

# INTERNATIONAL JOURNAL

## *Water Sciences and Environment Technologies*

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

*Volume (ix) - Issue 3 - November 2024*

**W**ater - **A**griculture - **C**limate'2024



**Water, Agriculture, Climate Change  
and Food Security**

**Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection**  
**Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul**

*Published by:*

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

**International Scientific Committee (ISC-WAC'2024)**

<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 Boukechima</i>	<i>M.Conf. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Nouredine Hamdi</i>	<i>Prof. Université of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Taoufik 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 Yahiaoui</i>	<i>Prof. University of Bechar (Algeria)</i>
<i>Mohamed Bessenasse</i>	<i>Prof. University of Saad Dahlab- Blida (Algeria)</i>
<i>Benabadj 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>Guegargiz Saadia</i>	<i>M.Conf. University of Biskra (Algeria)</i>
<i>Guenouze Abdelhamid</i>	<i>M.Conf. University of Blida1 (Algeria)</i>
<i>Khonaldia 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 Essablaoui</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 Hmaidi</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Imad Manssouri</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Abdelmajid Moumen</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>Cash Nganzou Luwesi</i>	<i>Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)</i>
<i>Koussonbon A. Leonard</i>	<i>Prof. FLLAC/ UAC (Congo)</i>
<i>Koumassi Dégla Hervé</i>	<i>Prof. LACEEDE/ UAC (Benin)</i>
<i>Hamma Yacouba</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



**L**'eau est source de vie : elle est partie intégrante de la sécurité alimentaire et de la nutrition et constitue l'élément vital des écosystèmes dont tous les êtres humains sont tributaires. L'eau potable et l'assainissement sont cruciaux pour la nutrition, la santé et la dignité de chacun. Sécuriser l'accès à l'eau peut être particulièrement difficile pour les populations vulnérables et les femmes. L'eau, en quantité et de qualité, est essentielle à la

production agricole, ainsi qu'à la préparation et à la transformation des aliments. L'agriculture irriguée représente 70 pour cent de l'ensemble des prélèvements d'eau dans le monde (eau de surface et eau souterraine).

### **L'eau Est Fondamentale Pour La Sécurité Alimentaire et la Nutrition (SAN)**

1. L'eau est source de vie. Elle est fondamentale pour la sécurité alimentaire et la nutrition. Elle est l'élément vital des écosystèmes, et notamment des forêts, des lacs et des terres humides, qui conditionnent la sécurité alimentaire et la nutrition des générations actuelles et à venir. De qualité et en quantité appropriées elle est indispensable pour la boisson et l'assainissement, la production d'aliments (pêches, cultures et élevage), la transformation et la préparation des aliments. Elle a également son importance pour les secteurs de l'énergie, de l'industrie et d'autres secteurs économiques. Les cours et les plans d'eau sont souvent utilisés comme voies de transport (notamment d'intrants, d'aliments destinés à la consommation humaine et animale). En fin de compte, l'eau favorise la croissance économique et la création de revenus et par conséquent, l'accès économique aux aliments.
2. L'eau potable et l'assainissement sont cruciaux pour la nutrition, la santé et la dignité de chacun. L'absence d'accès à l'eau potable, aux installations sanitaires et aux pratiques d'hygiène compromet l'état nutritionnel en raison des maladies transmises par l'eau et des infections intestinales chroniques. Malgré des progrès significatifs en ce qui concerne l'accès à l'eau potable et à l'assainissement, il y avait encore dans le monde en 2012, selon l'OMS et l'UNICEF, 4 pour cent de la population urbaine et 18 pour cent de la population rurale (mais 47 pour cent de la population rurale en Afrique subsaharienne) qui étaient privés d'accès à une source améliorée d'eau de boisson<sup>2</sup> et 25 pour cent de la population qui ne bénéficiaient pas d'installations sanitaires améliorées ou collectives.
3. Selon la FAO, en 2009, 311 millions d'hectares étaient équipés pour l'irrigation, 84 pour cent de ceux-ci étant effectivement irrigués, soit 16 pour cent des terres cultivées et 44 pour cent de la production végétale totale. Une irrigation fiable permet également l'accroissement et la stabilisation des revenus et confère une résilience aux moyens d'existence d'un grand nombre de petits exploitants. L'agriculture irriguée est de loin le premier consommateur d'eau dans le monde, puisqu'elle a absorbé au total en 2013† 252 milliards de mètres cubes prélevés dans les eaux de surface et eaux souterraines en 2013, soit 6,5 pour cent des flux des ressources mondiales renouvelables en eau douce et 70 pour cent des prélèvements anthropiques dans le monde, avec des différences sensibles entre les pays: 90 pour cent dans les pays à faible revenu, 43 pour cent dans les pays à revenu élevé.

### **La gestion des pénuries d'eau dans le secteur de l'agriculture et Dans les systèmes alimentaires**

1. L'amélioration de la gestion de l'eau dans le secteur de l'agriculture et dans les systèmes alimentaires vise à améliorer leur contribution à la SAN (disponibilité, accès, stabilité, nutrition), malgré les contraintes hydriques. On peut y parvenir en renforçant l'efficacité de l'eau à tous les niveaux (modalités d'utilisation de l'eau, de l'écosystème au végétal) et en accroissant la productivité de l'eau agricole (le rapport entre l'apport d'eau et la productivité) dans les systèmes pluviaux et irrigués.
2. L'amélioration de la gestion de l'eau pour favoriser la SAN passe par des mesures allant d'une planification appropriée et de l'optimisation des ressources, des apports et des moyens de production, à la fois dans les systèmes pluviaux et dans les systèmes irrigués, ainsi que d'un bout à l'autre des filières alimentaires, à une gestion durable des écosystèmes et des paysages de nature à améliorer, réguler et stabiliser l'approvisionnement en eau. La gestion de l'eau sera déterminante pour l'adaptation au changement climatique des systèmes agricoles, qu'ils soient pluviaux ou irrigués.
3. Pour la sécurité alimentaire de demain, il faut que la gestion des terres et des eaux préserve les fonctions de l'écosystème et assure la pérennité de la ressource. La gestion durable des écosystèmes et une approche écosystémique de la gestion de l'eau, du niveau local jusqu'au niveau continental, sont fondamentales pour assurer la quantité et la qualité de l'eau nécessaires pour la sécurité alimentaire et la nutrition de demain

**Noureddine Gaaloul**

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

Founder and Chief Editor International Journal Water Science and Environment Technologies

President of Scientific and Technical Association for Water and the Environment in Tunisia (ASTEE, Tunisie)

[www.ijsce.org](http://www.ijsce.org)

## Preface



# W

ater is life: it is integral to human food security and nutrition, and it is the

lifefood of ecosystems upon which all humans depend. Safe drinking water and sanitation are fundamental to the nutrition, health and dignity of all. Securing access to water can be particularly challenging for vulnerable populations and women. Water of sufficient quantity and quality is essential for agricultural production and for the preparation and processing of food. Irrigated agriculture accounts for 70 percent of all surface and ground water withdrawals globally. **Water is central to Food Security and Nutrition (FSN)**

1. *Water is life. Water is essential to food security and nutrition. It is the lifefood of ecosystems, including forests, lakes and wetlands, on which depend the food security and nutrition of present and future generations. Water of appropriate quality and quantity is essential for drinking and sanitation, for food production (fisheries, crops and livestock), food processing, transformation and preparation. Water is also important for the energy, industry and other economic sectors. Water streams and bodies are often key ways for transport (including inputs, food and feed). All in all, water supports economic growth, and income generation, and thus economic access to food.*
2. *Safe drinking water and sanitation are fundamental to the nutrition, health and dignity of all. Lack of access to safe drinking water, sanitation facilities and hygiene practices undermines the nutritional status of people through water-borne diseases and chronic intestinal infections. Despite significant advances in access to drinking water and sanitation, in 2012, according to WHO and UNICEF, globally 4 percent of the urban population and 18 percent of the rural population (but 47 percent of the rural population in Sub-Saharan Africa) still lacked access to an improved drinking water source<sup>2</sup> and 25 percent of the population lacked access to improved or shared sanitation.*
3. *According to FAO, in 2009, 311 million hectares were equipped with irrigation, 84 percent of those actually being irrigated, corresponding to 16 percent of all cultivated land and contributing to 44 percent of total crop production. Reliable irrigation is also essential to increasing and stabilizing incomes and provides livelihood resilience for a vast number of smallholder farmers. Irrigated agriculture is by far the largest water user globally, totalling 252 billion cubic meters of surface and groundwater withdrawals<sup>4</sup> in 2013<sup>7</sup>, equivalent to 6.5 percent of the global renewable freshwater resources flows, and 70 percent of anthropic withdrawals globally, with significant differences between countries: 90 percent in low income countries, 43 percent in high income countries.*

### Managing water scarcities in agriculture and food systems

1. *Improving water management in agriculture and food systems aims at improving the productivity of agriculture and food systems for FSN (availability, access, stability, nutrition), given water constraints. This can be achieved by improving water efficiency at all levels (how water is used, from ecosystems to plants) and by improving the agricultural water productivity (the ratio of output to the water input), in rainfed and irrigated systems.*
2. *Improving water management for FSN mobilises actions ranging from appropriate planning and optimization of resources, inputs and means of production, in both rainfed and irrigated systems, as well as along food chains, to sustainable management of ecosystems and landscapes which enhance, regulate and stabilize water provision. Water management will be key to the adaptation to climate change of agricultural systems both rainfed and irrigated.*
3. *For future food security, land and water management needs to preserve ecosystem functions and ensure the future of the resource. Sustainable management of ecosystems, and an ecosystem's approach to water management from local to continental levels is key to ensuring quantity and quality of water for food security and nutrition in the future.*

### Noureddine Gaaloul

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

Founder and Chief Editor International Journal Water Science and Environment Technologies

President of Scientific and Technical Association for Water and the Environment in Tunisia (ASTEE-Tunisie)

[www.jistee.org](http://www.jistee.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**

09 Volumes, 30 Issues, (426 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 (ix): 4 Issues (25 Papers) Water -Agriculture-Climate'2024**

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

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

**Issue 3 – Novembre 2024 (4 Papers):** *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Issue 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

<b>Cheikh Diop</b> , (Université Cheikh Anta Diop, Dakar-Fann, Boulevard Martin Luther King & Corniche Ouest - Sénégal) <i>Yaya Mansour Diédhiou. Analyzing Annual Rainfall from three Centennial Observing Stations in Senegal and the Gambia</i>	6
<b>Chafai Arbi</b> (Université de Tunis El Manar, Tunis) <i>Nadhem Brabim. Apport du SIG et de l'MNT -SRTM à l'étude morphométrique et hydrographique d'un bassin versant en zone semi aride : cas d'Oued Souani-Tunisie.</i>	15
<b>Olfaj Hajji</b> (Ecole supérieur des ingénieurs de Medjez El Beb, Tunisie) <i>Ala Bougeurra; Saleh Jelliti. La proposition d'un plan d'aménagement hydro-agricole (cas du bassin versant El Khrioua – gouvernorat du Kairouan)</i>	30
<b>Youssef Mahjoub</b> (Université de Carthage – Tunisie), <i>Amel Soualmia, Azeddine Kourta</i> Bridge Piers Configuration and Flood Management: A Numerical Analysis of Medjerda River Dynamics	36

[www.jistee.org](http://www.jistee.org)

[jistee@iresa.agrinet.tn](mailto:jistee@iresa.agrinet.tn)

[jistee@yahoo.com](mailto:jistee@yahoo.com)

## Analyzing Annual Rainfall from three Centennial Observing Stations in Senegal and the Gambia

Cheikh Diop<sup>1</sup>, Yaya Mansour Diédhiou<sup>1</sup>

Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal,

### Abstract

Senegal and the Gambia are under the influence of a highly variable climate. Therefore, farming and human settlements have to find ways to adapt to new climate conditions and interannual changes. Climate information plays a crucial role in the adaptation process of public and private organizations. With the need to better understand the changing mode of climate patterns, indices are used to describe the changes in the evolution of climate parameters. This paper aims at replacing the recent increase in rainfall in a broader context of long-term variations of annual precipitation totals. To this end, a long time series (120 years) of ground-based rainfall data has been collected. Three synoptic stations are chosen to analyze the rainfall series of centennial observing stations. The 10-year moving average and the 10-year averages are applied to the rainfall series to determine the trend over more than a century. With the calculation of the Percent Normal Precipitation (PNP), the comparison of phases has been done to distinguish between the wet and dry periods. Subsequently, the series has been divided into deciles to analyze the distribution of the highest and lowest annual precipitation totals. The results show that the trend is decreasing in all stations. The 1920s are the wettest years in Saint-Louis and Banjul, while the 1950s recorded the greatest rainfall amounts in Dakar. Two wet periods are separated by the dry period of the 1970s and 1980s in Saint-Louis and Dakar. In the last couple of decades, with the increase in rainfall, the PNP reached 150% some years. Furthermore, the highest rainfall amounts belong to the period before 1969. They did not appear in the second wet period. Conversely, the lowest rainfall amounts are well represented in the last couple of decades, showing that the recent years share some of the traits of the dry period of the 1970s and 1980s. The peculiarity of the annual precipitation totals since the early 2000s is a piece of climate information that can improve adjustments to year-to-year variations of precipitation.

**Keywords:** centennial observing station, rainfall, drought, Percent of Normal Precipitation, decile, Senegal, the Gambia

### Analyse de la pluviométrie de trois stations d'observation centenaires du Sénégal et de la Gambie

### Résumé

Rainfall over one watershed will be distributed on intercepted water, evaporated, infiltrated and flowed. Water flow at the surface depends on rainfall intensity and soil previous conditions. The year 2023 represent an exceptional dry year. The frequency is studied for the hydrological 22/23 and 23/24 years. Runoff coefficient calculated for registered floods over the three watersheds of Siliana, Nebhana and Lebna are very low from 1 to 2%. This is rarely registered over these watersheds. It shows the weakness of the surface flow and be very low of water volume stocked in the dams. Dam siltation represents a threat to all dams and in particular to these three dams. Siliana dam in particular is a critical situation in that the siltation rate exceeds 50%.

We discuss also the importance of soil conservation measures in the three watersheds. These measures play an important role in soil protection and sediment decrease which increases dam's life. The adaptation measures to these conditions have to be undertaken at the field scale and water bodies.

**Mots clés :** station d'observation centenaire, pluviométrie, sécheresse, Pourcentage de Précipitations Normales, décile, Sénégal, Gambie..

<sup>1</sup> Corresponding author: [1cheikh83.diop@ucad.edu.sn](mailto:1cheikh83.diop@ucad.edu.sn)

## INTRODUCTION

The highly variable character of the climate in West Africa makes it challenging to predict yields and flooding. In fact, human settlements are exposed to a variable rainfall in West Africa [1]. The first step in preparedness is the assessment of changes in the temporal distribution of rainfall. This is possible with long-time rainfall series recorded in Senegal and the Gambia. In fact, a historical perspective in rainfall variations is needed to better understand the recent trend in the climate evolution.

In some cases, there is a succession of wet and dry periods without abrupt changes. By analyzing a 500-long historical rainfall data, Rodrigo et al. [2] showed different phases in the evolution of the rainfall in southern Spain. In connection with the North Atlantic Oscillation, the annual precipitation totals statistically decreased from 1900 to 2010 in most of the Mediterranean regions [3]. In Thailand, Limsakul and Singhruck [4] showed an increase in rainfall in the early 2000s by analyzing a 1955-2014 series. The variations on interannual-to-interdecadal time scales in annual precipitation totals are in relation with large-scale phenomena in the Pacific Ocean.

To better understand the evolutionary pattern of the rainfall, gridded data are developed to provide longer time-series. Funk et al. [5], in 2015, acquired a centennial trend for the Horn of Africa. The gridded data showed a significant decline in rainfall since the 1990s. Century-long station data showed that the recent positive trend seen in Argentina in the second half of the century is still true when placed in a longer time series [6]. In the Sahel region, where Nouaceur and Murarescu [7] analyzed the rainfall data of 27 stations between 1947 and 2014 in Burkina Faso, Mauritania and Senegal, the annual rainfall increased in recent years following the dry period of the 1970s and 1980s and the intermediate period of the 1990s and early 2000s. Descroix et al. [8] highlighted the breaks in a century-long series. The dry period from 1968 continued until 1998 in Senegal and the Gambia. It followed a 1950-1967 wet period. The recovery in rainfall is accompanied by an increase in the interannual variability with abnormally wet years following abnormally dry years. Such a high interannual variability is comparable to what was observed during the wet period before the 1950s [8]. The high variability in rainfall affects both arid and humid regions. In the Northern Territory of Australia, by analyzing rainfall data of 230 stations from 1910 to 2017, He et al. pointed out the abrupt change in rainfall between 1966 and 1975 [9]. They found that the increasing trend in annual precipitation is associated with a greater variability in recent decades. Reconstructed rainfall data show decreases in areas of the Horn of Africa where rain gauges are scarce [5].

As above-mentioned, multidecadal rainfall series display phases in the evolution of annual precipitation totals. In addition, significant breaks appeared as the start of dry periods or wet periods. In the Sahel, recent studies place the beginning of the increase in annual amounts of rainfall in the late 1990s or early 2000s. To better understand the significance of the recent increase in rainfall in the Sahel region and in Banjul, this study focuses on coastal ground-based observations to describe the characteristics of the last phase in the evolution of the annual precipitation totals on the coast of Senegal and the Gambia.

## 2. METHODS

### 2.1 Description of the study area

The weather stations chosen for this study are located in the oldest cities of Senegal and the Gambia (Fig. 1). The city of Saint-Louis in Senegal was founded by Europeans from a ship anchored off the coast. In 1633, the Cape Verde Company established the first trading post for the slave trade on an island at the mouth of the river. Ten years later, the trading post was transferred by Louis Caullier to a less flood-prone area, the island of N'Dar, which then took the name of Saint-Louis, in homage to the King of France [10]. This city was the starting point of all kinds of expeditions across black Africa, Saint-Louis was at that time the heart of the colony of Senegal and its dependencies, capital of the colony of Senegal and finally in 1895 capital of French West Africa: Senegal, Sudan (Mali), Guinea and Côte d'Ivoire. The region of Saint-Louis covers an area of 19,034 km<sup>2</sup>, or about 10% of the national territory. It is bordered to the north by the Senegal River and Mauritania. Located 270 km from Dakar, Saint-Louis is part of the Sahel region and is located at 16°14'04" north latitude and 16°29'22" west longitude. The rainfall measurements began in Saint-Louis in 1892 [11].



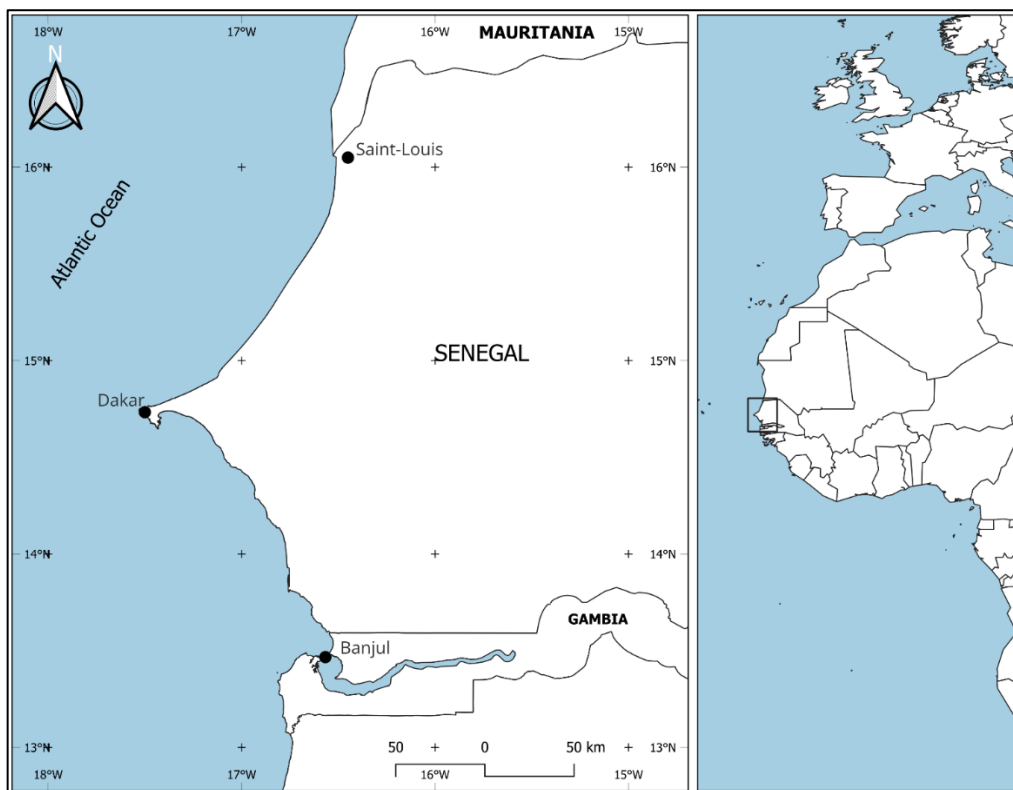


Fig. 1 – Location of the chosen centennial observing stations

Dakar was founded in 1857. In 1875, the administration was transferred from Gorée island, off the coast of Dakar, to Dakar. Nevertheless, it was the construction of the railway in 1883 that gave Dakar its importance. It was erected in 1887 as a commune for its 8,700 inhabitants. The Dakar region is located in the Cape Verde peninsula. It covers an area of 550 km<sup>2</sup>, or 0.28% of the national territory. Dakar is located at 17°30'00" west longitude and 14°43'00" north latitude. The Dakar region is bordered by the Atlantic Ocean in its northern, western and southern parts (12). From a climatic point of view, Dakar belongs to the Sahel region. The first rain gauge was installed in 1896 [11].

Banjul, the capital city of the Gambia, is an island located near the mouth of the Gambia River. It was founded in 1816. Under the orders of the British Colonial Office a military post was established on the river in order to stop the illegal slave trade. It was also intended to be a commercial outlet for merchants sent back from Senegal to France. Banjul was named in honor of Henry Bathurst, then colonial secretary. It thus became the capital of the British colony and protectorate of the Gambia. Bathurst, as it was called then, became the country's capital and was renamed Banjul in 1973. Its geographical position makes it a coastal area. The first rainfall records were made in 1886 [11].

In all of the three areas, there is a distinction between a long dry season of seven to nine months. The duration of the rainy season increases from the north (Saint-Louis) to the south (Banjul). The daily average temperature slightly varies during the year between 20 and 30°C (Fig. 2). In those coastal areas, the temperature is moderate.

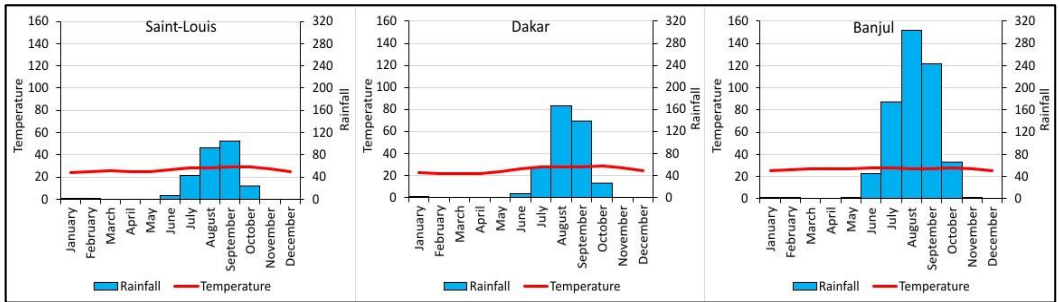


Fig. 2 - Climate diagrams of the study area

Saint-Louis and Dakar are cooler than Banjul, especially in the dry season. The rainfall increases from Saint-Louis to Banjul ranging between 272 mm, in Saint-Louis, and 839 mm, in Banjul. The latter station belongs to a much more rainier climate area. The rainfall is highly variable. From one year to another, the annual precipitation total can be the double. Furthermore, the time series of the rainfall is marked by significant changes showing different periods according to the average yearly rainfall [13, 14, 15, 16, 17]. In fact, the rainfall series in West Africa are characterized by abrupt increases or decreases starting new phases in the evolution of annual precipitation totals.

**2.2 Data and analysis**

To obtain a good representation of the territory covering Senegal and the Gambia, three synoptic stations have been selected (Tab. 1). Two of them are located in the Sahel region (Saint-Louis and Dakar). The station of Banjul represents the wetter area between the arid region and the equatorial climate. Among the nine centennial observing stations that exist in Senegal and the Gambia, these three of them (Saint-Louis, Dakar and the Gambia) offer the most complete rainfall series. They have been chosen to analyze the variability of the rainfall since the beginning of the twentieth century (1901). They are located on the coast of Senegal and the Gambia and differ in latitude (13 ° to 16 °). The time series of 120 years (1901-2020) makes it possible to analyze the evolution of annual precipitation totals in regions where decadal variations of the rainwater have significant consequences in farming and living conditions in cities during the rainy season. In fact, the chosen series include a number of phases among which the severe droughts of the 1970s and the 1980s as well as the noticeable increase in rainfall in the recent decades (1990s and 2000s).

**Table 1 – Selected centennial stations**

Station	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Average annual rainfall in mm (1991-2020)
Saint-Louis	16° 03' 00" N	16° 27' 00" W	4	272
Dakar	14° 43' 48" N	17° 30' 00" W	24	393
Banjul	13° 27' 00" N	16° 34' 48" W	5	835

World Meteorological Organization/Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal

As it is shown on the map (Fig. 1), the three stations are approximately equally positioned from one another -178 km from Saint-Louis to Dakar and 171 km from Dakar to Banjul. While Saint-Louis and Dakar share a Sahel climate with low rainfall and highly variable annual precipitation totals, Banjul displays a much wetter climate with rainfall amounts that are more than the double of the average total of Dakar.

The 10-year moving average, the Percent of Normal Precipitation (PNP) and the deciles have been utilized in analyzing the data. The moving average gave a general trend of the series when applied to annual values [18]. It makes it possible to easily display the trend by removing the extreme numbers that are frequently recorded in the Sahel. It has been displayed alongside the ten-year average of every decade. The PNP gives a measure of the departure between the rainfall of a given year and the 1991-2020 rainfall. The deciles provided insight into the distribution of annual precipitation totals in the series. They are used as indicators of drought or extremely high rainfall. Deciles give a distribution of rainfall in a time series [19, 20]. In this analysis, the 1<sup>st</sup> decile (lowest 10 percent) and the 10<sup>th</sup> decile (highest 10 percent) have been determined to show how the last 20 years (2000-2020) – described as wet - differ from the previous years of the series.

### 3. FINDINGS

#### 3.1 Evolution of the annual precipitation totals from 1901 to 2020

The lines in Fig. 3 show the ten-year moving average of the rainfall in Saint-Louis, Dakar and Banjul from 1901 to 2020. The downward evolution of the trendlines indicate a decreasing trend over the period under consideration.

In Saint-Louis, the first decade (1901-1910) had an average of 341.4 mm. Only the years 1901, 1905, 1906 and 1910 received above-average amounts of rainfall. The second decade (1911-1920) has an average of 439.5 mm. The average for the third decade (1921-1930) was 473 mm. It was in that decade that the rainiest year of the series (1922) has been recorded with its 769.5 mm. The fourth decade recorded an average of 374.7 mm with 1935 as the wettest year with 521.6 mm. From 1941 to 2020 the decadal averages are less than 350 mm. The 1970s, 1980s, and 1990s have averages of no more than 250 mm.

In Dakar, the decadal averages show a fluctuation until the 1950s when the highest annual values were recorded. In fact, the decade 1951-1960, with an average of 613.4 mm, was the rainiest. It was in the first decade, especially in 1906, that the largest quantity of the series was recorded (957.5 mm). From the 1970s to the 1990s, the annual precipitation totals were below 370 mm. There was an increase in the 2000s and 2010s with respectively an average of 424.4 mm and 432,0 mm.

For Banjul, a drop of 235.7 mm has been recorded in the 1910s – from 1215,13 mm to 979,4 mm. In the next decade, the decadal average reached its highest value (1269.2 mm) in the series before decreasing until the 1940s. Two times during the 1920s, annual precipitation totals greater than 1,500 mm have been recorded (in 1923 and 1927). The 1950s showed the second highest amounts with an average of 1221,7 mm. From the 1960s to the 1980s, a steady decline led to the lowest amounts in the 1980s. Since the 1960s, the decadal average of the annual precipitation totals has been below 1000 mm. The rise in the 1990s and 2000s did not continue in the 2010s. In fact, unlike in Saint-Louis and Dakar, in Banjul the upward trend since the 1990s stopped in 2012 with a peak of 1075.4 mm.

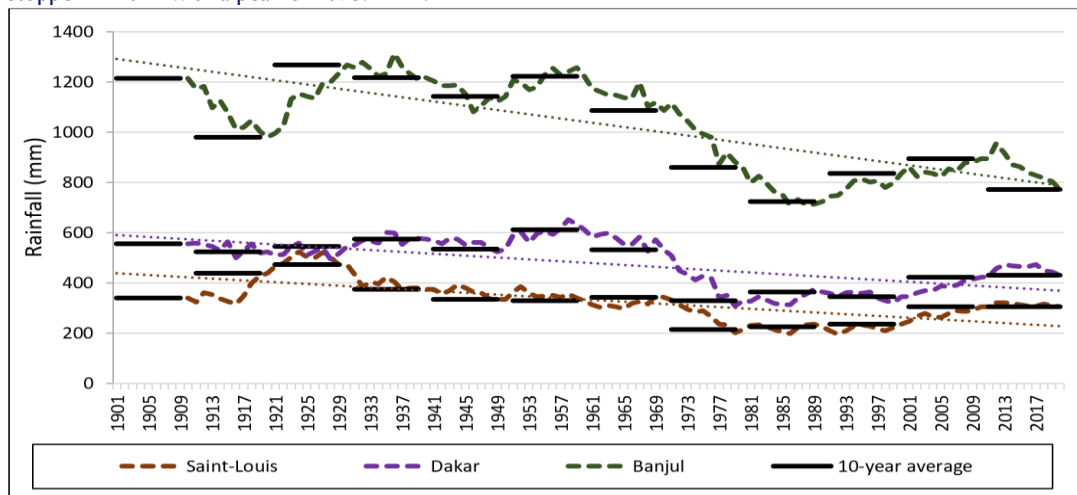


Fig. 3 – Ten-year moving average and ten-year average in Saint-Louis, Dakar and Banjul from 1901 to 2020.

In spite of the differences in the evolution of the decadal average of rainfall, the 1920s and 1950s appear in all three stations as wet decades. The 1920s showed the highest average in Saint-Louis and Banjul, while the 1950s is the wettest for Dakar. As it is showed by the 10-year moving average, from the 1950s the drop in rainfall led to the lowest amounts recorded in the 1980s in all stations.

### 3.2 Evolution of the Percent of Normal Precipitation (PNP) from 1901 to 2020

The evolution of rainfall in Saint-Louis, Dakar and Banjul from 1901 to 2020 shows two change points in Saint-Louis (1969 and 2009) and Dakar (1969 and 2004) (Fig. 4). In Banjul, the break year occurred in 1967.

The rainfall series in Saint-Louis, which has an average of 321.3 mm, can be divided into three periods. The first period (1901-1969) is wet with an average annual precipitation total representing 131.8% of the series average. The rainiest year of this period was 1922 with a proportion of 171.5% compared to the average of the series and the lowest rainfall was recorded in 1931 with 57.9%. The second period (1970-2009), which is dry, has an average annual proportion of 84.3%. The lowest rainfall fell in 1992 with 20.8%. The third period (2010-2020), which is described as wet with an average of 113.7%, is characterized by percentages higher than 150%. In fact, in the first and third periods annual rainfall amounts can be higher than 150%. In the last period, the rainfall amounts varied between 43.7% (in 2014) and 171.8% (in 2010).

In Dakar, the rainfall series shows an average of 482.1 mm and displays three periods. A first wet period (1901-1969) has on yearly average 139.9%. The rainiest year of this period was 1906 with a proportion of 238.8% compared to the average for the series, and the lowest percentage was observed in 1968 with 64.6%. The second period (1970-2004) of this series is dry and has an average of 84.5% in yearly percentage of rainfall. The largest quantities of that period were recorded in 1975 with a proportion of 140.7% and the lowest were recorded in 1972 with 29.1%. The third period (2005-2020) of the series is wet with an average proportion of 114%. The percentages of annual precipitation totals ranged between 165.5% (in 2005) and 40.2% (in 2014).

In Banjul, with an average of 1018.7 mm, the annual rainfall reveals two periods. The first one ended in 1967 with an average yearly proportion of 140.4% of the average of the series. The highest value of the period was recorded in 1936 with 203.4% and the lowest was in 1913 with a proportion of 72%. The second period was dry. It begins in 1968 and ends in 2020 with a yearly average of 98.6%. With an average proportion of 98.6%, the yearly percentage of rainfall varied between 42.4% (in 1983) and 153.5% (in 2010).

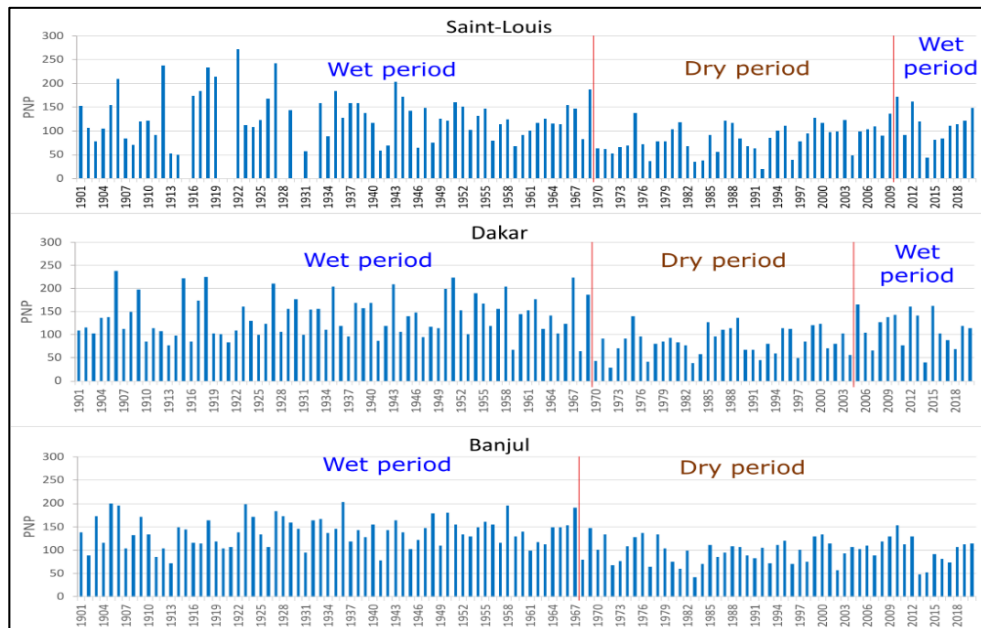


Fig. 4 – Percent of Normal Precipitation (PNP) in Saint-Louis, Dakar and Banjul from 1901 to 2020.

The drop in rainfall in the 2010s in Banjul manifests in the series with the existence of two periods. In the first one, the percentage can go beyond 150%, whereas in the second one it reached that value only one time

(in 2010). Most of the years, the amount of rainfall is below average. In contrast to Saint-Louis and Dakar, Banjul did not show any sustained improvement in the evolution of the rainfall.

### 3.3 Temporal distribution of the lowest and highest annual precipitation totals from 1901 to 2020

Except for the year 2010 in Saint-Louis, the ten highest annual precipitation totals were recorded before 1969 (Tab. 2). This testifies that the first periods in the three stations are wetter than the rest of the series. In the last period, even though there is an increase in rainfall, the precipitation totals are not as high as in the first period.

**Table 2 - Highest annual precipitation totals from 1901 to 2020.**

Saint-Louis	Year	2010	1916	1935	1917	1969	1943	1906	1919	1918	1912	1927	1922
	Rainfall	487	493	521.6	524	531	577.9	595.5	605.6	663.5	674.9	685.8	769.9
Dakar	Year	1954	1909	1950	1935	1958	1943	1927	1915	1967	1951	1918	1906
	Rainfall	760.6	793.4	802.2	817.4	818.4	840.1	847.3	892.9	895.4	901	901.8	957.5
Banjul	Year	1909	1928	1903	1948	1950	1927	1967	1958	1906	1923	1905	1936
	Rainfall	1437.4	1447.5	1451.1	1498.6	1512.2	1538.5	1601.7	1628.8	1634	1664.3	1678.1	1699.1

In Saint-Louis, the twelve wettest years are scattered throughout the period 1901 and 1969, especially between 1906 and 1927. As it has been shown in the decadal analysis, the 1920s are the wettest years in Saint-Louis. In Dakar, the 1950s are well represented among the wettest years on record. Actually, the ninetieth decile appears in the wettest period, that is before 1969. Banjul recorded its twelve highest rainfall amounts mostly in the 1920s. Some of them were recorded in the 1900s and in the 1950s.

The first decile corresponds to the lowest amounts of rainfall. They are mainly recorded in the 1970s and the 1980s (Tab. 3). Therefore, they are peculiar to dry periods, but they appeared in the last twenty years characterized as wet in Saint-Louis and Dakar.

**Table 3 - Lowest annual precipitation totals from 1901 to 2020.**

Saint-Louis	Year	1992	1983	1977	1984	1996	2014	2004	1914	1913	1972	1986	1931
	Rainfall	59.1	99.7	102.3	109.1	110.8	124	139.7	143.7	150.1	152.1	160.2	164.3
Dakar	Year	1972	1983	2014	1977	1970	1992	1997	2004	1984	1994	1968	2007
	Rainfall	116.7	154.9	161.3	171.2	177	181.3	202	228.2	234.4	241.3	258.9	266.1
Banjul	Year	1983	2013	2014	2002	1981	1977	1972	1984	1996	1913	1993	2017
	Rainfall	353.8	401.9	437	474.8	496.9	542.7	561.8	585.8	593	601.4	602	619.9

In Saint-Louis, the year 2014 recorded only 124 mm, one of the lowest amounts ever recorded. Similarly, in Dakar 2004 and 2007 are among the twelve lowest rainfall amounts ever recorded. In Banjul, the lowest annual rainfall appeared four times in the last decades (in 2002, 2013, 2014 and 2017). In fact, the recent upward trend is not observed in Banjul. Unlike the highest rainfall annual precipitation totals (the last decile), the lowest ones (the first decile) appeared in the recent years described as wet in Saint-Louis and Dakar. This means that the recent period shows some similarities with the previous dry period in terms of low annual amounts, but when one considers the wettest years, they find that they do not appear during the recent wet period. This finding is proof that the resumption of precipitation totals comparable to those of the 1920s, 1950s or 1960s is not supported by the data.

## DISCUSSION

By erasing abrupt interannual variations of the rainfall, moving averages allow a better visualization of the 120-year-long series analyzed in this paper. This simplification of the erratic evolution of precipitation in the Sahel is often used to grasp the trends over the decades. Pnevmatikos and Katsoulis [21] used a 5-year moving average to find that a decline in annual precipitation totals in Greece started in the 1980s. With this method and the calculation of departures, they were able to detect a new normal in the rainfall amounts. The interdecadal variations are also visualized by the ten-year averages. They have been efficient in showing the decadal changes in Banjul where the rainfall is higher than in Saint-Louis and Dakar. Indeed, unlike in northern stations (Saint-Louis and Dakar), in Banjul there are significant changes from one decade to another. For

instance, the 10-year average decreased by 13.9 percent in Banjul between the 2000s and the 2010s, whereas it varied only by 1,8 percent in Dakar and by 0,4 in Saint-Louis. The moving averages have been used in the southern part of West Africa to analyze the evolution of annual precipitation totals. We can find an application of this approach in the study of Baidu et al. [22]. They used the 5-year moving average and the decadal anomaly with the series 1901-2010 to analyze the rainfall trend in Ghana. That approach allowed them to confirm the decreasing trend in rainfall over the agroecological zones in Ghana.

With the wet period that ended in the late 1960s in West Africa, rainfall amounts had been decreasing until the 1990s [23]. A growing body of studies showed the increase in rainfall in the 1990s and 2000s after a dry period that started in the 1970s. Nkrumah et al. [24] analyzed a rise in rainfall in Southern West Africa. Through a review paper, Nicholson [25] showed the changes in rainfall in the Sahel. The publications she referred to highlighted the two wet periods separated by the dry period of the 1970s and 1980s. The recent increase in rainfall is associated with higher frequency of heavy rain. In fact, observational as well as gridded data showed a higher frequency of heavy rain in West Africa from 1951 to 2100 [26]. The well-above average years in West Africa (e.g. 2012) are associated with exceptionally high daily rainfall [15]. So, the upward trend of the rainfall since the 1980s is a manifestation of high daily rainfall amounts recorded in some years like in 2005 or 2012 in Dakar [27, 28].

The Percent of Normal Precipitation showed the different phases in the evolution of precipitation totals. The highly variable character of the rainfall in West Africa is documented and updated. Biasutti [29] explained that variability by the warming of the Sahara desert and the ocean changes. The droughts of the 1970s and 1980s are associated with sea surface temperature anomalies. In fact, interannual and interdecadal variability can be caused by regional changes on land and at sea. The prevalence of below average annual totals is in accordance with the paradoxical variation in extreme events. In spite of extreme precipitation intensity, dry spells are recorded in recent years in West Africa from 1970 to 2100 [30].

The spatial variability in the changes in recent decades (1990-2020) is not peculiar to Senegal and the Gambia. Some works found similar trends in other African countries. In Côte d'Ivoire, Konaté et al. illustrated different characteristics of the increase in rainfall in the south, the west and the center of the country [31]. In fact, the starting year of the recent increase in precipitation is not the same in all climatic areas. The same differences have been highlighted by Dacosta and Konaté when they analyzed the change points in Senegal in a series of a hundred years [13]. Independently from the climate type, changes in the variations of rainfall can also differ from one station to another.

## CONCLUSION

The long time series made it possible to analyze the significance of the recent trend in the evolution of annual precipitation totals in the western part of Senegal and the Gambia. The centennial observing stations (Saint-Louis, Dakar and Banjul) showed a declining trend of rainfall even though the annual amounts have been increasing since 2010 in Saint-Louis and 2005 in Dakar. The 1970s and 1980s drought years appear as of historical significance regarding the exceptional low rainfall amounts that are not offset by the recent rise in rainfall. Furthermore, the 1920s in Saint-Louis and in Banjul, and the 1950s in Dakar remain unparalleled. The twelve highest annual precipitation totals have been mainly observed before 1969. They appeared only once (in 2010 in Saint-Louis) in the last two decades (2000-2020). Conversely, the lowest annual precipitation totals are well represented among the recent years characterized as wet. Indeed, the data showed that in all three stations some of the lowest rainfall amounts have been recorded – in 2004 and 2014 in Saint-Louis; in 2007 and 2014 in Dakar; in 2013, 2014 and 2017 in Banjul. In spite of the improvement in the annual rainfall, there are signs of drought-like years.

The highly variable nature of the rainfall in the Sahel and in Banjul is key information for flood prevention and drought mitigation. The last twenty years show that the general climatic context should not shadow the peculiarity of some years marked by extremely high or extremely low rainfall. The downward trend of the annual precipitation totals from 1901 to 2020 is related to the short period (2000-2020) during which low annual rainfall was recorded in some years in spite of the overall increasing trend. Further investigation is needed to shed light on the changes observed in the last couple of decades on the coast of Senegal and the Gambia.

## References

- [1] C. Ciemer, N. Boers, M. Hirota, J. Kurths, F. Müller-Hansen, R. S. Oliveira R. Winkelmann, Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall, *Nature Geoscience*, 3 (2019), 174-179.
- [2] F.S. Rodrigo, M.J. Esteban-Parra, D. Pozo-Va' Zquez, Y. Castro-Di' Ez, Rainfall variability in southern Spain on decadal to centennial time scales, *International Journal of Climatology*, 7 (2000), 721-732.
- [3] C. M. Philandras, P. T. Nastos, J. Kapsomenakis, K. C. Douvis, G. Tselioudis, C. S. Zerefos, Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12 (2011), 3235-3250.
- [4] A. Limsakul, P. Singhruck, Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand, *Atmospheric Research*, 169 (2016), 301-317.
- [5] C. Funk, S. E. Nicholson, M. Landsfeld, D. Klotter, P. Peterson, L. Harrison, The centennial trends Greater Horn of Africa precipitation dataset, *Sci Data*. 1 (2015), 150050.
- [6] R. I Saurral, I. A. Camilloni, V. R. Barros, Low-frequency variability and trends in centennial precipitation stations in southern South America, *Intl Journal of Climatology*, 4 (2017), 1774–1793.
- [7] Z. Nouaceur, O. Murarescu, Rainfall Variability and Trend Analysis of Rainfall in West Africa (Senegal, Mauritania, Burkina Faso), *Water*, 6 (2020), 1754.
- [8] L. Descroix, A. Luxereau, L. A. Lambert, O. Rué, A. Diedhiou, A. Diongue-Niang, A. H. Dia, F. Gangneron, S. P. Manga, A. B. Diedhiou, J. Andrieu, P. Chevalier and B. Faty, An Interdisciplinary Approach to Understand the Resilience of Agrosystems in the Sahel and West Africa, *Sustainability*, 13 (2024), 5555.
- [9] J. He, P. Feng, B. Wang, W. Zhuang, Y. Zhang, D. L. Liu, J. Cleverly, A. Huete, and Q. Yu, Centennial annual rainfall pattern changes show an increasing trend with higher variation over Northern Australia, *Journal of Hydrometeorology*, 8 (2022), 1333-1349.
- [10] B. Toulter, Saint-Louis du Sénégal, un enjeu pour le patrimoine mondial, In Situ [En ligne], 3 | 2003, mis en ligne le 23 avril 2012, URL : <http://journals.openedition.org/insitu/1623>
- [11] J. Le Borgne, La pluviométrie au Sénégal et en Gambie, Dakar : ORSTOM, Ministère Français de la Coopération, 1988, 95 p.
- [12] ANSD (Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Situation économique et sociale régionale (Dakar), ANSD, Dakar, 2013, 129 p.
- [13] H. Dacosta, Y.K. Konaté, La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle, FRIEND 2002—Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice: Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference, Cape Town, South Africa, March (2002), IAHS Publ., 274 (2002), 499-506.
- [14] Y. L'hôte, G. Mahé, B. Somé, J.P. Triboulet, Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues, *Hydrological Sciences*, 47 (2002) 563-572.
- [15] L. Descroix, A. Diongue-Niang, H. Dacosta, G. Panthou, G. Quantin, A. Diedhiou, Evolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger-Moyen (Sahel), *Climatologie*, 10 (2013), 37-49.
- [16] P. Sagna, J.M. Dipama, E.W. Vissin, B.I. Diomandé, C. Diop, P.A.B. Chabi, P.C. Sambou, T. Sané, B.L.C.N. Karambiri, O. Koudamilaro, Y.M. Diédhiou, M. Yade, Climate Change and Water Resources in West Africa: A Case Study of Ivory Coast, Benin, Burkina Faso, and Senegal, in Diop, S., Scheren, P., Niang, A., eds., *Climate Change and Water Resources in Africa*, Springer Nature, 2021, pp. 55-86.
- [17] A. Badji, E. Mohino, M. Diakhaté, J. Mignot, A.T. Gaye, Decadal Variability of Rainfall in Senegal: Beyond the Total Seasonal Amount, *16 (2022)*, 5339-5358.
- [18] T. Merabtene, M. Siddique, A. Shanableh, Assessment of Seasonal and Annual Rainfall Trends and Variability in Sharjah City, UAE, *Advances in Meteorology*, (2016), 6206238.
- [19] B.S. Barrett, M. I. Esquivel Longoria, Variability of precipitation and temperature in Guanajuato, Mexico, *Atmósfera*, 4 (2013), 521-536.
- [20] C. Schär, Ni. Ban, E.M. Fischer, J. Rajczak, J. Schmidli, C. Frei, F. Giorgi, T.R. Karl, E.J. Kendon, A.M.G.K Tank, P.A. O'Gorman, J. Sillmann, X. Zhang, F.W. Zwiers, Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events, *Climate Change*, 1-2 (2016), 201-216.
- [21] J.D. Pnevmatikos, B.D. Katsoulis, The changing rainfall regime in Greece and its impact on climatological means, *Meteorological Applications*, 4 (2006), 331-345.
- [22] M. Baidu, L.K. Amekudzi, J.N.A. Aryee, T. Annor, Assessment of Long-Term Spatio-Temporal Rainfall Variability over Ghana using Wavelet Analysis, *Climate*, 2 (2017), 30.
- [23] L. Le Barbé, T. Lebel, D. Tapsoba, Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950–90, *Journal of Climate*, 2 (2002), 187-202.
- [24] F. Nkrumah, T. Vischel, G. Panthou, N.A.B. Klutse, D.C. Adukpo, A. Diédhiou, Recent Trends in the Daily Rainfall Regime in Southern West Africa, *Atmosphere*, 12 (2019), 741.
- [25] S.E. Nicholson, The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability, *ISRN Meteorology* (2013), 453521.
- [26] I. A. Saley, S. Salack, Present and Future of Heavy Rain Events in the Sahel and West Africa, *Atmosphere*, 6 (2023), 965.
- [27] P. Sagna, O. Ndiaye, C. Diop, A. Diongue-Niang, P.C. Sambou, Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? *Pollution atmosphérique*, 227 (2015), 1-17
- [28] A. Mendy, Variabilité des pluies au XX<sup>e</sup> siècle à Dakar, Sénégal, *Norois*, 268-269 (2023), 109-127.
- [29] M. Biasutti, Rainfall trends in the African Sahel: Characteristics, processes, and causes, *WIRES Climate Change*, 4 (2019), e591.
- [30] M.B. Sylla, P.M. Nikiema, P. Gibba, I. Kebe, N.A.B. Klutse, Climate Change over West Africa: Recent Trends and Future Projections, in Yaro, J.A., Hesselberg, J., eds., *Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa*, Springer Nature, 2023, pp. 25-40.
- [31] D. Konaté, S.R. Didi, K. B. Dje, A. Diédhiou, K. L. Kouassi, B. Kamagate, J.-E. Paturel, H.S.J.P. Coulibaly, C.A.K. Kouadio, T.J.H. Coulibaly, Observed Changes in Rainfall and Characteristics of Extreme Events in Côte d'Ivoire (West Africa), *Hydrology*, 5 (2023), 104

## Apport du SIG et de l'MNT-SRTM à l'étude morphométrique et hydrographique d'un bassin versant en zone semi-aride : cas d'Oued Souani -Tunisie.

Arbi.Chafai<sup>1</sup>, Nadhem.Brahim

<sup>1</sup> Laboratoire Plantes, Sols et Environnement LR21ES01, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 2092 Tunis

### Résumé

L'eau est une ressource indispensable pour toutes les formes de vie sur terre. Elle présente le cœur du développement socio-économique, du fonctionnement des écosystèmes et de la survie humaine. Toutefois, cette ressource peut se transformer en une catastrophe naturelle engendrant de multiples risques naturels tels que les ruissellements, l'érosion hydrique, les inondations et les glissements de terrains. Pour faire face à ces risques, la protection de cette richesse nécessite une étude préalable des caractéristiques morphométriques des bassins versants, qui jouent un rôle crucial dans le ruissellement des eaux de surface. L'objectif de cette recherche est d'évaluer les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant d'Oued Souani en utilisant les techniques SIG et les modèles numériques de terrain (MNT) de type (SRTM) avec une précision de 30 m. Ces outils constituent actuellement les techniques les plus avancées pour élaborer des cartes thématiques et extraire automatiquement les différents paramètres qui caractérisent la zone d'étude (forme, relief, réseau hydrographique, pente) avec une grande précision et en un temps limité. Les résultats obtenus forment une base de données contenant toutes les mesures et les formules mathématiques nécessaires qui permettent d'étudier la géomorphologie du bassin versant étudié, de comprendre leurs caractéristiques hydrologiques et de planifier des stratégies de prévention face aux risques naturels.

**Mots clés :** Bassin versant, Oued Souani, SIG, MNT, Caractéristiques morphométriques, Tunisie.

### Contribution of GIS and DEM-SRTM to the morphometric and hydrographic study of a watershed in a semi-arid zone: case of Souani River – Tunisia

#### Abstract

Water is an indispensable resource for all forms of life on earth. It lies at the heart of socio-economic development, ecosystem functioning and human survival. However, this resource can be transformed into a natural disaster, generating multiple natural hazards such as runoff, water erosion, flooding and landslides. To cope with these risks, protection of this resource requires prior study of the morphometric characteristics of watersheds, which play a crucial role in surface water runoff. The objective of this research is to evaluate the morphometric and hydrographic characteristics of the Souani River watershed using GIS techniques and Digital Elevation Model (DEM) of the type (SRTM) with a precision of 30 m. These tools currently constitute the most advanced techniques for developing thematic maps and automatically extracting the different parameters that characterize the study area (shape, relief, hydrographic network, slope) with great precision and in a limited time. The results obtained form a database containing all the necessary measurements and mathematical formulas which make it possible to study the geomorphology of the watershed studied, to understand their hydrological characteristics and to plan prevention strategies in the face of natural risks.

**Keywords:** Watershed, Souani River, GIS, DEM, Morphometric characteristics, Tunisia.

<sup>1</sup> Corresponding author: [geologue.arbi@hotmail.com](mailto:geologue.arbi@hotmail.com)



## I. INTRODUCTION

Un bassin versant est une zone de recueil des eaux de ruissellement et d'infiltration qui alimentent les rivières et les ravines et qui se rassemblent vers un même point, le plus en aval du réseau hydrographique, connu sous le nom d'exutoire. Le bassin versant est délimité par les lignes de partage des eaux, lignes théoriques de plus haute altitude qui font le tour de l'ensemble du bassin et déterminent la direction de l'écoulement des eaux de surface [1, 2, 3]. En outre, les bassins versants sont fondamentaux pour les études hydrologiques [4] et la protection et la conservation des ressources naturelles [5].

L'étude des risques naturels dans un bassin versant nécessite une connaissance approfondie de l'hydrologie, de la géologie, de la géomorphologie, de l'écologie et du climat afin de déterminer les éléments qui influencent sur la naissance des risques naturels (le couvert végétal, la pente, l'occupation du sol et le réseau hydrographique). En effet, les caractéristiques morphométriques sont les plus déterminantes pour les écoulements dans un bassin versant [6, 7]. Selon Narmatha et al. (2013) [8], ces mesures sont les premières prises par les géomorphologues afin de mesurer théoriquement l'impact de la morphologie du bassin sur le comportement hydrologique. Elles désignent les premières mesures réalisées par les géomorphologues pour quantifier théoriquement l'influence de la morphologie du bassin sur le comportement hydrologique [8]. Les premières études morphométriques dans le domaine de l'hydrologie ont été menées par Horton en 1940 et Strahler en 1950 [9]. Ainsi, l'analyse morphométrique est une approche importante pour la hiérarchisation des bassins versants, même sans tenir compte de la carte des sols [10].

Plusieurs paramètres quantitatifs importants peuvent être utilisés pour comprendre la dynamique d'un bassin versant : la surface, le périmètre, la longueur, la largeur, l'indice de compacité de Gravelius, l'indice de pente, la pente moyenne du cours d'eau, l'altitude maximale, l'altitude minimale [11]. L'analyse quantitative de ces paramètres morphométriques est donc largement utilisée dans les études consacrées à l'évolution des bassins versants et facilite la compréhension des processus topographiques et des propriétés physiques des sols. Elle fournit également des informations utiles pour résoudre efficacement divers problèmes naturels, tels que les sécheresses, l'érosion des sols et les inondations, ce qui aide considérablement à planifier des stratégies de prévention des catastrophes dans ces bassins versants et à comprendre leurs caractéristiques hydrologiques [12, 5].

Les méthodes traditionnelles employées pour l'analyse des caractéristiques physiques des bassins versants sont principalement basées sur des techniques manuelles et les résultats sont souvent imprécis. De nos jours, l'avènement de nouveaux outils tels que les SIG et les différents types d'imagerie satellitaire, il est devenu plus facile de déterminer différents paramètres tels que la forme, le relief et la classification des réseaux hydrographiques.

La présente étude avait pour but de faire ressortir les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani en utilisant les techniques SIG et les modèles numériques de terrain (MNT). Ces outils sont souvent utilisés pour l'analyse morphologique et ont le potentiel de fournir des informations spatiales précises pour la gestion des bassins versants et la prévention des catastrophes naturelles [13, 14, 5].

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. Site d'étude

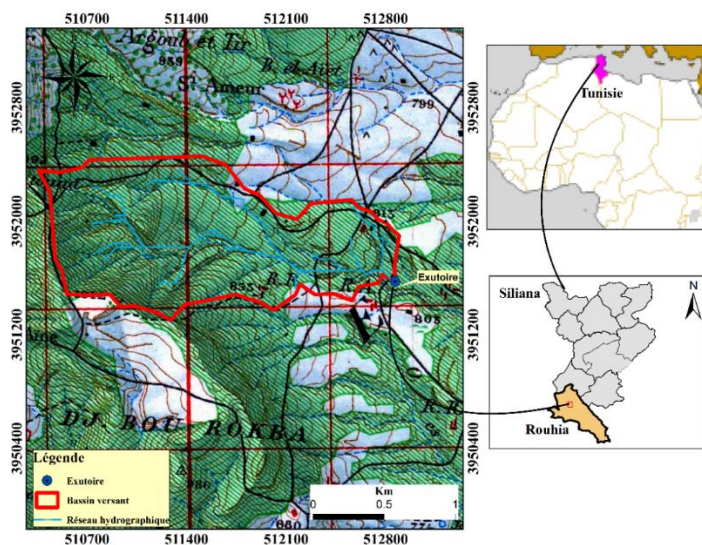
Géographiquement, le petit bassin versant d'oued Souani est situé au Nord-ouest de la Tunisie, dans la zone d'Esmirat de la délégation de Rouhia du gouvernorat de Siliana (fig.1). Ce bassin versant est l'un des six lacs collinaires programmés en 2015 par le Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) du gouvernorat de Siliana. Le projet s'inscrit dans le cadre des stratégies tunisiennes de protection des ressources naturelles et de développement du secteur agricole dans les zones montagneuses. Le climat de la zone d'intérêt est de type semi-aride inférior avec des hivers frais. Compte tenu de l'absence de station pluviométrique dans le bassin versant d'oued Souani, et après une grille détaillée, nous avons décidé que la station de Majbare Skarna était la plus proche (4 km) de la zone d'étude. Sur la période 1980-2011, les précipitations annuelles moyennes ont atteint un maximum de 553,35 mm en 2003, tandis que l'année la plus sèche a été 1988-1989, avec des

précipitations totales de 153,10 mm. En termes d'hydrologie, les eaux de surface du bassin proviennent du cours d'eau principal représenté par oued Souani.

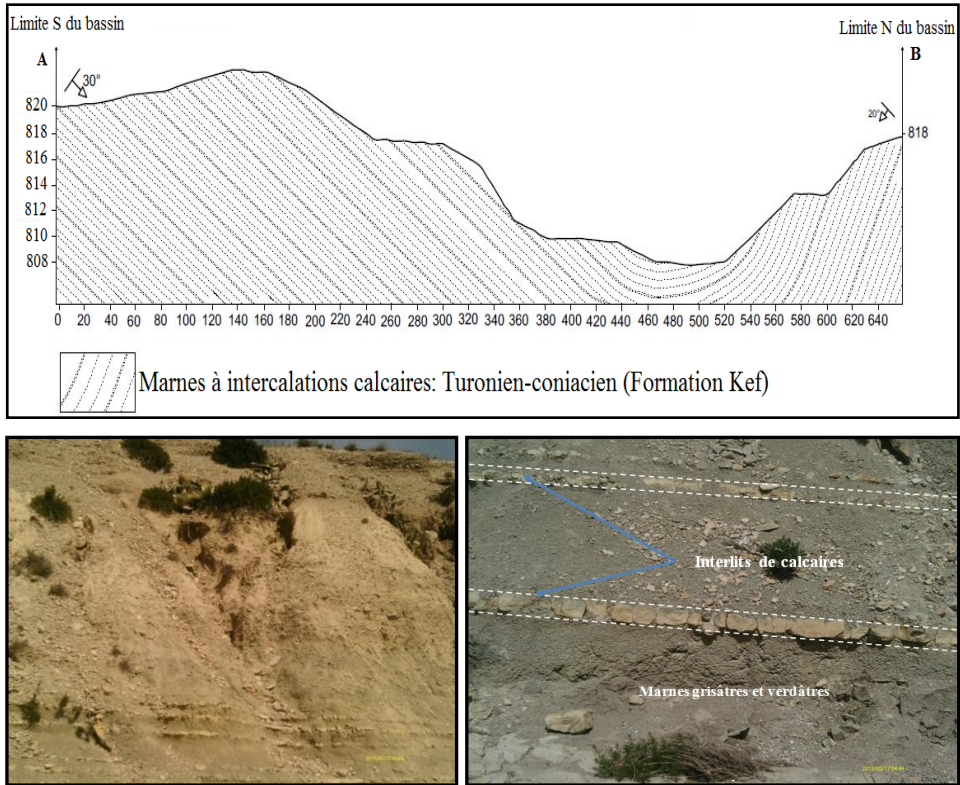
D'un point de vue géologique, le bassin s'étend sur quatre unités lithologiques, presque toutes formées de matériaux crétacés. Ces séries géologiques sont traversées par une série de failles NW-SE et N-S. Dans la partie aval, où se trouve le bassin, les couches géologiques correspondent à des marnes grisâtres et verdâtres alternant avec des interlits calcaires de la formation du Kef. Dans la partie aval, les couches géologiques correspondent à des marnes grisâtres et verdâtres alternant avec des interlits calcaires de la formation du Kef. Le pendage des couches est faible, 10° en aval, et peut atteindre 20° et 30° en dehors du bassin versant (Fig.3). En fait, la coupe géologique AB (Fig.3) montre que la cuvette du bassin correspond à une fermeture synclinale légèrement inclinée vers la rive gauche. Les pieds des berges sont recouverts par les dépôts alluviaux récents sous forme de terrasses à matrice argileuse.

Il existe trois principaux types de sols dans ce bassin versant : les sols minéraux bruts sont les plus répandus, représentant 44,1 % des sols du bassin, ils sont superficiels et résultent d'une érosion importante ; sols complexes (35,9%) ; et des sols peu développés, profonds et situés dans la partie aval, très proches de l'exutoire. Cette classe de sols couvre 20 % de la superficie totale du bassin versant.

La répartition spatiale des sols dans le bassin d'oued Souani indique différentes zones d'occupation à savoir les terres agricoles (céréalicultures, oliveraies) ont une superficie de 27,1 ha, soit 13,8% du bassin versant. Cette zone est très dégradée et actuellement traversée par plusieurs ravines, du fait de la présence de fortes pentes au niveau du Djebel Skarna, ce qui génère des vitesses élevées au niveau des écoulements. La formation forestière (forêt, garrigue et garrigue claire) domine sur ce bassin, elle occupe un espace très important de 138,9 ha, soit environ 70,8% de la superficie du bassin versant. Cette zone subit aussi une dégradation remarquable. Les forêts sont formées par des chaînes de pins d'Alep (*Pinus halepensis*). Les zones de parcours représentent 12,6% de la superficie totale et se trouvent principalement dans la partie Nord-Est du bassin versant près de l'exutoire. Le reste de la zone du bassin est occupé par des terrains nus.



**Fig.1-** Situation géographique de la zone d'étude



**Fig.2-** Alternance des marnes grisâtres et verdâtres avec des inters-lits de calcaire (épaisseur d'environ 5 à 10 cm) de la formation Kef

## 2.2 Base de données

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé une image satellitaire de type SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) d'une résolution de 30 x 30 mètres, téléchargée depuis le site : <http://opentopo.sdsc.edu/datasets>. Le traitement d'images MNT (Modèle numérique de terrain) a permis de délimiter la zone d'étude, d'extraire plusieurs cartes thématiques et d'évaluer différents paramètres morphométriques, topographiques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani. Le logiciel Arc GIS 10.3 a été utilisé pour traiter les données de cette étude. Ainsi, nous avons utilisé la carte topographique et géologique au 1/50 000 de la zone d'étude du Djebel Barbrou, Rouhia. L'organigramme de la méthodologie du travail est représenté par la figure ci-après (Fig. 3)

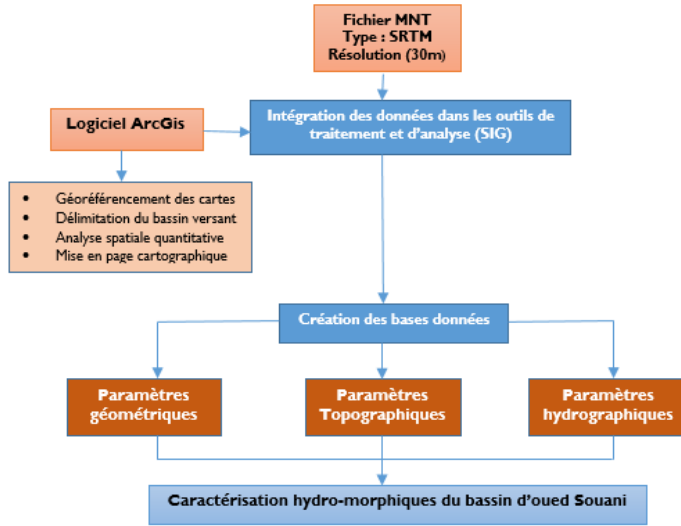


Fig. 3 - Organigramme d'étapes d'élaboration des paramètres hydro-morphiques du bassin étudié

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Caractéristiques géométriques

La forme du bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est-à-dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent sur l'hydrogramme de crue [15]

##### 3.1.1. Surface (S) & Périmètre (P)

La surface est un facteur clé dans la caractérisation morphométrique des bassins versants. Il indique la zone où tombent les précipitations et où les cours d'eau sont alimentés. Le périmètre représente toute irrégularité du contour ou de la limite du bassin versant [10, 15, 16]. C'est un indicateur de la taille du bassin versant [17]. Ces deux paramètres fournissent des informations importantes et précieuses dans l'étude des bassins versants. La superficie et le périmètre du bassin versant d'oued Souani ont été déterminés à l'aide du logiciel Arc GIS. Il couvre une superficie de  $A=1,96 \text{ km}^2$  et a un périmètre de  $P = 6,78 \text{ Km}$

##### 3.1.2. Indice de compacité de Gravelius $K_G$

L'indice de compacité de Gravelius  $K_G$  (1914) [18] est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant (P) au périmètre d'un cercle de même superficie. Il donne une idée sur la forme du bassin versant qui a une influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme. L'indice de compacité est obtenu par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \times S}} \approx 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{Eq. 1}$$

**Avec :**

$K_G$  : Indice de compacité de Gravelius

S : surface du bassin versant ( $\text{km}^2$ )

P : périmètre du bassin (km)

L'indice de compacité est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Cet indice permet l'évaluation globale du réseau de drainage : plus le bassin est compact, plus sa forme est ramassée, plus l'indice de Gravelius est faible et plus le temps de concentration est court [19].

Pour le bassin versant d'oued Souani,  $K_G = 1,36$ , le bassin a une forme allongée. Sa direction d'allongement est Sud-Est. Il est parallèle à la direction de l'écoulement de l'eau. Cette forme entraîne une érosion assez importante des sols.

### 3.1.3. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent correspond à une transformation géométrique du bassin versant. Elle prend alors une forme rectangulaire tout en conservant la même surface, périmètre et indice de compacité, et donc la même distribution hypsométrique [16]. La longueur et la largeur du rectangle équivalent sont calculées à l'aide des deux formules suivantes de Musy et Higy (2004) [20] :

$$L = \frac{K\sqrt{S}}{1.12} \times [1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2}]; \quad I = \frac{K\sqrt{S}}{1.12} \times [1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2}] \quad \text{Eq. 2}$$

**Avec :** L : Longueur du rectangle équivalent, I : Largeur du rectangle équivalent, A : Surface du bassin versant, K : Indice de compacité de Gravelius.

Pour le bassin concerné,  $L = 2,66$  km et  $I = 0,74$  km. Ces dimensions du rectangle équivalent signifient que la longueur est 3,59 fois supérieure à la largeur. Ils permettent de tracer le rectangle équivalent du bassin versant d'oued Souani (Fig. 6), à partir des données de la carte et de la courbe hypsométriques (Fig. 4 et 6 et Table. 2). Les caractéristiques physiques déterminées sont résumées dans le tableau n° 1.

**Table 1-** Caractéristiques géométriques du bassin versant d'oued Souani

Surface	Périmètre	Indice de compacité	Longueur du rectangle équivalent	Largeur du rectangle équivalent
1,96 km <sup>2</sup>	6,78 Km	1,36	2,66 km	0,74 km

## 3.2. Caractéristiques topographiques

L'étude des caractéristiques topographiques est un aspect essentiel pour comprendre le comportement hydrologique des bassins versants, car de nombreux phénomènes hydrologiques et climatiques changent en fonction du facteur altitude, comme les précipitations et la température.

### 3.2.1. Carte hypsométrique

La carte hypsométrique du bassin versant d'oued Souani a été obtenue par traitement des données à l'aide du modèle numérique de terrain de la zone d'étude (Fig.4). En effet, nous avons classé les altitudes du bassin en neuf tranches espacées de 30 m (Table.1). Ces résultats ont permis de tracer la courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Souani, qui offre une vue synthétique de la pente du bassin versant et représente la répartition de la superficie du bassin versant en fonction de son altitude. Ainsi, la forme de cette courbe permet de déterminer le degré d'érosion et de caractériser l'état de maturité du relief des bassins versants (jeune, en équilibre et vieux) [19].

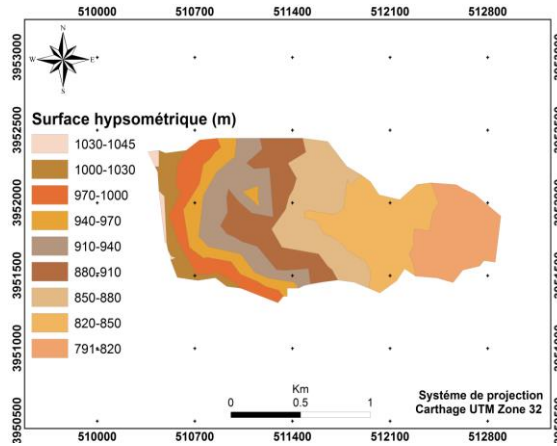


Fig.4-Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Souani

La carte hypsométrique montre des tranches d'altitude équidistantes de 30 m. Ces tranches sont généralement orientées E-W. Les zones de haute altitude sont situées dans la partie amont du bassin, tandis que les zones de basse altitude se trouvent à l'ouest et autour du lac à flanc de rivière Souani (Fig.4). Cette différenciation altimétrique favorise l'écoulement des eaux de surface au sein du bassin.

Table 2- Distribution hypsométrique du bassin versant d'oued Souani (chaque 30 m)

Altitudes (m)	Surfaces partielle		Surfaces cumulée		Hi (m)
	(Km <sup>2</sup> )	(%)	(Km <sup>2</sup> )	(%)	
<b>1030-1045</b>	0,016	0,82	0,016	0,82	1037,5
<b>1000-1030</b>	0,105	5,36	0,121	6,18	1015
<b>970-1000</b>	0,170	8,67	0,291	14,85	985
<b>940-970</b>	0,147	7,5	0,438	22,35	955
<b>910-940</b>	0,263	13,42	0,701	35,77	925
<b>880-910</b>	0,268	13,67	0,969	49,44	895
<b>850-880</b>	0,328	16,74	1,297	66,18	865
<b>820-850</b>	0,366	18,67	1,663	84,85	835
<b>791-820</b>	0,297	15,15	1,960	100	805,5

Le rectangle équivalent montre que les courbes de niveaux sont assez serrées en amont du bassin versant, indiquant que cette partie du bassin présente une forte pente et un relief assez élevé. Ils deviennent progressivement plus espacés vers l'exutoire du bassin versant, à mesure que la pente diminue et que la zone devient plus plate (Fig. 5).

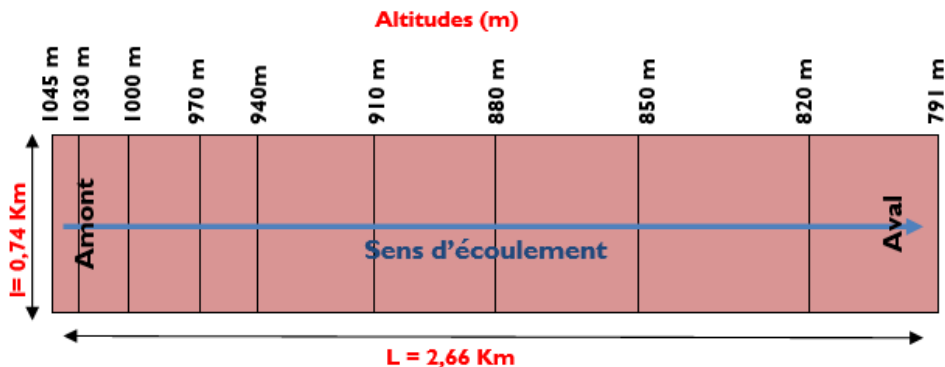


Fig. 5- Rectangle équivalent pour le bassin versant d'oued Souani

La courbe hypsométrique montre l'état d'équilibre du bassin de l'oued Souani. Le potentiel d'érosion est donc moyen. La classe d'altitude dominante se situe entre 791 m et 880 m, elle occupe environ 51% de la superficie totale du bassin versant, ses zones représentent les plaines et les versants. Les zones à très haute altitude (> 940 m) comme : Djebel Bou Rokba couvre une faible surface ne dépassant pas 23 % (Fig.6).

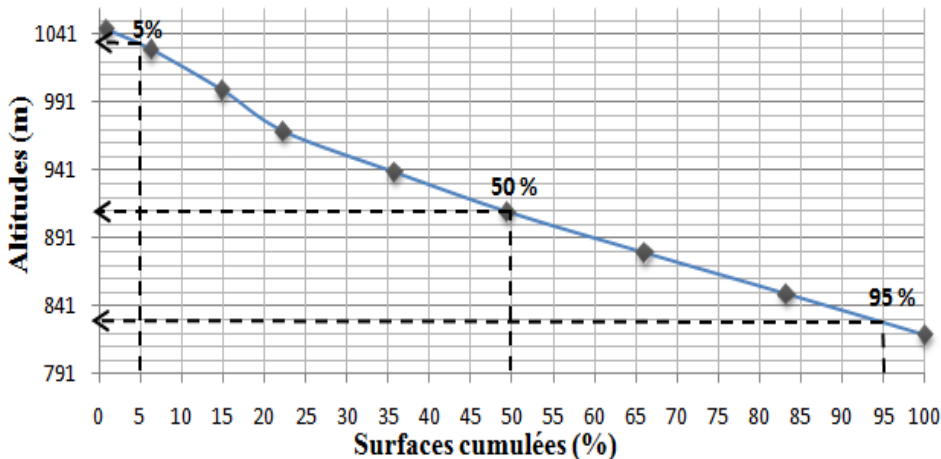


Fig. 6 - Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Souani

### 3.2.2. Altitudes caractéristiques

Les principales élévations du bassin versant d'oued Souani sont extraites directement du modèle numérique de terrain (MNT) et de la courbe hypsométrique (Fig.4 et 6).

- L'altitude maximale ( $H_{max}$ ) : **1045 m**
- L'altitude minimale ( $H_{min}$ ) : **791 m**
- L'altitude correspond à 5% de la surface ( $H_{5\%}$ ) = **1031 m**
- L'altitude correspond à 95% de la surface ( $H_{95\%}$ ) = **831 m**

Les altitudes maximale et minimale permettent de caractériser le bassin versant et de déterminer son amplitude altimétrique. Ils sont également nécessaires au calcul de la pente moyenne [17]. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin versant, tandis que l'altitude la plus basse correspond généralement à l'exutoire.

### 3.2.2.1. Altitude moyenne

L'altitude moyenne peut être déduite de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. Il est défini par la formule suivante.

$$H_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \times H_i}{S} \quad \text{Eq. 3}$$

#### Avec :

$H_{moy}$  : Altitude moyenne du bassin (m).

$S_i$  : Surface comprise entre deux courbes de niveaux  $i$  et  $i+1$  ( $Km^2$ ).

$H_i$  : Altitude entre ces deux courbes de niveaux successives (m).

$S$  : Surface totale du bassin versant en  $Km^2$

L'altitude moyenne du bassin versant d'oued Souani est  $H_{moy} = 899$  m, calculée manuellement à l'aide de la formule ci-dessus et du tableau 2.

### 3.2.2.2. Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la superficie totale du bassin, sur la courbe hypsométrique [21]. L'altitude médiane de notre bassin versant au point de 50% de la surface totale est approximativement égale à **911 m**. Cette valeur est proche de celle de la moyenne (**899 m**). L'écart (**12 m**) résulte de la courbe hypsométrique qui a une pente régulière.

**Table 3** - Altitudes caractéristiques et dénivelée du bassin versant étudié

B.V d'oued	$H_{max}$ (m)	$H_{min}$ (m)	$H_{5\%}$ (m)	$H_{50\%}$ (m)	$H_{95\%}$ (m)	(D) (m)
Souani	1045	791	1031	911	831	200

### 3.2.3. L'indice global de pente Ig

L'indice de pente global déterminant le relief d'un bassin versant est défini comme étant le rapport entre la dénivelée (D) qui sépare les altitudes  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  sur la courbe hypsométrique et la longueur du rectangle équivalent [22].

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad \text{Eq. 4}$$

#### Avec :

D : Dénivelée (m)

L : longueur de rectangle équivalent (km)

Dubreuil (1971) [21] a montré que cette première classification du relief basée sur l'indice global de pente ( $I_g$ ) donné par l'ORSTROM est applicable à de petits bassins versants d'environ 25  $km^2$  de superficie. La superficie du bassin versant cible n'excède pas 25  $km^2$ , il est donc inclus dans ce classement (Table .4). L'indice de pente global est de **0,075 m/m, son relief est donc fort (R6)**.



**Table 4 - Classification du relief selon l'ORSTOM (lg) (bassins versants < 25 km<sup>2</sup>)**

Classe	Valeurs d'lg	Classe des reliefs
1	lg < 0.002	Relief très faible
2	0.002 < lg < 0.005	Relief faible
3	0.005 < lg < 0.01	Relief assez faible
4	0.01 < lg < 0.02	Relief modéré
5	0.02 < lg < 0.05	Relief assez fort
6	0.05 < lg < 0.1	Relief fort
7	0.5 < lg	Relief très fort

### 3.2.4. Le dénivelé spécifique

Le dénivelé spécifique (Ds) est le produit de l'indice de pente global (lg) par la racine carrée de la superficie totale du bassin versant (S) [23].

$$Ds = lg \times \sqrt{S} \quad Eq.5$$

#### Avec :

lg : indice global de pente (m/m)

S : superficie du bassin versant (m<sup>2</sup>)

Cette deuxième classification (Table 5) ne tient pas compte de la superficie du bassin versant, elle est applicable à tout bassin quel que soit sa superficie [21].

**Table 5- Classification du relief de l'ORSTOM (Ds)**

Classe	Valeurs de Ds	Classe des reliefs
1	Ds < 10 m	Relief très faible
2	10 m < Ds < 25 m	Relief faible
3	25 m < Ds < 50 m	Relief assez faible
4	50 m < Ds < 100 m	Relief modéré
5	100 m < Ds < 250 m	Relief assez fort
6	250 m < Ds < 500 m	Relief fort
7	Ds > 500 m	Relief très fort

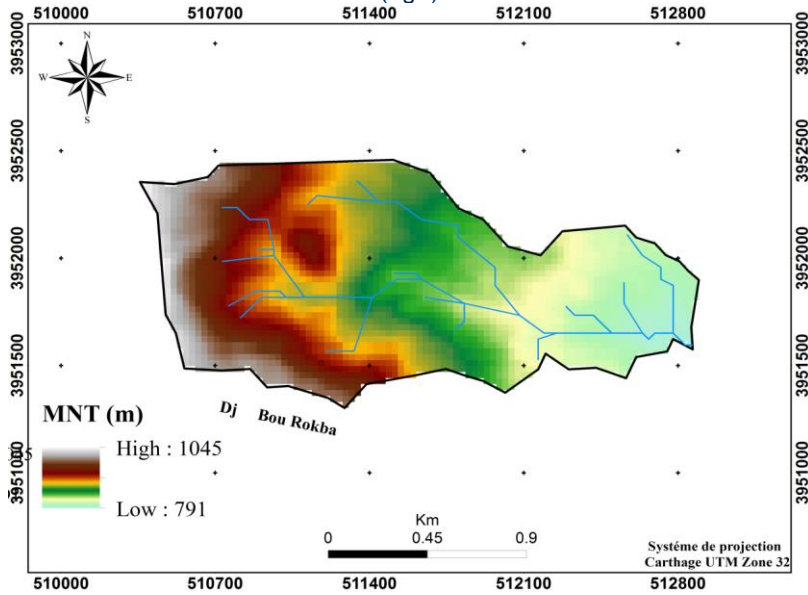
La pente spécifique (Ds) du bassin versant d'oued Souani est de l'ordre de **105 m**, (100 m < Ds < 250 m), ce qui permet de le classer dans une catégorie correspondant à un relief **assez fort (R5)** (Table 5). Ces deux derniers indices confirment que ce bassin est caractérisé par un relief accidenté, le rendant très sensible à l'érosion des sols.

### 3.2.5. Pente

La pente joue un rôle très important contre le phénomène d'érosion. Il est utilisé pour démontrer la capacité d'un ruissellement à arracher et transporter les particules. Plus la pente est élevée, plus l'effet de la dégradation du sol est important. La cartes des altitudes et des pentes de la zone d'étude ont été produites par le modèle numérique du terrain MNT du type SRTM avec une résolution de 30 m × 30 m à l'aide d'un système d'information géographique (Arc-GIS).

### 3.2.5.1. Pente du bassin versant d'oued Souani

La topographie de la zone d'étude est relativement accidentée, caractérisée par une variation altitudinale importante, allant de **791 m** à l'exutoire à **1047 m** (Fig.7).



**Fig. 7 –** Carte des altitudes du bassin versant d'oued Souani

Le bassin versant d'oued Souani prédomine (63% de la superficie du bassin versant) sur des pentes moyennes à très raides définies principalement dans le haut relief du Djebel Bou Rokba. Avec ces classes, le ruissellement est concentré et la vitesse augmente, ce qui explique l'apparition de certaines formes d'érosion (ravines et ravins) (Fig. 9) et inversement les classes de faibles pentes qui favorisent le décapage superficiel des sols. Toutefois, les faibles pentes sont concentrées dans les plaines (Fig. 8). En fait, environ 37 % du bassin versant présente une classe de pente faible à très faible (moins de 10 %) (Table 6).

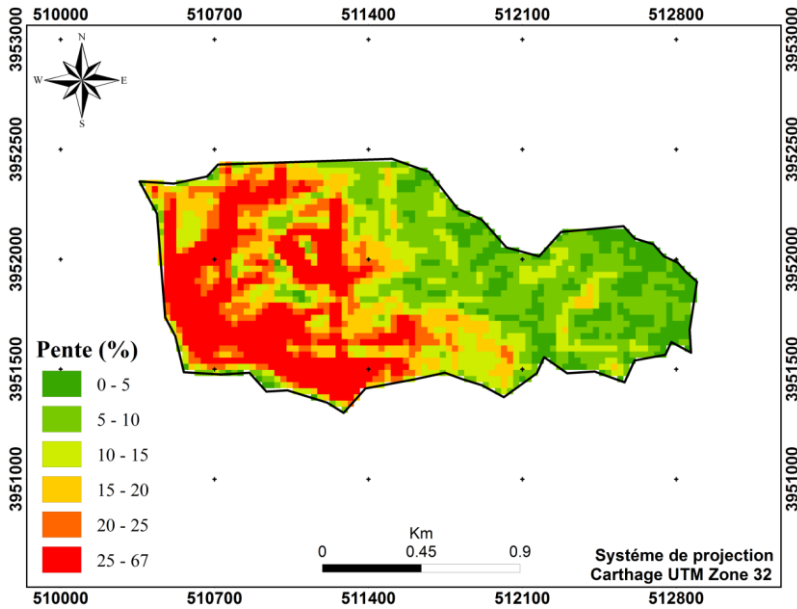
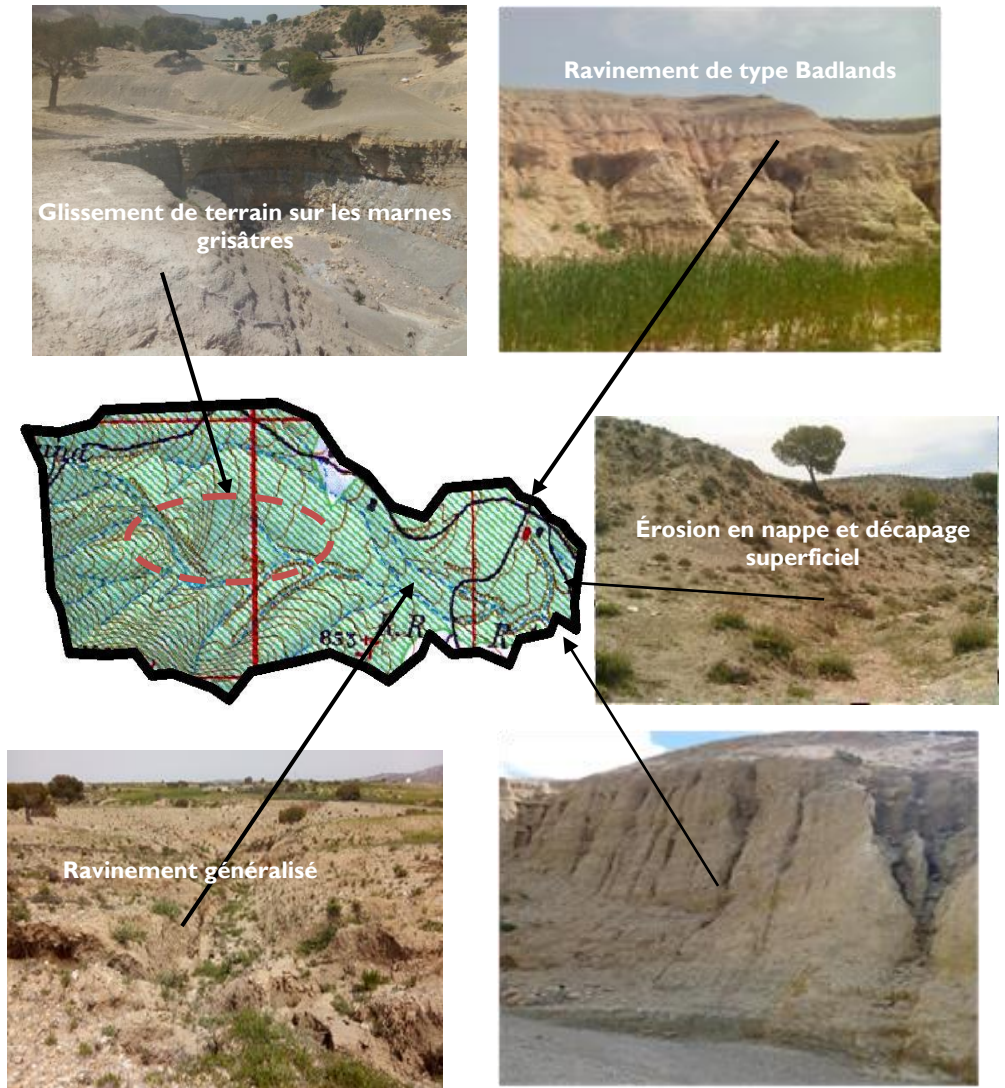


Fig. 8- Carte des pentes de la zone d'étude

Table 6 - Répartition des classes de pente du bassin d'oued Souani en fonction de la surface (%)

N° de classe	Pente	Classe de pente	Surface	Taux (%)
1	0-5	Pente très faible	23,85	12,17
2	5-10	Pente faible	47,90	24,43
3	10-15	Pente moyenne	32,90	16,79
4	15-20	Pente assez forte	27,55	14,05
5	20-25	Pente forte	19,00	9,70
6	25-67	Pente très forte	44,80	22,86

Ces conditions topographiques peuvent entraîner des pertes de terres importantes en raison de la prédominance de sols sensibles à l'érosion (sols superficiels ( $z < 20$  cm) pauvres en matière organique et occupant des zones en pente) et de structures lithologiques formées essentiellement de marnes et d'argiles qui deviennent plastiques et imperméables à l'eau. Les premières précipitations, limitant l'infiltration de l'eau dans le sol et favorisant uniquement le ruissellement des eaux superficielles.



**Fig. 9 -** Formes d'érosion hydrique observées dans le bassin versant d'oued Souani

### 3.3. Caractéristiques hydrographiques

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des canaux de drainage naturels ou s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines soit sous forme de source, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau [1].

#### 3.3.1 Ordre des cours d'eau

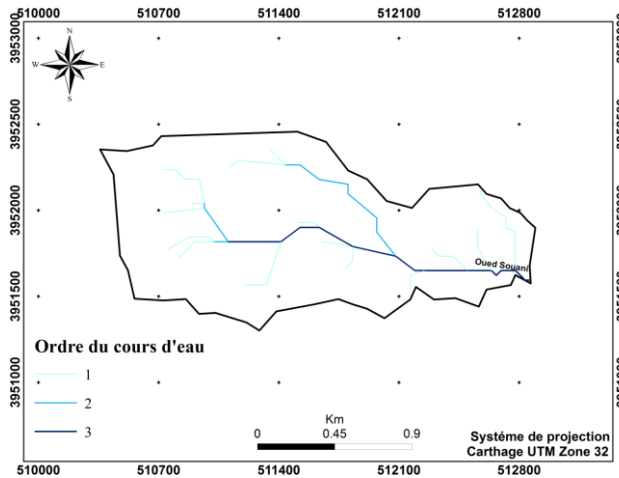
La mesure des longueurs de thalweg contribue aux différents calculs de paramètres morphométriques tels que la densité de drainage, le temps de concentration et la vitesse d'écoulement. La détermination de ces paramètres

nécessite une classification du réseau de drainage. La méthode de Strahler (1957) [24] peut être utilisée pour y parvenir.

Cette méthode consiste à classer les cours d'eau et d'affecter un ordre à chacun d'entre eux suivant la règle :

- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordres différents prend l'ordre du plus élevé des deux  $(n+m) = \text{Max}(n,m)$ .
- Tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté d'un  $(n+n=n+1)$ .

En extrayant la carte du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Souani à Arcgis (Fig. 10), nous avons pu classer les réseaux par ordre selon la méthode de Strahler (1957) [24]. Cette opération donne un ordre de trois (3) pour le bassin versant d'oued Souani (Table 7).



**Fig. 10** - Ordre d'écoulement du bassin versant d'oued Souani

**Table 7** - Classification du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Souani selon la méthode de Strahler (1957)

Ordre du cours d'eau	Bassin versant d'oued Souani	
	Nombre des cours d'eau	Longueur des cours d'eau (km)
<b>1</b>	39	3,74
<b>2</b>	4	1,29
<b>3</b>	15	1,93
<b>Total</b>	58	6,96

Le réseau hydrographique drainant le bassin versant d'oued Souani est assez dense, avec des ravins bien développés en amont. Il est formé par le fleuve principal avec un affluent gauche qui draine la partie orientale du bassin. L'affluent gauche drainant la partie orientale du bassin présente un réseau relativement dense, tandis que les ravins droits drainant la partie supérieure et occidentale du bassin sont plus denses en raison de la pente plus importante.

### 3.3.2. Densité de drainage Dd

La densité de drainage [25, 26] est définie comme étant la longueur totale de tous les cours d'eau à la surface du bassin versant. Elle est exprimée en Km/Km<sup>2</sup>. Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs tels que la lithologie, la tectonique, l'exposition, le couvert végétal, les pentes et le climat.

$$Dd = \frac{1}{S} * \sum_{i=1}^n Li \quad Eq. 6$$

#### Avec :

- Dd : La densité de drainage (km/km<sup>2</sup>)
- Li : La longueur des cours d'eau (km)
- S : La superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>)
- I : L'ordre d'écoulement de I à n

Le bassin versant de l'oued Souani a une longueur totale de 6,66 km, ce qui donne une densité de drainage de **3,55 km/km<sup>2</sup>**, ce qui donne une densité de drainage assez élevée. La valeur de densité dépend principalement des conditions topographiques, géologiques, pédologiques et climatologiques ainsi que des activités humaines.

### 3.3.3. Temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie amont la plus éloignée du bassin versant pour parvenir à l'exutoire. Ce paramètre est estimé par plusieurs relations empiriques, pour notre cas nous avons préféré la relation de Giandotti [27].

$$Tc = \frac{4\sqrt{Sb} + 1.5 Lt}{0.8 * \sqrt{\frac{H_{max} - H_{min}}{2}}} \quad Eq. 7$$

#### Avec :

- Tc : Temps de concentration (heures)
- H<sub>max</sub> : Altitude maximale en m
- H<sub>min</sub> : Altitude minimale en m
- Sb : Superficie du bassin (Km<sup>2</sup>)
- Lt : Longueur du talweg principal (km)

L'application de la formule ci-dessus au bassin versant étudié aboutit à un temps de concentration du ruissellement de **1,04 heure**. Ce temps de concentration est faible, ce qui signifie que le ruissellement se rassemble et se dilate rapidement et est évacué à grande vitesse, générant une force de décapage élevée sur les particules de sol et donc risquant un plus grand pouvoir érosif.

### 3.3.4. Vitesse d'écoulement (V)

Ce paramètre caractérise la vitesse moyenne d'écoulement des oueds par gravité suivant les pentes du bassin versant [23]. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$V = \frac{L}{Tc} \quad Eq. 8$$

#### Avec :

- V : Vitesse d'écoulement (km/h)
- L : Longueur du talweg principal (km)
- Tc : Temps de concentration (h)

Pour le bassin d'oued Souani, la vitesse d'écoulement des eaux superficielles est de l'ordre **2,4 km/h**.

#### 4. Conclusion

Cette étude est basée sur l'évaluation automatique des caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) et un logiciel SIG. Ces outils permettent d'économiser du temps et des efforts. L'étude de ces paramètres nous a permis de produire un certain nombre de cartes thématiques et d'obtenir les interprétations suivantes :

Le bassin versant étudié a une superficie de 1,96 km<sup>2</sup> et un périmètre de 6,78 km. Il a une forme allongée (KG= 1,36) dans la direction est-ouest, parallèlement à la direction de l'écoulement de l'eau. Selon l'équation de Roche, les dimensions du rectangle équivalent (longueur L=2,66 km et largeur l= 0,74 km) font que la longueur est 3,5 fois plus grande que la largeur. L'indice global de pente Ig est estimé à 50 m/Km par l'application de l'équation de Musy. Selon la classification de l'ORSTOM, il est classé comme ayant un relief fort. La topographie du bassin est relativement accidentée, caractérisée par des pentes moyennes à fortes et une variation altitudinale assez importante, allant de 791 m à l'exutoire à 1045 m sur le haut relief du Djebel Bou Rokba. D'un point de vue hypsométrique, la classe d'altitude dominante se situe entre 791 et 880 m au-dessus du niveau de la mer. Elle occupe environ 51 % de la surface totale du bassin versant, ces zones représentant des plaines et les versants. Les zones de très haute altitude (plus de 940 m) telles que : Djebel Bou Rokba couvrent une petite superficie ne dépassant pas 23%. Par conséquent, la courbe hypsométrique est très proche de l'équilibre, ce qui indique que le potentiel d'érosion est modéré. L'analyse des paramètres hydrographiques montre que le bassin versant d'oued Souani présente un réseau hydrographique assez dense avec un ravinement parfois très développé (Dd=3,55 km/km<sup>2</sup>).

Toutes ces caractéristiques morphologiques, topographiques et hydrologiques du bassin versant cible, la lithologie friable (affleurements peu perméables (marnes et marno-calcaires)), l'énorme étendue de terres non végétalisées combinée à une pluviométrie irrégulière et à des pentes moyennes à fortes, ainsi que l'absence d'équipements CES, font de la zone cible un environnement propice aux inondations.

Les résultats finaux démontrent la précision et la performance des systèmes d'information géographique et des modèles numériques de terrain (MNT) dans l'évaluation des paramètres hydro-morphiques influençant le ruissellement des eaux de surface.

#### Références

- [1] Roche M.1963. Hydrologie de Surface-ORSTOM. Gauthier-Villars édit. Paris (in French).
- [2] FAO .1996. Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, 54, 244p. <http://www.fao.org/docrep/w2570f/w2570f00.htm#Contents>.
- [3] Morell M, Thebe B, L'Hote Y, Drobot R, Carbonnel JP.1999. Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. \* H\* G\* A\*.
- [4] Gaikwad R, Bhagat V. 2018. Multi-criteria Prioritization for Sub-watersheds in Medium River Basin using AHP and Influence Approaches. *Hydrospatial Analysis*, 2(1): 61-82.
- [5] Faye C, Dièye S, Faye G. 2021. Analyse morphométrique et hydrologique du sous bassin versant du Niaoulé (Bassin de la Gambie) à l'aide de technique SIG.
- [6] Bewket W, Sterk G. 2005. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(2), 445-458.
- [7] Benzougagh B, Dridri A, Boudad L, Sdkaoui D, Baamar B. 2019. Apport des sig et teledetection pour l'évaluation des caractéristiques physiques du bassin versant d'oued inaouene (Nord-Est Maroc) et leurs utilités dans le domaine de la gestion des risques Naturels. *Am J Innov Res Appl Sci*, 8(4), 120-130.
- [8] Narmatha T, Jeyaseelan A, Mohan, SP, Mahalingam S, Natchimuthu S. 2013. Morphometric analysis of upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu, India using Geographical Information System. *Journal of Academia and Industrial Research*, 1(11), 726-729.
- [9] Kalaivanan K, Gurugnanam B, Suresh M. 2014. GIS based morphometric analysis of gadilam river basin, Tamil Nadu, India. *International Journal of Adv. Research*, 7(2), 1015-1022.

- [10] Biswas S, Sudhakar S, Desai VR. 1999. Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. *Journal of the Indian society of remote sensing*, 27, 155-166.
- [11] Veltri M, Veltri P, Maiolo M.1996. On the fractal description of natural channel networks. *Journal of hydrology*, 187(1-2), 137-144.
- [12] Manojkumar PD, Nitin NM, Akshada HK, Ganesh MD. 2019. Morphometric Analysis of Kolavadi Sub-Watershed in Bhor Tahsil Using GIS Techniques. *J.Geographical Studies*, 3(1): 1-10, 87-96.
- [13] Khan MA, Gupta VP, Moharana PC. 2001. Watershed prioritization using remote sensing and geographical information system: a case study from Guhiya, India. *Journal of Arid Environments*, 49(3), 465-475.
- [14] Chopra R, Dhiman RD, Sharma PK.. 2005. Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33, 531-539.
- [15] Llamas J. 1992. *Hydrologie générale: principes et applications*, 2<sup>e</sup> édition. Gaëtan Morin éd., BoucheNilie, Canada, 527 p.
- [16] Faye C. 2018. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques: cas du bassin versant de la Gambie.(bassin continental Guineo-Sénégalais).
- [17] Schumm SA. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, 67(5), 597-646.
- [18] Gravelius .1914. *Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German)*. Goschen, Berlin, 10 p
- [19] Musy A. 2005. *Cours d'hydrologie générale, Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse. Cours online, URL: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie>.*
- [20] Musy A, Higy C. 2004. *Hydrologie: Une science de la nature (Vol. 21)*. PPUR presses polytechniques.
- [21] Dubreuil P, Guiscafre J. 1971. La planification du réseau hydrométrique minimal. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol*, 8, 3-38.
- [22] Dubreuil P. 1966. Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants: leur détermination avec une précision acceptable. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol*, 5, 13-29.
- [23] Bouguerra H. 2018. Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien) (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid).
- [24] Strahler AN.1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- [25] Horton RE. 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361.
- [26] Horton RE. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- [27] DGACTA .1995. *Guide de conservation des eaux et des sols*. Ministère de l'agriculture de la Tunisie, Tunis. 273p



## La proposition d'un plan d'aménagement hydro-agricole (cas du bassin versant El Khrioua – gouvernorat du Kairouan)

Olfa Hajji<sup>1</sup>, Ala Bougeurra<sup>1</sup>; Saleh Jelliti

(1) Ecole supérieur des ingénieurs de Medjez El Bej, Tunisie,

(2) Commisariat Régional De L'Agriculture du Kairouan

### Résumé

La Tunisie fait face à un des plus sérieux problèmes de l'érosion du sol d'origine hydrique. En effet, l'érosion du sol présente l'un des plus importants problèmes environnementaux vu la complexité des facteurs qui y régissent et son impact direct sur la productivité agricole et les moyens de subsistance des populations locales.

Cette étude consiste à élaborer un plan d'aménagement antiérosif contenant plusieurs scénarios consistant à diminuer le taux d'érosion dans le bassin versant de l'oued Khrioua.

Le modèle adopté au cours de cette étude est le modèle de RUSLE qui est couramment utilisé pour calculer les pertes annuelles moyennes en sol unité de surface terrestre résultant de l'érosion. Cette perte dépend de plusieurs facteurs à savoir : l'érosivité des pluies, l'érodabilité du sol, le couvert végétal, la topographie et les pratiques antiérosives.

L'analyse, la combinaison des données et la modélisation ont été opérées dans un Système d'Information Géographique (SIG). La superposition des couches d'information sur les précipitations, les sols, la topographie et le couvert végétal, permettent d'obtenir une carte qui présente l'aléa moyen de l'érosion en t/ha/an par unité spatiale et par la suite la détermination de l'impact des scénarios des aménagements proposés sur le taux de l'érosion. En effet on trouve que le taux moyen de l'érosion est égale 7.27 et que la combinaison de tous les scénarios (Scénario 1 : Techniques culturales conservatrices et Scénario 2 : Aménagements des terres en pente et des cours d'eau) est la solution optimale ( $E=2.14t/ha/an$ ), mais il reste préférable de choisir le deuxième scénario (Aménagements des oliviers par des cuvettes et Implantation des banquettes à rétention) vu qu'il est le moins coûteux (4439.85mDT) et son résultat ( $E=5.01t/ha/an$ ) est aussi acceptable pour une lutte efficace contre l'érosion hydrique.

**Mots clés :** Érosion hydrique, Bassin Versant, Modélisation, RUSLE, SIG, Aménagements antiérosifs.

## The proposal for a hydro-agricultural development plan (case of the watershed El Khrioua – Kairouan governorate).

### Abstract

Tunisia is facing one of the most serious problems of soil erosion due to water. Indeed, soil erosion presents one of the most important environmental problems given the complexity of the factors that govern it and its direct impact on the agricultural productivity and livelihoods of local population. This study consists of developing an anti-erosive management plan containing several scenarios to reduce the rate of erosion in the El Khrioua watershed.

The model adopted in this study is the RUSLE model, which is commonly used to calculate average annual soil loss land surface unit resulting from erosion. This loss depends on several factors: the erosivity of the rains, the erodibility of the soil, the vegetation cover, the topography and the anti-erosion practice. The analysis, the combination of the data and the modelling were carried out in a Geographic Information System (GIS). Overlaying information layers on precipitation, soils, topography and vegetation cover, provide a map showing the average risk of erosion in t/ha/year per spatial unit and subsequently the determination of the impact of the proposed development scenarios on the rate of erosion. Indeed, the average rate of erosion is found to be 7.27 t/ha/year and the combination of all scenarios (scenario 1: Conservative Farming Techniques and scenario 2: Slope and Stream Development) is the optimal solution ( $E=2.14 t/ha/year$ ), but it remains preferable to choose the second scenario (arrangements of olive trees by basins and installation of retention benches) as is less expensive (4439.85mDT) and its results ( $E=5.01 t/ha/year$ ) is also acceptable for effective control of water erosion.

**Key Words:** Water erosion, Watershed, Modelling, RUSLE, GIS, Anti-erosion developments.

<sup>1</sup> Corresponding author: [olfa.hajji@yahoo.fr](mailto:olfa.hajji@yahoo.fr)

## INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu dans la région de la Méditerranée, touchant particulièrement la Tunisie et menace les ressources en eau et en sol du pays. En effet, les caractéristiques physiques et climatiques de la Tunisie sont favorables pour le déclenchement du phénomène de l'érosion hydrique qui a été accélérée par les conditions socio-économiques.

Ainsi pour assurer l'avenir agricole du pays, il était nécessaire de procéder à une lutte anti-érosive pour conserver les ressources naturelles. Cette lutte antiérosive lors de son début vers les années 60 n'était ni ciblée ni organisée suivant une planification jusqu'à la mise en œuvre de la stratégie nationale de conservation des eaux et du sol (CES), à partir de 1990.

Pour la mise en œuvre de cette stratégie, il est nécessaire de procéder à l'élaboration de plans d'aménagement CES pour différentes régions (gouvernorats, délégations, bassins versants) et à différentes échelles. L'élaboration de ces plans d'aménagement CES, est basée en particulier sur la modélisation de l'érosion. Elle est devenue une nécessité pour les décideurs afin de pouvoir cibler les zones à risques et opter pour des solutions adéquates. La modélisation de l'érosion a commencé par les modèles empiriques comme l'équation universelle des pertes en sol USLE et sa version révisée RUSLE.

D'autre part, la cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène. Ainsi, l'intégration des modèles empiriques existant avec les nouvelles techniques de spatialisation comme la télédétection et les Systèmes d'Informations Géographiques SIG ont permis de minimaliser les coûts financiers et de gagner le temps nécessaire de cartographier les risques.

Dans ce cadre s'inscrit le présent sujet de projet de fin d'études intitulé Plan d'aménagement hydro-agricole de bassin versant El Khrioua. Cette étude a pour objectif de proposer des scénarios des aménagements de conservation des eaux et du sol et de déterminer leurs impacts sur l'érosion.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### **Présentation de la zone d'étude**

Le bassin versant de l'oued Khrioua qui est un affluent de l'oued Zaher, affluent nord de l'oued Nebhana dont la confluence avec celui-ci est située à une dizaine de kilomètres avant son embouchure sur Sebkhath El Kalbia touche administrativement 2 délégations :

- La délégation de Nadhour : appartient au gouvernorat de Zaghuan contrôle 90% de la superficie du bassin versant.
- La délégation de Sbikha : appartient au gouvernorat de Kairouan contrôle 10% de la superficie du bassin versant.

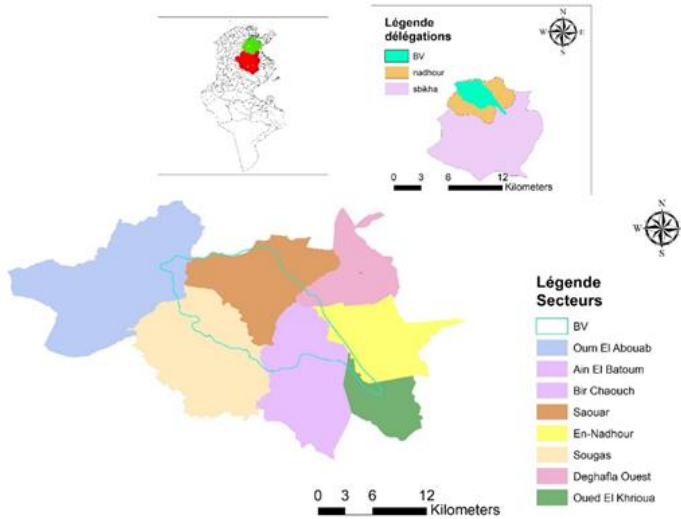


Fig. 1 - Localisation de la zone d'étude

Le bassin versant de l'oued Khrioua est caractérisée par un climat semi-aride (pluviométrie annuelle de l'ordre de 332.54 mm). Il s'étend sur une superficie de 139 Km<sup>2</sup>. Ce bassin est occupé principalement par des forêts (33.04 %) et des cultures annuelles (49.14 %), il est caractérisé par des sols peu évolués et des unités complexes de sol (62.07 % de la superficie totale). Le bassin versant El Khrioua a un relief assez fort. (Ds = 190m).

L'érosion hydrique est l'une des formes de dégradation des terres arables. Elle est divisée en deux types, éolienne et hydrique. Elle résulte d'un ensemble de processus complexes et interdépendants caractérisés par trois phases (détachement, transport et sédimentation).

Il existe deux principaux facteurs qui provoquent l'érosion hydrique, les facteurs anthropiques relatifs aux activités humaines (l'intensification de l'agriculture, croissance démographique, le surpâturage et la déforestation). A partir de la carte des aménagements, on a déterminé que les banquettes sont les seuls aménagements dans le bassin versant avec 7.5 % de la superficie totale. En effet 92.5 % de la superficie du bassin versant n'est pas aménagée.

### **Méthodologie de travail**

L'étude de sensibilité à l'érosion est d'une grande utilité dans l'élaboration des plans d'aménagement anti-érosifs, du fait qu'elle permet la détermination des zones les plus sensibles à l'érosion qui nécessitent une intervention prioritaire pour préserver le patrimoine sol et par conséquent assurer la durabilité du développement agricole. Pour l'évaluation de l'érosion hydrique à l'échelle de bassin versant oued El Khrioua, on a utilisé l'équation universelle de perte en sol révisée (RUSLE). Il s'agit d'une approche systémique basée sur une méthode multicritère permettant de dresser des cartes indicielles numérisées.

La première étape consiste à collecter et à cartographier les différents facteurs intervenant dans l'estimation de l'érosion en utilisant un SIG. Ces couches sont converties par la suite sous forme raster (Raster) avec le logiciel ArcGIS pour pouvoir les manipuler et les combiner. Ce dernier nous permet de visualiser, d'explorer, d'interroger et d'analyser les données spatiales.

Pour estimer les pertes en sols, il faut suivre les étapes suivantes :

D'abord, il faut élaborer la carte du facteur topographique combiné LS la combinaison du facteur inclinaison S et la longueur L de pente. Ensuite, calculer le facteur érosivité des pluies R à partir des données

pluviométriques. Puis, l'élaboration de carte de facteur d'érodabilité du sol K, couverture végétale C et pratiques antiérosives P à partir de carte pédologique, occupation de sol et aménagements existants. Enfin, en combinant les cinq cartes on obtient la carte des pertes en sols.

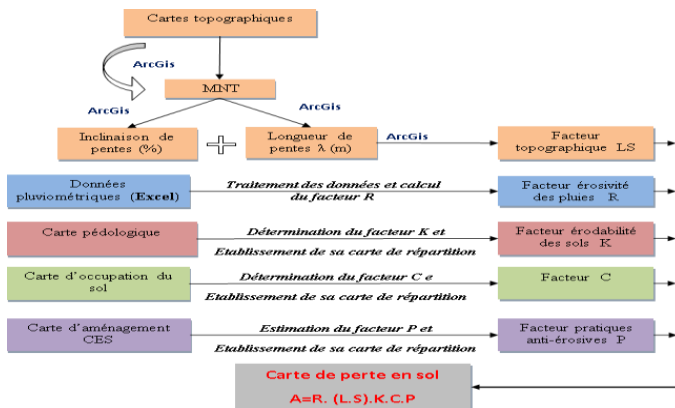


Fig. 2 - Organigramme méthodologique

de l'intégration de l'équation universelle de perte en sol dans le SIG (Wazzani, 2013).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Quantification des pertes en sol

Afin de déterminer les zones sensibles à l'érosion dans le bassin versant, il est intéressant d'utiliser l'approche RUSLE/SIG qui est basée sur l'utilisation de la télédétection et de la cartographie. En effet, pour aboutir à la carte des pertes en sols du bassin, nous avons élaboré d'abord les cartes associées à chaque facteur dans l'équation de RUSLE.

Tout d'abord, pour le calcul de l'érosivité des pluies R, nous avons utilisé les données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent à proximité de bassin versant sont des moyennes mensuelles et annuelles, nous prenons leurs valeurs pour la même période (1989 - 2019). Nous avons trouvé un indice R égal 515 MJ. mm/ha.h.an.

Ensuite nous avons déterminé les valeurs du facteur érodabilité du sol K à partir des cartes pédologiques du bassin versant. Les valeurs de K varient de 0,01 pour les Vertisols à 0,08 pour les sols peu évolués d'apport.

Quant aux valeurs du facteur LS, elles sont déterminées par la combinaison du facteur inclinaison S et la longueur L de pente.

Le bassin versant El Khrioua présente un facteur LS compris entre 0 et 14.9.

Pour le facteur C, la répartition spatiale montre la sensibilité des différents types d'occupation des sols vis-à-vis des processus érosifs hydriques. Les occupations des sols les moins exposées à l'érosion sont associées aux coefficients les plus faibles et vice-versa. À partir de la carte d'occupation des sols, nous déterminons la carte du facteur C qui varie de 0.104 à 0.7.

En outre, le facteur P est associé aux aménagements antiérosifs existants. Pour le bassin versant El Khrioua, nous trouvons une zone aménagée par des banquettes dont le facteur P est de 0.1, le reste est non aménagé ayant un facteur P égal à 1.

Enfin, la combinaison des cartes des différents facteurs intervenant dans l'érosion hydrique a permis d'obtenir la carte quantitative de l'aléa d'érosion des sols en tout point du bassin versant.

La combinaison des cartes des différents facteurs du modèle RUSLE intervenant dans l'érosion hydrique permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant (fig.3).

La figure n°3 présente la répartition des pertes en sols du bassin versant :

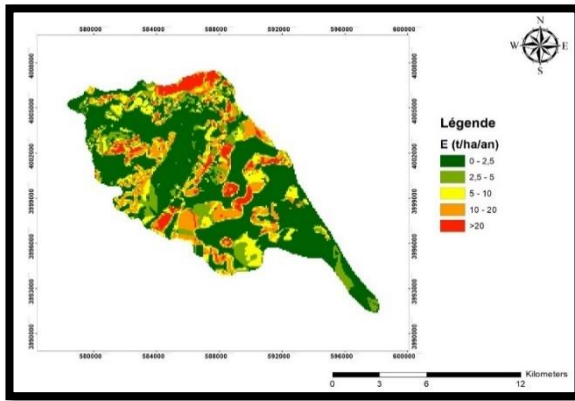


Fig. 3- Carte de répartition spatiale des pertes en sol du bassin versant EL Khrioua. La carte obtenue montre le taux d'érosion que le taux de l'érosion varie entre 0 et plus 20 t/ha/an répartie sur toute la surface du bassin versant avec une moyenne de l'ordre 7.27 t/ha/an. On remarque que les zones ayant une forte pente subissent de fortes érosions hydriques. Le tableau n°1 représente les superficies selon les classes de l'intensité des pertes en sol calculées au niveau du bassin versant.

**Tableau 1** - Répartition des superficies des pertes en sol selon les classes adoptées

Perte en sol (t/ha/an)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Intensité de l'érosion
0 - 2,5	8596	62	Très faible
2,5 - 5	977	7	Faible
5 - 10	1848	13	Moyenne
10 - 20	1644	12	Forte
>20	863	6	Très forte

Dans ce travail, on a classé l'érosion selon 5 classes selon la classification de Masson (1971). En effet, cette dernière classification est la plus adaptée au contexte semi-aride de la Tunisie. Nous constatons que la majorité de la superficie du bassin versant (69 %) est faiblement vulnérable à l'érosion hydrique, alors que les zones le plus sensibles à ce phénomène couvrent 31% en superficie.

### 3.2. Élaboration du plan d'aménagement

Afin de réduire l'érosion hydrique dans le bassin versant étudié, nous allons proposer quelques scénarios des aménagements antiérosifs et analyser leurs impacts sur la perte en sol. Trois scénarios seront traités dans cette étude :

- Scénario 1 : Techniques culturales conservatrices.
- Scénario 2 : Aménagements des terres en pente et des cours d'eau.
- Scénario 3 : Combinaison des divers scénarios étudié.

Les impacts de trois scénarios sur le taux d'érosion diffèrent d'un scénario à un autre. Pour bien comprendre l'effet de chaque scénario sur l'érosion hydrique et en le comparant avec l'état actuel, on procède à la figure n°4 qui traduit le tableau n°2

**Tableau 2 - Pourcentage des superficies affectées par l'érosion selon les scénarios**

Scénario Classes (t/ha/an)	Contexte actuel (%)	Techniques culturales conservatrices (%)	Aménagements des terres en pente et des cours d'eau (%)	Combinaison des deux scénarios (%)
0 - 2,5	62	75	82	95
2,5 - 5	7	5	4	2
5 - 10	13	9	6	2
10 - 20	12	8	5	1
> 20	6	4	3	1

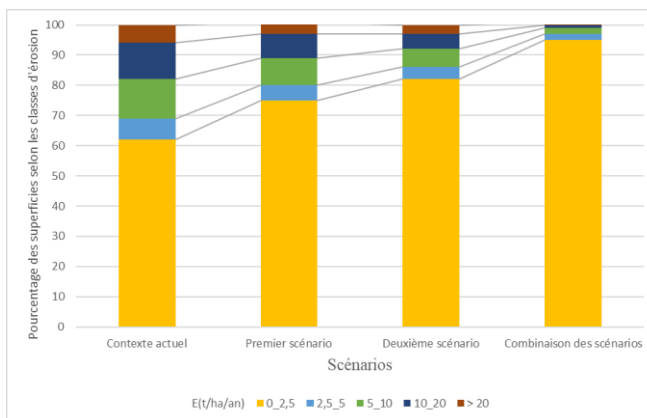


Fig. 1- L'effet des scénarios sur les classes d'érosion du bassin versant El khrioua

Pour le contexte actuel du bassin El Khrioua, l'érosion très faible et faible occupent respectivement 62% et 7% de la surface totale tandis que la superficie affectée par une érosion moyenne occupe seulement 13% et le reste de la superficie est occupées par l'érosion forte et très forte (18%).

Après avoir suivi le premier scénario « Techniques culturales conservatrices », 75% de la surface totale sont affectées par un degré d'érosion faible (entre 0 et 2.5 t/ha/an), en contrepartie, la superficie ayant un degré d'érosion élevé (>10 t/ha/an) diminue à 6%.

Le deuxième scénario « Aménagement des terres en pente et des cours d'eau » donne 82% et 4% de la superficie du bassin menacées par des pertes en sols très faibles (entre 0 et 2.5 t/ha/an) et faible (entre 2.5 et 5 t/ha/an), respectivement ; tandis que les pertes en sols moyenne occupent 6% et le taux élevé des pertes par érosion n'affecte que 8% de la superficie du bassin El Khrioua. Ce qui nous donne des résultats appréciables.

La combinaison des scénarios a donné 95%, 2% et 2% de la superficie occupée par une érosion très faible, faible et moyenne respectivement, alors que l'érosion élevée n'affecte que 2% du bassin. En comparant finalement les différents scénarios, nous pouvons conclure que la combinaison des scénarios donne des résultats meilleurs par rapport aux autres scénarios.

## CONCLUSION

Le bassin versant de l'oued Khrioua appartient à deux délégations : Nadhour et Sbikha qui est caractérisée par un climat semi-aride (pluviométrie annuelle de l'ordre de 332.54 mm). Il s'étend sur une superficie de 139 Km<sup>2</sup>. Ce bassin est occupé principalement par des forêts (33.04%) et des cultures annuelles (49.14%), il est caractérisé par des sols peu évolués et des unités complexes de sol (62.07% de la superficie totale).

L'érosion hydrique des sols résulte de divers processus que sont le détachement, le transport et la sédimentation. Ce phénomène est souvent renforcé par les modifications paysagères apportées par l'homme et résultant par exemple de l'intensification de l'agriculture, du surpâturage, de la déforestation, de croissance démographique.

Les conséquences de l'érosion sont multiples et variées telles que la dégradation des terres agricoles, l'appauvrissement du sol en éléments nutritifs, l'envasement des infrastructures hydrauliques et l'augmentation des risques des inondations.

Notre étude vise à déterminer la distribution spatiale des pertes en terres dans le bassin versant El Khrioua, et la comparaison portera sur la situation actuelle et celles relative à des propositions des nouveaux aménagements.

La méthode de travail combine le modèle de prévision des pertes en terre (RUSLE) avec le système d'information géographique (SIG). Cette procédure permet de donner une dimension dynamique aux informations du terrain et de simuler les situations les plus réalistes.

Concernant le contexte actuel, on a trouvé que la majorité de la superficie du bassin versant (69 %) est faiblement vulnérable à l'érosion hydrique, alors que les zones le plus sensibles à ce phénomène couvrent 31% en superficie.

On a analysé des différents scénarios d'aménagement antiérosif et leurs impacts sur les pertes en sol.

- **1er scénario** : Technique culturales conservatrices (Consolidation biologique des banquettes, reboisement et amélioration des parcours), qui a baissé la valeur moyenne de l'érosion de 7,27 t/ha/an jusqu'à 6,11 t/ha/an.

- **2ème scénario** : Aménagements des terres en pente et des cours d'eau (Aménagement des oliviers par des cuvettes et l'implantation des banquettes à rétention) ce qui produit une diminution de la valeur moyenne de l'érosion jusqu'à 5,01 t/ha/an.

- **3ème scénario** : consiste à combiner les deux scénarios précédents La nouvelle valeur de l'érosion moyenne est 2,14 t/ha/an.

Nous avons conclu que la combinaison des tous les scénarios est techniquement considérée la meilleure proposition pour réduire et diminuer la gravité du phénomène d'érosion, alors qu'économiquement c'est le deuxième scénario (chaque scénario coûtera successivement environ 8754.6 mDT, 4439.85 mDT et 13194.45 mDT).

Donc le deuxième scénario « Aménagements des terres en pente et des cours d'eau » est le scénario idéal pour une lutte efficace contre l'érosion hydrique. Enfin ce projet a pu atteindre son objectif d'évaluer, à l'échelle de bassin versant de l'oued Khrioua, le taux d'érosion, de délimiter les zones à différentes classes de risque, de proposer des scénarios d'aménagements et étudier leurs et leurs impacts sur les pertes en sol afin de choisir le scénario optimal.

## Références

- [1] HAJJI O., ABIDI S., HERMASSI T. AND MEKNI I., 2017. Evaluation of Water Erosion Risk in Tunisian Semi-Arid Area. Water Resources in Arid Areas: The Way Forward, Springer Water Book. DOI: 10.1007/978-3-319-51856-5. pp 215-249.
- [2] HAJJI O., ABIDI S., HABAIEB H. and MAHJOUH M. R., 2015. Cartographie des risques d'envasement des lacs collinaires de la Tunisie centrale. Geo-Sp Publication Mag. Vol. 4 N. 8, pp. 62-80.
- [3] HAJJI O., ABIDI S., HERMASSI T., MAHJOUH MR., HABAIEB H., 2014. Influence of spatio-temporal variability of soil surface states on the watershed hydrology behavior. Case study of El Hnach watershed (Tunisian semi-arid). International Research Journal of Public and Environmental Health Vol.1 (2), I.F. 0.386, pp. 63-69.
- [4] AL ALI Y., 2007. Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes : Analyse, fonctionnement et essai de modélisation en milieu méditerranéen (El-Gouazine, Tunisie Centrale) : Thèse de doctorat, l'Université Montpellier II, Ecole Doctorale : SIBAGHE, p. 1-8.
- [5] CRDA-Kairouan., Système de codage des paramètres du milieu physique (Gouvernorats du Centre Ouest).
- [6] CRDA-Kairouan., 2013. Etude d'un plan d'aménagement dans le gouvernorat de Kairouan – version provisoire.
- [7] CRDA-Zaghuan., 2014. Etude de planification des aménagements CES dans le gouvernorat de Zaghuan.
- [8] DG/ACTA., 2016. Elaboration de la stratégie de conservation des eaux et du sol de la Tunisie- Diagnostic et analyse évaluative- Rapport n°1 : Rapport de synthèse page 6.
- [9] DG/ACTA., 2017. Elaboration de la stratégie de conservation des eaux et des sols de la Tunisie
- [10] Georges Y., 2008. Evaluation de l'érosion dans le bassin versant de la rivière Grise (Haïti). Master en gestion des risques naturels, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.

## Bridge Piers Configuration and Flood Management: A Numerical Analysis of Medjerda River Dynamics

Youssef Mahjoub<sup>1</sup>, Amel Soualmia<sup>2</sup>, Azeddine Kourta<sup>3</sup>

1-Ph.D. Candidate, Department of Rural engineering, Water and Forestry, National Institute of Agronomy of Tunisia, Carthage University, Tunisia

2-Professor, Department of Rural engineering, Water and Forestry, National Institute of Agronomy of Tunisia, Carthage University, Tunisia.

3-Professor, INSA-CVL, PRISME, University of Orleans, France.

### Abstract

*Designing hydraulic structures such as bridges, dams, and irrigation canals necessitates a thorough understanding of associated hydraulic flow phenomena. Flow characteristics differ at various stages: before, during, and after passage through these structures. This study conducted a numerical analysis focusing on different geometries of obstacles in open channels to better understand the hydraulic jump following structure-fluid interaction.*

*Two geometric configurations of bridge piers (initially two piers, then three) were simulated using the finite volume method in ANSYS-FLUENT. The objective was to assess how geometry affects flow characteristics under identical hydrodynamic conditions. Non-slip walls were assumed for all fluid-solid interaction surfaces, including piles, bed, and sidewalls. The study aimed to highlight pressures, velocity fields, and hydraulic properties derived from the modeling.*

*A comparative analysis of the numerical results for the two configurations evaluated the flow characteristics. The simulations provided a comprehensive understanding of water behavior, detailing the variability of the velocity field and the impact of water pressure on obstacles. This research offers valuable insights into developing effective river management strategies, improving our ability to mitigate risks, and enhancing environmental safety amid changing conditions.*

**Key Words:** Water erosion, Watershed, Modelling, RUSLE, GIS, Anti-erosion developments.

### Configuration des piliers de pont et gestion des crues : analyse numérique de la dynamique de la rivière Medjerda

#### Résumé

*La conception d'ouvrages hydrauliques tels que des ponts, des barrages et des canaux d'irrigation nécessite une compréhension approfondie des phénomènes d'écoulement hydraulique associés. Les caractéristiques d'écoulement diffèrent à différentes étapes : avant, pendant et après le passage dans ces ouvrages. Cette étude a mené une analyse numérique axée sur différentes géométries d'obstacles dans des canaux ouverts pour mieux comprendre le ressaut hydraulique suite à l'interaction structure-fluide.*

*Deux configurations géométriques de piles de pont (initialement deux piles, puis trois) ont été simulées en utilisant la méthode des volumes finis dans ANSYS-FLUENT. L'objectif était d'évaluer comment la géométrie affecte les caractéristiques d'écoulement dans des conditions hydrodynamiques identiques. Des parois antidérapantes ont été supposées pour toutes les surfaces d'interaction fluide-solide, y compris les pieux, le lit et les parois latérales. L'étude visait à mettre en évidence les pressions, les champs de vitesse et les propriétés hydrauliques dérivées de la modélisation.*

*Une analyse comparative des résultats numériques pour les deux configurations a évalué les caractéristiques d'écoulement. Les simulations ont fourni une compréhension globale du comportement de l'eau, détaillant la variabilité du champ de vitesse et l'impact de la pression de l'eau sur les obstacles. Cette recherche offre des informations précieuses sur l'élaboration de stratégies efficaces de gestion des rivières, l'amélioration de notre capacité à atténuer les risques et le renforcement de la sécurité environnementale dans des conditions changeantes.*

**Mots clés :** Érosion hydrique, Bassin Versant, Modélisation, RUSLE, SIG, Aménagements antiérosifs.

<sup>1</sup> Corresponding author: [Youssefmahjoub31@gmail.com](mailto:Youssefmahjoub31@gmail.com)



## I. INTRODUCTION

Throughout history, from ancient times to the present day, humans have maintained a profound connection with water, acknowledging it as a fundamental source of life for all living beings. In order to manage effectively its use, humanity has consistently resorted to constructing civil engineering infrastructures for the purpose of harnessing, crossing, or utilizing water from various watercourses [1]. This has entailed the development of dams, canals, aqueducts, and other structures that influence the natural flow of water and its hydraulic characteristics. Throughout history, civil and water resource engineers have played a critical role in advancing our understanding of water systems and designing efficient infrastructure for water management [2] [3].

Throughout history, bridges have served as vital connectors, their design evolving alongside advancements in geometry. From the simple structures of ancient civilizations to the remarkable geometric precision [4], the role of geometry in bridge design continued to expand. In medieval Europe, intricate stone bridge designs emerged, further demonstrating the growing importance of structural integrity. This evolution in bridge design became particularly crucial for managing flood risks, with the configuration of bridge piers playing a critical role in regions prone to flooding, like the Medjerda River basin. The Renaissance further solidified this synergy between geometry, bridge construction, and water management, influencing modern bridge designs [5].

While a substantial body of literature exists on flow-cylinder interaction, a knowledge gap persists concerning the problem's hydrodynamic perspective [6]. Prior studies have primarily investigated the phenomenon from a kinematic standpoint, aiming to resolve the coherent flow structures (e.g., horseshoe vortices, down flow) generated around the cylinder using point measurements and experimental observations [7]. However, these approaches often lack in-depth analysis of the underlying hydrodynamic forces and mechanisms governing the interaction [8] [9]. Consequently, the following research questions remain unaddressed:

How does the number of piers affect the velocity distribution and control the backflow regions near to the structure?

How does bed shear stress change depending on the number of piers?

How does the number of the bridge piers control the spatial distribution of the shear stress on the cylinders' surface and the bottom around them?

The primary object of this study is to find answers to these questions for this particular case, open new perspectives for water-obstacle compartment studies. The numerical model has enabled us to study the flow and scour processes, particularly in relation to the issues referred to in the preceding paragraph.

## 2. NUMERICAL FRAMEWORK AND METHODOLOGY

This section outlines the numerical framework and methodology for analyzing how bridge structures affects water flow dynamics. It includes simulation of a real-scale case representing Tunisian bridges, using ANSYS software. The study aims to enhance practical value by employing real-scale geometry. It discusses the governing equations, turbulence model, and numerical algorithm, focusing on stability and accuracy for reliable results and insights into water flow behavior around bridges.

### 2.1 Domaine assumption

To enhance the relevance and value of our study, we chose to employ a real-scale case. The configuration of this type of bridge is frequently used in the Medjerda river and has been prevalent since the early 1980s to the present [5]. A 250m long by 20 m high and 80 m rectangular canal was used for the simulation. Figure 1 depicts the placement of the two bridges, each with two volumes, situated 50 meters from the entry of the channel.

For the ANSYS Fluent setup, we used the "Double Precision" option in 2D, incorporating gravitational acceleration, and the standard k-omega model.

### 2.2 Governing equations

#### 2.2.1 Monophasic turbulent flow Reynolds equations

In this section, a description of the computational model used throughout the present work provided the physical principles of conservation between pressure and velocity are described by the Navier-Stokes

equations. These non-linear partial differential equations characterize the monophasic turbulent flow in an open channel at each point in the fluid. The numerical solves the incompressible RANS equation:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \bar{\tau}_{ij}') + \rho g_i \quad (1)$$

Where

$\rho$ : Fluid density

$U$ : Longitudinal velocity vector

$u_i$ : The component of the velocity vector in the  $i$  direction

$t$ : Time

$g_i$ : The component of the gravity vector in the  $i$  direction

$\mu$ : Viscosity

$p$ : Static pressure

$x_i$ :  $x$  component in the  $i$  direction

$\tau_{ij}$ : Tensor viscous stresses

$\bar{\tau}_{ij}'$ : Reynolds stress tensor

The equation presented is the Navier-Stokes equation for fluid motion in its incompressible form. This equation describes the momentum balance in a fluid flow, accounting for various forces acting on a fluid particle [11]. The first term represents the rate of change of momentum per unit volume of the fluid. The second term describes the convective transport of momentum, indicating how the fluid's momentum changes as it moves through space. The third term represents the pressure gradient force per unit volume, highlighting the influence of pressure differences within the fluid. The fourth term accounts for the viscous stresses and Reynolds stresses in the fluid, incorporating both the internal friction due to fluid viscosity and the turbulent fluctuations. Finally, the last term represents the gravitational force per unit volume, reflecting the effect of gravity on the fluid.

In summary, the Navier-Stokes equation balances the inertial forces, pressure forces, viscous forces, and gravitational forces acting on a fluid element.

The introduction of the Reynolds stress tensor leads to nonlinear terms in the equation, hence the need for a closure model. This model helps represent the complex interactions between different components of turbulence and estimate their overall effect on the mean flow. The Boussinesq hypothesis aids in resolving the closure issue by introducing Reynolds stresses, which make the equation system more adaptable and describe how turbulence affects the evolution of mean flow.

$$-(\rho \overline{u_i u_j}) = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} (\rho k) \delta_{ij} \quad (2)$$

There are many closure models available, but we have chosen to use the RSM closure model for our case. This decision is based on its extensive use in similar situations and its proven effectiveness in the literature [12].

To resume, prior to the application of numerical methods, the Navier–Stokes equations are time-averaged (or ensemble averaged in flows with time-dependent boundary conditions). Extra terms appear in the time-averaged (or Reynolds-averaged) flow equations due to the interactions between various turbulent

fluctuations. This extra term is modelled with classical turbulence models. The K-omega was chosen after numerical validation and bibliographic research.

### 2.2.2 Biphasic turbulent flow Reynolds equations

The Eulerian formulation of the Navier-Stokes incompressible equation for a non-miscible biphasic flow requires a numerical solution to determine the position of the interface between different fluid streams [[8]] [[11]] [[12]]. The interface capture method involves identifying the free surface within a fixed mesh in the domain containing the free interface. This approach differs from methods that track the deformations of the mesh's free surface. The main advantage of these capture techniques is their ability to model flows with interface reconnections [12]. In this context, the technical method used to address the topological evolution of a biphasic region is the volume of fluid (VOF) approach, initially proposed by Hirt and Nichols. The continuity equation for phase q is derived from the following relations.

$$\text{div}(c_q \rho_q v_q) = \sum_{p=1}^2 m_{pq} \tag{3}$$

Where  $m_{pq}$  represents the mass transfer of the p<sup>th</sup> phase at a q<sup>th</sup> phase:  $m_{12} = m_{21}$  and  $m_{pp} = 0$ .  $\rho_q$  is the volume mass of the phase q and  $v_q$  is the volume. The equation for the conservation of momentum during phase q is given by the following relation:

$$\text{div}(c_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -c_q \overrightarrow{\text{grad}} p + \overrightarrow{\text{div}} \tau_q + \sum_{p=1}^2 (\overrightarrow{R}_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq}) + c_q \rho_q (\overrightarrow{F}_q + \overrightarrow{F}_{VMq}) \tag{4}$$

Where is

- $\tau_q$  : Shear stress of q<sup>th</sup> phase (pa);
- $\overrightarrow{F}_q$  : Exterior force of volume (N/kg);
- $\overrightarrow{F}_{VMq}$  : Added mass force (N/kg);
- $\overrightarrow{R}_{pq}$  : Interaction force at the interface;
- $C_q$  : Void fraction of phase q

### 2.3 Numerical Algorithm

The generation of mesh geometry by a pre-processor marks the transition from the physical realm to the numerical domain. Once created, this mesh is imported into computational code to iteratively solve equations and determine the parameters at each mesh node. The governing equations and turbulence model were resolved using a segregated solution approach, while the control volume technique was used to discretize the governing equations.

The SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) method was utilized to simulate the velocity-pressure coupling within a multiphase model (VOF). To model the convective and diffusive terms, a second-order upwind method was applied.

The rise of relative residuals in each governing equation was tracked, with a convergence criterion of 0.001% to confirm the convergence of the numerical calculation. Relaxation coefficients for velocity,

pressure, and other parameters were used to ensure the stability of the iterative process. The effects of friction near the wall were considered using the Standard Wall-Functions. Three different mesh distributions were analyzed to ensure the results were grid-independent.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In previous sections, we introduced our study's framework and extensively developed our prototype using CFD simulations. This section unveils primary outcomes from geometric and numerical simulations, highlighting the imperative for a more in-depth investigation of the problem.

#### 3.1 Mesh geometry generating

The mesh geometry was generated to accurately represent the riverbed and the configurations of the bridge piers. For the double piers configuration, two cylindrical piers were positioned symmetrically in the river. The mesh included finer elements around the piers to capture detailed flow patterns and turbulence. In contrast, the triple piers configuration involved an additional cylindrical pier, increasing the complexity of the mesh. This required further refinement to accurately simulate the increased turbulence and interactions between the piers, particularly in the regions where flow separation and recirculation occur.

#### 3.2 Discussion of the velocity field

In the double piers configuration (figure 1.a), the velocity field showed moderate deviations around the piers. The flow maintained a relatively smooth pattern, with slight accelerations observed in the recirculation zones behind the piers. In contrast, the water surface in the second configuration (figure 2.b) is significantly more disturbed compared to the two-pier setup. Visible waves and elevated water levels are observed around each pier, particularly in the areas between the piers, indicating heightened turbulence and flow disruption.

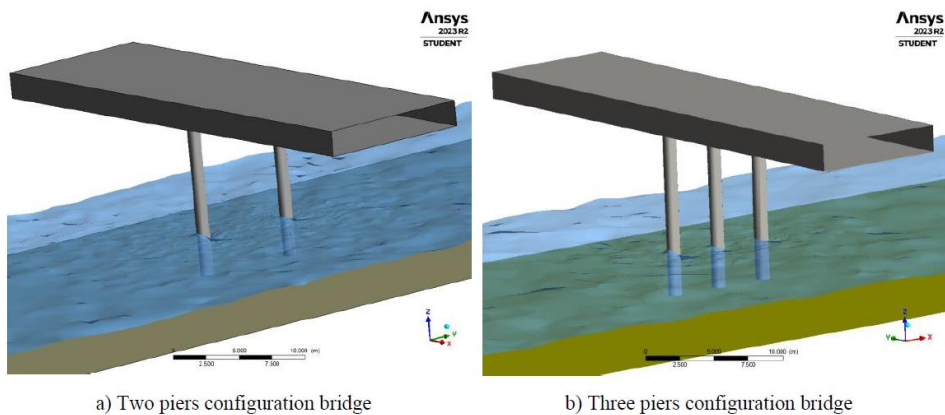
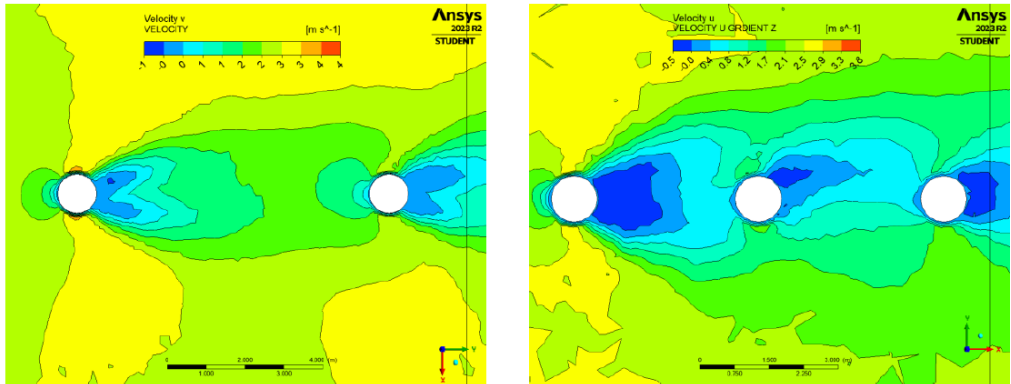


Figure 2: Water Surface Behavior around Bridge Pier Configuration

The Navier-Stokes equations, which govern fluid flow, explain these observations through the balance of inertial and viscous forces. The presence of the piers disrupts the flow, causing local accelerations (due to reduced cross-sectional area) and decelerations (due to flow separation).

The double piers configuration (in figure 2.a) displayed recirculation zones behind the piers, with water velocities generally lower in these areas due to the flow separation. The velocities in these recirculation

zones were approximately 20% lower than the free stream velocity, resulting in smoother flow patterns and lower turbulence. The impact on the overall flow dynamics was relatively moderate, allowing the river to maintain its general flow direction with minimal disturbance.



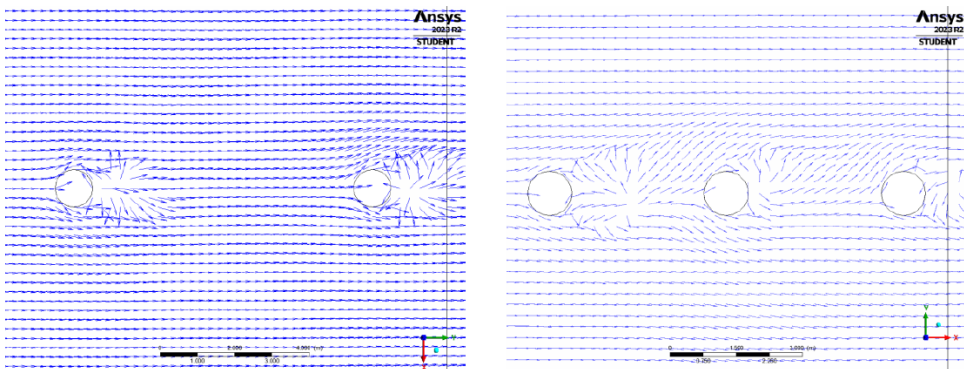
a) Two piers configuration bridge

b) Three piers configuration bridge

Figure 2: Contour of X-direction velocities differences between the two piers Two piers configuration bridge (a), and the three piers configuration bridge (b)

In contrast, the triple piers configuration (in figure 2.b) exhibited significant deflections and higher turbulence in the velocity field. The flow became uneven, with pronounced accelerations and decelerations around the piers. The continuity equation (conservation of mass) requires that the same volume of water flows past each cross-section of the river. With three piers, the available space for the water to flow through is reduced, leading to higher velocities and more intense recirculation zones.

The image provided (Figure 3) illustrates the velocity vectors near the water surface around circular bridge piers. In the double piers configuration (figure 3.a), the velocity vectors showed moderate deviations, with velocities increasing around the piers due to the constriction of the flow path. However, the increase was relatively modest, around 15% above the free stream velocity. In the recirculation zones behind the piers, the velocities were reduced by approximately 20%, indicating the formation of mild vortices and reduced turbulence.



a) Two piers configuration bridge

b) Three piers configuration bridge

Figure 3: X-direction velocity vectors differences between the two piers Two piers configuration bridge (a), and the three piers configuration bridge (b)

In the triple piers configuration (figure 3.b), the velocity vectors revealed more substantial deviations. The flow experienced significant accelerations, with velocities increasing by up to 35% above the free stream velocity around the piers. The recirculation zones were more extensive and pronounced, with velocities reduced by up to 30%, indicating stronger vortex formation and higher turbulence. The presence of an additional pier introduced more complexity and interaction between the recirculation zones, leading to a broader impact on the water flow dynamics.

### 3.3 Discussion of the wall shear field

For the double piers configuration (figure 4.a), the wall shear field demonstrated moderate shear stress around the piers. The shear stress,  $\tau$ , is a function of the velocity gradient near the wall, as described by the equation  $\tau = \mu (\partial u / \partial y)$ , where  $\mu$  is the dynamic viscosity of the fluid,  $u$  is the velocity, and  $y$  is the distance from the wall. The double piers create moderate gradients, leading to manageable levels of shear stress.

In the triple piers configuration, the wall shear field showed increased shear stress, particularly between and downstream of the piers. The higher shear stress can be attributed to the increased velocity gradients caused by the more complex flow patterns and interactions between the piers. The triple configuration introduces more regions where the flow velocity changes rapidly, leading to higher shear forces acting on the riverbed and the piers themselves. This suggests a more significant impact on sediment transport and potential erosion around the piers, as the increased shear stress can mobilize more sediment particles.

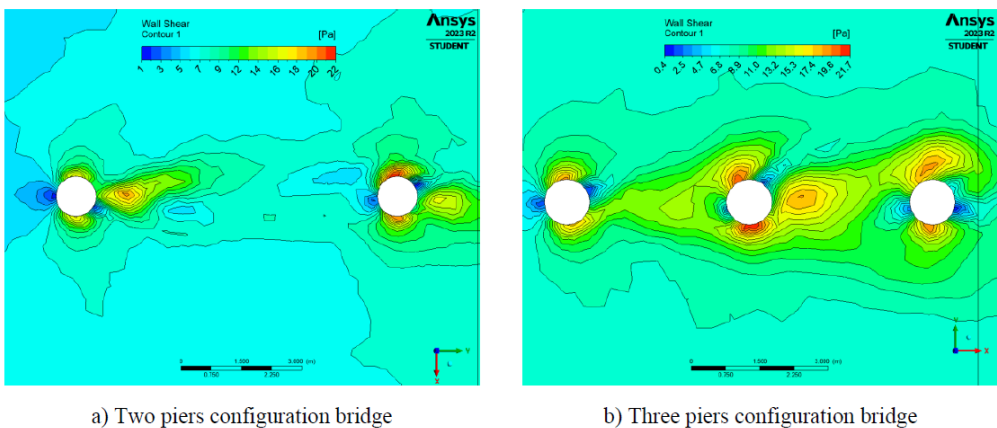


Figure 4: Shear stress (Pa) at the bottom for the two piers configuration bridge (a), and the three piers configuration bridge (b)

Figure 4 illustrates the wall shear contours around circular bridge piers, calculated using Fluent. The shear stress values are represented in Pascal (Pa), with color gradients indicating different magnitudes of shear stress. The left image, showing the double piers configuration, demonstrates moderate shear stress around the piers, with the highest values around the perimeters and decreasing radially outward. Approximately 30% of the surface around the double piers exhibits shear stress values above the threshold of 17 Pa. In comparison, the right image, depicting the triple piers configuration, shows higher shear stress, particularly in the interaction zones between the piers, indicating more complex flow patterns and higher potential for erosion. Around 50% of the surface in the triple piers configuration exhibits shear stress values above 17 Pa, indicating a more significant impact on the riverbed and potential for erosion.

## 4. CONCLUSIONS

This study highlights the significant influence of bridge pier configurations on water flow patterns, velocity fields, and wall shear stress in river systems. Through detailed numerical simulations, it was found that the triple piers configuration induces more pronounced disturbances and higher shear stress compared to the double piers setup. These findings align with fluid dynamics principles, as illustrated by the Navier-Stokes and continuity equations.

The addition of a pier in the triple configuration reduces the effective flow area, leading to increased velocities and more intense recirculation zones. This creates larger velocity gradients near the piers, resulting in higher shear stresses. Specifically, in the double piers configuration, about 30% of the surface exhibits shear stress values above the threshold of 17 Pa, whereas in the triple piers configuration, this value rises to approximately 50%. This significant increase in shear stress suggests a higher potential for erosion and sediment transport around the piers.

These findings have crucial implications for bridge design and flood management. The double piers configuration, with its lower impact on water flow and sediment transport, may be preferable in scenarios where minimizing environmental disruption is essential. On the other hand, the triple piers configuration, while potentially offering greater structural stability, requires careful consideration of its environmental impact, particularly regarding increased shear stress and potential erosion.

Future research should focus on experimentally validating these numerical results through laboratory and field studies. Additionally, advanced modeling techniques incorporating real-time data will enhance understanding of the interactions between bridge structures and water flow. By integrating these insights into the design process, innovative solutions that balance infrastructure needs with environmental sustainability can be developed.

Collaboration among researchers, engineers, and policymakers is essential to advance hydraulic engineering. By working together, safer and more resilient bridge designs that harmonize with natural water dynamics can be developed, effectively mitigating flood risks and minimizing environmental disruption. This study lays the foundation for such collaborative efforts, emphasizing the importance of considering both structural and environmental factors in bridge design.

### Abbreviation

CFD: Computational Fluid Dynamics

RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes

SIMPLE: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

## DECLARATIONS

### Availability of data and materials

All data and material can be obtained from the corresponding author upon request.

### Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

### Funding (not applicable)

### Authors' contributions (not applicable)

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors extend profound gratitude to the dedicated teammates at the INAT and PRISME laboratory, whose collaborative efforts have enriched my academic journey and contributed significantly to the success of our shared endeavors.

## REFERENCES

- [1] Linton, J. (2014). Modern water and its discontents: a history of hydrosocial renewal. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 1(1), 111-120. <https://doi.org/10.1002/wat2.1009>
- [2] Charlesworth, S. M., Fontaneda, L. A. S., & Mays, L. W. (2016). Back to the future? History and contemporary application of sustainable drainage techniques. Sustainable Surface Water Management: A Handbook for SuDS, 11-30. <https://doi.org/10.1002/9781118897690.ch2>
- [3] Gleick, P. (1998). The world's water. Issues in Science and Technology, 14(4), 80-88.
- [4] Hunter, N.M., Bates, P.D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N.G. and Mason, D.C. (2008) Benchmarking 2D Hydraulic Models for Urban Flooding. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 161, 13-30. <https://doi.org/10.1680/wama.2008.161.1.13>
- [5] Mahjoub, Y., Soualmia, A. and Kourta, A. (2024) Bridge Impact on Water Behavior: Simulation-Application to the Medjerda River in Tunisia. Open Access Library Journal, 11: e11597. <https://doi.org/10.4236/oalib.1111597>
- [6] Zdravkovich, M. M. (1997). Flow around circular cylinders: Volume 2: Applications (Vol. 2). Oxford university press.
- [7] C, Sumer BM, Fuhrman DR, Jacobsen NG, Fredsøe J. 2015 Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140104. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0104>
- [8] Jasim, R. A., Hussen, W. Q., Abdullah, M. F., & Zulkifli, R. (2023). Numerical Simulation of Characterization of Hydraulic Jump Over an Obstacle in an Open Channel Flow. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 106(1), 1-15. <https://doi.org/10.37934/arfmts.106.1.115>
- [9] Patil, D., Jadhav, R., & Sohoni, P. Analysis of Different Shapes in Bridge Pier Subjected to Extreme Flood Loading. National Conference on Structural Engineering NCRASE – 2020 <https://www.researchgate.net/publication/347933498>
- [10] Nasim, M., Setunge, S., Zhou, S., & Mohseni, H. (2018). An investigation of water-flow pressure distribution on bridge piers under flood loading. Structure and Infrastructure Engineering, 15(2), 219–229. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1545792>
- [12] Baykal C, Sumer BM, Fuhrman DR, Jacobsen NG, Fredsøe J. 2015 Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140104. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0104>



# 2024



## Colloque-Formation International

### Eau - Agriculture - Climat'2024

### Et Sécurité Alimentaire

### Ressources en Eau, Agriculture et Changement Climatique

10 au 15 Novembre 2024, Hammamet (Tunisie)

[www.jistee.org](http://www.jistee.org)



## Eau - Agriculture - Climat'2024

### Et Sécurité Alimentaire

'Ce qui compte c'est demain'

Pour plus d'informations veuillez contacter

Pr. Noureddine GAALOUJ

E-mail: [eauclimat@iresa.agrinet.tn](mailto:eauclimat@iresa.agrinet.tn)

[eauclimat@yahoo.com](mailto:eauclimat@yahoo.com)

**ASTEE Tunisie**  
 Association Scientifique et Technique pour l'Eau, l'Environnement et le Développement en Tunisie  
 L'Eau : Notre Métier  
 L'Environnement : Notre Vie  
 Le Climat : Notre Planète  
 Le Développement : Notre Objectif  
 La Formation : Notre Devoir  
 La Recherche : Notre Avenir



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

©2024 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V (ix), Issue 3 –November 2024 - [jistee.org/volume-ix-2024/](http://jistee.org/volume-ix-2024/)



# Colloque-Formation Internationale (EAC'2024)

10 au 15 Novembre 2024, Hammamet (Tunisie)

## Eau - Agriculture - Climat'2024 Et Sécurité Alimentaire

# Ressources en Eau, Agriculture et Changement Climatique

[www.jistee.org](http://www.jistee.org)



Pour plus d'informations veuillez contacter

Pr. **Noureddine GAALOUL**

E-mail: [eauclimat@iresa.agrinet.tn](mailto:eauclimat@iresa.agrinet.tn)

[eauclimat@yahoo.com](mailto:eauclimat@yahoo.com)



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

©2024 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V (ix), Issue 3 –November 2024 - [jistee.org/volume-ix-2024/](http://jistee.org/volume-ix-2024/)

# 2024

13 au 14 Novembre 2024

Hammamet (Tunisie)

## Formation Internationale

# Eau - Agriculture - Climat'2024

*Cinq modules au choix des formations au profit des Doctorants et chercheurs seront animés par des experts internationaux:*



[eauclimat@yahoo.com](mailto:eauclimat@yahoo.com)  
[eauclimat@iresa.agrinet.tn](mailto:eauclimat@iresa.agrinet.tn)

**Module 1 : Modélisation des Ressources en Eaux (Eaux de Surface ; Eaux Souterraines et Hydro chimie des eaux)**

**Module 2 : Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection**

**Module 3 : Modélisation Hydro-Agro-Climatologique SWAT**

**Module 4 : Intelligence Artificielle**

**Module 5 : Smart Agriculture: L'agriculture intelligente face au climat**

**Module 6 : Anglais Scientifique; Comprendre et communiquer**



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

©2024 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V (ix), Issue 3 –November 2024 - [jstee.org/volume-ix-3-2024/](http://jstee.org/volume-ix-3-2024/)



# INTERNATIONAL JOURNAL

## Water Sciences and Environment Technologies

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

*Volume (ix) - Issue 3 - November 2024*

W<sub>ater</sub> - A<sub>griculture</sub> - C<sub>limate</sub> 2024



**Water, Agriculture, Climate Change  
and Food Security**

**Systeme d'Information Géographique (SIG) et Télédétection**

**Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul**

*Published by:*

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