avec ln (couverture des eaux pluviales), ln (eau non comptabilisées) et ln (couverture eaux usées). L'accès à l'eau potable présente une relation linéaire négative avec ln (eau non comptabilisée). Le ln (système de couverture en eaux pluviales) présente une relation linéaire positive avec ln (consommation d'eau pour l'agriculture) et le ln (eau non comptabilisée). La consommation d'eau par habitant présente une corrélation négative avec le prix de l'eau. Le ln (consommation d'eau pour l'agriculture) présente une relation linéaire positive avec le ln (eau non comptabilisée).

Les analyses multivariées : l'analyse du Cluster a été choisi pour classer les observations et les variables dans la même catégorie de l'ensemble de données, en groupes plus significatifs afin que chaque groupe soit plus ou moins homogène et distinct des autres clusters. L'analyse montre deux groupes distincts de variables. Le 1^{er} comprend le revenu par habitant, la couverture en eau pluviale, le captage d'eau, la population, le tourisme, l'eau non comptabilisée, la consommation d'eau pour l'agriculture et la consommation d'eau par habitant. Il peut être étiqueté comme le captage d'eau. Le 2^{ème} groupe est l'occupation des sols, la couverture des eaux usées, l'emploi des femmes, l'accès à l'eau potable et le prix de l'eau. Il peut être labélisé *occupation des sols*. Le 1^{er} groupe de communes est caractérisé par l'occupation des sols et le 2^{ème} groupe est étiqueté par le captage des eaux souterraines.

Analyse en Composantes Principales (ACP) : elle a été effectuée pour les 5 catégories citées précédemment. L'analyse des facteurs de corrélation entre variables montre que le 1^{er} facteur représente environ 42,24% de la variance totale. Il est fortement corrélé avec le captage d'eau, la récupération des eaux pluviales, la population, le revenu par habitant, le tourisme et les fuites d'eau (corrélation négative). Le 2^{ème} facteur, représentant 16,2% de la variance, est fortement corrélé à la couverture des eaux usées, l'occupation des sols (corrélation négative) et le prix

de l'eau (corrélation positive). Le 3^{ème} facteur, avec 13%, est corrélé significativement avec les prix de l'eau (corrélation négative) et la consommation d'eau par habitant (corrélation positive). Le Prix de l'eau présente une forte opposition avec la consommation en eau par habitant. Sur la base des ordres de grandeur du facteur de coordonnées pour les variables dans l'analyse, le 1^{er} facteur représente le *captage d'eau*. Le facteur 2 serait caractéristique de *l'occupation des sols* et le facteur 3 de *la relation consommation d'eau / prix de l'eau*. Les résultats de l'ACP et de l'analyse des clusters présentent des similitudes et des différences entre les 5 catégories de variables. Toutefois, l'ACP donne plus de détails sur les groupes de variables (facteurs), l'association des individus (secteurs) et les variables correspondantes. Par conséquent, les résultats de l'ACP peuvent être appliqués à la formulation de la stratégie des programmes prioritaires pour gérer le problème de l'eau dans des zones géographiques identifiées. Par ailleurs, l'analyse du cluster peut être utilisée comme un outil à l'amont pour enquêter sur la hiérarchie et les formes des groupes possibles de communes et les variables correspondantes. L'Analyse des facteurs a été utilisée à des fins de comparaison avec les résultats de l'ACP. Le nombre de facteurs importants résultant de l'ACP pour les cinq catégories de variables, ont été utilisés pour l'analyse factorielle. Cette dernière a été réalisée pour les catégories socio-économiques, pression de pollution, état de qualité de l'eau, impact et réponses des gestionnaires. Les saturations des variables socio-économiques montrent que le 1^{er} facteur, avec 38,9% de la variance totale, représente *le captage des eaux dans l'aquifère côtier*. Le 2^{ème} facteur, avec 18,5%, peut être étiqueté « *occupation des sols* ». Le 3^{ème} facteur, 13,7%, montre que *le prix de l'eau* est un paramètre déterminant dans la consommation de l'eau par habitant. L'analyse factorielle révèle un nouvel indicateur important dans le captage des eaux, il s'agit de *la consommation d'eau pour l'agriculture*. Par contre, elle réduit le rôle de la variable tourisme.

CONCLUSION

Dans cette recherche, un nouveau modèle conceptuel a été élaboré en fonction de relations de cause à effet. Il met en évidence les éléments les plus importants et les techniques pour les caractériser, et indique que le développement de la gestion des ressources en eau doit tenir compte des aspects écologiques et de la protection des ressources disponibles. Les variables pertinentes ont été caractérisées et hiérarchisées en utilisant les RNA, les techniques d'évaluation des risques et l'opinion des experts. Les variables retenues ont été classées à l'aide des techniques d'analyse multivariée du cluster, l'ACP et l'analyse factorielle.

Références

- [1] Plan Bleu, (2003) Commission Méditerranéenne du Développement Durable, résultats du Forum de Fiuggi sur les "Avancées de la gestion de la demande en eau en Méditerranée" Constats et Propositions.
- [2] PNUE/PAM-Plan Bleu, (2009) Etat de l'environnement et du développement en Méditerranée. PNUE/PAM-Plan Bleu, Athènes.
- [3] Rivm, (1995) A General Strategy for Integrated Environmental Assessment at the European Environment.
- [4] World Health Organization (2004) *Guidelines for Drinking-Water Quality*, third edn. Vol. 1, Recommendations. WHO, Geneva, Switzerland.

Utilisation des méthodes géostatistiques et des réseaux neuronaux pour aider à la simulation des écoulements souterrains. Cas de la nappe côtière de la fosse Ben Ahmed (Algérie)

Samir Hani¹, Nabil Bougherira¹, Noureddine Guezgouz², Azzedine Hani¹, Larbi Djabri¹ and Hicham Chaffai¹

¹Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable (REDD), Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie

²Faculté des sciences de la nature et de la vie. Université Mohamed Cherif Messadia, Souk-Abras, Algérie

Résumé

Cet article a pour objectif d'aider les concepteurs des modèles numériques des écoulements souterrains à réaliser le calage plus facilement en contraignant les caractéristiques physiques des aquifères à rester à l'intérieur de la fourchette d'erreur donnée par des approches probabilistes.

Dans cette recherche, des méthodes telles que le krigeage, le cokrigeage et les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour cartographier les transmissivités de l'aquifère à partir de paramètres facilement accessibles (débit spécifique et résistance transversale).

La méthode est validée par la calibration du modèle numérique dont la réponse est la plus représentative du comportement de l'aquifère observé sur terrain.

Mots clés : transmissivité, débit spécifique, résistance transversale, krigeage, cokrigeage, réseaux de neurones artificiels, modélisation numérique..

Use of geostatistical methods and neural networks to help simulate underground flows. groundwater flow. The case of the Ben Ahmed coastal aquifer (Algeria)

Abstract

The aim of this paper is to help designers of numerical groundwater flow models to perform calibration more easily by constraining the physical characteristics of aquifers to remain within the error range given by probabilistic approaches.

In this research, methods such as kriging, cokriging and artificial neural networks were used to map aquifer transmissivities from readily available parameters (specific flow and transverse resistance).

The method is validated by calibrating the numerical model whose response is most representative of the aquifer's behavior observed in the field.

Key Words: transmissivity, specific flow, transverse resistance, kriging, cokriging, artificial neural networks, numerical modeling..

¹ Corresponding author: haniazzedine@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Les modèles numériques sont des moyens de plus en plus utilisés par les chercheurs et les gestionnaires aussi bien pour les études des conditions dynamiques des nappes que pour la gestion des ressources en eaux (Hill and Tiedeman 2007). Ils permettent, en effet, de mieux prendre en compte l'hétérogénéité des aquifères, de présenter avec cohérence leur comportement et donc d'aboutir à une stratégie de gestion de la ressource en eaux basée sur des critères économiques et techniques.

En contrepartie, la qualité et la densité des mesures sont devenues l'objet d'une exigence accrue. Cette dernière se manifeste surtout au cours de la phase d'identification du système, lorsque l'on cherche à valider la forme du modèle et à adopter par tâtonnements successifs les paramètres structuraux optimaux. La méthode consiste à procéder par « essais et erreurs » jusqu'à obtenir un modèle qui donne la réponse la plus voisine possible du comportement observé pris comme référence. L'opération est fastidieuse et s'appuie parfois sur des raisonnements empiriques qui nécessitent de nombreux contrôles par recoupement. Dans cette étude de nouveaux résultats sont obtenus en associant à la démarche déterministe du modèle une approche probabiliste permettant de tester avec plus d'objectivité la conformité du modèle.

2. MATERIELS ET METHODE

Il s'agit d'estimer la transmissivité en n'importe quel point de l'espace, à partir de variables faciles à acquérir, et avec une précision optimale. L'hétérogénéité du milieu et la distribution chaotique des propriétés hydrodynamique de l'aquifère incitent à adopter une approche probabiliste (Figure 1).

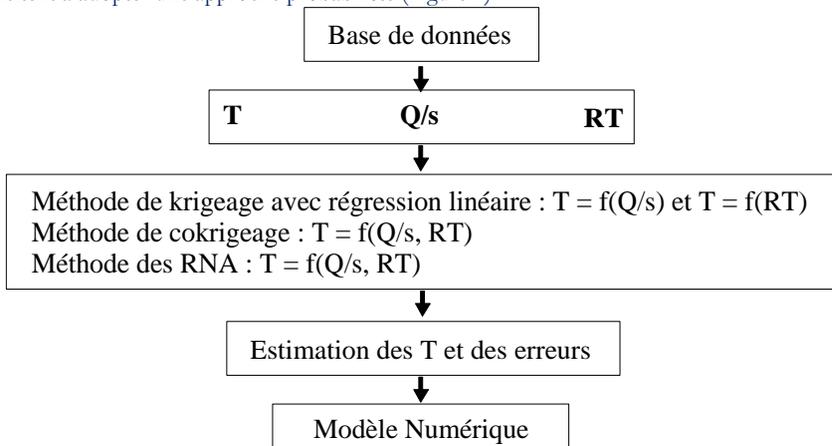


Figure 1. La méthodologie.

Le système aquifère du bassin d'effondrement de Ben Ahmed, situé au Nord-Est de l'Algérie est constitué par des formations mio-plio-quaternaires représentées, de haut en bas, par une couche de limons et des sables formant une nappe superficielle, une couche semi-perméable et d'une épaisse couche de graviers et de graviers constituant le principal aquifère. L'hétérogénéité du milieu aquifère et la distribution chaotique des propriétés hydrodynamique de l'aquifère incitent à adopter une approche probabiliste. L'idée est de faciliter le calage des modèles numériques en évitant les essais arbitraires, lors du calage, en contraignant la variation des perméabilités à rester à l'intérieur de la fourchette donnée par la méthode du krigeage.

3 RESULTATS

3.1- Application de la régression

Des relations linéaires significatives entre la transmissivité d'une part et le débit spécifique et la résistance transversale d'autre part ont été obtenues dans le système aquifère d'Annaba.

Les figures 2a-c montrent le positionnement des variables et le nombre de mesures ayant servi aux calculs.

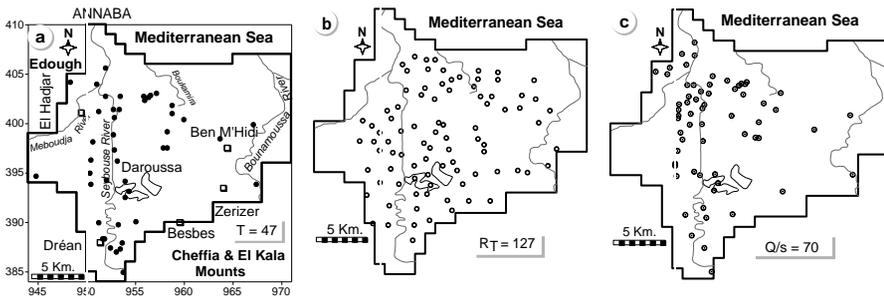


Figure 2. Localisation des points de mesure.

a) de T, b) de R_T et c) de Q/s dans la plaine d'Annaba.

Les traitements statistiques montrent un bon ajustement à une loi log normale allure unimodale.

Avec un coefficient de corrélation, r , égal à 0,8, la variable $\text{Log}T$ s'avère bien corrélée avec les variables $\text{Log}R_T$ et $\text{Log}Q/s$ (figure 3a-b).

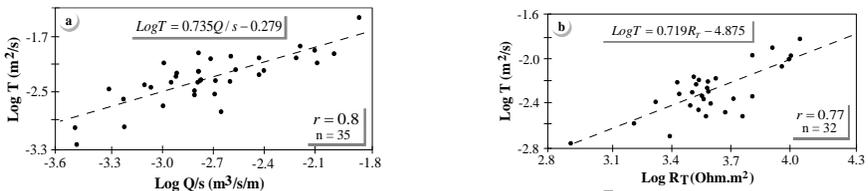


Figure 3 a-b. Régression et coefficient de corrélation

- La présence d'oscillations et d'effets de trou sur les variogrammes des figures 4a, b, c traduit la présence de zones à fortes valeurs juxtaposées à des zones à faibles valeurs (Fosse Ben Ahmed où les variations de faciès sont fréquentes).

- Les effets de pépite, surtout pour T, est dut à des erreurs de mesures, ou au pas d'échantillonnage trop lâche pour mettre en évidence une croissance rapide du variogramme correspondant à une microrégionalisation.

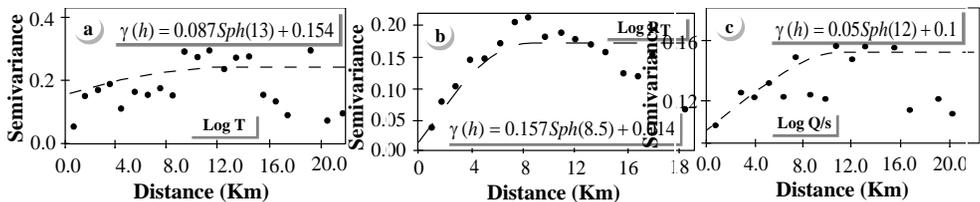


Figure 4a, b, c : Variogrammes expérimentaux et théoriques.

3.2- Krigeage associé à une régression linéaire

La carte des transmissivité paraît peu nuancée, avec des valeurs fluctuant entre 8.10^{-4} et $8.0 \cdot 10^{-3}$ m²/s avec une anomalie à fortes valeurs au sud-ouest des Salines (Figure 5a).

La précision de l'estimation est satisfaisante sur la plus grande partie de la plaine, avec des valeurs de E inférieures à 2.5 (Figure 5b).

La méthode régressive offre un modèle cartographique riche avec une bonne précision de l'estimation.

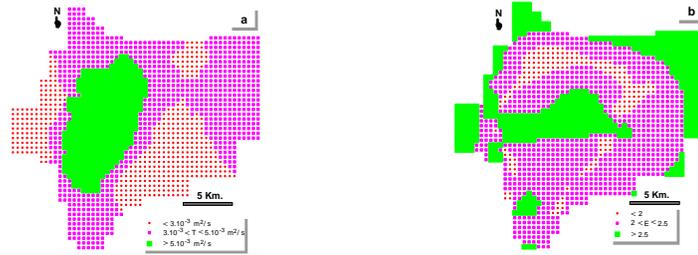


Figure 5a-b. Carte d'égales valeurs de transmissivité (a) et du coefficient d'incertitude E (b).
 Application de la méthode régressive.

3.3- Application du cokrigage :

L'estimation des transmissivités est réalisée sur des mailles carrées de tailles uniformes (500 m par 500 m). Les résultats de l'estimation, exprimés sous forme de représentations cartographiques permettent grâce à l'apport de variables supplémentaire, d'appréhender avec plus de réalisme la variabilité spatiale de la transmissivité.

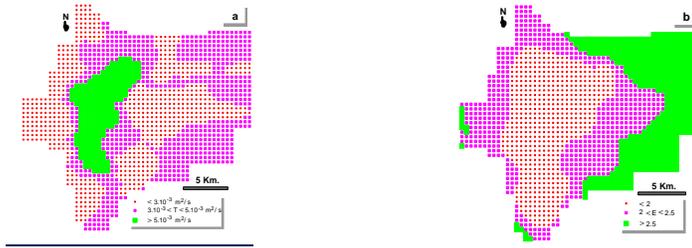


Fig. 6a-b : Carte d'égales valeurs de transmissivité.
 Application de la méthode du cokrigage.

La carte en courbes isovalues établie (Fig. 6a), se révèle nettement plus différenciée que la précédente. Les valeurs de transmissivités plus élevées, s'échelonnent de $1.2 \cdot 10^{-3}$ à $1.06 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

La carte de répartition des erreurs (Fig. 6b) montre que, hormis le secteur nord-est de la plaine ainsi que les secteurs situés au Sud, partout ailleurs l'estimation du T a été faite avec rigueur.

3.4- Krigeage associés aux réseaux de neurones artificiels

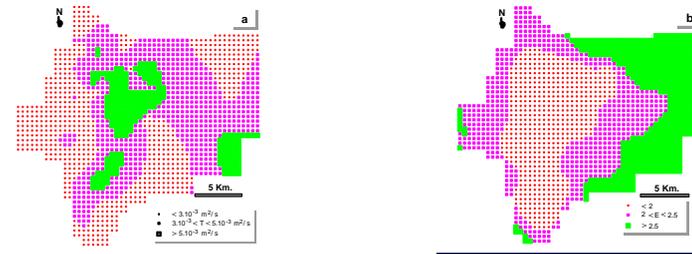


Figure 7a-b. : Carte d'égales valeurs de transmissivité.

Application de la méthode des réseaux de neurones.

Les plus fortes valeurs de transmissivité se situent le long de la vallée de la Seybouse et coïncident avec l'axe de la fosse de Ben-Ahmed (figure 7a). La représentation cartographique des variances de krigeage (figure 7b) montre que l'estimation de la transmissivité est d'autant plus précise que la densité des points de mesure est forte.

3.5- Simulation numérique des écoulements souterrains

Le code Modflow (Harbaugh AW, 2005) est utilisé en régime permanent sur l'état piézométrique relevé en avril 2000 (Fig. 8). La carte de transmissivité déduite du calage du modèle numérique (Figure 9), présente une grande analogie avec la distribution générée par la méthode de krigeage associée aux réseaux neuronaux.

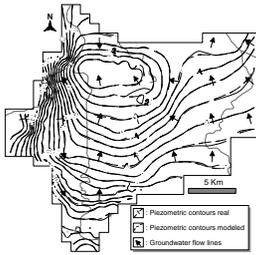


Figure 8. Comparaison entre piézométrie calculée et mesurée en régime permanent.

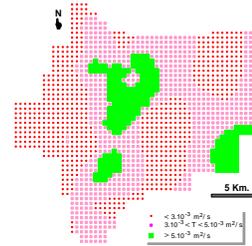


Figure 9. Carte d'égal valeurs de transmissivité. Application du modèle.

En se basant sur des considérations purement méthodologiques, on notera que la carte obtenue à partir des réseaux de neurones artificiels et à un degré moindre celle du cokrigage, permettant d'associer plusieurs variables d'origine différente dans l'estimation, s'avèrent préférables à la régression. Les deux méthodes exploitent un minimum d'hypothèses et à l'inverse de la méthode régressive, insèrent directement les variabilités spatiales de toutes les variables. En plus, l'utilisation des résultats de ces deux approches (ANN et cokrigage) permet de minimiser les écarts entre les réponses mesurées et les réponses simulées et donc d'éviter les simulations redondantes durant la phase du calage du modèle.

Tableau 1. Statistiques des résultats obtenus par différentes méthodes.

Méthodes	Valeurs estimées					Données de pompage				
	Min.	Max.	Moy.	E-T.1	C.V.	Min.	Max.	Moy.	E-T.2	C.V.
Régression	-3.089	-2.066	-2.451	0.1960	8	0.117	0.331	0.174	0.0433	24.8
Cokrigage	-2.913	-1.975	-2.326	0.1668	7.1	0.102	0.363	0.202	0.0521	25.2
ANN	-2.870	-1.906	-2.312	0.1655	7.3	0.100	0.345	0.213	0.0512	25.3
Modél. Num	-2.780	-1.912	-2.298	0.1567	7.2	0.111	0.334	0.209	0.0544	25.5

CONCLUSION

Les résultats obtenus sous forme de cartes des moyennes des transmissivités et de leur variance ont servis de champs d'entrée lors du calage du modèle numérique des écoulements souterrains et pour éviter les simulations redondantes. En effet par cette approche, on cherche à minimiser l'écart entre la piézométrie calculée par le modèle et la piézométrie mesurée en contraignant les paramètres structuraux à rester dans les limites fixées par l'approche probabiliste.

Les réseaux de neurones associés au krigeage et, à un degré moindre, le cokrigage donnent les meilleurs résultats en fournissant des valeurs moyennes par maille les plus proches des résultats de la simulation numérique. Les deux méthodes exploitent un minimum d'hypothèses et à l'inverse de la méthode régressive, insèrent directement les variabilités spatiales de toutes les variables.

Références

- [1] Hill MC, Tiedeman CR (2007) Effective groundwater model calibration, with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. Wiley, New York
- [2] Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the ground-water flow process. U.S. Geological Survey, Reston, Techniques and Methods 6-A16

Agriculture et gestion des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : quel est l'impact du système transfert d'eau potable du Notto-Diosmone-Palmarin (NDP) dans la résilience des activités maraîchères dans le bassin arachidier (Sénégal)

Mouhamadou Mansour Nguirane^{1,2}, Awa Niang Fall^{1,2}, Nathalie Pottier^{2,3}, Wally Faye^{1,2}, Coura Kane^{2,4}
Abdoulaye Faty^{1,2} and Birane Cisse^{1,2}

¹ Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)/Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usages de l'Eau (EDEQUE) – Sénégal

² Unité Mixte Internationale (UMI) Soutenabilité et Résiliences (SOURCE), IRD, BP 1386, CP18524, Dakar

³ Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) 47 boulevard Vanban 78047 Guyancourt - France

⁴ Université Alioune DIOP de Bambey (UADB) BP 30, Bambey (Diourbel) - Sénégal

Résumé

Le maraîchage est l'une des activités agricoles du bassin arachidier, pratiqué en saison sèche après les récoltes. Cependant au cours des décennies 70, 80, et 90, la région a subi des transformations environnementales qui ont fortement éprouvé cette activité. La longue sécheresse et la forte variabilité pluviométriques ont entraîné l'abaissement du niveau des nappes, l'assèchement des zones humides, l'extension des « tanns », l'invasivité des basses vallées par les eaux marines, le tarissement précoce des puits, et la disparition des ligneux au profit des herbes. Les nappes profondes captées entre 80 et 300m sont de mauvaise qualité physico-chimique et la mauvaise gouvernance des infrastructures hydrauliques contribue à la précarité de l'activité de maraîchage. Cependant, le système de transfert d'eau du Notto Diosmone Palmarin (NDP) intervenu dans le cadre des réformes de l'hydraulique rural, consistant à transférer de l'eau des zones pourvues vers les zones à fortes contraintes hydrauliques semble redonner vie à cette activité. La disponibilité d'une eau en quantité et de meilleure qualité a entraîné une forte recomposition des activités économiques, particulièrement le maraîchage qui avait disparu dans de nombreux villages. L'objectif de cet article est d'analyser l'impact du réseau de transfert d'eau du NDP dans le développement du maraîchage sur l'axe Thiès-Fatick dans le centre-ouest du bassin arachidier. Pour ce faire, nous avons effectué des enquêtes socio-économiques et des entretiens avec les maraîchers, les gestionnaires du réseau, et les autorités locales. Les résultats des enquêtes réalisées dans la zone de desserte du système de transfert d'eau mettent en évidence une reprise du maraîchage dans presque toute la zone et une diversification des spéculations cultivé mais également la capacité de résilience des populations du bassin arachidier. La bonne maîtrise de l'eau et une meilleure gestion hydraulique ont permis à la population de développer une résilience socioéconomique. Toutefois, la cherté des branchements a poussé 46 % maraîchers à développer des stratégies d'adaptations afin de réduire leurs vulnérabilités

Mots clés : bassin arachidier, sécheresse, salinisation, transfert d'eau, maraîchage, adaptation

Agriculture and governance of water resources in a context of climate variability: what is the impact of the Notto-Diosmone-Palmarin (NDP) drinking water transfer system on the resilience of market gardening activities in the groundnut basin (Senegal)?

Abstract

Market gardening is one of the agricultural activities in the groundnut basin, practised in the dry season after harvests. However, during the 70s, 80s and 90s, the region underwent environmental changes that severely affected this activity. Prolonged drought and highly variable rainfall led to a lowering of the water table, the drying up of wetlands, the spread of "tanns", the invasion of low-lying valleys by marine waters, the early drying up of wells, and the disappearance of woody plants in favour of grasses. The deep aquifers tapped between 80 and 300 metres below sea level are of poor physico-chemical quality, and poor governance of the water infrastructure contributes to the precarious nature of market gardening. However, the Notto Diosmone Palmarin (NDP) water transfer system, which was introduced as part of the rural water reforms and consists of transferring water from well-stocked areas to areas with severe water constraints, seems to be revitalising this activity. The availability of more and better quality water has led to a major shift in economic activities, particularly market gardening, which had disappeared from many villages. The aim of this article is to analyse the impact of the NDP water transfer network on the development of market gardening on the Thiès-Fatick axis in the central-western groundnut basin. To do this, we conducted socio-economic surveys and interviews with market gardeners, network managers and local authorities. The results of the surveys carried out in the area served by the water transfer system show a resumption of market gardening in almost the entire area and a diversification of the crops grown, but also the resilience of the people living in the groundnut basin. Good control over water and better water management have enabled the population to develop socio-economic resilience. However, the high cost of connections has prompted 46% of market gardeners to develop coping strategies to reduce their vulnerability.

Key Words: transmissivity, specific flow, transverse resistance, kriging, cokriging, artificial neural networks, numerical modeling..

¹ Corresponding author: mouhamadoumansour.nguirane@ucad.edu.sn

INTRODUCTION

La disponibilité de l'eau se pose de façon cruciale dans le Sahel qui a été fortement éprouvé par la longue période de sécheresse des années 70-80. Dans la plupart des pays d'Afrique subsahariens, en particulier au Sénégal, la disponibilité de l'eau fait face à de nombreux problèmes relatifs au changement climatique et aux difficultés de financement du secteur (ALBERGEL, 2008). Cette situation est beaucoup plus manifeste dans les zones rurales où la forte utilisation des ressources en eau a fini par aggraver la vulnérabilité hydraulique des communautés. Or dans ces zones l'eau reste le principal levier de l'économie rurale car étant au cœur du système de production. Le déficit d'accès à l'eau dans ces milieux rend difficile la pratique des activités agricoles (ABADIE, 2012). Ainsi, cette situation met les ménages dans une spirale de précarité ce qui les enfonce dans une profonde pauvreté (DIENG, 2017). L'agriculture est l'activité humaine la plus prépondérante des variations climatiques (IPAR, 2014). Dans le bassin arachidier, où elle est essentiellement pluviale, elle occupe l'essentielle de la population active et constitue la principale source de revenu des ménages (ANSD, 2015). Cependant, la longue période de sécheresse des années 70-80, a entraîné une réduction de la pluviométrie de l'ordre de 30 % dans l'estuaire du Sine-Saloum et 15 % dans le haut bassin entre 1970 et 2000 (ANACIM, 2016). Il s'en est suivi de fortes modifications environnementales qui représentent une contrainte supplémentaire pour un système de production en équilibre déjà précaire avec la variabilité climatique actuelle, surtout face au défi majeur pour le secteur agricole que représente la croissance démographique (IPAR, 2014). Cette situation a fortement affecté les ressources en eau de surface et les nappes souterraines de la région, provoquant l'assèchement des zones humides et l'envahissement des basses vallées par les eaux salées de la mer. A ces facteurs s'ajoute la mauvaise qualité des nappes profondes et les difficultés d'exhaure du fait de la forte profondeur entre 80 et 300m, car une partie de la région se trouve du point de vue hydrogéologique dans la bande salée (DGPRES, 2014). Ces problèmes hydrauliques ont fortement affecté les rendements agricoles et la qualité des terres arables avec l'extension des « *tanns* » qui sont des sols sulfatés acides (FAYE S. , 2017). Cette situation hydraulique de plus en plus compliquée a poussé l'état du Sénégal à s'engager dans une réforme de l'hydraulique avec un changement de paradigme dans la gestion de l'hydraulique rural. Ce changement d'approche apporte une innovation avec la mise en place d'un système de transfert d'eau des zones pourvues en eau vers des zones pauvres en eau. Ainsi, l'Association des Usagers des Forages Ruraux-motorisés (ASUFOR) qui assurait la gestion de l'eau est remplacée par l'Office des Forages Ruraux (OFOR), avec une implication directe de l'Etat dans la gestion. C'est dans ce contexte que le Notto-Ndiosmone-Palmarin qui est le premier système de transfert a vu le jour pour transporter de l'eau à partir d'une batterie de forages de la zone de Tassette (région de Thiès) vers jusqu'au îles du Saloum (OFOR, 2019). Cette réforme de l'hydraulique rurale, consistant à transférer de l'eau des zones pourvues vers les zones à fortes contraintes hydrauliques intervient pour répondre à la problématique de l'accès à l'eau productives mais également aider le secteur agricole à mieux s'adapter face aux défis du changement climatique. Ainsi, des investigations sont nécessaires pour déterminer les réels impacts de ce système de transfert sur la relance des activités maraichères et sur l'amélioration des conditions de vie des communautés rurales.

1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin arachidier est une zone agroécologique d'importance capitale dans l'économie du Sénégal. Il couvre environ 1/4 de la superficie du Sénégal, regroupe 60 % de sa population rurale et fournit plus 65 % de sa production agricole (CSE, 2016). Il s'étend sur environ 200 km du nord au sud et 350 km d'Ouest en Est. Comme son nom l'indique, le bassin arachidier est une zone où la culture arachidière était pratiquée de façon traditionnelle et couvre une superficie totale de 51 315 km² (ANAT, 2020). Notre zone d'étude couvre la partie la plus occidentale de ce bassin, notamment la façade côtière allant de Thiès jusqu'aux îles du Saloum (*Carte 1*). C'est une zone fortement peuplée où l'activité principale reste l'agriculture, à côté du maraîchage et de l'élevage. C'est une région à topographie relativement basse excepté le plateau de Thiès où les altitudes peuvent atteindre 110m (DGPRES, 2014). Les sols sont dominés par les sols ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés communément appelé sols Dior et les sols hydromorphes et les « *Tanns* » qui sont des sols sulfatés acides (SADIO, 2011). Le réseau hydrographique qui n'existe qu'en intermittence pendant la saison des pluies dans la zone continentale est marquée en aval par un estuaire inverse hypersalé. Le paysage du delta est dominé une mangrove qui occupe tout le delta du Saloum. Son climat est de type sahélien au Nord et sahélo-soudanien au sud avec des précipitations dont la pluviosité et la régularité s'accroissent suivant un gradient qui va du nord vers le sud (BODIAN, 2014).

2.2. Méthode

2.2.1. Les données climatiques

Nous avons utilisé les données de la pluviométrie mensuelle de 1960 à 2019 de deux stations climatiques (Fatick et Thiès) et de trois postes pluviométriques (Mbour, Foundiougne et Toubakouta). Le choix de ces stations s'explique par la qualité des données, la longueur des chroniques et leurs positionnements par rapport à notre zone d'étude. Ainsi, pour déterminer les tendances pluviométriques de la région nous avons calculé les écarts par rapport à la moyenne, les indices standardisés de précipitations pour chacune de ces stations et postes pluviométriques. L'analyse des séries chronologiques longues s'explique par un besoin de remonter le plus longtemps possible dans le temps pour prendre en considération la période humide d'avant 1970, la période de sécheresse et la période actuelle.

2.2.2. Les données hydrauliques

Ces données sont collectées auprès de l'Office des Forages Ruraux (OFOR), de la Société d'Exploitation des Ouvrages Hydrauliques (SEOH) et concernent la production en eau, le linéaire de réseau de transfert d'approvisionnement en eau potable du Notto-Diosmone-Palmarin (NDP), le nombre de branchement privés (domiciles), le nombre de bornes fontaines, le nombre d'abonnés maraichers et commerciaux (boulangers, stations-services, hôtels, restaurants), les abreuvoirs, les systèmes de tarification de l'eau, et le prix d'un abonnement. En plus de ces données nous avons collecté auprès de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE) les données des forages situés dans la zone de transfert en ce qui concerne les nappes captées, la profondeur ainsi que la qualité de l'eau.

2.2.3. Les données socio-économiques

Ces données ont été obtenues à partir d'enquêtes ménages auprès des populations de la zone, d'entretiens avec les structures de gestion de l'eau à savoir les Associations des Usagers des Forages Ruraux (ASUFOR), la Société d'exploitation des Ouvrages Hydrauliques (SEOH), l'Office des Forages Ruraux (OFOR), les personnes ressources (les maires et conseillers municipaux, les chefs de villages, les agents de développement) et des focus groupes auprès des (groupement et associations de femme transformatrices, des associations d'éleveurs etc.).

Dans le but faire une meilleure homogénéisation de nos enquêtes de terrain, la méthode spatiale non probabiliste a été choisie comme méthode d'échantillonnage. L'échantillonnage non probabiliste est utilisé lorsqu'il n'est pas possible de constituer une liste exhaustive de toutes les unités de sondage. Il existe plusieurs techniques d'échantillonnage non probabilistes. Celle adoptée est l'échantillonnage par « boule de neige » ou échantillonnage par réseau. Cette méthode consiste à choisir des individus au sein de la population cible puis à d'interroger chacun des individus ayant été sélectionnés. La taille de l'échantillon s'élève à 550 ménages dont 200 acteurs agricoles, 50 commerciaux et 300 ménages répartis dans 10 communes (*Tableau 1*). Nous avons établi une proportionnalité pour déterminer le nombre de ménage à interroger dans chaque village. Les enquêtes sont réalisées à l'aide d'un questionnaire ménage en utilisant l'outil Kobocollecte sur un pas de temps de 1 ménage sur 3. En effet, l'outil Kobocollecte reste un moyen très performant et efficace pour effectuer des enquêtes socio-économiques et pour collecter de données sur le terrain. Il offre des fonctionnalités de saisies numériques avec possibilités de se connecter à un serveur accessible depuis partout grâce à l'accès à une connexion internet. Ce logiciel permet d'enregistrer les coordonnées géographiques des sites enquêtés avec une possibilité d'exportation des données d'enquêtes sous plusieurs formats dont Excel, exploitables directement avec les logiciels de cartographie et de traitement des données. Le choix des communes s'est effectué en tenant compte de leur situation en fonction du réseau de transfert du Notto-Diosmone-Palmarin (NDP) soit en début de réseau, au centre ou en bout de réseau.

Tableau 2 : Echantillonnage des communes sélectionnées et des ménages à enquêter

Communes	Nbre de concessions	Nbre de ménages	Echantillonnage (15%)	Situation des communes En fonction du NDP
Tassette	210	468	70	Début réseau
Ndiagianiao	316	425	64	Début réseau
Fissel	192	333	50	Début réseau
Tattaguine	279	471	72	Centre du réseau
Fimela	300	512	78	Centre du réseau
Sésene	123	257	40	Centre du réseau
Djilasse	106	201	30	Centre du réseau
Bassoul	105	249	38	Bout de réseau
Dionewar	274	414	63	Bout de réseau
Palmarin	121	296	45	Bout de réseau
Total	2026	3626	550	

Source : Travaux d'enquêtes de terrain M. M. Nguirane, Mars 2022

Le but de ces enquêtes ménages est d'appréhender le point de vue de la population sur la gestion de l'hydraulique rurale, sur leur accès à l'eau et sur la qualité de l'eau. Cela permet de mesurer en partie l'efficacité de la politique hydraulique du monde rurale face aux chocs climatiques, et d'apprécier les limites de gouvernance axées sur le Partenariat Public Privé (PPP). Ces enquêtes permettront également d'identifier les opportunités offertes par le système de transfert d'eau potable du Notto-Diosmone-Palmarin (NDP) dans la relance des activités et les stratégies de résiliences adoptées par les ménages pour réduire leurs vulnérabilités. Pour les entretiens semi-structurés et les Focus groupes nous nous sommes entretenus avec les associations et groupements d'agriculteurs, d'éleveurs, les Groupements d'Intérêts Economiques (GIE), les organisations de femmes transformatrices, les acteurs et Opérateurs Economiques (boulangers, infrastructures hôteliers, gérants stations de service, entrepreneurs, unités de vente des eaux en sachets etc.). Nous avons également questionné les responsables de l'OFOR qui signe les contrats d'affermages, ainsi que la Société d'Exploitation des Ouvrages Hydrauliques (SEOH) qui gère le réseau d'eau potable, de la brigade des forages de Fatick, les comités de gestion ou Associations des Usagers des Forages Ruraux (ASUFOR) de Moundé et de Djirnda.

2.2.4. Les données sur la qualité de l'eau

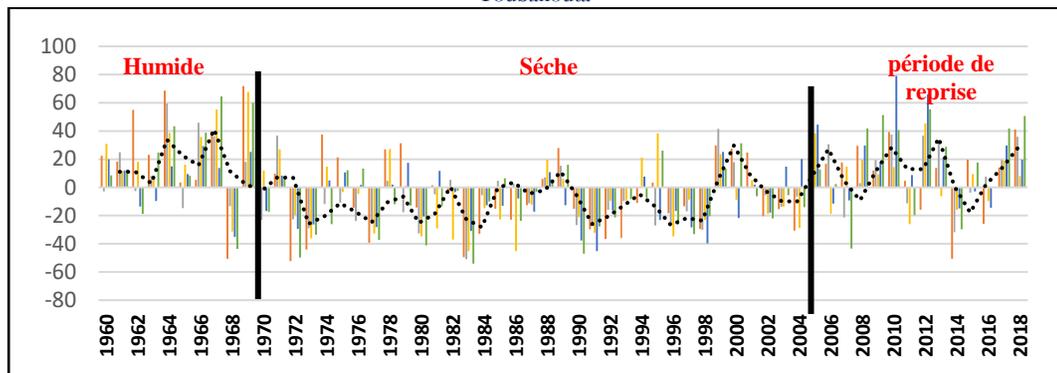
Nous avons effectué des mesures *in-situ* sur un échantillon de quarante-cinq (45) puits qui captent des systèmes d'aquifères superficielles et les lentilles d'eau douce qui sont des nappes fragiles et reposant sur un équilibre dynamique eau douce/eau salée. Les paramètres mesurés sont le Potentiel d'Hydrogène (pH), la Conductivité électrique (CE) en micro siemens, la Salinité (S) en g/litre et le Total Dissout de Solide (TDS). Les mesures de paramètres physiques ont été effectuées par le multi-paramètre Consort C6010. L'appareil a été calibré au laboratoire avec quelques tests de vérifications avant d'aller sur le terrain pour s'assurer de la qualité des mesures. Après chaque point de mesure (puits), l'appareil est proprement rincé avec de l'eau distillée avant de mesurer à nouveau un autre puits.

3. RESULTATS

3.1. Une forte irrégularité pluviométrique

L'analyse des écarts par rapport à la moyenne de 1960 à 2019 au niveau de toutes les stations étudiées permet de distinguer trois périodes distinctes : une période humide excédentaire de 1960 à 1969, une longue période déficitaire allant globalement de 1970 à 2008 où on ne rencontre que quelques années excédentaires et une période de reprise pluviométrique de 2009 à 2019 (ANACIM, 2016) (Figure 1). Les moyennes pluviométriques annuelles des stations qui couvrent notre zone d'étude à savoir Fatick, Mbour et Thiès qui étaient respectivement de 711,54mm, 757,07mm et 617,30mm entre 1960 et 1969 sont tombées à 527,51mm, 485,3mm et 441,83mm entre 1970 et 2008 pour atteindre 685,47mm, 705,72 mm et 485,93mm pour la période 2009-2018. Les déficits les plus importants de la série sont enregistrés durant la période de 1969 à 2008 avec -65,18mm observé au niveau de la station de Mbour en 1972 (BODIAN, 2014). On note une certaine reprise pluviométrique depuis 2009 mais avec des totaux pluviométriques encore loin de la période humide 1960-1969. Toutefois la série est encore courte pour confirmer une reprise pluviométrique effective au niveau des stations étudiées (FAYE, 2022).

Figure 1 : Evolution des écarts à la moyenne de la pluviométrie des stations de Thiès, Mbour, Fatick et Toubakouta



Source : ANACIM, 2019

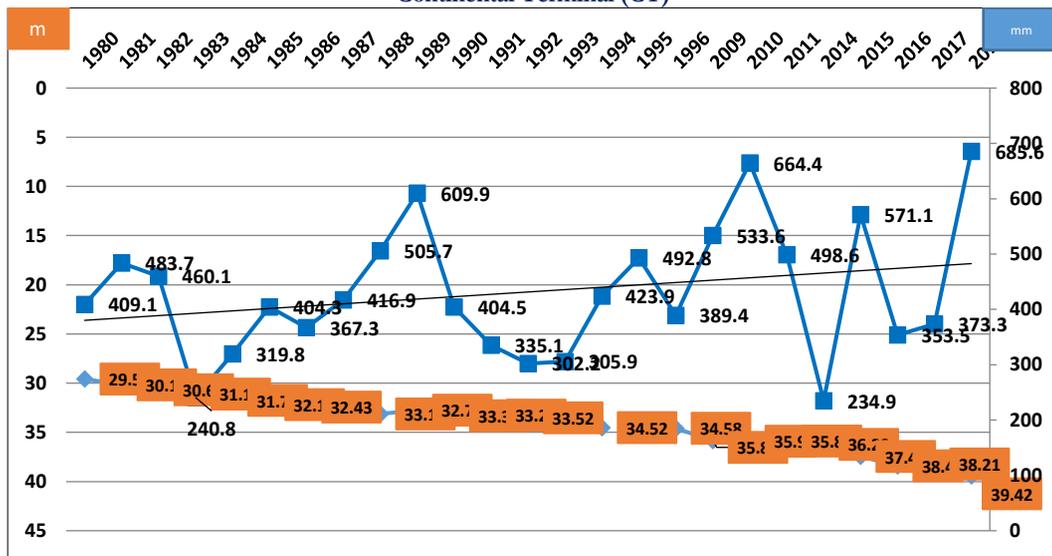
L'analyse spatiale de la pluviométrie montre un gradient pluviométrique Est-Ouest, plus on se rapproche du littoral c'est-à-dire des stations de Fatick Toubakouta et Mbour, plus les précipitations augmentent (ANACIM, 2016). L'analyse spatio-temporelle des données pluviométriques annuelles montre que non seulement les quantités de pluies varient d'une année à l'autre, mais aussi une tendance à la baisse qui s'était dessinée depuis le début des années 1970 au niveau de Fatick et même comme un peu partout ailleurs dans le pays (Malou, 2004). Cette situation est suivie par une période de retour assez timide de la pluviométrie enregistré dans de nombreuses stations de la zone au début des années 2000. De façon globale, la pluviométrie observée dans le bassin arachidier reste déficitaire comme c'est le cas dans tout le Sahel. Cela se manifeste par une régression pluviométrique observée avant 1970 et marquée par une variabilité interannuelle et des déficits. Ces déficits pluviométriques sont estimés à plus de 30 % dans l'estuaire du Sine-Saloum et 15% dans le haut bassin (DGPRE, 2014). La distribution spatiale de la pluviométrie montre une diminution des hauteurs de pluies allant du sud vers le nord durant les années 1990.

À l'échelle de la région, la distribution spatiale des précipitations montre une augmentation des pluies suivant un gradient nord-sud et est-ouest (Faye, 2016). Cette situation entraîne un déficit de recharge des nappes et par conséquent un problème d'accès à l'eau pour l'irrigation vu que la zone ne dispose pas d'eau douce en surface. La seule possibilité pour les maraichers reste les eaux souterraines pour disposer de l'eau douce pour effectuer leurs activités. Ainsi, cette situation entraîne une élévation du biseau salé. La péjoration climatique des dernières décennies a fini par entraîner une raréfaction des eaux douces en surface (DACOSTA, 2012). Le réseau hydrographique de cette zone est de ce fait complexe et impossible à appréhender de façon globale, excepté dans les petits sous-bassins-versants. Le Sine et le Saloum ont des écoulements temporaires et dans leur cours aval, l'eau y est très salée (Mendy, 2012).

3.2. Une baisse drastique des nappes et mauvaise gestion de l'eau

Les irrégularités pluviométriques ont fini par entraîné une raréfaction des eaux pluviales favorisant une faiblesse des infiltrations autrement dit les nappes ne sont pas recharger correctement. Cette a entraîné à son tour une baisse drastique du niveau statique des forages et des puits. Cela a également provoqué une rapide élévation du biseau salé et aggrave les problèmes d'accès en eau potable dans la zone.

Figure 2 : Suivi des variations pluviométriques et des Niveaux Statiques (NS) de la nappe du Continental Terminal (CT)



Source : DGPRE & ANACIM, 2022

L'évolution du niveau piézométrique (NS) montre une baisse considérable du niveau des nappes en relation avec les déficits pluviométriques qui ont marqué la zone de 1970 à 2008. Cette baisse est plus sensible au niveau du continental terminal qui est la plus accessible pour la population ainsi qu'au niveau du paléocène et de l'éocène. Il n'existe pas d'observation antérieure à la sécheresse pour les 13 piézomètres dont nous disposons excepte l'éocène qui commence en 1980 jusqu'à 2019. La relation entre l'évolution pluviométrique et les niveaux statiques des nappes

phréatiques montre que la nappe du Continental Terminal (CT) a subi considérablement l'influence des précipitations annuelles depuis quelques. En 1980, pendant la période de sécheresse, on note un NS de -29,58m pour une pluviométrie de 409,1mm ; en 1989, le NS est inférieur (-32,74 m) malgré une pluviométrie plus importante (609,9mm). Cette situation traduit le phénomène de rabattement de la nappe qui ne se recharge pas convenablement à cause des irrégularités pluviométriques et/ou de l'intervention anthropique. Depuis 2000, malgré un retour de la pluviométrie, le niveau des nappes continue à baisser (Figure 1). De façon générale, à Fatick l'évolution de Niveau Statique (NS) des piézomètres qui se trouvent tout sur le continental terminal présente de nombreuses caractéristiques d'un piézomètre a un autre mais reste toujours dépendante par rapport à l'évolution de la pluviométrie. Par exemple à Keur Mamour le NS qui était de -34,9m en 1976 avec un cumul pluviométrique annuel de 472,4mm et en 2002 le NS est passé à -35,42 alors que la pluviométrie avait subi une longue période sécheresse et se retrouve à 585,9mm. Pour ce qui est de du piézomètre de Ndiagne nous notons la même chose en 1974 le NS se trouvait à -23,98m et le cumul pluviométrique annuel de 548,5mm, de 74 à 76 la baisse pluviométrique a entraîné une baisse du ns qui est passé à -28,52m. Depuis 2002 nous notons une légère amélioration du NS accompagné par une de retour de la pluviométrie dans la zone. A Fatick l'évolution du NS en rapport avec la pluviométrie montre une tendance identique à celle de la région de Thiès. En 1976 le NS est passé de -15,12m à -15,58m en 2002 alors que la pluviométrie est passée 672,6mm à 462,7mm.

29,58m pour une pluviométrie de 409,1mm ; en 1989, le NS est inférieur (-32,74 m) malgré une pluviométrie plus importante (609,9mm). Cette situation traduit le phénomène de rabattement continue de la nappe qui ne se recharge pas convenablement à cause des irrégularités pluviométriques et/ou de l'intervention anthropique. Depuis 2000, malgré un retour de la pluviométrie, le niveau des nappes continue à baisser à de la surexploitation des eaux souterraines seules alternatives pour l'alimentation en eau potable.



Photo 1 : Raréfaction des eaux des nappes superficielles et abandons des puits à Diosmone (a), Loul Sésène (b), et Fissel (C)

(Source : cliché de M.M. Nguirane, enquête de terrain, 2022)

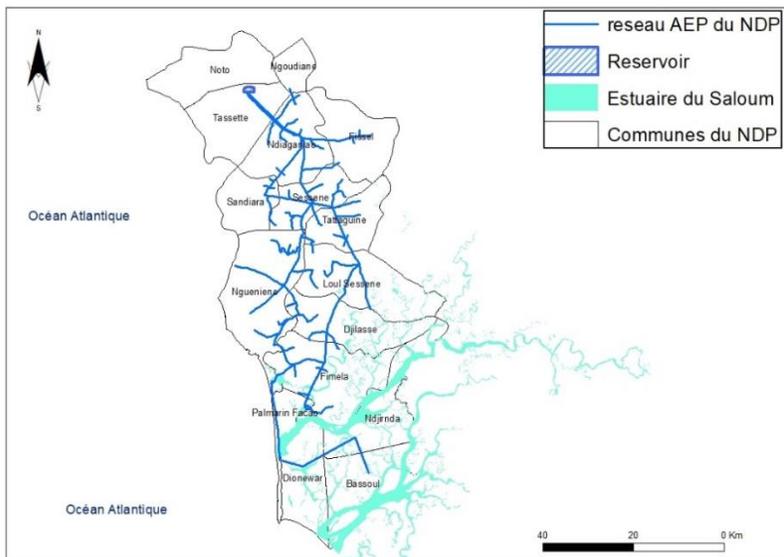
Cette situation se traduit par des problèmes d'accès à l'eau potable aigu vu la quasi-absence des eaux de surface dans la zone. Toutefois 21% acteurs agricoles interrogés abandonnent les activités maraichères à cause de la non-disponibilité de l'eau. Ainsi, ces acteurs se convertissent vers des activités comme le commerce ou opte pour la migration à la recherche de meilleures conditions de vies dans les espaces urbains.

La surexploitation des ressources en eau souterraine (puits, forages etc.) entraîne une rapide élévation du biseau salée, se traduisant par une dégradation de la qualité de l'eau et l'abandon précoce des puits par les ménages (DIENG NDAO, 2017). Cette situation aggrave la vulnérabilité des acteurs agricoles surtout les maraichers qui sont confrontés à de nombreuses difficultés avec la forte variabilité pluviométrique. La non disponibilité de l'eau dans la zone avait poussé la plupart des jeunes qui s'activaient dans l'agriculture pluviale et le maraichage à se reconverter par le biais de l'exode rural (IRD-IPAR, 2017).

3.3. Le transfert d'eau comme alternative pour améliorer l'accès à l'eau et booster les activités agricoles

L'accès à l'eau potable au niveau local est aujourd'hui une question plus que jamais préoccupante vu les irrégularités des précipitations, les cycles répétitifs de sécheresses et les difficultés liées à la gestion de l'eau. Ainsi, malgré tous ces efforts consentis par les pouvoirs publics, la gestion de l'eau demeure toujours problématique dans la zone avec une gestion informelle du sous-secteur, des déficits en termes d'entretiens et de maintenances des ouvrages, des difficultés d'accès à l'eau potable (taux d'accès très faible, pannes récurrentes, mauvaise qualité de l'eau, difficulté énormes de pratiquer les cultures de contre saison etc.), le manque de professionnalisme, les malversations financières découlant de la mauvaise gestion des ASUFOR (OFOR, 2016). Face aux revendications du monde rural, le gouvernement sénégalais a senti la nécessité de réformer le sous-secteur de l'hydraulique rural. C'est dans ce sens que l'Office des Forages Ruraux (OFOR) est créé en 2014 pour remplacer la Direction de l'Entretien et de la Maintenance (DEM), renforcer la couverture d'accès à l'eau potable et contourner les problèmes liés aux dysfonctionnements et à la modernisation des forages (dont plus de 50 % ont plus de 20 ans). Le rythme de dégradation des ouvrages hydrauliques traduit la baisse considérable des services d'approvisionnement en eau. Le taux d'accès à l'eau potable ne cesse de chuter, obligeant les populations à utiliser des sources traditionnelles puits, céanes, etc. À cela s'ajoutent le manque de planification des ASUFOR, un déficit financier, la récurrence des risques sanitaires d'origines hydriques (fluoroses osseuses, fluoroses dentaires, diarrhées et maladies gastro-entériques) et une gestion communautaire qui ne cesse de montrer ses limites face à une explosion des besoins en eau dans le bassin arachidier. Face à cette situation, une nouvelle réforme a été initiée pour déléguer les activités de maintenance et de production aux opérateurs privés. Ainsi, l'Office des Forages Ruraux (OFOR) a vu le jour en 2014 pour remplacer la Direction de l'Entretien et de la Maintenance (DEM). Ainsi, la gestion et la réhabilitation des infrastructures hydrauliques en milieu rural ont été retirées des fonctions dévolues à la DEM au profit de l'OFOR. Dans la logique de cette nouvelle réforme la construction des forages n'apparaît plus comme une solution durable pour régler les problèmes d'accès à l'eau potable dans la zone. Ainsi, l'OFOR cherche à révolutionner le sous-secteur de l'hydraulique rurale par la mise en place des partenariats public privée (PPP). L'OFOR est chargé de la gestion du patrimoine, du renouvellement et de l'extension des infrastructures, du contrôle et du suivi de la qualité de l'exploitation. De ce fait il signe des contrats d'affermages avec les délégations des services publics (DSP) qui assurent l'exploitation, la maintenance et le recouvrement. C'est dans ce sens que la SEOH a signé avec l'OFOR un contrat d'affermage pour une durée de 10 ans. C'est dans ce sens que le système de transfert du Notto-Diosmone- Palmarin (NDP) a vu le jour. Ce réseau de transfert vient en appont pour renforcer le niveau d'accès tout en améliorant la qualité de l'eau dans les îles du Saloum sur une distance de 800km.

Carte 3 : Réseau d'adduction d'eau potable du système de transfert dans la zone du NDP



Source : SEOH, 2022

L'arrivée de l'OFOR marque une innovation majeure dans la gestion de l'hydraulique rurale. Elle se démarque de la logique de construction des forages qui n'est plus une solution durable face aux problèmes d'approvisionnement en eau du milieu rural. Dans ce sens, la priorité est alors accordée à la mise en place de systèmes de transfert d'eau pour assurer la fourniture en eau potable dans les zones les plus vulnérables. Ainsi, l'OFOR signe des contrats d'affermage avec le secteur privé sous forme de Partenariat Public-Privé (PPP) pour une gestion durable des ressources en eau. Ces privés ou Délégués de Services Publics (DSP) sont chargés de la gestion du patrimoine, de la maintenance, de la gestion et de la distribution de l'eau dans les périmètres qui leurs sont affermés.

3.4. Un meilleur accès à l'eau pour booster les activités agricoles

Dans la zone Notto-Ndiosmone-Palmarin (NDP), le prix de l'eau se présente comme suite : l'eau destinée à la consommation (abonnés domestiques) est facturée à 275 FCFA/m³ ; de 300 FCFA/ m³ pour les usagers des bornes fontaines ; pour ce qui concerne les abonnés commerciaux le prix du mètre cube (m³) est estimé à 400 FCFA et de 200 FCFA pour les abonnements destinés aux usages maraichers et les abreuvoirs

Tableau 1 : Typologie des abonnements et des tarifications au sein du NDP

Types d'abonnés	Franc/m ³
AD (Abonné Domestique)	275
BF (Borne Fontaine)	300
AC (Abonné Commercial)	400
AM (Abonné Maraicher)	200
AB (Abreuvoir)	200

Source : SEOH, 2022

L'accessibilité financier pour les abonnés maraichers, abreuvoirs et aux domestiques répond à un double enjeu à savoir améliorer l'accès à l'eau potable dans ces zones rurales longtemps délaissées par les politiques publics, et fixer les populations en leurs donnant l'opportunité de disposer de l'eau potable pour développer les activités agricoles souvent perturbées par le réchauffement climatique. La disponibilité de l'eau douce offre au ménage la possibilité d'améliorer et de varier leurs sources de revenus pour relever le défi de la vulnérabilité socio-économique du monde rural. En effet les milieux ruraux sénégalais sont longtemps réputés être des zones où on observe les plus faibles revenus et qui sont tirés exclusivement à partir de l'agriculture et de l'élevage (secteur primaire). Mais avec l'avènement du système de transfert du NDP l'accès à l'eau potable ouvre les portes à de nouvelles activités impraticable autrefois (maraichages, aquaculture, élevage, services etc.). Ainsi, nos données d'enquêtes révèlent que près de 74% des maraichers ont recommencé leurs activités de maraichage grâce au réseau de transfert d'eau potable du NDP. En effet, nous pouvons retenir que 68% utilisent exclusivement l'eau du réseau NDP, 23% font des usages mixtes c'est-à-dire (eau du réseau NDP et eaux de puits) et les 9% utilisent les eaux de puits uniquement.

Tableau 3 : Sources d'approvisionnement en eau potable des maraichers

Source d'accès	Part en %	Catégories	Coûts
Eau du réseau (SEOH)	68%	Gros producteurs	275 CFA/ m ³
Usages mixtes (eau du réseau, eaux puits, autres)	23%	Producteurs mixtes	Mixtes
Puits et pompes	9%	Petits producteurs et/ou ménages agricoles	gratuit (frais de charges)

Source : Enquêtes de terrain M.M. Nguirane, 2022

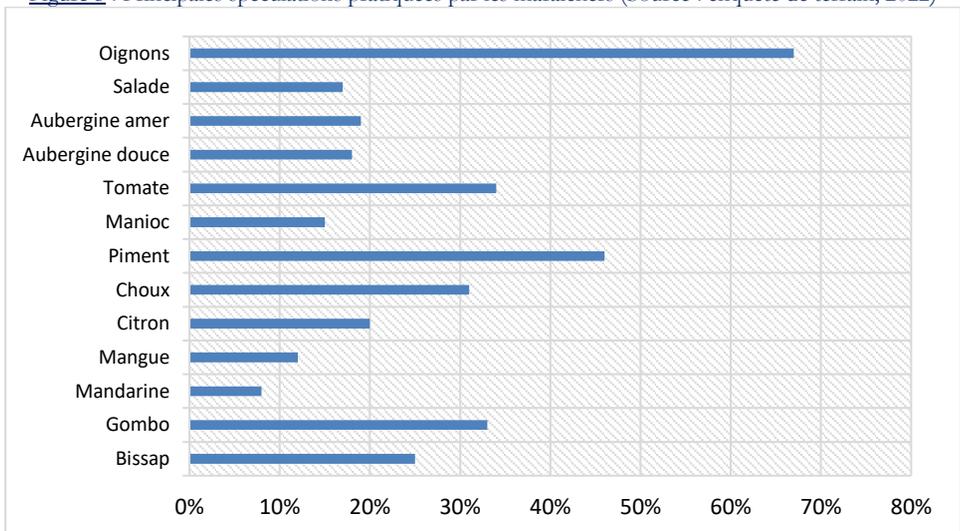
L'accessibilité de l'eau potable ouvre des possibilités aux agrobusiness à relancer leurs activités maraichères dans la zone. Le coût de l'eau varie en fonction de l'usage prévu. Avant la mise en place du réseau NDP, les eaux souterraines constituaient l'unique source d'approvisionnement des maraichers *via* des forages et puits qui sont parfois profonds et souvent avec une eau de mauvaise qualité dans de nombreux endroits. Par ailleurs, malgré le système en place, nous remarquons que les producteurs à faibles revenus ont souvent des usages mixtes avec l'eau du réseau et les eaux de puits pour éviter des factures trop élevées. Ces usages mixtes existent dans des localités où la qualité des eaux de puits n'a pas encore atteint un niveau de dégradation élevé et dépassent la moyenne des

normes de l’OMS (1,5mg/l). Les superficies des jardins (parcelles) maraichers varient entre un minimum de 30 m² (0,003 ha) et un maximum de 20.000 m² (2 ha). La moyenne des parcelles maraichères est estimée à 2.445 m², soit 0,2445 ha. En outre, le coût de l’eau varie en fonction de l’usage prévu. Avant la mise en place du réseau NDP, les eaux souterraines constituaient l’unique source d’approvisionnement des maraichers *via* des forages et puits qui sont parfois profonds et souvent avec une eau de mauvaise qualité dans de nombreux endroits. Malgré la mise en place du système de transfert d’eau potable, nous remarquons que les producteurs à faibles revenus ont souvent des usages mixtes avec l’eau du réseau et les eaux de puits pour éviter des factures trop élevées. Ces usages mixtes existent dans des localités où la qualité des eaux de puits n’a pas encore atteint un niveau de dégradation élevé (1,5mg/l). Par ailleurs, 65 % des maraichers enquêtés estiment que le coût de l’eau et des branchements reste toujours cher malgré le nouveau système de transfert mis en place et les services proposés.

3.5. Les variétés cultivées et les revenus tirés de la vente des récoltes

L’oignon est principale spéculation pratiquée par les abonnés maraichers. Il représente 70% des spéculations cultivées. Viennent ensuite le piment (26%), la tomate (22%), le citron (19%), la salade (11%), la mangue (11%) et les autres (papaye, bissap, aubergine amer, aubergine douce, manioc, chou et mandarine).

Figure 5 : Principales spéculations pratiquées par les maraichers (Source : enquête de terrain, 2022)



A noter que le cycle végétatif de la culture de l’oignon varie de 4 à 6 mois suivant les variétés. Celui du piment varie entre 2 à 3 mois alors que le cycle végétatif complet de la tomate se situe dans l’intervalle entre 4 à 7 mois. Les spéculations les plus cultivées par les maraichers sont dans un intervalle de cycle végétatif compris entre 2 et 7 mois pour la récolte. Près de trois quart (3/4) des maraichers font en même temps la vente et l’auto consommation de la production. Ceux qui ne font que la vente représente 15% des maraichers contre 11% à qui la première destination des récoltes est d’abord d’assurer la couverture des besoins alimentaires du ménage.

3.6. Les revenus tirés de la vente des produits agricoles

L’essentiel du revenu agricole moyen par exploitation estimé à 165 000 FCFA par période récolte. La commercialisation des légumes (tomates, choux, oignons, aubergine etc.) reste la principale source de revenu agricole. Ces légumes fournissent plus 75% des revenus issus de la production maraichère. Pour les ménages agricoles dehors de la fonction première qui est d’assurer la sécurité alimentaire, ces productions jouent tend de plus en plus le rôle d’une culture de rente pour améliorer leurs conditions de vies. L’essentiel du revenu agricole moyen par exploitation estimé à 165 000 FCFA par période récolte. La commercialisation des légumes (tomates, choux, oignons, aubergine etc.) reste la principale source de revenu agricole. Ces légumes fournissent plus 75% des revenus issus de la production maraichère. Pour les ménages agricoles dehors de la fonction première qui est d’assurer la sécurité alimentaire, ces productions jouent tend de plus en plus le rôle d’une culture de rente pour améliorer leurs conditions de vies.

Figure 5 : Comparaison des revenus tirés de la vente des récoltes entre maraichers non raccordés et ceux qui sont raccordés au réseau du système de transfert de transfert

Revenus des producteurs en FCFA	Maraichers raccordés	Eaux Mixtes	Eaux des Puits
Faibles < 50.000	-5%	-5%	70%
Moyens (50.000 - 150.000)	21%	38%	31%
Importants (150.000 - 300.000)	24%	55%	20%
Très importants (350.000 et Plus)	59%	23%	18%

Source : Enquête de terrain, M.M. Nguirane 2022

Les plus faibles revenus sont souvent notés chez les ménages agricoles dont les récoltes sont d'abord destinées à l'autoconsommation. Les maraichers qui sont raccordés au réseau et qui disposent de puits présentent le plus souvent des revenus plus importants. Les producteurs qui utilisent uniquement l'eau du système de transfert font face à la cherté des factures et des coupures s'ils sont en bout du réseau.

3.7. Stratégie de résiliences des maraichers

Le milieu rural sénégalais fait face aux impacts du changement climatique, la dégradation des écosystèmes, et des ressources naturelles. Cet état de fait freine toute action menée pour réduire les effets du changement climatique sur des sociétés déjà fragilisées. Face à la cherté des branchements certains maraichers mettent en place des stratégies d'adaptions. 13% des maraichages enquêtées utilisent les puits pour avoir accès à l'eau pour leurs activités maraichères. La récupération des eaux pluviales à travers des fosses creusées par les maraichers pour recueillir les eaux de ruissellement. Cette stratégie est utilisée par certains maraichers qui n'ont pas la possibilité d'acheter une moto pompe pour équiper leurs puits. Ainsi, face aux déficits en eau pour couvrir leurs besoins ils mettent en place ces fosses quelques mois avant l'arrivée de l'hivernage. Ces eaux recueillies durant la saison des pluies vont être utilisées pour arroger les champs entre deux et trois mois après l'hivernage. Selon les maraichers la forte évaporation et les infiltrations limitent les quantités de stockages des eaux de ruillement durant la période hivernale.



Figure 4 : Stratégies d'adaptation des maraichers pour pallier au déficits d'accès à l'eau dans le bassin arachidier (Source : Enquêtes ménages, Mars 2022 ; M.M. Nguirane)

Grâce aux transferts monétaires la mobilité spatiale des populations de longue durée et de distance ou temporaire (Saint-Louis, Thiès Dakar, Mbour, etc.) et constitue une stratégie de survie et de diversification des revenus pour la population locale. Toutefois les changements climatiques ne sont pas à la base de toutes les difficultés rencontrées dans les zones écologiques étudiées, en effet des facteurs anthropiques ou les problèmes politiques liés à un encadrement déficient du monde rural, sont aussi responsables de dérégulations portant aux migrations. / donc pas le seul facteur déterminant, mais il contribue à accélérer les dérégulations et les transformations analysées dans les sites étudiés.

Par conséquent, les transferts de fonds améliorent le quotidien de certains ménages, augmentent également les inégalités socio-économiques entre les ménages possédant un ou plusieurs migrants et les ménages n'en possédant pas.

DISCUSSIONS

Depuis la fin des années 1960, on a aussi assisté à des déficits pluviométriques de plus en plus importants, avec des années très pluvieuses alternées à d'autres de sécheresse. Ces aléas climatiques ont favorisé le processus de salinisation, qui est très relevant dans les zones en proximité de l'Océan accélérée par un climat avec une forte évapotranspiration. Pour une intensification de la production, il faudrait prévoir des systèmes d'exhaure et distribution de l'eau qui soient accessibles et durables dans le temps (considérant parmi les aspects critiques le coût de l'essence, la garantie de la qualité des pompes et les panneaux solaires). Le bassin arachidier du Sénégal, poumon économique rural du pays, est une zone très peuplée, aujourd'hui diversifiée en une polyculture-élevage en cours d'intensification. L'augmentation nécessaire des rendements agricoles afin de compenser une forte croissance démographique passe souvent par une micro-irrigation dépendante de ressources en eau mal connues et a priori peu abondantes. Depuis quelques décennies, les acteurs du monde rural, à commencer par les agriculteurs, se plaignent d'une salinisation de la nappe, dont les premières manifestations auraient été observées durant la grande sécheresse des années 1968-1998. Les eaux de la nappe phréatique, dans une grande partie de la zone, sont trop salées voir saumâtres dans ses aquifères. L'accès à l'eau douce apparaît comme la principale contrainte au développement d'une agriculture plus intensive et plus diversifiée. Pour les villages qui bénéficient de la présence des forages et systèmes d'irrigation, des plus simples au plus technologiques, il faudrait aussi prêter attention à l'organisation de la gestion du système et à la responsabilisation des personnes-ressource, avec des formations spécifiques pour l'entretien. Une formation technique en gestion des ressources hydriques, à travers l'adoption des méthodes de conservation de l'eau (paillage, brise-vent, enrichissement de la matière organique, fréquence et dose des arrosages, bassins de rétention à impluvium etc.), permettrait d'étaler la production tout au long de l'année, épargnant en plus sur les coûts de production, surtout pendant la saison sèche. Le maraîchage est une activité qui donne des avantages comparatives, par rapport aux cultures vivrières, mais aussi joue un rôle social important dans le ménage familial pour l'approvisionnement en légumes et l'apport quotidien de certaines éléments nutritionnels, avec des retombées sur la santé de la population, en particulier pour les couches les plus vulnérables (enfants, jeunes et femmes); c'est ainsi que les agriculteurs suivent souvent une stratégie visant à réduire le risque plutôt qu'à intensifier la production. Au moment de s'impliquer dans une culture bien déterminée, il devient toujours nécessaire comprendre l'orientation à donner à la production, c'est-à-dire si le produit est destiné à l'exportation et/ou au marché intérieur. Dans les deux cas, le choix pas seulement de la culture, mais aussi de la variété, devra prendre en considération le « goût » local et l'appréciabilité aux différents niveaux de production, mais aussi les meilleurs calendriers culturaux basés sur la commercialisation et les fluctuations des prix relatifs au cours des saisons, dans le but d'obtenir des productions précoces ou tardives. Les recherches sur les caractéristiques du marché du travail rural se présentent en termes d'offre (démographie, niveau d'instruction, accès à la terre) et de demande (système de production, volumes d'investissement et accès au marché). Du côté de la demande, la main d'œuvre se concentre en majorité dans le secteur agricole notamment dans les Unités de Production Agricoles (UPA) et dans le secteur non agricole. Le marché rural de l'emploi reste donc dominé par l'agriculture qui constitue le « premier employeur » des jeunes et la première source de revenus des ménages. Malgré l'importance de l'agriculture dans l'économie rurale et sa contribution dans la création d'emplois et de revenus, les zones rurales se vident de leurs jeunes hommes et jeunes femmes à la recherche d'un travail plus rémunérateur. En réalité, il ressort de l'étude une certaine précarité des jeunes travailleurs dans les exploitations agricoles familiales dans les zones de départ caractérisées par de faibles niveaux de revenus et peu d'opportunités économiques. Les résultats révèlent également que les taux d'activité varient d'une zone agroécologique à une autre et qu'il existe un dysfonctionnement des marchés de travail ruraux en général lié au déséquilibre entre la demande et l'offre. Par exemple, la faible productivité des activités agricoles et non-agricoles dans le Bassin arachidier explique l'importance du taux d'exode rural dans cette zone. Face à la recrudescence de l'émigration irrégulière dans un monde rural frappés par les impacts du réchauffement climatique

CONCLUSION

Le système de transfert d'eau potable a été développé pour sécuriser la ressource en eau dans une zone vulnérable. Il a permis à de nombreux ménages de diversifier et d'améliorer leurs revenus. Ainsi, la disponibilité de l'eau a créé de nombreuses opportunités dans de nombreuses localités qui subissaient autrefois un exode rural massif en saison sèche. Le nombre d'abonnés maraîchers sur le réseau de transfert est passé de 52 en 2015 à plus de 500 en 2022. En effet le système d'adduction du Notto-Diosmone-Palmarin (NDP), a non seulement permis de faciliter la pratique des cultures de contre-saison dans de nombreux villages, mais également de lutter contre la pauvreté et les migrations.

En termes d'usages, le transfert a permis le développement du maraîchage sur le long terme (entre 4 et 8 mois, contre 3/4 mois auparavant). Cela a pour conséquence d'améliorer la qualité des sols et une meilleure préservation de l'écosystème. Toutefois il faut noter que la tarification risquerait de compromettre les activités agricoles chez les ménages démunis. Face à la cherté de l'eau, ils ont recours aux eaux de puits pour couvrir leurs besoins en eau. Par ailleurs, des stratégies d'adaptation ont été développées pour disposer de l'eau mais elles sont limitées dans le temps et l'espace, par la forte salinité des eaux souterraines par endroit et le rabattement précoce des nappes superficielles. Ainsi, nos travaux attestent que la privatisation de la gestion des services de l'eau en milieu rural après la réforme de 2014 même si elle présente des opportunités incontournables, présente aussi des limites en termes d'implication des usagers, d'accessibilité financière etc. Même s'il semblerait que le secteur privé peut apporter de la plus-value dans le milieu rural, il reste cependant guidé par une recherche de profit. Il faut souligner que la disponibilité de l'eau a été possible grâce à l'implication du privé avec une augmentation des investissements, un partage des risques et une gestion plus efficace du service d'eau et des ouvrages hydrauliques. Ainsi, il semble évident de se poser la question suivante à savoir : Comment assurer la disponibilité de l'eau potable dans les milieux ruraux pour un développement des activités génératrices de revenus ? Comment faire de l'agriculture un levier pour régler la question de l'emploi et de la crise alimentaire dans les zones rurales ? comment articuler la privatisation des services d'eau et l'accès universel à l'eau prôné dans le cadre de l'Objectif pour Développement Durable (ODD 6).

REFERENCES

- [1] ANDION C. 2006 : Développement territorial durable en milieu rural, gouvernance et rôle des organisations non gouvernementales : l'État de Santa Catarina au Brésil. Mondes En Développement (MED), 2006/4 no 136, Pp. 85-100.
- [2] ANCEY. V. et al. 2009 : La vulnérabilité pastorale au Sahel : portée et limites des systèmes d'alerte basés sur des indicateurs, sur. L'eau et l'avenir durable des territoires. in L'élevage, richesse des pauvres. Stratégies d'éleveurs et organisations sociales face aux risques dans les pays du Sud, Versailles, Quæ, Pp 117-132.
- [3] ALBERGEL. et al. 2008 : Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. Collection Actualité scientifique AUF (Editeur: Archives Contemporaines). Sous la direction de : E. ROOSE, J. ALBERGEL, G. DE NON, A. LAOUNA, M. SABIR. 405 pages.
- [4] ANSD.2013 : Rapport Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE). UNFPA, USAID 19 pages.
- [5] ANSD. 2013 : Rapport Projection de la population du Sénégal 2013-2063 de l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan. 42pages.
- [6] BA. A. 2007 : Le bassin arachidier. Atlas de l'Afrique. Sénégal. Paris, Les Editions J.A. 1ère édition: pp 116-119.
- [7] BERTRAND. F., 1999 : Une unité éclatée. In Rivières du Sud : Sociétés et mangroves ouest-africaines. Paris, IRD Editions. vol 1 : Sous la direction de F. BERTRAND, M. Christine, C. SALEM 426pages.
- [8] BLANC. A. 2005 : Secteur de l'eau au Sénégal : un partenariat équilibré entre acteurs publics et privés pour servir les plus démunis ?, Département de la recherche, document de travail de l'AFD 45pages.
- [9] BODIAN. A. 2014 : Caractérisation de la variabilité temporelle récente précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Revue Physio-Géo, Volume 8/ 15pages.
- [10] COLY.A., 2000 : Caractérisation et mise en valeur agricole des bas-fonds dans les bassins versants de Sokone et Senghor. Mémoire de Maîtrise, Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines (FLSH) UCAD. 125pages.
- [11] DACOSTA. 2012 : Variabilité des précipitations sur le bassin du Saloum. Actes de l'Atelier de Gorée sur la Gestion des ressources côtières et littorales. Pp 87-103. Revue de géographie de Lyon, vol. 70, n°3-4, 1995. Sahel, la grande sécheresse. 282pages.
- [12] DGPRE.2014:Etudes hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités des ressources en eau des zones favorables en vue d'un transfert d'eau vers le bassin arachidier. Rapport Projet de mise en œuvre du plan d'action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). 106pages.
- [13] DIA, A et al.2011: Réformes des Services d'eau en milieu rural africain. Enjeux et limites du montage institutionnel de gestion. Une étude de cas au Sénégal au Sénégal, Mondes En Développement. Cairn info/ Revue Mondes En Développement (MED), 2011/3 (n°155), Editeur De Boeck Université/168pages.
- [14] DIENG.NDAO Ndeye Maguette 2017 : Étude de la relation eaux de surface-eaux souterraines dans un contexte de changements climatiques dans la zone Sud du bassin du Saloum. Thèse de doctorat Département de Géologie Faculté des Sciences et Techniques (FST) de l'UCAD. 281pages
- [15] DIONE. Yangane. 2014 : Participation du public et politiques d'accès à l'eau potable en milieu rural sénégalais. Thèse de doctorat en cotutelle de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier ; Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD). 243pages.
- [16] DIOP, E.S.1986 : Les estuaires tropicaux holocènes, étude comparative des caractéristiques de la géographie physique des rivières du sud du Saloum à la Mellcorée (République de Guinée). PhD, Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 379pages.

- [17] FAO. 1997 : Réformer les politiques dans le domaine des ressources en eau : Guide des méthodes, processus et pratiques. Rapport ONU-FAO, Rome 1997, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage Numéro 52, pages.
- [18] FAYE. Waly 2022 : Ecohydrologie dans le Bassin Arachidier (cas de Niakhar) Dynamique de l'infiltration et modélisation hydrologique des aquifères superficiels dans un espace sylvo-pastorale semi-aride. Thèse de doctorat Département de Géographie de la FLSH de l'UCAD. 382 pages.
- [19] FAYE. Guilgane 2016 : Impact des modifications récentes des conditions climatiques et océanographiques dans l'estuaire du Saloum et des régions de bordures (Sénégal). Thèse de doctorat Département de Géographie de la FLSH de l'UCAD. 598 pages.
- [20] FAYE, SANE 2017: Dynamique de la salinisation des terres de 1973 à 2014 et variabilité climatique dans le nord de l'estuaire du Saloum (Fatick, Sénégal). Thèse de doctorat Département de Géographie de l'UCAD. 341 pages.
- [21] IPAR. 2014 : Étude des stratégies d'adaptation des ménages ruraux (SAMER). Initiative Prospective Agricole. Rapport sur le Sénégal à l'horizon 2030: d'une société paysanne à une société urbaine. 37 pages.
- [22] IRD-IPAR 2017 : Dégénération des terres et phénomène migratoire en Afrique de l'Ouest : exemples de la Vallée du fleuve Sénégal et du Bassin arachidier au Sénégal. Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Initiative Prospective Agricole Rurale. Rome, FAO et CIRAD, 42 pages.
- [23] JOUVE. P., 2004 : Transition agricole et résilience des sociétés rurales. La croissance démographique, frein ou opportunité pour une intensification durable en Afrique subsaharienne, " Courrier de l'environnement de l'INRA 52. 101-106p.
- [24] Malou. 2004 : Impact du climat sur les ressources en eau en zone soudano-sahélienne (Sénégal). Thèse de Doctorat d'Etat. Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques (FST). de l'UCAD. 147 pages.
- [25] MENDY, A. 2012 : Perception et gestion des ressources en eau dans la Réserve de Biosphère du Delta du Saloum : Le cas du bassin versant de la Néma. Mémoire de DEA . Département de Géographie – Faculté des Lettres et Sciences Humaines (FLSH) de l'UCAD. 89 pages.
- [26] NDOUR. N. 2005 : Caractérisation et étude de la dynamique des peuplements de mangrove de la Réserve de Biosphère du Delta du Saloum (Sénégal). Mémoire de DEA Sciences de l'Environnement de l'UCAD, 180 pages.
- [27] NDOYE. S. et al. 2014 : Hydrodynamique et Hydrogéo-chimie de l'aquifère côtier superficiel du Saloum (Sénégal) : étude par modèle numérique. Revue du CAMES Sciences – Sciences Appliquées et de l'Ingénieur. Vol 1 (2) 72-78. ISSN 2312-8712. Géologie de l'environnement, 44 : 127-136 pages.
- [28] NIANG. I., 2007 : The impacts of climate change on coastal zones in West Africa. Rapport de la conférence internationale sur la réduction de la vulnérabilité des systèmes naturels économiques et sociaux en Afrique de l'Ouest, 81 pages.
- [29] NIASSE. 2004: Centre du Droit de l'Environnement UICN : Gouvernance de l'Eau en Afrique de l'Ouest/ Water Governance in West Africa. 34 pages.
- [30] OFOR. 2016 : Rapport d'évaluation du sous-secteur de l'hydraulique rural et bilan de la gestion communautaire. 42 pages.
- [31] PAPIL-Projet d'Appui à la Petite Irrigation Locale 2013 : Etude Diagnostic de la salinité des sols et des eaux dans les régions de Fatick et Kaolack, INP, CSE, Dakar, 113 pages.
- [32] PEPAM. 2013 : Appui à l'Amélioration de la Qualité de l'Eau dans le Bassin Arachidier : Fluor et sel dans l'eau : Défis et Solutions. CTB SENEGAL. Rapport du PEPAM-AQUA a & b. 24 pages.
- [33] SADIO. 2011 : La connaissance des sols salés sulfatés acides des mangroves : Processus et mécanismes de pédogenèse, distribution spatiale et évolution. In Récupération et valorisation des terres salées en Afrique. Rapport général, Atelier international préparatoire, Académie Nationale des sciences et Techniques du Sénégal, Dakar, Sénégal, pp25-26.
- [34] SAGNA. 2005 : Dynamisme du climat et son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique Occidentale », Dakar, UCAD, Tome 1, pp 272-318 .
- [35] SARR. 2013 : Approche participative de la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin du Sine : Etude de cas de la communauté rurale de Tattaguine. Mémoire de Master 2 Département de Géographie de l'UCAD 130 pages.
- [36] WADE. C.T. et al. 2017 : Etat des lieux des liens entre migration, transferts et résilience au changement climatique. Rapport d'étude research for climate-resilient futures. Innovation Environnement et Développement (IED) Afrique/Dakar 40 pages.
- [37] WETLAND. 2018: Etude hydrologique de référence de la réserve de Biosphère du delta du Saloum. Rapport du programme Mangrove Capital Africa (MCA) de Wetland. 40 pages.



REPUBLIC OF TUNISIA



International Conference-Training (EDC'2023) From 25 to 30 November 2023 Hammamet (Tunisia)

Water resources, Drought and Climate Change



E_{water} D_{rought} C_{Climate} '2023

If you have any questions, don't hesitate to Contact Pr.
Nourreddine GAALOU
E-mail: eaucimat@yahoo.com
eaucimat@iresa.agrinet.tn



2023

Colloque-Formation Internationale



E_{au} - S_{écheresse} - C_{limat}'2023

Ressources en Eau, Sécheresse et Changement Climatique

20 au 25 Novembre 2023 Hammamet (Tunisie)

www.jistee.org

E_{au} - S_{écheresse} - C_{limat}'2023

Pour plus d'informations veuillez contacter
Pr. Noureddine GAALOUL
E-mail: eauclimat@iresa.agrinet.tn
eauclimat@yahoo.com



International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)

Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE)



ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688 Open Access
08 Volumes, 27 Numéros, (404 Articles) et 1 Livre
08 Volumes, 27 Issues, (404 Papers) and 1 Book

www.jistee.org

jistee@iresa.agrinet.tn / jistee@yahoo.com

VOLUME (VIII) : 4 Numéros (27 Articles) / 4 Issues (27Papers)

Eau-Sécheresse-Climat'2023 / Water-- Drought -Climate'2023

Numéro 1 – Mars 2022 (6 Articles) Pénurie d'eau, hausse des températures... Face au changement climatique, de la lutte à l'adaptation ??

Numéro 2 – Décembre 2023 (11 Articles) Eau-Sécheresse-Climat'2023 Gestion intégrée des ressources en eau

Numéro 3 – Décembre 2023 (6 Articles) Eau-Sécheresse-Climat'2023 Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture

Numéro 4 – Décembre 2023 (4 Articles) Eau-Sécheresse-Climat'2023 Changement climatique et adaptation

VOLUME (VII) : 4 Numéros (32 Articles) / 4 Issues (31. Papers)

Eau-Santé-Climat'2022 / Water-- Health -Climate'2022

Numéro 1 – Mars 2022 (7 Articles) Changement Climatique : Quels effets sur notre santé ? / *Climate change : What effects on our health ?*

Numéro 2 – Juin 2022 (10 Articles) Impacts du Changement Climatique sur l'Eau, les Ecosystèmes et la Santé Humaine / *Impacts of Climate Change on Water, Ecosystems and Human Health*

Numéro 3 – Septembre 2022 (7 Articles) Eau, Climat, Santé, Inégalités : Quelles Solutions / *Water, Climate, Health, Disparities: Solutions*

Numéro 4 – Décembre 2022 (8 Articles) Changements climatiques Santé : Qualité de l'eau et accessibilité / *Changements climatiques Santé : Qualité de l'eau et accessibilité*

VOLUME (VI) : 4 Numéros (31 Articles) / 4 Issues (31Papers)

Eau-Agriculture-Climat'2021 / Water--Agriculture-Climate'2021

Numéro 1 – Avril 2021 (11 Articles) Face aux enjeux climatiques et alimentaires : Réinventer les relations Eau-Agriculture-Climat / *Faced with climate and food issues : Reinventing Water-Agriculture-Climate relations*

Numéro 2 – Juin 2021 (6 Articles) Changement climatique, eau, agriculture - Quelles trajectoires ? / *Climate Change, Water, Agriculture - What trajectories ?*

Numéro 3 – September 2021 (6 Articles) Changement Climatique, Eau et Agriculture Vers des Systèmes Résilients / *Climate Change, Water and Agriculture Towards Resilient Systems*

Numéro 4 – Décembre 2021 (8 Articles) Changement Climatique, Eau et Agriculture : Quelles Stratégies ? / *Climate Change, Water and Agriculture : What Strategies ?*

VOLUME (V) 2 Numéros (27 Articles) / 2 Issues (27 Papers)

Eau-Climat'2020 (EC-2020) / Water-Climate'2020 (EC-2020)

Numéro 1 – Septembre 2020 (14 Articles) Ressources en Eaux et Changements Climatiques / *Water Resources and Climate Change.*

Numéro 2 – Décembre 2020 (13 Articles) Gestion Intégrée des Ressources en Eau et Changement Climatique / *Integrated Water Resources Management and Climate Change*

VOLUME (IV) : 2 Numéros (68 Articles) / 2 Issues (68 Papers)

Eau-Energie-Climat'2019 (2EC-2019) /Water-Energy-Climate'2019 (E'C-2019)

Numéro 1 – Décembre 2019 (56 Articles) Gestion Intégrée des Ressources en Eaux / *Integrated Water Resources Management*

Numéro 2 – Décembre 2019 (12 Articles) Énergies Renouvelables Et changements climatiques / *Renewable Energies and climate change*

VOLUME (III) : 3 Numéros (103 Articles) / 3 Issues (103 Papers)

Eau-Environnement-Climat'2018 (E'2C-2018) /Water-Environnement-Climate'2018

Numéro 1 – Avril 2018 (62 Articles) Gestion des Ressources en Eau / *Water Resources Management*

Numéro 2 – Août 2018 (34 Articles) Sciences de l'Environnement / *Environmental Earth Sciences*

VOLUME (II) 5 Numéros (53 Articles) / 5 Issues (53 Papers)

Eau-Société-Climat'2017 (ESC-2017) / Water-Society-Climate'2017 (ESC-2017)

Numéro 1 – Février 2017 (17 Articles) Caractérisation qualitative et quantitative des ressources en eau / *Qualitative and quantitative characterization of water resources.*

Numéro 2 – Avril 2017 (8 Articles) Évaluation des ressources en eau sous les pressions de l'humanité et des changements climatiques / *Assessment of water resources under pressure from humanity and climate change*

Numéro 3 – Juin 2017 (9 Articles) Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques / *Vulnerability of Water Resources to Climate Change.*

Numéro 4 – Août 2017 (8 Articles) Modélisation de l'impact des changements anthropiques et climatiques sur les ressources en eau / *Modeling the impact of anthropogenic and climatic changes on water resources*

Numéro 5 – Octobre 2017 (11 Articles) Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie / *Numerical Modeling in Hydraulics, Hydrology and Hydrogeology*

VOLUME (I) 3 Numéros (36 Articles) / 3 Issues (36 Papers)

Eau-Climat'2014 (EC-2014) /Water-Climate'2014 (EC-2014)

Numéro 1 – Avril 2014 (17 Articles) Ressources en Eaux de Surface en Région Méditerranéenne / *Surface Water Resources in the Mediterranean Region.*

Numéro 2 – Août 2014 (8 Articles) Ressources en Eaux Souterraines en Région Méditerranéenne / *Ground Water Resources in the Mediterranean Region*

Numéro 3 – Décembre 2014 (11 Articles) Changements Climatiques en Région Méditerranéenne / *Climate Change in the Mediterranean Region*

Copyright © 2023 – Jistee Tous droits réservés

International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET/JISTEE)

©2023 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V (viii), Issue 2 –December 2023 - jistee.org/volume-viii-2023/

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688
Open Access Journal

Volume (viii) - Issue 2 – December 2023

Water - **D**rought - **C**limate 2023



Integrated Water Resources Management

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

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