

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

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

Volume (vii) - Issue 4 - Décembre 2022

Water-**H**ealth-**C**limate'2022



**Climate Changes Health: Water
Quality and Accessibility**

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

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

International Scientific Committee (ISC-WHC'2022)

<i>Nouredline Gaaloul</i>	<i>Prof. University of Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisia)</i>
<i>Hamadi Hababeb</i>	<i>Prof. University of Carthage – IRESA -IN-AT (Tunisia)</i>
<i>Zouhaier Nasr</i>	<i>Prof. University of Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisia)</i>
<i>Mohamed Hachicha</i>	<i>Prof. University of Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisia)</i>
<i>Zouhaier Hlaoui</i>	<i>Prof. University of Tunis - Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (Tunisia)</i>
<i>Adel Kbarroubi</i>	<i>Prof. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Rachid Boukchicha</i>	<i>M.Conf. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Nouredline Hamdi</i>	<i>Prof. Université of Gabès – ISSTEG (Tunisia)</i>
<i>Taoufik Hermassi</i>	<i>M.Conf. University of Carthage – IRESA -INRGREF (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 Djorfi</i>	<i>Prof. University of Annaba (Algeria)</i>
<i>Mohammed Achite</i>	<i>Prof. University of Chlef (Algeria)</i>
<i>Abdelhalim Yabiaoui</i>	<i>Prof. University of Bechar (Algeria)</i>
<i>Mohamed Bessenasse</i>	<i>Prof. University of Saad Dahlab- Blida (Algeria)</i>
<i>Benabadji 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>Guergazi Saadia</i>	<i>M.Conf. University of Biskra (Algeria)</i>
<i>Gwendouaz Abdelhamid</i>	<i>M.Conf. University of Blida1 (Algeria)</i>
<i>Khonalidia Wacila</i>	<i>M.Conf. University of Souk-Ahras (Algeria)</i>
<i>Belkacem Bekkoussa</i>	<i>M.Conf. University Mustapha Stambouli de Mascara (Algeria)</i>
<i>Ali Essahlaoui</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>El Ouali Abdelhadi</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Abdellah El Hmaidi</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Imad Manssour</i>	<i>Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)</i>
<i>Abdelmajid Mounem</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 Ngongo Lawesi</i>	<i>Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)</i>
<i>Koussoubon A. Leonard</i>	<i>Prof. FLLAC/ UAC (Congo)</i>
<i>Koumassi Dègla Hervé</i>	<i>Prof. LACEEDE/ UAC (Benin)</i>
<i>Hamma Yaacoub</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 (Cameroon)</i>
<i>Gnandi Kissao</i>	<i>Prof. Univ. Lomé (Togo)</i>
<i>Hamadoun 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 Delège</i>	<i>Prof. University of Liège (Belgium)</i>
<i>Meriam Gaaloul</i>	<i>Faculty of Architecture La Cambre Horta - ULB (Belgium)</i>

Preface



When we think about climate change, we are used to thinking about water quantity — drought, flooding, extreme rainfall and things along those lines. Climate change is just as tightly linked to issues related to water quality, and it's not enough for the water to just be there, it has to be sustainable." -- Anna Michalak, professor of global ecology at the Carnegie Institution for Science in Stanford, California, in The New York Times.

Water is a necessity of human life, and everyone deserves access to clean and safe water. After all, humans are made up of approximately 60 percent water. Unfortunately, climate change jeopardizes the quality and safety of our water. Warmer weather causes more water to evaporate, allowing the air to hold more water. This sets the stage for heavier rainfall and flooding, which decreases the quality of our water and increases health risks.

- **Flooding:** *Climate change can lead to heavier rainfall and increased flooding. Flood waters can be comprised of a variety of harmful contaminants. In some cases, floods can overhaul a region's drainage or wastewater treatment systems, increasing our risk of exposure to bacteria, parasites and other unhealthy toxins. This can contaminate the water we drink along with crops and other food we eat.*
- **Warmer Waters:** *As the earth's temperature rises, surface water temperatures in lakes and oceans also rise. Warmer waters create a more hospitable environment for some harmful algae and other microbes to grow. Some algae produce toxins that are harmful when ingested. Not only does this contaminate our water, but also the fish we eat.*

Access to clean water is a fundamental human right, yet some communities bear an inequitable burden of unsafe water. Children are especially susceptible to waterborne illness because they take in more water per body weight than adults, and their organ systems are still developing. Elderly people may be less resilient because many have preexisting chronic diseases that cause their immune system to be weakened. The aging infrastructure of our water system leaves low-income communities at higher risk of exposure as those communities may not have resources available to fix the problem. Our flood protection infrastructure must also be equipped to protect all communities. Consider Hurricane Katrina as an example: it was not the hurricane itself that resulted in mass destruction, but the flooding that led to property damage, injury and mold infestation/growth.

Water is one of the world's most important resources. It is central to agriculture which accounts for 72 percent of global freshwater withdrawals, and to other economic sectors. It is core to achieve the 2030 Agenda for Sustainable Development. While there is increasing awareness of the importance of water, there is still a need for more effective, integrated and coordinated actions, coupled with strong political will in recognizing water in a holistic manner to achieve all of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Governments and other stakeholders have acknowledged that water, sanitation, health, ecosystems, oceans, energy, food systems and nutrition are interlinked and that the rising trend of losses caused by water-related disasters must be addressed, with particular attention paid to people in vulnerable situations, including smallholder farmers, leaving no one behind.

There is an urgent need to consider how to best address these interconnected issues and to understand why and how water resources shall be used to achieve social, economic and environmental objectives embedded in national development strategies.

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.iistee.org



International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)

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

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

Open Access

07 Volumes, 23 Issues, (350 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 (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: Reimventing 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 (14 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

Coastal Aquifers: Seawater/Saltwater Intrusion. Impact of the coronavirus (covid-19) on the environment, climate change and water resources	5
Noureddine Gaaloul (<i>University of Carthage – INRGREF - Tunisia</i>), Saïed Eslamian and Rim Katlane	
The impact of instantaneous spring floods on the extreme functioning of undeveloped basins: case of the Ououamana catchment (March 2010 flood) (Oum Er-Rbia Basin, Morocco)	26
Lahlou Nadia (<i>University Mohamed V, Faculty of Letters and Human Sciences, Rabat –Morocco</i>)	
Monitoring of cork oak (<i>Quercus suber</i>) post-fire recovery using Sentinel 2A data: a case study in Takebt forest, Zekri, Algeria	36
Dib Tassadit , (<i>Mouloud Mammeri University, Tizi-Ouzou – Algeria</i>), Gaaloul Nouredine, Krouchi Fazia	
Case study of the modeling approach of the flows of the sub-catchment of Kisangani by the method of the curved numbers.	45
Papy kabadi lelo odimba (<i>University of Carthage, Inat, Tunisia</i>), Géorges Koshi Gimeya, and Issam Nouiri	
Analyse prospective climatique dans un contexte de changements climatiques : Cas du bassin versant du N’zi (Bandama, Côte d’Ivoire)	58
Asaph Yahot Joël Gnganguin (<i>Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny. - Côte d’Ivoire</i>) ; Amani Michel Kouassi and Khadara Diarrassouba	
Stratégie d’approvisionnement en eau potable en milieu rural au Bénin et atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD)	75
Sewade Sokegbe Grégoire , (<i>Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny - Bénin</i>), Gnimadi Codjo Clément, and Hounliho V. Beaudelaire A.	
Effets combinés du biochar et des fientes de volaille sur les paramètres physiologiques de la laitue (<i>lactuca sativa</i>)	89
Yemadje A. S. Alda (<i>Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques Abomey-Bénin</i>), Azalou Tingbe Fanès, Akotegnon Albert, Azonhe Thierry Hervé	
Cartographie des risques d’inondation dans le bassin versant du N’Zi (Bandama) en Côte d’Ivoire	100
Kouassi Amani Michel (<i>Université Félix Houphouët-Boigny - Côte d’Ivoire</i>), Gnganguin Asaph Yahot Joel, Kouame Kacou Essey Benjamin	

www.jistee.org

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

Coastal Aquifers: Seawater/Saltwater Intrusion. Impact of the coronavirus (covid-19) on the environment, climate change and water resources

Noureddine Gaaloul¹, Saïed Eslamian², Rim Katlane³

¹ University of Carthage, National Research Institute of Rural Engineering, Water and Forestry, LR 16INRGREF02, LR Valorization of Unconventional Waters, 17 rue Hédi Karray, BP no. 10 Ariana 2080, Tunisia

² Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

³ GEOMAG (LR19ES07)/PRODIG (UMR 8586), University of Mannouba-Tunis Campus Universities B.P.95 2010 Manouba, Tunisia;

Abstract

This paper describes the general view of Coastal Aquifers: Seawater/Saltwater Intrusion and groundwater problems in coastal aquifer. The Modeling seawater intrusion and groundwater flow pollution of this chapter is to set the stage for the modeling procedure and methodology. The relative impacts of anthropogenic interventions and global climate change on the dynamics of saltwater intrusion in highly urbanized coastal aquifers and the consequences of climate change on groundwater are long term are examining and can be far reaching. One of the more apparent consequences is the increased migration of salt water inland in coastal aquifers. The artificial recharges techniques in semi-arid areas and the Tunisia's experience in artificial recharge (water from the dam and treated wastewater) are described. The 'Tunisia's experience on Artificial Recharge of Groundwater' is the first in the semi-arid areas and has updated information on various aspects of investigation techniques for selection of sites, planning and design of artificial recharge structures, their economic evaluation, monitoring and technical auditing of schemes and issues related to operation and maintenance of these structures. The Impact of the coronavirus (covid-19) on the environment and water resources COVID-19 serves as a reminder of the critical importance of water and sanitation services, and should encourage Governments to prioritize the availability and sustainable management of water and sanitation for all, as stipulated in Goal 6 of the 2030 Agenda for Sustainable Development and the Human Right to Water and Sanitation.

Key Words: Seawater Intrusion, Coastal aquifer, Modeling, Climate change, Coronavirus (covid-19).

Impact Covid-19 dans les régions Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA)

Résumé

Cet article décrit la vue générale des aquifères côtiers : intrusion d'eau de mer/ eau salée et problèmes des eaux souterraines dans les aquifères côtiers. La Modélisation de l'intrusion d'eau de mer et de la pollution par l'écoulement des eaux souterraines de ce chapitre vise à préparer le terrain pour la procédure et la méthodologie de modélisation. Les impacts relatifs des interventions anthropiques et du changement climatique mondial sur la dynamique de l'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers fortement urbanisés et les conséquences du changement climatique sur les eaux souterraines sont examinés à long terme et peuvent avoir une grande portée. L'une des conséquences les plus apparentes est la migration accrue de l'eau salée vers l'intérieur des terres dans les aquifères côtiers. Les techniques de recharges artificielles en zones semi-arides et l'expérience de la Tunisie en matière de recharge artificielle (eau du barrage et eaux usées traitées) sont décrites. L'expérience de la Tunisie sur la recharge artificielle des eaux souterraines est la première dans les zones semi-arides et a mis à jour les informations sur divers aspects des techniques d'investigation pour la sélection des sites, la planification et la conception des ouvrages de recharge artificielle, leur évaluation économique, le suivi et l'audit technique. des schémas et des enjeux liés à l'exploitation et à l'entretien de ces ouvrages. L'impact du coronavirus (covid-19) sur l'environnement et les ressources en eau COVID-19 rappelle l'importance cruciale des services d'eau et d'assainissement, et devrait encourager les gouvernements à donner la priorité à la disponibilité et à la gestion durable de l'eau et de l'assainissement pour tous, comme stipulé dans l'objectif 6 de l'Agenda 2030 pour le développement durable et le droit humain à l'eau et à l'assainissement.

Mots clés : Intrusion d'eau de mer, Aquifère côtier, Modélisation, Changement climatique, Coronavirus (covid-19), .

¹ Corresponding author: gaaloul.noureddine@iresa.agrinet.tn

INTRODUCTION

Many people lack of access to the most basic weapons to shield themselves from COVID-19: water and soap. UN-water reports that 2.2 billion people around the world do not have safely managed drinking water, while 4.2 billion go without safe sanitation services and three billion lack basic handwashing facilities. Furthermore, an estimated 896 million people use health care facilities with no water service and 1.5 billion use facilities with no sanitation service. These conditions present a constant source of stress and disease, particularly for vulnerable and marginalized communities where people sometimes need to skip bathing to save water for cooking [1].

In many arid and semi-arid regions, surface water resources are limited and ground water is the major source for agricultural, industrial and domestic water supplies. Because of lowering of water tables and the consequently increased energy costs for pumping, it is recognized that ground water extraction should balance ground water recharge in areas with scarce fresh water supplies. This objective can be achieved either by restricting ground water use to the water volume which becomes available through the process of natural recharge or by recharging the aquifer artificially with surface water. Both options require knowledge of the ground water recharge process through the unsaturated zone from the land surface to the regional water table. As seawater intrusion progresses, existing pumping wells, especially close to the coast, become saline and have to be abandoned, thus, reducing the value of the aquifer as a source of freshwater. As an aid to effective management, many models have been developed over the years to represent and study this problem. They range from relatively simple analytical solutions to complex state-of-art numerical models using large computing capacity [2].

Groundwater also provides the largest amount of the total water resources in other countries. For example, in Tunisia it is about 95% of the total water resources, in Morocco it is 75%. Continuously increasing development has led to overexploitation of groundwater resources and growing impacts of human activities on aquifers in many countries, such as decline in groundwater levels and deterioration of groundwater quality. Groundwater is said to be contaminated when contaminant concentration levels restrict its potential use. Groundwater pollution caused by human activities can be broadly classified as point-source and non-point-source pollution [3].

Usually, quantity problems are directly related to groundwater extraction by human beings more or less. Over-extraction of groundwater modifies drastically piezometric head fields and groundwater flow patterns, inducing various drawbacks [4]. The term “over-extraction” can be defined as the condition, in which the total amount of groundwater extraction from an aquifer is close to or greater than the total recharge for several years [5]. According to Bouwer [6], degradation of groundwater quality can take place over large areas by the plane (or diffuse) sources through deep percolation from intensively farmed fields, or it can be caused by point source such as septic tanks, garbage disposal sites, cemeteries, mine spoils, oil spills or other accidental entry of pollutants into the underground environment. Next, natural chemical constituent within groundwater as a result of water-rock interaction presented by Todd [7]. Dissolved inorganic constituents in natural groundwaters can be subdivided into major, minor and trace constituents [8].

Numerical models for groundwater quality and Tunisia’s experience in artificial recharge, exploitation and management – rather than on their shared features and theoretical principles. Assessing the quality of this data is extremely difficult and was considered not feasible in preparing this compilation [2].

GENERAL VIEW OF SEAWATER/SALTWATER INTRUSION AND GROUNDWATER PROBLEMS

Groundwater is the water that occurs in the voids between the subsurface soil particles and in the cracks. The large quantities of groundwater are found in aquifers. Groundwater is the primary source of water for human activities such as agriculture, industry and domestic drinking water especially in regions with limited annual precipitation [7]. Because groundwater is located at deep locations, it is less vulnerable to pollution. However, anthropogenic activities such as fertilization and other pollution sources beside over exploitation of the aquifers create serious problems to groundwater quality. The intensive use of natural resources and the large production of wastes in modern society often pose a threat to groundwater from aspects of quantity and quality. Usually, quantity problems are directly related to groundwater extraction by human beings more or less. Over- extraction of groundwater modifies drastically piezometric head fields and groundwater flow patterns, inducing various drawbacks [4]. The term “over-extraction” can be defined as the condition, in which the total amount of groundwater extraction from an aquifer is close to or greater than the total recharge for several years [5].

There are different types of pollutants that can be found in groundwater, such as nitrate, heavy metals and saltwater. Intrusion of saltwater is the most common contamination occurrence in coastal aquifers [9]. Intrusion

of saltwater occurs when saltwater displaces fresh water in an aquifer. The phenomenon can occur in deep aquifers with the advance of saline waters of geologic origin, in shallow aquifers from surface waste discharge, and in coastal aquifers from the invasion of seawater [7]. Over pumping of groundwater wells that located near the shoreline is a major cause of encroachment of saltwater into the aquifers and may lead to saltwater intrusion. The total world freshwater supply is estimated to be 41,022 billion m³ [10]. The freshwater supply of different continents and annual withdrawals for domestic, industrial, and agricultural water uses. As can be seen in this table, annual withdrawal is about 8% of the total freshwater supply, and the agriculture sector, with 69% usage, has the highest rate among the water uses.

The last one is associated with the quantity problems, and hydrogeochemical study is one of the most promising ways to identify sources of contaminant and to solve some kinds of groundwater problems [11, 12]

An estimated eight to ten million cubic kilometers (km³) of fresh groundwater represents the lion's share of all liquid freshwater on Earth, or to be more precise: about 98 to 99% of it [13]. In comparison, the global volume of freshwater in lakes is less than 1% of the total fresh groundwater volume. However, the volume of freshwater stored in the Earth's crust represents only one per cent of the total volume of water in the hydrosphere, including the oceans.

Saltwater intrusion is one of the main causes of groundwater quality degradation and a major challenge in the management of groundwater resources in coastal regions. Saltwater intrusion causes an increase of salt concentration in groundwater which places limitations on its uses. Excessive pumping always leads to a dramatic increase in saltwater intrusion. In coastal aquifers, the hydraulic gradient exists towards the sea which leads to flow of the excess freshwater to the sea. Seawater intrusion (SWI) is a special category of groundwater contamination that threatens the health and possibly lives of the people living in coastal areas. The problems of saltwater intrusion into groundwater had become a considerable concern in many countries particularly in coastal areas. Seawater intrusion leads to the depletion of groundwater resources and should be prevented or controlled to protect water resources in coastal regions. The intrusion of saltwater in coastal aquifers has been investigated by several methods including geophysical methods, geochemical methods, experimental studies and mathematical models.

The knowledge of hydrogeochemical processes helps to get insight into the evaluating of contributions of rock-water interaction and anthropogenic influences on groundwater quality. These geochemical processes are responsible for the seasonal and spatial variations in groundwater quality [14, 15]. Groundwater chemically evolves by interacting with aquifer minerals or internal mixing among different groundwater along flow-paths in the subsurface [16, 17, 18]. These processes that govern the groundwater quality were the focus of many previous studies. In Saether [19], were interested in the geochemical processes such as weathering taking place in catchments. The cation exchange in a coastal aquifer was the focus in Martinez [20], they studied the effect of overexploitation of an unconfined aquifer on the groundwater quality in the coastal aquifer of Mar del Plata in Argentina. In Ikeda, [21], found out that investigation on processes of groundwater quality formation including the water-rock interaction and salinization process is a successful way to clarify the hydrological phenomena such as flow and mixing of water in the Southern foot of Mount Fuji. The study in Pulido-bosh [22], treated the effect of agricultural activities, high pumping and dissolution of carbonate rocks on the aquifer's chemical compositions in the coastal aquifer of Temara in the Northwestern region in Morocco. Furthermore, the main target in Kumar [23], was the identification of different hydrogeochemical processes such as dissolution, mixing, weathering of carbonate and ion exchange in the groundwater of Muktsar, Punjab, using conventional graphical plots and multivariate analysis.

Saltwater intrusion in coastal aquifers is a severe problem that many countries have to face at present, due to the fact that it contaminates groundwater aquifers and even surface water, leading to the unavailability of water resource for domestic, agricultural use and other consequences [24]. Seawater intrusion or called "saltwater intrusion" is a specific process of groundwater contamination [25]. This phenomenon draws special attention in the management of the coastal aquifers. As seawater intrusion progresses, a part of the aquifer close to the saline water. In such case, pumping wells operated there have to be controlled. Seawater intrusion (SWI) is a principal cause of fresh groundwater salinization in many regions of the world [26]. The seawater occupies the void space in the aquifer formation beneath the sea. This seawater zone in the aquifer extends to some distance landward from the coast below freshwater zone. Consequently, a zone of transition between freshwater and saltwater exists and it is referred as "interface zone" or more simply "interface" [27].

The causes of this problem differ due to various factors such as geological factors, human activities and regional economic level. Groundwater depletion has been recognized as the biggest driver in most stricken areas. It is

believed that groundwater will become saltier in the future considering the exploding population, increasing demands for agriculture and all other economic activities together with the changing climate and rising sea level [28]. The intensive extraction of groundwater from coastal aquifers reduces freshwater outflow to the sea and creates local water table depression, causing seawater to migrate inland and rising toward the wells [29,30,31], resulting in deterioration in groundwater quality. This phenomenon, called seawater intrusion, has become one of the major constraints imposed on groundwater utilization in coastal areas. Saltwater intrusion is one of the most widespread and important processes that degrade water quality to levels exceeding acceptable drinking and irrigation water standards and endanger future water exploitation in coastal aquifers. Coupled with a continuing sea level rise due to global warming, coastal aquifers are even more under threat. This problem is intensified due to population growth, and the fact that about 70% of the world's population occupies the coastal plain zones [32,33].

The situation of the groundwater in the Maghreb countries in arid environments (Tunisia, Algeria, Morocco, Libya and Egypt) has been marked by continuous decreases of water levels in coastal aquifers reaching alarming values. This decrease, caused by the synergistic effects of drought, flooding, agriculture and urbanization, has intensified the problem of seawater intrusion.

In Tunisia, the Korba coastal aquifer situated in Cap-Bon, Tunisia has been experiencing seawater intrusion since 1970 and currently the salt load in this unconfined aquifer has peak concentrations of 5 to 10 g/L. A large increase in the number of pumping wells for irrigation purposes since the 1960s has resulted in a lowering to below sea level of the water table in several observation piezometers, and in a consequent deterioration of the water quality. A numerical model that treats density-dependent variably saturated flow and miscible salt transport is used to investigate the occurrence of seawater intrusion in the Korba aquifer of the eastern coast of Cap-Bon in northern Tunisia [8, 34; 35, 36, 37, 38].

In Algeria, the Algerian coastal aquifers have also not escaped over exploitation with the Mitidja aquifer suffering from seawater intrusion, especially during the dry season. This aquifer system has a steady decline in water level in the order of 20–50 m per decade, which increases the rate of seawater intrusion on an annual basis. The origin of water salinity on the Annaba coast (NE Algeria) is attributed to several factors such as the geological features of the region, the climate and the salted bevel. The salinity increases steadily when approaching the sea and indicates the influence of marine water [39, 40, 41].

In Morocco, areas have been identified in which saltwater intrusion occurs (Temara-Rabat), however the aquifer system also contains marine deposits which contribute to the degradation of the groundwater. The rates of water abstraction in these areas have increased in the last 50 years, resulting in the lowering of the water table and eventually allowing seawater to intrude from coastal areas [22,42, 43, 44].

In Libya, the city of Derna is facing severe water shortages due to seawater intrusion. The intrusion has steadily increased from 1960 to 2005, a period during which potable water was available; since 2005, a loss of 75% in well production in this aquifer system has been observed. Tripoli (Libya) is also affected by saline intrusion, which extends 10 km inland from the coast; in the Gefara plain, this has been accelerated due to high rates of urbanization and increased agricultural activities [45].

In the Nile delta, seawater intrusion has been observed 60 km inland as a result of excessive pumping. An extensive saltwater body has developed from upper Egypt to eastern Libya in the past 50 years. The freshwater saline water interface passes through the Qattara depression crossing the Libyan-Egyptian border and finally turning to the S–W reaching the Tazerbo area. The development of the Siwa oasis from the deep Nubian Sandstone Aquifer is close to the freshwater/saline water interface and could cause the saline water to intrude into the freshwater aquifer. The problem is further compounded since on the Libyan side large amounts of water are abstracted for urban development, causing saltwater intrusion along the Libyan coast. This over abstraction in combination with the sluggish flow of the Nubian Sandstone Aquifer causes the saline water body to encroach even further inland with considerable increases in concentration of dissolved solids [46,47,48].

Although a lot of studies focused on the phenomenon of SWI in the worldwide, this important hydrogeochemical process still needs to be more deepen, especially with the modelling tools, because they allow predicting the behaviour of an aquifer system in response to pumping as excitations. If one will do it, decision makers can apply countermeasures to avoid the deterioration of the groundwater quality, which might have socio-economic effects [2].

TUNISIA'S EXPERIENCE IN ARTIFICIAL RECHARGE

In Tunisia, groundwater is the only dependable source for urban and agricultural water supply. In recent years, groundwater pumping increased with increased population, and water level in the unconfined aquifer has largely obviously declined. Moreover, groundwater quality deteriorates progressively overall in the Cap Bon and in the Tunisian Sahel. Historically, the groundwater salinization has been thought to result from processes related to water-rock interaction and long-term irrigation practices. Tunisia has arid and to semi-arid climate. The average rainfall is 500 to 800 mm per year in the northern part of the country, whereas the South only receives 100 to 200 mm. The global water resources amount to 4.8 billion m³, 2.7 billion m³ surface water and 2.1 billion m³ groundwater. The net development rate of surface resources is 57 % and that of groundwater 83 % [2]. Tunisia has an experience in artificial recharge of aquifers since the early 1956s. This is devised to increase groundwater resources while regulating surface flow, providing underground storage of this water and avoiding its becoming lost in the sea or in salt depressions, or its evaporation in dams. Currently, there exist more than 64 recharge zones of 23 aquifers. Since the 1958s, Tunisia has started the artificial recharge technique. Generally, surface water is used in artificial recharge, by dam's lake and underground dam infiltration, crossing the riverbed infiltration, injection wells, or infiltration basins. Several experiments of recharge by surface water were established, especially in Teboulba aquifer from 1970. Artificial recharge of Teboulba coastal aquifer by surface water provides an effective means of struggle against the seawater intrusion and improving the groundwater quality [8]. Artificial recharge of Grombalia aquifer was set during the 1975–1978 period at Oued Sidi Said station by three infiltration basins. From 1988, artificial recharge of Kairouan aquifer is done by infiltration in riverbed from the El Houereb and Sidi Saad dams. In Manzel Bouzalfa region, artificial recharge was performed by injection of surface water in three wells since 1990 [35]. The phenomenon of seawater intrusion in coastal aquifers is governed by the recharge process and pumping in these aquifers. Therefore, it is essential to know the water level in the aquifer and its fluctuations, in order to decide on a possible seawater intrusion and estimate its magnitude. Salinization in the coastal aquifers has become a major concern and has induced considerable economic losses, leading to impaired quality of freshwater aquifers. An excessive withdrawal of groundwater coupled with a significant decrease in recharge also contributes to this problem. The magnitude of saline water intrusion is influenced by the natural geological settings, hydraulic gradient, rate of groundwater withdrawal and its recharge [49, 50]. The salinization of groundwater aquifers makes it unusable for drinking and irrigation. Various explanations for the salinization phenomenon have been suggested: (i) seawater intrusion due to over pumping, (ii) dissolution and precipitation of some minerals, with cation exchange caused by the marine intrusion along the coastal areas, and (iii) the return flow from the inner irrigated coastal areas and chemical compounds of the fertilizers used in agriculture. Salinization of coastal fresh water aquifers by seawater intrusion, geomorphic changes, tidal waves, cyclonic storms and man-made hazards are major causes of the ground water pollution in the coastal areas of Tunisia [2,3,35]. Seawater intrusion is a principal cause of fresh groundwater salinization in many regions of the world [25,26,27]. Seawater intrusion and agricultural pollution are the major sources of groundwater contamination and salinization in coastal irrigated areas. Seawater intrusion was controlled by cation exchange, carbonate weathering and redox processes. Agricultural pollution is enriching the groundwater with NO₃, Ca, SO₄, and K elements [34].

A fifty-year artificial recharge of the aquifer by water from the dam

The Teboulba region is situated in the Tunisian Sahel. This region has a semiarid to arid climate with mild, wet winters and dry, hot summers, a mean annual rainfall of the order of 375mm and a mean annual temperature of about 20°C. The studied sector of the region is part of the Sahelian watershed basin, built up on a low-lying coastal plain partly recovered from the sea. The monotonous topography and the geological cover, dominated by Quaternary formations, make it impossible to identify any hydrogeological basin structures. However, the depressions in the interior of the region and the wadis along the coastal zone help to identify the boundaries of more or less individual hydrological basins.

The study site is located on an alluvial plain whose geology is dominated by Quaternary deposits. The Teboulba area has relatively stable tectonics apparent in the tabular sedimentary structure. However, normal faults have clearly affected the structure of the deep layers. The Teboulba plateau, 10 km long and 4 km wide, plunges quite sharply towards the sea while a fairly gentle slope links it to the Mokinne sebkha (a salt lake at the elevation of about 13m below sea-level). It contains an alluvial water-table aquifer with lenticular geometry, short horizontal extent and irregular vertical continuity. There are also a few perched aquifers lodged inside the formation in silt-sand layers and lenses intercalated between clay and clay-sand strata. The substratum of the aquifer, consisting of an impervious Mio-Pliocene clay-marl layer, lies at a depth of over 90m. The Teboulba aquifer covers a surface

area of around 35 km² and represents a hydrological recharge potential estimated, on average, at 0.65Mm³/y with an exploited volume of 1Mm³/y. This heavily negative budget (deficit of 0.35Mm³/y) is compensated by reserves but, above all, by an inflow of saltwater from the sea and/or the sebkha and by return flow of irrigation water from the neighbouring regions, estimated at 0.53Mm³/y [51], only a part of which flows towards Teboulba. The overexploitation of the resources, begun hundreds of years ago and particularly intensified in the last decades, has caused a drawdown of the aquifer to an elevation below sea level (over -30m at some points) in a zone that covers almost 12 km². This depression has provoked an intrusion into the aquifer layers of saltwater from the sea in the north and from the sebkha in the south and, as a consequence, the water quality has deteriorated to the extent that in some areas, it can no longer be used for irrigation [52]. The Teboulba coastal aquifer is located in the sand-silt Plio-Quaternary formations, characterized by an effective porosity estimated at 7%, an average transmissivity of around $2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ and a storage coefficient of the order of 3.5×10^{-2} . It is a vivid example of overexploitation. The flow in this aquifer takes several directions but converges generally on the exploitation zone. The flow toward the sea and toward the Mokinine sebkha, two natural outlets of the aquifer, is relatively weak due to the strong depression created by the heavy exploitation in the western part of the region. The hydraulic gradients are very variable depending on the lateral facies' changes in the aquifer formation and the drawdown linked to the overexploitation.

The aquifer is naturally recharged mainly by rainwater and, to a lesser degree, by domestic wastewater from infiltration pits and re-infiltration of some irrigation water. Discharge occurs mainly by pumping for agricultural purposes and into the sea and sebkha. Saltwater intrusion from the sea and/or from the sebkha may disturb the hydrodynamics of the aquifer. All these factors make the water balance of the aquifer extremely complex and its hydrodynamic equilibrium very fragile and, above all, highly variable. The history of this operation goes back to the 1970s. It concerns the recharge of the aquifer via a connection to the main pipe of the irrigation network [53, 54, 55]. As there was no excess water in the Nebhana dam because of the rainfall deficit during the period from 1978 to 1991, the recharge operation was interrupted at the end of 1978 and restarted in July 1992, lasting until 2000. The monitoring installation was composed of 22 surface wells exploiting the aquifer and three piezometers. The analysis of the piezometric level fluctuations versus time in the control wells indicated two distinct behaviours. The first one showed a rapid and continuous recovery of the water level in the wells close to the zone where the recharge was strong. The second one was the continuous decrease due to the exploitation of the aquifer by the surface wells. This can be explained by the great distance between the recharge zone and these wells and the weak natural recharge rate which does not compensate for the large quantities of water withdrawn by the farmers. Establishing the piezometric maps is sometimes made more difficult by the presence of small perched aquifers inside the weakly permeable lenticular formations.

After intense artificial recharge from 1971, an analysis of the piezometric situation of the aquifer, in 2011, further confirmed the existence of the localised domes, revealed in 1971, but definitely enhanced. The flow direction of the aquifer remained constant but still retained the depression in the western part of the aquifer. Furthermore, the map shows a narrowing of the depression cone compared to earlier situations. The water level had risen, sometimes by more than 13m underneath the recharge site.

The Teboulba aquifer is also recharged by infiltration return flow of treated wastewater used for irrigation. These irrigation volumes were 144,000 m³ in 1992, 114,000 in 1993 and 255,000 in 1994 [51]. Furthermore, this aquifer is characterized by water with a fairly heavy load of salt. Its salinity may reach 4.5 g/L. The highest values have been recorded near the sea and the sebkha whereas the lowest (1.5 g/L) are found toward the centre of the aquifer. The planned remedial action is to bring surface water from the overspill of the Nebhana dam and inject it into a few of the wells among the thousand existing ones. The mean rainfall recharge to the aquifer was estimated with an infiltration coefficient of rainfall of 5% determined by Kamenski's method applied to triple wells aligned along a flow line and monitored every month (aquifer recharge calculated from the rise in its level after a rain event). Luckily, because of the weak permeability of the water bearing layers, the saltwater intrusion has not progressed very far. The aquifer is exploited mainly by 806 surface wells, 465 of which are equipped with motor pumps enabling them to irrigate, by sprinklers, a surface area of about 200 ha. Hydrochemical studies carried out from 1940 to 1971 show that the salt content in the aquifer water follows the same pattern as the piezometric levels measured between 1940 and 1971.

The salinity map for 1971 shows values higher than 4.3 g/L, a sign that the aquifer water was becoming brackish. The high salinity values observed in the North and South of the region are explained by the contamination of the aquifer by saline intrusion from the sea and sebkha. This hypothesis is supported by the high chloride contents and the presence of inverse cation exchange reactions, which are characteristic of sea-and freshwater mixing movements [56, 57]. The salinity variations of its water, recorded in the control wells, were not very significant, due to the great surplus of rainfall that year which contributed to the natural recharge of the aquifer, thus maintaining both the piezometric levels and the water quality. The salinity map for the year 2011 shows a slight salinity reduction toward the west of the aquifer: the zone characterised by salinity lower than 2 g/L and situated near the recharge site becomes more extensive. This shows the influence of the mixing with less salty water from the Nebhana dam.

A twenty-six-year artificial recharge of the aquifer by treated wastewater

Besides reclaimed water reuse for agricultural purposes, seasonal recharge of the shallow and sandy aquifer of Nabeul Oued Souhil has been performed since 1985. The field experiment was located in the experimental farm of Oued Souhil (INRGREF) in North- Eastern Tunisia (to about 60 km of Tunis). The climate is semi-arid with 400 mm as mean annual precipitation at Nabeul city, and 19°C as mean temperature. Dominant economic activities are tourism and agriculture with some agro-industries.

The ground water artificial recharge by treated wastewater is the first pilot project in this field to be developed in Tunisia in 1986. The aquifer Hammamet-Nabeul is located at the north-eastern coast of Tunisia along the Mediterranean Sea. The shallow aquifer contains more than 3000 surface wells which are used to irrigate citrus. The alluvial aquifer of Quaternarian age is formed by sand with no or very low content of clay. The thickness of this aquifer ranges between 10 and 20 meters. It is underlain by a layer of Pliocenic clay, which reaches a thickness of more than 200 m. The aquifer is bordered at the west by a indifferiated Pliocene, consisting of sand, sandstone and clay being the main components. Soils in the Oued Souhil area were described as being composed of alluvia of coarse material belonging to the Quaternary marine formation. They are poor sandy to sandy-silty soils with low fine material content suitable for horticultural and orchard cultivation [58]. The vadose zone of the aquifer has been described previously [59, 60] and more recently [61] as varying between 10 and 13 m thick from the river bed to the infiltration basins. The permeability of the aquifer is estimated between 10^{-5} and 6×10^{-3} m/s. The piezometric surface determined the isopotential lines are parallel to the coast. The piezometric depression existing at the head of the river Souhil is a consequence of the concentrated pumping of pliocenic water in this area. The piezometric gradient varies between 1% and 2.5% and corresponds more or less to the slope of the underlying impervious clay layer.

Artificial groundwater recharge is operated at experimental scale in infiltration-percolation basins and the artificial recharge station Nabeul Oued Souhil is composed of four injection basins and 18 piezometers. Some of the observation wells are placed along two lines in direction of ground water movement, the others, between and near the infiltration basins. Groundwater recharge efficiency was proven not only by the increase of the water level in the wells but also by the improvement of the production of the surrounding wells. This experiment allowed an underground storage and an additional treatment step as wastewater slowly infiltrated through the unsaturated zone through the unsaturated zone. However, no clear conclusion could be drawn about the effect of reclaimed water on the bacterial and chemical composition of shallow groundwater since the initial contamination level of most of the wells was relatively high and subject to seasonal variations. According to the state of the art of soil-aquifer treatment [62, 63] improved operation of this facility would lead to a groundwater quality meeting unrestricted irrigation requirement [64].

The ground water artificial recharge by treated wastewater is the first pilot project in this field to be developed in Tunisia in 1986. The aquifer of Hammamet-Nabeul subject to the artificial recharge is located at the north-eastern coast of Tunisia along the Mediterranean Sea. It consists of a coastal plain, which covers a surface of about 60 km². The shallow aquifer contains more than 4000 wells, which are used to irrigate citrus. The alluvial aquifer of Quaternarian age is formed by sand with no or very low content of clay. The thickness of this aquifer ranges between 10 and 20 meters. It is underlain by a layer of Pliocenic clay, which reaches a thickness of more than 200 m. The aquifer is bordered at the west by a undifferentiated Pliocene, consisting of sand, sandstone and clay being the main components. The thickness of this formation can be more than 300 m meters [65]. In a deep well (about 200 m) located near the border to the alluvial aquifer, brackish water has been found, which is oversaturated in CaSO₄. Four wells located several hundred meters upwards, which penetrate only upper levels, are pumping fresh water with a conductivity of about 1 mS/cm. Several springs exist at the upper level of this formation with water of good chemical quality.

The coastal alluvial aquifers are crossed by five small rivers, the most important of which is the river Souhil with a basin of about 20 km². These rivers are usually dry and water flows only sporadically during the rainy periods. In spite of this, most of the recharge is provided by these rivers. Several hundreds of dug-wells exist in the area. Due to over-exploitation, the aquifer is practically exhausted: the average thickness of the saturated zone is about 2 to 3 meters. The re-circulation of the pumped water together with the solution of mineral manure have produced an important degradation of the chemical quality of the water [66].

The recharge site is selected on the basis of lithologic character, hydrologic situation, and a favorable geohydrologic environment. This part of the aquifer is a typical homogeneous alluvial deposits consisting of fine to medium sand with some gravel deposits. The gross hydrologic characteristics are relatively uniform

throughout the area. Also, the field of experimentation is a public property. The artificial recharge station is composed of four injection basins (Length = 20 m : Wide = 20 m : Depth 1.7 m. The side slopes are covered with a layer of synthetic and permeable geotextile tissue (specific gravity = 270 g/m²: permeability = 0.0007 m/s) and 18 piezometers. The piezometric map-as shown the figure 60.5 plotted before artificial recharge reveal that the infiltration basins are placed on a preferential direction of ground water movement. The local hydraulic gradient is about 0.015 [66].

Two hypotheses advanced to explain the mechanism of the wastewater recharge throughout the saturated and the unsaturated zone of the aquifer: (i) the injected wastewater itself moved and a mixing with the native water is produced. (ii) Volumes of injected wastewater were sufficient to totally displace all native formation water and the mechanism is the "piston flow". The use of isotopic tracer supports this last hypothesis.

Some hydraulic properties for, the aquifer was determined during the study: (i). Plots of particles size distribution were constructed using data derived from core samples from test holes. The graphs show that for most of the intervals analyzed; there is a uniform range of fine and medium sand. To determine the theoretic velocity of ground water, we have applied A. Hazen's law ($K = c \cdot d^{210}$), based on the data of particles size distribution; the result was that the velocity obtained is about 0.0001 m/s ($c = 135$); (ii) Horizontal hydraulic conductivity derived from pumping test interpretations is reported to be about 0.0004 to 0.0005 m²/s; (iii) On the site of the artificial recharge, the water table lies 12 m below ground and the saturated zone has a limited depth (less than 4 m) ; (iv) The lowest ground water levels occurred during the end of the dry season (summer) and the highest water levels occurred during the end of the wet season(spring). Ground water level fluctuations are about (1-2 m) per year; and (v) The piezometric map- plotted before artificial recharge reveal that the infiltration basins are placed on a preferential direction of ground water movement [66].

The aquifer, to survey the hydrodynamic impact of the recharge, water levels have been measured daily before, during, and after the experimentation, in observation wells (18 piezometers and 22 shallow wells). When wastewater is injected into the basins, it forms a conical mound around the basins. The height of the cone is greatest under the recharge basins and decrease laterally with distance. It appears that the dimensions of the mound are governed by the basin size and shape, recharge rate, duration, and aquifer characteristics.

Fifty year of treated wastewater reuse for a seawater intrusion hydraulic barrier

In the case of lake of surface water, and in addition to the use of available surface water to artificial recharge groundwater, the treated wastewater can be used in addition to artificial recharge [67]. Testing artificial recharge by Treated WasteWater (TWW) in Tunisia began in Oued Souhil (Nabeul) (Figure 1) in 1986 [66].

In 1986, the ground water artificial recharge by treated wastewater at the experimental station in Nabeul Oued Souhil (Irrigation efficiency) is the first pilot project in this field. Besides reclaimed water reuse for agricultural purposes, seasonal recharge of the shallow and sandy aquifer of Nabeul Oued Souhil has been performed since 1985. The ground water artificial recharge by treated wastewater is the first pilot project in this field to be developed in Tunisia in 1986. The aquifer Hammamet-Nabeul is located at the northeastern coast of Tunisia along the Mediterranean Sea.

In 2008, a new pilot site was established in the region of Korba-Mida (Recharge aquifer and seawater intrusion) to recharge the aquifer with domestic treated wastewater (TWW) of the Korba Wastewater Treatment Plant (KWTP) (Figure 1). The aim was a better evaluation of the mixing processes between seawater, groundwater bodies and the new recharge contributor, and of the changes due to intense groundwater withdrawal, which will be useful from a water resource management perspective aimed at controlling human interference on the Korba plain groundwater. Korba aquifer (northeast Tunisia) is one of typical example of coastal aquifer in semi-arid regions that have been intensively overused during the last years.

The Korba-Mida aquifer is made up mainly of marine sediments deposited in the Dakhla syncline north of Korba city by Abbes and Polak [68, 69], (Figure 2a). The study area is bounded to the north by Wadi Lebna, to the south by Wadi Sidi Othmen, to the west by the elevated mountains consisting of Mio-Pliocene sequences, and to the east by the Mediterranean Sea. The aquifer system is constituted by the superficial and shallow Plio-Quaternary formations and by the deeper Miocene units. The Miocene base is constituted by impermeable marls and contains brackish water with a salinity of 3–4 g/L. The younger upper Miocene is actively pumped at 150–500 m depth upstream of the study site and is tapped for drinking-water supply well in Taffeloun. The deep Miocene aquifer is captive and feeds the upstream Plio-Quaternary; its natural outlet is the sea [2,3,35]. The relationship between both deep Miocene and Plio- Quaternary aquifers is known but not clear. With no distinction in hydraulic terms, the Pliocene and Quaternary deposits form the Plio-Quaternary aquifer. According to electric sections, the

Pliocene part contains a succession of saturated freshwater and brackish-water levels with, in the bottom, layers saturated with variably salty water. It is locally semi-confined due to less permeable deposits and is, the most productive aquifer of the area. Its recharge is provided by direct infiltration of rainwater and stream water. It is severely affected by salinization from seawater intrusion. The Quaternary part is vertically compartmentalized in places. Its recharge occurs principally through incised glacies and outcrops and is favored by the topographic relief formed by Quaternary Tyrrhenian fossil dunes. The main coastal sabkhas are no longer the natural outlets of the Tyrrhenian, due to a reversal of the hydraulic gradient [70].

Numerous works have been examined the geological framework of Korba aquifer [65, 71] from borehole lithology and water wells. It is underlain mainly by Pliocene formations and Quaternary marine platforms. To the authors' knowledge, the origin of such fresh groundwater in this very limited area is not clear but could be linked to the presence of faults affecting Miocene formations and favoring mixing (Figure 2b). Three main geological formations constitute the aquifer system (Figure 2a):

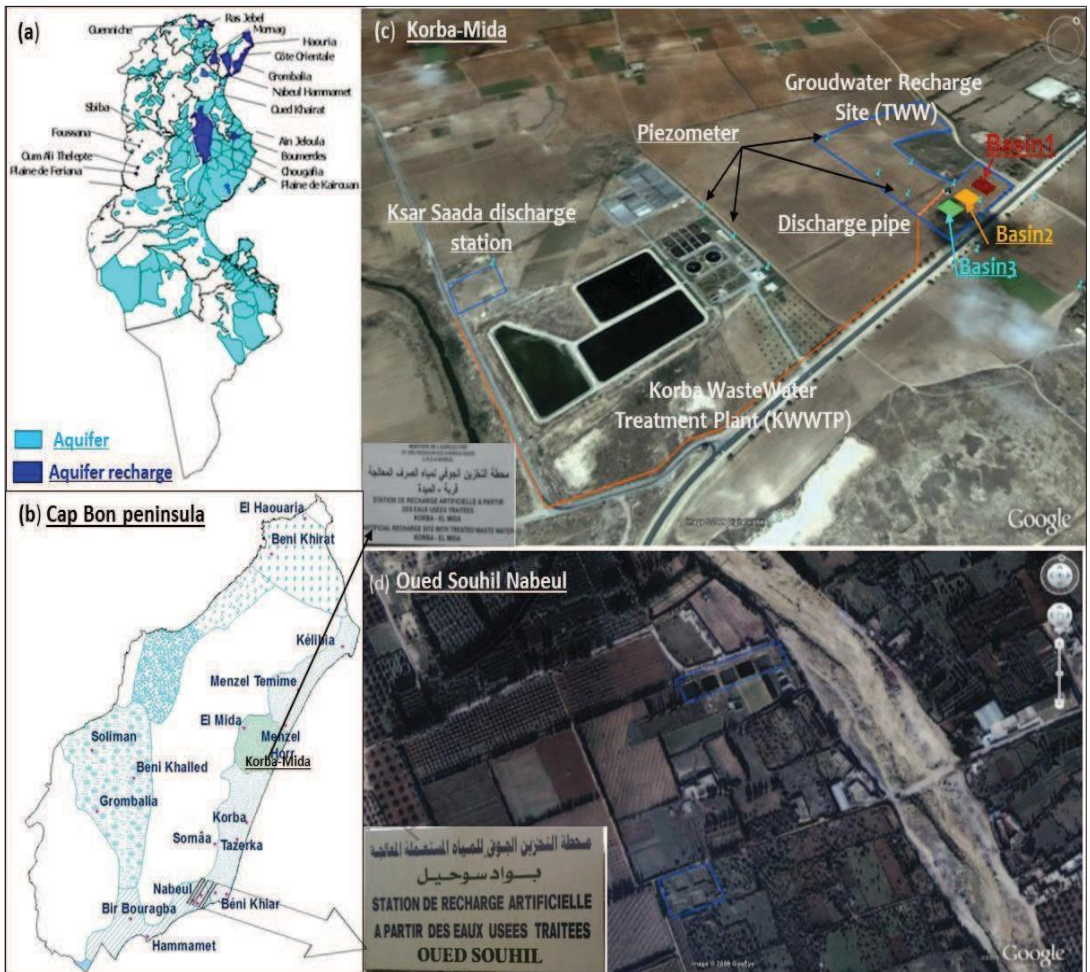


Figure 1. (a) Articial recharge of the aquifer techniques in Tunisia, (b) Location map of the Cap Bon Peninsula (c) Korba Wastewater Treatment Plant (KWWTP), and Korba –Mida ground water recharge site and piezometers (d) Recharge site in Oued souhel (Nabeul) [35].

- (i) The Middle Miocene is the base of the system and is not exposed except some relics North West of the study area. It is 2700 m thick and is made up of detrital deposits mainly from deltaic bodies. The upper part is composed of lenticular sandstones and marls with lignite levels and clay in the study area (Figure 2a) truncated by riverine systems [69] with a thickness of 500 m.
- (ii) Marine Pliocene sediments transgress unconformably over the Miocene (Figure 2a) and outcrop NW of Taffeloun. These are composed mainly of interbedded sandstone-sand-marl topped with variably clayey sandstone with a thickness varying between 15 and 160 m [65].
- (iii) Quaternary deposits in the study site contain upper Pleistocene and Holocene deposits. It can reach 150 m in the Taffeloun area. At the base, the upper Pleistocene deposits with a thickness of 30 m, also called the Tyrrhenian deposits of the last marine transgression, are made up with fossiliferous carbonate sandstones and covered by old consolidate dunes with fossiliferous limestone (Figure 2a). The further Pleistocene deposits, described as three marine platforms, show mixed carbonate, bioclastic and siliciclastic sediments [72, 73]. This facies is truncated by a carbonate sequence and aeolian oolitic deposits. The uppermost continental Pleistocene is represented by continental red deposits and a centimeter- to meter-thick calcrete extending over large areas [73, 74]. At Taffeloun, the calcrete outcrops and its thickness is 15 m (Figure 2a).

The mainly cause of salinization is the mixing between freshwater and saltwater under seawater intrusion process. It was clearly observed from the EC profile in the area investigated. All samples show a rapid increase of EC at depths of 5 m below sea-level. These depths represent the interface between freshwater and saltwater. Furthermore, brackish water has been found in the upper aquifer. This finding has been interpreted as being due to the recycling of irrigation water where the uses of fertilizers contribute to the high EC values. Seawater fractions varied from 0.24% to 54.68%. Seawater seems to contribute to the composition of groundwater. The mixing of seawater with fresh-brackish water was confirmed, using Piper diagram. Nevertheless, mixing freshwater-seawater was not conservative and accompanied by other geochemical processes. Plotted in a Piper diagram, the majority of samples are Na-Ca-Cl type.

A number of wells plot on are in the Theoretical Mixing Line (TML) indicating that mixing processes are taking place as a result of their higher SO_4^{2-} and Ca^{2+} content. The most likely source of this Sulphate is from dissolution of the small amounts of Gypsum scattered through the aquifer, present in the catchment area or the evaporation of the irrigation water excess and of the Calcium is also from the dissolution and precipitation of the Calcite. These observations suggest that dissolution of gypsum would be a potential source of both Ca^{2+} and SO_4^{2-} . Gypsum source are mainly fertilizers or precipitation by evaporation at the topsoil. The hydrogeological and hydrochemical investigations seem to be a useful tool to better understand the Korba unconfined aquifer of Cap-Bon where saltwater intrusion will eventually spread, particularly during dry periods. Consequently, both groundwater monitoring and management and groundwater conservation are essential for efficient surveillance of the saltwater intrusion.

The coastal aquifer of the Cap Bon Peninsula in Tunisia is one of the first studied examples of groundwater depletion and salinization under a semi-arid climate. The large quantities of water abstracted by the agricultural and industrial sectors since the 1960s have resulted in a spatiotemporal evolution of piezometric depletion and groundwater quality degradation due to seawater intrusion [2,3,35]. Artificial recharge of groundwater has been part of Tunisia's integrated management of water resources since the 1970s [34].

The east coast aquifer of the Cap Bon Peninsula, which lies 100 km east of Tunis, extends for about 45 km and underlies an area of approximately 475 km² (Figure 1). The region has a semi- arid climate characterized by an average annual rainfall (determined from 1964 to 2014) of 480 mm with temporal irregularities; 65% of this is concentrated between November and March. The climatic deficit (rainfall minus evapotranspiration) covers a period of about 10 months, reaching its maximum (160 mm) in July and August. The summers are hot and dry and the winters cold and wet. Average annual temperatures vary between 17 and 19 °C. Monthly evaporation is high (around 1300 mm per year) with humidity between 68% and 76%. The dry season is pronounced, which aggravates the situation given that the highest water demand usually coincides with the period of drought [2,3,35].

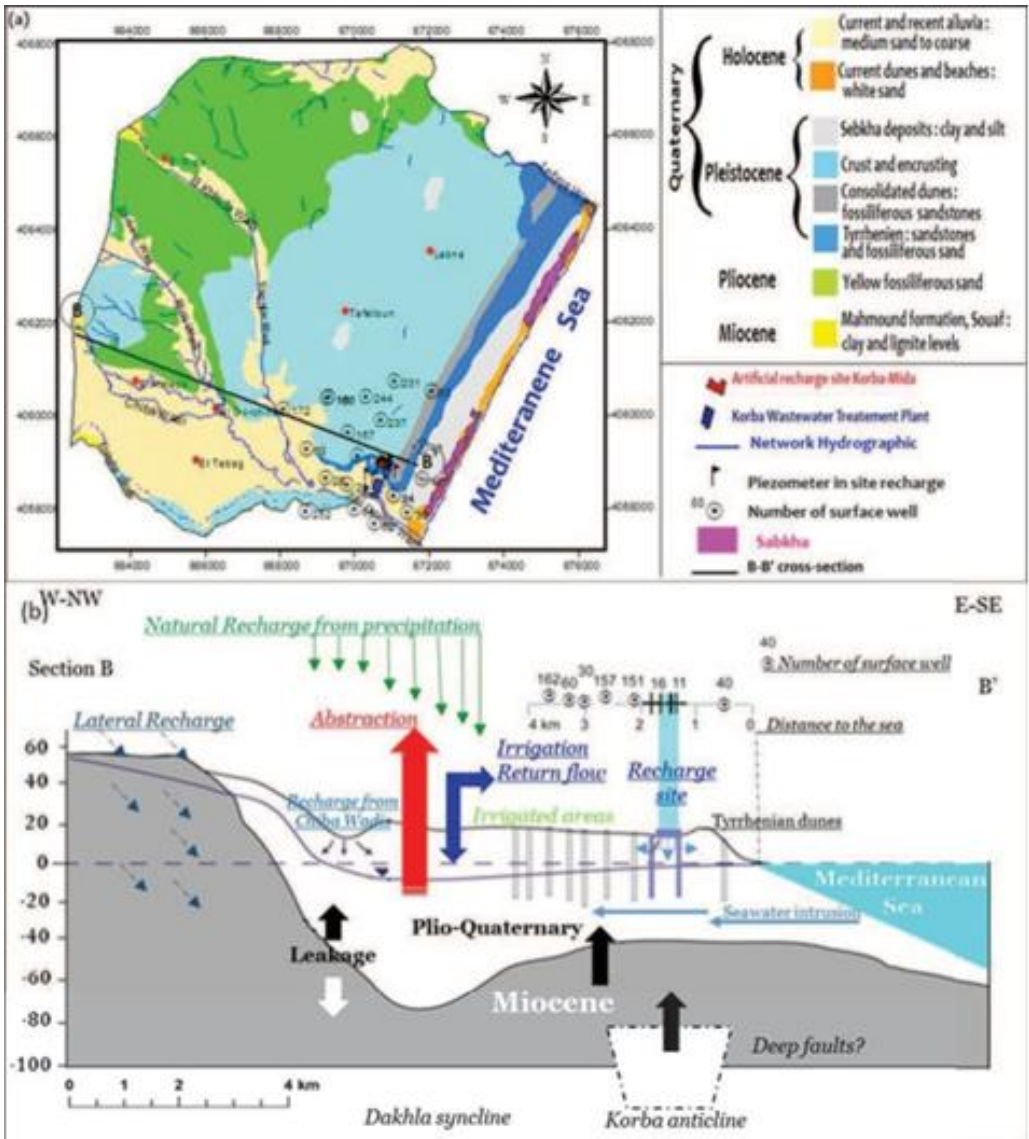


Figure 2:(a) Geological setting of the Korba-Mida basin showing piezometric network and farm-well sampling points; (b) Schematic geological cross-section (BB') through the study area showing the locations of the artificial recharge site, studied wells and piezometers [34,35].

The Korba-Mida aquifer is one of the more productive aquifers of Tunisia, but suffers heavily from water scarcity and salinization due to seawater intrusion. Its exploitation began in the 1960s, mainly for irrigation purposes. Pumped abstraction of the groundwater by 2008 was estimated at 50 Mm³, with meteoric recharge at 17 Mm³, and irrigation return flow at 16% of the annual irrigation-water percolation to the aquifer between 1993 and 2003 [2,3,35,71;75, 76, 77]. More than 9240 wells were active throughout the region in 2008, mainly pumping the shallow Plio-Quaternary aquifer; the number of wells is proportional to the number of farms [78]. The electrical conductivity values range from 2 to 3 mS/cm and the Ca-HCO₃ groundwater type dominates. However, high EC value (between 9 and 30 mS/cm) appear in the central part of the plain specially in Korba, Diar El Hojje

and Tafelloun areas which are relatively marked by the presence of shallow depth piezometric level and the Na–Ca–Cl groundwater type dominates.

The coastal aquifer of the Cap Bon Peninsula in Tunisia is one of the first studied examples of groundwater depletion and salinization under a semi-arid climate. The large quantities of water abstracted by the agricultural and industrial sectors since the 1960s have resulted in a spatiotemporal evolution of piezometric depletion and groundwater quality degradation due to seawater intrusion [71]. Artificial recharge of groundwater has been part of Tunisia's integrated management of water resources since the 1970s [8]

In 2008, a new pilot site was established in the Korba-Mida area to recharge the aquifer with treated domestic wastewater from the Korba treatment plant. The aim was a better evaluation of the mixing processes between seawater, groundwater bodies and the new recharge contributor, and of the changes due to intense groundwater withdrawal, which will be useful from a water resource management perspective aimed at controlling human interference on the Korba plain groundwater.

Boron adsorption thus concerns a variety of exchange phases such as clay minerals, metal hydroxides, organic matter and carbonates such as calcite [79, 80]. In our case, with the clay content being rather low, the non-conservative behavior of boron does not limit its applicability to the waters injected into the Korba aquifer.

The carbamazepine (CBZ) molecule is uncharged and polar, but can occasionally create weak interactions with soils and minerals [81]; the main phase that will induce adsorption interactions of the CBZ molecule is soil organic matter [82]. As such, CBZ and its metabolites are easily transported into groundwater when treated wastewater is used for irrigation or artificial aquifer recharge, especially where the organic matter content is low. It is only since 2004 that CBZ has been considered as a qualified parameter for detecting wastewater in the aquatic environment [83]. The persistence of CBZ in soils has been assessed [84] as being especially due to the organic matter content [82, 85] causing its sorption and reducing its mobility before mineralization. CBZ clearly accumulates in groundwater under the impact of artificial recharge close to the infiltration ponds. It is conservative under SAT conditions, and is not significantly degraded over two years under the aerobic conditions in the vicinity of the SAT wastewater recharge system [86]; it is even found preserved in groundwater after long flow times within the subsurface zone [87].

In 2011, the highest nitrate concentrations (seven times the potability norm) were measured in wells I62, 60, and 30, with low amounts of ammonium and dissolved manganese. Note that groundwater contamination in the region is due mainly to residual agricultural products like N-fertilizers [74]. The above wells also belong to the wealthier farms, which are known to irrigate more and use more fertilizers than the farms owning wells 157, 40 and I51. Also, at the scale of the Korba plain, vertical transfers are sufficient to contaminate the entire aquifer from the upstream areas to the coast. The concentrations thus result from a mixing with the upstream groundwater flow and the return flow in unsaturated zone [88]. The increasing salinization of the groundwater combined with agricultural practices are gradually impacting the groundwater quality. The supplies at the time were not, however, sufficient to compensate the effects of traditional water management; recent hydrogeological models have shown that the situation in the central part of the Korba aquifer was critical in 2004 due to overexploitation amounting to 135% of the recharge [2,3,35, 36,77]. Multidisciplinary approaches have been used to study the consequences of seawater intrusion into the Korba plain. For the study of the hydro chemical investigation of the coastal and insular aquifers in Tunisia [35], the authors quantified the salinization in Korba has primarily three origins (geological, seawater and the salts irrigation concentration. This facilitates a qualitative description of the state of the resource. These data also permit to describe the evolution of the seawater intrusion. Obviously, the salinity distribution in the Korba-Mida aquifer is correlated with the piezometric evolution. The vertical salinity profiles measured before artificial recharge in three piezometers allowed delineating a distribution of salt concentrations in the aquifer. The most recent studies, combining geophysics and hydrochemistry, were by [89] who quantified the inland invasion of seawater as reaching 1.5 km south of Wadi Chiba and 5 km south of Diar El Hajje. According to the salinity maps, they identified five salinity zones with the least concentrated (2 to 4 g/L salinity) in the northern coastal aquifer and the most concentrated (22 g/L salinity) north of Korba. Salinity was more pronounced along the coast, resulting in a large number of shallow wells being abandoned. Calculations of seawater mixing varied from 0 to 70%, reflecting the heterogeneity of the salinization process [74], the high values were in piezometers of the Korba and Tafelloun area. In order to provide a hydraulic barrier against seawater intrusion, the treated wastewater is infiltrated through ponds and undergoes soil aquifer treatment (SAT), to improve its quality, especially in terms of microbiology.

The Korba-Mida artificial recharge site lies 15 m above sea level (NGT) and contains three infiltration basins, of which two function simultaneously with a feed of 300 to 1400 m³/day. A first flow modeling of the artificial

recharge site of Korba has been realized to study the impact of injection of treated wastewater [35]. The results obtained by the Modflow simulations, affirm that the artificial recharge will achieve its role of barrier against the sea intrusion and will contribute to the groundwater's resources conservation of the studied area. Transmissivity at the selected recharge site is 4.10^{-3} m²/s and the storage coefficient range between 4.510^{-4} and 6.10^{-4} [35]. The aquifer's permeability is estimated between 1.610^{-3} and 2.10^{-3} m/s. Its hydraulic gradient varies between 0.2 to 1.10^{-3} m/day, and flow velocity varies from 0.2 to 0.6 m/day. Infiltration tests at the bottom of the 1.5-m-deep infiltration basin indicates infiltration flow between 5 and 60 m/day [35]. These low values are due to the presence of hard sandstone intercalated in the sand at depth and slowing down vertical transfers. The recharged waters from the Korba treatment station are infiltrated after tertiary treatment. The monthly volume of water injected into the artificial recharge site's basins has ranged from a minimum of 5,948 m³ (December 2008) to a maximum of 37,653 m³ (July 2010), with a total of about 1.151 million m³ of treated wastewater being injected into the three basins between December 2008 and March 2012.

Salinity at the recharge site decreased from 10 g/L in 2008 to 3-9 g/L in 2011 [35] here attention must be paid to the role of the fresh groundwater body whose refreshing effect must not be confounded with that of the recharge waters. A slight increase in the piezometric level was also recorded in the wells between 2009 and 2011; here the contribution of artificial recharge to the piezometric levels may be hidden because of continuous abstraction through irrigation wells in the area along with the installation of illegal surface wells, especially for agriculture.

The fresh-water quality plotted in the Piper diagram differs from that of the fresh groundwater and coastal aquifer samples and is closer to that of the deeper aquifer composition reported by Kouzana et al., [89]. The very low Ca, Mg and HCO₃ concentrations indicate a more likely equilibrium with sand, sandstone or rainwater than with the Pleistocene carbonates. The B concentration in the 2011 Piezometer I6 sample (2.77 mmol/L) is lower than that of free uncontaminated meteoric water in which the B content is <4 mmol/L [34], and its pH (6.59) is consistent with equilibrium in a siliceous aquifer [34].

The 2009 Cl concentration in Piezometer 5 (42 mmol/L) is close to that of Piezometer I6 in 2009 (40.73 mmol/L), whereas the Cl of Piezometer 5 in 2010 (2.01 mmol/L) is less than that of Piezometer I6 in 2009 and 2011 (5.9 mmol/L). Knowing that artificial recharge had higher Cl concentrations of 30, 67 and 77 mmol/L, these major variations between fresh and brackish facies are interpreted as due to the spatial displacement and temporal mixing of fresh water, Plio- Quaternary water, and recharge water under various hydrodynamic constraints such as the infiltrated recharge volume, withdrawals at close vicinity, and meteoric recharge.

The groundwater over the three years of study was generally enriched in calcium, sulfates and bicarbonates, compared with a simple mixing with seawater. All the wells and some of the piezometers showed an Na deficiency ($N_{a-react} < 0$), varying from -5 to -22 mmol/L, most commonly combined with a K deficiency (-0.1 to -1.7 mmol/L). Ca concentrations in the wells varied between 10 and 20 mmol/L with the amount of calcium reactant being strictly positive, except for Piezometer 5 in 2010 (-1.7 mmol/L). Strontium was also plotted in excess (points above the I:I line) versus Na+K. Reactant magnesium had low positive or negative values (-0.9 to 2.9 mmol/L).

Before initiation of artificial recharge by waste water treated at the Korba-Mida site, the piezometric lines in 2008 (Figure 3a) shows a decrease in hydraulic head towards the north, where ground water discharges to pumping wells and the Sidi Othmen Wadi. The effects of pumping are indicated by a depression (-2 to -7m) in the potentiometric surface in the center of the plain, likely the result of over-pumping. The effects of pumping are indicated by a depression in the potentiometric surface in the center of the plain, likely the result of over-pumping. All the piezometric level are below the sea, over the entire study recharge are (Basins I, 2 and 3) and varies between zero to -3m from the Basin3 to basin I, at the center of the basin 2 which is a depression area (Figure 3a) [35].

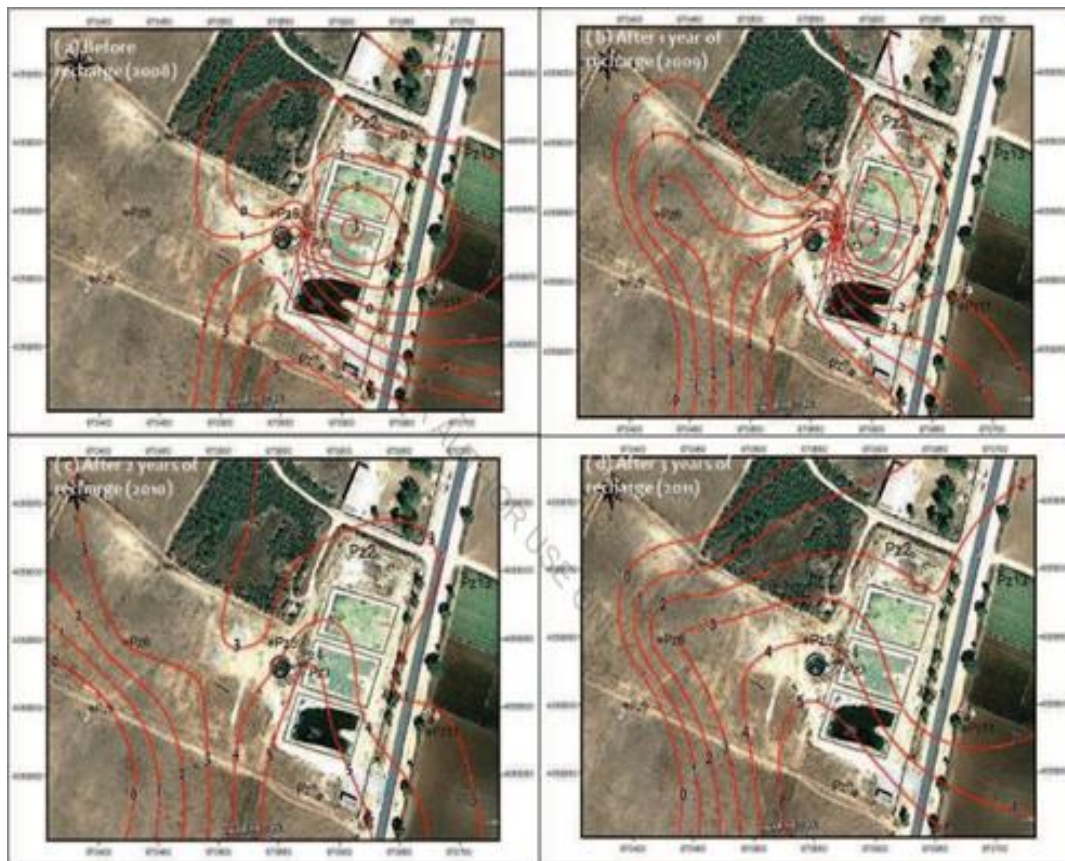


Figure 3 Piezometric evolution (m) at the Korba-Mida recharge site (m): (a) 2008 before recharge, (b) 2009 after injected 342286 m^3 of wastewater, (c) 2010 after injected 715898 m^3 of wastewater, (d) 2011 after injected 1.05 million m^3 of wastewater [35].

In 2010, after twenty-five months of artificial recharging by wastewater treated (volume cumulated 715898 m^3) the higher ground water aquifer in the left side of the recharge site at $+3 \text{ m}$ and creates a bulging piezometric at the recharge site indicating a convergence of the groundwater flow. The piezometric surface appears with positive values in the recharge site (Fig. 3c). A decrease of salinity of 1 g/L appears in all the basins I, 2 and 3 (Figure 3c) [35].

The salinity of groundwater in piezometers varied from 1 to 8 g/L (maximum in Pz_2). Ground water salinity in the aquifer increased towards the axis from *lebna Wadi* to *Chiba Wadi* (groundwater salinity 22 g/L), this resulting to the high exploitation in this region (Figure 4a) [35].

After 13 months of artificial recharging by treated wastewater, the zero piezometric curve is displaced to its original state to the recharge site area, showing that the drawdown of piezometric heads extending benefits in this region (Figure 4b). In the north of the study area, the salinity changes from a rate between 4 to 5 g/L (Pz_2 and Pz_4), there has a degradation of water quality of the aquifer (Figure 4b) [35].

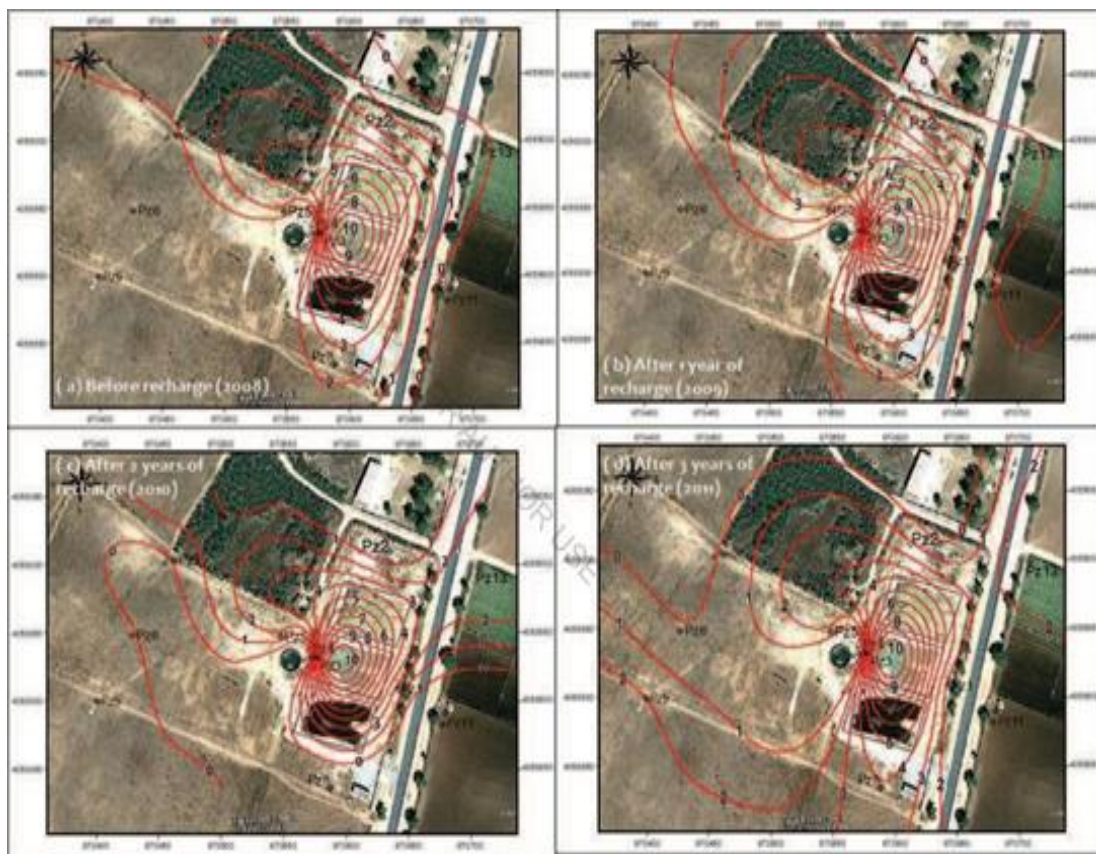


Figure 4 Salinity evolution (g/l) at the Korba-Mida recharge site (m): (a) 2008 before recharge, (b) 2009 after injected 342286 m³ of wastewater, (c) 2010 after injected 715898 m³ of wastewater, (d) 2011 after injected 1.05 Million m³ of wastewater [35]

Artificial recharge by dam water represents a valuable tool for managing water resources. The installations needed for the recharge operations are simple and relatively inexpensive. Although there are other methods of artificial recharge, the recharge by injection directly into the aquifer is the most efficient one for creating freshwater barriers against saline intrusion. However, clogging of the wells, which was quite random, and the doubts of the farmers concerning this technique might jeopardize the success of the recharge operation. Tunisia has acquired an extensive experience in the field of recharge. However, until now the recharge has remained low and discontinuous in time and space. The superimposition of a 'recharge front' due to the new 'treated wastewater' component modified the previous transitional states away from equilibrium by adding a new constraint, i.e., the development of reductive conditions with the intrusion of high amounts of organic matter and the entry of a new boron and CBZ source. Although the natural amounts of metals in the aquifer is not known, pollutant metals issued from human activities were injected into the aquifer and the oxido-reductive conditions enhanced their mobility. Salinity at the recharge site generally decreased from 10 g/L in 2004 to 2-3 g/L in 2011 [35]; here attention must be paid to the role of the fresh groundwater body whose refreshing effect must not be confounded with that of the recharge waters. A slight increase in the piezometric level was also recorded in the wells between 2009 and 2011; here the contribution of artificial recharge to the piezometric levels may be hidden because of continuous abstraction through irrigation wells in the area along with the installation of illegal surface wells, especially for agriculture. Nevertheless, further spatial and temporal studies need to assess the migration of the treated wastewaters plume, which is likely to migrate at depth until reaching the impermeable Miocene substratum.

IMPACT OF THE CORONAVIRUS (COVID-19) ON THE ENVIRONMENT AND WATER RESOURCES

On 30 December 2019, an uncommon pneumonia outbreak of unknown aetiology was reported in Wuhan, Hubei province, China [90,91,92]. Virus isolation and molecular analysis indicated a novel coronavirus (family Coronaviridae) provisionally named 2019-nCoV [92]. The International Committee on Taxonomy of Viruses (2020) later designated the virus as 'severe acute respiratory syndrome coronavirus 2' (SARSCoV-2) and the World Health Organization (WHO) officially named the associated disease coronavirus disease 2019 [90,91,92,93]. As the world rallies against the COVID-19 pandemic, millions of people in developing communities are already struggling with a public health catastrophe. Without clean water, people are constantly at risk from waterborne diseases such as cholera. Climate change is exacerbating this threat. 785 million people still do not have clean water close to home. Droughts, floods, salt water contamination, poor service management, weak governance and environmental degradation all contribute to this denial of their basic human right. Climate change is accelerating and amplifying these factors, increasing unpredictability of weather patterns and making extreme weather events and natural disasters more frequent and intense. Sewage systems are flooded with increasing frequency, contaminating water sources and the local environment. Severe droughts force people to even less safe sources of drinking water. And the likelihood of other health impacts is increased – for example in Bangladesh, where rising seas raise groundwater salinity, contributing to high blood pressure and heart disease among coastal communities [95]. It is those who have done least to contribute to man-made global warming who are carrying the greatest burden of climate change. People in the poorest countries are living on the brink of the climate crisis, and the poorest communities among them are worst affected, being least able to prepare and protect themselves and their environments. Without durable, climate-resilient water and sanitation systems, people struggle to cope. But well-managed water systems can protect access to reliable water supplies. Decent sanitation systems can resist floods. And, as we are witnessing during the COVID-19 pandemic, hygiene behaviors such as handwashing are a crucial first line of defense against the spread of disease. Our response to today's global health crisis must also address the effects of the climate emergency, and prepare us for the crises of tomorrow, with sustainable water, sanitation and hygiene services that are fit for the future. There is no clinically approved antiviral drug or vaccine available to be used against COVID-19. However, few broad-spectrum antiviral drugs have been evaluated against COVID-19 in clinical trials, resulted in clinical recovery. In the current review, we summarize and comparatively analyze the emergence and pathogenicity of COVID-19 infection and previous human coronaviruses including severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV) and middle east respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV). [92,93]. In Tunisia, The COVID-19 pandemic has severely tested a Tunisian government that only came to power in February 2020. On 16 March 2020, the authorities suspended international flights, closed land, and maritime borders, enforced a lockdown, and banned all public gatherings. These measures initially worked well, and the country had only 1,157 cases and 50 deaths as of 22 June 2020 [95]. At least with the initial lockdown, Tunisian society seemed to have endorsed the effort [96]. Tunisia has made an admirable effort to build a democratically ordered state under trying circumstances, and the government has embraced the principle of transparency in managing the current crisis. It has created a user-friendly website to share real-time information about the crisis and government policies to cope with it [97]. Poor health infrastructure, however, remains a challenge, and the country entered the pandemic with only 331 intensive care units (ICU) beds [98]. On 26 March, the Ministry of Health confirmed that it had acquired 2,000 additional ICU beds. As Tunisia is highly dependent on income from tourism and trade with Europe, its economy has suffered a serious setback. These include the creation of a support fund for SMEs, management credit procedures for companies in the tourism and hospitality sectors, and delayed tax levies for most affected businesses. In May 2020, Tunisia requested critical medical supplies from NATO through the Euro-Atlantic Disaster Response Coordination Centre, which is the Alliance's primary civil emergency response mechanism [99]. Investing in long-term water security and access to clean water and sanitation is essential for public health. Governments should prioritize three strategies:

- (i) Super-charge investment in clean water access and sanitation.; Experts believe that the capital investments required to meet global goals for water supply, sanitation and hygiene services. Funding for water and sanitation not only builds more resilient and thriving communities, but it can bolster local economies. One study in Antananarivo, Madagascar showed substantial job creation and increased wages from investments in water access, sanitation and hygiene – including everything from construction of water kiosks and laundry blocks, to fixing pipe leaks and clearing drains, to women's management of water kiosks and laundry businesses.
- (ii) Effectively manage the water resources we have so that ample clean water is available to communities. Setting water withdrawal limits for industry and agriculture and investing in measures like water-efficient irrigation can help. Water pollution in many parts of the world is also worsening – even in high-income countries effectively reducing available supplies and adding to public health problems. Investments in domestic and industrial wastewater treatment and best practices to reduce nutrient pollution from agriculture can protect water for human use. Effective long-term water management policies, alongside targeted policies that increase water affordability and public provision for all, can help prevent the impacts of future water crises on the poor.
- (iii) Massively boost investment in natural ecosystems: Wetlands, forested watersheds and floodplains are the literal wellspring of abundant clean water supplies. Evidence repeatedly shows the value and economic return of these approaches, but they still receive far less investment than traditional engineered infrastructure.

CONCLUSION

All around the world, saltwater intrusion is caused by overexploitation of fresh groundwater. Where groundwater is overexploitation from aquifers, water head gradients may cause the migration of sea water toward wells, making the freshwater unusable.

The coronavirus has now reached the pandemic stage and continues to spread globally, and hand washing is the most important precaution by health authorities to stop the virus. COVID-19 is a deadly reminder that inclusive water supply and sanitation matters for all of us.

Currently, there is no evidence about the survival of the COVID-19 virus in drinking-water or sewage. The morphology and chemical structure of the COVID-19 virus are similar to those of other surrogate human coronaviruses for which there are data about both survival in the environment and effective inactivation measures. Thus, this brief draws upon the existing evidence base and, more generally, existing WHO guidance on how to protect against viruses in sewage and drinking-water

Groundwater constitutes an important component of many water resource systems, supplying water for domestic use, for industry, and for agriculture. Management of a groundwater system, an aquifer, artificial recharge and their rates, and control conditions at aquifer boundaries. The quantity and quality problems cannot be separated. In many parts of the world, with the increased withdrawal of groundwater, often beyond permissible limits, the quality of groundwater has been continuously deteriorating, causing much concern to both suppliers and users. In recent years, in addition to general groundwater quality aspects, public attention has been focused on groundwater contamination by hazardous industrial wastes, by leachate from landfills, by oil spills, and by agricultural activities such as the use of fertilizers, pesticides, and herbicides, and by radioactive waste in repositories located in deep geological formations, to mention some of the most acute contamination sources. In many parts of semi-arid areas, ground water development has already reached a critical stage, resulting in acute scarcity of the resource. Over-development of the groundwater resources results in declining groundwater levels, shortage in water supply, intrusion of saline water in coastal areas and increased pumping lifts necessitating deepening of groundwater abstraction structures. These have serious implications on the environment and the socio-economic conditions of the populace.

Saltwater intrusion is the induced flow of seawater into freshwater aquifers primarily caused by groundwater development near the coast. Where groundwater is being pumped from aquifers that are in hydraulic connection with the sea, induced gradients may cause the migration of salt water from the sea toward a well, making the freshwater well unusable.

The protection of groundwater resources has emerged in recent years as a high priority topic on the agenda of many countries. In responding to the growing concern over deteriorating groundwater quality, many countries are developing a comprehensive regulatory framework for the management of subsurface water resources with management referring to both quantity and quality aspects. Within this framework, groundwater models are rapidly coming to play a central role in the development of protection and rehabilitation strategies. These models provide forecasts of the future state of the groundwater aquifer systems and/or the unsaturated zone in response to proposed management initiatives. For example, models will predict the effects of implementing a proposed management scheme on water levels and on the transport and fate of pollutants. The models are now used in the formulation of policies and regulations, the issuing of permits, design of monitoring and data collection systems, and the development of enforcement actions.

In many parts of semi-arid areas, water pollution from agricultural sources is plagued with uncertainty of various proveniences. Groundwater quality issues in arid and semi-arid lands are very complicated. Human activities result in the groundwater resources being polluted, aquifers being incorrectly exploited and utilized, and abstraction facilities being vandalized. Groundwater development has already reached a critical stage, resulting in acute scarcity of the resource. Overdevelopment of groundwater resources results in declining groundwater levels, shortage in water supply, intrusion of saline water in coastal areas, and increased pumping lifts necessitating deepening of groundwater abstraction structures. These have serious implications on the environment and socioeconomic conditions of the populace. the primary groundwater management issue in many semi-arid countries today is pollution. this may derive from a point source, perhaps a leaking solvent store at a factory, or it may be diffuse, such as the threat posed by the use of agricultural fertilizers and pesticides. The key to understanding the transport of a pollutant from the ground surface or near surface into an aquifer is an understanding of recharge. Land zonation of different classes of aquifer vulnerability is a valuable tool for management and planning.

The "Tunisia's experience on Artificial Recharge of Groundwater" is the first in the semi-arid areas and has updated information on various aspects of investigation techniques for selection of sites, planning and design of artificial recharge structures, their economic evaluation, monitoring and technical auditing of schemes and issues related to operation and maintenance of these structures. Tunisia has an experience in artificial recharge of aquifers since the early 1950s. This is devised to increase groundwater resources while regulating surface flow, providing underground storage of this water and avoiding its becoming lost in the sea or in salt depressions, or its evaporation in dams.

References

- [1] UNWATER, WHO and UNICEF launch updated estimates for water, sanitation and hygiene. 20 June 2019. Available from <https://www.unwater.org/news/who-and-unicef-launch-updated-estimates-water-sanitation-and-hygiene>
- [2] Gaaloul N. Water Resources and Climate Change from History to Covid-19 Vaccines in the MENA Regions (Middle East and North Africa). LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 368 p. ISBN: 978-620-4-71658-9. <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/978-620-4-71658-9>
- [3] Gaaloul N. Seawater Intrusion into Coastal Aquifer and Climate Change: Impact of the coronavirus (covid-19) on the environment and water resources). Editions Universitaires Européennes, 2020. 229 p. ISBN: 978-613-9-57238-0. <https://www.amazon.fr/Seawater-Intrusion-Coastal-Aquifer-Climate/dp/613957238X>
- [4] Margat, J. De la surexploitation des nappes souterraines [On aquifer overexploitation]. Eaux Souterraines et Approvisionnement en Eau de la France. Ed BRGM, Orléans, 1977, p. 393-408
- [5] Custodio, E. (2000) The complex concept of overexploited aquifer. Papeles de la Fundacion Marcelino Botin, Madrid, 2000, p.1-45
- [6] Bouwer, H. 1978. Groundwater Hydrology. McGraw-Hill Book Company: United State of America, 1978, 480 p.
- [7] Todd, A.D., (1980) Groundwater hydrology. Second edition. John Wiley and Sons, 1980, 552 p. Doi:10.1002/gj.3350170407
- [8] Gaaloul, N. Eslamian, S. Artificial Recharge Experiences in Semiarid Areas, in Handbook of Engineering Hydrology, Ch. 2, Vol. 3: Environmental Hydrology and Water Management, Ed. By Eslamian, S., Taylor and Francis, CRC Group, USA, 2014, p. 17-49.
- [9] Charbeneau, R., 2000. Groundwater hydraulics and pollutant transport. Prentice Hall. 2000, 593 p. DOI:/10.1115/1.1451232
- [10] World Resources Institute. World Resources: A Guide to the Global Environment, a joint publication by The World Resources Institute, The United Nations Environment Program, The United Nations Development Program, and The World Bank, Oxford University Press, New York, 1998.
- [11] Afsin M. Hydrochemical evolution and water quality along the groundwater flow path in Snadikli Plain, Afyon, Turkey. Environmental Earth Sciences, 1997: 31(3):221-230. DOI:10.1007/s002540050183
- [12] Stuyfzand, P. J. Pattern in groundwater chemistry resulting from groundwater flow. Hydrogeology Journal, 1999. 7, 1527. DOI: 10.1007/s100400050177
- [13] WHYMAP. Groundwater Resources Map of Africa, BGR, Hannover, Germany and UNESCO, Paris. 2008. Available from <http://www.whymap.org/>
- [14] Matthes, G. The Properties of Groundwater. Wiley: New York, 1982, 498 pp.
- [15] Kumar, M., Ramanathan, A.L., Rao, M.S. and Kumar, B. Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. Journal of Environmental Geology, 2006:53, 553-574. DOI: 10.1007/s00254-006-0275-4
- [16] Domenico, P.A. Concepts and Models in Groundwater Hydrology. McGraw-Hill: New York, 1972, 416 p.
- [17] Wallick, E.L. and Toth, J. Methods of regional groundwater flow analysis with suggestions for the use of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. In Proceedings of an Advisory Group Meeting of the International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 1976, 37-64.
- [18] Toth, J. The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater. "In Proceeding of the first Canadian/ American conference on hydrogeology", Banff, Alta, June, 1984.
- [19] Saether, O.M., and De Caritat, P. Geochemical Processes, Weathering and Groundwater Recharge in Catchments. A.A. Balkema: Rotterdam, 1997, 400 p.
- [20] Martinez, D.E., and Bocanegra, E.M. 2002. Hydrochemistry and cation exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. Hydrogeology Journal, 2002, 10, p. 393-408.
- [21] Ikeda, K. Chemical evolution of groundwater quality in the southern foot of Mount Fuji. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 1989: 40, 331-404.
- [22] Pulido-Bosh, A., Tahiri, A. and Vallejos, A. Hydrogeochemical characteristics of processes in the Temara aquifer in Northwestern Morocco. Journal of Water, Air, and Soil Pollution, 1999: 114, 323-337.
- [23] Kumar, M., Kumari, K., Singh, U.K. and Ramanathan, A.L. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: conventional graphical and multivariate statistical approach. Journal of Environmental Geology, 2009: 57, 873-884. DOI: 10.1007/s00254-008-1367-0
- [24] Johnson, T. Battling Seawater Intrusion in the Central & West Coast Basins. Technical Bulletin. Lakewood: The Water Replenishment District, 2007.

- [25] Bear J. Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, New York 1972. DOI: 10.1097/00010694-197508000-00022
- [26] Bear J, Cheng AHD. Modeling groundwater flow and contaminant transport. Springer, New York. 2010. DOI:10.1007/978-1-4020-6682-5
- [27] Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods Practices. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London, 1999, 625 p.
- [28] Dorman, F. Crisis, Economics and the Emperor's Clothes. 1st ed. Lulu Internet Publisher. 2013.
- [29] Masciopinto, C. Simulation of coastal groundwater remediation: The case of Nardò fractured aquifer in Southern Italy. *Environ. Model. Softw.* 2006; 21, 85–97.
- [30] Mjemah, I.C.; Van Camp, M.; Walraevens, K. Groundwater exploitation and hydraulic parameter estimation for a Quaternary aquifer in Dar-es-Salaam, Tanzania. *J. Afr. Earth Sci.* 2009, 55, 134–146.
- [31] Van Camp, M.; Mtoni, Y.E.; Mjemah, I.C.; Bakundukize, C.; Walraevens, K. Investigating seawater intrusion due to groundwater pumping with schematic model simulations: The example of the Dar Es Salaam coastal aquifer in Tanzania. *J. Afr. Earth Sci.* 2014; 96, 71–78
- [32] Jones, B.F.; Vengosh, A.; Rosenthal, E.; Yechieli, Y. Geochemical investigation of groundwater quality. In *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices*; Springer: Kluwer, The Netherlands, 1999, pp. 51–71.
- [33] Meybeck, M.; Vorosmarty, C.; Schultze, R.; Becker, A. Conclusions: Scaling Relative Responses of Terrestrial Aquatic Systems to Global Changes. In *Vegetation, Water, Humans and the Climate*; Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P.A., Gash, J.H.C., Bravo de Guenni, L., Meybeck, M., Pielke, R.A., Vorosmarty, C.J., Hutjes, R.W.A., Lutkemeier, S., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003, pp. 455–464.
- [34] Cary L., Casanova J., Gaaloul N., Guerrot C., Combining boron isotopes and carbamazepine to trace sewage in salinized groundwater: a case study in Cap Bon, Tunisia. *Applied chemistry*, 2013; 34, p.126-139. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292713000693>
- [35] Gaaloul N., Rechargeable groundwater : Artificial recharge of groundwater by treated wastewater / Des nappes phréatiques rechargeables : Recharge artificielle des eaux souterraines par les eaux usées traitées. ISBN- 13:978-613-8-41471-I; ISBN-10:6138414713EAN:978613841471I; 2019,132 p.
- [36] Kerrou, J., Renard, P., Tarhouni, J. Status of the Korba groundwater resources (Tunisia): observations and three-dimensional modelling of seawater intrusion. *Hydrogeol.* 2010; 18 (5), 1173–1190.
- [37] Paniconi C., Khlaifi I., Lecca G., Giacomelli A., Tarhouni J. A modelling study of seawater intrusion in the Korba Coastal Plain, Tunisia. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2001; 26 (4) , p. 345-351.
- [38] Zghibi, A, Zouhri, L., Tarhouni, J., Kouzana, L. Groundwater mineralisation processes in Mediterranean semi-arid systems (Cap-Bon, North east of Tunisia): hydrogeological and geochemical approaches. *Hydrological Processes*. 2012; 27 (22), 3227-3239. DOI:10.1002/hyp.9456
- [39] Djabri L, Laouar R, Hani A, Mania J, Mudry J. The origin of water salinity on the Annaba coast (NE Algeria). *Proceedings of symposium HSO2a held during IUGG2003 at Sapporo; 2003 July; IAHS. Publ. No 280; pp. 229-35.*
- [40] Bouderbala A . Groundwater salinization in semi-arid zones: an example from Nador plain (Tipaza, Algeria). *Environ Earth Sci.* 2015;73:5479–5496. DOI:10.1007/s12665-508014-3801-9
- [41] Imerzoukenc, S.; Walraevens, K.; Feyen, J. Salinization of the coastal and eastern zones of the alluvial and unconfined aquifer of the Mitdja Plain (Algeria). In *Proceedings of the 13th SaltWater Intrusion Meeting, Cagliari, Italy, 5–4 June 1994*; p. 163–175.
- [42] Chaoui Alia, A.; El Halimi, N.; Walraevens, K.; Beeuwsaert, E.; De Breuck, W. Investigation de la Salinisation de la Plaine de Bou-Areg (Maroc Nord-Oriental); *Freshwater Contamination; International Association of Hydrological Sciences—IAHS Publication: London, UK, 1997 : 243, p. 211–220.*
- [43] El Halimi, N.; Chaoui Alia, A.; Beeuwsaert, E.; Walraevens, K. Hydrogeological and Geophysical Investigation for Characterizing the Groundwater Reservoir in Saïdia Plain (north-eastern Morocco). In *Development of Water Resource Management Tools for Problems of Seawater Intrusion and Contamination of Fresh-Water Resources in Coastal Aquifers*; Walraevens, K., Ed.; Ghent University: Ghent, Belgium, 2000. p. 67–75, ISBN 90- 76878-01-3.
- [44] El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Benavente, J. & Kaufmann, O. Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied Geochemistry*, 2009; 24, 16-31.
- [45] Sadeg SA, Karahanoglu N. Numerical assessment of seawater intrusion in the Tripoli region, Libya. *Environ Geol*; 2008; 40: 1151-68.
- [46] Sherif, M. The Nile Delta aquifer in Egypt. In: Bear, J., Cheng, A., Sorek, S., Ouazar, D., and Herrera, A. (eds), *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices*, Book Series: Theory and Application of Transport in Porous Media, Kluwer Academic Publishers: The Netherlands, 1999, 14, 559-590.
- [47] Sefelnasr, A., Sherif, M. Impacts of Seawater Rise on Seawater Intrusion in the Nile Delta Aquifer, Egypt. *Groundwater*, 2014; 52, 2, p.364-376. DOI:10.1111/gwat.12058
- [48] Gomaa S.M., Hassan T.M., Helal E. Assessment of seawater intrusion under different pumping scenarios in Moghra aquifer, Egypt. *Science of the Total Environment*, 2021, 781, DOI :10.1016/j.scitotenv.2021.146710
- [49] Choudhury K, Saha DK, Chakraborty P. Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain. *Journal*

- of Appl. Geophysics ,2001:46:189–200
- [50] Batayneh, AT. Use of electrical resistivity methods for detecting subsurface fresh and saline water and delineating their interfacial configuration: a case study of the eastern Dead Sea coastal aquifers. *Jordan Hydrog.*2006: 14:1277–1283
- [51] Beni-Akhy, R. Etude des impacts anthropiques sur les eaux souterraines du Sahel oriental tunisien : caractérisation hydrogéologique, modélisation mathématique et cartographie de la vulnérabilité' environnementale. PhD thesis, Tunis University, Tunis, Tunisia. 1998
- [52] Amri, R. (1992) Note hydrogéologique de la nappe de Teboulba, rapport interne du Commissariat régional au développement agricole, Monastir, Tunisie.1992, 15 p.
- [53] Besbes, M. Premier essai d'alimentation artificielle par puits de la nappe de Teboulba, rapport interne de la Direction Générale des Ressources en Eaux, Tunis, Tunisie, 1971.28 p.
- [54] Maalel, F. Note hydrogéologique sur la recharge artificielle de la nappe de Teboulba, rapport interne du Commissariat régional au développement agricole, Monastir, Tunisie.1998.10 p.
- [55] Rekaya, M. and Amri, R. Note sur les possibilités de recharge artificielle des nappes de Teboulba et Moknine à partir des eaux usées de la Direction Générale des Ressources en Eaux, Tunisie.1992. 20 p.
- [56] Bourri, S. and Ben Dhia, H. A thirty-year artificial recharge experiment in a coastal aquifer in an arid zone: The Teboulba aquifer system (Tunisian Sahel). *Comptes Rendus. Géoscience*,2010 : 342(I), 60–74.
- [57] Kloppmann, W., Chikurel, H., Picot, G., Guttman, J., Pettenati, M., Aharoni, A., Guerrot, C., Millot, R., Gaus, I., and Wintgens, T. B and Li isotopes as intrinsic tracers for injection tests in aquifer storage and recovery systems. *Applied Geochemistry*, 2009 : 24, I214–I223.
- [58] Calo, A. Etude pédologique du périmètre de Oued Souhil.1964. 10p.art. no. 146710.2021
- [59] Rekaya, M. Expérimentation pilote de recharge artificielle à partir des eaux usées traitées. Cas de la nappe de l'Oued Souhil (Nabeul).1986, 20 p.
- [60] Plata Bedmar, A. and Rekaya, M. Application des techniques nucléaires aux études de recharge artificielle d'un aquifère côtier en Tunisie. Report.1987. 20 p.
- [61] Kallali, H. and Yoshida, M. Soil and subsoil characterization of Souhil Wadi (Nabeul) pilot plant for wastewater infiltration-percolation. In: *Proceedings of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management (EPCOWMP2002)*, Tunis, Tunisia;
- [62] Bouwer, H. Role of groundwater recharge in treatment and storage of water reuse. *Water Science and Technology*, 1991: 24(9), 295–302.
- [63] Brissaud, F. and Salgot, M. Infiltration percolation as a tertiary treatment. *Hydrotop 94*, Marseille, April I2– I5, 1994:Vol. II, pp. 39I–398.
- [64] Rekaya, M. and Brissaud, F. Recharge de la nappe de l'Oued Souhil par des effluents secondaires. XXI° J. de l'Hydraulique: Les eaux souterraines et la gestion des eaux. Sophia Antipolis, 29–31 January, 1991, II. 4. I-II. 4.8.
- [65] Ben Salem, H. Contribution l'étude de la Géologie du Cap Bon: Stratigraphie, tectonique et sédimentologie. Thèse 3e cycle Université de Tunis-II, Tunis, Tunisie ?1992, 203 p
- [66] Plata Bedmar, A. and Rekaya, M. Use of Nuclear Techniques for Artificial Recharge Studies of a Coastal Aquifer in Tunisia. IAEA, Vienna, Austria.1988.15p.
- [67] Koussis, AD., Georgopoulou, E., Kotronarou, A., Mazi, K., Restrepo, P., Destouni, G., Prieto, C., Rodriguez, JJ., Rodriguez-Mirasol, J., Cordero, T., Ioannou, C., Georgiou, A., Schwartz, J. and Zacharias, I. Cost efficient management of coastal aquifers via recharge with treated wastewater and desalination of brackish groundwater: application to the Akrotiri basin and aquifer, Cyprus. *Hydrology Science Journal*, 2010: 55(7):I234– I245, 2010.
- [68] Abbès A., Étude géologique et géophysique du Miocène de la Dakhla (Cap-Bon, Tunisie nord-orientale) : application à la prospection des couches lignitifères (Thèse 3e cycle). Faculté des sciences et techniques, Université de Franche-Comté, Besançon, France (1983), p. 199 p
- [69] Abbès A., Polak, M. La formation Saouaf dans les synclinaux de la Dakhla (Cap Bon) et de Saouaf (Tunisie nord-orientale).Notes Serv. Geol. Tunis., 46 (1981), pp. 99-111
- [70] Gharsalli R., Zouaghi T., Soussi M., Chebbi R., Khomsi S., Bedir M. Seismic sequence stratigraphy of Miocene deposits related to eustatic, tectonic and climatic events, Cap Bon Peninsula, northeastern Tunisia.2013: *Comptes Rendus - Geoscience*, 345 (9-10), pp. 401-417. DOI: 10.1016/j.crte.2013.07.003
- [71] Ennabli, M. Etude hydrogéologique des aquifères Nord Est de la Tunisie par une gestion intégrée des ressources en eau, Université de Nice. Thèse de doctorat d'état, p. 400.
- [72] Temani, R., Gaaloul, N., Jedoui, Y., Razgallah, S.. The Upper Pleistocene deposits of Cap Bon (North - Eastern Tunisia): Bio-sedimentology and spatio-temporal evolution. *International journal of tropical geology, geography and ecology* Tome 1-2, 2008:pp. 83-90.
- [73] Elmejdoub, N., Jedoui, Y.. Pleistocene raised marine deposits of the Cap Bon peninsula (N-E Tunisia): Records of sea-level highstands, climatic changes and coastal uplift. *Geomorphology* 2009 : 112, 179-189.
- [74] Ben Hamouda, M.F., Tarhouni, J., Leduc, C., Zouari, K.. Understanding the origin of salinization of the Plio-quaternary eastern coastal aquifer of Cap Bon (Tunisia) using geochemical and isotope investigations. *Environmental Earth Sciences*,2011 : 63, 889-901.
- [75] Paniconi, C., Khlaifi, I., Lecca, G., Giacomelli, A., Tarhouni, J.. Modeling and Analysis of Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Eastern Cap-Bon, Tunisia. *Transp. Porous Media*,2001 : 43, 3-28.

- [76] Paniconi, C., Khlaifi, I., Lecca, G., Giacomelli, A., Tarhouni, J., 2001. A modelling study of seawater intrusion in the Korba coastal plain, Tunisia. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2001: 26, 345-351.
- [77] Kerrou, J., Renard, P., Tarhouni, J.. Status of the Korba groundwater resources (Tunisia): observations and three-dimensional modelling of seawater intrusion. *Hydrogeology Journal*, 2010: 18, 1173-1190.
- [78] Gaaloul, N.; Pliakas, F.; Kallioras, A.; Schuth, C.; Marinos, P. Simulation of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Forty Five Years exploitation in an Eastern Coast Aquifer in NE Tunisia. *Open Hydrol. J.*, 2012: 6, 31– 44.
- [79] Goldberg, S., Forster, H.S.. Boron sorption on calcareous soils and reference calcites. *Soil Sci.* 1991:152, 304-310.
- [80] Majidi, A., Rahnamaie, R., Hassani, A., Malakouti, M.J. Adsorption and desorption processes of boron in calcareous soils. *Chemosphere*, 2010: 80, 733-739.
- [81] Scheytt, T., Mersmann, P., Lindstädt, R., Heberer, T. Determination of sorption coefficients of pharmaceutically active substances carbamazepine, diclofenac, and ibuprofen, in sandy sediments. *Chemosphere*, 2005: 60, 245-253.
- [82] Maoz, A. and Chefetz, B. Sorption of the pharmaceuticals carbamazepine and naproxen to dissolved organic matter: Role of structural fractions. *Water Research*, 2010: 44, 981-989.
- [83] Clara, M., Strenn, B., Kreuzinger, N. Carbamazepine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behaviour of Carbamazepine in wastewater treatment and during groundwater infiltration. *Water Research*, 2004: 38, 947-954.
- [84] Maeng, S.K., Sharma, S.K., Lekkerkerker-Teunissen, K., Amy, G.L. Occurrence and fate of bulk organic matter and pharmaceutically active compounds in managed aquifer recharge: A review. *Water Research*, 2011: 45, 3015-3033.
- [85] Chefetz, B., Mualem, T., and Ben-Ari, J. Sorption and mobility of pharmaceutical compounds in soil irrigated with reclaimed wastewater. *Chemosphere*, 2008: 73, 1335-1343.
- [86] Arye, G., Dror, I., Berkowitz, B.. Fate and transport of carbamazepine in soil aquifer treatment (SAT) infiltration basin soils. *Chemosphere*, 2011: 82, 244-252.
- [87] Kreuziner, N., Clara, M., Strenn, B., Vogel, B.. Investigation on the behavior of selected pharmaceuticals in the groundwater after infiltration of treated wastewater. *Water Sci. Technol.* 2004:50, 221-228.
- [88] Slama, F. Field experimentation and modelling of salt transfer in Korba coastal plain: Impact of seawater intrusion and irrigation practices, *Hydrogeology*. University of Neuchâtel, INAT, 2010.p. 128 p.
- [89] Kouzana, L., Ben mammou, A., Gaaloul, N. Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales*, 2009 : Tome I, pp. 57–70.
- [90] World Health Organization (WHO). (2019). Report of the WHO-China joint mission on coronavirus disease 2019 (COVID-19). Available at: <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-jointmission-on-covid-19-final-report.pdf>
- [91] World Health Organization (WHO). Coronavirus disease (COVID-2019) situation reports. Available at: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>
- [92] World Health Organization. Coronavirus disease 2019 (covid-19): situation report, 51. Geneva: World Health Organization; 2020. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331475>
- [93] World Health Organization [Internet]. The push for a covid-19 vaccine. Geneva. [cited 2020 Dec 23]. Available from: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/covid-19-vaccines>
- [94] Huang C, Wang Y, Li X, Ren L, Zhao J, Hu Y, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet* 2020;395:497–506. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140673620301835>
- [95] World Vision, “ COVID-19 surge in Northwest Syria as cases multiply by 14 times in one month”, October 2020, <https://reliefweb.int/report/syrian-arab-republic/covid-19-surge-northwest-syria-cases-multiply-14-times-one-month>
- [96] Dworkin, Anthony and Tarek Megerisi. “North Africa”, Council on Foreign Relations, 19 March 2020, https://www.cfr.eu/article/commentary_infected_the_impact_of_the_coronavirus_on_the_middle_east_and_no.
- [97] Mezran, Karim, et al., “The coronavirus crisis highlights the unique challenges of North African countries”, Atlantic Council, 30 March 2020, <https://atlanticcouncil.org/blogs/menasource/the-coronavirus-crisis-highlights-the-unique-challenges-of-north-african-countries/>
- [98] Guetat, M. Tunisia and coronavirus: the reality of a poor governance, ISPI Dossier, 12 April 2020, <https://www.ispionline.it/en/publicazione/mena-region-vs-covid-19-one-challenge-common-strategies-25649>
- [99] NATO. Tunisia requests international assistance in their response to COVID-19”, 6 May 2020, https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_175635.htm?

The impact of instantaneous spring floods on the extreme functioning of undeveloped basins: case of the Ououmana catchment (March 2010 flood) (Oum Er-Rbia Basin, Morocco)

Lahlou Nadia¹

¹ Department of Geography. University Mohamed V, Faculty of Letters and Human Sciences, Rabat – Morocco Laboratory “Society, Territories, History and Heritage

Abstract

Difficult to prevent floods from happening, but it is possible to prepare for it. The knowledge of flood phenomena, their genesis and their operation are the starting point in risk management. In Morocco, the floods are characterized by the rising of water, which constantly causes more and more damage. Many, areas have been deeply affected by this type of hazard, causing particularly significant damage.

It is located in the great basin of Oum Er-Rbia (second largest basin on the scale of Morocco). The Ououmana catchment covers an area of 173 km², it is part of the friable Triassic formations of the eastern depression of the plateau central foot of the middle Atlas. It is equipped with hydrometric station, Taghzout downstream the catchment. The altitudes are between 2235 m and 681m.

This basin is subject to harsh climatic conditions marked by high precipitation aggressively concentrated and irregular in time and space. This paper aims to characterize the instantaneous floods recorded over the 1971-2015 period, with a focus on the spring flood of 2010. The main objective is to understand the course and behaviour of this flood. To do this, we propose a range of hydrological methods for the study and analysis of this important flood.

Key Words: instantaneous floods; undeveloped basins; instantaneous flows; statistical analysis; Ououmana catchment (basin the Oum Er-Rbia – Morocco).

L'impact des crues printanières instantanées sur le fonctionnement extrême des bassins non aménagés : cas du bassin versant de la Ououmana (crue de mars 2010) (Bassin de l'Oum Er-Rbia, Maroc)

Résumé

Difficile d'empêcher les inondations de se produire, mais il est possible de s'y préparer. La connaissance des phénomènes d'inondation, leur genèse et leur fonctionnement sont le point de départ de la gestion des risques. Au Maroc, les inondations se caractérisent par la montée des eaux, qui cause sans cesse de plus en plus de dégâts. De nombreuses zones ont été profondément touchées par ce type d'aléa, causant des dégâts particulièrement importants.

Il est situé dans le grand bassin de l'Oum Er-Rbia (deuxième plus grand bassin à l'échelle du Maroc). Le bassin versant de la Ououmana couvre une superficie de 173 km², il fait partie des formations friables triasiques de la dépression orientale du pied central du plateau du moyen Atlas. Il est équipé d'une station hydrométrique, Taghzout en aval du bassin versant. Les altitudes sont comprises entre 2235 m et 681 m.

Ce bassin est soumis à des conditions climatiques rudes marquées par de fortes précipitations agressivement concentrées et irrégulières dans le temps et dans l'espace. Cet article vise à caractériser les crues instantanées enregistrées sur la période 1971-2015, avec un focus sur la crue printanière de 2010. L'objectif principal est de comprendre le cours et le comportement de cette crue. Pour ce faire, nous proposons une gamme de méthodes hydrologiques pour l'étude et l'analyse de cette importante crue

Mots clés : crues instantanées; bassins non aménagés; débits instantanés ; analyses statistiques; Bassin versant de la Ououmana (bassin de l'Oum Er-Rbia – Maroc).

¹ Corresponding author: nadia.lahlou@usms.ma

INTRODUCTION

Climate change has a more pronounced impact on arid and semi-arid regions like that of Morocco. And has a considerable influence on the hydrological cycle. They also increase the risks associated with extreme events such as low water and floods.

The hydrological extremes, pose a big problem to the citizens. If the lack of water leads to the appearance of low water and the degradation of water quality, the rainfall intensity causes floods sometimes with a catastrophic character.

In Morocco, the floods are characterized by the rising of water, which constantly causes more and more damage. Many, areas have been deeply affected by this type of hazard, causing particularly significant damage.

PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE

The Oum Er-Rbia Basin is one of the largest basins in the kingdom. It covers an area of 35,000 km² with a length of 550 km. The Oued Oum Er-Rbia originates in the Middle Atlas at an altitude of 2,400 m and crosses the Middle Atlas chain, the Tadla plain and the coastal Meseta, before jumping into the Atlantic Ocean, 16 km from the city of El Jadida. It is fed by several permanent and seasonal.

It is located in the great basin of Oum Er-Rbia (second largest basin on the scale of Morocco). The Ouauamana catchment covers an area of 173 km², it is part of the friable Triassic formations of the eastern depression of the plateau central foot of the middle Atlas. It is equipped with hydrometric station, Taghzout downstream the catchment. The altitudes are between 2235 m and 681m. Ce bassin est soumis à des conditions climatiques contraignantes marquées par de fortes précipitations pluviométriques agressives concentrées et irrégulières dans le temps et dans l'espace.

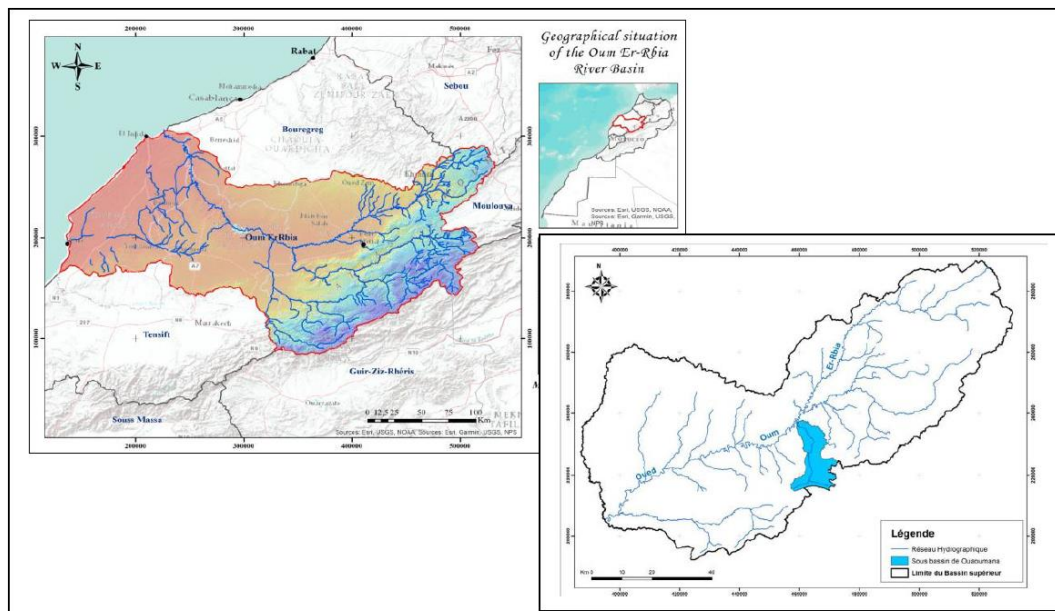


Fig. 1. Geographic location of the study area

Climatic and hydrological framework:

Development of rainfall characteristics:

The analysis of the annual precipitation of the Taghzout station for the period 1971-2015 shows a temporal irregularity characterized by high variability (Fig.1)

If we consider dry years below average and wet years above average, we notice that the 46 years of the chronicle studied, 27 years are dry and 19 years are wet.

With annual average precipitation of 513 mm in the basin. The difference between the wet year (973 mm in 1996) and the dry year (195 mm in 1981) is constant at 778 mm.

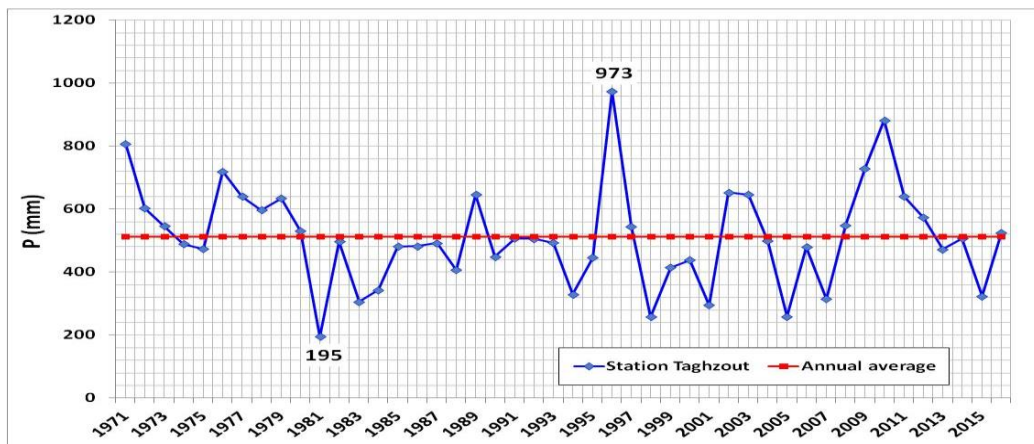


Figure n ° 1: Annual precipitation at Taghzout station compared to the average (1971-2015)

The precipitation recorded during this period brings back important years, such as 1981 - 1998 - 2005 with low precipitation and the years 1996 - 2010 with high precipitation (fig. 1 and tab.1).

Station	Moyenne	Min		Max		Dry year	Wet year
		P (mm)	Année	P (mm)	Année		
Taghzout	513	195	1981	973	1996	27	19

Table 1: statistical characteristics of Taghzout station

The analysis of the maximum monthly rainfall for the period 1971-2015, (fig.2), shows monthly rainfall variability. The rainfall maximums are recorded in autumn and winter, the difference between the maximum and the minimum, reaches 268 mm, which clearly shows the rainfall contrast between winter and summer.

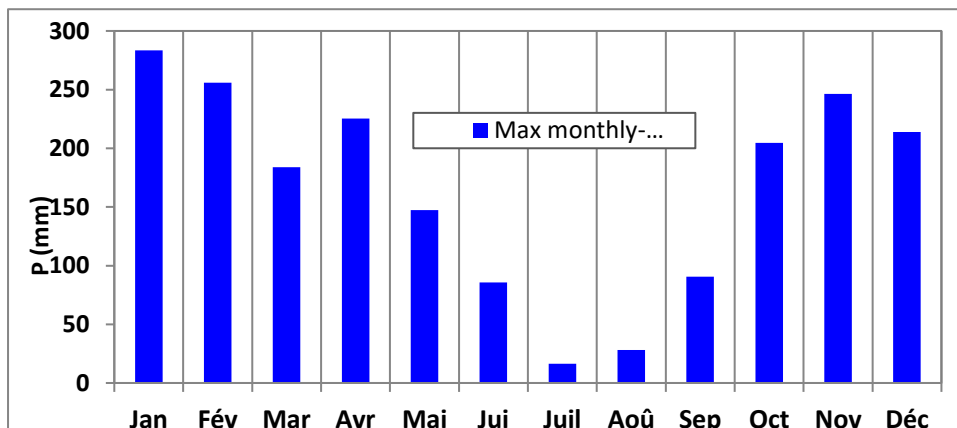


Figure n° 2: Monthly rainfall maximums for the stations Taghzout (1971-2015)

Monthly flow coefficient of wadi Ououmana (1971-2015):

The hydrological pattern of Wadi Ououmana is influenced by periods of high water and periods of low water and this in relation to climatological inputs.

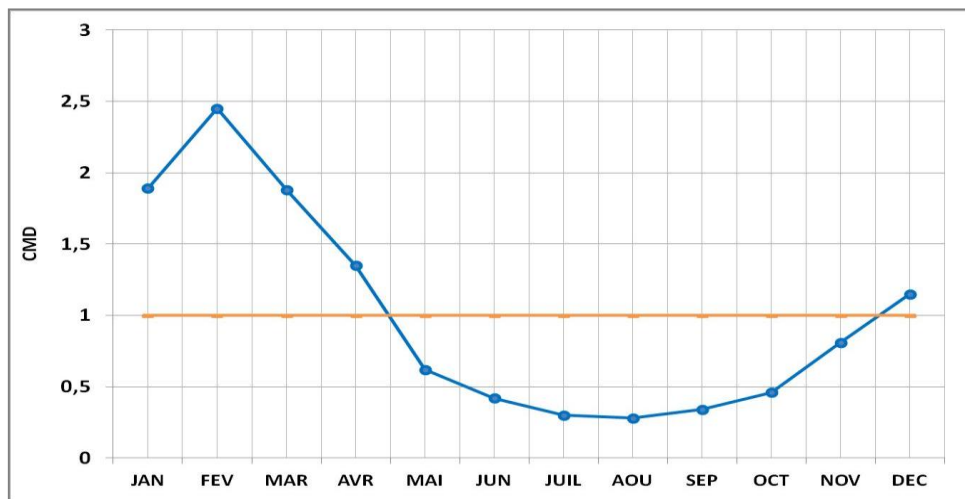


Figure n 3: The monthly flow coefficient of Oued Ououmana, Taghzout station (1971-2015)

- High water season:

It starts from the month of December to the month of April (5 months). The highest level (2,4 m³/s) is recorded during the month of February. This means that the period of the high waters lasts all the season of the winter and part of the spring and this is due to rainfall contribution, the feeding by the sources and by the snow child.

- The low water season:

It characterized by the months that have been below average, from me in May to November, so its spring and fall. The lowest flow is recorded during the months of July and August (0,33 m³/s). And this is due to the deficiencies of rainfall intakes, in addition to evaporation.

MATERIALS AND METHODS :

This method is an essential element for extreme hydrological studies (floods), as it allows a good knowledge of this phenomenon and leads to an overall scientific assessment of the state of the streams during these hydrological phases. Complemented by the hydrological bases that have been developed in parallel, we want it to be widely applied to understand the behaviour of rivers in critical situations.

In order to understand the phenomenon of floods, the statistical analysis of hydrometric data constitutes the main tools of this work on the data of instantaneous flows provided by the Taghzout station downstream (1971-2015).

EXTRACTION OF FLOODS FROM INSTANTANEOUS

Instantaneous spring floods extraction is a hydrological approach to identifying flash floods in a basin. It is an approach which aims, therefore, to give an overview of the significant losses to the flow regime in a basin during a phase of rising waters, to quantify their effects and to assess and represent the resulting hydrological floods.

In terms of application, several criteria were chosen for the extraction of the flood from instantaneous references each year:

- Largest Instantaneous peak flow in the year.
- Type of flood (fast/slow).
- Flood shape (simple/complex).
- Duration of flood (long/short).

Flood classification is a method that results in an indication of the hydrological status of a watershed system by referring to different flood events. This method is an aid in the identification of the hydrological behaviour of a river during the high water phases.

RESULTS AND DISCUSSION:

Extraction of instantaneous spring floods references of the Ouauoumana catchment (1975-2015)

In terms of results, there were 45 instantaneous reference floods for the period (1975-2015).

Years	Periods	Q peak (m3/s)	Years	Periods	Q peak (m3/s)
1975	30/3/1975 00:00	15,6	1995	3/10/1995 16:00	97,2
	3/4/1975 00:00		4/10/1995 00:00		
1976	30/10/1976 00:00	17	1996	31/1/1996 00:00	170
	1/11/1976 20:00		2/2/1996 00:00		
1977	23/1/1977 20:00	37,1	1997	2/1/1997 20:00	64,5
	27/1/1977 00:00		4/1/1997 08:00		
	11/2/1978 08:00		3/2/1998 00:00		
1978	14/2/1978 12:00	36,7	1998	6/2/1998 10:00	35,5
	13/2/1979 00:00		9/7/1999 20:00		
1979	18/2/1979 08:00	66	1999	10/7/1999 16:00	79,7
	12/11/1980 12:00		26/12/2000 13:00		
1980	15/11/1980 00:00	23,9	2000	28/12/2000 12:00	52
	1/4/1981 20:00		23/12/2001 13:00		
1981	4/4/1981 12:00	7,6	2001	24/12/2001 00:00	20,8
	4/6/1982 17:00		25/11/2002 00:00		
1982	5/6/1982 02:00	41,5	2002	26/11/2002 07:00	208,4
	25/2/1983 16:00		9/12/2003 02:00		
1983	26/2/1983 00:00	6,5	2003	12/12/2003 00:00	139
	17/6/1984 15:00		3/5/2004 13:30		
1984	20/6/1984 00:00	182	2004	4/5/2004 23:00	33,6
	7/1/1985 08:30		4/3/2005 00:00		
1985	8/1/1985 08:00	22,4	2005	6/3/2005 23:00	19
	7/3/1986 20:00		26/2/2006 16:00		
1986	11/3/1986 08:00	33,9	2006	28/2/2006 12:00	49,5
	11/2/1987 00:00		20/4/2007 20:00		
1987	13/2/1987 20:00	114,0	2007	22/4/2007 08:00	13
	24/2/1988 00:00		28/9/2008 16:00		
1988	29/2/1988 23:59	65,9	2008	29/9/2008 10:00	83,5
	20/8/1989 16:00		1/2/2009 16:00		
1989	21/8/1989 08:00	79,6	2009	2/2/2009 16:00	58,9
	8/12/1990 20:00		9/3/2010 00:00		
1990	9/12/1990 20:00	58,0	2010	9/3/2010 18:00	227,7
	26/3/1991 16:00		18/5/2011 08:00		
1991	4/4/1991 08:00	33,5	2011	19/5/2011 08:00	4,6
	7/4/1992 12:00		17/11/2012 21:30		
1992	10/4/1992 12:00	35,3	2012	20/11/2012 08:00	55
	14/11/1993 20:00		4/4/2013 22:00		
1993	18/11/1993 00:00	74,5	2013	8/4/2013 08:00	16,3
	28/2/1994 12:00		9/11/2014 00:00		
1994	6/3/1994 00:00	27,2	2014	10/11/2014 08:00	10
			31/5/2015 16:00		
			2015	1/6/2015 08:00	8,9

Table 2. Instantaneous spring floods of station the Taghzout (1971-2015)

It is noted that the maximum instantaneous peak flow at Taghzout can reach 227.7 m3/s recorded in March 2010, as for the absolute minimum of these maximums, it can drop to 4.6 m3/s in 2011.

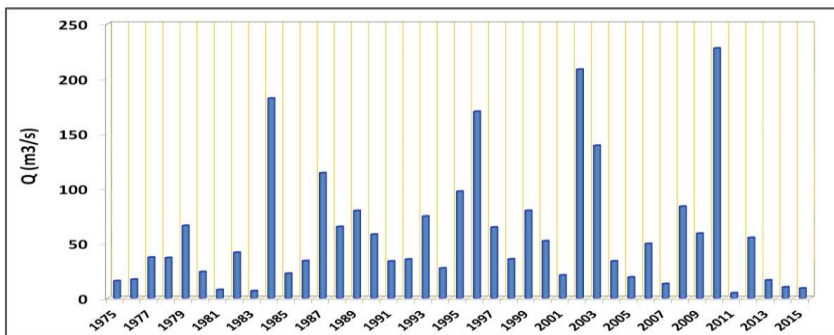
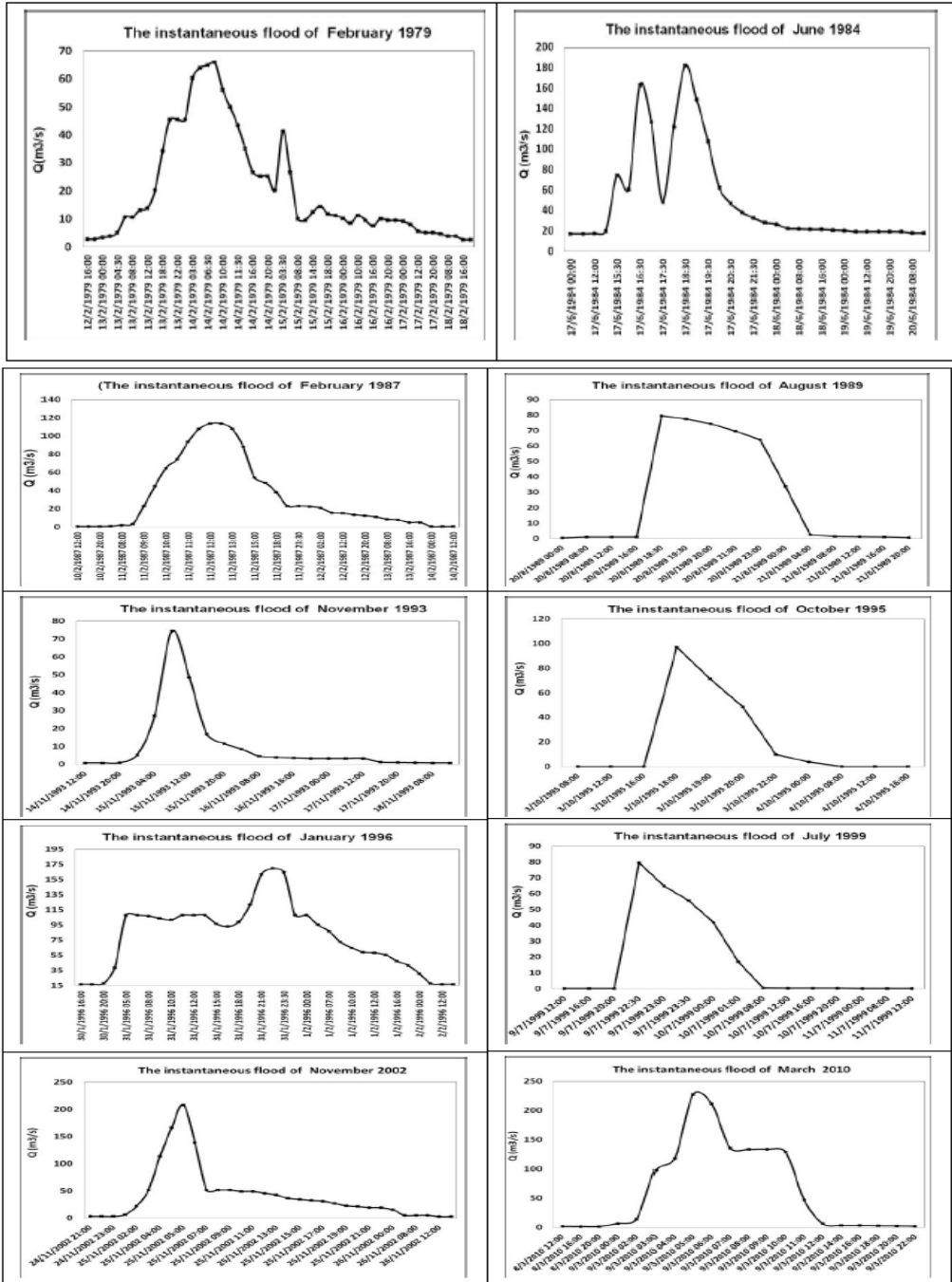


Figure n 4: Instantaneous spring floods of station the Taghzout (1971-2015)

Among the questions that occupy us:

- How do the floods (complex or simple) go ?
- What are their speeds?
- What are their effects on the river?

So we propose to answer these questions the analysis of some events that occurred in the Ououmana basin.



Instantaneous flood présentation recorded in 2010 :

The following figure represents all the instantaneous floods recorded in the Ououamana basin during the year 2010.

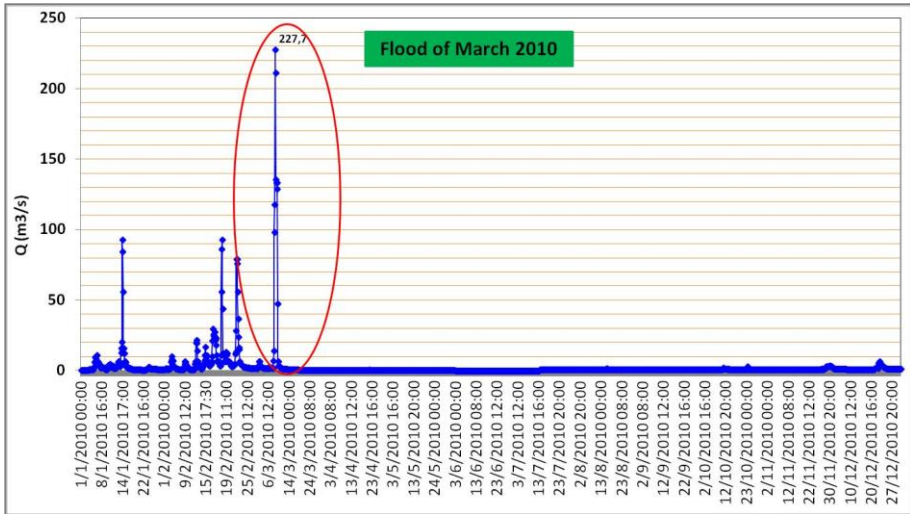


Fig. n 5: Flood presentation studied from the instant Q of 2010 at the Taghzout station

The March 2010 spring flood with a peak flow of 227.7, it is considered the largest instantaneous flood in the statistical series (1971-2015)

2010 Spring Flood Analysis :

The analysis is related to the 2010 instantaneous reference flood, recorded by the Tahzout station downstream from the Ououamana basin.

Year	Station	Périodes	Q peak (m3/s)
2010	Taghzout	9/3/2010 00:00	227,7
		9/3/2010 18:00	

Table 3: in the Taghzout station in m³/s

The flood of March 2010, takes place during the high water period between 00:00 pm and 18:00 pm on March 9. That is for 18 hours.

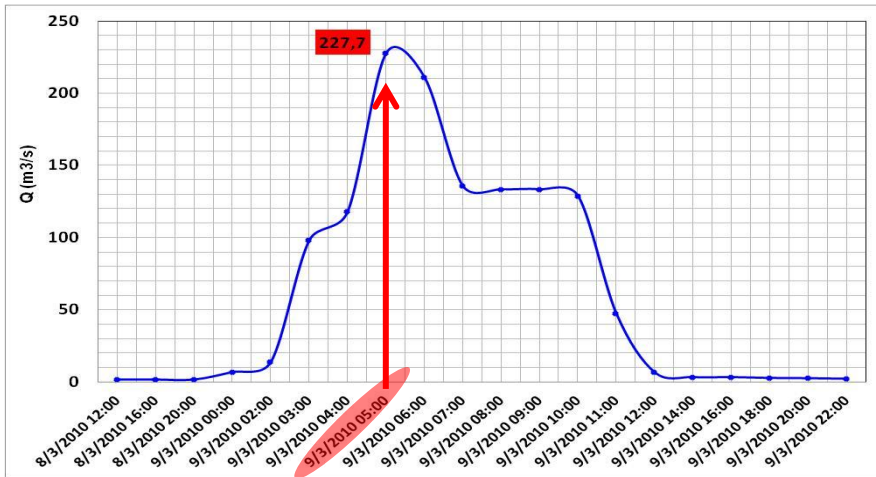


Fig. 6: Hydrograph of the 2010 spring flood at Taghzoute station

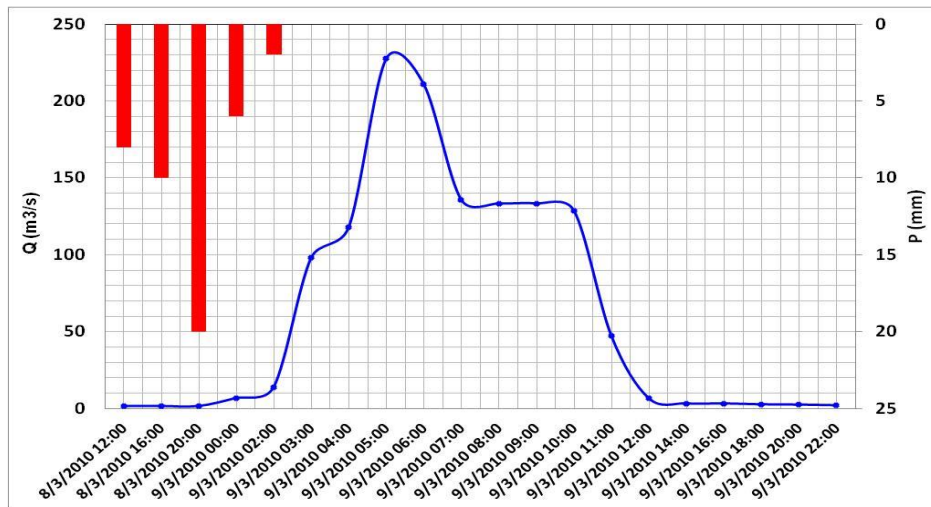
Flood characteristics studied:

The characteristics of the 2010 instantaneous flood are presented in table n° 3, It is noted that the 2010 flood at a simple shape, with 1 peak. Also characterized by its short duration, 18 hours in total, 5 hours uphill and 13 hours downhill. So the decline was slow compared to the flood.

Table 4: Flood characteristics of March 2010 in the Taghzout station in m3/s

Yer	Station	Q peak (m3/s)	Date of climb	Duratio n (H)	Rise time (H)	Descent time (H)	Form	Type
2010	Taghzout	227,7	9/3/2010 05:00	18 h	5 h	13 h	simple	short and fast

The flood of March 2010 follows the 44.7 mm of precipitation of 08/03/2010 with 1 peak resulting from a short rainy episode.



ig. 6: The rain flow relationship

The peak of 9/03/2010 05:00 corresponds to the heavy rains of 08/03/2010 in total 44.7 mm. This precipitation generated a rapid rise of the waters that lasted 5 hours. The decline was also rapid downstream of the basin, as it took only 13 hours.

So the instantaneous floods are due to violent localized rains, whose evolution is sudden and of short duration, and whose human and socio-economic impacts are heavy consequences.



Source: Field work 2016

Photos n°: impacts of flooding on the watercourse

Depending on the way the water circulates, the solid materials transported by the watercourse, namely pebbles, trees, as well as human waste, accentuate the overflow phenomenon. From a qualitative point of view, the accumulation of these ice jams causes a stagnation of the water resulting in a degradation of the quality and a real threat to the aquatic life.

CONCLUSIONS

Most of the reference floods in the Ououmana basin appear in winter and spring; they have a complex shape, characterized by several peaks and last for a long time. Simple floods are short and fast.

The instantaneous floods are difficult to predict. They follow violent localized rains whose evolution is sudden and of short duration, and whose impacts on the Man and socio-economic are heavy consequences. What is thought of large flash floods can occur in any month of the year.

Therefore it is important to understand that the 2010 flood analysis, considered being the most representative instantaneous reference flood in a basin heavily influenced by anthropogenic actions, to determine the flood processes and its spread from upstream to downstream, to understand their genesis, determine their mechanism and their impact on the environment.

References

- [1] Atallah M., Hazzab A., Korichi K., Hafiane M. (2010). Simulation of the flood waves propagation by the finite elements method: case study of the Wadi Mekka in Algeria. *International Net-Work Environment Management Conflicts*, pp 44-51
- [2] El Ghachi M. (2007). la seille: un système fluvial anthropisé (Lorraine, France) Tome 1. Thèse de 3eme cycle, Université Paul Verlaine de METZ, France .344 p.
- [3] Estupina B.V. (2004). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclairs – application à de petits bassins du sud de la France. Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, France. P
- [4] Gharbi M , Soualmia A. (2012). Simulations des crues éclair au niveau de la haute vallée de la Medjerda (Boussalem). Deuxième congrès tunisien de mécanique COTUME 2012, Sousse, Tunisie, pp 81-86.
- [5] Ghanem M. (2002). Contribution à une typologie topo-climatique en montagne méditerranéenne : application au haut bassin versant de l'oued Lakhdar : cas de la vallée des Ait Bou Guemmez (Haut Atlas central, Maroc). *Revue de géographie du Maroc*, N°1-2 vol 25, pp 61- 84.
- [6] Gaume E. (2002). Eléments d'analyse sur les crues éclairs. Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique. 359 pages.
- [7] Gille E. (2010). Spatialisation et modélisation des caractères de l'écoulement: une approche géographique de l'hydrologie. Dossier pour l'habilitation à diriger des recherches. Université Paris 7, 90 p.
- [8] Bravard J-P. (1998). Le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique ". U. F. R de géographie, Université de Paris-Sorbonne, n° 599, pp. 3-15.
- [9] Crouser P., Corbette S., Seegrist D-W. (1966). Methods of measuring and analyzing rainfall Interception by grass. *International Association of Scientific Hydrology, Bulletin*, 11:2, pp. 110-120.
- [10] Lallemeni C. (2018). Hydrométrie, mesure les débits d'une rivière, pour quoi et comment ? ISSN 2555-0950, pp 1-28.
- [11] Lahlou N., EL Ghachi M., EL Khalki Y. (2019). Hydrological extremes in ungauged basins :Creation of rating curve and extraction of torrential floods (2016-2018) Case of the watershed of Oued Kheniss (Oum Er-Rbia Basin, Morocco). *International Journal of Environment & Water* ISSN 2052- 3408, Vol 8, Issue 1, 2019.
- [12] Lahlou N., El Ghachi M. (2015). Le fonctionnement hydrologique dans les bassins montagnards non aménagés dans le Haut Atlas Central : cas du bassin d'ASSIF GHZZAF (Région Béni Mellal-Khenifra). *Revue du département histoire et géographie*, N2, ISSN :2421-9274.
- [13] Laborde J.P. (2000). Eléments d'hydrologie de surface. Tome 2 : critique et analyse statistique des données hydrologiques. Ecole .Nat .Sup .de Géol .Appli/Nat .polytech de Lorraine, 95 p.

Monitoring of cork oak (*Quercus suber*) post-fire recovery using Sentinel 2A data: a case study in Taksebt forest, Zekri, Algeria

Dib Tassadit¹, Gaaloul Nouredine², Krouchi Fazia¹

¹ Laboratoire de production amélioration et protection des végétaux et des denrées alimentaires, Faculty of Biological and Agronomic Sciences, Mouloud Mammeri University, BP 17 RP, 15000, Tizi-Ouzou, Algeria.

² University of Carthage, National Research Institute of Rural Engineering, Water and Forestry, LR 16INRGREF02, LR Valorization of Unconventional Waters, 17 rue Hédi Karray, BP no. 10 Ariana 2080, Tunisia

Abstract

In the mediterranean region a significant decline in the vitality of vegetation has been observed in the last decades, resulting in high forest losses for several species. In Algeria, the increase in species mortality has been attributed to several factors, mainly forest fires resulting from an increase in human activities, temperature and long periods of drought. To monitor the impact of fire events on tree recovery, a rapid and efficient method is required. In this paper, an approach based on the change detection is proposed to evaluate a post-fire cork oak forest recovery using sentinel 2A images. A highly burned area was selected and its recovery rates were monitored throughout three different post-fire periods. Three months after the fire event, several patterns were recognized and differentiated in the area with an important forest recovery rate of 11.41%.

Key Words: *Quercus suber*, Forest fire, Post-fire recovery, Sentinel 2A, Taksebt, Tizi-Ouzou, Algeria.

Suivi du recouvrement du chêne liège (*Quercus suber*) après incendie à l'aide des données Sentinel 2A : Cas de la suberaie de Taksebt (Zekri, Tizi-Ouzou, Algérie)

Résumé

Dans la région méditerranéenne, un déclin significatif de la vitalité de la végétation a été observé au cours des dernières décennies, entraînant une forte perte de forêt pour plusieurs espèces. En Algérie, l'augmentation de la mortalité des espèces a été attribuée à plusieurs facteurs, principalement les feux de forêt résultant d'une augmentation des activités humaines, de la température et de longues périodes de sécheresse. Pour surveiller l'impact des incendies sur le recouvrement forestier, une méthode rapide et efficace est nécessaire. Dans cet article, une approche basée sur la détection des changements est proposée pour évaluer l'état d'une forêt de chêne-liège après un incendie à l'aide d'images sentinel 2A. Une zone fortement brûlée a été sélectionnée et ses taux de recouvrement ont été suivis pendant trois périodes post-incendie. Trois mois après l'incendie, plusieurs changements ont été reconnus et différenciés dans la zone avec un taux de recouvrement important du couvert végétal de l'ordre de 11,41%.

Mots clés : *Quercus suber*, Feu de forêt, Recouvrement post incendie, Sentinel 2A, Taksebt, Tizi-Ouzou, Algérie

¹ Corresponding author: dib.tassadit@yahoo.com

INTRODUCTION

Cork oak ecosystem is one of the most representative ecosystems in the western mediterranean basin (Catty et al. 2012), both in Europe and in North Africa, covering more than 2.3 million hectares (Cowling et al., 2005). *Quercus suber* plays an important ecological, economic and social role in several mediterranean countries (Pereira and Fonseca, 2003; Bulgalho et al. 2011). Due to their uniqueness these ecosystems are recognized as habitats of conservation value, supporting a large variety of animal, plant and fungi species, including many endemics (Bernal, 1999). Cork is a renewable natural resource constituting a valuable and versatile raw material for industry since it is used for an important variety of products (Pereira, 2011). It is the second most important marketable non-wood forest products in the mediterranean regions (Silva and Catty, 2006).

Forests are a valuable and natural resource, however, despite of their value, several factors, ranging from diseases, drought, human activities, and air pollution to forest fires influence the vegetation condition and health (Costa et al., 2010). Pausas (1997) and Silva and Catty (2006) considered wildfires as one of the major causes of *Quercus suber* forests decline in mediterranean regions with nearly half a million hectare burned every year (FAO, 2011), and more than 50 000 fires sweep through a million hectares of the forests (Dimitrakopoulos and Mitsopoulos, 2006). Further more fire risk is likely to increase in the future due to climate change (Pinol et al., 1998; Pausas et al., 2004). Most of the mediterranean broadleaved species have the capacity of resprouting after disturbances. Indeed, after severe fires, cork oak is considered the only species with stem and crown resprouting ability through epicormic buds (Pausas et al. 2009; Moreira et al. 2009). In previous researches, the study of the post-fire cork oak state was based on field survey and measurements, but, nowadays, the introduction of remote sensing technology offers an alternative approach to detect and quantify forest vegetation, composition, regeneration and association structure (Wolter and Townsend, 2011; Wolter et al., 2012). Remote sensing has great potential for monitoring disturbances; it can provide valuable information at different spatiotemporal scales, due to its inherently spatial nature, repeatability and ability to observe large extents at fine scales (Frolking et al., 2009; Lasaponara et al., 2022). Several platforms such as Landsat have been proved to be effective in vegetation monitoring studies (Souza et al., 2005; Asner, 2009). Recently, Sentinel 2A data, launched in 2015, has been widely used in post-fire recovery studies. One of the most common techniques of spatiotemporal monitoring is the supervised classification. This methodology allows highlighting land cover changes and temporal trends.

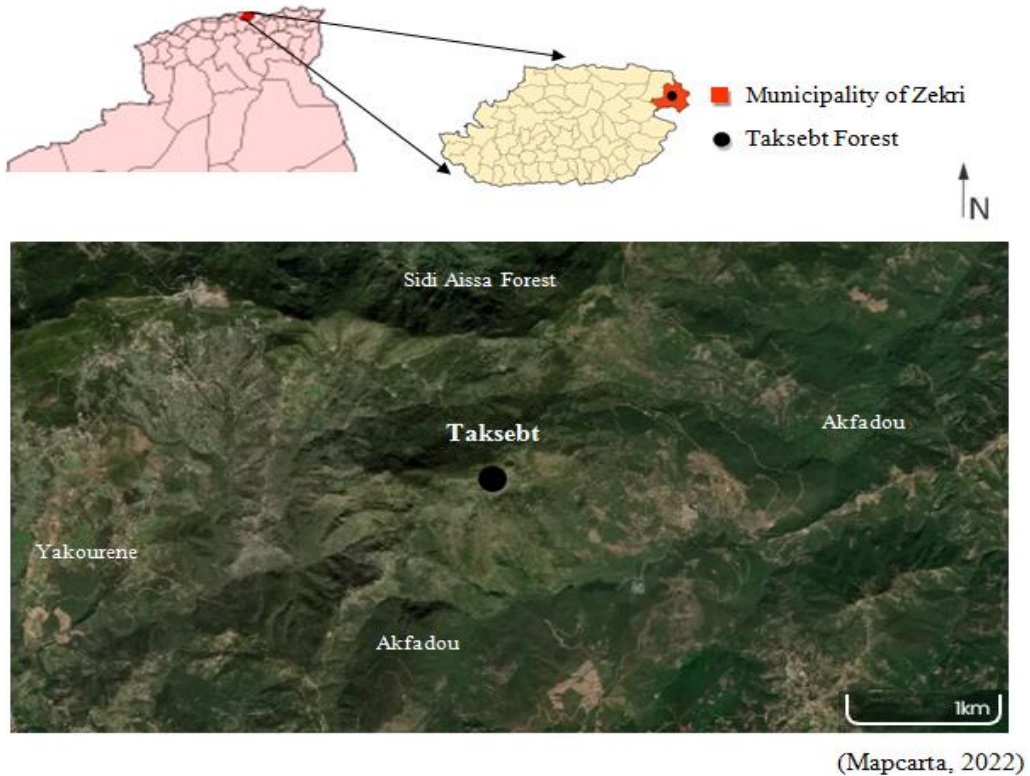
In this paper, we aim to monitor a cork oak post-fire vegetation recovery, from 15 days to one year after the fire, in Taksebt *Quercus suber* forest located in Zekri, northern Algeria. For this purpose, a supervised classification was used based on the sentinel 2A imagery. Therefore, the main objectives of this proposed research are: (1) to monitor the post-fire recovery in the study area, (2) to highlight the potential of using Sentinel 2A imagery for the post-fire monitoring studies, (3) and to provide information to forest services, about the forest states for future actions.

MATERIAL AND METHODS

Study area

The study was undertaken in one of the northern Algerian cork oak forests, namely Taksebt (36° 45' 19.28"N and 4° 38' 9.49"E), which is situated in the western side of Zekri area, belonging administratively to Tizi-Ouzou forest service. The area is surrounded by several forests; Sidi Aissa from the north, Yakourene from the west and the Akfadou Mountain from both the east and the south (Figure 1). Taksebt lies over an area of 1127ha (BNEF, 1989), with an altitude varying from 850 to 900m and a considerable slopes ranging from 20 to 70%. It has a rocky topography and a brown, humid forest soil with an important layer of humus (Lapie, 1909). The bioclimate is considered temperate, humid, situated in the thermo-mediterranean stage with a mean annual temperature of 18°C. *Quercus suber* is the dominant species in Taksebt (more than 80 % of the total area), while the remaining area is composed of a mix between cork oak and zeen oak. The understory is mainly represented by *Cytisus triflorus*, *Daphne gnidium*, *Arbutus unedo*, *Crataegus monogyna*, *Ampelodesmos mauritanicus* and *Erica arborea*.

Most of the northern Algerian forests were subjected to an important forest fires during the summer of 2021. Taksebt underwent a very important fire in August 10th, 2021, which caused severe damages to the trees and a reduction of the understory biomass.



(Mapcarta, 2022)

Figure 1: location of the study area (Taksebt forest, Zekri, Tizi-Ouzou, Algeria)

Data processing

Sentinel-2A satellite is a Copernicus mission, one of the various missions of the European Union’s earth observation program. It was launched on June 2015, offering coverage with a high spatiotemporal resolution (temporal resolution of 5 days and a spatial resolution of up to 10m) (Navarro et al., 2007) and a swath width of 270 km. Sentinel images have 13 spectral bands, from the visible and the near infrared to the short waves infrared (Table 1).

Table 1: Wavelengths and spatial resolution of Sentinel 2A bands (Liorens et al., 2021).

Band	Name	Central wavelength (nm)	Spatial Resolution (m)
1	Coastal aerosol	443	60
2	Blue	490	10
3	Green	560	10
4	Red	665	10
5	Red-edge 1	705	20
6	Red-edge 2	740	20
7	Red-edge 3	783	20
8	Near Infrared	842	10
8a	NIR narrow	865	20
9	Water vapor	945	60
10	Cirrus	1375	60
11	SWIR 1	1610	20
12	SWIR 2	2190	20

For the present study, three Sentinel 2A images, corrected atmospherically, radiometrically and geometrically, with less than 5% of clouds coverage, were downloaded (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>), for 3 different dates, from some days to a year after the forest fires of Taksebt area (Table 2).

Table 2: Acquisition dates of the sentinel 2A images.

Image	Date of acquisition
1	27 th August, 2021
2	16 th October, 2022
3	11 th September, 2022

On a Geographical Information System software, the free open access software QGIS, a supervised classification was performed using images of the spatial resolution of 10m. The methodology was applied on a subset of images, clipped using the geographical coordinates of the study area under a coordinate system WGS84/UTM zone 31N. The three images were classified into 3 classes according to their spectral signatures and the land occupations (Table 3).

Table 3: Description of the post-fire land cover classes in Taksebt cork oak forest.

Name of the class	Description
Forest area	Represents the green areas: cork oak forest and all Taksebt's vegetation
Bare soil	Represents non vegetation areas: burned areas and rocky ones.
Others	Gathers all the other land covers: roads, settlements, poultry sheds and others.

RESULTS

Immediately after the fire, the results (Table 4) show a forested area of 204.55 ha; a bare soil covering 851.11 ha and the other land occupations covering an area of 71.34 ha. Three months after the fire, the forest area increased by 124.53ha, similarly for the other occupations (paths, roads and urban) which increased to 300 ha, while the bare soil decreased to almost half of its surface (353.19ha). On September 2022, the forested area and the bare soil continued increasing by 4.06 ha and 11.94 ha, respectively, while the other land covers decreased from 300 to 284 ha.

Table 4: Post-fire land cover classes and their respective areas.

Land cover	August 2021		October 2021		September 2022	
	Area (%)	Area (ha)	Area (%)	Area (ha)	Area (%)	Area (ha)
Forest Area	18,15	204,55	29,2	329,08	29,56	333,14
Bare soil	75,52	851,11	44,18	497,92	45,24	509,86
Others	6,33	71,34	26,62	300	25,2	284
total	100	1127	100	1127	100	1127

According to the classification results, the overall post-fire land cover changes from August 2021 to September 2022, the forested area in Taksebt forest recovered over an area of 12.59ha. The change in the bare soil class is regressive, it lost an important area of 341.25ha, while the other land occupations, represented mainly by the roads and settlements, have increased by 212.666ha (Figure 2).

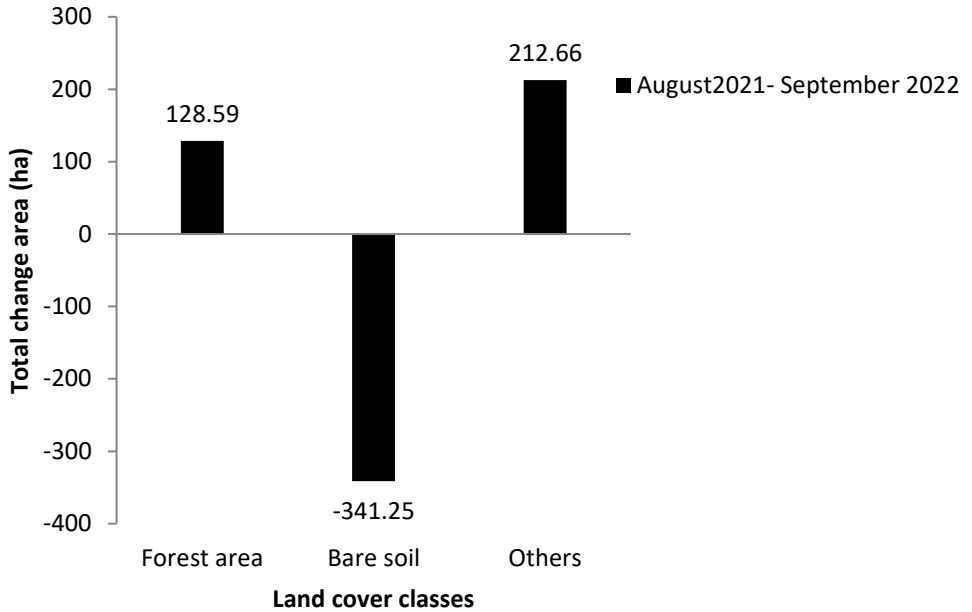


Figure 2: The overall post-fire Land cover changes in Taksebt forest.

Three months after the fire, the land cover changes in Taksebt were positive for the forest area and the other class with surfaces of 124.53 ha and 22.66, respectively; the bare soil, in its side, decreased highly with an area of 353.19 ha. From October 2021 to September 2022, the rates of changes in the study area were very low, as, the forest area and the bare soil increased with 4.06 ha and 11.94 ha, while the other occupations of the forest area decreased with 16 ha (Figure 3).

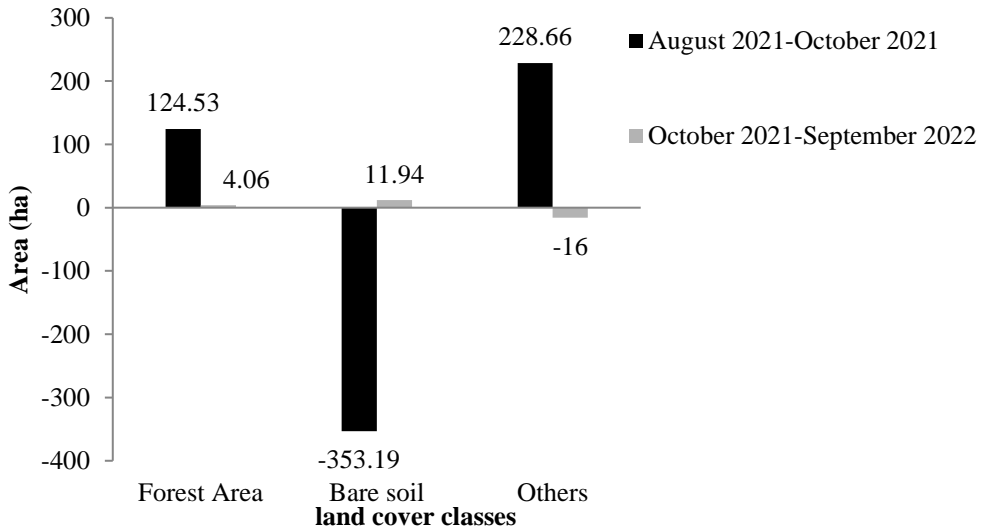


Figure 3: Periodic post-fire land cover changes in Taksebt forest.

Overall, the histogram of the losses and gains in the post-fire land cover occupations of Taksebt (Figure 4) shows important gains in vegetation area and the other classes with surfaces of 128.59 and 228.66 ha, respectively, while, the bare soil lost over 353.19 ha of its area

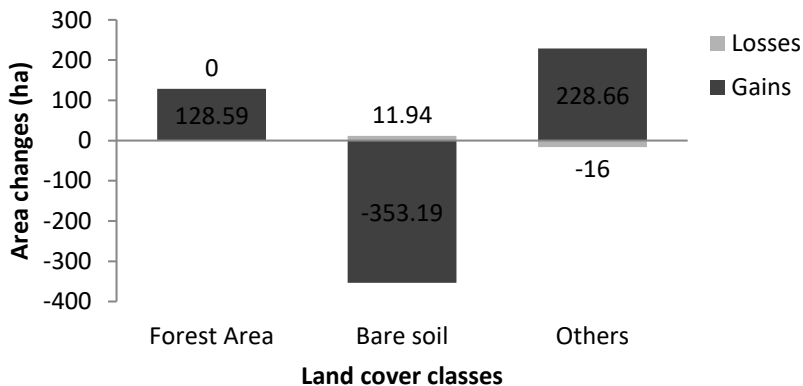


Figure 4: The overall post-fire losses and gains of areas in Taksebt.

The results displayed by the obtained maps from the post-fire supervised classification (Figure 5) follow the above mentioned results. Few days after the fire, the bare soil, which is represented by burned areas, was the dominant cover class, while the forested area was on a restricted surface. Three months after the fire, a clear spread of the green area was noticeable on the map B and the bare soil lost a part of its from which was converted into forest and other land occupations. A year after the forest disturbance, the forest expanse seemed to be the same, while some unknown land covers changed into bare soils.

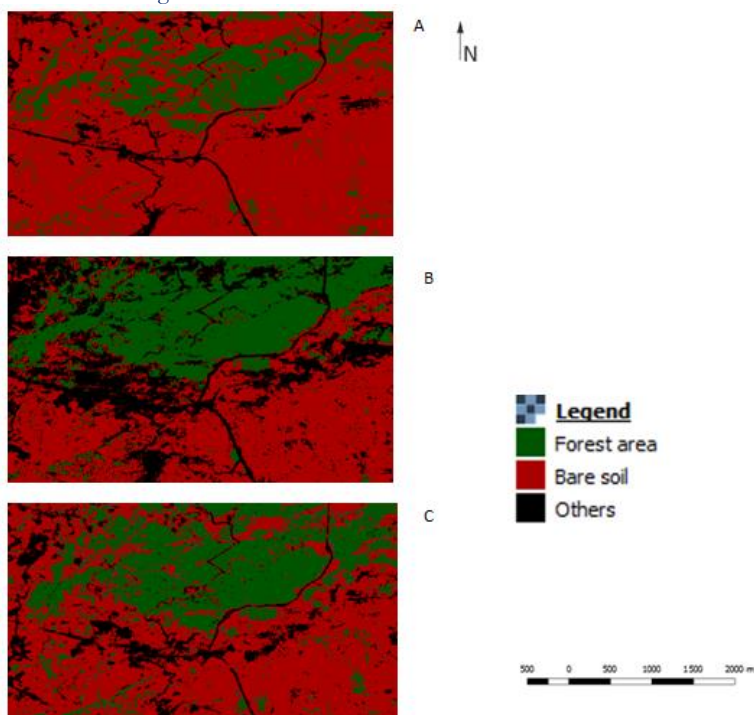


Figure 5: Post-fire supervised classification maps (A: August 2021; B: October 2022; C: September 2022).

DISCUSSION

The use of supervised classification as an explanatory method applied on Sentinel 2A imagery (10m) provided interesting results for all the analyzed images. Furthermore, the methodology was efficient for monitoring of post-fire forest recovery and suitable for identification of the changes. It highlighted every land cover change both visually, through the obtained maps and quantitatively, through the numerical results. Thus, the classification provided excellent and accurate results with well defined groups of pixels.

The identification of the areas where land cover has changed over time in the post-fire chosen periods was significantly distinguishable. In fact, the overall change was characterized by an important increase in the post-fire cork oak recovery along with a decrease in the bare soil area. Three months after the fire, the forested area recovered over 124.53ha, which were as a bare soil just after the fire. The bare soil, represented mainly, by burned surfaces just after the fire, decreased by 353.19ha, an area converted into both vegetation and others, such as roads and paths opened after the fire. A year after the event, in comparison with the previous period, only very small and non noticeable changes occurred in Taksebt forest. Those results may be directly related to the behavior of cork oak after fires, which request a period of three months to recover (Moreira et al., 2009; Dib et al., 2022). In most cases, the foresters allow the forest to recover by itself before any management actions. In this study, it is proved that for cork oak ecosystems a period of three months is requested.

Quercus suber recovery has been the most conspicuous landscape change in this study area, despite the significant disturbances caused by fires on the forests, it has been highlighted that the natural vegetation of this study area has a high resilience capacity. Previously (Pereira, 2011; Bardadi et al., 2021), cork oak proved to be a well adapted species to the mediterranean climate with its dry and hot summers and its environmental hazards. According to Catry et al. (2011), cork oak is the only mediterranean species recovering vegetatively. However, in Algeria, *Quercus suber* is the unique tree with the ability to resprout from epicormic buds, a characteristic which allows its survival after severe damages (Pausas et al., 1997). Moreover, thanks to their insulating bark, cork oak trees have a remarkable resistance to fires (Catry et al., 2011). It has been noticed that, when the bark is sufficiently thick, it protects the epicormic buds, allowing trees to resprout quickly from stem and crown buds after fires (Silva and Catry, 2006).

Forest fires are a problematic and recurrent issue in several countries (Sobrino et al., 2019; Liorens et al., 2021). In Algerian forests, they are the most challenging hazard (Meddour et al., 2013). They are major disturbance factors playing a critical role, modifying ecosystem structure and function, on short and long terms (Garcia-Liamas et al., 2019). However, post-fire forest recovery largely depends on the fire event and characteristics which are known as the fire regime (Bond and Van Wilgen, 1996). In the present study, the fact that cork oak of Taksebt forest seemed to have recovered three months after the fire event, suggests that the fire was moderate and swiped over the area only once during the summer of 2021, exactly on the 10th of August.

Although a Sentinel 2 is a medium resolution sensor, it has allowed improving mapping of fires and their consequences at finer scales compared to other sensors (Drusch et al., 2012; Mpakairi et al., 2020). The investigation conducted in the present research contributed to the assessment of Sentinel 2A free images usefulness in forest spatiotemporal dynamics analysis. They allow an extraction of useful information and therefore, highlight several land cover parameters. It was previously evidenced by Huang et al. (2016) that sentinel 2A images can provide spectral differentiation between unburned and burned areas. And in the present study such images allowed differentiation between classes of land occupancy mainly between the burned areas and the vegetation cover.

CONCLUSION

In conclusion, in the burned area investigated, the post-fire spatiotemporal dynamics seems to lead towards an important cork oak forest. The presented results prove that only three months are necessary for cork oak ecosystems to recover after large and important fires. Sentinel 2A imagery provides a great opportunity for global vegetation monitoring due to its enhanced spatial, spectral and temporal characteristics compared to other free access satellites. However, this data and the applied methodology have proven to be of great use in forest dynamics studies, especially when it is necessary to operate, as in this case, in a spatiotemporal analysis. The present study will be as a support for the concerned forest services for any future management of Taksebt cork oak forest, which is an important area, with high ecological, economic and social values.

References

- [1] Asner, G. P. 2009. Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters*, 4(3), 034009.
- [2] Bardadi, A., Souidi, Z., Cohen, M., & Amara, M. 2021. Land use/land cover changes in the tlemcen region (Algeria) and classification of fragile areas. *Sustainability*, 13(14), 7761.
- [3] Bernal, C. 1999. Guía de las plantas del alcornoque. Dpto. Recursos Naturales Renovables, Instituto CMC, Junta de Extremadura. Artes Gráficas Boysu, s.l., Mérida.
- [4] Bond, W. J., and Van Wilgen, B. W. 2012. *Fire and plants* (Vol. 14). Springer Science & Business Media.
- [5] Bugalho, M. N., Caldeira, M. C., Pereira, J. S., Aronson, J., & Pausas, J. G. 2011. Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(5), 278-286.
- [6] Bureau National de Recherches Forestières. 1989. Etude des suberaies de l'Akfadou. Azazga, Tizi-Ouzou, Algérie.
- [7] Catry, F. X., Moreira, F., Cardillo, E., and Pausas, J. G. 2012. Post-fire management of cork oak forests. In *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests* (pp. 195-222). Springer Netherlands.
- [8] Catry, I., Franco, A. M., and Sutherland, W. J. 2011. Adapting conservation efforts to face climate change: Modifying nest-site provisioning for lesser kestrels. *Biological Conservation*, 144(3), 1111-1119.
- [9] Costa, A., Pereira, H., and Madeira, M. 2010. Analysis of spatial patterns of oak decline in cork oak woodlands in Mediterranean conditions. *Annals of Forest Science*, 67(2), 204.
- [10] Cowling, R. M., Ojeda, F., Lamont, B. B., Rundel, P. W., and Lechmere-Oertel, R. 2005. Rainfall reliability, a neglected factor in explaining convergence and divergence of plant traits in fire-prone mediterranean-climate ecosystems. *Global ecology and biogeography*, 14(6), 509-519.
- [11] Dib, T., Kazanis, D., Arianoutsou, M., Messaoudene, M., and Krouchi, F. 2022. Post-fire regeneration of cork oak (*Quercus suber*) in Kiadi forest (Akkfadou-Algeria), *Mediterr. Bot.* Online First.
- [12] Dimitrakopoulos, A. P., and Mitsopoulos, I. D. 2006. Global forest resources assessment 2005-report on fires in the Mediterranean region. *Fire Management Working Papers (FAO)*.
- [13] Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F. Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., and Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.
- [14] FAO, 2011. State of the world's forests 2011. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- [15] Frolking, S., Palace, M. W., Clark, D. B., Chambers, J. Q., Shugart, H. H., and Hurtt, G. C. 2009. Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G2).
- [16] García-Llamas, P., Suárez-Seoane, S., Taboada, A., Fernández-Manso, A., Quintano, C., Fernández-García, V. Fernandez-Guisuraga, J., Marcos, E., and Calvo, L. 2019. Environmental drivers of fire severity in extreme fire events that affect Mediterranean pine forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 433, 24-32.
- [17] Huang, H., Roy, D. P., Boschetti, L., Zhang, H. K., Yan, L., Kumar, S., Gomez-Dans, J., and Li, J. 2016. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination. *Remote Sensing*, 8(10), 873.
- [18] Lapie, G. 1909. Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurjura.
- [19] Lasaponara, R., Abate, N., Fattore, C., Aromando, A., Cardettini, G., and Di Fonzo, M. 2022. On the Use of Sentinel-2 NDVI Time Series and Google Earth Engine to Detect Land-Use/Land-Cover Changes in Fire-Affected Areas. *Remote Sensing*, 14(19), 4723.
- [20] Llorens, R., Sobrino, J. A., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., & Vega, J. A. 2021. A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95, 102243.
- [21] Meddour-Sahar, O., and Bouisset, C. 2013. Les grands incendies de forêt en Algérie: problèmes humains et politiques publiques dans la gestion des risques. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/ Journal of Mediterranean geography*, (121), 33-40.
- [22] Moreira, F., Catry, F., Duarte, I., Acácio, V., and Silva, J. 2009. A conceptual model of sprouting responses in relation to fire damage: an example with cork oak (*Quercus suber* L.) trees in Southern Portugal. *Plant Ecol* 201:77–85.
- [23] Mpakairi, K. S., Kadzunge, S. L., and Ndaimani, H. 2020. Testing the utility of the blue spectral region in burned area mapping: Insights from savanna wildfires. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100365.
- [24] Navarro, G., Caballero, I., Silva, G., Parra, P. C., Vázquez, A., and Caldeira, R. 2017. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 97-106.
- [25] Pausas, J., G. 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Clim Chang* 63:337–350.
- [26] Pausas, J. G. 1997. Resprouting of *Quercus suber* in NE Spain after fire. *Journal of Vegetation Science*, 8(5), 703-706.
- [27] Pausas, J. G. 1997. Resprouting of *Quercus suber* in NE Spain after fire. *Journal of Vegetation Science*, 8(5), 703-706.
- [28] Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., and Vallejo, R. 2009. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin?—A review. *International Journal of Wildland Fire*, 17(6), 713-723.
- [29] Pereira, H. (Ed.). 2011. Cork: biology, production and uses. Elsevier.

- [30] Pereira, P. M., and Da Fonseca, M. P. 2003. Nature vs. nurture: the making of the montado ecosystem. *Conservation Ecology*, 7(3).
- [31] Piñol, J., Terradas, J., and Lloret, F. 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic change*, 38(3), 345-357.
- [32] Silva, J. S., and Catry, F. 2006. Forest fires in cork oak (*Quercus suber*L.) stands in Portugal. *International Journal of Environmental Studies*, 63(3), 235-257.
- [33] Sobrino, J. A., Llorens, R., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., and Vega, J. A. 2019. Relationship between soil burn severity in forest fires measured in situ and through spectral indices of remote detection. *Forests*, 10(5), 457.
- [34] Souza Jr, C. M., Roberts, D. A., and Cochrane, M. A. (2005). Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 329-343.
- [35] Wolter, P. T., Berkley, E. A., Peckham, S. D., Singh, A., and Townsend, P. A. 2012. Exploiting tree shadows on snow for estimating forest basal area using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 121, 69-79.
- [36] Wolter, P. T., and Townsend, P. A. 2011. Multi-sensor data fusion for estimating forest species composition and abundance in northern Minnesota. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 671-691.

Case study of the modeling approach of the flows of the sub-catchment of Kisangani by the method of the curved numbers

Papy kabadi Lelo Odimba¹, Georges Koshi Gimeya² and Issam Nouiri³

¹ Papy kabadi lelo odimba, PhD-Student, Université de Carthage /Inat, Tunis*

² Georges Koshi Gimeya, teaching assistant, Inbtp, Kinshasa

³ Issam Nouiri, teacher professor PhD, University of Carthage /Inat, Tunis

Abstract

Integrated water resources management (IWRM) in large basins requires a thorough understanding of all components of the water balance and the most realistic representation of biophysical processes that occur over time. In order to assist managers and decision makers, this research aims to build and calibrate a surface water tool for a representative case study of large river basins: the Kisangani sub-basin, a special case of the large Congo River basin located in Central Africa. It is one of the largest sub-basins in this region, with a large portion located in the Democratic Republic of Congo (DRC). It occupies 24% of the entire greater Congo River basin and discharges a mean annual flow of approximately 20330 m³/s into the Congo River in this city. The location of this Kisangani sub-basin south of the equator gives it a climate influenced by southern subtropical high pressure.

This research is based on the Curve Number (CN) method, implemented on SWAT and QGIS software (QSWAT). Data are collected from international public databases, satellite images and ground observations (hydrometric data for the period 2008-2014). The constructed model was able to simulate monthly flows with an overall coefficient of determination (R²) evaluated at 0.9 after calibration. It is shown that the most influential parameters on the performance of the model are: i) the curve number (CN); ii) the soil evaporation compensation factor (E_{sc}.brn); iii) the Available Water Capacity of the soil layer (mm H₂O/mm.) (Sol_AWC (...)) soil and a test parameter to see the behavior of the model sensitivity the SFTMP.bn. We find that the precipitation parameter has a great influence on the performance of this model due to its location in the equatorial Torrid Zone of central Africa as in the case of other studies mentioned above.

Key Words: Surface water modeling, Kasai sub-basin, Curve Number, Calibration, IWRM.

Etude de cas de l'approche de modélisation des écoulements du sous-bassin versant de Kisangani par la méthode des nombres courbes

Résumé

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans les grands bassins nécessite une compréhension approfondie de toutes les composantes du bilan hydrique et la représentation la plus réaliste des processus biophysiques qui se produisent au fil du temps. Afin d'aider les gestionnaires et les décideurs, cette recherche vise à construire et à calibrer un outil d'eau de surface pour un cas d'étude représentatif de grands bassins fluviaux : le sous-bassin de Kisangani, un cas particulier du grand bassin du fleuve Congo situé en Afrique centrale. C'est l'un des plus grands sous-bassins de cette région, avec une grande partie située en République démocratique du Congo (RDC). Il occupe 24% de l'ensemble du grand bassin du fleuve Congo et déverse un débit annuel moyen d'environ 20330 m³ / s dans le fleuve Congo dans cette ville. La localisation de ce sous-bassin de Kisangani au sud de l'équateur lui confère un climat influencé par les hautes pressions subtropicales du sud. Cette recherche est basée sur la méthode Curve Number (CN), implémentée sur les logiciels SWAT et QGIS (QSWAT). Les données sont collectées à partir de bases de données publiques internationales, d'images satellitaires et d'observations au sol (données hydrométriques pour la période 2008-2014). Le modèle construit a permis de simuler des débits mensuels avec un coefficient de détermination global (R²) évalué à 0,9 après calage. Il est montré que les paramètres les plus influents sur les performances du modèle sont : i) le numéro de courbe (CN); ii) le facteur de compensation de l'évaporation du sol (E_{sc}.brn); iii) la capacité en eau disponible de la couche de sol (mm H₂O/mm.) (Sol_AWC (...)) sol et un paramètre de test pour voir le comportement de la sensibilité du modèle le SFTMP.bn. Nous constatons que le paramètre de précipitation a une grande influence sur les performances de ce modèle en raison de sa localisation dans la zone torride équatoriale de l'Afrique centrale comme dans le cas d'autres études mentionnées ci-dessus.

Mots clés : Modélisation des eaux de surface, sous-bassin du Kasai, Curve Number, Calibration, IWRM.

¹ Corresponding author: papykabadi@yahoo.fr

INTRODUCTION

The Kisangani sub-basin has the particularity of being exposed to equatorial climatic conditions with a distinct rainy season characterized by a proven equatorial rainfall regime. It requires a particular attention and a mode of management of its resources by its strategic position which constitutes the starting point of the navigability of the course of the Congo River towards the Capital Kinshasa. It is a route for the circulation of goods and people by supplying the far east of the country.

This type of watershed management is universally considered as a tool to provide precise elements of knowledge on the manifestations of climate variability and its relationship with water resources (Ardoin Bardin, 2004). It is indeed appropriate to adopt a good integrated management strategy, passing through hydrological modeling that also facilitates the analysis of meteorological scenarios and allows the study of the impacts of climate change and / or anthropic influences on the hydrological cycle of a watershed (CREALP, 2019).

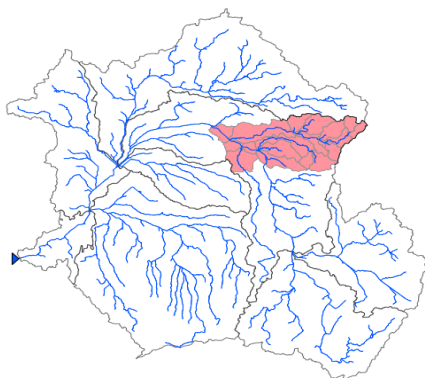


Figure. 1: Representation of the Kisangani sub-basin in the greater Congo River basin

This Kisangani sub-basin (in red) is part of the Lualaba sub-basin (Upper Congo) belonging to the Great Congo River Basin located in Central Africa. It is also one of the largest sub-basins in this region and the only one that constitutes the hinge between the southern and northern hemispheres of the Great Congo River Basin, most of which is located only in the Democratic Republic of Congo (DRC). It occupies 24% of the entire great Congo River basin and its location astride the equator shows that this great Congo River basin has a bimodal regime. The Kisangani sub-basin which is the subject of our study is located in the eastern part of the whole Congo River Basin and DRC, occupying only 7.35% of its surface.

MATÉRIELS AND METHODS

The chosen method is that of Curve Numbers, allowing to estimate the runoff and which can be adjusted according to the hydric state of the soil and the tool used is that of the Qswat model which has a specification of its "Open Source" character opening the field of adaptation of the model to the possible specificities of the studied environment.

The Modelling can be separated into two parts: a sub-basin component which carries out water balances on each sub-basin, which are then integrated on the whole basin, and a transfer component which carries out the transfer of water in the networks towards the outlet. The Curve Numbers method aims to estimate the flow of the basin and not only that from surface runoff (Romain Lardy, note on Curve Numbers, 2013).

Furthermore, by considering the flow as surface runoff, it is then implicitly considered to come solely from Hortonian runoff, which would take place over the entire modeled area and be the dominant surface runoff process (Garen and Moore, 2005). Note, however, that for the SWAT model, when calculating the value of CN as a function of soil water content, if the soil is saturated, then the coefficient is 99, indicating the existence of flow through soil saturation (Neitsch et al., 2009). Its implementation in the SWAT tool by integrating the daily dynamics including one method integrating the soil water content admitting the value of CN of 99 in the case of saturated soil and the other based on the potential evapotranspiration of plants, the retention coefficient. Moreover, by integrating the effect of the slope, it is possible to adjust the CN. This slope also affects the flow velocities of

overhead and underground streams. This sub-basin is only a special case for its modeling and a practical case as a whole. The calibrated simulation model therefore provides a solid basis for building an integrated surface water management tool for the Kisangani sub-basin.

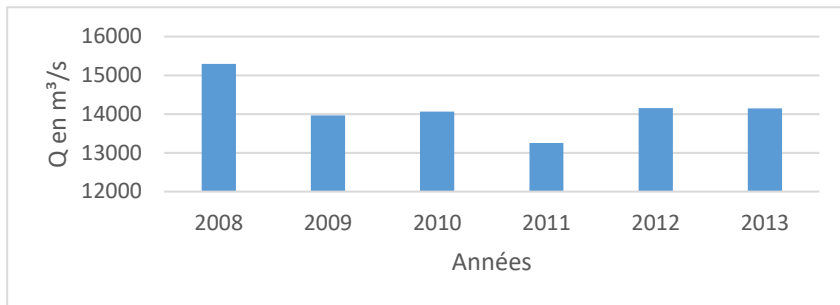


Figure. 2: Representation of the hydrographic flows of Kisangani sub-basin.

We used the physiographic data defined in Table 7 below. This is a suite of data sets from the greater Congo River basin

Table 1: Table of physiographic data used in this Kisangani sub-basin case.

Dataset	Associated physical reality	Origin
Digital terrain model(DTM)	Topography, hydrographic network	Produced by a raster image upload in the Cgiar.org site.
Météorological	Précipitations, les températures, solar radiation, humidity relative, Wind speeds	Observed city stations and those downloaded from Global Weather Data for Swat (GWD)
Land cover	A supervised classification into different dominant classes	Obtained by downloading from FAO soft
Soil Type	Pédology	

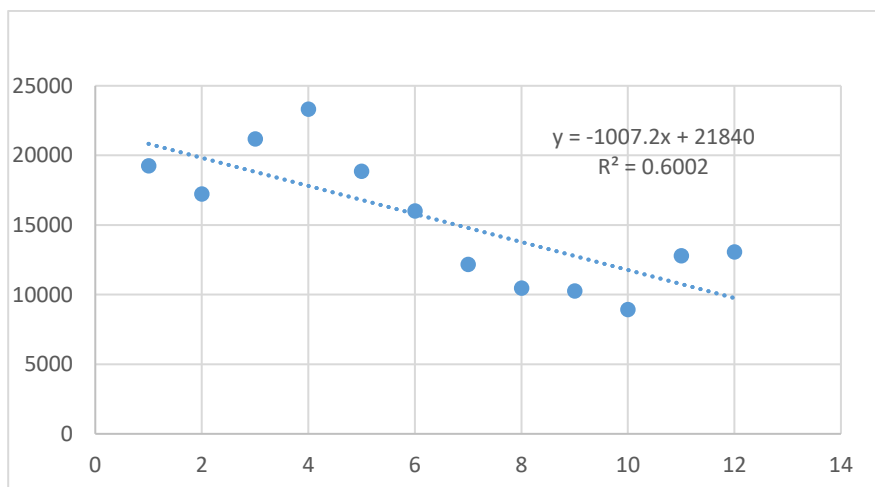


Figure.3: representation of the linear flow of the river in the Kisangani sub-basin

RESULTATS

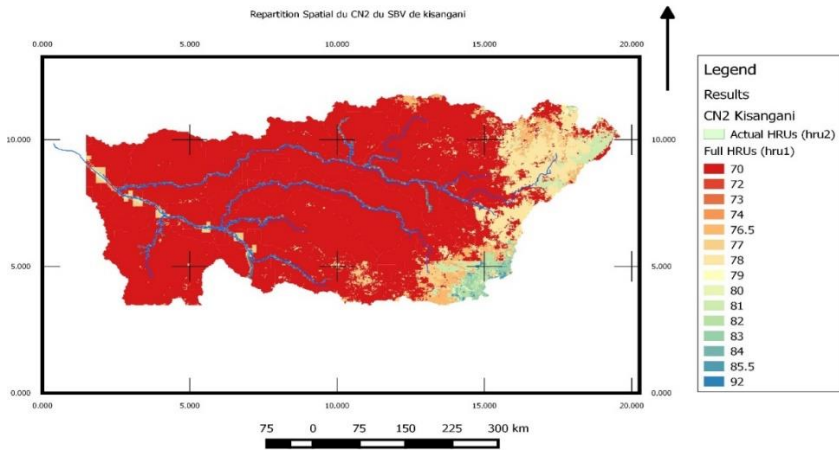


Figure.4: Representation of the spatial distribution of CN2 in the Kisangani sub-basin.

The present study develops from a combination of physiographic (DTM, soil types, land use, meteorology) and hydrometric input data, a SWAT model to reproduce the hydrological functioning of our Kisangani sub-catchment conditioned by calibration parameters and the most sensitive indices to ensure its performance.

This application without calibration of the SWAT model for our case gives satisfactory results ($R^2= 0.6$) for a monthly time step, respectively 7930,13 m³/S as average of the observed flows whose linear equation is:

$$Y= -1007.2x + 2184040 \text{ (1)}$$

We could not try to reproduce this variability of the hydrological operation on a daily scale, given our objective. But nevertheless, we will try in what follows and leave the way open to those who want to realize them.

We realized the delimitation of this sub-basin of Kisangani by using the digital terrain model which was used to draw the paths and directions of flow in an open source geographic information system (QGIS).

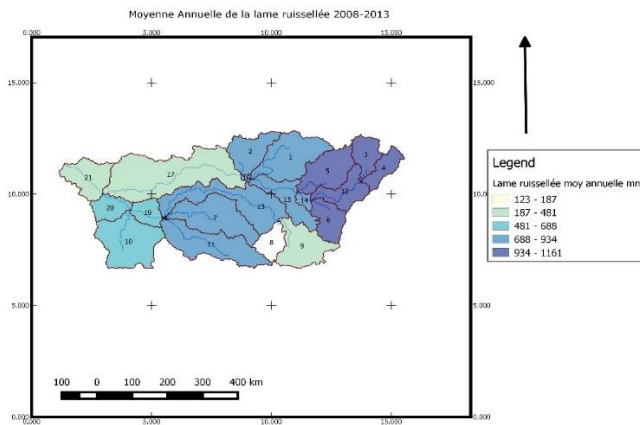


Figure.5: Representation of the spatial distribution of the results of the average annual runoff in the Kisangani sub-basin.

For the most appropriate spatial discretization and best subsequent analyses, we performed 21 spatial cuttings of this sub-catchment ranging from 21 km² at the smallest to 41038 km² at the largest. The identical combination obtained by crossing the sub-catchment cutting, land use and Pédology assumes a similar hydrological response (HRU) in each sub-catchment. A total of 738 HRU were identified in our Kisangani sub-catchment.

The curves numbers method with its CN index is spatially distributed in this sub-basin in a range of 92 to 70. This is explained by the types of soils and land uses in this eastern area of the country with the presence of two lakes Edward and Albert in the range of 83 to 81, the source or resource of the great Nile River. The average height of the runoff is also distributed over the entire area with high heights of 1161 to 934 mm and a minimum of 187-123 mm.

In view of these results, we accept that this ability to reproduce without calibration is an indicator of the quality of our input data according to our objective.

Sensitivity analysis tool

We analyze it with SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) which is a calibration program for SWAT models. For our case, the choice of the calibration method is the SUFI-2 procedure (Sequential Uncertainty Fitting).

In SUFI-2, the identification of sensitive parameters is done using the t-stat and P-value indicators. A parameter is more sensitive when it has a high absolute value of t-stat and a value of P-value close to zero.

Tools for evaluating the performance of the model

The SWAT model's performance is first evaluated graphically by the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) which is an objective function that indicates to what extent the variation of the observations corresponds to the variation of the simulated values. It determines the magnitude of the residual variance (or "noise") compared to the measured data variance. This evaluation of the fit of the simulated data to the observed data is done by a value ranging from $-\infty$ to 1. The closer the NSE is to 1, the better the modeling. Its equation is as follows:

Equation 1 . Equation's Nash - Sutcliffe

$$NSE = 1 - \frac{\sum(O - S)^2}{\sum(O - \bar{O})^2}$$

Then by the coefficient of determination R². It represents the proportion of variance explained in the total variance of the observations. Its value varies from 0 (null model) to 1 (perfect model), with results considered satisfactory when it exceeds 0.5:

Equation 2 . Equation's Determination

$$R^2 = \frac{[\sum(O - \bar{O}) \cdot (S - \bar{S})]^2}{[\sum(O - \bar{O})] \cdot [\sum(S - \bar{S})]^2}$$

With O the observed values; \bar{O} the average of the observed values; S the simulated values and \bar{S} the average of the simulated values.

Sensitivity Analysis and Calibration.

Parameter sensitivity analysis is a method of identifying changes in output variables based on changes in model parameters. We relied on the SWAT-CUP variable parameter approach by choosing SUFI-2 as our type of calibration method by pulling out the most sensitive parameter indicators t-stat and P-value. This algorithm was developed for parameter optimization so that all uncertainties (parameter, conceptual model, input, etc.) are

mapped onto the parameter ranges, which are calibrated to set most of the measured data within the 95% prediction uncertainty.

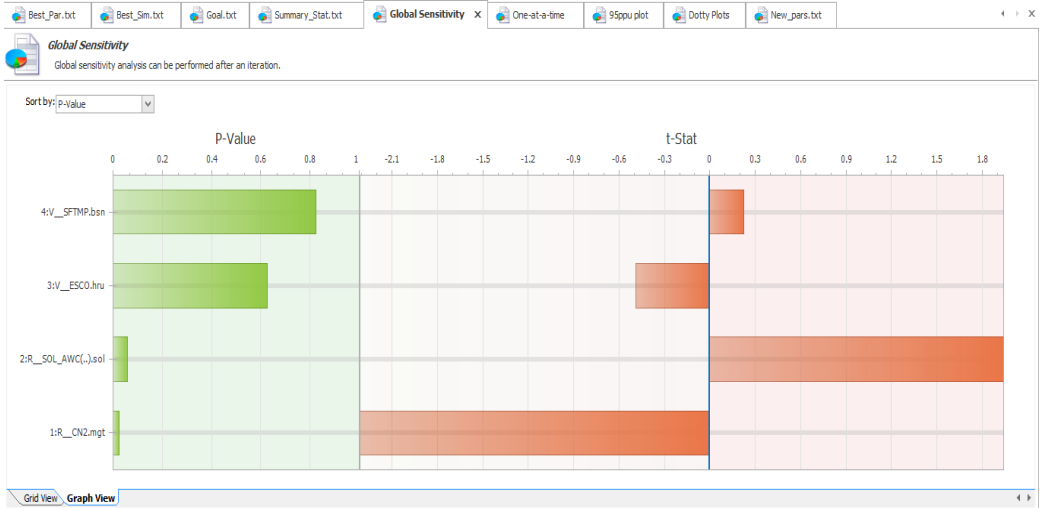


Figure.6: Figure of the index table of the most sensitive parameters.

In our case of study, the period from 1979 to 2010 consisted in establishing a comparison of the observed data and downloaded on GWD given the vastness of our watershed and the great unavailability of acquisition of meteorological information from different stations.

This operation led us to be able to make an amplification of the meteorological data by creating a grid of the GWD stations on all the extent of our Watershed. This phase constituted our first test way to assure us of our meteorological data leading us in the continuation of our process of study. The period of 2005 - 2008 is the one of the starting up of the model (Warm up period) and of 2008 - 2014 is the one of our automatic calibration at the monthly scale.

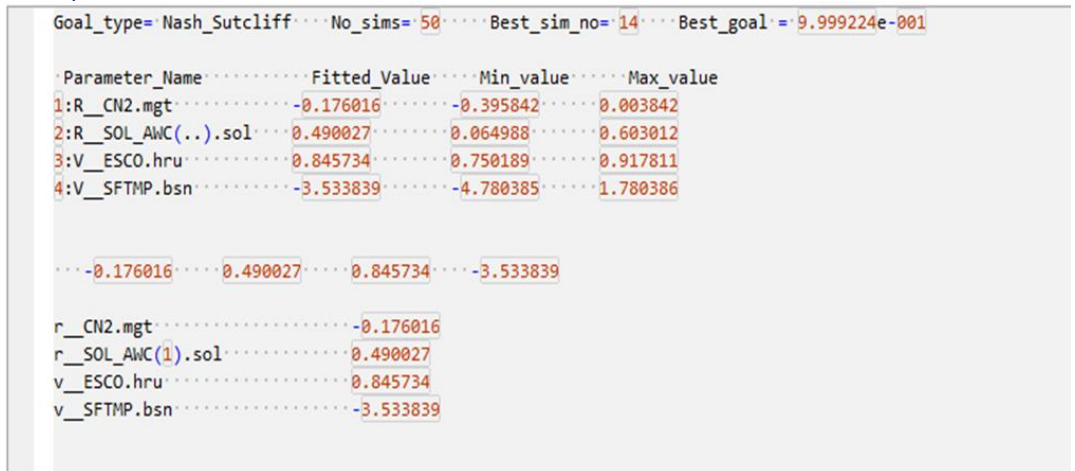


Figure.7: Representation of the values of the best parameters after 50 simulations.

We performed 50 simulations although the number seems so small but is part of the test experiments. The parameters gave us information about the sensitivity of our model and the best simulation n°14 with adjusted parameter values for calibration and simulation.

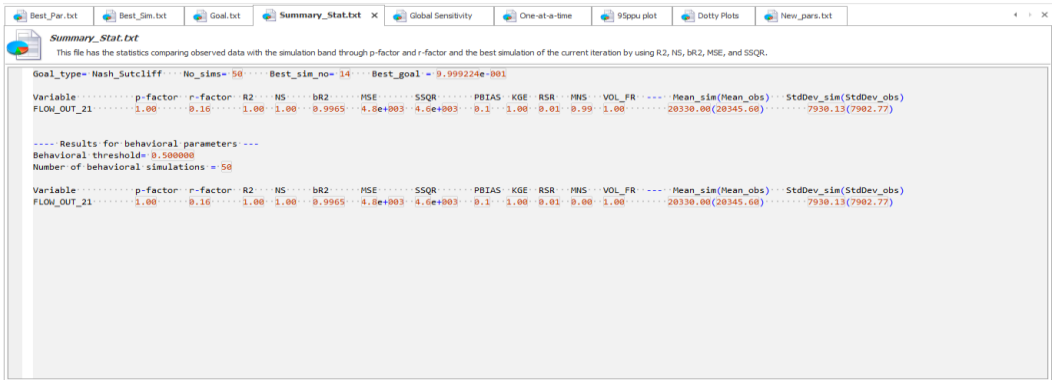


Figure.8: Summary representation of the statistics of the values of the indices of the parameters of the simulation.

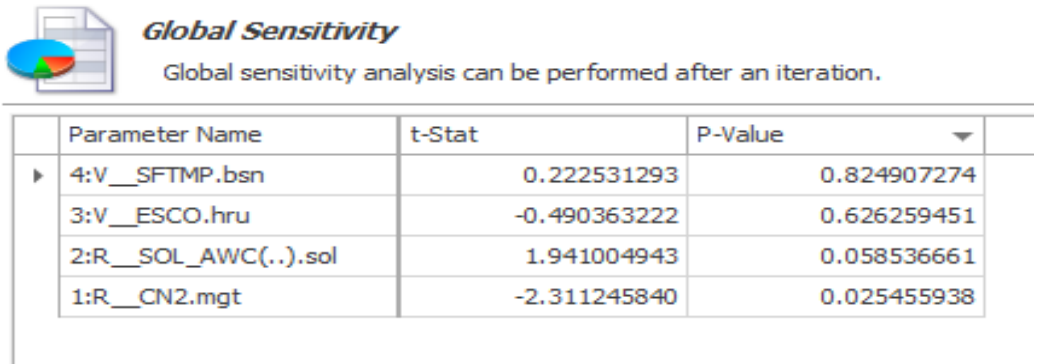


Figure.9: Table of global sensitivity parameters



Figure.10: Representation of the simulation with SWA-CUP of the Kisangani Basin.

DISCUSSION AND CONCLUSION

Our conclusions are based on our objectives for the Congo River Basin, which was to show the availability of SWAT to perform analysis and modeling operations given its large size and the opportunities

The sensitivity analysis for this Kisangani sub-basin case study confirms the quality of our input data used, which ideally represents (optimizes) the reality on the ground

The most sensitive parameters are related to baseline inputs, including surface runoff, soil water, groundwater, channel delivery, and actual and potential evaporation.

The SWAT-CUP tool allowed us to calibrate our model. The sensitivity study led us to the selection of the following parameters: In "relative" mode i) the curve number (CN); ii) the Available Water Capacity of the soil layer (mm H₂O/mm.) (Sol_ AWC (...)) and "replacement" mode; iii) the soil evaporation compensation factor (Esco .hru); iv) soil and a test parameter to see the behavior of the model sensitivity the SFTMP.bn.

For the most appropriate spatial discretization and the best subsequent analyses, we performed 27 spatial breakdowns of our sub-watershed, corresponding to average HRU areas ranging from 1 km² to 8886 km².

A total of 738 HRUs were identified in our Kisangani subwatershed. Given these results, the Curve Number method seems so crucial in this case study.

In short, the Curve Number method implemented in SWAT can provide useful information for the successful implementation of integrated water resources management in the Kisangani sub-basin.

Finally, these steps have contributed to prove that despite the complexity and the immensity of the studied environment, the restriction in the acquisition of observed data, the obtained results prove that the SWAT hydrological model provides information of the different interactive and complex natural processes in a sub-watershed. It is a robust tool in its operation and its capacity to achieve a good integrated management of water and soil resources that will lead to a good sustainable exploitation of the biophysical characteristics of the Kisangani sub-basin and the surrounding areas

Références

- [1] Achour I., 2015. Etude du bilan hydrologique du bassin versant amont du barrage de Nebhana. Projet de fin d'études, Institut National Agronomique De Tunisie ,72p.
- [2] Ambroise B., 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du Département « Science du Sol » de l'INRA, Dijon, 34p.
- [3] Ambroise B., 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : 110p.
- [4] ANCTIL, F. (2004). "Description du projet de recherche - Modélisation hydrologique des petits bassins versants en milieu rural.",357–368.
- [5] Andréassian V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 pp.
- [6] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: part I. Model development. J. Am. Water Resour. Assoc. 34 (1), 73–89.
- [7] Ben Zaïed M., 2009. Etude d'impact des aménagements CES par application des modèles hydrologiques : Cas du bassin versant d'Oued Oum Zessar. Mémoire de maîtrise, école nationale d'ingénieurs de Tunis: 4p.
- [8] Bessière H., 2008. Assimilation de données vibrationnelle pour la modélisation hydrologique distribuée des crues à cinétique rapide. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse : 11p.
- [9] Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N. and Tagg A.F., 1984. Testing a physically based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. Journal of Hydrology 69, 119-143.
- [10] Chu, T. W., and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. Trans. ASAE 47(4): 1057- 1073.
- [11] CNEA 1991. Evaluation des aménagements CES dans la région de Haffouz-el Ala. Etude réalisée par le CNEA pour la D/CES-Ministère de l'Agriculture 81 pages.
- [12] CNEA, 2003. Etude d'impact des travaux de conservation des eaux et du sol dans le gouvernorat de Kairouan (DG/ACTA-MARH).
- [13] COTHA, 1957 COMPAGNE DES TECHNIQUES HYDRAULIQUES ET AGRICOLES,
- [14] Aménagement de l'Oued Nebhana : Etude hydrologique.
- [15] D/CES 1996 Etude de planification des aménagements de conservation des eaux et du sol du gouvernorat de Kairouan. Rapport principal et annexe. Réalisée par EGS (Engineering and Général Services), 300 p.
- [16] DGRE (DIRECTION GENERALE DES RESSOURCES EN EAU), 1995. Atlas du
- [17] Gouvernorat de Kairouan, 80p.
- [18] Edijatno N. et Michel C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche (2) ,113-121.
- [19] Emma A., 2003. Modélisation mensuelle pluie-débit/ apports de la spatialisat-ion- cas des données de sols. Thèse de doctorat, université Montpellier II: 40p.

- [20] Gaume E., 2002. Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation débit-pluie ; Cours de DEA en Sciences et Techniques de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [21] Glavan, M., Cegljar, A., Pintar, M., 2015. Assessing the impacts of climate change on water quantity and quality modelling in small Slovenian Mediterranean catchment lesson for policy and decision makers. *Hydrol.*
- [22] Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.
- [23] Isik, S., Kalin, L., Schoonover, J.E., Srivastava, P., Lockaby, B.G., 2013. Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: an Artificial Neural Network and curve number based hybrid approach. *J. Hydrol.* 485, 103–112.
- [24] Jiang, S.H., Ren, L.L., Yong, B., Fu, C.B., Yang, X.L., 2012. Analyzing the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohai basin in northern China. *Hydrol. Res.* 43 (1–2), 3–13.
- [25] Kelmes V., 1986. Operational test of hydrological simulation models. *Hydrological sciences Journal* 31(1), 13-24.
- [26] Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro climatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.
- [27] Lin, K., Zhang, Q., Chen, X., 2010. An evaluation of impacts of DEM resolution and parameter correlation on TOPMODEL modeling uncertainty. *J. Hydrol.* 394, 370–383.
- [28] Makhloof Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay: 426 p.
- [29] Mansouri Y., 2013. Etude de la vulnérabilité des ressources en eau et en sols dans le bassin versant de Nebhana, Mémoire de Mastère, Institut National Agronomique De Tunisie, 90p.
- [30] MORIN G., 1991, Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemples d'application, In Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride, John Libbey Eurotext, AUPELF-UREE, Eds, 23–39.
- [31] Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- [32] Ousaiif D., 2014. Modélisation hydrologique des apports liquides du bassin versant du barrage Nebhana, Mémoire de Mastère, Institut National Agronomique De Tunisie, 94p.
- [33] Payraudeau S., (2002). Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. Thèse ENGREF de Montpellier, Spécialité science de l'eau. 255p.
- [34] Perrin C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle globale pluie-débit au travers d'une approche comparative, thèse doctorat, Cemagref, institut polytechnique de Grenoble, 291p.
- [35] Refsgaard JC et Storm B., 1996. Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Distributed hydrological Modelling (ed. by JC. Refsgaard et M.B. Abbott), 41–54. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- [36] Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.
- [37] Sefton, C. E. M. and Howard, S. M.: Relationship between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales, *J. Hydrol.*, 211, 1–16, 1998.
- [38] Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
- [39] Singh, V.P., 1995. Watershed modeling. In: V.P. Singh (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 1-22.
- [40] Van Liew, M. W., J. G. Arnold, and J. D. Garbrecht. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551.
- [41] Vazquez-Amabile, G. G., and B. A. Engel. 2005. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. *Trans. ASAE* 48(3): 991- 1003.
- [42] Yérima B., 2002, Méthodologie d'évaluation quantitative des ressources en eau dans un bassin versant de Medjerda, Mémoire d'Etudes Approfondies à l'INAT.

JOURNAL INTERNATIONAL

Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement

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

Volume (vii) - Numéro 4 – Décembre 2022

E_{au} - S_{anté} - C_{limat}'2022



**Changements climatiques Santé :
Qualité de l'eau et accessibilité**

Rédacteur en Chef : Pr Nouredine Gaaloul

Publié par :

*L'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et
l'Environnement en Tunisie (ASTEETunisie)*



Comité Scientifique International (CSI-EC'2022)

<i>Nouredine Gaaloul</i>	<i>Prof. Université de Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Hamadi Habaieb</i>	<i>Prof. Université de Carthage – IRESA -IN-AT (Tunisie)</i>
<i>Zouhaier Nasr</i>	<i>Prof. Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Hachicha</i>	<i>Prof. Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zouhaier Hlaoui</i>	<i>Prof. Université de Tunis - Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (Tunisie)</i>
<i>Adel Kharroubi</i>	<i>Prof. Université de Gabès – ISSTEG (Tunisie)</i>
<i>Rachid Boukebina</i>	<i>M.Conf. Université de Gabès – ISSTEG (Tunisie)</i>
<i>Nouredine Hamdi</i>	<i>Prof. Université de Gabès – ISSTEG (Tunisie)</i>
<i>Taoufik Hermassi</i>	<i>M.Conf. Université de Carthage – IRESA -INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Habib Sellami</i>	<i>M.Conf. Université de Jendouba – IRESA- ESIM (Tunisie)</i>
<i>Hechmi Belaid</i>	<i>M. Assistant. Université de Jendouba -IRESA- ESIM (Tunisie)</i>
<i>Rim Katlane</i>	<i>M.Conf. Université de la Manouba - Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités (Tunisie)</i>
<i>Ibrahimia Amadou Traoré</i>	<i>Expert Hydrogéologue</i>
<i>Mohamed Meddi</i>	<i>Prof. ENSH, (Algérie)</i>
<i>Azgedine Hani</i>	<i>Prof. Univ. Annaba (Algérie)</i>
<i>Larbi Djabri</i>	<i>Prof. Univ. Annaba (Algérie)</i>
<i>Salah Eddine Ali Rahmani</i>	<i>Prof. Univ. des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algérie)</i>
<i>Saadane Djorji</i>	<i>Prof. Université de Annaba (Algérie)</i>
<i>Mohammed Achite</i>	<i>Prof. Université de Chlef (Algérie)</i>
<i>Abdelhalim Yabiaoui</i>	<i>Prof. Université de Bechar (Algérie)</i>
<i>Mohamed Bessenasse</i>	<i>Prof. Université de Saad Dablab- Blida (Algérie)</i>
<i>Benabadj Nonry</i>	<i>Prof. Université de Tlemcen (Algérie)</i>
<i>Abdessamad Merzouk</i>	<i>Prof. Université de Tlemcen (Algérie)</i>
<i>Beloulou Laroussi</i>	<i>Prof. Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)</i>
<i>Abdelhalim Yabiaoui</i>	<i>M.Conf. Univ. Bechar (Algérie)</i>
<i>Gnergazj Saadia</i>	<i>M.Conf. Université de Biskera (Algérie)</i>
<i>Guenouaz Abdelhamid</i>	<i>M.Conf. Université de Blida1 (Algérie)</i>
<i>Khonaldia Wacla</i>	<i>M.Conf. Université de Souk-Abras (Algérie)</i>
<i>Belkacem Bekkoussa</i>	<i>M.Conf. Université Mustapha Stambouli de Mascara (Algérie)</i>
<i>Ali Essablaoui</i>	<i>Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)</i>
<i>El Ouadi Abdelhadi</i>	<i>Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)</i>
<i>Abdellah El Hmaidi</i>	<i>Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)</i>
<i>Imad Manssour</i>	<i>Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)</i>
<i>Abdelmajid Nadoum</i>	<i>Prof. Université Nadour (Maroc)</i>
<i>Mbamed Anyay</i>	<i>Prof. Université de Fès (Maroc)</i>
<i>Abdelaziz Abdallaoui</i>	<i>Prof. Université Moulay Ismail (Maroc)</i>
<i>Nadia Lablou</i>	<i>M.Conf. Université Mohamed V Rabat (Maroc)</i>
<i>Amadou Thierno Gaye</i>	<i>Prof. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (Sénégal)</i>
<i>Sousou Sambou</i>	<i>Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Sénégal)</i>
<i>Diop Ngom Fatou</i>	<i>Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Sénégal)</i>
<i>Abdoulaye Faty</i>	<i>Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Sénégal)</i>
<i>Soro Nagnin</i>	<i>Prof. UFR STRM (Cote d'Ivoire)</i>
<i>Gnamba Franck Maxime</i>	<i>Prof. UFR STRM (Cote d'Ivoire)</i>
<i>Soro Nagnin</i>	<i>Prof. UFR STRM (Cote d'Ivoire)</i>
<i>Cusb Ngongzo Lwesi</i>	<i>Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)</i>
<i>Koussoubon A. Leonard</i>	<i>Prof. FLLAC/ UAC (Congo)</i>
<i>Koumassi Dégla Hervé</i>	<i>Prof. LACEEIDE/ UAC (Bénin)</i>
<i>Hamma Yaouba</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. Université de 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. Université de 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. Darmstadt (Germany)</i>
<i>Jean-François Delège</i>	<i>Prof. Univ. de Liège (Belgique)</i>
<i>Meriam Gaaloul</i>	<i>Faculty of Architecture La Cambre Horta - ULB (Belgique)</i>

Préface



Lorsque nous pensons au changement climatique, nous avons l'habitude de penser à la quantité d'eau - sécheresse, inondations, précipitations extrêmes et autres choses du genre. Le changement climatique est tout aussi étroitement lié aux problèmes liés à la qualité de l'eau, et il ne suffit pas que l'eau soit simplement là, elle doit être durable." -- Anna Michalak, professeur d'écologie mondiale à la Carnegie Institution for Science à Stanford, Californie, dans le New York Times.

L'eau est une nécessité de la vie humaine, et tout le monde mérite d'avoir accès à une eau propre et salubre. Après tout, les humains sont constitués d'environ 60 % d'eau.

Malheureusement, le changement climatique met en péril la qualité et la salubrité de notre eau. Un temps plus chaud provoque l'évaporation d'une plus grande quantité d'eau, ce qui permet à l'air de retenir plus d'eau. Cela ouvre la voie à des pluies plus abondantes et à des inondations, ce qui diminue la qualité de notre eau et augmente les risques pour la santé.

- **Inondations :** *Le changement climatique peut entraîner des précipitations plus abondantes et une augmentation des inondations. Les eaux de crue peuvent être composées d'une variété de contaminants nocifs. Dans certains cas, les inondations peuvent remettre en cause les systèmes de drainage ou de traitement des eaux usées d'une région, augmentant ainsi notre risque d'exposition aux bactéries, parasites et autres toxines malsaines. Cela peut contaminer l'eau que nous buvons avec les cultures et les autres aliments que nous mangeons.*
- **Eaux plus chaudes :** *À mesure que la température de la terre augmente, la température des eaux de surface des lacs et des océans augmente également. Des eaux plus chaudes créent un environnement plus hospitalier pour la croissance de certaines algues nuisibles et d'autres microbes. Certaines algues produisent des toxines qui sont nocives lorsqu'elles sont ingérées. Non seulement cela contamine notre eau, mais aussi les poissons que nous mangeons.*

L'accès à l'eau potable est un droit humain fondamental, mais certaines communautés portent le fardeau inéquitable de l'eau insalubre. Les enfants sont particulièrement sensibles aux maladies d'origine hydrique parce qu'ils sont absorbants plus d'eau par poids corporel que les adultes et que leurs systèmes organiques sont encore en développement. Les personnes âgées peuvent être moins résilientes parce que beaucoup ont des maladies chroniques préexistantes qui affaiblissent leur système immunitaire. L'infrastructure vieillissante de notre système d'approvisionnement en eau expose les communautés à faible revenu à un risque d'exposition plus élevé, car ces communautés peuvent ne pas disposer de ressources pour résoudre le problème. Notre infrastructure de protection contre les inondations doit également être équipée pour protéger toutes les communautés. Prenons l'exemple de l'ouragan Katrina : ce n'est pas l'ouragan lui-même qui a provoqué des destructions massives, mais les inondations qui ont supprimé des dommages matériels,

L'eau est l'une des ressources les plus importantes au monde. Elle est au cœur de l'agriculture, qui représente 72 % des prélèvements mondiaux d'eau douce, et d'autres secteurs économiques. Il est essentiel de réaliser l'Agenda 2030 pour le développement durable. Bien qu'il y ait une prise de conscience croissante de l'importance de l'eau, des actions plus efficaces, intégrées et coordonnées, associées à une forte volonté politique pour reconnaître l'eau de manière holistique afin d'atteindre tous les objectifs de développement durable (ODD) sont toujours nécessaires.

Les gouvernements et les autres parties prenantes ont reconnu que l'eau, l'assainissement, la santé, les écosystèmes, les océans, l'énergie, les systèmes alimentaires et la nutrition sont interdépendants et qu'il faut s'attaquer à la tendance croissante des pertes causées par les catastrophes liées à l'eau, en accordant une attention particulière aux personnes en situation de vulnérabilité. situations, y compris les petits exploitants agricoles, ne laissant personne de côté.

Il est urgent d'examiner comment traiter au mieux ces problèmes interdépendants et de comprendre pourquoi et comment les ressources en eau doivent être utilisées pour atteindre les objectifs sociaux, économiques et environnementaux intégrés dans les stratégies nationales de développement.

Nouredine Gaaloul

Professeur de l'Enseignement Supérieur Agricole (Université de Carthage – IRESA-INRGREF)

Fondateur et Rédacteur en Chef de la Revue Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement

Président L'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement en Tunisie (ASTEE ^{Français})

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
07 Volumes, 22 Numéros, (350 Articles) et 1 livre



*Livre (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 (vii) : 4 Numéros (32. Articles) Eau–Santé–Climat 2022

Numéro 1 – Mars 2022 (7 Articles) Changement Climatique : Quels effets sur notre santé ?

Numéro 2 – Juin 2022 (10 Articles) Impacts du Changement Climatique sur l'Eau, les Ecosystèmes et la Santé Humaine

Numéro 3 – Septembre 2022 (7 Articles) Eau, Climat, Santé, Inégalités : Quelles Solutions

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

Volume (vi) : 4 Numéros (31 Articles) Eau–Agriculture–Climat 2021

Numéro 1 – Avril 2021 (11 Articles) Face aux enjeux climatiques et alimentaires : Réinventer les relations Eau-Agriculture-Climat

Numéro 2 – Juin 2021 (6 Articles) Changement climatique, eau, agriculture - Quelles trajectoires ?

Numéro 3 – Septembre 2021 (6 Articles) Changement Climatique, Eau et Agriculture Vers des Systèmes Résilients

Numéro 4 – Décembre 2021 (8 Articles) Changement Climatique, Eau et Agriculture : Quelles Stratégies ?

Volume (v) : 2 Numéros (27 Articles) Eau–Climat 2020

Numéro 1 – Septembre 2020 (14 Articles) Ressources en Eaux et Changements Climatiques

Numéro 2 – Décembre 2020 (13 Articles) Gestion Intégrée des Ressources en Eau et Changement Climatique

Volume (v) : 2 Numéros (68 Articles) Eau–Energie–Climat 2019

Numéro 1 – Décembre 2019 (56 Articles) Gestion Intégrée des Ressources en Eaux

Numéro 2 – Décembre 2019 (12 Articles) Énergies Renouvelables Et changements climatiques

Volume (iii) : 3 Numéros (103 Articles) Eau–Environnement–Climat 2018

Numéro 1 – Avril 2018 (62 Articles) Gestion des Ressources en Eau

Numéro 2 – Août 2018 (34 Articles) Sciences de l'Environnement

Volume (ii) : 5 Numéros (53 Articles) Eau–Société–Climat 2017

Numéro 1 – Février 2017 (17 Articles) Caractérisation qualitative et quantitative des ressources en eau

Numéro 2 – Avril 2017 (8 Articles) Évaluation des ressources en eau sous les pressions de l'humanité et des changements climatiques

Numéro 3 – Juin 2017 (9 Articles) Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques

Numéro 4 – Août 2017 (8 Articles) Modélisation de l'impact des changements anthropiques et climatiques sur les ressources en eau

Numéro 5 – Octobre 2017 (11 Articles) Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie

Volume (i) : 3 Numéros (36 Articles) Eau–Climat 2014

Numéro 1 – Avril 2014 (17 Articles) Ressources en Eaux de Surface en Région Méditerranéenne

Numéro 2 – Août 2014 (8 Articles) Ressources en Eaux Souterraines en Région Méditerranéenne

Numéro 3 – Décembre 2014 (11 Articles) Changements Climatiques en Région Méditerranéenne

Copyright © 2022 – Jistee Tous droits réservés

Analyse prospective climatique dans un contexte de changements climatiques : Cas du bassin versant du N'zi (Bandama, Côte d'Ivoire)

Asaph Yahot Joël Ngangouin¹, Amani Michel Kouassi² And Khadara Diarrassouba³

1 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Ecole Doctorale Polytechnique (Côte d'Ivoire).

2 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; (Côte d'Ivoire).

3 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), École Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG),(Côte d'Ivoire)

Résumé

La variabilité climatique, notamment pluviométrique et thermique, en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, n'est plus à démontrer. Cette étude a pour objectif d'analyser la variabilité des paramètres climatiques actuelles et leurs tendances aux horizons 2050 et 2100 dans le bassin versant du N'zi (Bandama). À cet effet, les données climatiques analysées (1961-2020) sont issues de treize stations de la société de développement et d'exploitation aéroportuaire, aéronautique et météorologique (SODEXAM) couvrant le bassin d'étude. Des données de projection des pluviométries et températures issues du modèle climatique régional RACMOT22T du projet Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) sur la zone Afrique (CORDEX Africa) avec le scénario RCP 8.5 ont été également utilisées. La méthodologie adoptée a consisté à mettre en évidence les indicateurs actuels et futurs de la variabilité climatique à travers l'indice de normalisation, la méthode de régression linéaire, les cumuls pluviométriques saisonniers et les moyennes thermométriques saisonnières. La variabilité climatique se manifeste par une dynamique régressive des pluies annuelles sur la période 1961-2020 mais avec une reprise de celles-ci sur la sous-période 1991-2020. Quant à la température annuelle, elle connaît une évolution progressive régulière sur la période 1961-2020 en général et la sous-période 1991-2020 en particulier. L'analyse des cumuls pluviométriques saisonniers sur la période de référence 1991 à 2020 révèle que la période saisonnière juillet-août-septembre (JAS) est la plus pluvieuse pour les climats subtropical (climat soudanais) et tropical humide (climat baouléen). Quant au climat subéquatorial (climat atléen de l'intérieur), la saison la plus pluvieuse est le trimestre avril-mai-juin (AMJ). Le trimestre le moins pluvieux est celui de janvier à mars (JFM) sur tout l'ensemble des trois zones climatiques traversées par le bassin versant du N'zi. Les températures moyennes saisonnières évaluées sur la période 1991-2020 ont mis en évidence deux extrêmes thermiques sur le bassin versant du N'zi. Le trimestre le plus froid sur l'ensemble du bassin est celui de juillet-août-septembre (JAS) alors que la saison la plus chaude correspond au trimestre janvier-février-mars (JFM). Les projections climatiques réalisées prévoient une augmentation de la température comprise entre +1,8 °C et +2,2 °C pour l'horizon 2050 et entre +3,8 °C et +4,2 °C pour l'horizon 2100. Les pluies révèlent des tendances à la baisse traduite des écarts allant de -14,5% à -17,6% à l'horizon 2050 et entre -26,5% et -32,3% à l'horizon 2100. Les impacts de ces conditions climatiques futures sur les ressources naturelles (eaux, forêts, etc.), les cultures, les activités économiques, etc. pourraient être considérables.

Mots clés : Prospective climatique, indicateurs climatiques, scénarios climatiques, N'zi (Bandama), Côte d'Ivoire.

Prospective climate analysis in a context of climate change: Case of the N'zi watershed (Bandama, Côte d'Ivoire)

Abstract:

The climatic variability, in particular rainfall and temperature, in West Africa in general and in Côte d'Ivoire in particular, is well established. This study aims to analyze the variability of current climate parameters and their trends for the 2050 and 2100 horizons in the N'zi (Bandama) watershed. To this end, the climatic data analyzed (1961-2020) come from thirteen stations of the airport, aeronautical and meteorological development and operation company (SODEXAM) covering the study area. Rainfall and temperature projection data from the climate model of the Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) project in the African zone (CORDEX Africa) with the RCP 8.5 scenario were also used. The methodology adopted consisted in highlighting the current and future indicators of climate variability through the standardization index, the linear regression method, seasonal rainfall accumulations and seasonal temperature averages. Climate variability is manifested by a regressive dynamic of annual rainfall over the period 1961-2020 but with a resumption of these over the sub-period 1991-2020. As for the annual temperature, it experiences a regular progressive evolution over the period 1961-2020 in general and the sub-period 1991-2020 in particular. The analysis of seasonal rainfall accumulations over the reference period (1991 to 2020) reveals that the seasonal period July-August-September (JAS) is the rainiest for the subtropical (Sudanese climate) and humid tropical (Baulean climate) climates. As for the subequatorial climate (African climate of the interior), the rainiest season is the quarter April-May-June (AMJ). The least rainy quarter is that from January to March (JFM) over all of the three climatic zones crossed by the N'zi watershed. The seasonal average temperatures assessed over the period 1991-2020 highlighted two thermal extremes in the N'zi watershed. The coldest quarter over the entire watershed is that of July-August-September (JAS) while the hottest season corresponds to the January-February-March quarter (JFM). The climate projections made predict a temperature increase of between +1.8°C and +2.2°C for the 2050 horizon and between +3.8°C and +4.2°C for the 2100 horizon. The rains reveal downward trends reflected in deviations ranging from -14.5% to -17.6% by 2050 and between -26.5% and -32.3% by 2100. impacts of these future climatic conditions on natural resources (water, forests, etc.), crops, economic activities, etc. could be considerable.

Key Words: Climate forecasting, climate indicators, climate scenarios, N'zi (Bandama), Côte d'Ivoire.

¹ Corresponding author: michel.kouassi@inphb.ci

INTRODUCTION

L'Afrique est considérée comme la région la plus vulnérable aux effets des changements climatiques du fait de la fragilité des économies. Pour autant il est encore délicat d'évaluer l'ampleur et la nature de ces changements à l'avenir, en particulier pour ce qui concerne les précipitations. Les modèles climatiques sont relativement satisfaisants pour prévoir le changement de température en Afrique. Dans son dernier rapport, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat [1] confirme qu'au cours du XXI^{ème} siècle, le réchauffement climatique en Afrique serait plus important qu'au niveau mondial. La hausse de la température moyenne entre 1980/99 et 2080/99 pourrait atteindre entre 3 et 4°C sur l'ensemble du continent, 1,5 fois plus qu'au niveau mondial. Cette hausse sera moins forte au sein des espaces côtiers et équatoriaux (+3°C) et la plus élevée dans la partie ouest du Sahara (+4°C). En revanche, des incertitudes demeurent sur les résultats des projections concernant les précipitations. L'Afrique du Nord, l'Afrique australe ou l'Afrique de l'Est figurent parmi les régions où l'incertitude est la moins forte. La côte méditerranéenne de l'Afrique, comme le pourtour méditerranéen dans son ensemble, pourrait connaître une diminution des précipitations (-15 à -20 %) entre 1980/99 et 2080/99. A l'autre extrémité du continent, l'hiver mais surtout le printemps en Afrique australe pourrait être également moins pluvieux. Dans la ceinture tropicale, les résultats des modèles montrent un accroissement de la pluviométrie en Afrique de l'Est, qui se prolonge dans la corne de l'Afrique. En revanche, aucune conclusion claire ne peut être tirée concernant le régime des précipitations en Afrique de l'Ouest.

Les simulations obtenues à partir de modèles climatiques, sur le climat des décennies à venir, indiquent que les tendances positives des températures observées depuis une trentaine d'années devraient se prolonger durant le XXI^{ème} siècle [1]. Le haut niveau de concordance parmi les modèles climatiques régionaux et mondiaux pour l'Afrique de l'Ouest permet d'établir avec un haut niveau de confiance qu'une augmentation escomptée de la température et une baisse de la pluviométrie se produiront de manière très vraisemblable [2]. Malgré les incertitudes sur la part de fiabilité que l'on peut accorder à ces simulations du climat futur, il est utile d'avoir une information sur les évaluations de ces projections au sein de nos régions. A défaut d'apporter des éléments opérationnels de réponse sur les impacts potentiels de ces changements climatiques, cela permettrait d'orienter la réflexion des mesures d'atténuation et d'adaptation, l'objectif étant à terme de minimiser le plus possible les impacts néfastes d'un changement climatique. En effet, toutes les démarches et outils soulignent que l'adaptation est un processus de long terme et l'expérience montre que c'est un apprentissage constant. Ainsi, l'adaptation peut mener à utiliser plusieurs exercices de prospective à la suite, ou au sein d'un même projet territorial, avec des angles et outils différents, et aussi à choisir des mesures d'adaptation qui changent avec le temps. Les prospectives aident donc à envisager ce temps long, qui nécessite souvent d'agir bien en amont des dysfonctionnements à venir. Les études prospectives sur les coûts des mesures à mettre en place face au changement climatique sont formelles, le coût de l'inaction est toujours supérieur au coût de l'action. En effet, l'étude des paramètres climatiques (pluie et température), de leur évolution observée au cours du dernier siècle et de leur évolution future probable dans le cadre des changements climatiques est d'un grand intérêt pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation. De même, les besoins d'information sur l'évolution du climat aux échelles régionale et locale constituent un grand sujet de débat [2]. Les changements climatiques sont susceptibles d'imposer des contraintes supplémentaires sur la disponibilité et l'accessibilité de l'eau.

En Côte d'Ivoire, les impacts de la variabilité climatique ont accentué le niveau de vulnérabilité des populations humaines et des ressources dont elles vivent. Elles leur imposent également des changements dans leurs modes de vie [3]. Les impacts de ces changements sont assez bien documentés sur les caractéristiques moyennes des régimes de pluie et de température à court terme [3-9]. Mais, ils le sont moins lorsqu'on s'intéresse aux projections à long terme [10-13]. Ces constats militent en faveur d'analyses prospectives climatiques en Côte d'Ivoire aux horizons proches et lointains. Pour les projections climatiques en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, les données CORDEX-Afrique ont démontré leur capacité d'application [2]. En effet, les projections climatiques ont été établies à partir d'expériences de modélisations régionales et mondiales. Les projections climatiques régionales futures sont de plus en plus utilisées comme outil dans l'élaboration d'activités relatives à l'adaptation, aux politiques et aux prises de décisions. De plus, il est essentiel qu'elles soient associées à des stratégies d'adaptation et prises de décisions au niveau local [2].

De ce fait, ce travail est une contribution à la connaissance de l'évolution du climat à l'échelle locale et régionale, dans le bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. En effet, le bassin versant du N'zi, étiré en latitude, est une zone de transition entre des climats différents. Le bassin est donc à cheval sur trois zones climatiques (climat subtropical au Nord, climat tropical humide au centre et climat subéquatorial au Sud). Ce bassin est donc représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire.

Ainsi, cette étude a pour objectif d'analyser la variabilité des paramètres climatiques actuelles et leurs tendances aux horizons 2050 et 2100 dans le bassin versant du N'zi (Bandama). Ce travail est basé sur deux principales hypothèses. La première admet une variabilité des paramètres du climat définis et utilisés au cours de cette étude (pluviométrie et température de l'air). La deuxième hypothèse suppose un scénario (RCP 8.5) où les politiques climatiques actuelles restent inchangées ; dans ce cas les activités anthropiques vont continuer d'impacter le climat futur. L'application d'un indice de normalisation et de la méthode de régression linéaire a permis d'analyser les variations climatiques à l'échelle interannuelle. Une analyse saisonnière a été effectuée sur la base des cumuls pluviométriques et des moyennes thermiques trimestriels. Les écarts de variations des différents indicateurs climatiques à partir des données climatiques passés (1991-2020) et futures (CORDEX) ont été appréciés aux horizons 2050 et 2100.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation de la zone d'étude

Le secteur d'étude est le bassin-versant du N'zi (Figure 1), sous-bassin du bassin-versant du fleuve Bandama. Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6° et 9°26' Nord. Le bassin-versant du N'zi-Bandama occupe une superficie de 35 500 km². La zone d'étude s'étend sur différentes régions climatiques allant de la région des savanes au Nord à la zone de forêt au Sud du bassin (Figure 1). Le régime subtropical (climat soudanais) se caractérise par deux saisons, une saison pluvieuse d'avril à octobre (7 mois) et une saison sèche de novembre à mars (5 mois) qui est accentuée par l'Harmattan. Ce climat correspond au climat tropical de transition. Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux. Ce régime caractérise le Nord du bassin et se situe au Nord du 8^{ème} parallèle Nord. Il est caractérisé par des précipitations moyennes (1951-2000) annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime humide (climat baouléen) se situe dans le centre du bassin. On observe un régime climatique à quatre saisons : une grande saison des pluies de mars à juin (4 mois), une petite saison sèche de juillet à août (2 mois), une petite saison des pluies commençant en septembre et s'achevant en octobre (2 mois) et une grande saison sèche du mois de novembre à février (4 mois). Ce type de climat fait la transition entre le climat subtropical et le climat subéquatorial. Ce climat est proche du climat subéquatorial par l'abondance des précipitations. Il est caractérisé par des précipitations moyennes annuelles (1951-2000) variant entre 1200 mm et 1600 mm. Le régime subéquatorial (climat attiéen de l'intérieur) qui est caractérisé par quatre (4) saisons ; la grande saison des pluies se situe entre mars et juin suivie d'une pause (petite saison sèche) entre juillet et août. La petite saison pluvieuse intervient dans le mois de septembre pour prendre fin au mois de novembre. Les mois de novembre, décembre, janvier et février constituent la grande saison sèche. Ce régime caractérise le Sud du bassin en dessous du 7^{ème} parallèle Nord. Il est caractérisé par des précipitations moyennes annuelles (1951-2000) supérieures à 1600 mm.

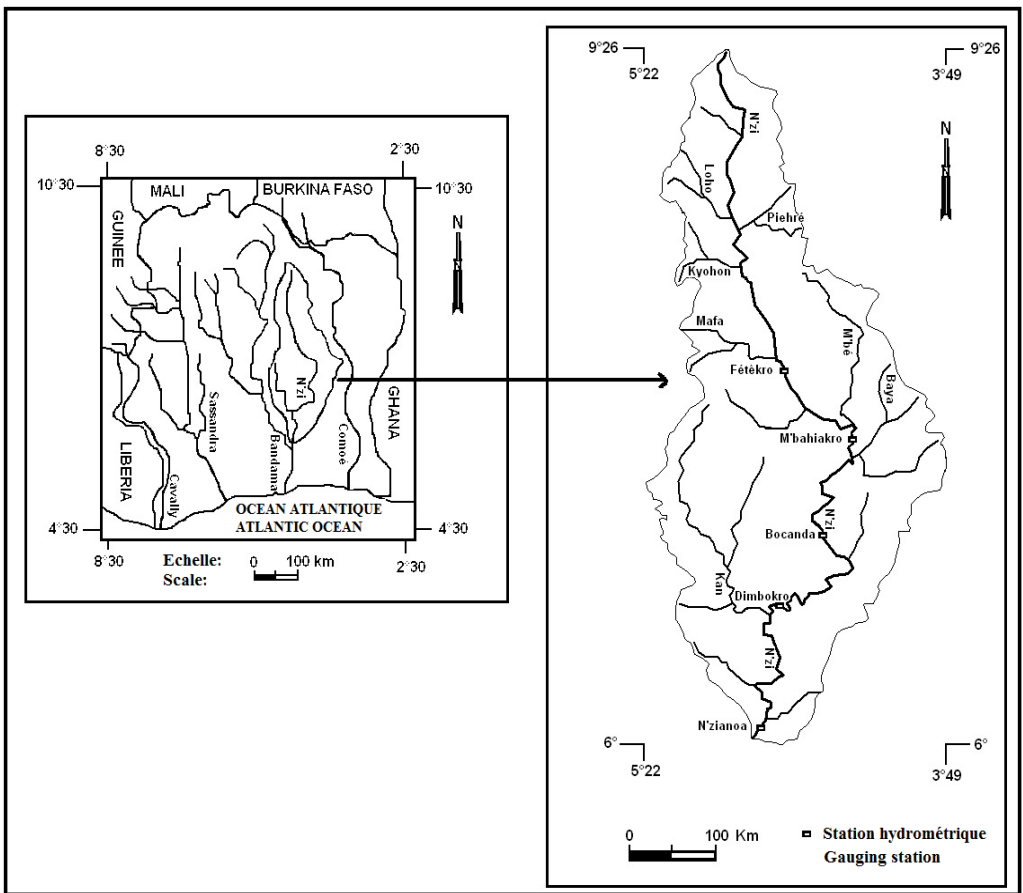


Figure 1 - Présentation du bassin-versant du N'zi (Bandama)

Données de l'étude

Les données climatiques passées utilisées dans cette étude concernent la pluviométrie et la température de l'air. Elles ont été collectées auprès du service de météorologie nationale (SODEXAM : Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique). Les différentes données sont à l'échelle mensuelle et couvrent la période 1961-2020. Les données pluviométriques ont été collectées au niveau des stations de Tafiré, Niakaramandougou, Katiola, Dabakala, Bouaké, Tiébissou, Bocanda, M'bahiakro, Daoukro, Bongouanou, Dimbokro et Tiassalé (Figure 2). En ce qui concerne les températures, elles ont été collectées au niveau des stations de Korhogo pour le Nord du bassin, Bouaké pour le Centre du bassin et Dimbokro pour le Sud du bassin.

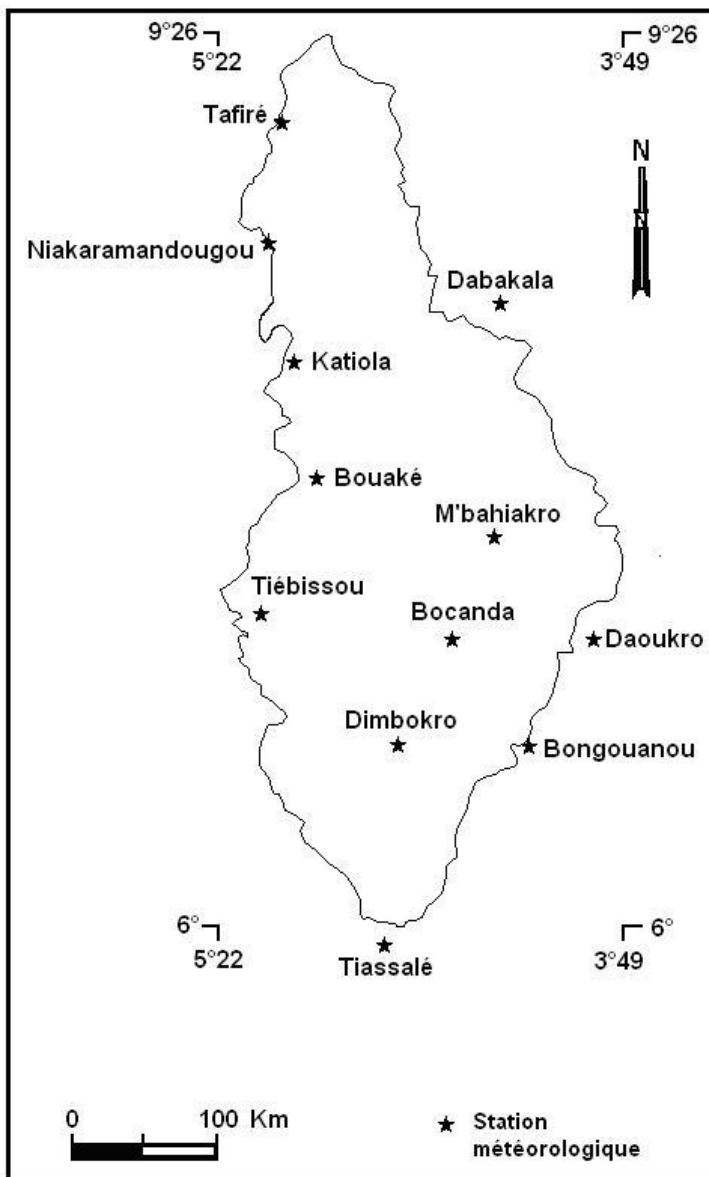


Figure 2 - Stations climatiques retenues (bassin versant du N'zi)

METHODES**Méthodes d'étude du climat présent**

Les différents paramètres climatiques (pluie et température) ont été analysés à partir des valeurs moyennes calculées (méthode des polygones de Thiessen) en fonction des zones climatiques traversées par le bassin versant du N'zi (Bandama) sur la base des travaux de Kouao *et al.* [14-15]. Ainsi, on a la répartition suivante des stations climatiques en fonction des régimes climatiques :

- climat subtropical (climat soudanais) : Korhogo, Tafiré et Niakara ;
- climat tropical humide (climat baouléen) : Bouaké, Tiébissou, M'bahiakro, Katiola et Dabakala ;
- climat subéquatorial (climat atliéen de l'intérieur): Dimbokro, Bocanda, Bongouanou, Daoukro et Triassalé.

Indice standard de normalisation

Pour caractériser le climat d'un lieu donné, les climatologues utilisent des normales climatiques. En effet, ils calculent les valeurs moyennes sur 30 ans des principaux paramètres météorologiques (valeur préconisée par l'Organisation Météorologique Mondiale). Le choix d'une durée de 30 ans pour caractériser un climat permet de disposer d'un nombre d'observations suffisamment grand pour que le résultat soit robuste. Cette durée est également bien adaptée pour s'affranchir de la variabilité interannuelle du climat (les variations d'une année sur l'autre) et pour mettre en évidence d'éventuelles évolutions du climat. La moyenne d'un paramètre météorologique sur une durée de 30 ans est appelée « normale » [16]. En vue d'apprécier l'évolution du climat en passant de la période normale 1961-1990 à la période normale 1991-2020, la méthode de l'indice standard de normalisation a été appliquée aux données pluviométriques et thermométriques sur la période 1961-2020. L'indice standard de normalisation (I_i) a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires d'une variable donnée. Il se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation 1 :

$$I_i = \frac{X_i - X_0}{\mu} \quad (1)$$

Avec :

- X_i : valeur de la variable de l'année i ;
- X_0 : valeur moyenne interannuelle de la variable sur la période 1961-1990 ;
- μ : valeur interannuelle de l'écart-type de la variable sur la période 1961-1990.

Méthode de la régression linéaire

L'analyse de l'évolution des paramètres climatique étudiés (pluie et température) sur la période 1991-2020 a nécessité l'application de la méthode de la régression linéaire. Cette méthode vise à déterminer, par la régression linéaire, l'évolution des paramètres climatiques. L'analyse de l'évolution des températures permet de déterminer d'une part l'influence du réchauffement global sur le réchauffement local et, d'autre part, la concordance entre la tendance des températures et celles des précipitations [17]. Elle consiste en une représentation graphique d'une droite de régression de type affine qui présente l'évolution linéaire d'un paramètre climatique (Y) en fonction du temps (X) et permet de déceler la tendance temporelle [18-19]. L'équation de la droite de tendance est sous la forme suivante (équation 2) :

$$Y = aX + b \quad (2)$$

où :

a est le coefficient directeur et représente la pente, et b une constante.

- Si $a > 0$, on a une augmentation ;
- Si $a < 0$, on a une diminution

La qualité du modèle de régression est indiquée par le coefficient R^2 . Il représente la proportion des points de mesures qui est expliquée par la régression linéaire. Cette valeur est comprise entre 0 (modèle n'explique rien) et 1 (le modèle est parfait et tous les points sont sur la droite de régression). Des classes du coefficient de détermination exprimant l'importance de la variabilité interannuelle sont définies comme suit :

- $R^2 < 0,1$: extrêmement importante ;
- $0,1 < R^2 < 0,2$: très importante ;
- $0,2 < R^2 < 0,3$: importante ;
- $R^2 > 0,3$: moyenne.

Variations saisonnières des indicateurs climatiques d'impact

L'analyse saisonnière des paramètres climatiques (pluie et température) a été réalisée sur la période 1991-2020. Les cumuls saisonniers des précipitations, hauteurs d'eau cumulées sur les saisons ont été utilisées comme indicateurs pluviométriques pour l'analyse saisonnière des précipitations. La température moyenne saisonnière est définie comme étant la moyenne des températures moyennes mensuelles sur une saison donnée. Elle a été utilisée comme indicateur thermique dans saisonnière des températures. Dans le cadre de cette étude, chaque saison définie correspond à trois mois consécutifs, dont le découpage temporel est le suivant :

- trimestre 1 : janvier-février-mars (JFM) ;
- trimestre 2 : avril-mai-juin (AMJ) ;
- trimestre 3 : juillet-août-septembre (JAS) ;
- trimestre 4 : octobre-novembre-décembre (OND).

Méthodologie d'étude du climat futur

Des données climatiques futures de pluies mensuelles et de températures moyennes mensuelles ont été utilisées. Elles couvrent les périodes 2036-2065 pour l'horizon 2050 et 2071-2100 pour la fin du 21^{ème} siècle. Ces données proviennent du programme CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) et ont été prétraitées (logiciel R-STUDIO) et corrigées par la méthode delta à partir des données passées de la SODEXAM (1991-2020). Il s'agit des données du modèle climatique régional RACMOT22T du royal Netherlands meteorological Institute et forcé par le modèle climatique global EC-EARTH. Il s'agit des données du modèle climatique régional RACMOT22T du royal Netherlands meteorological Institute (KNMI : Royal Dutch Meteorological Institut) et forcé par le modèle climatique global ICHEC-EC-EARTH (CORDEX Afrique) avec une résolution spatiale de $0,44^{\circ} \times 0,44^{\circ}$ qui a la particularité d'avoir les trois scénarii (RCP 2.6, 4.5 et 8.5). Le 5^{ème} rapport du GIEC s'appuie sur de nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES). Les SRES ont laissé la place aux RCP (Représentative Concentration Pathway). La logique de travail est inversée. Au lieu de partir des projections d'évolutions socio-économiques pour déterminer les émissions de GES, on fixe en entrée des scénarios contrastés d'émission de GES desquels on traduit les chemins socioétaux qui amèneront à ces émissions de GES. Cela a abouti à 4 scénarios de forçage radiatif. Pour se faire, plusieurs scénarii dénommés RCP (Représentative Concentration Pathway) sont généralement projetés. Ce sont des scénarii de trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300. Ces scénarii ont été établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son cinquième rapport, AR5 (IPCC Fifth Assessment Report 5). Un scénario RCP permet de modéliser le climat futur. Dans l'AR5, sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail. Les quatre scénarii sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 : le scénario RCP-2.6 correspond à un forçage de $+2,6 \text{ W/m}^2$, le scénario RCP-4.5 correspond à un forçage de $+4,5 \text{ W/m}^2$, et de même pour les scénarii RCP-6 et RCP-8.5. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. Les données futures utilisées proviennent du scénario RCP 8.5 qui est le scénario retenu et présenté comme le scénario le plus pessimiste. Selon ce scénario, on ne change rien et les émissions de gaz à effet de serre (GES) continuent d'augmenter au rythme actuel. Les données utilisées ont servi à l'étude du climat présent et futur dans le bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Les écarts de variations des paramètres climatiques (précipitations et température) par rapport à la période de référence (1991-2020) ont été évalués aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle sur les horizons 2050 et 2100.

ANALYSE ET DISCUSSION

Analyse des régimes climatiques présents

Analyse des régimes annuels du climat présent : L'analyse des indices standardisés de précipitations (SPI) montrent que la pluviométrie de la période de référence 1991-2020 est relativement plus faible que celle de la période normale 1961-1990 dans les trois zones climatiques traversés par le bassin versant du N'zi (Figure 3). En effet, les SPI sont à dominance positive sur la période 1961-1990 comparativement à la période 1991-2020 où il est constaté une prédominance des SPI négatifs. Les deux dernières décennies sont caractérisées par des SPI quasi totalement négatifs. Cependant, il observé une évolution des SPI vers zéro voir des valeurs positives au cours de ces dernières décennies. Ce constat a suscité la réalisation d'une analyse de régression linéaire des précipitations sur la période 1991-2020. Les résultats montrent dans l'ensemble que les précipitations annuelles au niveau du bassin versant du N'zi connaissent une relative hausse pour toutes les trois zones climatiques étudiées sur la période 1991-2020 (Figure 4). Cette tendance à la hausse des précipitations varie d'une zone climatique à une autre. En effet, le bassin versant connaît une très importante hausse dans les zones climatiques baouléenne (climat tropical humide) ($R^2 = 0,11$) et attiéenne (climat subéquatorial) ($R^2 = 0,18$) et une importante hausse dans le climat soudanais (climat subtropical) ($R^2 = 0,24$). Au niveau du climat soudanais (climat subtropical), la tendance est d'une augmentation de 58 mm/décennie. Elle est estimée à 80 mm/décennie au niveau du climat baouléen (climat tropical humide) et 84 mm/décennie dans l'attiéenne de l'intérieur (climat subéquatorial). Les résultats de la régression linéaire ont confirmé ceux des SPI. Ces résultats mettent en évidence un retournement de tendance par rapport à la période 1961-1990. En effet, il est observé une reprise des précipitations au cours de la période 1991-2020.

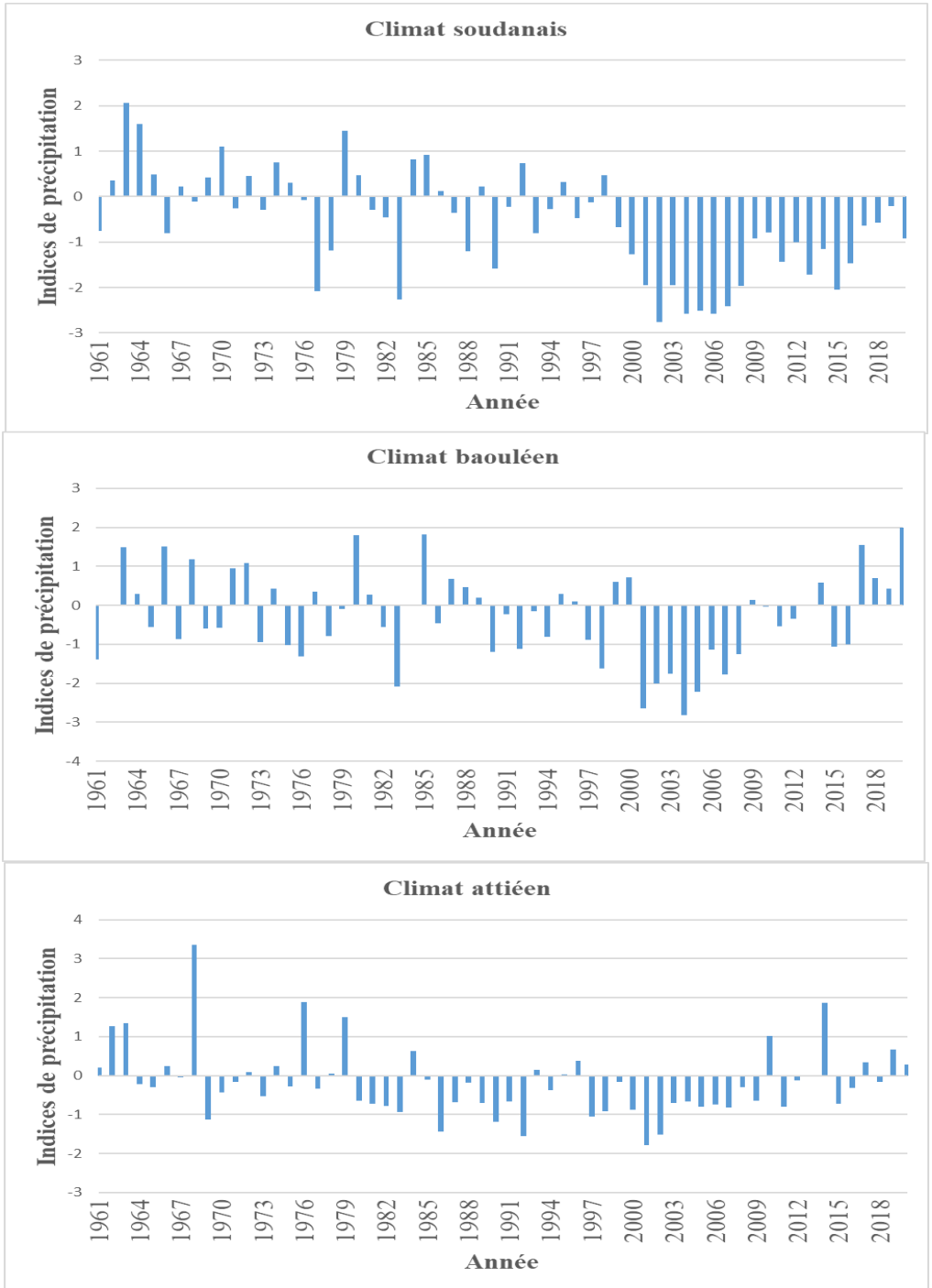


Figure 3 - Indices normalisés de précipitations dans le bassin versant du N'zi (1961-2020)

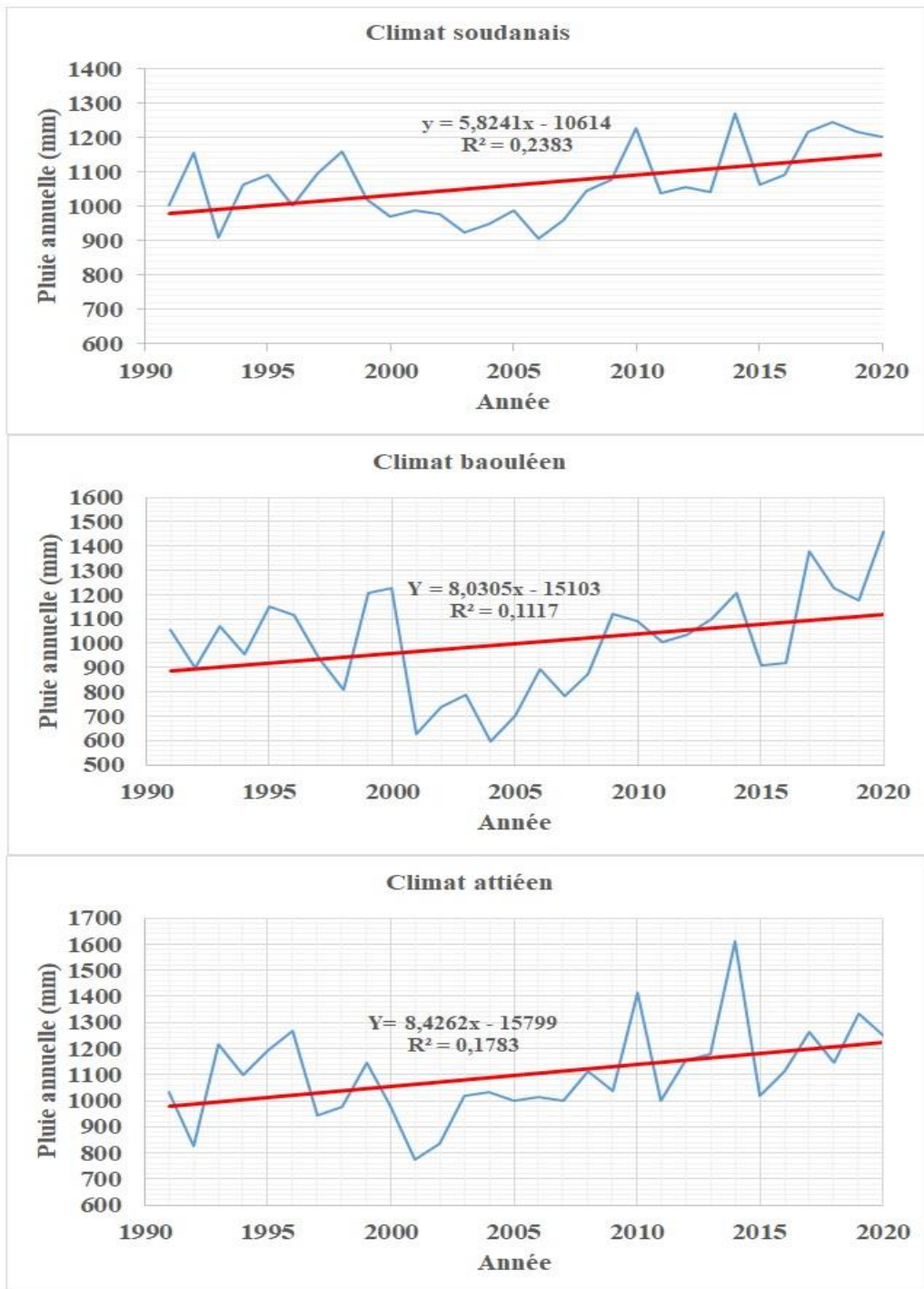


Figure 4 - Evolutions des précipitations dans le bassin versant du N'zi (1991-2020)

L'analyse des indices standardisés de température (STI) montrent que la température moyenne annuelle enregistrée sur la période de référence 1991-2020 connaît une hausse par rapport à la période normale 1961-1990 dans les trois zones climatiques analysés et couvrant le bassin versant du N'zi (Figure 5). En effet, les STI sont tous positifs sur la période 1961-1990 comparativement à la période 1991-2020 où il est constaté une prédominance des STI négatifs. Il est constaté une croissance plus ou moins régulière des STI sur la période 1961-2020. La réalisation d'une analyse de régression linéaire des températures sur la période 1991-2020 a mis en évidence une tendance régulière à la hausse des températures moyennes annuelles au niveau des trois zones climatiques traversés par le bassin du N'zi (Figure 6). Cette tendance croissante des températures varie d'une zone climatique à une autre. En effet, le bassin versant connaît une importante hausse de la température moyenne annuelle dans le climat soudanais (climat subtropical) ($R^2 = 0,30$) alors que la baisse est de niveau moyen dans les zones climatiques baouléenne (climat tropical humide) ($R^2 = 0,38$) et attiéenne (climat subéquatorial) ($R^2 = 0,49$). Du Nord au Sud et sur la période de trente ans (1991-2020), cette tendance progressive est de $+1,05$ °C dans le climat soudanais (climat subtropical), $+1$ °C au niveau du climat baouléen (climat tropical humide) et $+1,62$ °C dans l'attiéenne de l'intérieur (climat subéquatorial). Les résultats de la régression linéaire ont aussi confirmé ceux des STI. Il est important de relever que les températures les moins chaudes sont observées au centre du bassin (climat tropical humide ou baouléen) alors que les plus chaudes sont observées au Sud du bassin.

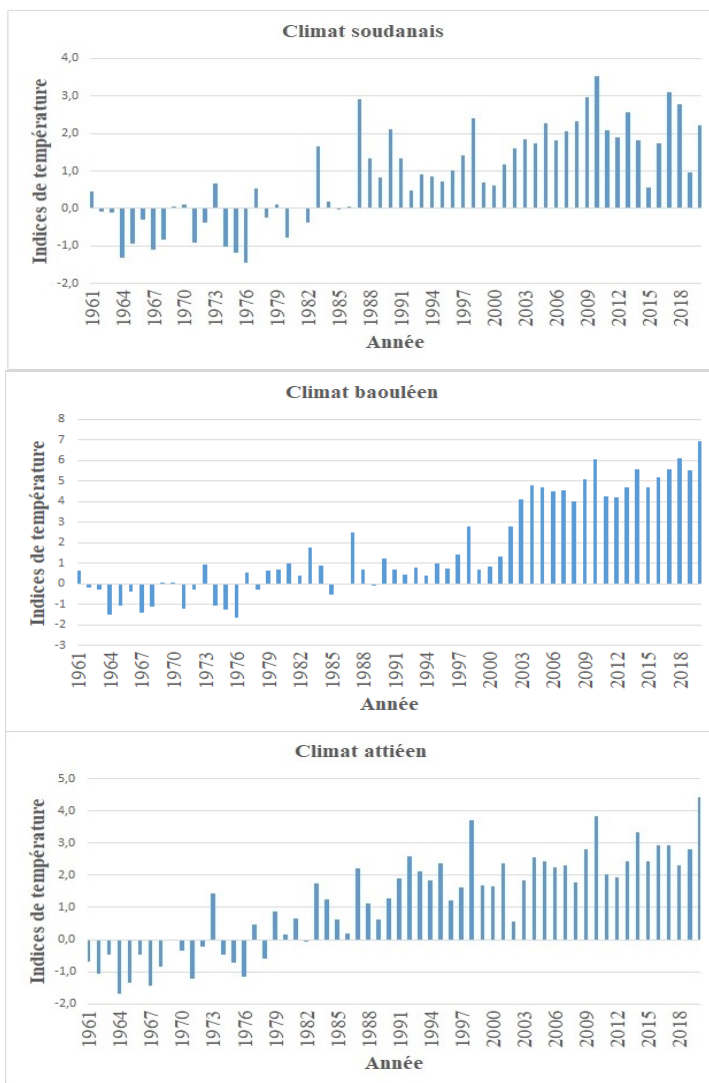


Figure 5 - Indices normalisés de température dans le bassin versant du N'zi (1961-2020)

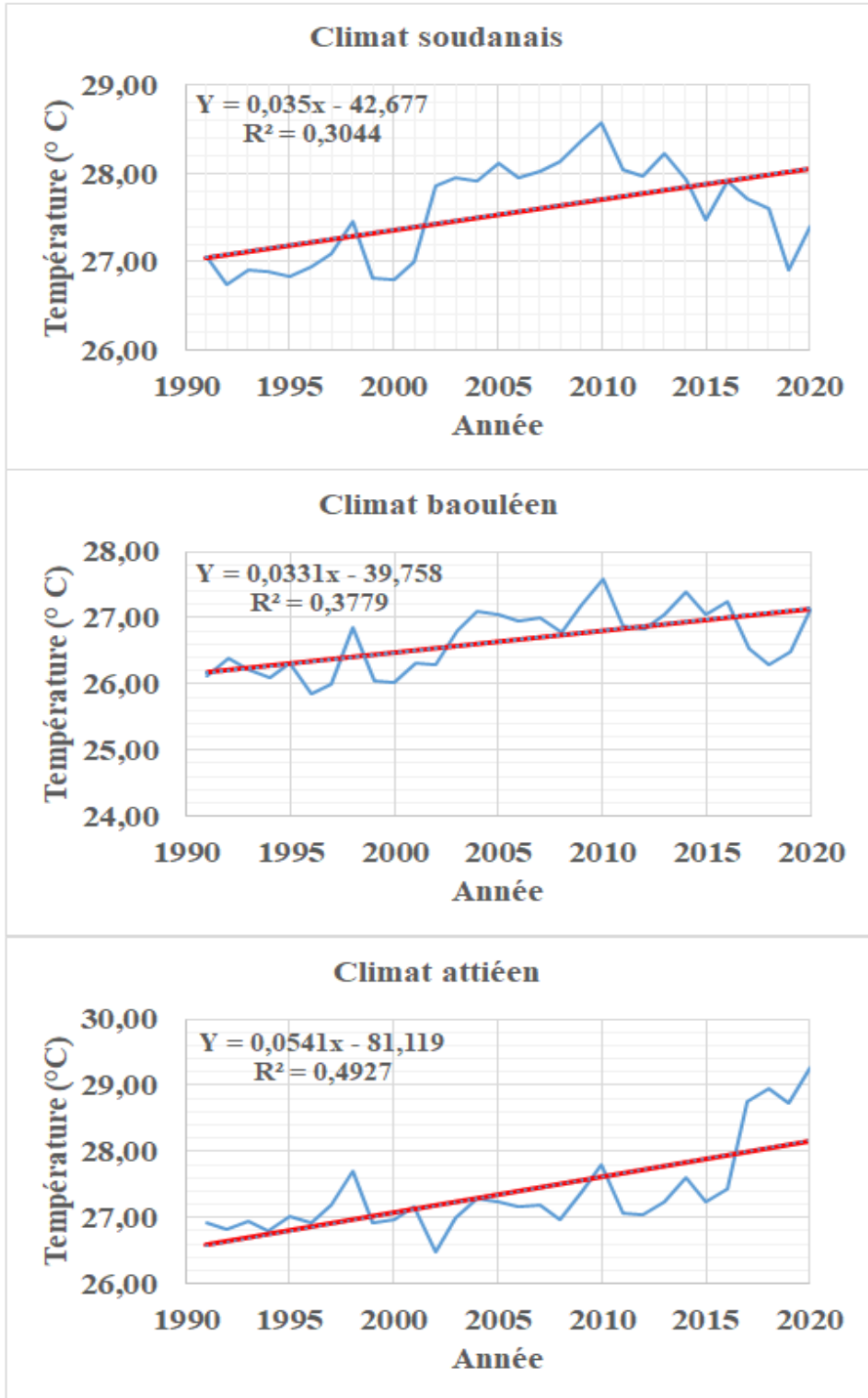


Figure 6 - Evolutions des températures dans le bassin versant du N'zi (1991-2020)

Analyse des régimes saisonniers du climat présent

L'analyse des cumuls pluviométriques trimestriels sur la période de référence 1991 à 2020 (Figure 7) révèle que le trimestre juillet à septembre (JAS) est le plus pluvieux pour les climats soudanais ou subtropical (667 mm) et baouléen ou climat tropical humide (404 mm). Le trimestre AMJ (393 mm) dans le climat tropical humide ou baouléen a une pluviométrie très proche de celle du JAS. Quant au climat subéquatorial ou attiéen de l'intérieur, la saison la plus pluvieuse est le trimestre avril à juin (AMJ) (498 mm). Le trimestre le moins pluvieux est celui de janvier à mars (JFM) sur tout l'ensemble des trois zones climatiques avec respectivement 68 mm pour le climat subtropical ou soudanais, 135 mm pour le climat tropical humide ou baouléen et 167 mm pour le climat subéquatorial ou attiéen de l'intérieur. Les précipitations saisonnières à travers les cumuls pluviométriques trimestriels présentent globalement une grande variabilité d'une saison sur l'autre dans le bassin versant du N'zi sur la période 1991-2020. Cette variabilité est plus marquée au niveau des régimes subtropicaux (soudanais) et subéquatoriaux (attiéen de l'intérieur).

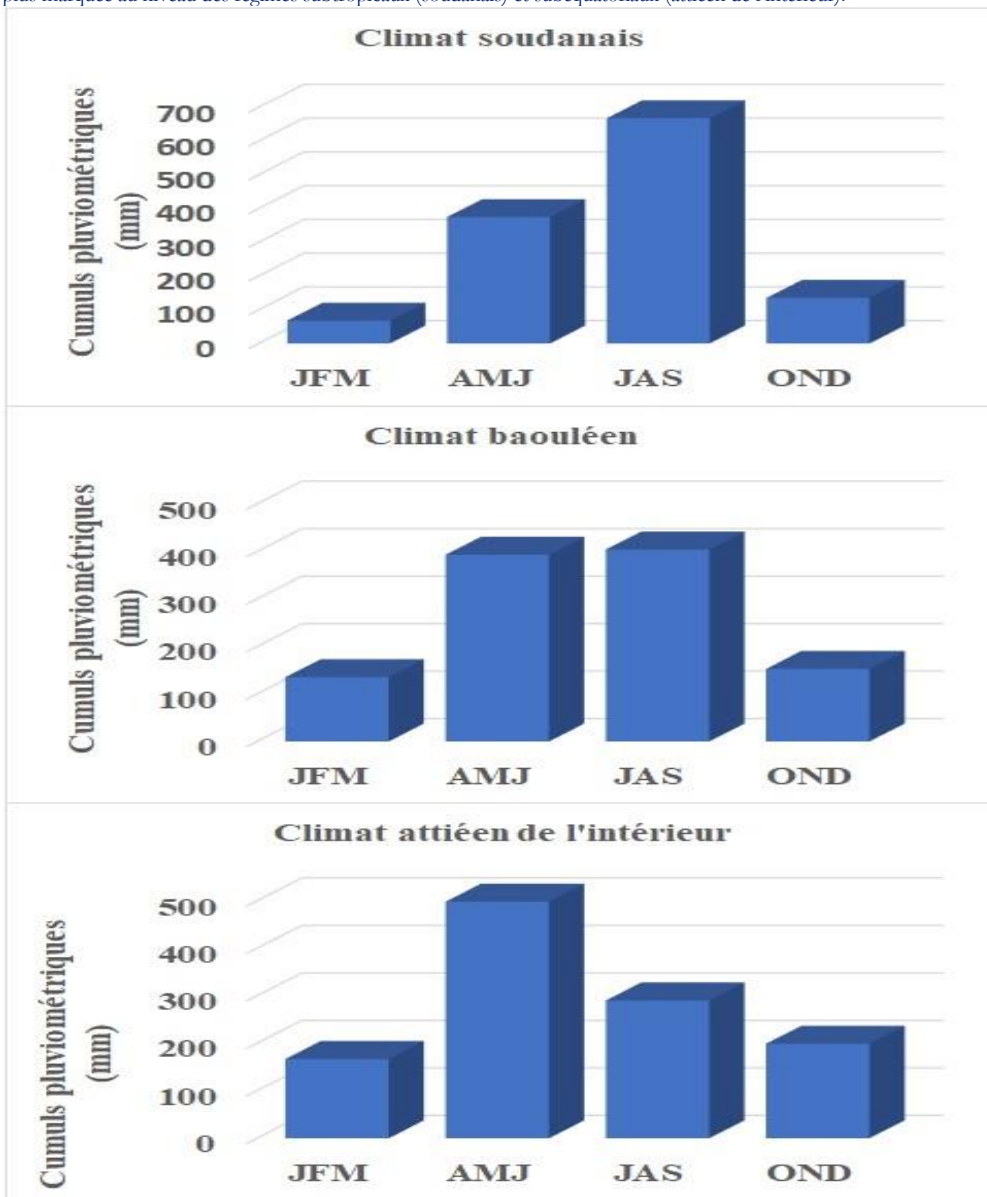


Figure 7 - Variations des cumuls pluviométriques trimestriels dans le bassin versant du N'zi (1991-2020)

Les températures moyennes saisonnières évaluées sur la période 1991-2020 (Figure 8) ont mis en évidence deux extrêmes thermiques sur le bassin versant du N'zi. Le trimestre le plus froid sur l'ensemble du bassin est celui de juillet-août-septembre (JAS) avec des valeurs partant de 25,20 °C dans le climat baouléen (climat tropical humide) à 26,85 °C pour le climat attiéen (climat subéquatorial). Quant à la saison la plus chaude sur les trois zones climatiques, elle correspond au trimestre janvier-février-mars (JFM) avec des valeurs allant de 27,55 °C (climat tropical humide ou baouléen) à près de 29 °C (climat subéquatorial ou attiéen de l'intérieur).

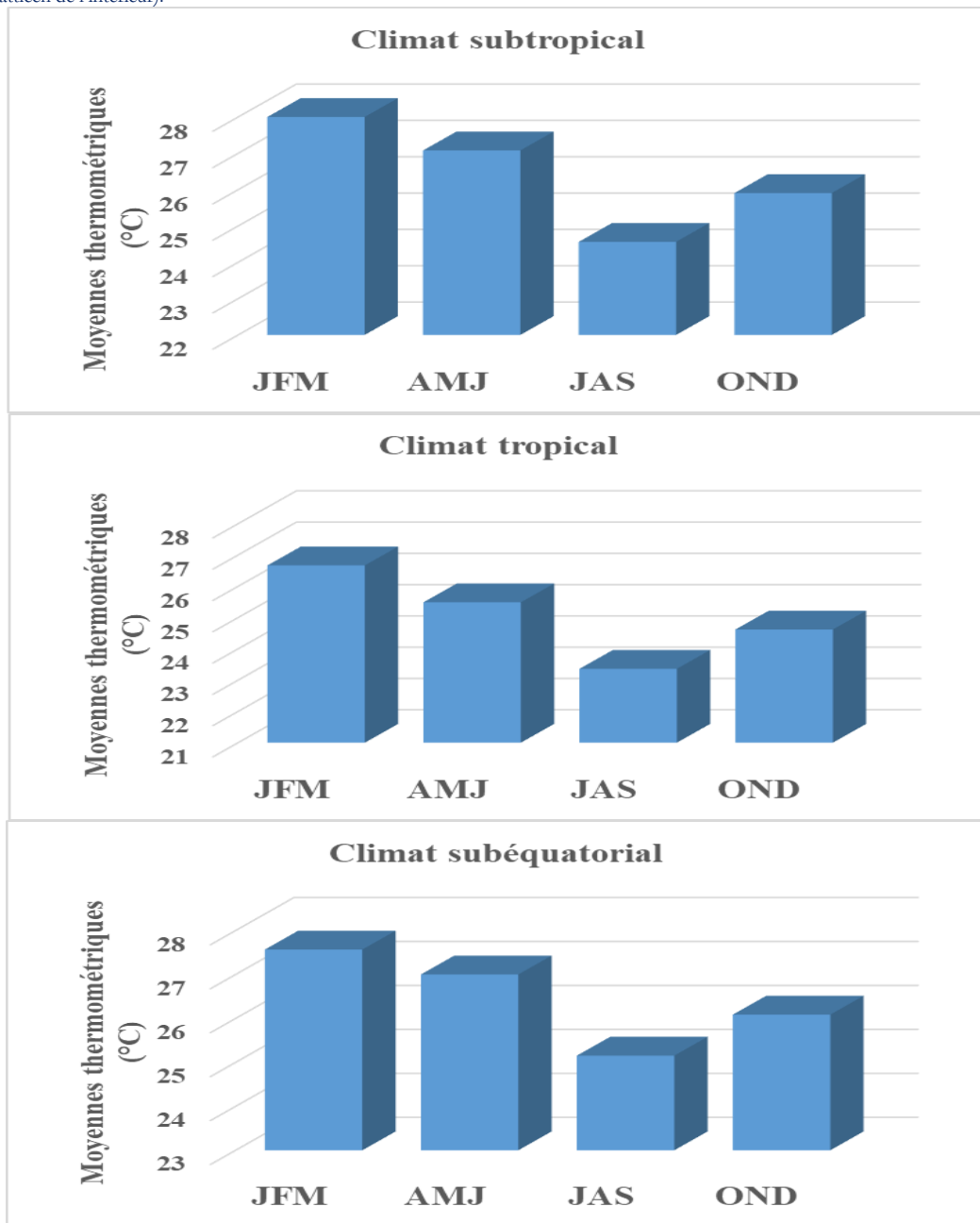


Figure 8 - Variations des moyennes thermométriques trimestriels dans le bassin versant du N'zi (1991-2020)

Analyse des tendances du climat futur

Analyse des régimes annuels du climat futur : Au niveau du bassin versant du N'zi, une diminution des précipitations annuelles est constatée aux périodes futures avec des écarts pluviométriques (par rapport à la période de référence 1991-2020) fluctuant entre -14,5% (climat subéquatorial ou attiéen de l'intérieur) et -17,6% (climat subtropical ou climat soudanais) à l'horizon 2050 et entre -26,5% (climat subéquatorial ou attiéen de l'intérieur) et -32,3% (climat subtropical ou soudanais) à l'horizon 2100 pour le scénario RCP 8.5 (correspondant à un scénario sans politique climatique) (tableaux 1 et 2). Cette baisse serait plus ressentie dans le Nord du bassin (climat soudanais ou subtropical) que les parties centre (climat tropical humide ou baouléen) et sud (climat subéquatorial ou climat attiéen de l'intérieur). Cette baisse pluviométrique est estimée à une hauteur variant entre 188 et 371 mm. Pour le scénario RCP 8.5 appliqué au cours de cette étude au niveau du bassin versant du N'zi, les projections climatiques montrent une poursuite du réchauffement annuel jusqu'aux années 2100 quels que soit les horizons et les zones climatiques (Tableau 1 et 2). En effet, la température moyenne annuelle progresse et l'écart à la référence (moyenne sur la période 1991-2020) de la température moyenne annuelle varie selon les périodes et les régimes climatiques. Au milieu du 21^{ème} siècle (horizon 2050), le bassin versant du N'zi connaîtrait des températures moyennes annuelles un peu supérieures aux températures moyennes annuelles observées sur la période de passé récent (1991-2020). Cette augmentation des températures varie entre +1,8 °C (climat soudanais ou subtropical) et +2,2 °C (climat attiéen de l'intérieur ou subéquatorial) avec une moyenne de +2,03 °C. Au cours de la période 2071-2100, la hausse de la température moyenne annuelle oscille entre +3,8 °C (climat soudanais ou subtropical) et +4,2 °C (climat attiéen de l'intérieur ou subéquatorial) avec une moyenne de 4 °C correspondant à la hausse observée au niveau du climat baouléen ou climat tropical humide.

Tableau 1 - Ecarts pluviométriques et thermométriques annuels à l'horizon 2050

	Climat subtropical	Climat tropical	Climat subéquatorial
Précipitations(mm)	-201,7	-203,0	-188,5
Précipitations (%)	-17,6	-16,3	-14,5
Température(°C)	+1,8	+2,1	+2,2
Température (%)	6,5	7,6	8,1

Tableau 2 - Ecarts pluviométriques et thermométriques annuels à l'horizon 2100

	Climat subtropical	Climat tropical	Climat subéquatorial
Précipitations(mm)	-371,5	-351,0	-343,4
Précipitations (%)	-32,3	-28,2	-26,5
Température(°C)	+3,8	+4,0	+4,2
Température (%)	13,8	6,5	15,1

Analyse des régimes saisonniers et mensuels du climat futur

L'évolution saisonnière de l'écart relatif du cumul de précipitation par horizon temporel pour le scénario RCP 8.5 est très contrastée (Tableaux 3 et 4). Aux différents horizons futurs (2050 et 2100), on peut constater la diminution sensible et quasi-généralisée des précipitations saisonnières sur l'ensemble du bassin versant. Cette baisse est forte à l'horizon 2050 mais modérée à l'horizon 2100. La baisse des précipitations saisonnières est très forte au niveau des périodes saisonnières AMJ et JAS et plus modérée au niveau des saisons JFM et OND.

Tableau 3 - Ecarts pluviométriques saisonniers à l'horizon 2050

	Climat subtropical	Climat tropical	Climat subéquatorial
JFM	-37,8	-67,6	-51,0
AMJ	-6,6	-11,2	-18,7
JAS	-34,4	-46,2	-6,0
OND	-15,7	-46,9	-6,9

Tableau 4 - Ecarts pluviométriques saisonniers à l'horizon 2100

	Climat subtropical	Climat tropical	Climat subéquatorial
JFM	-30,1	-64,7	-66,2
AMJ	-37,8	-30,5	-26,9
JAS	-47,0	-18,4	-19,5
OND	-11,0	-43,7	-23,6

Selon le scénario RCP 8.5 appliqué, les températures augmentent par rapport à la période de référence (1991-2020) pour toutes les saisons. Cette augmentation va de +1,5 à +3,1 °C avec une moyenne de +2,08 °C et un écart-type de 0,45 °C à l'horizon 2050 (Tableau 5). Pour ce qui est de l'horizon 2100, cette augmentation oscillera entre +3,3 °C et 5 °C avec une moyenne de + 4 °C et un écart-type de 0,53 °C (Tableau 6). La hausse est plus marquée au cours des saisons janvier-février-mars (JFM) et juillet-août-septembre (JAS) sur tout le bassin et selon les horizons de projections. Les saisons qui enregistrent les plus faibles hausses de la température sont respectivement les saisons d'octobre-novembre-décembre (OND) et avril-mai-juin (AMJ). Les plus fortes augmentations de la température sont observées au niveau du climat subéquatorial alors que les plus faibles hausses sont constatées au niveau du climat tropical humide (climat baouléen).

Tableau 5 - Ecarts thermométriques saisonniers à l'horizon 2050

	Climat subtropical	Climat tropical	Climat subéquatorial
JFM	2,2	3,1	2,4
AMJ	1,5	1,7	2,2
JAS	2,2	1,8	2,6
OND	1,5	1,8	1,9

Tableau 6 - Ecarts thermométriques saisonniers à l'horizon 2100

	Climat subtropical	Climat tropical	Climat subéquatorial
JFM	4,0	5,0	5,0
AMJ	3,8	3,6	4,0
JAS	4,4	3,7	4,1
OND	3,3	3,7	3,4

DISCUSSION

L'évolution des paramètres climatiques est caractérisée par une baisse générale des pluies annuelles sur la période 1961-2020 mais avec une reprise de celles-ci sur la sous-période 1991-2020. Pour ce qui concerne la température annuelle, elle est marquée par une évolution à la hausse et de façon monotone sur la période 1961-2020. Les variations saisonnières pluviométriques sur la période de référence 1991 à 2020 montre que le JAS (juillet-août-septembre) est la saison la plus pluvieuse pour les climats subtropical (climat subtropical ou soudanais) et tropical humide (climat tropical humide ou baouléen). Quant au climat subéquatorial (climat subéquatorial ou attiéen de l'intérieur), le trimestre le plus pluvieux est la saison AMJ (avril-mai-juin). La saison la plus sèche sur l'ensemble du bassin versant du N'zi est la période JFM (janvier-février-mars). La saison la plus chaude sur la période 1991-2020 est le trimestre janvier-février-mars (JFM) alors que la saison la plus froide est le trimestre juillet-août-septembre (JAS). Les projections climatiques réalisées prévoient une hausse de la température comprise entre +1,8 °C et +2,2 °C pour l'horizon 2050 et entre +3,8 °C et +4,2 °C pour l'horizon 2100. Les projections pluviométriques révèlent des tendances à la baisse traduite des écarts allant de -14,5% à -17,6% à l'horizon 2050 et entre -26,5% et -32,3% à l'horizon 2100.

Les résultats obtenus au cours de ce travail ont été comparés aux travaux antérieurs réalisés d'abord en Côte d'Ivoire, ensuite en Afrique de l'Ouest et enfin hors de l'Afrique de l'Ouest.

Au cours des dix dernières années, des travaux ont été réalisés dans le contexte ivoirien [3 ; 10-13]. Ainsi, les travaux de Kouamé *et al.* [10] sur les impacts du changement climatique sur les précipitations et les températures aux horizons 2050 et 2080 dans le bassin versant de Davo (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) ont été réalisés à partir de quatre modèles de circulation générale couplés Atmosphère Ocean (MCGAO) et deux scénarios d'émission des Gaz à Effet de Serre (GES) (A2 et B2). Les résultats de ces travaux ont mis en évidence une augmentation de la température variant entre 1,7°C et 3,7°C. Les précipitations quant à elles connaîtront une évolution controversée. On enregistre une tendance à la baisse de -0,4% à l'horizon 2050 (A2). Sous le scénario B2, les précipitations connaîtront une augmentation de 2,4% (horizon 2050) et de 3,7% (horizon 2100). Le scénario B2 est plus pluvieux et moins chaud que le scénario A2. Les résultats des travaux de Yao *et al.* [11] ont mis en évidence à partir de prévisions du modèle climatique RegCM3-A1B, une tendance à la baisse des précipitations annuelles de 0,42 % et de 10,8 % respectivement aux horizons 2035-2050 et 2085-2100 sur le bassin versant de la Lobo (Sassandra) situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Les projections des variables climatiques (températures et pluviométrie) examinées par Kouamé *et al.* [3] aux horizons 2050 et 2080 dans le Centre-Est de la Côte d'Ivoire ont été basées sur des simulations du modèle climatique CORDEX. Toutes les projections montrent une augmentation de la température dans le Centre-Est de la Côte d'Ivoire durant les deux tranches de temps du 21ème siècle. La variation annuelle projetée par le modèle est de 0,2 à 2,6°C. Concernant les pluies, le taux annuel prédit projeté aux horizons 2050 et 2080 par le modèle va de -4 à -12%. Les projections pluviométriques sont incertaines et dépendent des scénarii d'émission et des horizons choisis. Le rapport technique du GIZ [12] relatif au profil de risque climatique de la Côte d'Ivoire, offre un aperçu des projections climatiques de la Côte d'Ivoire d'ici à 2080, en partant de différents scénarios de changement climatique (appelés Representative Concentration Pathways (Profils représentatifs d'évolution de concentration ou RCP). Le RCP2.6 est un scénario de réduction des émissions conforme à l'Accord de Paris ; le RCP6.0 est un scénario d'émissions moyennes

à élevées. Les projections ne tiennent pas compte des effets des futurs impacts socio-économiques. En fonction des scénarios, il est prévu que la température en Côte d'Ivoire augmente dans une fourchette comprise entre 1,7 °C et 3,7 °C d'ici à 2080 par rapport aux niveaux pré-industriels, avec des températures plus élevées et davantage de températures extrêmes dans la partie nord du pays. Les tendances en matière de précipitations sont très incertaines, puisqu'elles vont d'un changement très limité à une diminution des précipitations annuelles pouvant atteindre 65 mm d'ici à 2080. Les périodes sèches et humides devraient devenir plus extrêmes. Les écarts relatifs évalués en référence à la période 1961-1990 des paramètres climatiques par Kouassi *et al.* [13] au niveau du bassin versant du N'zo (Sassandra) dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire à partir du scénario RCP 2.6 et des données CORDEX-Afrique ont mis en évidence une baisse de la pluviométrie annuelle (-19,7%) et une augmentation de la température moyenne annuelle (+1,6 °C) au milieu du siècle présent (horizon 2050).

Dans le contexte ouest africain, plusieurs travaux ont été effectués [20-22]. Les résultats des travaux de Kouakou *et al.* [20] effectués à partir du modèle régional RegCM3 ont mis en évidence selon les localités en Afrique de l'Ouest un accroissement de 0,4 °C à 1,8 °C de la température à l'horizon 2031-2040 et de 3,2 °C à 5,8 °C à l'horizon 2091-2100. Selon l'analyse, les précipitations pourraient baisser dans l'ensemble dans la zone et atteindre dans certaines localités 60%. Spécifiquement, les températures au Sahel connaîtraient des augmentations moyennes mensuelles et annuelles plus importantes que celles des régions du Golfe de Guinée. Quant aux précipitations, elles subiraient une augmentation annuelle de 0,44% au Sahel contre une baisse de 3% dans le Golfe de Guinée à l'horizon 2031-2040. A l'horizon 2091-2100, les précipitations diminueraient de 12,6% au Sahel et de 9,12% dans les régions du Golfe de Guinée. Selon les travaux de Sarr et Camara [21] réalisés à partir de données CORDEX et de modèles climatiques régionaux (MCR) sous le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP8.5., il est prédit une diminution des précipitations sur une bonne partie du Sahel notamment sur sa partie Ouest à l'horizon 2100. Selon Ly et Touné (2019), les projections climatiques issues de la médiane de 29 modèles climatiques du GIEC, pour deux scénarios globaux contrastés d'évolution des concentrations atmosphériques de gaz à effets de serre (RCP 4.5 et 8.5) montrent que les populations du Niger vont devoir s'adapter :

- à une augmentation significative des températures dans une gamme de 1,5 à 3 degrés d'ici 2050 ;
- à une probable intensification des pluies caractérisée par une augmentation de la pluviométrie, en particulier dans les régions de l'Est et du Nord-Est, s'accompagnant d'une réduction du nombre de jours de pluie.

A partir de deux modèles de circulation générale (MCG) (modèle HADCM3-A2 et modèle CSIRO-A2), Karambiri *et al.* [22], prévoient une tendance à l'augmentation des pluies annuelles de l'ordre de 10% en 2050 (modèle HADCM3-A2) et une baisse de l'ordre de -8% en 2050 (modèle CSIRO-A2) au Burkina Faso.

Une analyse des projections climatiques a été également analysée en dehors du contexte ouest africain. Ainsi, selon les travaux de Haensler *et al.* [23] dans le bassin du Congo en Afrique centrale, il est observé que tous les modèles climatiques, indépendamment de la saison et du scénario d'émission, indiquent un réchauffement de la température atmosphérique de surface d'au moins 1°C vers la fin du 21^{ème} siècle. Concernant la température atmosphérique annuelle moyenne de surface, les changements probables vers la fin de ce siècle sont compris entre +3,5 °C et +6 °C pour un scénario de fortes émissions et entre +1,5°C et +3°C pour un scénario d'émissions contenues de gaz à effet de serre. En général, l'accroissement prévu des températures est légèrement supérieur à la moyenne dans les zones situées au Nord de l'Afrique centrale, au Nord de la charnière climatique, et légèrement inférieur à la moyenne dans les zones centrales. Selon le même auteur, les résultats des différentes simulations relatives aux précipitations totales sont moins robustes que ceux concernant la température atmosphérique de surface. Certains modèles prévoient un accroissement des précipitations annuelles dans la majeure partie du bassin du Congo, tandis que d'autres modèles anticipent une diminution dans les mêmes zones. Néanmoins, ces mêmes auteurs prévoient une tendance générale vers un faible accroissement des précipitations annuelles dans la majeure partie de la région vers la fin du 21^{ème} siècle. On peut pronostiquer une augmentation plus importante des précipitations annuelles sur la région la plus sèche du nord de l'Afrique centrale, ce qui est surtout lié à l'expansion vers le Nord de la ZCIT et au fait que les quantités de précipitations sont plutôt modestes sur cette région. Les changements dans les précipitations annuelles seraient probablement compris dans une gamme allant de -10 à +10 % dans la zone la plus humide et de -15 et +30 % dans la zone la plus aride. Des changements drastiques dans les précipitations annuelles futures semblent donc assez improbables. L'étude de Woillez [24] a montré que l'empreinte du changement climatique global est déjà clairement visible au Maroc : la température moyenne du pays a augmenté de +0,42 °C/décennie depuis 1990 et la diminution des précipitations est estimée à plus de 20% entre 1961 et 2005. La moyenne des projections des différents modèles climatiques indique que cette tendance à l'aridification va se poursuivre, avec à horizon 2050 une augmentation supplémentaire de la température de +1,5 °C (+2 °C) pour le scénario RCP4.5 (RCP8.5) et une diminution des précipitations de -15 % environ. Certains modèles projettent un déclin des précipitations bien supérieur, de l'ordre de -40 %.

Les données climatiques CORDEX-Afrique utilisées, bien que caractérisées comme toute donnée de projection d'incertitudes, est relativement satisfaisant pour prévoir les changements climatiques à l'échelle annuelle et saisonnière en Côte d'Ivoire. Le choix de la dernière normale climatique (1991-2020) a été également démontré. Ces projections s'inscrivent en continuité des tendances généralement observées en Afrique en général, particulièrement en Afrique de l'Ouest et singulièrement en Côte d'Ivoire. Elles sont cohérentes avec d'autres travaux de caractérisation des changements climatiques futurs à une échelle locale.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'analyser la variabilité des paramètres climatiques actuels et leurs tendances aux horizons 2050 et 2100 dans le bassin versant du N'zi (Bandama) à partir de l'indice de normalisation, de la régression linéaire, des cumuls pluviométriques saisonniers et des moyennes thermométriques saisonnières. Les résultats obtenus montrent que la variabilité climatique se manifeste par une dynamique régressive des pluies annuelles sur la période 1961-2020 mais avec une reprise de celles-ci sur la sous-période 1991-2020. Quant à la température annuelle, elle connaît une évolution progressive régulière sur la période 1961-2020 en général et la sous-période 1991-2020 en particulier. L'analyse des cumuls pluviométriques saisonniers sur la période de référence 1991 à 2020 révèle que la période saisonnière juillet-août-septembre (JAS) est la plus pluvieuse pour les climats subtropical (climat soudanais) et tropical humide (climat baouléen). Quant au climat subéquatorial (climat atléien de l'intérieur), la saison la plus pluvieuse est le trimestre avril-mai-juin (AMJ). Le trimestre le moins pluvieux est celui de janvier à mars (JFM) sur tout l'ensemble des trois zones climatiques traversées par le bassin versant du N'zi. Les températures moyennes saisonnières évaluées sur la période 1991-2020 ont mis en évidence deux extrêmes thermiques sur le bassin versant du N'zi. Le trimestre le plus froid sur l'ensemble du bassin est celui de juillet-août-septembre (JAS) alors que la saison la plus chaude correspond au trimestre janvier-février-mars (JFM). Les projections climatiques réalisées prévoient une augmentation de la température comprise entre +1,8 °C et +2,2 °C pour l'horizon 2050 et entre +3,8 °C et +4,2 °C pour l'horizon 2100. Les pluies révèlent des tendances à la baisse traduite des écarts allant de -14,5% à -17,6% à l'horizon 2050 et entre -26,5% et -32,3% à l'horizon 2100. Les impacts de ces conditions climatiques futures sur les ressources naturelles (eaux, forêts, etc.), les cultures, les activités économiques, etc. pourraient être considérables. Ainsi, les résultats de cette étude pourront aider à augmenter la résilience face aux changements climatiques de certaines activités humaines telles que l'agriculture, l'alimentation en eau potables, la production d'électricité, etc.

Remerciements : Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la SODEXAM (Côte d'Ivoire) pour la fourniture des données climatiques de l'étude.

Références

- [1] GIEC 2014. Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail i, ii et iii au cinquième rapport d'évaluation du GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- [2] KOUAMÉ K.R., KANGA P.A.D., KOLI B.Z. 2019. Variabilité climatique dans le centre-est de la Côte d'Ivoire : indicateurs, scénarii actuels et futurs. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 1, 7-20.
- [3] AHOUSI K.E., KOFFI Y.B., KOUASSI A.M., SORO G., SORO N., BIEMI J. 2013. Étude de la variabilité hydroclimatique et de ses conséquences sur les ressources en eau du Sud forestier et agricole de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 1 (6), 30-50.
- [4] KOUAKOU K. E., GOULA B. T. A., KOUASSI A. M. 2012. Analyze of climate variability and change impacts on hydro-climate parameters: case study of Côte d'Ivoire, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3, 1-8.
- [5] KOUDOU A., KOUAME K. A., NIAMKE K. H., KOUAME K. F., SALEY M. B., ADJA M.G. 2015. Contribution de l'analyse en composantes principales à la régionalisation des pluies du bassin versant du N'zi, de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 26, 156-172.
- [6] FOSSOU R. M. N., LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O., Z., BAKA D., ONETIE O.Z., OROU R. 2014. Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), *Larhyss Journal*, 21, 87-110.
- [7] N'DA K.C., DIBI-KANGAH P., DJIBRIL D.N., DJE K.B., ZUELI K.B. 2016. Changements climatiques : quelques aspects de la variabilité climatique dans le bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Programme d'Appuis Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES), 86-104.
- [8] KOUASSI A. M., ASSOKO A. V. S., DJE K. B., KOUAKOU K. E., KOUAME K. F., BIEMI J. 2017. Analysis of the persistence of drought in West Africa: Characterization of the recent climate variability in Ivory Coast. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 1 (2), 47-59.
- [9] SORO G., AHOUSI K.E., TRAORE A., SORO N. 2017. Impacts de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le « V » Baoulé (centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000 sur les ressources en eau. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, 2 (3), 7-10.
- [10] KOUAMÉ Y.M., SORO G.E., KOUAKOU K.E., KOUADIO Z.A., MÈLÈDJE N.E.H., GOULA B.T.A., ISSIAKA SAVANÉ I. 2014. Scénarios des changements climatiques pour les précipitations et les températures en Afrique subsaharienne tropicale humide : cas du bassin versant de Davo (Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 18, 197-213.

- [11] YAO A.B., KOUASSI K.L., KOUAKOU K.E., GOULA B.T.A., GAYÉ A.T. 2019. Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 15(4), 330-342.
- [12] GIZ 2020. Profil de risque climatique : Côte d'Ivoire. Rapport technique, 12 p.
- [13] KOUASSI A.M., GNANGOUIN A.Y.J., YAO C.A., N'GUESSAN N.E. 2021. Etude d'impact prospective des débits de crues dans un contexte de changements climatiques en Afrique de l'Ouest: Cas du bassin versant du N'zo (Sassandra, Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 57 (2), 117-131.
- [14] KOUAO J.M., KOUASSI A.M., DEKOULA S.C., ASSEUFI B.D. 2020. Analyse de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *Larhyss Journal*, 41, 233-259
- [15] KOUAO J.M., KOUASSI A.M., KOUDOU A., GBOLA A.C.F. 2021. Apport des indices climatiques à la redéfinition de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 34 (1), 102-114
- [16] OUEDRAOGO M. 2001. Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 257p.
- [17] TAIBI S. 2011. Analyse du régime climatique au Nord de l'Algérie. Mémoire de Magister en agronomie, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach Alger, Algérie, 149 p.
- [18] FAYE C., SOW A. A., NDONG J. B. 2015. Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, 9, 17-35.
- [19] KOUAO J.M. 2022. Variations climatiques et prévision de la sécheresse par régression linéaire multiple d'indices de précipitations normalisés : Cas de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 215p.
- [20] KOUAKOU K.E., KOUADIO Z.A., KOUASSI F.W., GOULA B.T.A., SAVANÉ I. 2014. Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Afrique Sciences*, 10(1), 145 - 160
- [21] SARR A.B., CAMARA M. 2017. Evolution Des Indices Pluviométriques Extrêmes Par L'analyse De Modèles Climatiques Régionaux Du Programme CORDEX: Les Projections Climatiques Sur Le Sénégal. *European Scientific Journal*, 13 (17), 206-222.
- [22] KARAMBIRI H., YACOUBA H., IBRAHIM B., FOTIE J. 2021. Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant du Nakambé (Burkina Faso). <https://hydrologie.org>.
- [23] HAENSLER A., SAEED F., JACOB D. 2013. Assessing the robustness of projected precipitation changes over central Africa on the basis of a multitude of global and regional climate projections. *Climatic Change*, 121, 349–363, DOI 10.1007/s10584-013-0863-8
- [24] WOILLEZ, M.-N. 2019. Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts. *Papiers de Recherche AFD*, 108, 1-25.

Stratégie d'approvisionnement en eau potable en milieu rural au Bénin et atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD)

Sewade Sokegbe Grégoire¹, Gnimadi Codjo Clément², Hounliho V. Beaudelaire A.³

1 Laboratoire Pierre Pagney 'Climat, Eau, Ecosystème et Développement' (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC, République du Bénin),

2 Laboratoire d'Economie Locale et Développement Participatif /IRHS/CBRSI, (République du Bénin)

3 Direction des Participations de l'Etat et de la Dénationalisation, du Ministère de l'Economie et des Finances, (République du Bénin)

Résumé

L'analyse diagnostique des stratégies d'approvisionnement en eau potable a été conduite dans tous les départements du Bénin. Les ressources en eau, en raison de leurs caractères socio-économiques et environnementales constituent un élément primordial à la vie. La présente recherche vise à analyser les effets socio-économiques de la mise en œuvre des documents de politique du secteur de l'eau. Elle a été réalisée par le biais de la recherche documentaire, de la Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP) et les entretiens avec les bénéficiaires directs et indirects des investissements et les responsables des structures déconcentrées de l'Etat. L'analyse des résultats a été faite à partir du Modèle SWOT. Les données sur les potentialités, les besoins des ressources en eau, les unités géologiques, les recharges des aquifères, la typologie des ouvrages de mobilisation des eaux de surface, les dotations financières du secteur et les réalisations physiques ont été collectées. Les résultats sur l'analyse de la mise en œuvre des politiques de gestion des ressources en eau indiquent que le pays a connu de 2002 à 2015, des avancées majeures. Il dispose des conditions favorables à la réalisation des infrastructures hydrauliques. Le pays dispose également des potentialités de plus de 13 milliards de m³/an d'eau de surface et 1,89 milliards de m³/an d'eau souterraine. A l'horizon 2025, les estimations des besoins en eau de consommation sont de 300369 m³/jour en milieu rural et 796369 m³/jours en milieu urbain. Pour l'atteinte des OMD, le pays a bénéficié de plus de 209 milliards de francs CFA dont 28 milliards sur financement budget national et 171 milliards sur financements extérieurs, soit 18,44% contre 81,56%. Ces proportions indiquent la dépendance du secteur des financements extérieurs. L'analyse des réalisations physiques et financières sur la période de 2002 à 2015 a montré les difficultés de mise en œuvre des programmes et projets inscrits par la DGEau et de ses services déconcentrés

Mots clés : Ressources en eau, ouvrages hydrauliques, Analyse diagnostique

Drinking water supply strategy in rural areas in Benin and achievement of the Millennium Development Goals (MDGs)

Abstract:

The diagnostic analysis of drinking water supply strategies was conducted in all departments of Benin. Water resources, because of their socio-economic and environmental characteristics, constitute an essential element for life. This research aims to analyze the socio-economic effects of the implementation of water sector policy documents. It was carried out through documentary research, the Accelerated Method of Participatory Research (MARP) and interviews with the direct and indirect beneficiaries of the investments and the heads of the decentralized structures of the State. The analysis of the results was made from the SWOT model. Data on the potentialities, needs of water resources, geological units, aquifer recharges, typology of surface water mobilization works, financial allocations for the sector and physical achievements were collected. The results on the analysis of the implementation of water resource management policies indicate that the country experienced major progress from 2002 to 2015. It has favorable conditions for the construction of hydraulic infrastructures. The country also has the potential for more than 13 billion m³/year of surface water and 1.89 billion m³/year of groundwater. By 2025, estimates of drinking water needs are 300,369 m³/day in rural areas and 796,369 m³/day in urban areas. To achieve the MDGs, the country received more than 209 billion CFA francs, including 28 billion from national budget financing and 171 billion from external financing, i.e. 18.44% against 81.56%. These proportions indicate the sector's dependence on external financing. The analysis of physical and financial achievements over the period from 2002 to 2015 has shown the difficulties in implementing the programs and projects registered by the DGEau and its decentralized services.

Key Words: Water resources, hydraulic works, diagnostic analysis.

¹ Corresponding author: sewadegr@gmail.com

INTRODUCTION

L'eau représente une ressource indispensable à la vie et au développement socio-économique d'un pays. L'Alimentation, la santé et les activités humaines dépendent de sa disponibilité en quantité et en qualité (MERPMEDER, 2015, p8). Selon le Groupe d'Expert « Eau » de l'Organisation des Nations Unies (2019, p.2), l'eau est une composante essentielle du développement durable. Elle est fondamentale pour le développement socio-économique, la sécurité alimentaire et la santé des écosystèmes. Elle est également indispensable à la réduction de la charge mondiale de morbidité, l'amélioration de la santé, du bien-être et de la productivité des populations. La réduction constante de la disponibilité de la ressource impose une utilisation rationnelle de l'eau. Cette rationalité passe par une politique cohérente des ressources en eau (MPDEEP, 2012, p.10). Selon le même auteur, les statistiques de l'ONU établissent à 35% les populations qui vivent dans les sociétés de consommation alors que 65% vivent dans des conditions indignes et inhumaines. Au titre des facteurs qui déterminent cette pauvreté inhumaine se trouve l'eau. Dans le monde, environ 15 millions d'êtres humains dont 3 à 4 millions d'enfants de moins de 12 ans meurent chaque année après avoir bu de l'eau impropre (OMS, Djoffon, 2010) cité par SEWADE S. G (2019, p.8).

En 1992, à la Conférence de Rio de Janeiro et de Dublin, sur les inquiétudes écologiques et environnementales, de grandes questions liées au développement durable ont été soulevées (Ahamidé B., 2006, p88). Au nombre de ces questions, se trouvent celles relatives à l'approvisionnement en eau des populations vis-à-vis de leur besoin et de la disponibilité de la ressource. Pour l'ONU, (2010, p88), plusieurs régions du monde dont la plupart dans le tiers monde souffrant de la disponibilité de l'eau potable, ont développé des maladies liées à la consommation de l'eau impropre. Plusieurs textes ont été pris en 2002 par la communauté internationale pour reconnaître le « droit à l'eau » pour tous les êtres humains. Malgré cette reconnaissance, aujourd'hui, 1,2 milliards d'êtres humains sont privés d'un accès à l'eau potable et 2,6 milliards n'ont pas accès aux services d'assainissements de base (raccordement aux égouts ou à une fosse septique). En conséquence, Dans le monde, 36 000 personnes meurent chaque jour par manque d'eau potable et par défaut d'assainissement.

Selon l'OMS (2005) cité par YETOGNON J.E.G. (2013, p.1), dans les pays en développement, un cinquième (1/5) des décès prématurés et des cas de maladies résultent des risques environnementaux majeurs. Chaque année, plus d'un milliard d'être n'ont d'autres choix que d'utiliser l'eau de sources impropres et dangereuses avec plus de 3900 victimes par jour parmi les enfants compromettant ainsi la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Sur le plan mondiale, les dépenses publiques affectées à la gestion des ressources en eau ne dépassent pas 1% du Produit Intérieur Brut (PIB). Selon le Rapport de la Vision Nationale de l'Eau à l'horizon 2025 (1999, p.3), le Bénin disposerait d'un important potentiel en eau de surface estimé à 13 106 millions de m³ par an. L'usage actuel très insignifiant pour l'eau potable, l'abreuvement en bétail et l'irrigation avoisine 2,8%. Dans le long terme, les projections d'utilisation de l'eau sont estimées respectivement à : 1,06% pour l'eau potable en milieu rural, 1,5% pour le milieu urbain, 12,21 pour l'agriculture, 1,34% pour l'abreuvement du bétail et 31,51 pour le secteur hydro électrique. Les ressources souterraines du pays avoient les 1,9 milliard de m³ par an en moyenne, dont les prélèvements sont estimés à 2% de la recharge annuelle. Ces prélèvements sont estimés à 14% dans le long terme. Elle n'est pas aussi abondante pour prendre en compte les 80 % des régions de socles au Centre et au Nord du pays sans faire recours aux eaux de surface. Ce recours ne peut s'opérer sans une politique stratégique appropriées et une mobilisation des ressources financières.

L'augmentation de la population réduit la quantité d'eau par habitant. Selon les données du MPDEEP (2012, p17), en 1955 la population Béninoise s'élevait 2 111 000 habitants et la disponibilité en eau par habitant et par an était de 6 208 m³. Trois décennies après, cette population a atteint les 4 622 000 habitant avec une disponibilité en eau par habitant et par an de 2 835 m³. Ces estimations passent en 2025 dans une hypothèse basse à 11 337 000 habitants avec une disponibilité en eau par habitant et par an à 1 156 m³. Dans une hypothèse hausse, la population est estimée à 13 243 000 habitants avec une disponibilité en eau de 990 m³ par habitant et par an. Les potentialités du Bénin en eau n'étant pas constantes, elles démunies en sous l'influences des variabilités climatiques et des facteurs anthropiques. Ces ressources diminuent deux fois plus vite que les précipitations qui, elles ont diminué de 15 à 20% depuis les années 70 à nos jours.

En 1992, le Bénin s'est doté d'une Stratégie d'approvisionnement en eau potable en milieu rural, en 1988 de la Stratégie Nationale de gestion des ressources en eau visant à instaurer une gestion intégrée, concertée et durable. Par ailleurs, le Bénin a signé et ratifié plusieurs accords internationaux ayant trait à la gestion de l'eau, de l'environnement et des écosystèmes. Ainsi, pour se conformer aux OMD, le gouvernement a envisagé d'atteindre le plein accès à l'eau potable et un taux de desserte de 67,3% en milieu rural. Pour ce faire, 1320 Equivalents Points

d'Eau (EPE) doivent être réalisés chaque année à compter de 2002 (DGEau, 2003) cité par YETOGNON J.E.G. (2013, p4), SEWADE S. G. (2019, p. 27). Selon DEGBEVI et al., (2007), cité par SEWADE S.G. (2019, p.325), pour atteindre les OMD, pour l'ensemble du secteur de l'eau, il faut mobiliser sur la période 2007-2015 environ 460,9 milliards francs CFA, soit une dotation financière prévisionnelle d'environ 52 milliards de francs CFA. Malgré l'importance des actions engagées, les fruits n'ont pas tenu la promesse des fleurs laissant d'importants défis en termes de pauvreté et d'inégalité. La proportion des populations utilisant une source d'eau améliorée est passée de 50% en 1990 à 75,7% en 2010 (EMICoV, 2011), cité par PNUD, (2017, p.26). Selon le Rapport d'évaluation des OMD (2016), le taux de desserte est passé de 37% en 2003 à 68,1% en 2015. Ce taux a connu une tendance baissière depuis 2015. Il est passé de 42,7% en 2015 à 42,3% en 2016 et puis 41,8% en 2017 avant d'atteindre 37% en 2019 contre 40,4% en 2018 malgré la construction 2258 équivalents points d'eau entre 2014-2019 (PNUD 2017, p26). De même, le degré de mise en œuvre de la politique de la gestion intégré des ressources en eau a connu une lente progression par an en passant de 35% en 2015 à 36 % en 2016 et puis 36,3% en 2017 à 36,5% en 2018. Enfin, il est passé à 36,7% en 2019 (PNUD 2017, p26). L'objectif de l'étude a été d'évaluer les effets socio-économiques de la mise en œuvre de la stratégie d'approvisionnement en eau potable en milieu rural au Bénin.

Cadre Général de l'étude

Située dans la zone intertropicale Ouest Africaine, la République du Bénin s'étend entre 6°17' et 12°30' de latitude Nord et entre 0°45' et 4°00 de longitude Est et couvre une superficie de 114 743 km². Elle est limitée au Nord par le fleuve Niger, frontière naturelle avec la république du Niger, au Nord-Ouest par le Burkina-Faso, à l'Ouest par le Togo, à l'Est par le Nigéria et au Sud par l'Océan Atlantique du Golfe de Guinée auquel il fait front sur 124 km et s'allonge sur une distance d'environ 672 km² (GNIMADI C. C., 2013, p344). Sa largeur varie de 124 km (le long de la Côte) à 324 km à la partie septentrionale de la ville de Natitingou jusqu'au Borgou.

Approche méthodologique

L'approche méthodologique est fondée sur trois points essentiels : la collecte des données, les travaux de terrain, le traitement et l'analyse des résultats.

Données collectées

Les données utilisées dans le cadre de la présente étude sont des données secondaires sur la période allant de 2002 à 2015. Elles sont relatives aux données démographiques issues des recensements généraux de la population et de l'habitation (RGPH, 1979, 1992, 2002, et 2013) et la projection sur 2025 par l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INStAD). Ces données ont été complétées par des données bibliographiques collectées dans les centres de documentation de la BIDOC-FSA, de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASCNA) et la Direction Générale de l'Eau (DGEau). Elles ont permis d'apprécier les besoins en eau des populations à l'horizon 2025. Les données relatives aux investissements, aux réalisations physiques et financières, aux potentialités du Bénin en ressources en eau ont été collectées. Ces informations ont été fournies par des populations rurales bénéficiaires des investissements, les responsables administratifs des services déconcentrés, les Directions Départementales des Mines et de l'Eau (DDEE) et des Agences Territoriale de Développement Agricole (ATDA). Pour chaque catégorie d'acteurs, un questionnaire ou guide d'entretien a été élaboré et a pris en compte les besoins d'informations nécessaires à la réalisation de l'étude. Les informations recueillies ont été saisies et traitées à l'aide du Tableur Excel pour les données quantitatives, et par recoupement pour les données qualitatives.

Méthode utilisée

L'échantillon a été constitué par choix raisonné. La population cible représente environ 1,3/105ème de la population totale desservie en milieu rural en 2015 qui est de 5 171 000 habitants. Cette taille correspond à 67 personnes interrogées dont 34% pour les bénéficiaires des investissements, (soit 23 personnes), 32% pour les agents administratifs, bénéficiaires indirects des investissements, (soit 21 personnes), et 33% sont des responsables au niveau déconcentré (soit 23 personnes). L'étude est menée par le biais de la Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP). Le choix des communes est fait sur le niveau du taux de desserte en eau potable (faible, moyen et élevé) et couvre tous les départements. L'analyse des résultats est faite à partir du Modèle SWOT. Le traitement de toutes ces informations a abouti aux résultats.

RESULTATS

Analyse des potentialités et besoins des ressources en eau

Au Bénin, la pluviométrie relativement bonne est caractérisée par une importante variabilité spatio-temporelle qui rend aléatoire toute politique de développement conçue en marge de la maîtrise des ressources en eau. La hauteur des pluies par an varie en moyenne entre 700 et 1300 mm et est répartie sur 70 à 110 jours. Il bénéficie d'un réseau assez important de cours d'eau plus moins permanent drainant des bassins-versants (YETOGNON E. J. G. 2013 P.19). Ces cours d'eau sont modestes par leur débit et leur longueur et ont un régime irrégulier (Adam et Boko, 1993). Les cours d'eau sont répartis sur l'ensemble du territoire en quatre (04) grands bassins hydrographiques : (i) ensemble hydrographique du Niger le fleuve Niger (120 km), la rivière Sota (250 km), la rivière Alibori (338 km), et la rivière Mékrou (410 km) ; (ii) ensemble hydrographique de la Volta : la rivière Pendjari (380 km) ; (iii) ensemble hydrographique de l'Ouémé-Yéwa : le fleuve Ouémé (510 km) et ses principaux affluents que sont l'Okpara (200 km) et le Zou (150 km), la lagune de Porto Novo (35 km²), le lac Nokoué (150 km²) ; (iv) ensemble hydrographique du Mono-Couffo : le fleuve Mono (100 km), le Couffo (190 km), le lac Ahémé (78 km²), la lagune de Ouidah (40 km²), le lac Toho (15 km²) la lagune de Grand Popo (15 km²) YETOGNON E. J. G. (2013, p19) et MDPEED, (2012, p39). Les graphes 1 et 2 suivants fournissent des informations sur les estimations des apports d'eaux surface calculés aux stations hydrométriques en termes de superficie, de volume et en modulation.

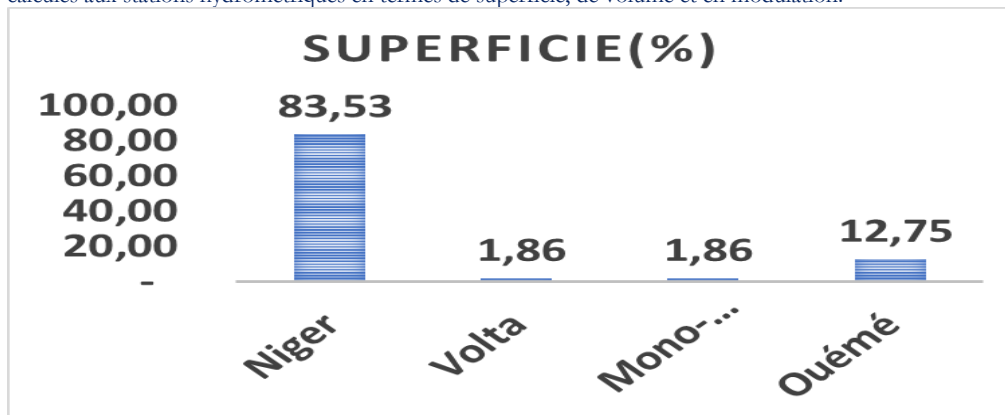


Figure 1 : Superficie des Bassins Source : Données DGEau, Août 2022
 Source : Données DGEau, Août 2022

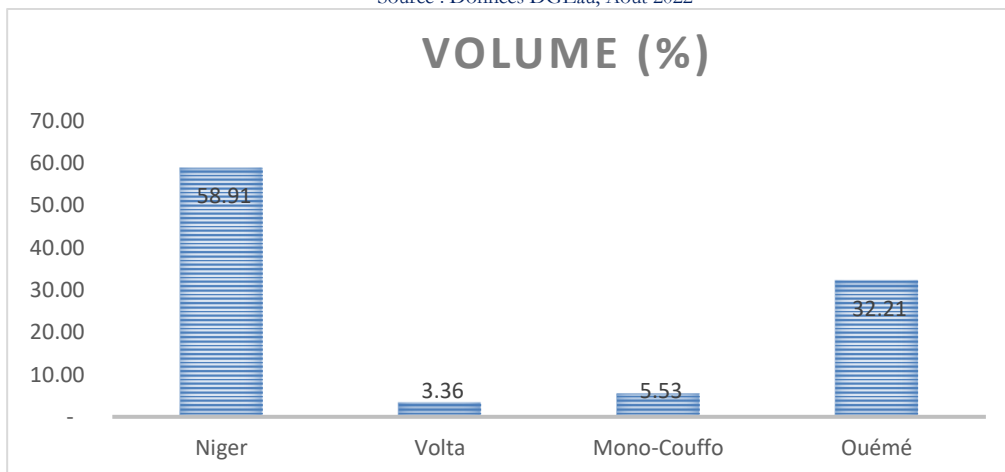


Figure 2 : Volume des Bassins
 Source : Données DGEau, Août 2022

L'analyse des graphes fait ressortir qu'en termes de superficie des ensembles hydrographiques, et sur une période d'observation variant entre 6 et 48 ans, le bassin du Niger vient en tête avec une proportion de 83,53% des superficies et 58,91% en volume, suivi de celui de l'Ouémé avec des proportions de 12,75% de superficie et 32, 21 en volume. Les proportions des bassins de la Volta et du Mono-Couffo sont s'égalisent en termes de superficie (1,86%), et respectivement 3,36% et 5,53% en volume. Ces ensembles hydrographiques constituent des alternatives secondaires et parfois même primaires en cas de panne des Adductions d'Eau Villageoise (AEV) YETOGNON E.J.G. (2013, p.19). Le tableau 1 suivant estime des ressources en eau superficielle, exception faite des apports du fleuve Niger, de la Sazué et des hauts bassins de la Kéran et de la Kara.

Tableau1 : Estimation des eaux superficielles Sources : Données DGEau, juillet 2022

Les

Bassin	Stations	Données hydrométriques			Période (Année complète)
		Superficie (%)	Moyenne (%)	Volume (%)	
Pendjari	Porga 2	1,99	3,53	4,16	38
Niger	Malanville	89,31	60,11	70,98	36
Mékrou	Kompongou	0,51	1,11	1,31	28
Alibori (1)	Kandi-Bani	0,73	16,73	1,98	38
Sota (1)	Koubéri	1,20	1,93	2,28	36
Ouémé	Bonou	4,20	10,28	12,13	48
Couffo	Lanta	0,15	0,29	0,03	22
Mono	Athiéomé	1,92	6,03	7,13	24

ressources en eau drainées par les principaux cours d'eau du Bénin sont estimées à 13106 millions de m³. Ces estimations sont faites sur une période de 22 à 48 ans au niveau des stations hydrométriques en aval des cours d'eau et se fonde sur leurs modules moyens interannuels.

Sur une superficie de 1 119 685 km² de cours d'eau que compte le Bénin, le fleuve Niger à la station de Malanville occupe la première place avec une proportion de 89,39% suivi de l'Ouémé et la Pendjari aux stations respectives de Bonou (4,20%) et Porga (1,99%). En termes de volume exprimé en m³, le fleuve Niger occupe toujours le premier rang avec une proportion de 70,98%, suivi du fleuve Ouémé (12,13%), du Mono (7,13%) et de la Pendjari (4,16%). Les tendances moyennes exprimées en m³/s présente un schéma contraire. Elles mettent le fleuve Niger en premier pelletons (60,11%), suivi de l'Alibori à Kandi-Bani (16,73%), le Mono à la station d'Athiéomé (6,03%). Cette analyse ne prend pas en compte les réservoirs naturels comme les lacs, les lagunes, les rivières, les marigots et autres plans d'eau d'importance au Sud. Le tableau 2 suivant illustre les unités géologiques et les recharges des aquifères au Bénin.

Tableau 2 : Unités géologiques et les recharges des aquifères
 Source : MECAG-PDP, 1999

Unités géologiques	Superficies		Recharge annuelle	
	(Km ²)	(%)	millions (m ³)	(%)
Régions du socle	91 800	80	1 120	60
Grès de Kandi	10 200	9	125	7
Bassin sédimentaire côtier	11 303	10	600	32
Alluvions du Niger et dépôts de la Pendjari	1 460	1	25	1
Total	114 763	100	1 870	100

De l'analyse du tableau 2, le Bénin couvre une superficie de 114 763 km² et comprend deux régions géologiques. Une zone de socle représentant environ 80% de la superficie totale et une zone sédimentaire qui prenne en compte le bassin sédimentaire côtier (10%), une partie du Nord-Est dénommé bassin sédimentaire de Kandi (9%) et une partie de l'extrême Nord-Est appelée Bassin de la Volta (1%). Sur une recharge totale annuelle de 1,87 milliards de m³ d'eau (163m³/ha en moyenne), le bassin sédimentaire côtier occupe la première position avec 10% de la superficie et détient 32% des ressources en eau du pays. Le tableau 3 montre l'importance par département, des ouvrages de mobilisation de l'eau de surface au Bénin.

Tableau 3 : Typologie des ouvrages de mobilisation des eaux de surface. Source : DGEau, 2010

Depart.	Barrage		Chute		Mare naturelle		Surcreusement		Tota	
	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
Alibori	26	13,68	0	0	0	0	36	35,29	62	20,06
Atacora	55	28,95	3	100	0	0	0	0	58	18,97
Borgou	56	29,47	0	0	14	100	45	44,12	115	37,22
Collines	32	16,84	0	0	0	0	20	19,61	52	16,83
Couffo	4	2,11	0	0	0	0	0	0	4	1,29
Donga	15	7,89	0	0	0	0	1	0,98	16	5,18
Plateau	2	1,05	0	0	0	0	0	0	2	0,65
Total	190	100	3	100	14	100	102	100	309	00

Selon le tableau 3, sur 309 ouvrages de mobilisation de l'eau de surface, les barrages occupent une place de choix (61, 49%), suivi des surcreusements de mare (33,01%), les mares nature (4,53%) et les chutes (0,97%). Par département, les ouvrages se répartissent comme suit : Borgou 37,22%, Alibori 20,06%, Atacora 18,97%, les Collines 16,83%, la Donga 5,18%, le Couffo 1,29% et le Plateau 0,65%. Ces ouvrages permettent de mobiliser près de 40 millions de m³ pour plusieurs usages. Les ressources en eau sont suivies par trois canaux d'observation : (i) un canal météorologique-pluviométrique, (ii) un canal hydrométrique et (iii) un canal piézométrique.

Tableau 4 : Estimation des besoins en eau potable à l'horizon 2025 Source : MEEM, 2006

Département	Estimation des besoins en Eau potable Milieu Rural (50 litres par habitant par jour)			Estimation des besoins en Eau Potable en Milieu Urbain (100 litres par habitant par jour)		
	Population rurale	Besoin journalier (m3)	Total annuel (10 ³ m ³)	Population urbaine	Besoin journalier (m3)	Total annuel (10 ³ m ³)
Alibori	462 399	23 120	8 439	612 947	61 295	22 373
Atacora	487 532	24 377	8 897	646 264	64 626	23 588
Atlantique	711 384	35 569	12 983	942 997	94 300	34 419
Borgou	642 603	32 130	11 727	851 822	85 182	31 091
Collines	475 559	23 778	8 679	630 391	63 039	23 009
Couffo	465 498	23 275	8 495	617 056	61 706	22 523
Donga	310 632	15 532	5 669	411 768	41 177	15 030
Littoral	590 185	29 509	10 771	782 389	78 234	28 555
Mono	319 484	15 974	5 830	423 501	42 350	15 458
Ouémé	648 460	32 423	11 834	859 587	85 959	31 375
Plateau	361 260	18 063	6 593	478 879	47 888	17 479
Zou	532 377	26 619	9 716	705 709	70 571	25 758
Total	6 007 373	300 369	109 633	7 963 310	796 327	290 658

De l'examen du tableau 4, sur la base de 50 litres d'eau par habitant en milieu rural et 100 litres par habitant en milieu urbain, les besoins en eau potable à l'horizon 2025 sont respectivement de 796 327 m³ et 300 369 de m³ par jours. Ces besoins correspondent aux prélèvements annuels totaux de 109,633 millions et 290, 658 millions de m³. Le financement de la gestion des ressources en eau en général et de l'hydraulique rurale en particulier est assuré par l'Etat et les Partenaires Techniques et Financiers. L'évolution des dotations financières du secteur de l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) en Milieu Rural (MR) sur la période allant de 2003 à 2015 est mise en exergue (Figures 3 et 4).

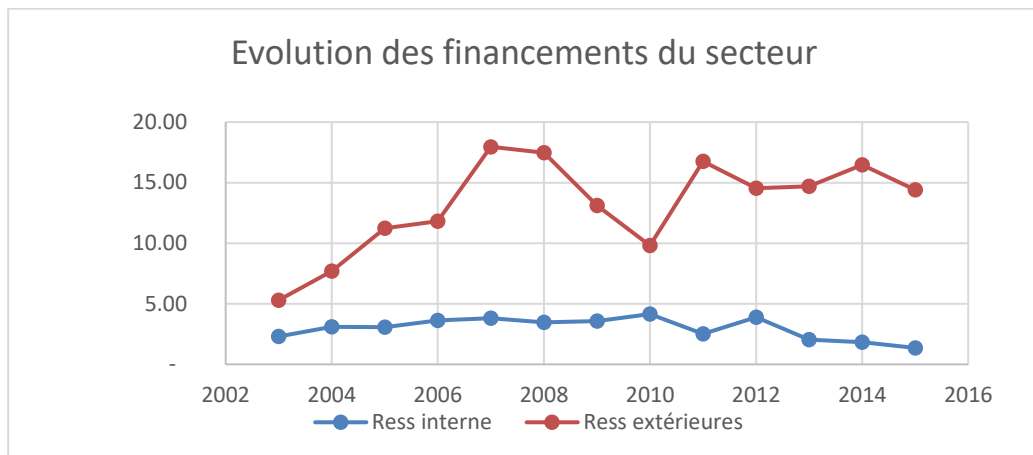


Figure 3 : Evolution des financements. Source : Rapport DGEau, 2015

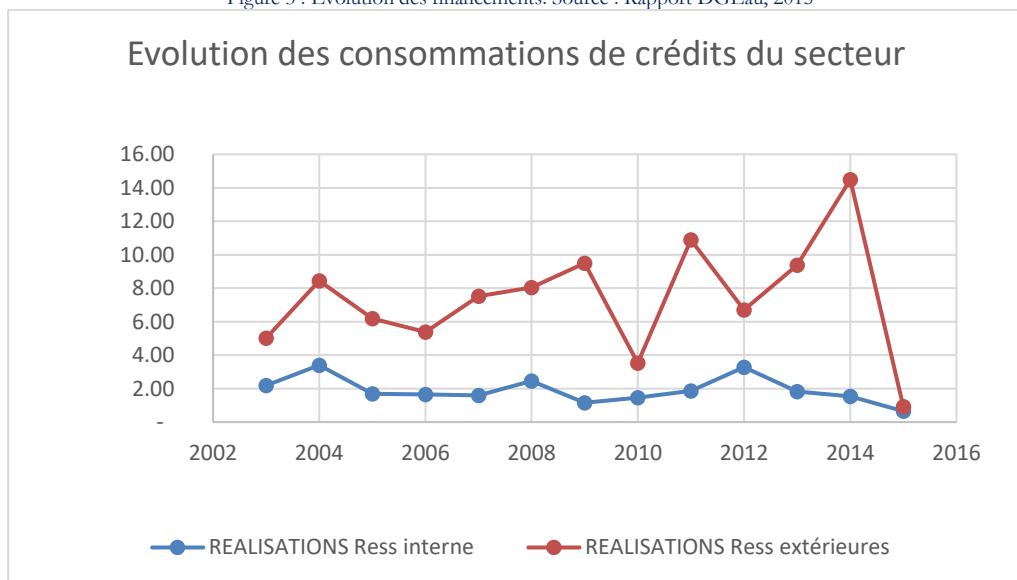


Figure 4 Evolution des consommations. Sources : Rapport DGEau 2015

Il est observé une faible progression des financements intérieurs sur la période allant de 2002 à 2015 (Figure 3). Pour atteindre les OMD, le gap financier a été comblé par les financements extérieurs au cours de la même période de référence. La mobilisation des financements porte sur un montant total de 209,99 milliards de francs CFA dont 38,72 milliards sur financement Budget National et 171, 29 milliards de francs CFA pour les financements extérieurs, soit respectivement 18,44% et 81,56%. Ces proportions montrent la forte dépendance du secteur de l'eau potable en milieu rurale aux financements externes et les difficultés de mobilisation des ressources internes. En outre, les difficultés rencontrées sur le terrain sont liées à la capacité de mise en œuvre de la Direction Générale de l'Eau et ses structures déconcentrées (Figure 4). Par conséquent, la consommation des dotations est restée en dessous de la moyenne qui est de 2,98 milliards pour le budget national et 13, 17 milliards pour les financements extérieurs. Cette situation est imputable à la faible consommation des crédits (Figure 5).

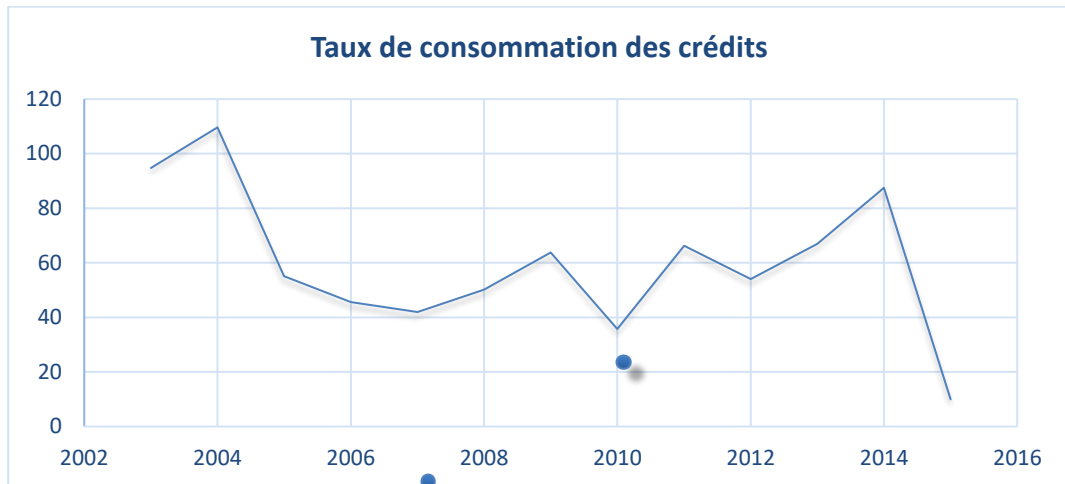


Figure 5 : Evolution du taux de consommation des dotations financières. Source : Rapport DGEau, 2015.

L'analyse de la figure 5 vient renforcer les résultats obtenus à partir de la figure 4. Le taux de consommation des financements affectés au secteur de l'Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural au Bénin sur la période de 2002 à 2015 est proche de la moyenne (50%). Il convient de signaler dans les années 2004, le taux de consommation des dotations financières a dépassé les 100%. Pendant ce temps, le secteur a assisté à une décroissance progressive pour se stabiliser à 9,96% en 2015. Les performances relatives observées en 2003 (94,7%), en 2004 (109,6%) et en 2014 (87,49%) sont dues aux fonds de concours obtenus des Partenaires Techniques et Financiers (DANIDA, KFW, GIZ, Pays-Bas, AFD, BAD, le Royaume de la Belgique, le Gouvernement du Japon et la Banque Mondiale). Les mauvaises performances financières constatées peuvent avoir des impacts sur l'atteinte des OMD. Pour les apprécier, il faut analyser les indicateurs physiques de l'hydraulique villageoise sur la période de 2002 à 2015.

Analyse des indicateurs physiques d'AEP en Milieu Rural

Efficacité technique du secteur d'AEP

Pour atteindre la cible des OMD (67,3% de taux de desserte) dans le secteur de l'Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural, les projections financières ont prévu 178,1 milliards de francs CFA de 2002 à 2015 avec une réalisation physique de 1320 Equivalents Points d'Eau sur l'ensemble du territoire national. Sur la même période de référence, 209,99 milliards de francs CFA ont été mobilisés soit un taux de mobilisation des ressources financières de 117, 90%. Cette rubrique rend compte de l'évolution des réalisations physique du secteur sur la période de l'étude (Figure 6).

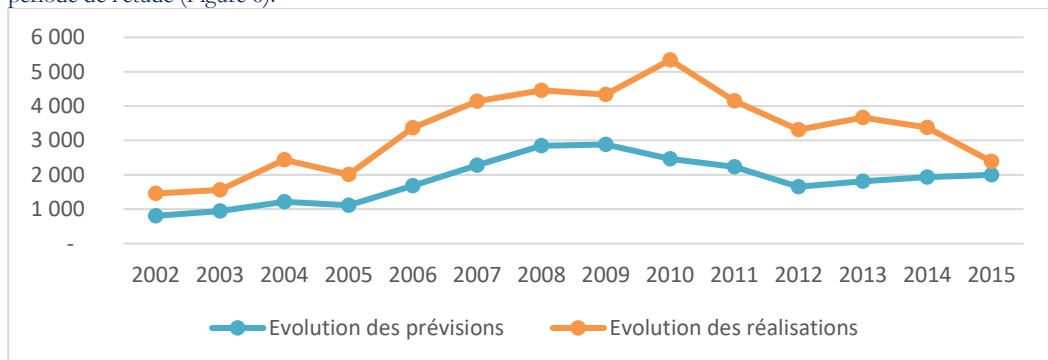


Figure 6: Evolution des prévisions et des réalisations physiques du secteur AEP-MR. Source : DGEau, 2015 et des données de terrain Août 2022

De l'examen de la figure 6, les réalisations d'Equivalent Point d'Eau ont connu une croissance régulière sur la période 2002 à 2010 où le secteur a connu le fort taux de réalisation (100, 9%). A partir de là, les performances du secteur en matière de réalisation ont chuté pour s'établir 385 équivalents point d'eau en 2015. L'objectif moyen de réalisation de 1320 équivalents point d'eau par an pour atteindre les Objectifs du Millénaire pour le Développement en 2015, s'est réalisé sur la période allant de 2006 à 2014 avec une réalisation moyenne annuelle de 1831 Equivalent Point d'Eau. Les réalisations moyennes annuelles portent sur 1439 Equivalents Point d'Eau contre une prévision moyenne annuelle de 1847 Equivalents Points d'Eau. Cette situation a engendré un score d'inefficacité moyen annuel de 408 EPE. Ce score d'inefficacité renvoie à la question de capacité de mise en œuvre de la Direction Générale de l'Eau et de ses services déconcentrés. La situation de la population réellement desservie a été mise en exergue (Tableau 5).

Tableau 5 : Typologie des ouvrages et population desservie. Source : Données ANAEP-MR, Août 2022

Type d'ouvrages	Caractéristiques				Population desservie (%)
	Ouvrage total		Ouvrage fonctionnel		
	Nombre	(%)	Nombre	(%)	
FPM	12 000	93,75	9000	75	66
AEV	600	4,69	120	20	33
PEA	200	1,56	180	90	1
Total	12 800	100	9300		100

L'examen de ce tableau révèle que les populations sont desservies à 66% par des forages munis de pompe à motricité humaine (FPM), contre 33% par les adductions d'eau villageoises (AEV) équipée d'un canal de distribution, et 1% par un poste d'eau autonome (PEA) desservant une bonne fontaine (BF). Les FPM représente 93,75% de l'ensemble des infrastructures hydrauliques, suivis par les AEV 4,69% et les PEA 1,56%. En termes de fonctionnalité, 75% des FPM sont fonctionnels, contre 20% des AEV et 90% des PEA.

Le portefeuille des infrastructures hydrauliques est composé de trois types d'ouvrages : les Forages à Motricité Humaine (FPM), les Adduction d'Eau Villageoise (AEV) et les Postes d'Eau Autonomes (PEA). Selon la DGEau (2007), citée par SEWADE S.G. (2019, p.34), une AEV est constituée d'un ouvrage de captage de l'eau souterraine de petit diamètre (15 à 40 cm), muni d'un système de pompage par une pompe immergée électromagnétique, d'un grand réservoir (château d'eau) et d'une canalisation de distribution à travers les Bonne Fontaines (BF). Quant aux Poste d'Eau Autonomes (PEA), le dispositif est identique à la seule différence qu'il n'existe pas de Bonne Fontaines. L'eau est desservie sur place aux populations par une rampe de 3 à 4 robinets. Pour l'approvisionnement en eau potable des populations en milieu rural, l'eau souterraine est exploitée. Une quarantaine de communes rurales des départements du sud bénéficient des conditions favorables sans contraintes majeures de mobilisation des ressources en eau. Elles sont de bonne qualité à l'exception du biseau « salé » en bordure de la côte. A l'exception de du biseau « sec » en limite des aquifères continu traversant les départements du Couffo, Zou et Plateau, les débits dépassant les 15m³/heure sont observés (ANEAP-MR, 2016, p.6). Pour le même auteur, 31 communes rurales situées dans les zones de socle constitués de granites, gneiss, quartzites, silts et argiles présentent d'importantes variations de productivité dépendant du degré de fissuration des socles. Cette situation ne permet pas une grande mobilisation des ressources en eau pour satisfaire les populations en constante augmentation. L'évolution de la population desservie de 2002 à 2015 a été mise en exergue (Figure 7).

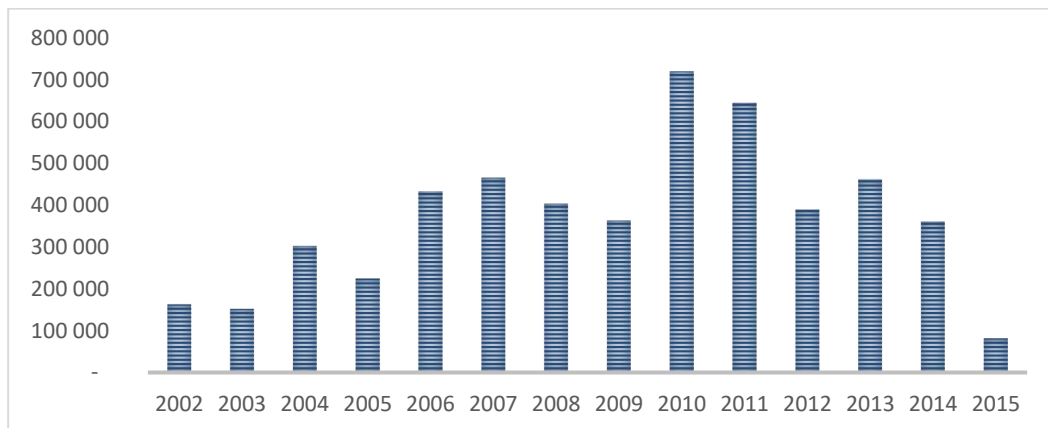


Figure 7 : Evolution de la population desservie de 2002 à 2015 Source : DGEau, 2015 et des données de terrain, Août 2022

L'examen de la figure 7 met en exergue une desserte de la population sur la période de référence en dent de scie. Cette évolution a connu deux pics respectivement en 2007 et en 2010 avec 466 000 et 720 000 personnes desservies. Par contre, Cette desserte a amorcé une tendance baissière à partir de 2011 pour s'établir à 82 000 personnes desservies en 2015. Sur la période de 2002 à 2015, 396 357 personnes en moyenne ont été desservies contre 419 750 habitants de prévision, soit un score d'inefficacité moyen annuel de 50 393 personnes. En outre, il est important d'analyser l'évolution des besoins et des réalisations sur la période de référence (Figure 8).

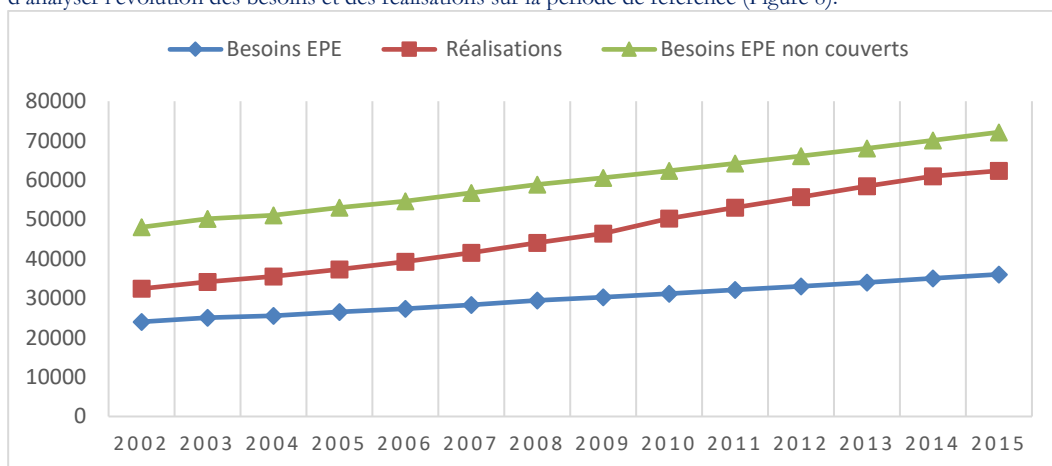


Figure 8: Evolution des besoins et des réalisation de 2002 à 2015. Source DGEau 2015 et données de terrain, Août 2022

La figure 8 met en exergue le niveau de performance de desserte rurale largement en deçà des besoins réels de la population de 2002 à 2015. L'analyse comparée des résultats obtenus (67,6%) par rapport aux cibles des différents Budgets Programmes par Objectifs (BPO) (85% de taux de desserte en 2015) de la Direction Générale de l'Eau sur la période, il se dégage un score d'inefficacité de 17, 40% (DGEau, 2016, p. 10). Par conséquent, il est observé un contraste dans la mise en œuvre des politiques du secteur d'Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural (PNUD, 2017, p.26). Le milieu rural intègre toutes les localités situées en dehors des périmètres gérés par l'opérateur urbain du service de l'eau à savoir le Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB). Il concerne toutes les communes du pays, à l'exception de Cotonou, Parakou et Porto Novo et compte 4200 villages, dont 65% en dessous de 2000 habitants, regroupant 27000 localités et plus de 8 500 000 habitants en 2016 (ANEP-MR, 2016, p.5). Ces besoins ne prennent pas en compte les usages des secteurs relatifs à l'agriculture, à l'élevage, à la pêche et à l'irrigation dont la demande est en permanente évolution. L'évolution des taux d'accroissement des besoins en

eau potable en milieu rural et l'augmentation du taux de desserte sur la période allant de 2002 à 2015 ont été mises en exergue (Figure 9).

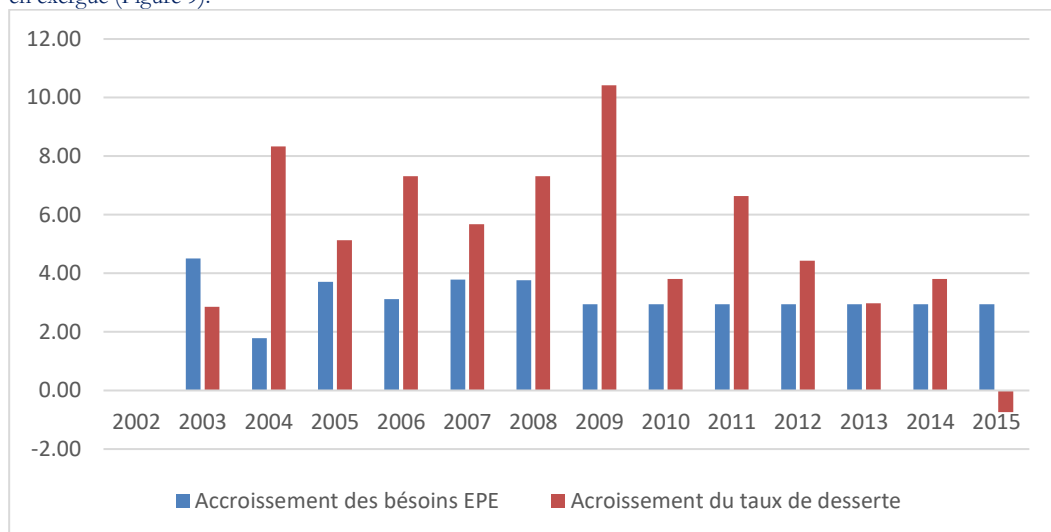


Figure 9: Evolution des taux d'accroissement des indicateurs de performances Source : DGEau et des données de terrain, Août 2022

La figure 9 met en exergue l'accroissement de la desserte en eau potable en milieu rural sur la période allant de 2004 à 2014. Sur la période d'une décennie, cet indicateur a évolué plus que l'augmentation des besoins en Equivalent Point d'Eau au Bénin. Cette évolution a connu une chute à partir de 2014 pour devenir négative en 2015. Ce contraste montre qu'il reste d'énormes progrès à réaliser pour espérer atteindre les Objectifs de Développement Durable (ODD) en matière d'alimentation en eau potable des populations rurales (Banque Mondiale, 2016, p.8). L'analyse diagnostique de la stratégie du secteur de l'eau en milieu rural au Bénin est présentée par le modèle SWOT (Tableau 6).

Fort de ces constats, pour éliminer les faiblesses et réduire sensiblement les menaces, la loi N°2010-44 du 24 novembre 2010 portant Gestion des Ressources en Eau en République du Bénin a été adoptée, suivi du Document du Plan National de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau validé en février 2011 et du Document de Politique Nationale de l'Eau. Aux termes des dispositions de cette loi, l'Etat exerce plusieurs rôles selon le guide à l'usage des communes dans l'approvisionnement en eau potable. Il assure l'orientation et la coordination des actions partenaires externes dans le secteur de l'eau (Gaston Sèssimè LAGOYE et al., 2022, p.615). Il convient de signaler qu'avant l'introduction des lois et autres documents de politique du secteur de l'eau, les populations, tirant partie de leur milieu de vie, avaient toujours préservé les ressources naturelles selon les règles de la tradition (Hèdible Sidonie et Boko Michel, 2006, p.65). Pour ces auteurs cités par Gaston Sèssimè LAGOYE et al., (2022), le responsable du village, cumulait les fonctions du chef de villages et les fonctions de maître de la terre et de l'eau (Gaston Sèssimè LAGOYE et al., 2022, p.615).

Tableau 6 : Résultat d'analyse diagnostique de la stratégie du secteur « eau » en milieu rural à l'aide du Modèle SWOT

Source : Données de terrain, Août 2022 et MPDEEP, (2012, p. 122).

Forces	Faiblesses
A l'issue de l'étude, des principaux atouts naturels ou de potentialité existante dont la mise en valeur contribue au développement économique et social des populations de même que l'ensemble des caractéristiques du système d'organisation d'exploitation et de gestion des potentialités des zones susceptibles d'avoir des impacts négatifs à court, moyen et long terme sur la vie des populations et les écosystèmes sont appréhendés à travers les forces et faiblesses.	
<ul style="list-style-type: none"> - Existence d'un document de vision et stratégie de la gestion des ressources en eau - Existence des Programmes d'Action et des Documents de Budgets Programmes par Objectifs (BPO) - Existence de la Politique Nationale de l'Eau fondée sur le Gestion Intégrée des ressources en eau (GIRE) - Large disponibilité des ressources en eau à des fins productives (13 milliards de m³ par an pour les eaux de surface et 1,9 milliards de m³ par an pour les eaux souterraines), en terres cultivables et en terres irrigables - Augmentation exponentielle de l'effectif de la population - Existence d'un cadre juridique et réglementaire de la gestion des ressources en eau (Loi sur la gestion de l'eau, CNE, GIRE...etc). - Existence d'un cadre institutionnel pour la gestion des ressources en eau - Existence au Bénin d'une approche de la gestion des ressources en eau - Existence des ouvrages de mobilisation des ressources en eau au Bénin et des facteurs climatiques favorables 	<ul style="list-style-type: none"> - Absence de coordination dans le processus d'élaboration du document de vision et de politique du secteur de l'eau (absence de vision globale du secteur, absence d'objectifs et orientations du secteur, absence d'indicateurs de performance vérifiables) - Absence dans les Budgets Programmes par Objectifs de l'usage de l'eau pour les autres secteurs d'activités (agriculture, pêches, etc.) - Absence de cohérence dans les programmations stratégiques du secteur - Problème de mobilisation des ressources en eau dans les zones de socle, soit 80% du territoire national (Centre et au Nord). - Absence dans les dispositions législatives et réglementaire, de l'implication des chefs de culte dans la gestion des points et plans d'eau, la délimitation des zones par usage des plans d'eau, la délimitation des zones de protection des plans d'eau, la délimitation des couloirs d'accès aux plans d'eau pour le cheptel, etc. - Très forte concentration du pouvoir de gestion des ressources en eau au niveau central.
Opportunités	Menaces
L'ensemble des conditions favorables de développement offertes par les atouts et les potentialités existantes de même que les risques présents et futurs liés aux faiblesses sont consignés dans cette partie synthèse du Modèle SWOT.	
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Forte demande de l'Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural, pour les activités agricoles, pour l'aquaculture, pour la pisciculture, pour l'élevage dans des conditions économiques ✚ Priorité accordée à l'Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural par la Communauté Internationale et l'importance des Partenaires Techniques et Financiers au financement du secteur de l'Eau ✚ Développement du partenariat Communes-DGEau et les autres acteurs du secteur 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Pollution de l'eau de boisson risque de maladie ✚ Faiblesse des revenus des ruraux et coûts élevés des facteurs de production ✚ Extension des cultures dans les bassins versants avec l'usage des produits chimiques nuisibles à la diversité biologique ✚ Occupation des terres inondées et accroissement des risques d'étalement des eaux ✚ Ensablement et appauvrissement des bas-fonds, dégradation de la qualité des ressources en eau.

DISCUSSION

A travers le diagnostic stratégique du secteur de l'eau et l'évaluation des différentes politiques y afférentes, il ressort que des interventions opérées de 2002 à 2015 ont enregistré des avancées. Ces avancées concernent l'Alimentation en Eau Potable en milieu rural, péri-urbain et urbain. Le Bénin dispose d'une potentialité de plus de 13 milliards de m³ par an des eaux de surface et 1,89 milliards de m³ d'eau souterraines. Le pays dispose également des conditions climatiques favorable à la réalisation des infrastructures hydrauliques et à la mobilisation des ressources en eau pour les différents usages notamment : l'élevage, la pêche, l'agriculture, l'irrigation et l'eau de boisson.

YETOGNON E.J.G. (2013, p. 46) dans ses travaux de recherche sur « l'évaluation des dépenses publiques du financement de l'accès à l'eau potable en milieu rural au Bénin » avait trouvé des résultats similaires. Pour l'auteur, le secteur de l'eau potable en milieu rural au Bénin est confronté à de sérieux problèmes malgré l'existence de plusieurs politiques et stratégies en matière de gestion et financement du secteur (YETOGNON E.J.G., 2013, p. 46). La stratégie sectorielle 2005-2015, résultante des améliorations apportées aux anciens documents de stratégie prend en compte des OMD au profit du secteur de l'hydraulique rurale.

Pour MERPMEDER (2015, p. 18), le Bénin sans compter les lacs et lagunes au Sud du pays, dispose d'eau de surface de 13,106 milliards de m³ non compris les eaux du fleuve Niger. Pour les eaux souterraines, la recharge annuelle des aquifères est estimée à près de 2 milliards de m³ mais le niveau de mobilisation et d'exploitation de ces ressources est encore faible (2%) (SONEB, 2015, p.18). Cette disponibilité diffère selon les auteurs. Selon DGEau (2010) citée par YETOGNON E J G (2013, p.25), la quantité d'eau disponible au Bénin s'élève à environ 25 milliards de m³ par an dans un contexte d'augmentation rapide de la population et du changement climatique.

Sur les questions d'atteinte des OMD en 2015, les résultats divergent. Pour MEM (2018, p. 1), la Stratégie de Croissance pour la Réduction de la Pauvreté au Bénin (2011-2015) a positionné l'amélioration de l'accès à l'eau potable en milieu rural parmi les défis les plus importants et a accompli des efforts en vue de l'augmentation du taux de desserte. Ce taux de desserte sur l'ensemble du territoire est passé de 57% en 1990 à 78% en 2015, dépassant largement les OMD. Pour la DGEau (2016, p.10), le taux de déserte en milieu rural au 31 décembre 2015 était de 67,6%. Ce taux a été déterminé avec la méthode dite « global ». Cet indicateur déterminé à partir de la méthode dite 'détaillée' donne un taux de 45%. Pour une vision plus juste de la situation du secteur, il s'avère nécessaire que les acteurs du secteur s'accordent sur une méthode de calcul appropriée. Toutefois, toutes les études s'accordent sur le fait que la disponibilité des ressources en eau pour le moyen et le long terme ne devrait pas constituer un facteur limitant pour le développement socio-économique du pays. Le problème de la pérennisation de cette disponibilité face aux effets des changements climatiques et des pratiques anthropiques actuelles (MDPEED, 2012, p. 11) doit être résolu. M. Bied-Charreton (2004), cité par Gaston Sessimé LAGOYE, et al., (2022, p.121), dans leurs travaux sur « Déterminants socio-économiques de la performance des ouvrages hydrauliques dans le département du Plateau (République du Bénin) » révèlent que la gouvernance des ressources en eau constitue un enjeu politique, économique et social majeur. D. Brooks (1977) cité par le même auteur, les premières étapes de la gestion des ressources en eau sont axées sur l'amélioration de l'approvisionnement en eau potable qui a consisté à développer des technologies et des infrastructures hydrauliques pour répondre à l'accroissement de la demande du point de vue des besoins à satisfaire. Or, la demande de l'eau, fonction des besoins, des comportements, des valeurs humaines et la manière dont les sociétés fonctionnent et s'organisent représente un enjeu majeur complexe que l'approvisionnement en eau potable des populations. L'avenir d'un pays réside dans sa capacité à gérer les ressources en eau (Gaston Sessimé LAGOYE, 2022, p.121).

CONCLUSION

L'étude avait pour objectif d'apprécier les effets socio-économiques de la mise en œuvre des différentes stratégies d'approvisionnement en eau potable en milieu rural au Bénin. Des différentes interventions politiques et financières dans le secteur de l'eau ont permis au Bénin d'enregistrer des avancées. Les taux de desserte en milieu rural, péri-urbain et urbain ont progressé au cours des années, bien qu'ils soient en dessous des attentes pour satisfaire au mieux les populations. Dans le domaine de la gestion des ressources en eau, l'ouverture de plusieurs chantiers politiques, législatifs et réglementaires est notée. Au-delà de ces acquis, les performances actuelles d'approvisionnement en potable, éloignent le Bénin de l'atteinte des objectifs visés par la « **Vision Eau 2025** ».

Références

- [1] Ahamide Bernard (2006) : La Gestion Des Ressources En Eau Des Populations Rurales : Commune De Pahou, Mémoire De Maîtrise En Géographie, DGAT/FLASH/UAC, 118 P.
- [2] ANAEP-MR (2016) : Stratégie Nationale De D'approvisionnement En Eau Potable En Milieu Rural, 2017-2030, Document De Synthèse, 14p
- [3] Dgeau (2016) : Rapport D'exécution Du Budget Programme Par Objectif, Gestion 2015 De L'Approvisionnement En Eau Potable En Milieu Rural (AEP-MR) Et De La Gestion Intégrée Des Ressources En Eau (GIRE), 75p.
- [4] GNIMADI Codjo Clément (2013) : Impact De La Taille Et De La Composition Du Ménage Sur La Fécondité Désirée Et La Pratique Contraceptive Des Femmes Au Bénin, Les Cahiers Du CBRST, N°4, Décembre 2013, Pp344-369.
- [5] MEM (2018) : Etude De Collecte De Données Pour Le Développement Des Eaux Souterraines Et L'amélioration Des Systèmes D'approvisionnement En Eau Dans Les Départements De Couffo Et Plateau En République Du Bénin, Rapport Général, 137p.
- [6] MERPMEDER (2015) : Evaluation De La Stratégie Nationale De L'Approvisionnement En Eau Potable En Milieu Urbain Et Péri-Urbain 2006-2015, Rapport Final, 58p.
- [7] MPDEEP (2012) : Evaluation De La Politique De Gestion Des Ressources En Eau Au Bénin, Rapport Général, 126p.
- [8] HEDIBLE Sidonie Et BOKO Michel (2006) : Qualité De Sept (07) Points D'eau Dans La Région Côtière Du Bénin (Afrique De L'Ouest), In Revue Scientifique Semestrielle Edité Par LACREDE/FLASH/UAC N°1, Pp 45-64.
- [9] LAGOYE Sèssimè Gaston, DOSSOU-YOVO Adrien Et KOUDJEGA Hervé (2022) : Problématique De La Gestion Des Ressources En Eau Dans La Commune De Kétou (Département Du Plateau), Revue International Journal Of Progressive Sciences And Technologies (IJPSAT), Vol 33, N°01, June 2022, PP 605-618.
- [10] LAGOYE Sèssimè Gaston, DOSSOU-YOVO Adrien Et KOUDJEGA Hervé (2022) : Déterminant Socio-Economique De La Performance Des Ouvrages Hydrauliques Dans Le Département Du Plateau (République Du Bénin), In Revue International Journal Water Sciences And Environment Technologies (IJWSET), Vol (Vii), Issus 2-June 2022, Pp109-122.
- [11] ONU (2010) : Etude De La Disponibilité De L'eau Potable Et Des Maladies Liées A La Consommation Des Eaux Polluées Dans Le Monde, Volume 1, Numéro 2, Washington DC 88p.
- [12] ONU (2019) : L'Eau Et Le Climat Dans Le Cadre Du Programme Mondiale De Développement Durable : Note De Politique De L'Organisation Des Nations Unies Sur Le Changement Climatique Et Eau, 28p.
- [13] PNUD (2017) : Priorisation Des Cibles Des Objectifs De Développement Durables (ODD) Au Bénin, Rapport Général, 250p.
- [14] SEWADE SOKEGBE Grégoire (2019) : Analyse Socio-Economique De La Gestion Des Ouvrages Hydrauliques Dans Le Département Du Couffo Au Sud-Ouest Du Bénin, Thèse De Doctorat Unique, UAC, 325p.
- [15] Vision Eau 2025 (1999) : Vision Nationale De L'Eau, L'an 2025, Rapport De Synthèse, 37p.
- [16] YETOGNON Eric, Judith Georges (2013) : Evaluation Des Dépenses Publiques De Financement De L'accès A L'eau Potable En Milieu Rural Au Bénin, Thèse De Doctorat Unique, UAC, 255p..

Effets combinés du biochar et des fientes de volaille sur les paramètres physiologiques de la laitue (*Lactuca sativa*)

Yemadje Alda Aude Sèna¹

¹ École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) Lokossa, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM), Abomey, Bénin, Laboratoire de Recherches Pluridisciplinaires de l'Enseignement Technique (LaRPET) ;

Résumé

La présente recherche vise à identifier la meilleure combinaison de dosages de fientes de volaille et du biochar qui permettra d'avoir une bonne production de la culture de la laitue (*Lactuca sativa*). Ceci permettra de conserver la fertilité des sols, de garantir la sécurité alimentaire des populations et de réduire l'utilisation des produits chimiques qui constituent une nuisance pour l'environnement et la santé des consommateurs.

Pour mener cette recherche, un essai composé de douze unités parcelaires comportant trois répétitions et quatre traitements : T0 (témoin n'ayant reçu aucune dose d'application), T1 (75% de fientes de volaille et 25% de biochar), T2 (25% de fientes de volailles et 75% de biochar), T3 (50% de fientes de volailles et 50% de biochar) a été installé. Chaque unité parcelaire a une superficie de 1,68 m². Les données collectées ont été traitées et analysées avec le tableur Excel 2010 et le logiciel Statistix.

Les résultats obtenus montrent que les traitements (T1, T2 et T3) ayant reçus des apports de combinaison de fertilisant organique (biochar et fiente de volaille) ont été les plus efficaces au niveau de tous les paramètres étudiés (longueur, largeur et le nombre de feuilles ainsi que le poids et le rendement de la laitue). Le traitement T3 (50% de fientes de volaille et 50% de biochar) a été le plus performant. Il a été très favorable pour la culture de la laitue et pourrait donc constituer une alternative aux engrais chimiques pour une production biologique et serait écologiquement rentable.

Mots clés : Dangbo, variation climatique, pathologies, santé humaine, cadre de vie.

Combined effects of biochar and poultry droppings on the physiological parameters of lettuce (*Lactuca sativa*)

Abstract:

The present research aims to identify the best combination of dosages of poultry droppings and biochar that will allow a good production of the culture of lettuce (*Lactuca sativa*). This will make it possible to preserve soil fertility, guarantee the food security of the populations and reduce the use of chemical products which constitute a nuisance for the environment and the health of consumers.

To conduct this research, a trial made up of twelve plot units comprising three repetitions and four treatments: T0 (control having received no application dose), T1 (75% poultry droppings and 25% biochar), T2 (25% poultry droppings and 75% biochar), T3 (50% poultry droppings and 50% biochar) was installed. Each plot unit has an area of 1.68 m². The data collected was processed and analyzed with Excel 2010 spreadsheet and Statistix software. The results obtained show that the treatments (T1, T2 and T3) having received inputs of a combination of organic fertilizer (biochar and poultry manure) were the most effective in terms of all the parameters studied (length, width and number of leaves and lettuce weight and yield). The T3 treatment (50% poultry droppings and 50% biochar) was the most effective. It has been very favorable for the cultivation of lettuce and could therefore be an alternative to chemical fertilizers for organic production and would be ecologically profitable.

Key Words: Glo-Djigbé, biochar; chemical fertilizers ; poultry droppings; *Lactuca sativa*.

¹ Corresponding author: michel.kouassi@inphb.ci

INTRODUCTION

Le maraîchage dans les pays de l'Afrique de l'ouest, constitue l'une des composantes principales de l'agriculture urbaine et péri-urbaine qui se sont fortement développées au cours des dernières décennies suite à la croissance démographique et à l'augmentation des besoins alimentaires (Singbo et al, 2004 cité par ACDD, 2019, p. 14). Le Bénin n'échappe pas à cette situation. La pression humaine qui s'exerce sur ce pays devient importante. Avec une population de 3.331.210 habitants en 1979 (INSAE **RGPH 1**, 1988 cité par A. A. S., Yemadje, 2015 p. 21), le Bénin se retrouve à 4.915.555 habitants en 1992 (INSAE **RGPH 2**, 1994), 6.769.914 habitants en 2002 (INSAE **RGPH 3**, 2004, p.82) et à 10. 008.749 en 2013 avec un taux d'accroissement annuel de 3,5% (INSAE **RGPH 4**, 2014, p.2). De 1979 à 2013, soit trente et quatre (34) ans d'écart, la population de ce pays a triplé. La croissance rapide que connaît ce pays principalement ces villes, crée des problèmes de sécurité alimentaire surtout qu'on note une faiblesse des performances des systèmes de production rurale. Dès lors, l'agriculture urbaine et périurbaine deviennent une solution pouvant permettre d'améliorer l'insuffisance en denrées alimentaires des citadins (Hounpkonou, 2003, cité par D.M.G.F. Chidikofan, 2010, p.1). Les cultures maraîchères sont alors la principale activité de cette agriculture qui permettent de répondre efficacement à la demande alimentaire urbaine (James et al., 2006, cité par D.M.G.F. Chidikofan, 2010, p.1). La volonté des maraîchers de couvrir les besoins alimentaires de cette population les amène d'une part à l'utilisation massive de produits chimiques pour le contrôle des ravageurs et de la fertilité des sols (Akogbéto et al., 2005 ; Ahouangninou et al., 2011, cité par C. C. A. Ahouangninou, 2013, p. 102) et d'autre part aux eaux usées et de marécage pour l'irrigation des cultures. Cette utilisation abusive ou inappropriée des engrais chimiques aboutit à la dégradation du sol, à la pollution de l'air et des eaux ainsi que la qualité des produits avec des effets néfastes sur la santé humaine, animale et végétale (R. S. Lokossou et al, 2018, p. 12440 et 12443). Or de nos jours, les préoccupations sociales concernant les questions environnementales liées à l'agriculture sont de plus en plus prégnantes. Alors l'agriculture biologique apparaît comme l'une des solutions les plus adéquates pour produire des légumes et légumineuses sains sans hypothéquer l'équilibre de la biodiversité. Elle permettra aussi d'améliorer la qualité des sols et leur capacité de production en réduisant la dépendance aux engrais chimiques et tout ceci en vue d'un milieu de vie plus durable (Lefebvre et al., 2005, cité par D. M. F. Grâce Chidikofan, 2010, p.2). C'est l'une des nombreuses approches possibles de l'agriculture durable et beaucoup de ses techniques sont utilisées dans divers systèmes de production agricole. Mais la mise en pratique de cette approche agricole rencontre d'énormes difficultés dans les grandes villes du Bénin particulièrement celle de ville de Cotonou, capitale économique du pays, possédant environ onze (11) sites pour le maraîchage (Ogouwalé, 2007 cité par D. M. F. Grâce Chidikofan, 2010, p. 1) et vise essentiellement la culture des légumes et légumineuses (laitue, carotte, concombre, grande morelle, etc.). Dans cette ville, la production maraîchère est handicapée par de nombreuses contraintes telles que l'urbanisation sans cesse croissante, la rareté des espaces libres, la pollution de l'air et de l'eau d'irrigation par les gaz d'échappement, l'accès difficile à la terre, la forte pression parasitaire et surtout la baisse de la fertilité des sols due à leur surexploitation. Face à cette situation et dans la perspective d'améliorer le rendement des cultures maraîchères principalement celle de la laitue dont la demande est très forte dans la ville de Cotonou et ses environs surtout dans les périodes de grands événements (fêtes, communion, carême etc ...), le présent travail dont le thème est intitulé : « Effets combinés du biochar et des fientes de volaille sur les paramètres physiologiques de la laitue à Glo-Djigbé » a été mis en œuvre. En effet, cet article vise d'une part le développement de l'activité de maraîchage dans les zones péri urbaines et d'autres part à substituer les stratégies utilisées actuellement par les maraîchers (association des fertilisants organiques locaux comme les fientes de volaille, les bouses de vache et les composts des déchets solide ménagers avec les engrais minéraux) qui ne sont pas sans conséquence sur l'environnement et la santé humaine à une nouvelle pratique. Cette nouvelle pratique est basée sur la combinaison de deux fertilisants organiques (biochar et fientes de volaille) très bénéfiques sur le plan de la rentabilité, de l'environnement et de la santé. L'objectif de cette recherche est de déterminer la meilleure combinaison des dosages de la fientes de volaille et du biochar qui permettra d'avoir une bonne production de la laitue sur le plan de la croissance et du développement dans les conditions écologiques de l'arrondissement de Glo-Djigbé.

Présentation du cadre de recherche

L'arrondissement de Glo-Djigbé est localisé au sud du Bénin précisément dans le département de l'Atlantique et est située entre 6°30' et 6°35' latitude Nord puis 2°15' et 2°30' longitude Est. Il est limité au nord par l'arrondissement de Zinvié, au sud par ceux de Ouédo et Togba, à l'est par celui d'Akassato puis à l'Ouest par la commune de Zè (Figure 1). Cet arrondissement a une superficie de 100,79 km² et se trouve environ à vingt-sept

kilomètres de la commune de Cotonou et 15 kilomètres de l'arrondissement d'Abomey-Calavi. Il est caractérisé par un climat de type subéquatorial marqué par deux saisons de pluies et deux saisons sèches. La pluviométrie moyenne annuelle qui est de 1200 mm dégage d'immenses possibilités agricoles. La température moyenne est d'environ 27,2°C. L'état hygrométrique reste toujours élevé 60 à 80% avec des maxims au moment des grandes précipitations. Ces sols sont très meubles en surface et bien drainés puis possèdent de bonnes caractéristiques physiques qui permettent un bon développement de la culture de laitue. La proximité de cet arrondissement de la première commune la plus peuplé du Bénin et de l'arrondissement d'Abomey-Calavi, la cité dortoir des "cotonois" constitue un enjeu majeur en termes d'approvisionnement en matière de déchets organiques (fiente de volaille, bouse de vache, des déchets agricoles et des déchets solides ménagers) à faible coût. Ces déchets constituent les matières premières pour la fabrication du biochar. Aussi sa position permettra de régler les problèmes de pourriture des cultures et de réduire le coût du transport. L'ensemble de ces facteurs sera un atout aussi bien pour le consommateur qui aura les cultures de qualité et à moindre coût que pour le maraicher qui va tirer un maximum de profit

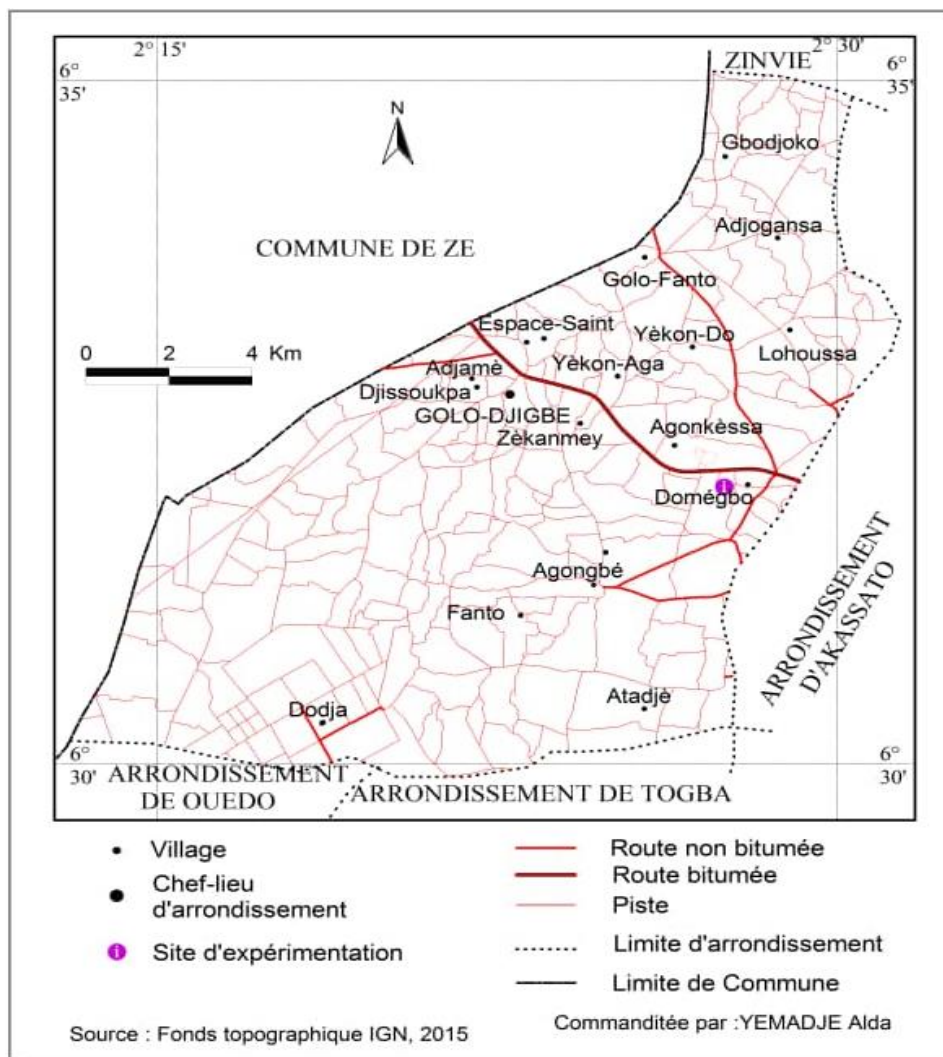


Figure 1 : Situation géographique de l'arrondissement de Glo-Djigbé

MATERIEL ET METHODES

Matériels

▪ Matériel végétal :

Le matériel végétal est constitué des semences de laitue de la variété Eden (Photo 1).



Photo 1 : Semence de laitue (variété EDEN)

La semence de laitue (Photo 1) produit des feuilles bien développées, larges et se regroupant en pomme. Elle fait 3 à 4 semaines en pépinière et 4 à 6 semaines sur planches. C'est une variété plus cultivée dans la zone de recherche.

Matériel utilisé pour la fabrication du biochar

Plusieurs matériels sont utilisés dans le processus de fabrication du biochar. Il s'agit :

- I. des matières premières (Spathes de maïs et fanes d'arachide),
- II. du carboniseur qui a servi à la décomposition thermique de la matière première dans un milieu pauvre en oxygène,
- III. du moulin qui a permis de réduire en poudre le char obtenu après la carbonisation,
- IV. d'un récipient pour faire le mélange du char afin d'obtenir le biochar.

Matériel utilisé pour les mesures

Il s'agit : du mètre en ruban, de balance pour peser la quantité du biochar, de la fiente de volaille et des récoltes. Les fiches de collecte de données des paramètres étudiés.

Fertilisants : Les fertilisants utilisés sont la fiente de volaille et le biochar.

Méthode : La méthode adoptée se résume essentiellement à la collecte et au traitement des données puis à l'analyse des résultats.

Collecte des données

Données collectées

Les données collectées sont à la fois quantitatives et qualitatives. Elles portent sur :

- Les données physiques : il s'agit des données pluviométriques, hygrométriques, de températures et du sol,
- Les données concernant les paramètres morphologiques de la laitue : Il s'agit de la longueur, de la largeur, du nombre de feuilles, du poids des laitues récoltés et du rendement.

Outils et techniques de collecte des données

Outils : Il s'agit de la fiche de collecte des données qui a servi comme un support d'enregistrement des données depuis le repiquage des laitues jusqu'à la récolte.

Techniques de collecte des données

Recherche documentaire

La documentation a consisté à mener des investigations au niveau des centres et des institutions de recherche dont les domaines d'activité ont rapport avec le thème de la présente recherche. A ces centres et institutions de recherche s'ajoute l'apport des sites web qui ont permis de disposer des ouvrages numériques. Dans ces différents centres d'informations et sur l'internet, les documents (mémoires, thèses, rapports, articles, revues) ont été d'un apport considérable. Ils ont permis d'avoir des connaissances sur la zone de recherche et de mieux comprendre le système de production de la culture de laitue, des techniques de fabrication et d'application du biochar puis de la fiente de volaille.

Techniques culturales

Plusieurs opérations culturales ont été effectuées dans le cadre de la préparation du terrain. Il s'agit entre autres : de la délimitation du terrain, du fauchage, de l'essouchage, du nettoyage, de la mise en place du dispositif expérimental et de l'application des différentes combinaisons de la fiente de volaille et de biochar.

Dispositif expérimental et traitement (Apport de fertilisants organiques)

Le dispositif expérimental adopté est celui en blocs complètement aléatoires (BAC) ou bloc de Fisher de quatre traitements avec trois répétitions. L'unité expérimentale est de 1,68 m². Les écartements de repiquage sont respectivement de 30 cm x 30 cm soit une densité de 16 plants/unité expérimentale. Les traitements appliqués se présente comme suit :

- T0 : Traitement témoin n'ayant reçu aucun apport de fertilisant,
- T1 : 75% de biochar (2 520 g) + 25 % de fientes de volailles (840 g),
- T2 : 25% de biochar (840 g) + 75 % de fientes de volailles (2 520 g)
- T3 : 50% de biochar (1 680g) + 50 % de fientes de volailles (1 680g).

Les 3360 g de combinaison de fertilisants organiques ont été déterminés par rapport à la quantité nécessaire que doit recevoir unité expérimentale de 1,68 m². Le mélange des fertilisants apporté aux planches a été arrosé pendant deux semaines avant le repiquage. Ceci va permettre la séquestration des nutriments par le biochar afin de les distribuer de façon progressive aux plants de laitue.

Semis : Le semis a été réalisé à faible profondeur et son lit est couvert des pailles d'*Elais guinensis* (palmier à huile). Ceci permet à ce dernier de conserver l'humidité et de minimiser la pression des rayons solaires. La pépinière a duré 24 jours.

Repiquage : Le repiquage de la laitue (*Lactuca sativa*) a été fait vingt-quatre (24) jours après le semis en pépinière sur des planches bien arrosées. Les plants vigoureux, atteints le stade de 3 à 4 feuilles, ont été repiqués. A la fin du repiquage, les planches des plantules ont été convenablement arrosés et les mottes émietées une fois de plus.

Entretien

Arrosage : L'eau est apportée aux plants sous forme de pluie. La quantité apportée dépend du niveau initial d'humidité du sol. Il est fait 2 fois par jours.

Binage, désherbage et sarclage

Le binage réalisé chaque semaine est suivi du sarclage des allées et du désherbage des planches, qui sont effectués trois fois depuis le repiquage des plants jusqu'à la maturité ; ce qui a permis de lutter efficacement contre les adventices et ameublir le sol pour une bonne aération et infiltration d'eau.

Traitements phytosanitaires

Le traitement phytosanitaire a été réalisé deux fois. L'extrait aqueux de feuille de neem a été utilisée. Le premier est fait deuxième semaine après le repiquage et le second une semaine après le premier.

Récolte et mesure des paramètres

La récolte a eu lieu le 28^{ème} jour après le repiquage. Le principe de récolte a consisté à arracher avec la main les plants de laitue, de rincer le système racinaire avant la prise des mesures. Les mesures ont été faites sur les quatre (04) plants du milieu de chaque planche afin d'éviter les effets de bordures. Les paramètres étudiés sont entre autres : la longueur, la largeur, le nombre de feuilles, le poids des laitues et le rendement.

Traitements des données et analyse des résultats

Les données collectées ont été traitées avec le tableur Excel. La statistique descriptive a été mise à contribution pour le calcul des moyennes, des écartypes et des coefficients de variation. Le coefficient de variation a été utilisé pour vérifier l'homogénéité des variances afin d'apprécier le niveau de significativité des différences observées sur l'efficacité des traitements appliqués aux paramètres étudiés. Aussi ce tableur a servi pour à la réalisation des tableaux, des graphiques et des courbes. Les cartes ont été faites grâce au logiciel Arc-View. L'analyse des résultats a été descriptive, analytique et comparative.

RESULTATS ET DISCUSSION

Effets combinés de différentes doses de fertilisants (biochar et fientes de volaille) sur la longueur, la largeur et le nombre de feuilles de la culture de laitue.

La variation des moyennes des différents paramètres (longueur, largeur et nombre de feuilles) de la culture de laitue sur quatre plants de laitue (moyenne de trois répétitions) et les coefficients de variation par traitement est consignée dans le tableau I.

Traitements	Moyennes des paramètres (longueur, largeur et nombre de feuilles) de la culture de laitue et coefficients de variation par traitement					
	Longueur moyenne des Feuilles (cm)	CV (%)	Largeur moyenne des feuilles (cm)	CV (%)	Nombre moyen de feuilles	CV (%)
T0	5,43	33,78	3,40	53,75	4,25	33,46
T1	6,03	44,58	5,26	61,39	5,75	49,26
T2	6,02	33,42	4,43	60,25	5,75	43,32
T3	6,82	43,56	5,31	64,41	6,25	38,67

Tableau I : Effectifs moyens et coefficient de variation par paramètre et Traitement

Source : Données de terrain, Octobre, 2021

De l'analyse des coefficients de variation (tableau I), il ressort que l'efficacité des traitements sur les paramètres (longueur, largeur et nombre de feuilles) est hétérogène. Cela signifie que la différence entre la performance des traitements effectués est moyennement significative. Ce qui traduit les valeurs moyennes maximales observées au niveau des traitements ayant reçus des fertilisants que ceux témoins. La figure 2 montre de façon plus explicite la divergence entre l'efficacité des traitements sur la longueur, la largeur et le nombre de feuilles de la laitue échantillonnée.

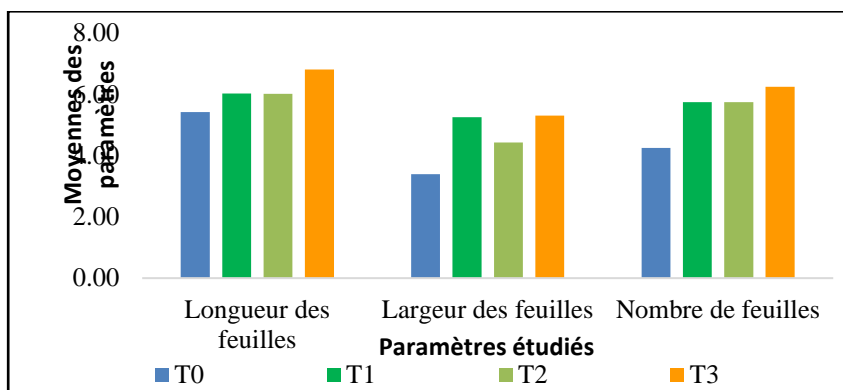


Figure 2 : Valeurs moyennes des paramètres (longueur, largeur et nombre de feuilles) par rapport aux traitements.

T0 : Traitement témoin sans apport de fertilisant,

T2 : 25% de fientes de volailles et 75% de biochar ,

T1 : 75% de fientes de volailles et 25% de biochar ,

T3 : 50% de fientes de volailles et 50% de biochar

De l'observation de la figure 2, il est à noter que le traitement T3 (50% de fientes de volailles et 50% de biochar) a les plus fortes valeurs moyennes soit 6,82 cm et 5,31 cm respectivement pour la longueur et la largeur des feuilles puis près de sept feuilles par plant. Les traitements T1 (75% de fientes de volailles et 25% de biochar) et T2 (25% de fientes de volailles et 75% de biochar) occupent respectivement la deuxième et la troisième place à l'exception du paramètre nombre de feuilles où près de six feuilles par plant sont enregistrées pour chacun de ces deux traitements. Les plus faibles valeurs moyennes sont observées au niveau du traitement T0 (traitement témoin sans apport de fertilisant) avec 5,43 cm pour la longueur des feuilles, 3,40 cm pour celle de la largeur puis moins de 5 feuilles par plant. Il est à retenir alors que le traitement T3 est le plus performant pour les paramètres longueur, largeur et nombre de feuilles.

Influence des différentes doses de fertilisants (biochar et fientes de volaille) sur la le poids et rendement de la culture de laitue.

Les résultats issus de l'évaluation du poids et du rendement moyens de la laitue sur quatre plants (moyenne de trois répétitions) et les coefficients de variation par traitement sont présentés dans le tableau II.

Traitements	Moyennes des paramètres (Poids et rendement) des laitues récoltés et coefficients de variation par traitement			
	Poids moyen de laitue (g)	CV (%)	Rendement moyen (Kg/ha)	CV (%)
T0	16,87	60,03	168,63	60,02
T1	58,13	17,45	581,37	17,45
T2	38,10	41,96	380,93	41,96
T3	68,45	29,60	684,53	29,61

Tableau II : Valeurs moyennes et coefficient de variation par paramètre et traitement

Source : Données de terrain, Octobre, 2021

T0 : Traitement témoin sans apport de fertilisant,

T2 : 25% de fientes de volailles et 75% de biochar ,

T1 : 75% de fientes de volailles et 25% de biochar ,

T3 : 50% de fientes de volailles et 50% de biochar

Le tableau II montre des coefficients de variations élevés au niveau de tous les traitements. Ce qui prouve que l'efficacité des traitements au niveau des paramètres poids et rendement est très variée. L'inégalité de l'efficacité est hautement significative entre T0 et les autres traitements. Les plus fortes valeurs moyennes sont enregistrées au niveau des traitements ayant reçus des apports de fertilisants organiques (T1, T2 et T3) avec des valeurs moyennes comprises entre 68,45 g et 38,10 g pour le paramètre poids puis 684,53 kg/ha et 380,93 kg/ha pour celui du rendement. Les valeurs moyennes minimums sont retrouvées au niveau du traitement T0 avec 16,87 g pour le poids et 168,63 kg/ha pour le rendement. La figure 3 présente de manière plus perceptible la différence de l'efficacité des traitements sur les paramètres poids et rendements.

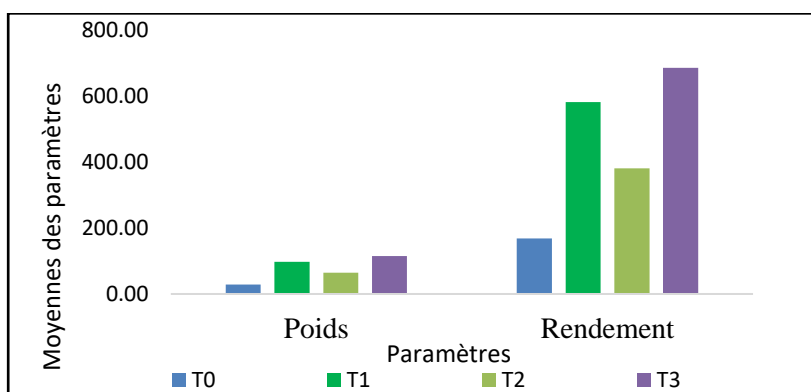


Figure 3 : Valeurs moyennes des paramètres (poids et rendement de la laitue) par rapport aux traitements.

L'analyse de la figure 3 montre que le traitement T3 est le plus performant aussi bien pour le paramètre poids que pour celui du rendement avec des valeurs moyennes de 68,45 g pour le poids et 684,53 kg/ha pour le rendement. Il est suivi par ordre d'efficacité des traitements T1, T2 et T0 qui se trouve en dernière position.

Discussion

Effet des doses variées de la combinaison des fertilisants (biochar et fientes de volaille) sur la longueur, la largeur et le nombre de feuilles de la culture de laitue

Les plants de laitue cultivés sur les planches des différents traitements ont eu une bonne croissance. Mais les plants dont les planches ont reçu de fertilisants ont plus évolué que celles témoins sans apport de fertilisant. Les analyses statistiques ont montré que la performance des traitements effectués est moyennement significative. Le traitement T3 (50% de fientes de volailles et 50% de biochar) a les plus fortes valeurs moyennes pour les paramètres longueur, largeur et nombre de feuilles soit respectivement 6,82 cm, 5,31 cm et sept (07) feuilles. Les T1 (75% de fientes de volailles et 25% de biochar) vient en deuxième position et celui T2 (25% de fientes de volailles et 75% de biochar) occupe la troisième place en termes de performance. Le traitement T0 arrive en dernière position avec des valeurs moyennes plus faibles. Ces résultats prouvent que les planches ayant reçues de fertilisant sont très chargées en éléments minéraux surtout en azote apporté par la fiente de volaille. Les résultats trouvés pour cette recherche confirment ceux de Tononholou en 2013 qui a notifié que les fientes de volailles avaient une influence significative sur le développement en hauteur, longueur et la largeur des feuilles de laitue. De même, Tchaniley et *al*, (2020 p.15547) ont prouvé que la combinaison des fientes de volaille avec des fertilisants minéraux a mis à la disposition des plants de laitue, au moment opportun différents éléments nutritifs nécessaires pour la croissance en hauteur, en diamètre et le nombre de feuilles des plants. Cet état de chose é été signalé par William en 2003 cité par Tchaniley et *al*, (2020, p.15547) qui révèlent que l'azote stimule une croissance de la partie aérienne favorisant aussi l'augmentation de rapport tiges feuillées, racines et hauteurs des plants. Jacques et Pierre en 2005, ont fait les mêmes observations et ont affirmé que l'azote était le principal facteur de croissance des végétaux verts. Aussi l'ajout du

biochar a favorisé la rétention de l'humidité au sol et la distribution progressive des éléments nutritifs à la laitue suivant ses besoins pendant son cycle végétatif pour sa bonne croissance et son développement. S. Thomas, 2013 cité par A. M. S. Yemadjè, (2017 p.9) a également souligné que l'addition du biochar au sol augmente la capacité de rétention en eau grâce à sa surface poreuse offrant aux microorganismes une hydratation durant des périodes sèches ou à l'intérieur même de sols aride. A. A. S. YEMADJE et al, (2022, p. 41) dans une autre étude ont constaté que la hauteur moyenne et le nombre moyen de feuilles des plants de l'amarante des planches ayant reçues des biochars de différentes doses dépassent ceux des planches témoins n'ayant reçues aucune dose de biochar. Ces auteurs ont conclu que les planches témoins sont pauvres en éléments nutritifs tandis que celles ayant reçues les traitements de biochar sont riches en éléments nutritifs qui enrichissent le sol et favorisent la bonne croissance des plants d'amarante en hauteur et en nombre de feuilles. M. A. S. Yemadjè, (2017, p. 43) a fait également les mêmes remarques. Il a noté que l'apport de biochar au sol a activé les microorganismes qui ont minéralisé la matière organique et ont ainsi offert à la culture de l'amarante les nutriments nécessaires à sa croissance. Devant ces constatations, on peut alors dire que l'apport du biochar seul ou en combinaison avec d'autres fertilisants au sol favorise la croissance en hauteur, longueur, largeur et en feuilles des légumes feuilles. Comme l'a signalé Zafindrabenja, 2012, cité par T. E. Andriantahiana, (2013, p. 35) la fertilisation du sol est l'un des facteurs qui influe la croissance et le développement d'une plante.

Influence des différentes doses de fertilisants (biochar et fientes de volaille) sur la le poids et rendement de la culture de laitue

Les résultats obtenus au niveau des paramétrés poids et rendement ont montré aussi des différences entre les plants des planches témoins (sans apports de fertilisant) et celles ayant reçues de fertilisant. Le constat fait est que tous les traitements ayant reçu des apports combinés de fertilisants organiques (biochar et fientes de volaille) ont des poids et rendements plus élevés que le traitement n'ayant pas reçu d'apport. Les plus faibles moyennes en poids et rendements sont retrouvées au niveau du traitement T0 (témoin) avec 16,87 g pour le poids et 168,63 kg/ha pour le rendement. Celles maximum sont notés au niveau du traitement T3 (50% de biochar combiné à 50% de fientes de volaille) avec des valeurs moyennes de 68,45 g pour le poids et 684,53 kg/ha pour le rendement. Il est suivi par ordre d'efficacité des traitements T1 et T2. L'analyse du coefficient de variation a montré également une inégalité de performance entre les traitements qui est hautement significative entre T0 et les autres traitements ayant reçu de fertilisant. Ceci suggère que la combinaison de fertilisants organiques (biochar et fientes de volaille) apportés aux cultures a eu des effets positifs sur le poids et le rendement. Les planches enrichies par de fertilisants (combinaison fiente de volaille et biochar) ont permis aux plants de laitue d'exprimer leur potentiel en poids et rendement. Tchaniley et al, (2020, p.15547) ont abouti aux mêmes résultats au sud du Togo. Ils ont constaté comme dans la présente étude que la combinaison des fientes de volaille avec des fertilisants minéraux donne les meilleurs rendements pour la production de laitue. Saïdou et al en 2012 ont rapporté des résultats similaires aux nôtres. Ils ont remarqué après l'utilisation du compost enrichi avec la fiente de volaille, un rendement élevé des plants de la laitue. Ces résultats sont concordants aussi avec ceux obtenus par A. A. S. YEMADJE et al, (2022, p. 43). Ces auteurs ont constaté que les rendements en poids des plants d'amarantes sous diverses doses de biochars montrent un effet significatif au seuil de 5% entre les traitements. Ils ont noté une différence en gain de 1,17 t/ha, 1,35 t/ha et 0,81t/ha respectivement pour les traitements T1 (50% biochar de tige de maïs et 50% biochar fane d'arachide), T2 (75% biochar de tige de maïs et 25% biochar de fane d'arachide) et T3 (25% de biochar de tige de maïs et 75% biochar de fane d'arachide) par rapport au témoin T0 (témoin). Alors ils ont déduit que ces meilleurs rendements observés ne peuvent qu'être dus par l'apport du biochar qui a des propriétés physiques qui favorise la croissance rapide des plans de l'amarante et par conséquent leur rendement.

CONCLUSION

L'essai réalisée sur l'effet de la combinaison du biochar et des fientes de volaille sur les paramètres physiologiques de la laitue a permis de conclure que les traitements ayant reçus la combinaison de différentes doses de biochar et de fientes de volaille ont influencé significativement la croissance en longueur, largeur, nombre de feuilles, poids et rendement des plants de la laitue. Mais le traitement T3 (50% de fientes de volailles et 50% de biochar) présente les meilleures performances pour tous les paramètres étudiés. Il est à retenir que la combinaison de différentes doses de biochar et de fientes de volaille pourrait bien être recommandée pour la culture de la laitue. Toutefois le dosage du traitement T3 serait mieux indiquée pour cette culture.

Références

- [1] Ahouangninou Claude Comlan Agbatan, 2013, Durabilité de la production maraîchère au sud-Bénin : un essai de l'approche Eco systémique, Mémoire de Thèse, FLASH/UAC, 344 p
- [2] Amadji G., 2006, Valorisation des ordures ménagères par la production du chou pommé sur sol sableux du littoral. In: Actes de l'Atelier «Agricultures et Développement Urbain en Afrique de l'Ouest et du Centre» sous presse, 10 p
- [3] Chidikofan D.M.G.F., 2010, Contribution à l'amélioration de la qualité des cultures maraîchères des sites Houeyiho à Cotonou au Bénin : Cas de la laitue (*Lactuca sativa*), Mémoire de Master, EPAC / UAC, p.56 + annexes
- [4] CQVB, 2011 : Le biochar, Outil pour la gestion des résidus de biomasse et la fertilité des sols. Biotendance. Conseil de Production Végétale du Québec. 12 p.
- [5] Hounkponou K. S., 2003, Urbanisation et agriculture : analyse de l'évolution de pression foncière sur les activités de maraîchage dans le Sud Bénin : Cas de Cotonou, Ouidah et Grand-popo. Thèse d'ingénieur agronome, FSA /UAC, Bénin, 103 p. 27.
- [6] INSAE RGPH 1, 1988, La population de l'Atlantique, Villages et quartiers de ville, 10 p
- [7] INSAE RGPH 2, 1994, La population de l'Atlantique, villages et quartiers de ville, 8 p
- [8] INSAE RGPH 3, 2004, Cahier des villages et de villes, département du Littoral, 15 p
- [9] INSAE, RGPH 4, 2014, Recensement Général de la Population et de l'Habitat, 35 p
- [10] Gomgnimbou Alain P. K., Bandaogo Alimata A., Coulibaly Kalifa, Sanon Abdramane, Ouattara Souleylana et Nacro Hassan B., 2019 : Effets à court terme de l'application des fientes de volaille sur le rendement du maïs (*Zea mays* L.) et les caractéristiques chimiques d'un sol ferrallitique dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso, Int. J. Biol. Chem. Sci, ISSN 1991-8631, 13(4): 2041-2052.
- [11] Kèkè Eugénie, 2002, L'érosion pluviale en milieu urbain : Cas de la Commune d'Abomey-Calavi, Aspects, Impacts et Moyens de lutte. Mémoire de Maîtrise, DGAT/FLASH/UAC, 88 p.
- [12] Lokossou Romaric S., Akouehou Gaston S., Avononmadegbe Mickaël L., Orou matilo Augustin, 2018, Modes de gestion des terres dans la zone tampon de la réserve de biosphère de la Pendjari, Journal of Applied Biosciences 124: 12433-12445 ISSN 1997-5902
- [13] Ogoouwalé R., 2007, Système d'irrigation et production maraîchère dans les villes de Cotonou et de Sèmè-Kpodji (Bénin), Approche cartographique. Laboratoire d'Etudes des climats, des Ressources en eau et de la Dynamique des Ecosystèmes, UAC, Bénin, 21 p
- [14] Saidou A., Bachabi S. F. X., Padonou G. E., Biao O. D. B., Balogoun I., Kossou D., 2012, Effet de l'apport d'engrais organiques sur les propriétés chimiques d'un sol ferrallitique et la production de laitue au Sud Bénin. Rev.CAMES-Série A, 13(2):281-285.
- [15] Sara Laurin-Lanctôt, 2015 : Effet de l'amendement en biochar des sols biologiques pour une culture de tomates sous serre : Rétention en nutriments, activité biologique et régie de fertilisation, Mémoire de Maîtrise en sols et environnement Maîtrise ès sciences (M.Sc.), Université Laval, p.146
- [16] Singbo, G. A., Nouhoheflin, T., Idrissou, L., 2004, Etude des perceptions sur les ravageurs des légumes dans les zones urbaines et périurbaines du sud Bénin. Projet Légumes de qualité, Rapport d'activités, IITA-INRAB-OBEPAB, 21 p284
- [17] Tanzo Mangwini Arnold, Djanya Otshudi Benoit, Lubunda Mandungu, Khonde Khonde Joachim, Lumumba Tambwe Robert, 2021, Production de Gombo sur les Différents Substrats Organiques (bouse de vaches, Guano et *Tithonia Diversifolia*) dans les Conditions Ecologiques de Bandundu-Ville, République Démocratique du Congo, Volume 9 | Number 3 | November, pp. 201-205, <http://www.congosciences.cd>.
- [18] Tchaniley Larounga, Ayisah Kwasi Dzola, DEWA Kassa Kodjo Akonta, 2020, Effet de la combinaison des fertilisants organiques et minéraux (NPK 15-15-15 et urée) sur le rendement de la laitue (*Lactuca sativa* L.) dans le sud du Togo, Journal of Applied Biosciences ISSN 1997-5902, 151: 15540 - 15549.
- [19] William G., 2003, Physiologie végétale, Editions De Boeck Université, rue des Minimes 39, B-1000 Bruxelles, 110-115p.
- [20] Yannick Useni Sikuzani, Gladys Mwamba Ilunga, Theodore Mwamba Mulembo, Becker Ntumba Katombe, Jonas Lwalaba Wa Lwalaba, Mick Assani Bin Lukangila, Antoine Kanyenga Lubobo, Louis Baboy Longanza, 2014 : Amélioration de la qualité des sols acides de Lubumbashi (Katanga, RD Congo) par

l'application de différents niveaux de compost de fumiers de poules, Journal of Applied Biosciences, ISSN 1997–590277:6523–6533, <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v77i1.3>

- [21] Yêmadje A. A. S., 2015, Décharges incontrôlées dans les arrondissements d'Abomey-Calavi et de Godomey en République du Bénin : Impacts sur les sols, les eaux et la santé humaine, thèse de doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, 360 p
- [22] Yêmadje Alda Aude Sèna, Yêmadje Amour Modeste sèflimi, Tokpo Dèdomè Herbert et Azonhe H. Thierry, 2022, valorization of agricultural residues in biochar for a sustainable vegetable production: case of amaranth (*amaranthus hybridus*) in glo-djigbé district, International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch Vol. 07, No. 02; 2022 ISSN: 2456-8643, pp 34-44
- [23] Yêmadjè Amour Modeste sèflimi, 2017 : Valorisation des résidus agricoles et de biomasse en biochar pour une culture maraîchère durable dans l'arrondissement d'Abomey-Calavi, Mémoire de licence, EPAC / UAC, p.41 + annexes.

Cartographie des risques d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire

Kouassi Amani Michel¹, Gngangouin Asaph Yahot Joel², Kouame Kacou Essey Benjamin³

1 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

2 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Ecole Doctorale Polytechnique (EDP), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

3 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

Résumé

Les inondations constituent un risque naturel majeur du monde contemporain et figurent au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde en occasionnant d'importants dégâts humains et matériels. La Côte d'Ivoire a connu durant la dernière décennie des inondations majeures qui ont causé des dégâts économiques et humains importants dans plusieurs régions du pays (Abidjan, Grand-Labou, Zuenoula, etc.) y compris le bassin versant du N'zi (Bandama). Dans ce cadre, la détermination des zones susceptibles d'être affectées par les inondations est primordiale pour une meilleure gestion de ce risque. L'objectif de cette étude est de cartographier les risques d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire plus précisément dans les localités de Dimbokro et M'babikro. Des données de débits journaliers maximaux annuels ont été utilisées et couvrent la période allant de 1961 à 2016. La démarche méthodologique est basée sur une double modélisation qui part de la détermination des débits fréquentiels de crue à court (10 ans), moyen (50 ans) et long termes (100 ans) à partir d'une modélisation statistique basée sur l'analyse fréquentielle. Les résultats obtenus de cette analyse fréquentielle sont ensuite utilisés dans un modèle de simulation hydraulique afin de déduire les caractéristiques de l'écoulement en termes de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement. Ainsi, à partir de la matrice de danger suisse et d'un modèle numérique de terrain avec une résolution spatiale de 30 m, les zones inondables et les étendues des crues ont été déterminées au niveau des villes de Dimbokro et M'babikro. Les résultats obtenus mettent en évidence la forte vulnérabilité à l'inondation de plusieurs enjeux au sein de ces différentes localités (habitations, édifices religieux, restaurants, pharmacies, édifices administratifs, voiries, plantations, champs, etc.). Ces cartes constituent des outils d'aide à la prise de décision pour les structures décentralisées (Districts, Conseils régionaux, Mairies, etc.) et les gouvernants et servent à l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation dans les villes de Dimbokro et M'babikro.

Mots clés : Cartographie, Risques d'inondation, Modélisation statistique, Modélisation hydraulique, N'Zi (Bandama), Côte d'Ivoire.

Flood risk mapping in the N'Zi watershed (Bandama) in Côte d'Ivoire

Abstract:

Floods are a major natural hazard in the contemporary world and are at the forefront of natural disasters in the world, causing significant human and material damage. Côte d'Ivoire has experienced major floods over the past decade which have caused significant economic and human damage in several regions of the country (Abidjan, Grand-Labou, Zuenoula, etc.) including the N'zi watershed (Bandama). In this context, the determination of areas likely to be affected by floods is essential for better management of this risk. The objective of this study is to map the risks of flooding in the N'Zi (Bandama) watershed in Côte d'Ivoire, more precisely in the localities of Dimbokro and M'babikro. Annual maximum daily flow data were used and cover the period from 1961 to 2016. The methodological approach is based on a double modeling which starts from the determination of the frequential flood flows in the short (10 years), medium (50 years) and long term (100 years) from statistical modeling based on frequency analysis. The results obtained from this frequency analysis are then used in a hydraulic simulation model in order to deduce the characteristics of the flow in terms of water heights and flow velocities. Thus, from the Swiss danger matrix and a digital terrain model with a spatial resolution of 30 m, the flood zones and the extent of the floods were determined at the level of the towns of Dimbokro and M'babikro. The results obtained highlight the high vulnerability to flooding of several issues within these different localities (dwellings, religious buildings, restaurants, pharmacies, administrative buildings, roads, plantations, fields, etc.). These maps are decision-making support tools for decentralized structures (Districts, Regional Councils, Town Halls, etc.) and governments and are used to draw up flood risk prevention plans in the cities of Dimbokro and M'babikro.

Key Words: Cartography, Flood risks, Statistical modeling, Hydraulic modeling, N'Zi-Bandama, Côte d'Ivoire.

¹ Corresponding author: michel.kouassi@inphb.ci

INTRODUCTION

Les inondations constituent un risque naturel majeur du monde contemporain et figurent au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde en occasionnant d'importants dégâts humains et matériels [1-3]. L'inondation est relativement commune dans certaines régions du monde. Elle fait partie des cycles naturels qui sont aggravés par les changements climatiques. Les inondations gagnent de l'intensité et réussissent à franchir les crues maximales à plusieurs reprises et tous les pays, qu'ils soient développés ou en développement, connaissent actuellement un mouvement sans précédent de concentration des populations et des activités dans les zones urbaines. Cette urbanisation croissante, préoccupe les collectivités territoriales, les élus locaux, les aménageurs du territoire et la communauté scientifique car elle entraîne la concentration des hommes dans des espaces plus ou moins réduits, exposant ces populations aux risques d'inondations. Ces faits imposent une prise en considération du risque d'inondation par les aménagistes et les décideurs locaux [1]. Dans ce cadre, la détermination des zones susceptibles d'être affectées par les inondations est primordiale pour une meilleure gestion de ce risque. Les conséquences des inondations sont accentuées par le phénomène d'érosion qui mérite également une attention particulière. En effet, la pression démographique responsable de la pression foncière conjuguée à l'utilisation du bois comme seule source d'énergie conduit à la destruction du couvert végétal, à la dégradation des sols.

Ces différentes formes de dégradations rendent les terres plus vulnérables à l'inondation. La Côte d'Ivoire a connu durant la dernière décennie des inondations majeures qui ont causé des dégâts économiques et humains importants dans plusieurs régions du pays (Abidjan, Grand-Lahou, Zuenoula, etc.). Comme pour diverses régions de la Côte d'Ivoire, le bassin versant du N'Zi (Bandama) est sensible aux événements hydroclimatiques extrêmes, notamment les crues liées à des épisodes de précipitations intenses. De tels épisodes sont fréquents et peuvent être dévastateurs. En effet, les intempéries enregistrées dans cette région montrent à quel point la protection contre les inondations est devenue un enjeu majeur. Elle constitue, par conséquent, un défi capital de la gestion des ressources hydriques. En effet, dans le bassin versant du N'Zi (Bandama), le 19 septembre 2018, une inondation a été observée à M'Bahiakro [4]. La route nationale A, qui relie la ville de M'Bahiakro à Bouaké, a été coupée par les eaux, suite aux pluies diluviennes qui se sont abattues sur la localité. Cette voie bitumée est devenue impraticable. L'eau qui avait envahi les deux côtés de la voie, juste après quelques mètres, à la sortie de la ville, a fini par déborder et couper la route en deux, rendant la circulation impossible à cet endroit. Les hauteurs d'eau pouvant atteindre le mètre et demi (1,5 m) par endroit. Les véhicules et autres usagers ont été obligés d'emprunter une déviation du côté du cimetière jusqu'au quartier TP au Nord de la ville pour reprendre la route nationale. Des quartiers de la ville comme tels que « Représentant », « Résidentiel », etc. ont été aussi menacés par les eaux qui progressent vers les habitations mais avec des hauteurs plus faibles (moins d'un mètre d'eau). Le 18 octobre 2018, une inondation du fleuve N'Zi a affecté plusieurs familles à Dimbokro dans le Centre de la Côte d'Ivoire, en raison des fortes pluies qui sont abattues sur le pays, plus précisément dans la capitale régionale du N'Zi [5]. Environ trois cent quatorze (314) personnes issues de 33 familles, résidents des quartiers de Dioulakro et Kennedy, ont quitté leurs maisons pour trouver refuge chez des parents et amis dans d'autres quartiers de la ville [5]. Ces faits constatés sur le bassin versant du N'Zi où les villes telles que M'Bahiakro et Dimbokro sont très proches du cours d'eau et se font même traversées par celui-ci, comme c'est le cas de Dimbokro, ce qui accentue leur vulnérabilité aux débordements d'eau, il est plus que nécessaire d'analyser les risques d'inondations dans le bassin versant du N'Zi (Bandama).

Ces faits démontrent la vulnérabilité du bassin versant du N'zi (Bandama) aux inondations liées aux crues du fleuve N'zi en général et dans les localités à forts enjeux tels que Dimbokro et M'bahiakro en particulier. En effet, la modélisation des événements extrêmes s'avère un enjeu scientifique essentiel pour améliorer les systèmes de prévision des crues et assurer la protection de la population et des infrastructures [6]. Afin de réduire les pertes en vies humaines et les dégâts causés aux infrastructures dans les plaines inondables, il est nécessaire de prévoir les niveaux d'eau des rivières, y compris l'étendue des inondations pour la cartographie des risques [6]. À cet effet, plusieurs approches ont été développées pour modéliser les risques d'inondation. Ces modèles numériques sont des outils importants pour comprendre et évaluer les inondations, étant donné la forte dynamique non linéaire des écoulements dans les plaines inondables.

Pour délimiter les zones inondées, des études récentes [7] indiquent que les approches actuelles sont basées sur la simulation hydraulique intersectant les niveaux d'eau prédits avec une surface de plaine inondable. En effet, la simulation hydraulique vise à étudier la propagation de l'onde de crue dans le fleuve, à délimiter les plaines inondables et à simuler les niveaux d'eau. Les méthodes numériques peuvent consister en des modèles unidimensionnels ou bidimensionnels de la surface de l'eau [7]. Ces modèles hydrauliques sont des outils mathématiques qui tentent de reproduire le mouvement des fluides et nécessitent généralement une estimation de

leurs paramètres. Selon leur représentation spatiale du débit de la plaine inondable, les modèles peuvent être regroupés de manière dimensionnelle [8].

Ainsi l'objectif de cette étude est d'étudier la problématique des inondations au niveau des localités de M'Bahiakro et Dimbokro dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) à travers une modélisation des crues afin d'identifier les zones à risque. Il s'agit alors d'évaluer le risque d'inondation afin de fournir les informations nécessaires aux acteurs locaux pour asseoir une stratégie et se prémunir contre les effets néfastes des inondations.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation de la zone d'étude : Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (Figure 1), sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km². Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction Nord-Sud. Le N'zi a une pente moyenne de 0,053%. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro [9]. De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du N'zi est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm/an. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat atléen) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm/an [9]. Le bassin du N'zi se caractérise par une végétation savanicole dans le Centre et le Nord. La partie sud est couverte par la forêt. Le relief du bassin est peu accidenté. Il est généralement constitué de plateaux (100 à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferralitiques moyennement dessaturés (Nord) et les sols ferralitiques fortement dessaturés (Centre et Sud). Ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) définissent les conditions physiques de l'écoulement [9].

Données de l'étude : Les données de débits utilisées proviennent de la Direction de l'Hydrologie. Il s'agit de données de débits journaliers maximaux annuels collectées au niveau des stations hydrométriques de Dimbokro et M'Bahiakro. Ces données couvrent la période 1961-2016. Les débits journaliers maximaux annuels dans le bassin versant du N'Zi varient de 10,6 à 559 m³/s à la station de M'Bahiakro et de 45,8 à 646 m³/s à la station de Dimbokro. Ces valeurs montrent que les données retenues pour l'étude sont représentatives. Des données altimétriques ont été également utilisées. Il s'agit de modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 m recueilli par la navette spatiale américaine Endeavour et issu des missions SRTM (Shuttle Radar Topographie Mission).

Démarche méthodologique de cartographie des zones inondables

Afin d'identifier les zones à risque d'inondation et réduire la vulnérabilité des enjeux, une approche cartographique numérique basée sur une double modélisation a été adoptée. La première modélisation est de nature statistique basée sur une analyse fréquentielle qui a pour but de déterminer les quantiles de débits journaliers maximaux annuels. Cette analyse fréquentielle est généralement appliquée à partir de la méthode des maxima annuels (débits journaliers maximaux annuels) comme moyen de constitution des données. Cette méthode consiste en l'application de la théorie de valeurs extrêmes à une série de données. Ces données sont constituées en extrayant une valeur maximale par année et ajustées à une loi statistique. La modélisation hydraulique est réalisée afin de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques (hauteurs d'eau et vitesses de l'eau) à partir des quantiles de débits journaliers maximaux annuels déterminés au moyen de l'analyse fréquentielle. Enfin, une cartographie des zones inondables est réalisée à partir des matrices de danger qui croisent l'intensité maximale d'un phénomène de crue et sa probabilité d'occurrence [10].

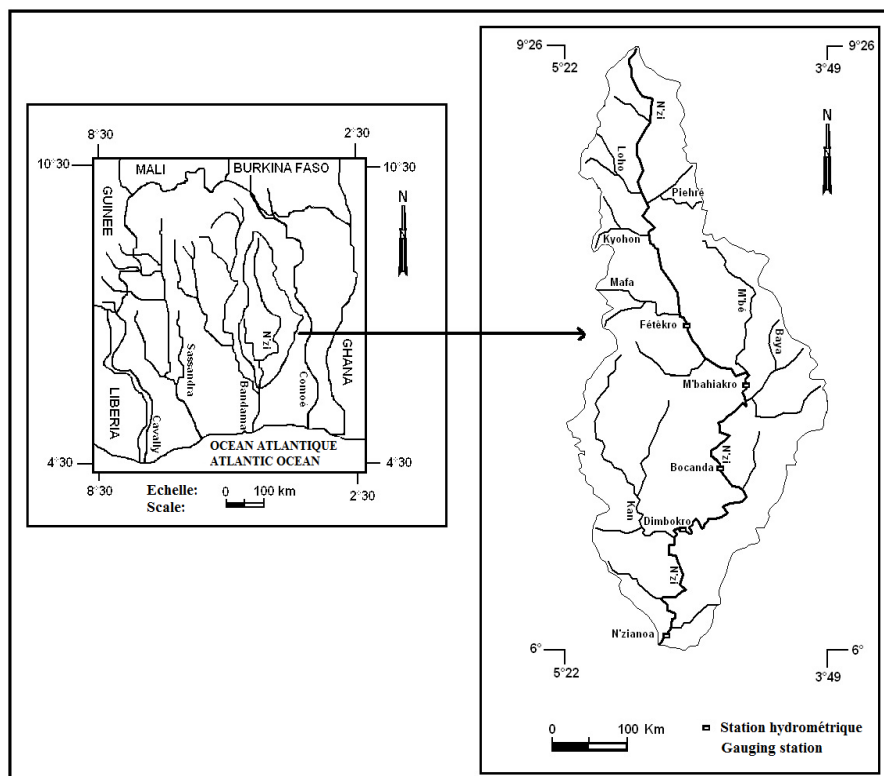


Figure 1 - Présentation du bassin versant du N'zi (Bandama).

Analyse fréquentielle des débits de crues

Les données utilisées doivent satisfaire certaines hypothèses de base de l'analyse fréquentielle [11-12]. En effet, les données doivent être indépendantes (test de Kendall), homogènes (test de Wilcoxon) et stationnaires (test de Wald-Wolfowitz). D'après la littérature spécifique, les lois GEV et Gumbel sont les plus adaptées [2 ; 13-14]. En effet, la loi GEV avec son aspect sécurisant, est plus appréciée, car elle peut donner des quantiles deux à trois fois plus élevés que ceux déterminés par la loi de Gumbel [2 ; 15]. D'autres lois telles que la loi Lognormale, la loi Gamma, etc. ont été utilisées par plusieurs autres auteurs [16-17]. En Côte d'Ivoire, la loi de Weibull s'ajuste au mieux aux extrêmes hydrologiques du bassin versant du fleuve Cavally [18]. Les lois qui ajustent au mieux les observations extrêmes (queue supérieure de la distribution) ont été privilégiées [14 ; 19-20] : la loi de Weibull, la loi Gamma et la loi de Gumbel. Ces différentes lois ont été testées. En effet, des représentations graphiques et des critères numériques [test de χ^2 , critère bayésien (BIC) et critère d'Akaike (AIC)] ont été utilisés pour le choix de la meilleure loi [12 ; 21-22]. Ces deux critères (BIC et AIC) permettent de réaliser un classement de modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie et les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs [22]. La détermination des quantiles a été faite aux périodes de retour de 10 ans (court terme ; débits décennaux), 50 ans (moyen terme ; débits cinquantennaux) et 100 ans (long terme ; débits centennaux) [1]. L'expression du quantile est basée sur l'équation 1 :

$$x(F) = x_0 + S * u(F) \quad (1)$$

x_0 et S étant respectivement la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables

Une modélisation hydraulique a permis de simuler et prédire l'évolution des caractéristiques hydrauliques des cours d'eau (hauteurs d'eau, vitesses de circulation) à partir des quantiles de débits journaliers maximaux annuels déterminés aux différentes périodes de retour [23]. Cette modélisation permet d'analyser la relation hauteur d'eau-débit dans le lit des rivières et identifier les zones inondables sur certains tronçons présentant une forte vulnérabilité.

Les écoulements dans cette étude sont considérés non permanents compte tenu de la variation des paramètres hydrauliques (débits, niveaux d'eau, profondeurs et vitesses) en fonction du temps. La modélisation hydraulique a été réalisée à partir du modèle HEC-RAS avec ses différentes composantes (géométrie, conditions hydrauliques, calage et simulation) [6 ; 8] qui est largement utilisé pour la cartographie des risques d'inondation, l'évaluation des dommages causés par les inondations [24] et la prévision des inondations en temps réel. L'outil utilisé (modèle HEC-RAS) est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique. Cette extension de modélisation permet de gérer des aspects quasi 2D du débit en reliant la géométrie de la rivière à un modèle de terrain numérique sous la forme d'un réseau irrégulier triangulé. De cette manière, la sortie distribuée fournie par HEC-RAS pour chaque section transversale est interpolée entre les sections transversales et conduit à une profondeur d'eau et à une surface de vitesse de l'eau [25]. Le système HEC-RAS contient trois composants d'analyse fluviale unidimensionnels pour :

- i) les calculs de profil de surface d'eau à écoulement constant ;
- ii) la simulation d'écoulement instable (hydrodynamique unidimensionnelle et bidimensionnelle) ;
- iii) les calculs de transport de sédiments à la limite mobile.

Un élément clé est que ces composants utilisent une représentation de données géométriques commune et des routines de calcul géométriques et hydrauliques communes [26]. Au niveau de HEC-RAS, la morphologie du cours d'eau est représentée par une série de sections transversales appelée section de rivière [6]. La distance entre les sections transversales adjacentes est appelée la longueur de la portée. L'outil HEC RAS est capable d'effectuer des calculs unidimensionnels du profil de la surface de l'eau dans le cas de l'hydrodynamique de la surface de l'eau à flux constant et de l'écoulement instable [26]. La représentation la plus simple du débit de la plaine inondable consiste à traiter le débit comme unidimensionnel le long de la ligne médiane du chenal de la rivière [8 ; 26]. Le modèle unidimensionnel HEC-RAS [26] définit un environnement de modélisation entièrement fonctionnel qui traite pratiquement tous les types de problèmes de réseau fluvial [25]. Le modèle RAS (River Analysis System) du Centre d'ingénierie hydrologique (HEC) du Corps de l'armée américaine comprend un modèle à débit constant, un modèle à débit instable, ainsi qu'un large éventail de travaux hydrauliques et l'installation de conception hydraulique. En raison de sa grande capacité à décrire un large éventail de processus physiques, il s'est avéré très utile pour appuyer toutes les phases de la planification de la gestion des cours d'eau [25]. La cartographie des risques d'inondations nécessite des données précises sur la topographie [27] et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) réaliste qui constitue un apport essentiel aux modèles hydrauliques [28-29]. La précision des calculs hydrauliques dépend de la qualité du MNT utilisé et des légers changements des niveaux d'eau qui peuvent induire des changements majeurs dans la zone inondée. La résolution spatiale du MNT est le paramètre le plus crucial [27], et les caractéristiques de surface, dont généralement les crevasses ou la couche des débris, doivent être identifiées à partir de la résolution du MNT [6]. Les cartes de danger se basent sur une matrice (Figure 2) qui croise l'intensité maximale d'un phénomène de crue et sa probabilité d'occurrence [10]. En termes d'aménagement urbain, cette approche permet de mettre en place des mesures de réduction des risques adaptées et ciblées pour chaque portion du terrain analysé. Des seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence ont été établis pour chaque aléa considéré (Tableaux 1 et 2).

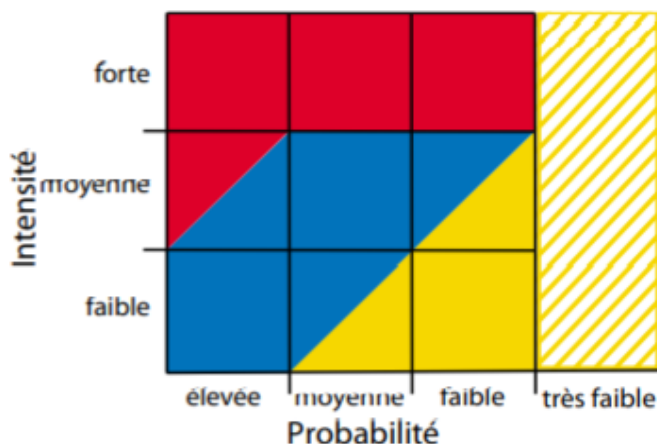


Figure 2 - Matrice de danger Suisse [10]

Tableau 1 - Seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence [10]

ESURE	Critère	Faible	Moyenne	Forte
Intensité	Hauteur (m)	$h < 0,5$	$2 > h > 0,5$	$h > 2$
	Vitesse x Hauteur (m^2/s)	$v \times h < 0,5$	$! > v \times h > 0,5$	$v \times h > 2$
Probabilité	Temps de retour T (ans)	100	50	10

Tableau 2 - Code de couleur de la matrice suisse et sa signification [10]

ZONE	Niveau de danger	Signification pour l'aménagement
Rouge	Danger élevé	Interdiction de construire, dézonage des zones constructibles non utilisés ;
Bleu	Danger moyen	Construction possible à condition de prendre des mesures préventives
Jaune	Danger faible	Construction agréée, zone de sensibilisation au danger.
Jaune-blanc	Danger très faible	Construction agréée

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats de la modélisation statistique et analyse des quantiles de débits

Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité ont été respectivement vérifiées par les différentes séries de débits journaliers maximaux annuels à l'aide des tests statistiques de Wald-Wolfowitz, de Wil-Coxon et de Mann-Kendall aux seuils de 1% et 5% (Tableau 3).

Tableau 3 - Résultats des tests d'hypothèses

Station	Test d'hypothèses	Résultat du test
Dimbokro	Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	Accepté au seuil de 5%
	Test d'homogénéité de Wilcoxon	Accepté au seuil de 5%
	Test de stationnarité de Kendall	Accepté au seuil de 1%
M'bahiakro	Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	Accepté au seuil de 5%
	Test d'homogénéité de Wilcoxon	Accepté au seuil de 5%
	Test de stationnarité de Kendall	Accepté au seuil de 1%

Les différents résultats du test de khi-deux appliqué aux données de débits journaliers maximaux annuelles sont consignés dans le tableau 4. L'application de ce test s'est révélée concluante pour la totalité des lois d'ajustement sur les débits de crue. Les différentes lois ont été acceptées au seuil de signification de 5%. Ce test n'a pas permis de trancher sur le choix de la meilleure loi d'ajustement des Q_{jmax} . D'où la nécessité de recourir aux critères d'Akaike et Bayésien.

Tableau 4 - Test de χ^2 appliqué aux débits maximaux des stations de Dimbokro et M'bahiakro (1961-2016)

Station	Loi de probabilité	χ^2	P value
Dimbokro	Gamma	3,64	0,82
	Gumbel	3,64	0,82
	Weibull	5,07	0,65
M'bahiakro	Gamma	10,43	0,17
	Gumbel	9,71	0,21
	Weibull	5,07	0,65

Les résultats obtenus suite à l'application des critères d'Akaike et bayésien sont consignés dans le tableau 5. Pour la station de Dimbokro, la loi qui ajuste au mieux les données de débits journaliers maximaux annuels est la loi Weibull, suivie de la loi Gumbel et enfin la loi Gamma. Quant à la station de M'bahiakro, la meilleure loi est la loi Gamma, suivie de la loi Gumbel et enfin la loi Weibull.

Tableau 5 - Critères BIC et AIC appliqués aux débits maximaux des stations de Dimbokro et M'bahiakro (1961-2016)

STATION		BIC	AIC
Dimbokro	Weibull	699,48	695,43
	Gumbel	702,34	698,28
	Gamma	704,92	700,87
M'bahiakro	Gamma	685,44	681,39
	Gumbel	686,05	681,99
	Weibull	689,01	684,96

Les quantiles de crues décennales, cinquantennales et centennales estimés à partir des meilleures lois identifiées dans le bassin versant du N'Zi sont respectivement de 405, 518 et 559 m³/s à la station de M'Bahiakro. Quant à la station de Dimbokro, les quantiles de crues décennales, cinquantennales et centennales estimés sont respectivement de 371, 507 et 561 m³/s.

Résultats de la cartographie des zones inondables

Les résultats de cartographie de propagation des crues aux différentes périodes de retour de retour ont été présentés par ville (M'Bahiakro et Dimbokro).

Cas de la ville de M'Bahiakro

Les résultats du tableau 6 montrent les hauteurs et vitesses maximales ainsi que les zones touchées du N'Zi à M'Bahiakro. Les hauteurs varient de 0,6 (10 ans) à 8,36 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,25 (10 ans) et 0,89 m/s (100 ans).

Tableau 6 - Synthèse des hauteurs et vitesses d'eau du N'Zi à M'Bahiakro

Sites	10 ans	
	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	5,95	0,79
Pharmacie N'Zi	0,6	0,25
Nationale A	1,5	0,28
Zone non urbanisée	3	0,32
Sites	50 ans	
	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	6,19	0,64
Pharmacie N'Zi	1,1	0,47
Nationale A	1,7	0,45
Zone non urbanisée	3,2	0,27
Sites	100 ans	
	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	8,36	0,89
Pharmacie N'Zi	1,3	0,47
Nationale A	2,1	0,45
Zone non urbanisée	3,7	0,42

Trois zones inondables se démarquent pour une période de retour de 10, 50 et 100 ans au niveau de M'Bahiakro dans la partie nord du bassin. Cette propagation spatiale touche principalement la Nationale A axe M'Bahiakro-Bouaké, une grande zone non urbanisée qui sert de plantation et la pharmacie N'Zi au Nord de la ville. Plusieurs plantations (cacao, anacarde, etc.) et champs (igname, etc.) sont également concernées par les inondations au niveau de M'Bahiakro.

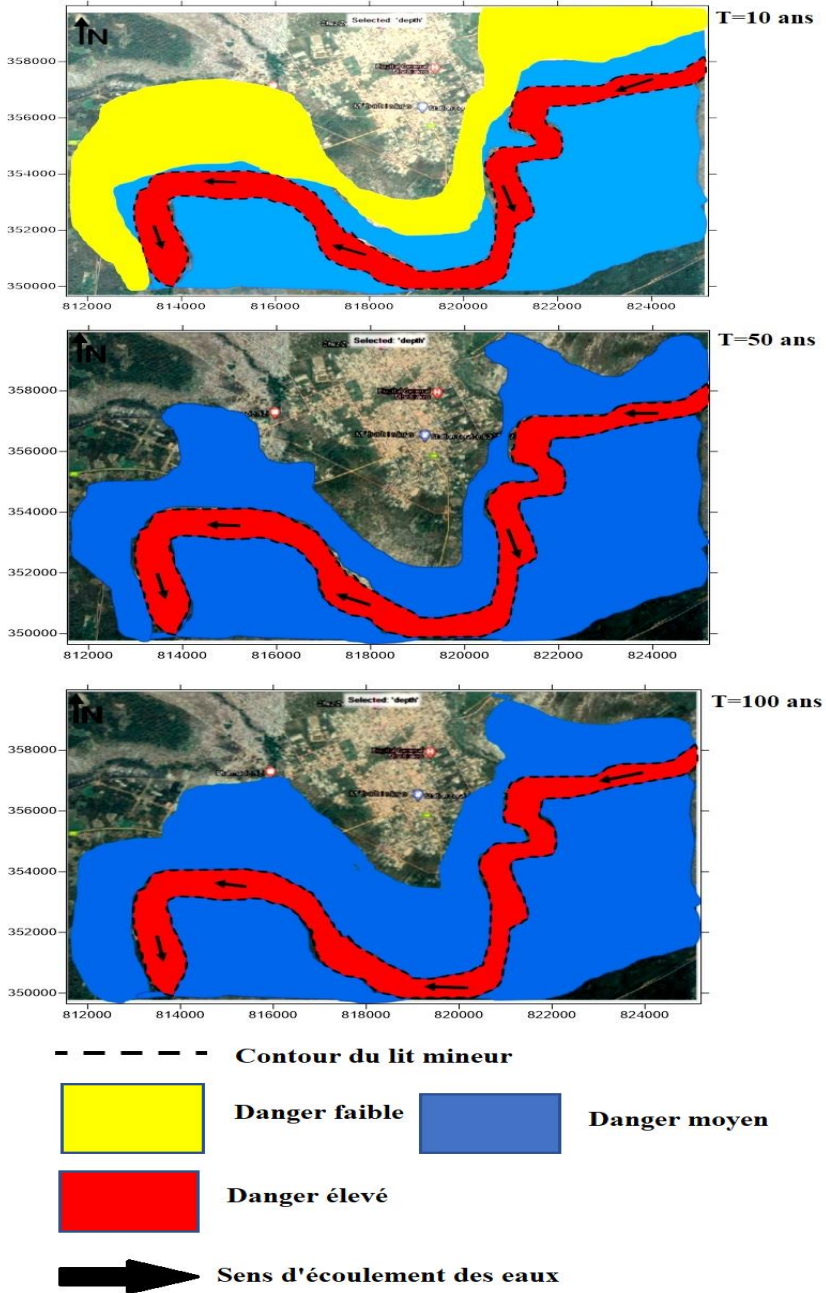


Figure 3 - Zones inondables de la ville de M'Bahiakro

Cas de la ville de Dimbokro

Le tableau 7 montre les hauteurs et vitesses maximales du N°Zi à Dimbokro. Les hauteurs varient de 0,6 (10 ans) à 10,91 m (100 ans) et les vitesses oscillent entre 0,23 et 0,56 m/s (100 ans).

Tableau 7 - Synthèse des valeurs de hauteurs et vitesses d'eau du N°Zi à Dimbokro

10 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	7,8	0,28
Mosquée de Dimbokro	0,9	0,35
Paroisse de Dimbokro	0,6	0,28
Route église témoins de Jéhovah	1,4	0,23
50 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	10,08	0,47
SODEFOR	1,65	0,31
Mosquée de Dimbokro	1,32	0,35
Paroisse de Dimbokro	1,4	0,28
Route église témoins de Jéhovah	0,9	0,23
100 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	10,91	0,56
SODEFOR	1,9	0,27
Mosquée de Dimbokro	2,1	0,26
Paroisse de Dimbokro	1,8	0,29
Restaurant O'falé	1,62	0,31
Route église témoins de Jéhovah	0,95	0,35

La ville de Dimbokro dans le Sud du bassin est marquée par trois zones inondables aux périodes de retour de 10 et 50 ans. Il s'agit de la grande mosquée de Dimbokro, la paroisse catholique de Dimbokro et la route conduisant à l'église du royaume des témoins de Jéhovah. En plus des trois zones, le siège de la SODEFOR et le restaurant « O'falé » sont identifiées comme des zones rouges à la période retour de 100 ans. Les villages de Krokro et Ebimolossou à Dimbokro sont également dans la zone inondable. Ces villages payent le fait de leur proximité au cours d'eau.

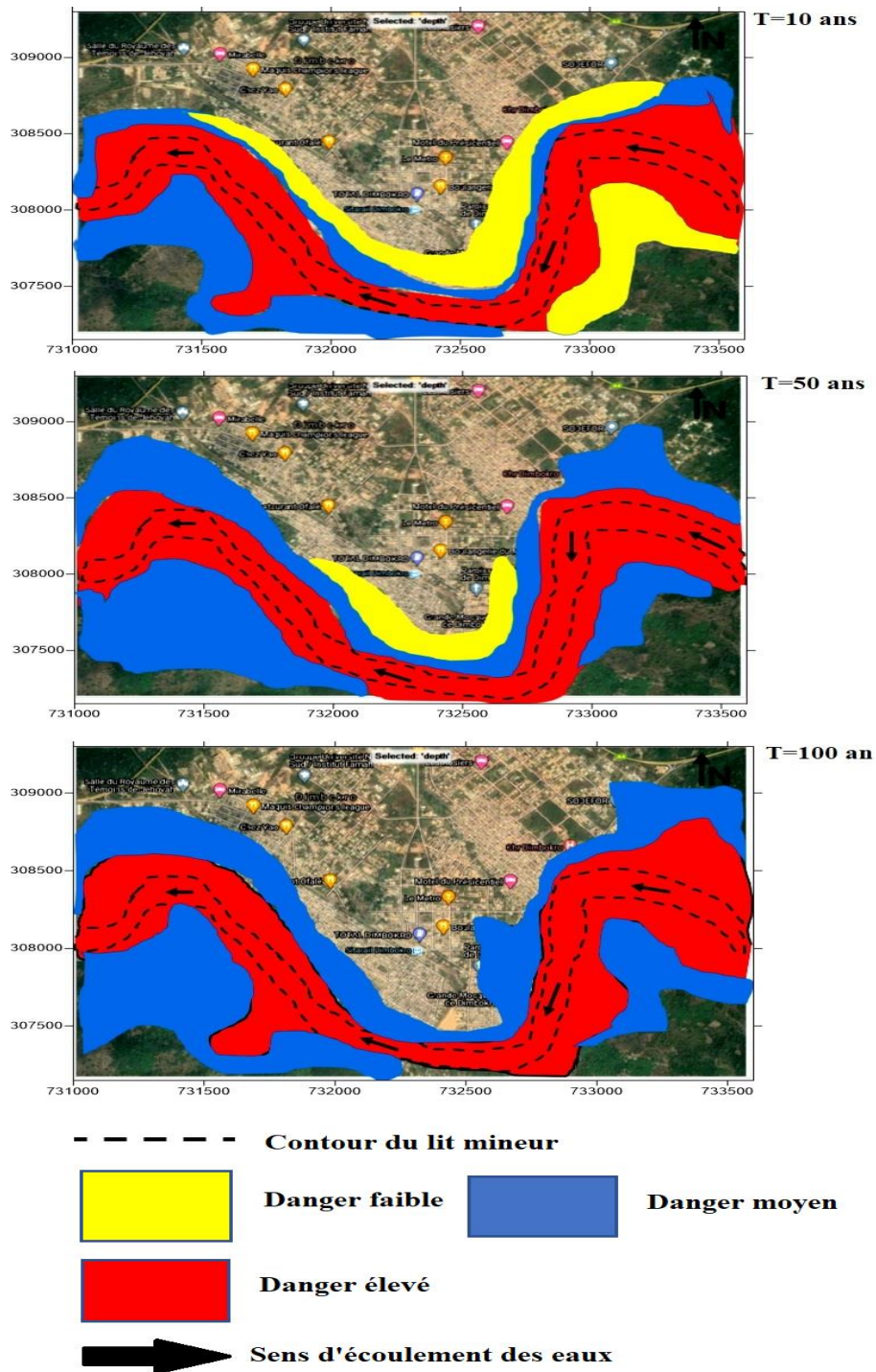


Figure 4 - Zones inondables de la ville de Dimbokro

DISCUSSION

Les principaux résultats ont montré que la loi qui ajuste au mieux les débits journaliers maximaux annuels de la station de M'bahiakro est la loi Weibull. Quant aux débits journaliers maximaux annuels de la station de Dimbokro, ils sont mieux ajustés par la loi de Gumbel. La loi Weibull et GEV ont occupé la deuxième place respectivement au niveau de la station de M'bahiakro et Dimbokro. Ces résultats sont concordants à ceux obtenus par plusieurs auteurs ayant travaillé sur l'analyse fréquentielle des débits de crue [2 ; 13-15 ; 18]. Ces résultats confortent l'idée selon laquelle la distribution de Gumbel, bien que plus simple, ne fournit pas nécessairement les meilleurs résultats [13 ; 30-35]. Les quantiles de débits journaliers maximaux déterminés aux périodes de retour de 10, 50 et 100 ans, varient de 417 (T=10 ans) à 583 m³/s (T=100 ans) à la station de M'Bahiakro et fluctuent entre 385 (T=10 ans) et 605 m³/s (T=100 ans) à la station de Dimbokro. Ces quantiles ont ensuite été utilisés pour déterminer les hauteurs et vitesses de propagation de crues. Il ressort qu'à la station de M'bahiakro, les hauteurs d'eau varient de 5,95 (10 ans) à 8,36 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,79 (10 ans) et 0,89 m/s (100 ans). Au niveau de la station hydrométrique de Dimbokro, il est constaté des valeurs de hauteurs d'eau allant de 7,8 (10 ans) à 10,1 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,28 (10 ans) et 0,58 m/s (100 ans). Des cartes de « risque d'inondation » ont été produites afin de permettre aux aménagistes et aux autorités locales de proposer des mesures d'atténuation dans les zones susceptibles d'être affectées par les inondations et d'agir plus efficacement en cas de crue. Une comparaison des résultats obtenus aux récentes inondations de 2018 qui se sont produites à M'Bahiakro et Dimbokro, montre que les zones touchées par les inondations sont en parfaite adéquation avec les zones inondables définies au cours de cette étude. L'analyse des limites des plaines inondables montre que le canal du N^oZi concerné par la présente étude à l'état actuel n'arrive pas à évacuer totalement les eaux pluviales surtout celles engendrées par une pluie décennale. Il est observé déjà un débordement pour la crue décennale pour toutes les deux localités étudiées. Pour évacuer le trop plein, nous préconisons le drainage qui consiste à enterrer dans le sol des canalisations drainantes c'est-à-dire qui récupèrent l'eau en excès et qui la conduisent vers un puits perdu, un fossé ou vers le réseau public d'évacuation des eaux pluviales. La vulnérabilité aux inondations est de plus en plus ressentie avec l'épanouissement que connaissent les différentes villes en matière d'urbanisme et d'infrastructures à l'intérieur ou à proximité du bassin versant (habitations, lieux de cultes, restaurants, structures hôtelières, écoles primaires, secondaires et supérieures, etc.). Les zones à risque de dommages élevés ont une représentation relativement importante. Ces zones correspondent en grande partie aux habitations et terrains en cultures et révèlent à quel point le risque d'inondation est important. En effet, plusieurs facteurs sont à l'origine de ce phénomène. Il s'agit en premier lieu du relief. Les parties amont et centre de la ville de Dimbokro se caractérisent par un relief relativement élevé tandis que la partie aval occupe principalement une plaine d'altitude faible et sujette aux inondations en période de forte pluie. En deuxième lieu, on peut avancer les intensités pluvieuses qui peuvent être importantes, et ce, surtout en périodes pluvieuses, comme le démontre les retours d'expériences évoqués en 2018, qui ont été consécutives à des pluies diluviennes.

À ces facteurs naturels s'ajoutent la gestion déficiente de l'espace, marquée par l'absence d'une application rigoureuse de la réglementation relative à la construction en zones inondables, ainsi que le problème de l'imperméabilisation des sols favorisant, par la suite, le ruissellement des eaux et la réduction de la capacité d'infiltration des sols. En effet, l'augmentation de la population a accentué la pression sur le milieu naturel et augmenté les enjeux exposés au risque [36]. Dans ce contexte, la gestion du risque d'inondation doit, en conséquence, être conjointement établie en prenant en considération l'aléa et la vulnérabilité [1]. Elle doit répondre à deux objectifs principaux, à savoir : la limitation de l'implantation des bâtiments et des personnes dans les zones fortement exposées et la protection de l'existant. De même, dans la gestion du risque d'inondation, il est possible de distinguer deux aspects complémentaires qui se différencient par le niveau d'urgence des moyens à mettre en œuvre. D'une part, la prévention et le retour d'expérience qui interviennent hors contexte de crise et, d'autre part, la prévision et la gestion de crise qui interviennent en situation de crue [1]. La prévention est basée sur l'analyse de crues potentielles afin d'aider à la compréhension des phénomènes physiques. Elle vise à caractériser l'aléa et la vulnérabilité pour protéger l'existant, informer les populations concernant leur vulnérabilité aux inondations et les démarches à suivre en cas de crise et limiter l'implantation des biens et des personnes dans les zones fortement exposées.

Quant au retour d'expérience, ultérieur à la crise, il vise à tirer des leçons des crues survenues par le passé afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et d'aider à la gestion des crues futures. Le retour d'expérience est en particulier mis en œuvre pour une analyse de la vulnérabilité [1] et le découpage spatial des plaines d'inondation en ce qui a trait à l'exposition au risque d'inondation. Contrairement à la prévention, la prévision et la gestion de

crise correspondent à des actions en état d'urgence. La prévision est le préalable direct à une crise éventuelle. Elle vise à anticiper la survenue d'une inondation et de ses conséquences afin d'alerter les populations et de mettre en place des secours plus efficaces. La gestion de crise rassemble l'ensemble des moyens mis en œuvre en période de crue pour protéger, informer et secourir les populations. Elle nécessite des outils opérationnels pour des décisions rapides permettant aux organismes d'intervention et de secours d'avoir des informations très utiles sur les étendues inondées et les voies de circulation coupées.

Une meilleure information des populations exposées et la diminution de la vulnérabilité des biens situés dans les zones inondables sont à privilégier [1 ; 36]. Cependant, si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, chaque citoyen doit aussi contribuer à se protéger efficacement et diminuer sa propre vulnérabilité. De plus, la protection contre les inondations constitue un axe majeur. Il s'agit de généraliser les systèmes d'annonce de crues de manière à répondre aux besoins grandissants en matière de prévisions hydrométéorologiques et de prévention des situations de risques, d'apporter des corrections à des situations héritées du passé ayant permis l'implantation dans des zones à haut risque et d'intégrer le risque d'inondation dans les plans d'aménagement.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer les risques d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) principalement dans les villes de M'Bahiakro et Dimbokro. Il s'est agi de déterminer les zones susceptibles d'être affectées par les inondations pour une meilleure gestion de ce risque. La méthodologie mise en place dans cet article est basée sur la modélisation hydraulique. En Aïnsi, à partir de données des débits instantanés collectées aux stations hydrométriques de Dimbokro et M'bahiakro, qui se situent entre 1961 et 2016, l'objectif a été de déterminer les meilleures distributions des séries de débits de crues pour chaque bassin versant ainsi que l'estimation des débits de pointe de crues pour les différentes périodes de retour. Les principaux résultats ont montré que la loi qui ajuste au mieux les débits journaliers maximaux annuels de la station de M'bahiakro est la loi Weibull. Quant aux débits journaliers maximaux annuels de la station de Dimbokro, ils sont mieux ajustés par la loi de Gumbel. Ces résultats ont permis par la suite d'estimer les débits fréquentiels de crues selon les différentes périodes de retour. Les différents quantiles et leurs périodes de retour obtenus par cette analyse fréquentielle ont servi comme données d'entrée au niveau de la modélisation hydraulique.

Ces quantiles ont ensuite été utilisés pour déterminer les hauteurs et vitesses de propagation de crues. Il ressort qu'à la station de M'bahiakro, les hauteurs d'eau varient de 5,95 (10 ans) à 8,36 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,79 (10 ans) et 0,89 m/s (100 ans). Au niveau de la station hydrométrique de Dimbokro, il est constaté des valeurs de hauteurs d'eau allant de 7,8 (10 ans) à 10,1 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,28 (10 ans) et 0,58 m/s (100 ans).

Des cartes de « risque d'inondation » ont été produites afin de permettre aux aménagistes et aux autorités locales de proposer des mesures d'atténuation dans les zones susceptibles d'être affectées par les inondations et d'agir plus efficacement en cas de crue. Les résultats obtenus ont permis d'avoir un outil d'évaluation du risque d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama).

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction de l'Hydrologie pour leur avoir fourni les données hydrométriques utilisées dans cette étude.

Références

- [1] Rifai N., Khattabi A. & Rhazi L. 2014. Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (Nord-Ouest du Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 27 (1), 57-69. <https://doi.org/10.7202/1021982ar>
- [2] Souanef N. 2015. Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod. Mémoire de Magister en Hydraulique, Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie, Algérie, 108 p.
- [3] Gemenne F., Blocher J., De Longueville F., Vigil D., Telenti S., Zickgraf C., Gharbaoui D. & Ozer P. 2017. Catastrophes naturelles, changement climatique et déplacements de populations en Afrique de l'Ouest. *Geo-Eco-Trop*, 41, 317-337.
- [4] Agence Ivoirienne de Presse (AIP) 2018a. Septembre 2018
- [5] Agence Ivoirienne de Presse (AIP) 2018b. Octobre 2018
- [6] Bennani O. 2020. Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride. Cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc). Mémoire de Thèse de Doctorat, Université Paul Valéry, Montpellier 3, P'école doctorale Territoires, Temps, Sociétés et Développement - ED60

et de l'unité de recherche Gouvernance, Risque, Environnement, Développement – UMR GREDFrance, 162p.

- [7] Sarhadi A., Soltani S. & Modarres R. 2012. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 458, 68-86.
- [8] Teng J., Jakeman A.J., Vaze J., Croke B.F.W., Dutta D. & Kim S. 2017. Flood inundation modeling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modeling & software*, 1, 201-216.
- [9] Kouassi A.M., Nassa R.A.K., N'Guessan B.T.M., Kouamé K.F. & Biemi J. 2019. Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'Zi (cote d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 30 (3), 215-223.
- [10] Gabriela W. & Mohamed L. 2014. Cartographie du danger d'inondation guide pratique pour l'application de la méthode suisse au Maroc. Rapport technique, Université de Lausanne, Suisse, 28p.
- [11] EL Adlouni S., Bobée B. & Ouarda T. B.M.J. 2008. On the tails of extreme event distributions in Hydrology. *Journal of Hydrology*, 355, 1-4, 16-33. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.011)
- [12] Kouassi A.M., Nassa R.A.K., Koffi Y.B., Kouamé K.F. & Biemi J. 2018. Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, 31 (2), 147-160.
- [13] Koutsoyannis D. 2004a. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences–Journal des Sciences Hydrologiques*, 49 (4), 575-590.
- [14] Belagoune F. 2012. Etude et modélisation des crues des cours d'eau en milieu semi-aride : cas des grands bassins versants 05, 06 et 07. Mémoire de Magistère, Université D'Ouargla, 181p.
- [15] Arnaud P. & Lavabre J. 2007. Estimation de l'aléa pluvial en France Métropolitaine. Editions Quae, 153 p.
- [16] Meddi M. & Sadeuk B.A.A 2014. Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie). *Nature & Technologie, C- Sciences de l'Environnement*, 10, 21-31.
- [17] López J. & Francés F. 2012. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indexes as external covariates, 3rd STAHY International Workshop on statistical methods for hydrology and water resources management, October 1-2, 2012 Tunis, Tunisia.
- [18] Brou L.A. 2018. Modélisation de la dynamique hydrologique du fleuve Cavally sous l'influence de fortes pressions anthropiques dans la région de Zouan-Hounien (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé, Côte d'Ivoire, 200p.
- [19] Béliveau J. 2006. Analyse fréquentielle multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en statistique pour l'obtention du grade de Maître de sciences (M.Sc.), 60p.
- [20] Meylan P., Favre A.C. & Musy A. 2012. *Hydrologie fréquentielle : Une science prédictive*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 168 p.
- [21] Soro G.E. 2011. Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193p.
- [22] Dewals J.B., Detrembleur S., Archambeau P., Erpicum S., Ernst J. & Pirotton M. 2011. Caractérisation micro-échelle du risque d'inondation : modélisation hydraulique détaillée et quantification des impacts socio-économiques. *La bouille blanche*, 2, 28-34. DOI [10.1051/lhb/2011015](https://doi.org/10.1051/lhb/2011015)
- [23] Hostache R. 2006. Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. Thèse de Doctorat de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, 255p.
- [24] Mertz B., Kreibich H., Schwarze R. & Thieken A. 2010. Review article Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (8), 1697-1724.
- [25] Pistocchi A. & Mazzoli P. 2002. Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. *Proceeding IEMSS*, 305-310.
- [26] Brunner G.W. 2016. HEC-RES River Analysis System - User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 962p.
- [27] Papaioannou G., Loukas A., Vasiliades L. & Aronica G.T. 2016. Flood inundation mapping sensitivity to remote spatial resolution and modeling approach. *Natural Hazards*, 83, 117-132.
- [28] Pereira-Cardenal S.J., Riegels N.D., Berry P.A.M., Smith R.G., Yakovlev A., Siegfried T.U., Bauer-Gottwein P. 2011. Real-time remote sensing driven river basin modeling using radar altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 241–254.

- [29] Musa Z.N., Popescu I. & Mynett A. 2015. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3755-3769.
- [30] Koutsoyannis D. 2004b. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences—Journal des Sciences Hydrologiques*, 49 (4), 591-610.
- [31] Turcotte D.L. & Malamud B.D. 2004. Landslides, forest fires, and earthquakes: examples of self-organized critical behavior. *Physica A*, 340, 580-589.
- [32] Sisson A.S. & Pericchi L. 2006. A case for a reassessment of the risk of extreme hydrological hazards in the Caribbean. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, DOI: 10.1007/s00477-005-0246-4.
- [33] Benkhald A. 2007. Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff : comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoie*, 8, 83-91.
- [34] Goula B.T.A., Brou K., Brou T., Savané I., Vamoryba F. & Bernard S. (2007). Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois log normale et de Gumbel. *Hydrological Science-journal-des Sciences Hydrologiques*, 43 (4), 435-444.
- [35] Goula B.T.A., Soro G.E. Dao A., Kouassi F.W. & Srohourou B. 2010. Frequency analysis and new cartography of extremes daily rainfall events in Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Sciences*, 10 (16), 1684-1694.
- [36] Neppel L., Bouvier C., Desbordes M. & Vinet F. 2003. Sur l'origine de l'augmentation apparente des inondations en région méditerranéenne. *Revue des sciences de l'eau-Journal of Water Science*, 16 (4), 475-494. <https://doi.org/10.7202/705519ar>



REPUBLIC OF TUNISIA



International Conference-Training (ESC'2023)

From 13 to 18 March 2023 Hammamet (Tunisia)



Water resources, Health and Climate Change



E_{water} H_{health} C_{Climate} '2023

Water-Health-Climate'2023

'Ce qui compte c'est demain'

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



Abbi Rim



2023

Colloque-Formation International

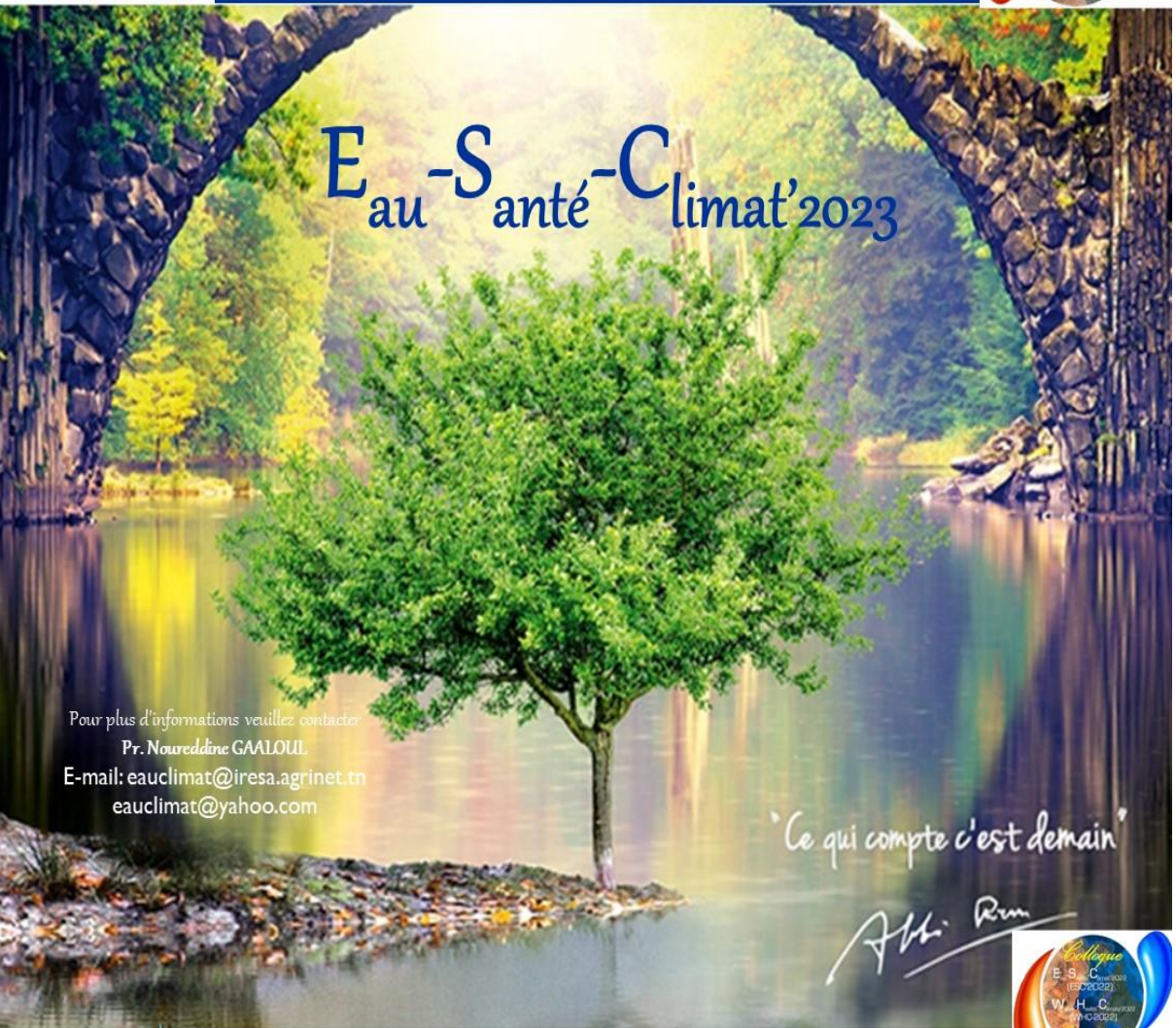
Eau - Santé - Climat'2023

Ressources en Eau, Santé et Changement Climatique

13 au 18 Mars 2023, Hammamet (Tunisie)



www.jistee.org



Eau - Santé - Climat'2023

Pour plus d'informations veuillez contacter

Pr. Noureddine GAALOUL

E-mail: eauclimat@iresa.agrinet.tn

eauclimat@yahoo.com

'Ce qui compte c'est demain'

Abbi Rem



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
07 Volumes, 23 Numéros, (350 Articles) et 1 Livre
07 Volumes, 23 Issues, (350 Papers) and 1 Book

www.jistee.org

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

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

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

- Numéro 1 – Mars 2022 (7 Articles)** Changement Climatique : Quels effets sur notre santé ? / *Climate change : What effects on our health ?*
Numéro 2 – Juin 2022 (10 Articles) Impacts du Changement Climatique sur l'Eau, les Ecosystèmes et la Santé Humaine / *Impacts of Climate Change on Water, Ecosystems and Human Health*
Numéro 3 – Septembre 2022 (7 Articles) Eau, Climat, Santé, Inégalités : Quelles Solutions / *Water, Climate, Health, Disparities: Solutions*
Numéro 4 – Décembre 2022 (8 Articles) Changements climatiques Santé : Qualité de l'eau et accessibilité / *Changements climatiques Santé : Qualité de l'eau et accessibilité*

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

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

- Numéro 1 – Avril 2021 (11 Articles)** Face aux enjeux climatiques et alimentaires : Réinventer les relations Eau-Agriculture-Climat / *Faced with climate and food issues : Reinventing Water-Agriculture-Climate relations*
Numéro 2 – Juin 2021 (6 Articles) Changement climatique, eau, agriculture - Quelles trajectoires ? / *Climate Change, Water, Agriculture - What trajectories ?*
Numéro 3 – Septembre 2021 (6 Articles) Changement Climatique, Eau et Agriculture Vers des Systèmes Résilients / *Climate Change, Water and Agriculture Towards Resilient Systems*
Numéro 4 – Décembre 2021 (8 Articles) Changement Climatique, Eau et Agriculture : Quelles Stratégies ? / *Climate Change, Water and Agriculture : What Strategies ?*

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

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

- Numéro 1 – Septembre 2020 (14 Articles)** Ressources en Eau et Changements Climatiques / *Water Resources and Climate Change.*
Numéro 2 – Décembre 2020 (13 Articles) Gestion Intégrée des Ressources en Eau et Changement Climatique / *Integrated Water Resources Management and Climate Change*

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

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

- Numéro 1 – Décembre 2019 (56 Articles)** Gestion Intégrée des Ressources en Eau / *Integrated Water Resources Management*
Numéro 2 – Décembre 2019 (12 Articles) Énergies Renouvelables Et changements climatiques / *Renewable Energies and climate change*

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

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

- Numéro 1 – Avril 2018 (62 Articles)** Gestion des Ressources en Eau / *Water Resources Management*
Numéro 2 – Août 2018 (34 Articles) Sciences de l'Environnement / *Environmental Earth Sciences*

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

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

- Numéro 1 – Février 2017 (17 Articles)** Caractérisation qualitative et quantitative des ressources en eau / *Qualitative and quantitative characterization of water resources.*
Numéro 2 – Avril 2017 (8 Articles) Évaluation des ressources en eau sous les pressions de l'humanité et des changements climatiques / *Assessment of water resources under pressure from humanity and climate change*
Numéro 3 – Juin 2017 (9 Articles) Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques / *Vulnerability of Water Resources to Climate Change.*
Numéro 4 – Août 2017 (8 Articles) Modélisation de l'impact des changements anthropiques et climatiques sur les ressources en eau / *Modeling the impact of anthropogenic and climatic changes on water resources*
Numéro 5 – Octobre 2017 (11 Articles) Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie / *Numerical Modeling in Hydraulics, Hydrology and Hydrogeology*

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

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

- Numéro 1 – Avril 2014 (17 Articles)** Ressources en Eaux de Surface en Région Méditerranéenne / *Surface Water Resources in the Mediterranean Region.*
Numéro 2 – Août 2014 (8 Articles) : Ressources en Eaux Souterraines en Région Méditerranéenne / *Ground Water Resources in the Mediterranean Region*
Numéro 3 – Décembre 2014 (11 Articles) Changements Climatiques en Région Méditerranéenne / *Climate Change in the Mediterranean Region*

Copyright © 2022 – Jistee Tous droits réservés



Appel à contributions : Prochain numéro la revue
Scientifique : JISTEE – Mars 2023
Call for contributions: Next issue of the Scientific review:
JISTEE – March 2023

√ Open-access (OA) Journal

√ Double-anonymous Peer Reviewing

√ Fast Publication: 20-30 Days

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

Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Mars 2023

Nous coordonnons la rédaction, du numéro mois de Décembre 2022 “ Eau- Santé – Climat”, (ESC-2022), qui vous est ensuite offert gratuitement en format pdf.

Le thème retenu pour 2022 est “ Eau- Santé – Climat”, en vous rappelant, si besoin en était, que le changement global couvre à la fois le changement climatique et les changements anthropiques (variations d’occupation des sols et aménagements des bassins versants, prélèvements, etc.).

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

Les contributions seront attendues pour le courant du mois de Novembre 2022 afin de pouvoir être révisées par le Comité Scientifique International et que la mise en forme du numéro ait lieu en Août 2022 au plus tard.

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



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

Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE
– Mars 2023

International Journal of Water Science and Environment Technologies

We are pleased to inform you that the Vol 7, No 3 of International Journal of Water Science and Environment Technologies is available at <https://jistee.org/volume-vi-2022/>

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

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

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

International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)



Volume (VIII) - Issue 1 - [March 2023]

ISSN Online: 1737-9350

ISSN Print: 1737-6688

Open Access

www.iistee.org



[WWW.IISTEE.org](http://www.iistee.org)

Invitation for Research Article – Mars 2023

Dear Researcher

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

We publish

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

Description :

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

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

With regards

Editorial Office

International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)

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

©2022 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V (viii), Issue 4 –December 2022 - jistee.org/volume-viii-2022/

JOURNAL INTERNATIONAL

Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement

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

Volume (vii) – Numéro4 – Décembre 2022

E_{au} - **S**_{anté} - **C**_{limat}'2022



**Changements climatiques Santé :
Qualité de l'eau et accessibilité**

Rédacteur en Chef : Pr Noureddine Gaaloul

Publié par:

L'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et
l'Environnement en Tunisie (ASTEETunisie)

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

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

Open Access

Volume (vii) - Issue 4 – December 2022

Water-**H**ealth-**C**limate'2022



Climate Changes Health: Water Quality and Accessibility

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

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