

Guest Editors

**Prof. Amina Wafik**

**Prof. Zouhir Baroudi**

**GEOLOGY BETWEEN  
CLASSICISM AND MODERNISM:  
CHALLENGES AND ADVANCES**

**ESJ Special Edition**

**ISSN: 1857-7881 (Print)**

**ISSN: 1857-7431 (Online)**

October 2023

## *Generativity is a Core Value of the ESJ: A Decade of Growth*

Erik Erikson (1902-1994) was one of the great psychologists of the 20th century<sup>1</sup>. He explored the nature of personal human identity. Originally named Erik Homberger after his adoptive father, Dr. Theodore Homberger, he re-imagined his identity and re-named himself Erik Erikson (literally Erik son of Erik). Ironically, he rejected his adoptive father's wish to become a physician, never obtained a college degree, pursued independent studies under Anna Freud, and then taught at Harvard Medical School after emigrating from Germany to the United States. Erickson visualized human psychosocial development as eight successive life-cycle challenges. Each challenge was framed as a struggle between two outcomes, one desirable and one undesirable. The first two early development challenges were 'trust' versus 'mistrust' followed by 'autonomy' versus 'shame.' Importantly, he held that we face the challenge of **generativity** versus **stagnation in middle life**. This challenge concerns the desire to give back to society and leave a mark on the world. It is about the transition from acquiring and accumulating to providing and mentoring.

Founded in 2010, the European Scientific Journal is just reaching young adulthood. Nonetheless, **generativity** is one of our core values. As a Journal, we reject stagnation and continue to evolve to meet the needs of our contributors, our reviewers, and the academic community. We seek to innovate to meet the challenges of open-access academic publishing. For us,

---

<sup>1</sup> Hopkins, J. R. (1995). Erik Homburger Erikson (1902–1994). *American Psychologist*, 50(9), 796-797. doi:<http://dx.doi.org/10.1037/0003-066X.50.9.796>

generativity has a special meaning. We acknowledge an obligation to give back to the academic community, which has supported us over the past decade and made our initial growth possible. As part of our commitment to generativity, we are re-doubling our efforts in several key areas. First, we are committed to keeping our article processing fees as low as possible to make the ESJ affordable to scholars from all countries. Second, we remain committed to fair and agile peer review and are making further changes to shorten the time between submission and publication of worthy contributions. Third, we are looking actively at ways to eliminate the article processing charges for scholars coming from low GDP countries through a system of subsidies. Fourth, we are examining ways to create and strengthen partnerships with various academic institutions that will mutually benefit those institutions and the ESJ. Finally, through our commitment to publishing excellence, we reaffirm our membership in an open-access academic publishing community that actively contributes to the vitality of scholarship worldwide.

*Sincerely,*

***Daniel B. Hier, MD***

*European Scientific Journal (ESJ) Natural/Life/Medical Sciences*

*Editor in Chief*

---

# International Editorial Board

**Jose Noronha Rodrigues,**  
University of the Azores, Portugal

**Nino Kemertelidze,**  
Grigol Robakidze University, Georgia

**Jacques de Vos Malan,**  
University of Melbourne, Australia

**Franz-Rudolf Herber,**  
University of Saarland, Germany

**Annalisa Zanola,**  
University of Brescia, Italy

**Robert Szucs,**  
University of Debrecen, Hungary

**Dragica Vujadinovic,**  
University of Belgrade, Serbia

**Pawel Rozga,**  
Technical University of Lodz, Poland

**Mahmoud Sabri Al-Asal,**  
Jadara University, Irbid-Jordan

**Rashmirekha Sahoo,**  
Melaka-Manipal Medical College, Malaysia

**Georgios Vousinas,**  
University of Athens, Greece

**Asif Jamil,**  
Gomal University DIKhan, KPK, Pakistan

**Faranak Seyyedi,**  
Azad University of Arak, Iran

**Abe N'Doumy Noel,**  
International University of Social Sciences Hampate-Ba (IUSS-HB) Abidjan RCI, Ivory  
Coast

**Majid Said Al Busafi,**  
Sultan Qaboos University- Sultanate of Oman

**Dejan Marolov,**  
European Scientific Institute, ESI

**Noor Alam,**  
Universiti Sains Malaysia, Malaysia

**Rashad A. Al-Jawfi,**  
Ibb University, Yemen

**Muntean Edward Ioan,**  
University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine (USAMV) Cluj-Napoca,  
Romania

**Hans W. Giessen,**  
Saarland University, Saarbrucken, Germany

**Frank Bezzina,**  
University of Malta, Malta

**Monika Bolek,**  
University of Lodz, Poland

**Robert N. Diotalevi,**  
Florida Gulf Coast University, USA

**Daiva Jureviciene,**  
Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania

**Anita Lidaka,**  
Liepaja University, Latvia

**Rania Zayed,**  
Cairo University, Egypt

**Louis Valentin Mballa,**  
Autonomous University of San Luis Potosi, Mexico

**Lydia Ferrara,**  
University of Naples, Italy

**Byron A Brown,**  
Botswana Accountancy College, Botswana

**Grazia Angeloni,**  
University “G. d’Annunzio” in Chieti, Italy

**Chandrasekhar Putcha,**  
California State University, Fullerton, CA, USA

**Cinaria Tarik Albadri,**  
Trinity College Dublin University, Ireland

**Mahammad A. Nurmamedov,**  
State Pedagogical University, Azerbaijan

**Henryk J. Barton,**  
Jagiellonian University, Poland

**Assem El-Shazly,**  
Zagazig University, Egypt

**Saltanat Meiramova,**  
S.Seifullin AgroTechnical University, Kazakhstan

**Rajasekhar Kali Venkata,**  
University of Hyderabad, India

**Ruzica Loncaric,**  
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Croatia

**Stefan Vladutescu,**  
University of Craiova, Romania

**Anna Zelenkova,**  
Matej Bel University, Slovakia

**Billy Adamsen,**  
University of Southern Denmark, Denmark

**Marinella Lorinzi,**  
University of Cagliari, Italy

**Giuseppe Cataldi,**  
University of Naples “L’Orientale”, Italy

**N. K. Rathee,**  
Delaware State University, USA

**Michael Ba Banutu-Gomez,**  
Rowan University, USA

**Adil Jamil,**  
Amman University, Jordan

**Habib Kazzi,**  
Lebanese University, Lebanon

**Valentina Manoiu,**  
University of Bucharest, Romania

**Henry J. Grubb,**  
University of Dubuque, USA

**Daniela Brevenikova,**  
University of Economics, Slovakia

**Genute Gedviliene,**  
Vytautas Magnus University, Lithuania

**Vasilika Kume,**  
University of Tirana, Albania

**Mohammed Kerbouche,**  
University of Mascara, Algeria

**Adriana Gherbon,**  
University of Medicine and Pharmacy Timisoara, Romania

**Pablo Alejandro Olavegogeochea,**  
National University of Comahue, Argentina

**Raul Rocha Romero,**  
Autonomous National University of Mexico, Mexico

**Driss Bouyahya,**  
University Moulay Ismail, Morocco

**William P. Fox,**  
Naval Postgraduate School, USA

**Rania Mohamed Hassan,**  
University of Montreal, Canada

**Tirso Javier Hernandez Gracia,**  
Autonomous University of Hidalgo State, Mexico

**Tilahun Achaw Messaria,**  
Addis Ababa University, Ethiopia

**George Chiladze,**  
University of Georgia, Georgia

**Elisa Rancati,**  
University of Milano-Bicocca, Italy

**Alessandro Merendino,**  
University of Ferrara, Italy

**David L. la Red Martinez,**  
Northeastern National University, Argentina

**Anastassios Gentzoglani,**  
University of Sherbrooke, Canada

**Awoniyi Samuel Adebayo,**  
Solusi University, Zimbabwe

**Milan Radosevic,**  
Faculty Of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia

**Berenyi Laszlo,**  
University of Miskolc, Hungary

**Hisham S Ibrahim Al-Shaikhli,**  
Auckland University of Technology, New Zeland

**Omar Arturo Dominguez Ramirez,**  
Hidalgo State University, Mexico

**Bupinder Zutshi,**  
Jawaharlal Nehru University, India

**Pavel Krpalek,**  
University of Economics in Prague, Czech Republic

**Mondira Dutta,**  
Jawaharlal Nehru University, India

**Evelio Velis,**  
Barry University, USA

**Mahbubul Haque,**  
Daffodil International University, Bangladesh

**Diego Enrique Baez Zarabanda,**  
Autonomous University of Bucaramanga, Colombia

**Juan Antonio Lopez Nunez,**  
University of Granada, Spain

**Nouh Ibrahim Saleh Alguzo,**  
Imam Muhammad Ibn Saud Islamic University, Saudi Arabia

**Ashgar Ali Ali Mohamed,**  
International Islamic University, Malaysia

**A. Zahoor Khan,**  
International Islamic University Islamabad, Pakistan

**Valentina Manoiu,**  
University of Bucharest, Romania

**Andrzej Palinski,**  
AGH University of Science and Technology, Poland

**Jose Carlos Teixeira,**  
University of British Columbia Okanagan, Canada

**Enkeleint - Aggelos Mechili,**  
National and Kapodistrian University of Athens, Greece

**Anita Auzina,**  
Latvia University of Agriculture, Latvia

**Martin Gomez-Ullate,**  
University of Extremadura, Spain

**Nicholas Samaras,**  
Technological Educational Institute of Larissa, Greece

**Emrah Cengiz,**  
Istanbul University, Turkey

**Francisco Raso Sanchez,**  
University of Granada, Spain

**Simone T. Hashiguti,**  
Federal University of Uberlandia, Brazil

**Tayeb Boutbouqalt,**  
University, Abdelmalek Essaadi, Morocco

**Maurizio Di Paolo Emilio,**  
University of L'Aquila, Italy

**Ismail Ipek,**  
Istanbul Aydin University, Turkey

**Olena Kovalchuk,**  
National Technical University of Ukraine, Ukraine

**Oscar Garcia Gaitero,**  
University of La Rioja, Spain

**Alfonso Conde,**  
University of Granada, Spain

**Jose Antonio Pineda-Alfonso,**  
University of Sevilla, Spain

**Jingshun Zhang,**  
Florida Gulf Coast University, USA

**Rodrigue V. Cao Diogo,**  
University of Parakou, Benin

**Olena Ivanova,**  
Kharkiv National University, Ukraine

**Marco Mele,**  
Unint University, Italy

**Okyay Ucan,**  
Omer Halisdemir University, Turkey

**Arun N. Ghosh,**  
West Texas A&M University, USA

**Matti Raudjarv,**  
University of Tartu, Estonia

**Cosimo Magazzino,**  
Roma Tre University, Italy

**Susana Sousa Machado,**  
Polytechnic Institute of Porto, Portugal

**Jelena Zascerinska,**  
University of Latvia, Latvia

**Umman Tugba Simsek Gursoy,**  
Istanbul University, Turkey

**Zoltan Veres,**  
University of Pannonia, Hungary

**Vera Komarova,**  
Daugavpils University, Latvia

**Salloom A. Al-Juboori,**  
Muta'h University, Jordan

**Stephane Zingue,**  
University of Maroua, Cameroon

**Pierluigi Passaro,**  
University of Bari Aldo Moro, Italy

**Georges Kpazai,**  
Laurentian University, Canada

**Claus W. Turtur,**  
University of Applied Sciences Ostfalia, Germany

**Natalia Sizochenko,**  
Dartmouth College, USA

**Michele Russo,**  
University of Catanzaro, Italy

**Nikolett Deutsch,**  
Corvinus University of Budapest, Hungary

**Andrea Baranovska,**  
University of st. Cyrill and Methodius Trnava, Slovakia

**Brian Sloboda,**  
University of Maryland, USA

**Yassen Al Foteih,**  
Canadian University Dubai, UAE

**Marisa Cecilia Tumino,**  
Adventista del Plata University, Argentina

**Luca Scaini,**  
Al Akhawayn University, Morocco

**Aelita Skarbaliene,**  
Klaipeda University, Lithuania

**Oxana Bayer,**  
Dnipropetrovsk Oles Honchar University, Ukraine

**Onyeka Uche Ofili,**  
International School of Management, France

**Aurela Saliaj,**  
University of Vlora, Albania

**Maria Garbelli,**  
Milano Bicocca University, Italy

**Josephus van der Maesen,**  
Wageningen University, Netherlands

**Claudia M. Dellafiore,**  
National University of Rio Cuarto, Argentina

**Francisco Gonzalez Garcia,**  
University of Granada, Spain

**Mahgoub El-Tigani Mahmoud,**  
Tennessee State University, USA

**Daniel Federico Morla,**  
National University of Rio Cuarto, Argentina

**Valeria Autran,**  
National University of Rio Cuarto, Argentina

**Muhammad Hasmi Abu Hassan Asaari,**  
Universiti Sains, Malaysia

**Angelo Viglianisi Ferraro,**  
Mediterranean University of Reggio Calabria, Italy

**Roberto Di Maria,**  
University of Palermo, Italy

**Delia Magherescu,**  
State University of Moldova, Moldova

**Paul Waithaka Mahinge,**  
Kenyatta University, Kenya

**Aicha El Alaoui,**  
Sultan My Slimane University, Morocco

**Marija Brajčić,**  
University of Split, Croatia

**Monica Monea,**  
University of Medicine and Pharmacy of Tirgu Mures, Romania

**Belen Martinez-Ferrer,**  
Univeristy Pablo Olavide, Spain

**Rachid Zammar,**  
University Mohammed 5, Morocco

**Fatma Koc,**  
Gazi University, Turkey

**Calina Nicoleta,**  
University of Craiova, Romania

**Shadaan Abid,**  
UT Southwestern Medical Center, USA

**Sadik Madani Alaoui,**  
Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Morocco

**Patrizia Gazzola,**  
University of Insubria, Italy

**Krisztina Szegedi,**  
University of Miskolc, Hungary

**Liliana Esther Mayoral,**  
National University of Cuyo, Argentina

**Amarjit Singh,**  
Kurukshetra University, India

**Oscar Casanova Lopez,**  
University of Zaragoza, Spain

**Emina Jerkovic,**  
University of Josip Juraj Strossmayer, Croatia

**Carlos M. Azcoitia,**  
National Louis University, USA

**Rokia Sanogo,**  
University USTTB, Mali

**Bertrand Lemennicier,**  
University of Paris Sorbonne, France

**Lahcen Benaabidate,**  
University Sidi Mohamed Ben Abdellah, Morocco

**Janaka Jayawickrama,**  
University of York, United Kingdom

**Kiluba L. Nkulu,**  
University of Kentucky, USA

**Oscar Armando Esparza Del Villar,**  
University of Juarez City, Mexico

**George C. Katsadoros,**  
University of the Aegean, Greece

**Elena Gavrilova,**  
Plekhanov University of Economics, Russia

**Eyal Lewin,**  
Ariel University, Israel

**Szczepan Figiel,**  
University of Warmia, Poland

**Don Martin,**  
Youngstown State University, USA

**John B. Strait,**  
Sam Houston State University, USA

**Nirmal Kumar Betchoo,**  
University of Mascareignes, Mauritius

**Camilla Buzzacchi,**  
University Milano Bicocca, Italy

**EL Kandoussi Mohamed,**  
Moulay Ismai University, Morocco

**Susana Borrás Pentinat,**  
Rovira i Virgili University, Spain

**Jelena Kasap,**  
Josip J. Strossmayer University, Croatia

**Massimo Mariani,**  
Libera Universita Mediterranea, Italy

**Rachid Sani,**  
University of Niamey, Niger

**Luis Aliaga,**  
University of Granada, Spain

**Robert McGee,**  
Fayetteville State University, USA

**Angel Urbina-Garcia,**  
University of Hull, United Kingdom

**Sivanadane Mandjiny,**  
University of N. Carolina at Pembroke, USA

**Marko Andonov,**  
American College, Republic of Macedonia

**Ayub Nabi Khan,**  
BGMEA University of Fashion & Technology, Bangladesh

**Leyla Yilmaz Findik,**  
Hacettepe University, Turkey

**Vlad Monescu,**  
Transilvania University of Brasov, Romania

**Stefano Amelio,**  
University of Unsubria, Italy

**Enida Pulaj,**  
University of Vlora, Albania

**Christian Cave,**  
University of Paris XI, France

**Julius Gathogo,**  
University of South Africa, South Africa

**Claudia Pisoschi,**  
University of Craiova, Romania

**Arianna Di Vittorio,**  
University of Bari "Aldo Moro", Italy

**Joseph Ntale,**  
Catholic University of Eastern Africa, Kenya

**Kate Litondo,**  
University of Nairobi, Kenya

**Maurice Gning,**  
Gaston Berger University, Senegal

**Katarina Marosevic,**  
J.J. Strossmayer University, Croatia

**Sherin Y. Elmahdy,**  
Florida A&M University, USA

**Syed Shadab,**  
Jazan University, Saudi Arabia

**Koffi Yao Blaise,**  
University Felix Houphouet Boigny, Ivory Coast

**Mario Adelfo Batista Zaldivar,**  
Technical University of Manabi, Ecuador

**Kalidou Seydou,**  
Gaston Berger University, Senegal

**Patrick Chanda,**  
The University of Zambia, Zambia

**Meryem Ait Ouali,**  
University IBN Tofail, Morocco

**Laid Benderradji,**  
Mohamed Boudiaf University of Msila, Algeria

**Amine Daoudi,**  
University Moulay Ismail, Morocco

**Oruam Cadex Marichal Guevara,**  
University Maximo Gomes Baez, Cuba

**Vanya Katarska,**  
National Military University, Bulgaria

**Carmen Maria Zavala Arnal,**  
University of Zaragoza, Spain

**Francisco Gavi Reyes,**  
Postgraduate College, Mexico

**Iane Franceschet de Sousa,**  
Federal University S. Catarina, Brazil

**Patricia Randrianavony,**  
University of Antananarivo, Madagascar

**Roque V. Mendez,**  
Texas State University, USA

**Kesbi Abdelaziz,**  
University Hassan II Mohammedia, Morocco

**Whei-Mei Jean Shih,**  
Chang Gung University of Science and Technology, Taiwan

**Ilknur Bayram,**  
Ankara University, Turkey

**Elenica Pjero,**  
University Ismail Qemali, Albania

**Gokhan Ozer,**  
Fatih Sultan Mehmet Vakif University, Turkey

**Veronica Flores Sanchez,**  
Technological University of Veracruz, Mexico

**Camille Habib,**  
Lebanese University, Lebanon

**Larisa Topka,**  
Irkutsk State University, Russia

**Paul M. Lipowski,**  
Creighton University, USA

**Marie Line Karam,**  
Lebanese University, Lebanon

**Sergio Scicchitano,**  
Research Center on Labour Economics (INAPP), Italy

**Mohamed Berradi,**  
Ibn Tofail University, Morocco

**Visnja Lachner,**  
Josip J. Strossmayer University, Croatia

**Sangne Yao Charles,**  
University Jean Lorougnon Guede, Ivory Coast

**Omar Boubker,**  
University Ibn Zohr, Morocco

**Kouame Atta,**  
University Felix Houphouet Boigny, Ivory Coast

**Patience Mpanzu,**  
University of Kinshasa, Congo

**Devang Upadhyay,**  
University of North Carolina at Pembroke, USA

**Nyamador Wolali Seth,**  
University of Lome, Togo

**Akmele Meless Simeon,**  
Ouattara University, Ivory Coast

**Mohamed Sadiki,**  
IBN Tofail University, Morocco

**Paula E. Faulkner,**  
North Carolina Agricultural and Technical State University, USA

**Gamal Elgezeery,**  
Suez University, Egypt

**Manuel Gonzalez Perez,**  
Universidad Popular Autonoma del Estado de Puebla, Mexico

**Denis Pompidou Folefack,**  
Centre Africain de Recherche sur Bananiers et Plantains (CARBAP), Cameroon

**Seka Yapi Arsene Thierry,**  
Ecole Normale Supérieure Abidjan (ENS Ivory Coast)

**Dastagiri MB,**  
ICAR-National Academy of Agricultural Research Management, India

**Alla Manga,**  
University Cheikh Anta Diop, Senegal

**Lalla Aicha Lrhorfi,**  
University Ibn Tofail, Morocco

**Ruth Adunola Aderanti,**  
Babcock University, Nigeria

**Katica Kulavkova,**  
University of "Ss. Cyril and Methodius", Republic of Macedonia

**Aka Koffi Sosthene,**  
Research Center for Oceanology, Ivory Coast

**Forchap Ngang Justine,**  
University Institute of Science and Technology of Central Africa, Cameroon

**Toure Krouele,**  
Ecole Normale Supérieure d'Abidjan, Ivory Coast

**Sophia Barinova,**  
University of Haifa, Israel

**Leonidas Antonio Cerda Romero,**  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

**T.M.S.P.K. Thennakoon,**  
University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka

**Aderewa Amontcha,**  
Université d'Abomey-Calavi, Benin

**Khadija Kaid Rassou,**  
Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de la Formation, Morocco

**Rene Mesias Villacres Borja,**  
Universidad Estatal De Bolívar, Ecuador

**Aaron Victor Reyes Rodriguez,**  
Autonomous University of Hidalgo State, Mexico

**Qamil Dika,**  
Tirana Medical University, Albania

**Kouame Konan,**  
Peleforo Gon Coulibaly University of Korhogo, Ivory Coast

**Hariti Hakim,**  
University Alger 3, Algeria

**Emel Ceyhun Sabir,**  
University of Cukurova, Turkey

**Salomon Barrezueta Unda,**  
Universidad Tecnica de Machala, Ecuador

**Belkis Zervent Unal,**  
Cukurova University, Turkey

**Elena Krupa,**  
Kazakh Agency of Applied Ecology, Kazakhstan

**Carlos Angel Mendez Peon,**  
Universidad de Sonora, Mexico

**Antonio Solis Lima,**  
Apizaco Institute Technological, Mexico

**Roxana Matefi,**  
Transilvania University of Brasov, Romania

**Bouharati Saddek,**  
UFAS Setif1 University, Algeria

**Toleba Seidou Mamam,**  
Universite d'Abomey-Calavi (UAC), Benin

**Serigne Modou Sarr,**  
Universite Alioune DIOP de Bambey, Senegal

**Nina Stankous,**  
National University, USA

**Lovergine Saverio,**  
Tor Vergata University of Rome, Italy

**Fekadu Yehuwalashet Maru,**  
Jigjiga University, Ethiopia

**Karima Laamiri,**  
Abdelmalek Essaadi University, Morocco

**Elena Hunt,**  
Laurentian University, Canada

**Sharad K. Soni,**  
Jawaharlal Nehru University, India

**Lucrezia Maria de Cosmo,**  
University of Bari "Aldo Moro", Italy

**Florence Kagendo Muindi,**  
University of Nairobi, Kenya

**Maximo Rossi Malan,**  
Universidad de la Republica, Uruguay

**Haggag Mohamed Haggag,**  
South Valley University, Egypt

**Olugbamila Omotayo Ben,**  
Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria

**Eveligh Cecilania Prado-Carpio,**  
Technical University of Machala, Ecuador

**Maria Clideana Cabral Maia,**  
Brazilian Company of Agricultural Research - EMBRAPA, Brazil

**Fernando Paulo Oliveira Magalhaes,**  
Polytechnic Institute of Leiria, Portugal

**Valeria Alejandra Santa,**  
Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina

**Stefan Cristian Gherghina,**  
Bucharest University of Economic Studies, Romania

**Goran Ilik,**  
"St. Kliment Ohridski" University, Republic of Macedonia

**Amir Mohammad Sohrabian,**  
International Information Technology University (IITU), Kazakhstan

**Aristide Yemmafouo,**  
University of Dschang, Cameroon

**Gabriel Anibal Monzón,**  
University of Moron, Argentina

**Robert Cobb Jr,**  
North Carolina Agricultural and Technical State University, USA

**Arburim Iseni,**  
State University of Tetovo, Republic of Macedonia

**Raoufou Pierre Radji,**  
University of Lome, Togo

**Juan Carlos Rodriguez Rodriguez,**  
Universidad de Almeria, Spain

**Satoru Suzuki,**  
Panasonic Corporation, Japan

**Iulia-Cristina Muresan,**  
University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine, Romania

**Russell Kabir,**  
Anglia Ruskin University, UK

**Nasreen Khan,**  
SZABIST, Dubai

**Luisa Morales Maure,**  
University of Panama, Panama

**Lipeng Xin,**  
Xi'an Jiaotong University, China

**Harja Maria,**  
Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Romania

**Adou Paul Venance,**  
University Alassane Ouattara, Cote d'Ivoire

**Nkwenka Geoffroy,**  
Ecole Superieure des Sciences et Techniques (ESSET), Cameroon

**Benie Aloh J. M. H.,**  
Felix Houphouet-Boigny University of Abidjan, Cote d'Ivoire

**Bertin Desire Soh Fotsing,**  
University of Dschang, Cameroon

**N'guessan Tenguel Sosthene,**  
Nangui Abrogoua University, Cote d'Ivoire

**Ackoundoun-Nguessan Kouame Sharll,**  
Ecole Normale Superieure (ENS), Cote d'Ivoire

**Abdelfettah Maouni,**  
Abdelmalek Essaadi University, Morocco

**Alina Stela Resceanu,**  
University of Craiova, Romania

**Alilouch Redouan,**  
Chouaib Doukkali University, Morocco

**Gnamien Konan Bah Modeste,**  
Jean Lorougnon Guede University, Cote d'Ivoire

**Sufi Amin,**  
International Islamic University, Islambad Pakistan

**Sanja Milosevic Govedarovic,**  
University of Belgrade, Serbia

**Elham Mohammadi,**  
Curtin University, Australia

**Andrianarizaka Marc Tiana,**  
University of Antananarivo, Madagascar

**Ngakan Ketut Acwin Dwijendra,**  
Udayana University, Indonesia

**Yue Cao,**  
Southeast University, China

**Audrey Tolouian,**  
University of Texas, USA

**Asli Cazorla Milla,**  
University of the People, USA

**Valentin Marian Antohi,**  
University Dunarea de Jos of Galati, Romania

**Tabou Talahatou,**  
University of Abomey-Calavi, Benin

**N. K. B. Raju,**  
Sri Venkateswara Veterinary University, India

**Hamidreza Izadi,**  
Chabahar Maritime University, Iran

**Hanaa Ouda Khadri Ahmed Ouda,**  
Ain Shams University, Egypt

**Rachid Ismaili,**  
Hassan 1 University, Morocco

**Tamar Ghutidze,**  
Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia

**Emine Koca,**  
Ankara Haci Bayram Veli University, Turkey

**David Perez Jorge,**  
University of La Laguna, Spain

**Irma Guga,**  
European University of Tirana, Albania

**Jesus Gerardo Martínez del Castillo,**  
University of Almeria, Spain

**Mohammed Mouradi,**  
Sultan Moulay Slimane University, Morocco

**Marco Tulio Ceron Lopez,**  
Institute of University Studies, Mexico

**Mangambu Mokoso Jean De Dieu,**  
University of Bukavu, Congo

**Hadi Sutopo,**  
Topazart, Indonesia

**Priyantha W. Mudalige,**  
University of Kelaniya, Sri Lanka

**Emmanouil N. Choustoulakis,**  
University of Peloponnese, Greece

**Yasangi Anuradha Iddagoda,**  
Chartered Institute of Personal Management, Sri Lanka

**Pinnawala Sangasumana,**  
University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka

**Abdelali Kaaouachi,**  
Mohammed I University, Morocco

**Kahi Oulai Honore,**  
University of Bouake, Cote d'Ivoire

**Ma'moun Ahmad Habiballah,**  
Al Hussein Bin Talal University, Jordan

**Amaya Epelde Larranaga,**  
University of Granada, Spain

**Franca Daniele,**  
“G. d’Annunzio” University, Chieti-Pescara, Italy

**Saly Sambou,**  
Cheikh Anta Diop University, Senegal

**Daniela Di Berardino,**  
University of Chieti-Pescara, Italy

**Dorjana Klosi,**  
University of Vlore “Ismail Qemali, Albania

**Abu Hamja,**  
Aalborg University, Denmark

**Stankovska Gordana,**  
University of Tetova, Republic of Macedonia

**Kazimierz Albin Klosinski,**  
John Paul II Catholic University of Lublin, Poland

**Maria Leticia Bautista Diaz,**  
National Autonomous University, Mexico

**Bruno Augusto Sampaio Fuga,**  
North Parana University, Brazil

**Anouar Alami,**  
Sidi Mohammed Ben Abdellah University, Morocco

**Vincenzo Riso,**  
University of Ferrara, Italy

**Janhavi Nagwekar,**  
St. Michael’s Hospital, Canada

**Jose Grillo Evangelista,**  
Egas Moniz Higher Institute of Health Science, Portugal

**Xi Chen,**  
University of Kentucky, USA

**Fateh Mebarek-Oudina,**  
Skikda University, Algeria

**Nadia Mansour,**  
University of Sousse, Tunisia

**Jestoni Dulva Maniago,**  
Majmaah University, Saudi Arabia

**Daniel B. Hier,**  
Missouri University of Science and Technology, USA

**S. Sendil Velan,**  
Dr. M.G.R. Educational and Research Institute, India

**Enriko Ceko,**  
Wisdom University, Albania

**Laura Fischer,**  
National Autonomous University of Mexico, Mexico

**Mauro Berumen,**  
Caribbean University, Mexico

**Sara I. Abdelsalam,**  
The British University in Egypt, Egypt

**Maria Carlota,**  
Autonomous University of Queretaro, Mexico

**H.A. Nishantha Hettiarachchi,**  
University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka

**Bhupendra Karki,**  
University of Louisville, Louisville, USA

**Evens Emmanuel,**  
University of Quisqueya, Haiti

**Iresha Madhavi Lakshman,**  
University of Colombo, Sri Lanka

**Francesco Scotognella,**  
Polytechnic University of Milan, Italy

**Kamal Niaz,**  
Cholistan University of Veterinary & Animal Sciences, Pakistan

**Rawaa Qasha,**  
University of Mosul, Iraq

**Amal Talib Al-Sa'ady,**  
Babylon University, Iraq

**Hani Nasser Abdelhamid,**  
Assiut University, Egypt

**Mihnea-Alexandru Gaman,**  
University of Medicine and Pharmacy, Romania

**Daniela-Maria Cretu,**  
Lucian Blaga University of Sibiu, Romania

**Ilenia Farina,**  
University of Naples "Parthenope, Italy

**Luisa Zanolla,**  
Azienda Ospedaliera Universitaria Verona, Italy

**Jonas Kwabla Fiadzawoo,**  
University for Development Studies (UDS), Ghana

**Adriana Burlea-Schiopoiu,**  
University of Craiova, Romania

**Alejandro Palafox-Munoz,**  
University of Quintana Roo, Mexico

**Fernando Espinoza Lopez,**  
Hofstra University, USA

**Ammar B. Altemimi,**  
University of Basrah, Iraq

**Monica Butnariu,**  
University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine "King Michael I, Romania

**Davide Calandra,**  
University of Turin, Italy

**Nicola Varrone,**  
University of Campania Luigi Vanvitelli, Italy

**Luis Angel Medina Juarez,**  
University of Sonora, Mexico

**Francesco D. d'Ovidio,**  
University of Bari "Aldo Moro", Italy

**Sameer Algburi,**  
Al-Kitab University, Iraq

**Braione Pietro,**  
University of Milano-Bicocca, Italy

**Mounia Bendari,**  
Mohammed VI University, Morocco

**Stamatios Papadakis,**  
University of Crete, Greece

**Aleksey Khlopytskyi,**  
Ukrainian State University of Chemical Technology, Ukraine

**Sung-Kun Kim,**  
Northeastern State University, USA

**Nemanja Berber,**  
University of Novi Sad, Serbia

**Krejsa Martin,**  
Technical University of Ostrava, Czech Republic

**Magdalena Vaverkova,**  
Mendel University in Brno, Czech Republic

**Jeewaka Kumara,**  
University of Peradeniya, Sri Lanka

**Antonella Giacosa,**  
University of Torino, Italy

**Paola Clara Leotta,**  
University of Catania, Italy

**Francesco G. Patania,**  
University of Catania, Italy

**Rajko Odobasa,**  
University of Osijek, Faculty of Law, Croatia

**Jesusa Villanueva-Gutierrez,**  
University of Tabuk, Tabuk, KSA

**Leonardo Jose Mataruna-Dos-Santos,**  
Canadian University of Dubai, UAE

**Usama Konbr,**  
Tanta University, Egypt

**Branislav Radeljic,**  
Necmettin Erbakan University, Turkey

**Anita Mandaric Vukusic,**  
University of Split, Croatia

**Barbara Cappuzzo,**  
University of Palermo, Italy

**Roman Jimenez Vera,**  
Juarez Autonomous University of Tabasco, Mexico

**Lucia P. Romero Mariscal,**  
University of Almeria, Spain

**Pedro Antonio Martin-Cervantes,**  
University of Almeria, Spain

**Hasan Abd Ali Khudhair,**  
Southern Technical University, Iraq

**Qanqom Amira,**  
Ibn Zohr University, Morocco

**Farid Samir Benavides Vanegas,**  
Catholic University of Colombia, Colombia

**Nedret Kuran Burcoglu,**  
Emeritus of Bogazici University, Turkey

**Julio Costa Pinto,**  
University of Santiago de Compostela, Spain

**Satish Kumar,**  
Dire Dawa University, Ethiopia

**Favio Farinella,**  
National University of Mar del Plata, Argentina

**Jorge Tenorio Fernando,**  
Paula Souza State Center for Technological Education - FATEC, Brazil

**Salwa Alinat,**  
Open University, Israel

**Hamzo Khan Tagar,**  
College Education Department Government of Sindh, Pakistan

**Rasool Bukhsh Mirjat,**  
Senior Civil Judge, Islamabad, Pakistan

**Samantha Goncalves Mancini Ramos,**  
Londrina State University, Brazil

**Mykola Nesprava,**  
Dnoproetrovsk State University of Internal Affairs, Ukraine

**Awwad Othman Abdelaziz Ahmed,**  
Taif University, Kingdom of Saudi Arabia

**Giacomo Buoncompagni,**  
University of Florence, Italy

**Elza Nikoleishvili,**  
University of Georgia, Georgia

**Mohammed Mahmood Mohammed,**  
University of Baghdad, Iraq

**Oudgou Mohamed,**  
University Sultan Moulay Slimane, Morocco

**Arlinda Ymeraj,**  
European University of Tirana, Albania

**Luisa Maria Arvide Cambra,**  
University of Almeria, Spain

**Charahabil Mohamed Mahamoud,**  
University Assane Seck of Ziguinchor, Senegal

**Ehsaneh Nejad Mohammad Nameghi,**  
Islamic Azad University, Iran  
**Mohamed Elsayed Elnaggar,**  
The National Egyptian E-Learning University , Egypt

**Said Kammas,**  
Business & Management High School, Tangier, Morocco

**Harouna Issa Amadou,**  
Abdou Moumouni University of Niger

**Achille Magloire Ngah,**  
Yaounde University II, Cameroun

**Gnagne Agness Essoh Jean Eudes Yves,**  
Universite Nangui Abrogoua, Cote d'Ivoire

**Badoussi Marius Eric,**  
Université Nationale des sciences, Technologies,  
Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) , Benin

**Carlos Alberto Batista Dos Santos,**  
Universidade Do Estado Da Bahia, Brazil

**Oumar Bah,**  
Sup' Management, Mali

**Angelica Selene Sterling Zozoaga,**  
Universidad del Caribe, Mexico

**Josephine W. Gitome,**  
Kenyatta University, Kenya

**Keumean Keiba Noel,**  
Felix Houphouet Boigny University Abidjan, Ivory Coast

**Tape Bi Sehi Antoine,**  
University Peleforo Gon Coulibaly, Ivory Coast

**Atsé Calvin Yapi,**  
Université Alassane Ouattara, Côte d'Ivoire

**Desara Dushi,**  
Vrije Universiteit Brussel, Belgium

**Mary Ann Hollingsworth,**  
University of West Alabama, Liberty University, USA

**Aziz Dieng,**  
University of Portsmouth, UK

**Ruth Magdalena Gallegos Torres,**  
Universidad Autonoma de Queretaro, Mexico

**Atanga Essama Michel Barnabé,**  
Université de Bertoua, Cameroun

**Alami Hasnaa,**  
Universite Chouaid Doukkali, Maroc

**Emmanuel Acquah-Sam,**  
Wisconsin International University College, Ghana

**Fabio Pizzutilo,**  
University of Bari "Aldo Moro", Italy

**Hicham Chairi,**  
Abdelmalek Essaadi University, Morocco

**Noureddine El Aouad,**  
University Abdelmalek Essaady, Morocco

**Samir Diouny,**  
Hassan II University, Casablanca, Morocco

**Gibet Tani Hicham,**  
Abdelmalek Essaadi University, Morocco

**Anoua Adou Serge Judicael,**  
Université Alassane Ouattara, Côte d'Ivoire

**Abderrahim Ayad,**  
Abdelmalek Essaadi University, Morocco

**Sara Teidj,**  
Moulay Ismail University Meknes, Morocco

**Gbadamassi Fousséni,**  
Université de Parakou, Benin

**Bouyahya Adil,**  
Centre Régional des Métiers d'Education et de Formation, Maroc

**Haounati Redouane,**  
Ibn Zohr Agadir, Morocco

**Hicham Es-soufi,**  
Moulay Ismail University, Morocco

**Imad Ait Lhassan,**  
Abdelmalek Essaâdi University, Morocco

**Givi Makalatia,**  
Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia

**Adil Brouri,**  
Moulay Ismail University, Morocco

**Noureddine El Baraka,**  
Ibn Zohr University, Morocco

**Ahmed Aberqi,**  
Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Morocco

**Oussama Mahboub,**  
Queens University, Kingston, Canada

**Markela Muca,**  
University of Tirana, Albania

**Tessougue Moussa Dit Martin,**  
Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Mali

**Kledi Xhaxhiu,**  
University of Tirana, Albania

**Saleem Iqbal,**  
University of Balochistan Quetta, Pakistan

**Dritan Topi,**  
University of Tirana, Albania

**Dakouri Guissa Desmos Francis,**  
Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire

**Adil Youssef Sayeh,**  
Chouaib Doukkali University, Morocco

**Zineb Tribak,**  
Sidi Mohammed Ben Abdellah University, Morocco

**Ngwengeh Brendaline Beloke,**  
University of Biea, Cameroon

**El Agy Fatima,**  
Sidi Mohamed Ben Abdelah University, Morocco

**Julian Kraja,**  
University of Shkodra "Luigj Gurakuqi", Albania

**Nato Durglishvili,**  
University of Georgia, Georgia

**Abdelkrim Salim,**  
Hassiba Benbouali University of Chlef, Algeria

**Omar Kchit,**  
Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Morocco

**Isaac Ogundu,**  
Ignatius Ajuru University of Education, Nigeria

**Giuseppe Lanza,**  
University of Catania, Italy

**Monssif Najim,**  
Ibn Zohr University, Morocco

**Luan Bekteshi,**  
“Barleti” University, Albania

**Malika Belkacemi,**  
Djillali Liabes, University of Sidi Bel Abbas, Algeria

**Oudani Hassan,**  
University Ibn Zohr Agadir, Morocco

**Merita Rumano,**  
University of Tirana, Albania

**Mohamed Chiban,**  
Ibn Zohr University, Morocco

**Tal Pavel,**  
The Institute for Cyber Policy Studies, Israel

**Jawad Laadraoui,**  
University Cadi Ayyad of Marrakech, Morocco

**El Mourabit Youssef,**  
Ibn Zohr University, Morocco

**Mancer Daya,**  
University of Science and Technology Houari Boumediene, Algeria

**Krzysztof Nesterowicz,**  
Ludovika-University of Public Service, Hungary

**Laamrani El Idrissi Safae,**  
Ibn Tofail University, Morocco

**Suphi Ural,**  
Cukurova University, Turkey

**Emrah Eray Akca,**  
Istanbul Aydin University, Turkey

**Selcuk Poyraz,**  
Adiyaman University, Turkey

**Ocak Gurbuz,**  
University of Afyon Kocatepe, Turkey

**Umut Sener,**  
Aksaray University, Turkey

**Mateen Abbas,**  
Capital University of Science and Technology, Pakistan

**Muhammed Bilgehan Aytac,**  
Aksaray University, Turkey

**Sohail Nadeem,**  
Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan

**Salman Akhtar,**  
Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan

**Afzal Shah,**  
Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan

**Muhammad Tayyab Naseer,**  
Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan

**Asif Sajjad,**  
Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan

**Atif Ali,**  
COMSATS University Islamabad, Pakistan

**Shahzda Adnan,**  
Pakistan Meteorological Department, Pakistan

**Waqar Ahmed,**  
Johns Hopkins University, USA

**Faizan ur Rehman Qaiser,**  
COMSATS University Islamabad, Pakistan

**Choua Ouchemi,**  
Université de N'Djaména, Tchad

**Syed Tallataf Hussain Shah,**  
COMSATS University Islamabad, Pakistan

**Saeed Ahmed,**  
University of Management and Technology, Pakistan

**Hafiz Muhammad Arshad,**  
COMSATS University Islamabad, Pakistan

**Johana Hajdini,**  
University "G. d'Annunzio" of Chieti-Pescara, Italy

**Mujeeb Ur Rehman,**  
York St John University, UK

**Noshaba Zulfiqar,**  
University of Wah, Pakistan

**Muhammad Imran Shah,**  
Government College University Faisalabad, Pakistan

**Niaz Bahadur Khan,**  
National University of Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan

**Titilayo Olotu,**  
Kent State University, Ohio, USA

**Kouakou Paul-Alfred Kouakou,**  
Université Peleforo Gon Coulibaly, Côte d'Ivoire

**Sajjad Ali,**  
Karakoram International University, Pakistan

**Hiqmet Kamberaj,**  
International Balkan University, Macedonia

**Sanna Ullah,**  
University of Central Punjab Lahore, Pakistan

**Khawaja Fahad Iqbal,**  
National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan

**Heba Mostafa Mohamed,**  
Beni Suef University, Egypt

**Abdul Basit,**  
Zhejiang University, China

**Karim Iddouch,**  
International University of Casablanca, Morocco

**Jay Jesus Molino,**  
Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Panama

**Imtiaz-ud-Din,**  
Quaid-e-Azam University Islamabad, Pakistan

**Dolantina Hyka,**  
Mediterranean University of Albania

**Yaya Dosso,**  
Alassane Ouattara University, Ivory Coast

**Essedaoui Aafaf,**  
Regional Center for Education and Training Professions, Morocco

**Ahmed Aberqi,**  
Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Morocco

**Silue Pagadjovongo Adama,**  
Peleforo GON COULIBALY University, Cote d'Ivoire

**Soumaya Outellou,**  
ENCG-Ibn Tofail University-Kenitra, Morocco

# Table of Contents:

**Contribution à la Reconnaissance Géologique et Géophysique du Pont Naturel d’Iminifri-Maroc.....1**

*Said Bouhachim*

*Amroumoussa Benmoussa*

*Amina Wafik*

*Abdessamad Najine*

*Raji Abdletife*

**Etude de la Vulnérabilité à l’Effondrement des Cavités de l’Ancienne Médina de Béni Mellal, Maroc.....23**

*Amina Wafik*

*Amroumoussa Benmoussa*

*Abdessamad Najine*

*Rajji Abdelatif*

*Achraf Kharmouch*

*Said Bouhachim*

**Nouvelle Approche d’Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines : Cas de la Nappe Mio-PlioQuaternaire du Bassin du Tadla (Maroc).....49**

*Amroumoussa Benmoussa*

*Amina Wafik*

*Najine Abdsamad*

*Sahar Khrmouch*

**Etude Comparative des Différentes Méthodes d'Estimation de  
l'Evapotranspiration en Zone Semi-Aride (cas Plaine Tadla  
Maroc).....74**

*Amroumoussa Benmoussa*

*Amina Wafik*

*Abdessamad Najine*

*Raji Abdletife*

*Sahar Khrmouch*



13 years ESJ  
*Special edition*

## **Contribution à la Reconnaissance Géologique et Géophysique du Pont Naturel d’Iminifri-Maroc**

***Said Bouhachim***

***Amroumoussa Benmoussa***

Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoressources et Environnement

***Amina Wafik***

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

***Abdessamad Najine***

***Raji Abdletife***

Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoressources et Environnement

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n40p1](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p1)

---

Submitted: 07 August 2023

Accepted: 18 October 2023

Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

*Cite As:*

Bouhachim S., Benmoussa A., Wafik A., Najine A. & Abdletife R. (2023). *Contribution à la Reconnaissance Géologique et Géophysique du Pont Naturel d’Iminifri-Maroc*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 1. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p1>

---

### **Résumé**

Le pont naturel d’Iminifri l’objet de cette étude est situé dans la commune de Tifni. Administrativement, il relève du cercle de Demnate, la Province d’Azilal-Maroc. L’étude géologique et géophysique des différentes formations pour la vérification de la stabilité du pont. La l’analyse des résultats et leur interprétation montre que l’ossature du pont naturel d’Iminifri est formée principalement de concrétions travertineuses calcaires. Ce sont des formations quaternaire sconstituées par des dépôts bio-carbonatés correspondant à d’anciennes émergences liasiques aujourd’hui disparues ou déplacées. La nature variée des formations travertineuses témoignent de leur formation dans des milieux différents : les ruptures de pente, les chenaux à écoulement pérenne, les berges concaves des méandres soumises à l’action prolongée des embruns dégagés par l’agitation de l’eau. Plusieurs types d’encroûtement travertineux ont été identifiés. Les plus abondants sont les

encroûtements plans, les encroûtements de buissons, les encroûtements sur support végétal et les encroûtements sur galets. Toutes les constatations effectuées confirment que les matériaux de la dalle formant l'ossature du pont sont fragilisés et visiblement dégradés. La lente altération et le comportement différé des matériaux soumis à des contraintes agressives sont en général à l'origine de la dégradation des conditions de stabilité. Des facteurs exogènes jouent également un rôle prépondérant comme les infiltrations pluviales et les vibrations engendrées par le trafic routier. Ils peuvent brutalement accélérer un processus de dégradation qui semblait être de plus en plus accentué. Objectif de cette étude à la vérification de la stabilité du pont et à l'analyse des résultats et leur interprétation. La reconnaissance géologique a été complétée par des investigations géophysiques en utilisant des méthodes adaptées aux conditions pétrophysiques des formations géologiques. D'après les études effectuées sur le pont, il est raisonnable de dire que la structure d'Iminifri évolue plus ou moins rapidement vers sa ruine. Ce qui nous pousse à trouver des solutions urgentes pour sauver ce patrimoine géologique du danger d'effondrement.

---

**Mots-clés:** Stabilité, Altération, Géophysique, Travertins, Iminifri

---

## **Contribution to the Geological and Geophysical Recognition of the Natural Bridge of Iminifri-Morocco**

*Said Bouhachim*

*Amroumoussa Benmoussa*

Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoressources et Environnement

*Amina Wafik*

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

*Abdessamad Najine*

*Raji Abdletife*

Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoressources et Environnement

---

### **Abstract**

The natural bridge of Iminifri, the subject of this study, is located in the commune of Tifni. Administratively, it falls under the Demnate circle, Azilal Province, Morocco. The geological and geophysical study of the various formations is aimed at verifying the stability of the bridge. The analysis of the results and their interpretation shows that the framework of the

natural bridge of Iminifri is primarily composed of limestone travertine concretions. These are Quaternary formations consisting of biocarbonate deposits corresponding to ancient Liassic emergencies that have since disappeared or shifted. The diverse nature of the travertine formations reflects their formation in different environments: slope breaks, perennial flow channels, concave banks of meanders subjected to the prolonged action of spray generated by water agitation. Several types of travertine encrustations have been identified, including flat encrustations, bushy encrustations, encrustations on vegetation, and encrustations on pebbles. All observations confirm that the materials forming the bridge's framework are weakened and visibly degraded. Slow deterioration and delayed behavior of materials subjected to aggressive stresses are generally the cause of deteriorating stability conditions. Exogenous factors also play a significant role, such as rainwater infiltration and vibrations generated by road traffic. They can abruptly accelerate a degradation process that appeared to be increasingly pronounced. The objective of this study is to verify the stability of the bridge and analyze the results and their interpretation. Geological reconnaissance was complemented by geophysical investigations using methods adapted to the petrophysical conditions of the geological formations. Based on the studies conducted on the bridge, it is reasonable to conclude that the structure of Iminifri is evolving towards its ruin, more or less rapidly. This pushes us to urgently find solutions to save this geological heritage from the danger of collapse.

---

**Keywords:** Stability, Alteration, Geophysics, Travertines, Iminifri

## Introduction

Le pont d'Iminifri est une arche naturelle d'une hauteur de 30 m, formé par le creux d'oued l'Assif. Il est l'un des sites les plus visités de la région de Demnate pour son aspect touristique qui attire les touristes passionnés par les monuments historiques et aussi l'aspect scientifique par son caractère exceptionnel conféré notamment par l'arche créée par les formations travertineuses. Il convient de rappeler également que le site d'Iminifri est classé en vertu de l'arrêté. vizir el du 19 Mars 1949 (18 Joumada I 1368) publié dans le journal officiel n° 1903 du 15 Avril 1949 un site d'intérêt biologique et écologique. Il bénéficie donc d'une protection administrative, qui impose les mesures de sa sauvegarde et de sa préservation. Ce pont naturel est situé à la jonction des deux routes régionales RR 302 et RR 307 qui lient Demnate à respectivement Ouaouizaght au Nord-Est et la route nationale N 10 entre Ouarzazate et Skoura au Sud, à 6 kilomètres à l'Est de la ville de Demnate (Frödin, 2016). Le suivi technique de cet ouvrage exceptionnel par les services chargés de l'équipement et du transport, avait fait ressortir que l'ouvrage serait

le siège de chutes de blocs rocheux, faisant craindre pour sa stabilité et pour la sécurité des biens et des personnes. On se propose dans la présente étude de collecter toutes les données géologiques et géophysiques nécessaires et suffisantes pour évaluer l'état physique des matériaux formant l'ossature de l'arche et préciser les facteurs endogènes et exogènes responsables de l'altération de ces matériaux. Le choix s'est porté sur les méthodes géophysiques de type sondages électrique et sismique réfraction couplée avec les résultats des investigations géologiques régionales et locales.

## Méthodes

Utilisez la section des méthodes pour décrire les méthodes statistiques utilisées pour l'analyse des données. Utilisez cette section pour décrire les méthodes utilisées, les sujets étudiés ou les matériaux utilisés. Si la recherche est terminée, utilisez le passé.

## Résultats

Rapporter avec concision les résultats trouvés. Utilisez les tableaux et les figures selon le cas. Ne répétez pas excessivement les résultats rapportés dans les tableaux et les figures dans le texte. Réservez la discussion des résultats à la section Discussion.

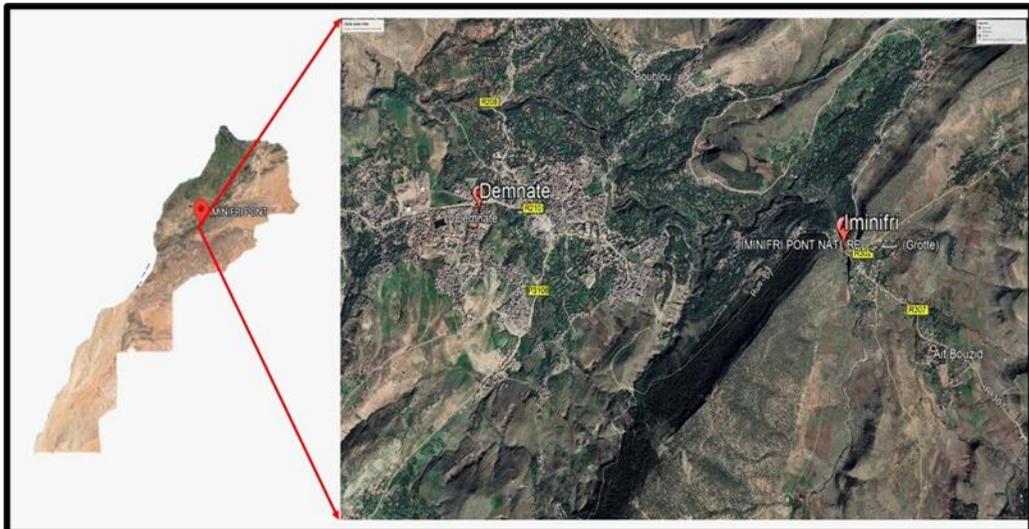


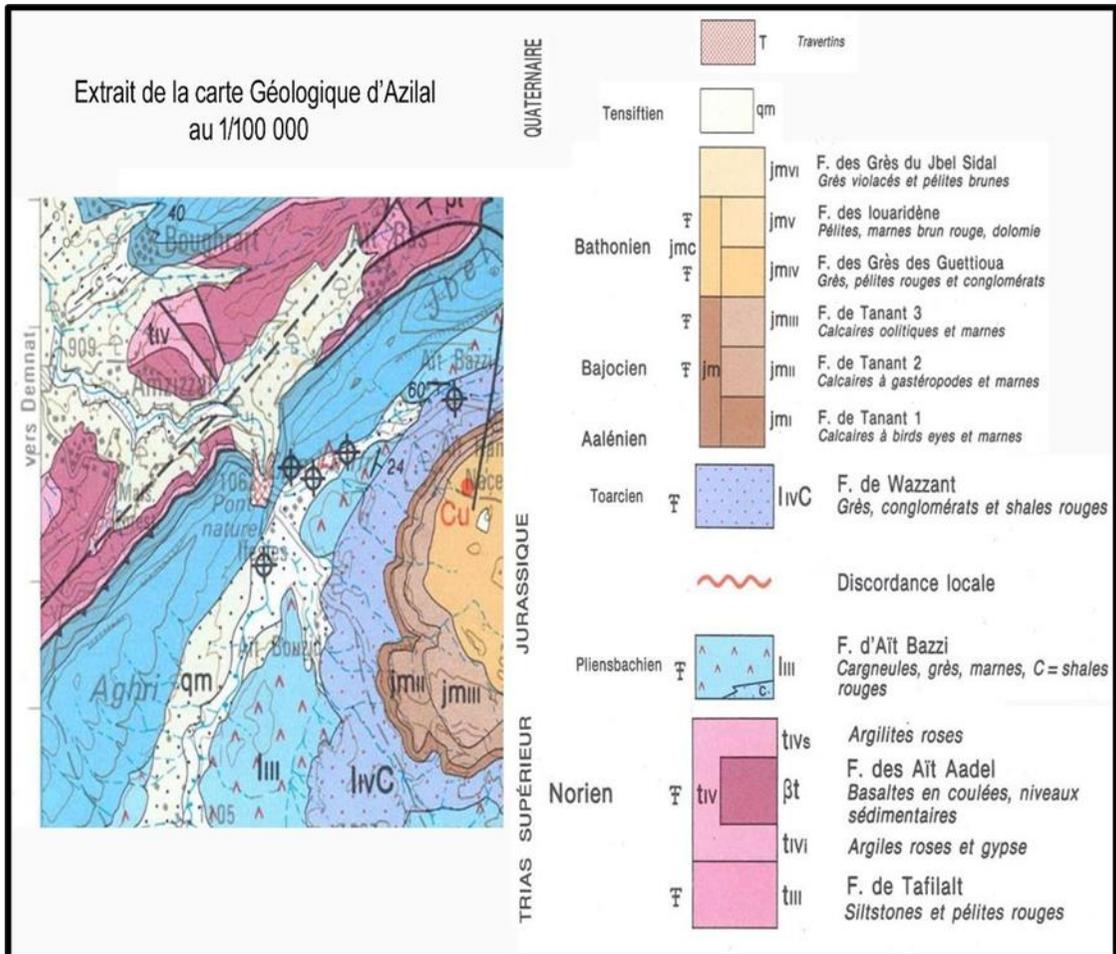
Figure 1. Situation géographique du Pont naturel d'Iminifri

## II. Contexte géologique

La synthèse des travaux géologiques effectués, montre que les formations rencontrées dans le site d'Iminifri sont, essentiellement du Secondaire et du Quaternaire (Landel et al., 2016). Les formations du Primaire et du Tertiaire sont quasiment absentes. Dans ce contexte, la série

stratigraphique débute avec le Trias ( l'ère secondaire) qui est constitué par des argiles rouges à niveaux salifères, avec des affleurements localisés de basalte doléritique. Ces derniers sont attribués au magmatisme triasique(Sadki, 1996).

- ❖ **Le Jurassique** est représenté par le Domérien calcaro-dolomtique du Lias inférieur. Ces formations affleurent dans toute la région et sont affectées par une faille de direction Nord-Est /Sud-Ouest, mettant à nu les formations triasiques sous-jacentes. Le niveau liasique est le siège de plusieurs sources qui résurgent dans la zone d'étude.
- ❖ **Le Crétacé** affleure au niveau de certaines zones sur les versants à pentes fortes à l'Est de la zone d'étude. Il est représenté par les formations du Cénomano-Turonien qui relève du Crétacé moyen. Il s'agit de marnes jaunes et blanches avec des bancs de calcaires durs.
- ❖ **Le Quaternaire** est représenté par des dépôts alluvionnaires et colluvionnaires qui ont résulté de l'érosion des reliefs de la chaîne montagneuse au Sud.
  - Le Quaternaire ancien comporte des limons roses à concrétions calcaires, à galets ou à cailloutis avec des niveaux de conglomérats fluviatiles et parfois lacustres. Il s'agit probablement de dépôts d'âge Amirien.
  - Le Quaternaire moyen est représenté par des limons à cailloutis et à conglomérats caractérisés par des encroûtements calcaires.
  - Le Quaternaire récent est constitué par des limons rouges parfois tirsifiés, et des conglomérats calcaires attribués au Soltanien. Il englobe aussi les matériaux accumulés dans certaines cuvettes et qui proviennent de la décomposition sur place des calcaires et dolomies et du ruissellement périphérique. Ces dépôts sont essentiellement argileux et peuvent atteindre des épaisseurs importantes.
  - Les formations travertineuses sont des formations quaternaires constituées par des dépôts de travertin, correspondant à d'anciennes émergences liasiques, aujourd'hui disparues ou déplacées. Ils peuvent avoir plusieurs faciès : tufeux, gréseux et même conglomératique.



**Figure 2.** Carte géologique de la région d'Iminifri  
 (Extrait de la carte géologique du Maroc au 1/50000) Feuille d'Azilal (Jenny, 1988)

### ❖ Les Travertins du Quaternaire :

Il s'agit de précipitations de carbonates inorganiques qui se forment à partir des eaux des sources froides ou thermales. Ce concrétionnement peut être influencé par la présence de bactéries ou d'algues, souvent incrustées dans la matrice calcitique, sans pour autant qu'elles puissent consister en précipitations organiques, dans la mesure où les réactions métaboliques ne sont pas forcément impliquées dans le processus de précipitation. Ainsi, les travertins sont des sédiments carbonatés continentaux, représentés sous toutes les latitudes, dont la formation peut actuellement être observée et étudiée. L'architecture des dépôts travertineux apparaît extrêmement variée et, bien que les facteurs contrôlant la précipitation de ce type de carbonate soient connus (hydrologie, climat, tectonique), la mise en place et l'évolution diagénétique de ces sédiments, restent complexes. Le rôle direct des

organismes est bien visible sur les masses travertineuses qui forment l'ossature de l'arche objet de la présente expertise. Les travertins d'Iminifri forment une plaque subhorizontale au contact du Lias. Ils sont particulièrement développés aux griffons des principales sources karstiques, ou jalonnent l'emplacement d'anciennes émergences aujourd'hui disparues ou déplacées. Ces dépôts biochimiques constituent des cascades travertineuses. Leurs lieux préférentiels de dépôt étaient là où les eaux subissaient leur première chute. Leur rôle hydrogéologique est non négligeable car ces formations perméables jouent le rôle d'intermédiaire

Dans l'abouchement de seaux karstiques (Bouchaou et al., 1997), avec les cours principaux. Les travertins sont des dépôts généralement problématiques à cause de leur position géographique isolée dans un encaissant calcaire, de leur morphologie et de leurs faciès distincts. Les méthodes de recherche (levé géomorphologique et analyse pétrographique) mises en œuvre pour déterminer leur origine, ont livré des résultats convergents. Ceux-ci permettent de conclure que les processus génétiques responsables de l'édification de ces travertins sont de nature hydrothermale (Beaudet, 1971). D'autres facteurs secondaires comme l'hydrologie de surface, les facteurs biogéniques et physico-chimiques y ont également laissé des traces (Knouz et al., 2016). Les analyses minéralogiques préliminaires réalisées sur des échantillons de travertins prélevés dans différents endroits du site, ont montrées plusieurs phases de recristallisation, bien que macroscopiquement la calcite semblait parfaitement cristallisée. Elle se présente de couleur brun-miel avec une faible porosité. L'explication géomorphologique de ce type de formation est souvent cherchée dans l'existence d'une rupture de pente, dans le profil longitudinal du cours d'eau. Cette rupture provoque une augmentation de la turbulence et, par conséquent, modifie les équilibres physico-chimiques. Ces accumulations présentent une disposition étagée sur les versants, en contrebas des sources karstiques qui leur ont donné naissance. Elles descendent dans le fond même de la vallée, et sont formées de couches de mousses et de tiges incrustées de carbonates. Ces formations offrent une épaisseur variable et une stratification grossière. Elles dessinent une série d'inflexions qui s'adaptent à la topographie de l'ancien versant (Beaudet, 1971). Très souvent le développement vertical de ces dépôts donne des édifices travertineux d'allure cunéiforme, dont la plus grande épaisseur est comprise entre 10 et 20 m.

## 2.1. Contexte climatique

Le climat de la région est de type semi-aride à caractère continental. Les précipitations s'échelonnent irrégulièrement d'Octobre-Novembre à Avril-Mai ; elles sont quasi-inexistantes en Juillet et en Août. Les températures s'élèvent progressivement depuis Avril pour atteindre leur maxima en Juillet

et en Août et s'abaissent nettement depuis mi-Septembre jusqu'au minima de Janvier-Février. L'hygrométrie est faible, la moyenne mensuelle varie de **40%** (août) à **70%** (janvier).

### **III. Méthodes et matériel**

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un résistivimètre IRIS Syscal R1et d'un sismographe de type PASI Plus spécialement conçu pour la prospection des terrains superficiels et souterrains et parfaitement adapté aux études géologiques et structurales. La zone d'études avec un surface probablement de 320 m<sup>2</sup> et un périmètre de 100 m est ainsi couverte en une seule implantation. Les mesures de la résistivité électrique sont réalisées selon les axes X et Y, ainsi que dans la direction à 45° de sorte à couvrir efficacement le volume à reconnaître. Cette méthode d'investigation correspond au "cross-diagonal Survey" tel que défini par (Barker & Loke, 1996). Cette méthode d'investigation géophysique par ondes de surfaces et tomographie électrique ont été mises en œuvre dans une parcelle pont de Iminifri couvrant une superficie de 320 m<sup>2</sup>. La deuxième méthode de sismique réfraction permet quant à elle, la détermination, entre autres, des caractéristiques mécaniques instantanées des sols. La plus fréquemment utilisée, consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes de compression, générées par un système de percussion ou, quand c'est nécessaire, par de l'explosif. Bien qu'on peut saisir également la vitesse de propagation des ondes de cisaillement par un appareillage spécifique, on peut cependant les déduire, à un stade préliminaire, des vitesses des ondes de compression, si le coefficient de Poisson des sols est connu. Les données géophysiques ont été traitées, analysées, puis interprétées par le biais de programmes spéciaux comme IPI2WIN, RES2DINV et Surfer, en tenant compte des informations géologiques disponibles sur le site. Des corrélations ont été effectuées d'une manière systématique entre les données acquises. Ces corrélations ont permis de lever certaines indéterminations et d'affiner les modèles du sous-sol(Deceuster & Kaufmann, 2007).

#### **3.1. Principe de la tomographie électrique :**

La tomographie électrique est une méthode géophysique qui permet d'obtenir des images de la résistivité électrique du sous-sol. Elle repose sur une combinaison des deux techniques électriques classiques : traîné et sondage. Ces deux dernières permettent de déterminer la résistivité électrique du sous-sol grâce à un dispositif quadripôle (AMNB) formé de deux électrodes d'injection de courant A et B et deux autres de mesures de la différence de potentiel M et N connectées à un résistivimètre.

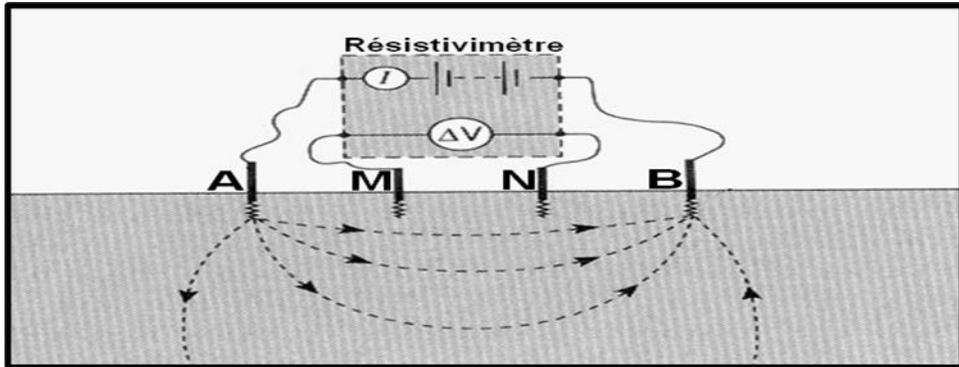


Figure 3. Dispositif quadripôle de mesure de la résistivité électrique

En tomographie électrique, on utilise un dispositif multi-électrodes qui offre la possibilité d'acquérir un grand nombre de mesures. Ceci permet d'avoir une image de la résistivité du sous-sol en particulier dans les régions à géologie complexe caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate. La tomographie électrique consiste à réaliser simultanément des profils multiples de résistivité correspondant à des espacements d'électrodes de plus en plus grands. Il existe plusieurs façons de disposer les électrodes. Pour une configuration classique de type Wenner, le schéma général de l'acquisition consiste à augmenter régulièrement le nombre ( $n$ ) de séparation unitaire ( $a$ ) des électrodes.

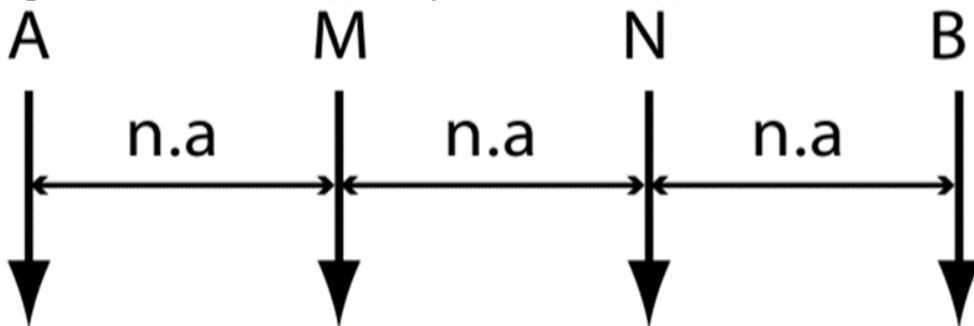


Figure 4. Schéma d'un dispositif Wenner

Les valeurs de la résistivité apparente sont reportées au milieu du dispositif à une profondeur proportionnelle à  $n$ . Ceci conduit à l'établissement d'une pseudo-section qui est une simple représentation des données et ne correspond pas à une coupe verticale de la résistivité du sous-sol. L'établissement d'une telle coupe nécessite une inversion des données qui consiste à minimiser, de façon itérative, l'écart entre les pseudo-sections mesurée et calculée à partir d'un modèle initial.

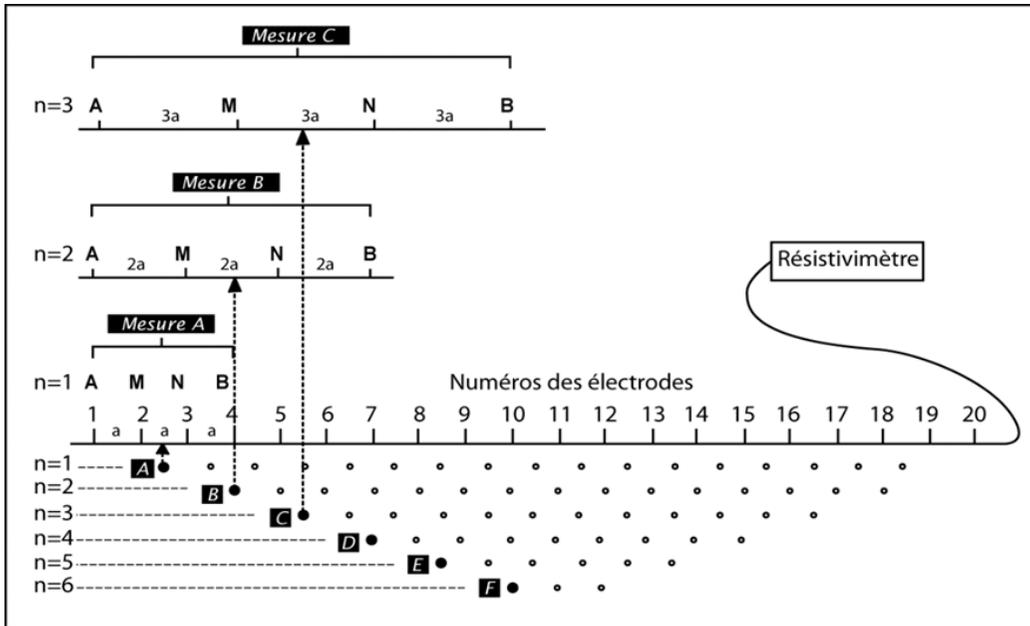


Figure 5. Établissement d'une pseudo-section

Tableau 1. De l'emplacement sondage electrique

N° Sondage électrique	Orientation	Coordonnées du centre	Longueur
I	NNW-SSE	X :350852,73; X:350941,19 Y :126711,21; Y:126643,34	150 m
II	NNW-SSE	X :350857,18; X:350942,50 Y :126720,00; Y:126645,34	150 m
III	ENE-WSW	X :350863,75; X:350961,13 Y :126700,42; Y:126700	150 m
IV	ENE-WSW	X :350871,22; X:350963,59 Y :126692,4; Y:126695,62	150 m



a. Implantation des profils géo-électriques      b. mise en place des appareils de mesure

Figure 6. Plan des Mesures géophysiques effectués

### 3.2. Les caractéristiques de site d'étude

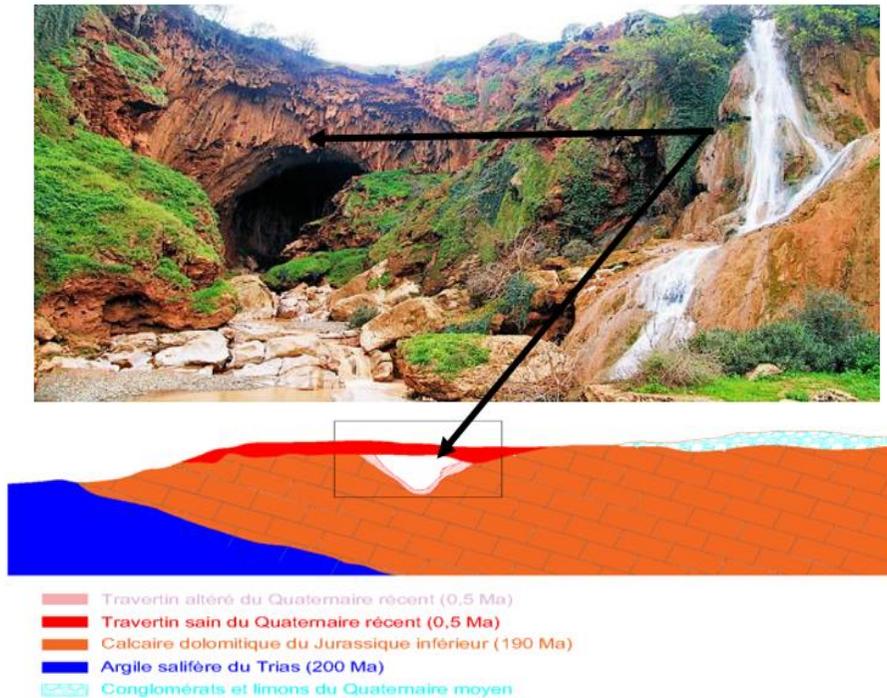


Figure 7. Coiffe de l'arche en travertin sur les calcaires dolomitiques



Figure 8. Aspect des travertins sus-jacents au calcaire dolomitique

La nature variée des formations travertineuses témoigne de leur formation dans des milieux différents : les ruptures de pente, les chenaux à écoulement pérenne, les berges concaves des méandres soumises à l'action prolongée des embruns provoqués par l'agitation de l'eau, les sources et les

suintements. Plusieurs types d'encroûtement travertineux ont été identifiés. Les plus abondants sont les encroûtements plans, les encroûtements de buissons, les encroûtements sur support végétal et les encroûtements sur galets. La précipitation de ces encroûtements se produit au cours des saisons sèches, combinée avec la saturation en carbonate de calcium dissout et le développement de la végétation (Duponcheel et al., 2009).

Dans cette zone, quelques caractéristiques permettent de distinguer au moins trois ou quatre générations de travertins dans une esquisse relative de chronologie. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Présence de plusieurs niveaux d'accumulation fluviale avec des éléments détritiques ;
- Différentes générations de colluvions ;
- Stades de diagénèse et de karstification plus ou moins avancés offerts par les divers ensembles travertineux ;
- Morphologie dégradée ou bien conservée ;
- Position géomorphologique.

Deux types de mesures d'angle sont nécessaires pour caractériser l'orientation des structures observées sur le terrain (stratification, fractures, diaclases etc.). Seul le calcaire dolomitique comporte des diaclases et des joints, au contraire du massif de travertin qui en est exempt de par sa nature et sa texture.



**Figure 9.** Boussole de mesure des pendages

Le tableau suivant indique les pendages des stratifications du massif.

**Tableau 2.** Direction et pendage des stratifications

NUM	SIS	Lat. (°)	Long.(°)	Direction	Pendage
1	<i>AVAL</i>	31,7251	-6,9726	55 (NE)	25
2		31,7252	-6,9724	60 (NE)	35
3		31,7254	-6,9723	70 (NE)	45
4		31,72535	-6,9724	60 (NE)	36
5		31,72525	-6,9723	60 (NE)	25
6		31,72517	-6,97219	60 (NE)	28
7		31,7253	-6,9723	60 (NE)	41
8		31,72537	-6,97217	56 (NE)	41
9		31,7253	-6,9721	62 (NE)	41
10	<i>AMONT</i>	31,723	-6,9714	30 (NE)	32



a. Pendage rive gauche, à l'amont de l'arche (Sud)

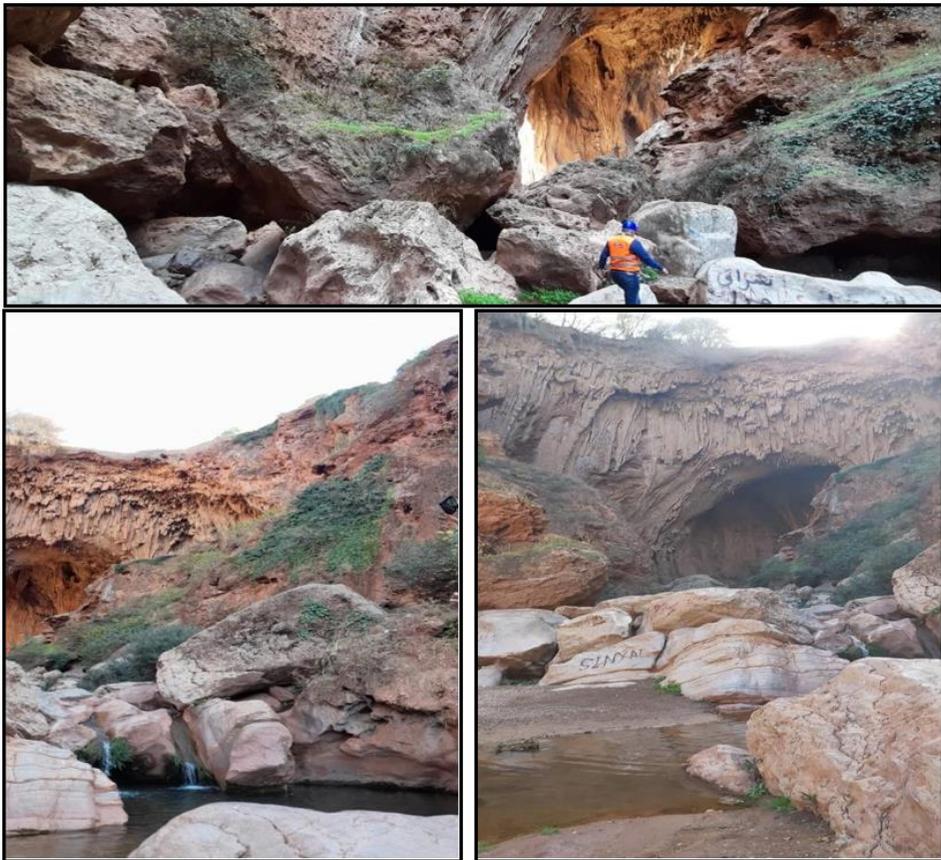
b. Effondrement de gros blocs dans le lit de l'oued

**Figure 10.** Pendage NE vers le lit de l'oued sur sa rive gauche (vue vers le Sud)

L'effondrement des gros blocs dans le lit de l'oued, se présente dans des conditions identiques, à l'aval de l'arche vers le Nord. La photo b (figure 11) en donne un aperçu. On y aperçoit en arrière-plan, le pendage défavorable vers le lit de l'oued. La situation stratigraphique est donc similaire à celle qui règne à l'amont de l'arche vers le Sud, entraînant les mêmes effondrements de gros blocs de calcaire dolomitique (Jenny, 1988).



**Figure 11 :** a. Face avale (Nord de l'arche vue vers le Sud) b. Gros bloc dans le lit de l'oued, au Nord de l'arche vers l'aval

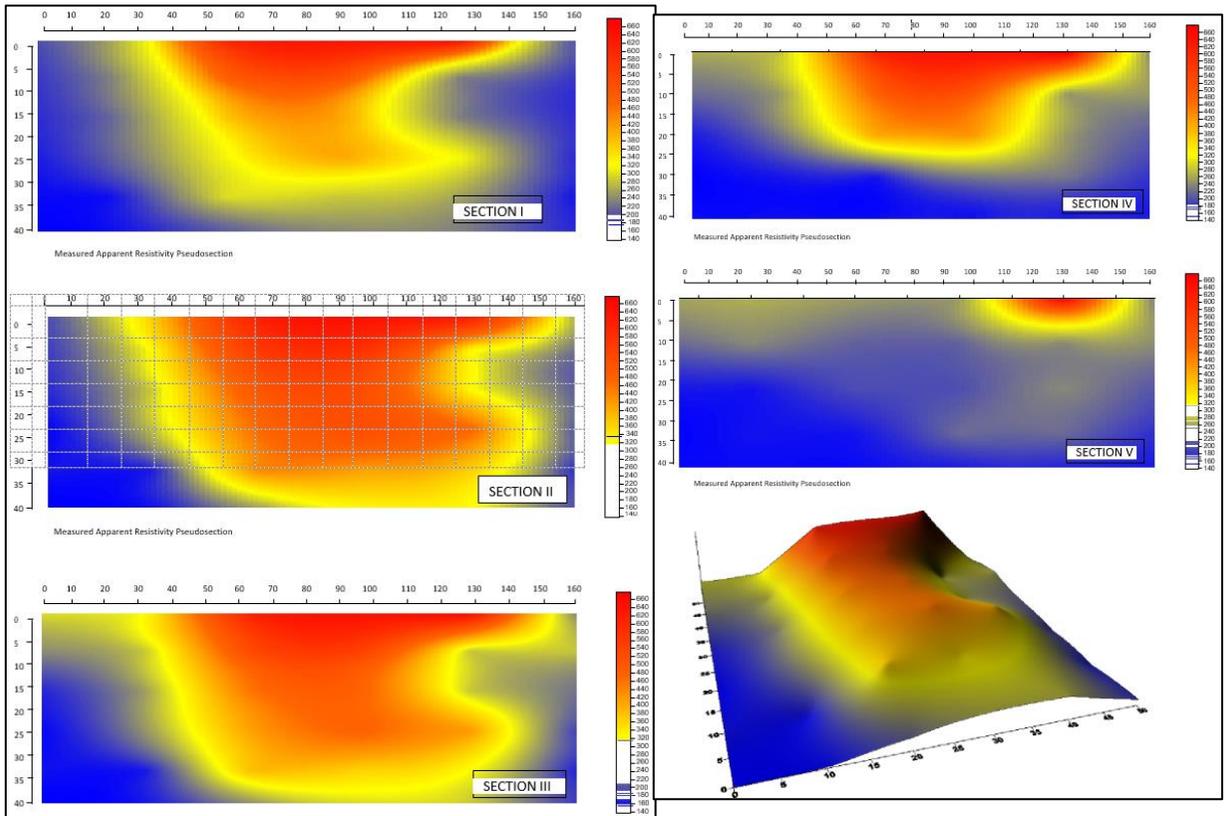


**Figure 12.** Photos illustrant les éboulements et chutes de blocs à partir de l'arche

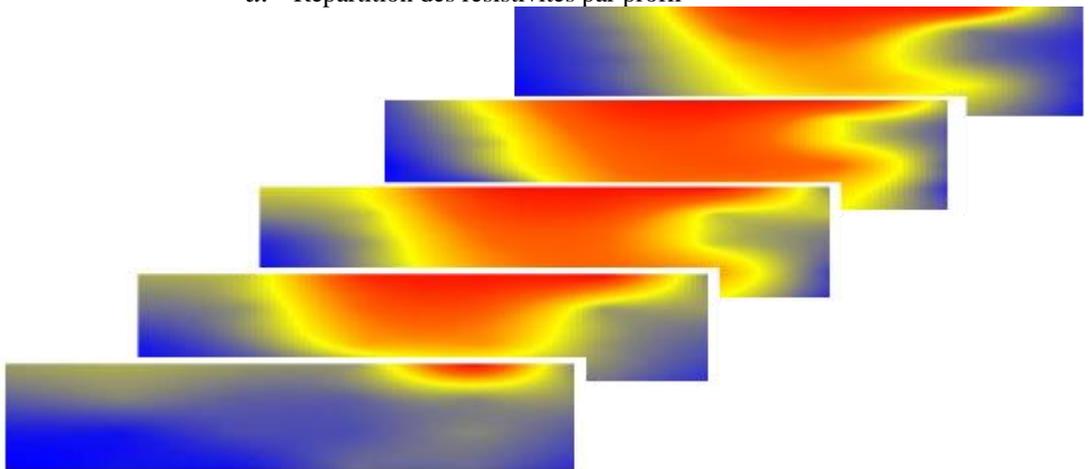
#### IV. Résultats

Les résultats obtenus sur chaque traînée de mesure, sont représentés (figure 13). Chaque profil comporte l'échelle chromatique des résistivités en

$\Omega_m$ , à sa droite. Le dernier graphique est une représentation 3D des résistivités :

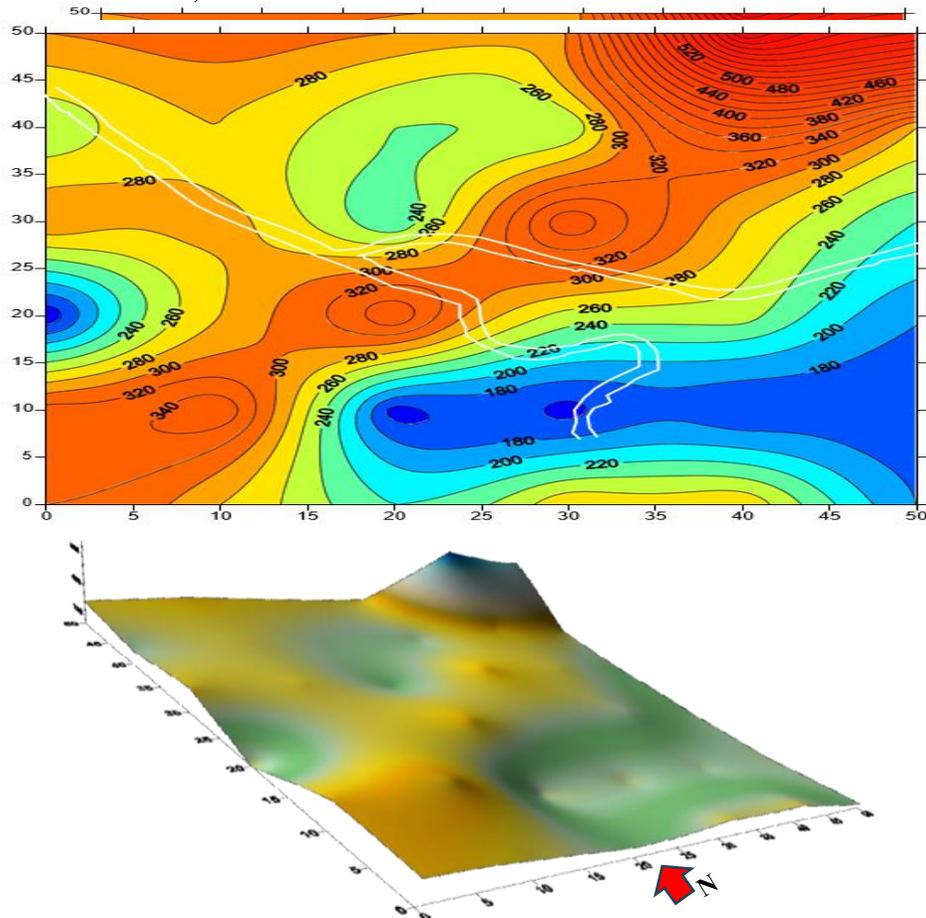


a. Répartition des résistivités par profil



b. Mise en parallèle des sections de résistivité  
*Figure 13.* Profils géo-électriques

Les mesures des profils géo-électriques ont montré que le massif rocheux est caractérisé par une résistivité comprise entre 240 et 340  $\Omega\text{m}$ , sur toute la zone D'iminifri. Toutefois, la cartographie des résistivités (Figure 14), montre que celles-ci se présentent dans un couloir étroit d'orientation SW-NE, passant par le Sud-Est de l'arche de façon homogène (Loke & Barker, 1996), de 300 à 340  $\Omega\text{m}$ . Cette résistivité croit de façon très sensible de 340 à plus de 600  $\Omega\text{m}$  au NE, vers l'aval de l'oued, loin du site de l'arche. Sur l'axe-même de l'arche, d'orientation Sud-Nord, la résistivité décroît progressivement du Sud vers le Nord, de 320 à 240  $\Omega\text{m}$ .

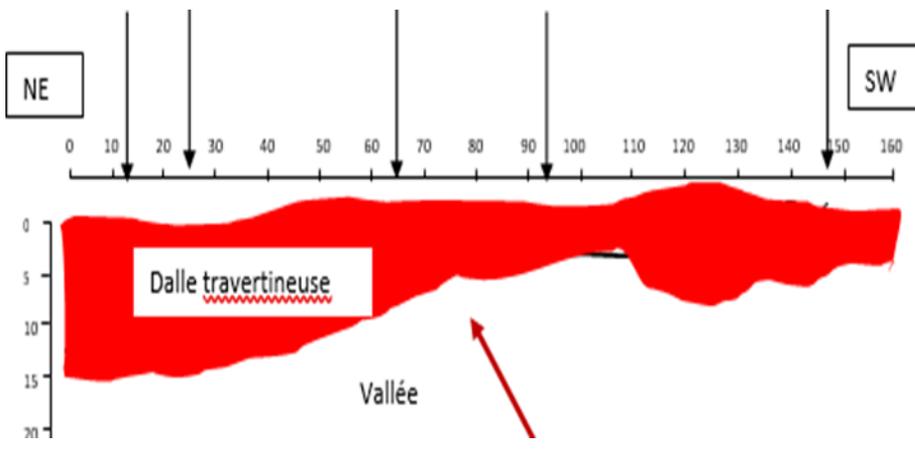


**Figure 14.** Cartographie et modèle 3D de la résistivité autour du site

On peut conclure sur la base de la prospection géo-électrique que :

- L'épaisseur de la dalle Travertineuse varie entre 2 m environ au droit de l'arche et 15 m vers le Nord-Est, au-delà de la route RR 302, dans la limite de la zone prospectée par la méthode géo-électrique (Figure 15).

- Plusieurs anomalies électriquement résistantes, sont présentes sur le site. On peut les attribuer à des poches encaissées dans la masse travertineuse, probablement engendrées par des faciès carbonatés, saturés par les eaux d'infiltration.
- Le sol de fondation serait hétérogène, avec présence de faciès tantôt conducteurs, tantôt résistants, qui s'alterneraient avec des tufs et des calcaires travertineux interstratifiés, probablement altérés. Cette alternance fait selon des épaisseurs variables. Il s'agirait donc de matériaux hétérogènes et composites, renfermant divers constituants de différentes résistivités (Paysage, 2009).



**Figure 15.** Une coupe lithologique NE-SW

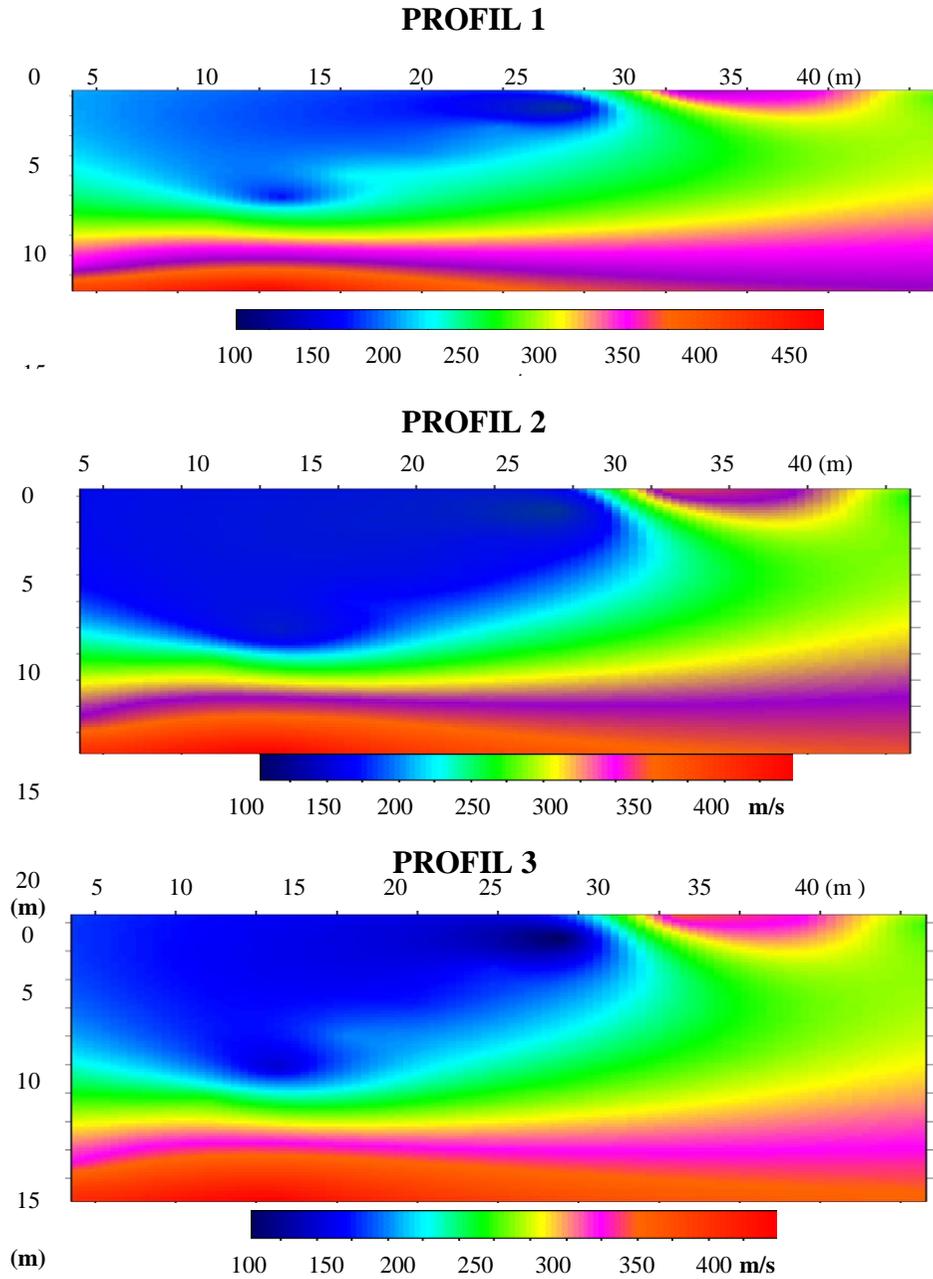
Résultats des mesures de sismique réfraction :

La campagne de de sismique réfraction a concerné trois différents profils (Figure 16). Ils ont été réalisés tant sur la plateforme supérieure de l'arche, que dans la vallée de l'Assif Tidsi.



**Figure 16.** Installation des géophones reliés au sismographe

Les profils sismiques, établis après l'interprétation des mesures, sont comme indiqué sur les graphiques chromatique (figure17) . Les vitesses y sont exprimées en mètres par seconde.



**Figure 14.** Profils sismiques

Le tableau 3 synthétise l'ensemble des résultats des mesures de sismique réfraction. Il fournit également la vitesse globale équivalente de toute la couche superficielle de 13 m d'épaisseur.

**Tableau 3. Récapitulatif des résultats**

PROFIL	Profondeurs (m)	Vitesses (m/s)	Epaisseur (m)	Vitesse Equivalente (m/s) <sup>(*)</sup>
1	0 – 1,25 1,25 – 5,99 5,99 – 13,99 > 13,99	130 229 256 400	1,25 4,74 8,00 -	<b>225,315</b>
2	0 – 0,50 0,50 – 4,88 4,88 – 13,26 > 13,26	129 183 263 390	0,50 4,38 8,38 -	<b>280,381</b>
3	0 – 0,74 8,74 6,32 6,32 – 17,55 > 17,55	182 189 247 452	0,74 5,58 11,23 -	<b>214,400</b>

On déduit de la campagne des profils sismique-réfraction, les grandeurs caractéristiques des roches qui constituent le site d’Iminifri.

❖ **Vitesse  $V_p$  Retenue**

L’empreinte des véhicules formant les convois routiers normalisés, est limitée. Elle varie de 0,25 m ( $B_c$ ) à 1,00 m ( $M_c$  120). Le bulbe des contraintes résultant de leur circulation, ne pénètre pas dans le sol de plus de 2m, sauf cas exceptionnel (convoi E). Considérant ce qui précède, il convient de retenir sur une base sécuritaire, la vitesse  $V_p$  de la couche superficielle, dont la valeur minimale varie entre 130 et 183 m/s. Nous avons pris pour les calculs de stabilité, relativement à la moyenne des minima  $V_m$ , la vitesse  $V_p$  suivante :

$$\text{équation N°1 : } V_p = V_m/1,10 = 150 \text{ m/s}^2$$

❖ **Grandeurs Dérivées**

- Vitesses  $V_s$  des ondes de cisaillement

Le rapport de la vitesse  $V_p$  des ondes de compression à la vitesse  $V_s$  des ondes de cisaillement, est un coefficient  $\alpha$  qui dépend du coefficient  $\nu$  de Poisson. Sachant que ce coefficient est généralement compris entre 0,3 et 0,38 pour les roches calcaires, nous avons retenu pour les roches du site d’Iminifri, à ce stade de l’étude,  $\nu = 1/3$ . Pour cette valeur de  $\nu$ , le rapport des vitesses

$$V_p/V_s \text{ est } \alpha = 2. \text{ Soit } V_s = V_p/2 = 75 \text{ m/s. : } \text{équation N°2}$$

- Module de déformation instantané  $E_i$

L’expression exacte du module de déformation instantané, fait intervenir la densité  $\rho$  de la roche, son coefficient de Poisson  $\nu$  et la vitesse  $V_p$  de propagation des ondes de compression. Tous calculs faits sur la base de

$\rho = 19,6 \text{ kN/m}^3, \nu = 1/3$  et  $V_p = 150 \text{ m/s}$ , on obtient la valeur de  $E_i = 25,841 \text{ MPa}$ .

- **Module de déformation statique  $E_s$**

Le module de déformation statique  $E_s$  est obtenu à partir du module de déformation instantané  $E_i$ , en fonction du coefficient de fluage à long terme de la roche calcaire. Tous calculs faits le coefficient obtenu est  $E_i/E_s = 2,461$ . Ainsi  $E_s = 10,50 \text{ MPa}$ .

- **Fréquence propre  $f_0$  de l'arche d'Iminifri**

La fréquence propre de vibration d'une épaisseur  $H$  d'un massif rocheux, est liée à la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$  par la relation  $f = V_s/4H$ . On obtient ainsi les fréquences suivantes autour de l'arche.

Face	Position	Fréquence $f_0$ (Hz)
SW (Amont)	Appuis	0,740
	Clé	6,602
N (Aval)	Appuis	0,464
	Clé	0,768

Le travertin repose sur un massif de calcaire dolomitique appartenant au Jurassique inférieur (Secondaire). Ce massif se présente en bancs dont le pendage est incliné vers le cours d'Assif Tislit. Le lit que ce dernier a creusé dans le calcaire dolomitique, a provoqué en raison du pendage défavorable de ce dernier, la chute de nombreux blocs rocheux qui jonchent le lit de l'oued, là où ce massif affleure.

## Conclusion

Les deux phénomènes vibratoires qui sollicitent l'arche sont les séismes d'une part et des tirs de mine dans trois carrières à 11 km environ au Sud de l'arche. Le phénomène hydraulique revêt deux aspects : les précipitations pluvieuses d'une part et les infiltrations qui proviennent de la séguia, par l'irrigation des terres agricole d'autre part (Cayla & Duval-Massaloux, 2013). Les pluies ont une action érosive sur le travertin par percussion et par ruissellement. Les infiltrations lentes et continues en provenance de la séguia ont une action régénératrice du travertin, selon la réaction chimique de précipitation du  $\text{CaCO}_3$ . De ce point de vue elles ont un effet réparateur naturel de l'érosion du travertin. L'arche peut être considérée actuellement stable, sous l'effet du trafic routier. Donc toutes les études effectuées sur le pont, il est raisonnable de dire que la structure d'Iminifri évolue plus ou moins rapidement vers sa destruction. Ce qui nous pousse à chercher des solutions pour sauver ce patrimoine géologique du risque d'effondrement.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

### References:

1. Aïtomar, T., Taïbi, A. N., Hannani, M. El, Khalki, Y. El, Aïtomar, T., Taïbi, A. N., Hannani, M. El, El, Y., & Nouvelle, K. (2020). *Nouvelle méthodologie d' inventaire et d' évaluation des géomorphosites dans le contexte du géoparc M' goun ( Maroc ) To cite this version : HAL Id : hal-02515903.*
2. Al-Fares, W., Bakalowicz, M., Albouy, Y., Vouillamoz, J.-M., Dukhan, M., Toe, G., & Guérin, R. (2001). Contribution de la géophysique à l' étude d' un aquifère karstique - Exemple : le site karstique du Lamalou. *3ème Colloque GEOFCAN, 25-26 Septembre 2001, Orléans, 25–26.*
3. Beaudet, G. (1971). Le Quaternaire marocain : état des études. *Revue de Géographie Du Maroc, 20*, 3–56.
4. Bouchaou, L., Chauve, P., Mudry, J., Mania, J., & Hsissou, Y. (1997). Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride: Cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). *Journal of African Earth Sciences, 25*(2), 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(97\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00100-0).
5. Cayla, N., & Duval-Massaloux, M. (2013). Le géotourisme : patrimoines, pratiques, acteurs et perspectives marocaines. *Collection EDYTEM. Cahiers de Géographie, 14*(1), 101–116. <https://doi.org/10.3406/edyte.2013.1228>.
6. Deceuster, J., & Kaufmann, O. (2007). *Application des tomographies en résistivité électrique 3D à la reconnaissance de zones karstifiées , Belgique.* Actes du 4ème colloque GEOFCAN, Paris, France, 137-142.
7. Duponcheel, M.A., Georgeon A. Ragot C. (2009). Diagnostic et Perspectives Pont naturel d' Iminifri. Institut National d'Horticulture et de Paysage. Rapport inédit, Ingénierie des Territoires. 94 p.
8. Frödin J. (1922). Géographie Physique de l'Ouest du Maroc. *Geografiska Annaler, Vol. 4* pp. 58-76. Wiley on behalf of Swedish Society for Anthropology and Geography eds. Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/519735>.
9. El Khammari, K., Najine, A., Jaffal, M., Aïfa, T., Himi, M., Vásquez, D., Casas, A., & Andrieux, P. (2007). Imagerie combinée

- géoélectrique–radar géologique des cavités souterraines de la ville de Zaouit Ech Cheikh (Maroc). *Comptes Rendus Geoscience*, 339(7), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.06.001>.
10. Elaloui, A., Marrakchi, C., Fekri, A., Maimouni, S., & Aradi, M. (2015). Mise En Place D’Un Modèle Qualitatif Pour La Cartographie Des Zones À Risque D’Érosion Hydrique Dans La Chaîne Atlasique: Cas Du Bassin Versant De La Tessaoute Amont. (Haut Atlas Central, Maroc). *European Scientific Journal*, 11(29), 1857–7881.
  11. Jenny, J. (1988). Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc au 1/100.000 (feuille d’Azilal, Haut Atlas central). Notes et Mem. Serv. géol. Rabat, 339 bis, 104 pp.
  12. Knouz, N., Boudhar, A., Mostafa, E., & Aghzaf, B. (2016). Étude de La Vulnérabilité Des Nappes à La Pollution En Zones Semi-Arides: Cas de La Nappe Phréatique Des Béni Amir Au Maroc. *Journal of Mediterranean Geography. Méditerranée* [Online], Ecosystems, Hydrology, document; 6 : 1-17. Disponible en ligne : <https://journals.openedition.org/mediterranee/7853>.
  13. Landel, P., Senil, N., Mao, P., Sur, E., Poles, L. E. S., Du, D. E., Diagnostic, P., Des, S., & Patrimoniales, R. (2016). *ETUDE SUR LES POLES D ’ ECONOMIE DU PATRIMOINE DIAGNOSTIC STRATEGIQUE DES RESSOURCES PATRIMONIALES DE LA REGION* Pierre-Antoine Landel , Nicolas Senil , Pascal Mao To cite this version : HAL Id : halshs-01387639.
  14. Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
  15. Sadki, D. (1996). Le Haut-Atlas central (Maroc). Stratigraphie et paléontologie du Lias supérieur et du Dogger inférieur –dynamique des bassins et des peuplements. *Doctorat Université de Lyon, France*. 142: 245 p. *Geoly\_0750-6635\_1996\_Mon\_142\_1\_1789*. 3–245.
  16. Zaitouni M., & Ibouh H. (2016). *Apport de la télédétection dans l’évaluation de la variation des surfaces d’eau, du sol et du couvert végétal dans la plaine du Tadla entre 1984 et 2015*. September. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19180.16000>.



13 years ESJ  
*Special edition*

## **Etude de la Vulnérabilité à l'Effondrement des Cavités de l'Ancienne Médina de Béni Mellal, Maroc**

*Amina Wafik*

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

*Amrououssa Benmoussa*

*Abdessamad Najine*

*Rajji Abdelatif*

*Achraf Kharmouch*

*Said Bouhachim*

Département de Géologie, Université Cadi Ayad  
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n40p23](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p23)

Submitted: 07 August 2023

Accepted: 20 October 2023

Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

*Cite As:*

Wafik A., Benmoussa A., Najine A., Abdelatif R., Kharmouch A. & Bouhachim S. (2023). *Etude de la Vulnérabilité à l'Effondrement des Cavités de l'Ancienne Médina de Béni Mellal, Maroc*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 23.

<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p23>

### **Résumé**

Le recensement des cavités dans les zones urbanisées est indispensable pour empêcher la survenue de diverses causes de dommages liés à d'éventuels effondrements. Les cavités constituent également des cibles privilégiées pour les archéologues, car les vides laissés dans l'oubli sont des foyers potentiels de matériaux dévoilant des usages antérieurs. Ces cavités sont de tailles variées, leur origine est humaine ou non, dans des milieux externes ou sous des structures. Leur dimension, ainsi que les caractéristiques physiques du milieu extérieur dans lequel elles se trouvent, permettent l'utilisation de méthodes géophysiques différentes. Nous avons mis l'accent sur l'utilisation de deux méthodes géophysiques, les sondages électriques, la sismique réfraction et la tomographie par mesures de résistivité électrique, pour localiser et déterminer les cavités situées dans l'ancienne ville de Béni Mellal. Ce travail a pour objectif de procéder à établir une carte de vulnérabilité des cavités à

l'effondrement dans l'ancienne médina de Béni Mellal en appliquant la démarche d'analyse multicritère et la modélisation par éléments finis pour déterminer les poids des paramètres déterminants de la vulnérabilité. En effet la combinaison des résultats ont permis de caractériser les zones les cavités souterraines, correspondants à des cavités ou des karsts. La carte de vulnérabilité aux effondrements de ces cavités permettrait de circonscrire les principaux secteurs menacés, d'appréhender les dégâts, les éviter ou les réduire. Elle pourrait servir comme outil de base pour le traitement des cavités.

---

**Mots clés:** Iminifri, Travertins, Altération, Stabilité, Géophysique

---

## **Study of the Vulnerability to the Collapse of Cavities in the Old Medina of Béni Mellal, Morocco**

*Amina Wafik*

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

*Amrououssa Benmoussa*

*Abdessamad Najine*

*Rajji Abdelatif*

*Achraf Kharmouch*

*Said Bouhachim*

Département de Géologie, Université Cadi Ayad  
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

---

### **Abstract**

The Geological and Geophysical study Inventories of cavities in urbanised areas are essential to prevent the occurrence of various causes of damage linked to possible collapses. Cavities are also prime targets for archaeologists, as forgotten voids are potential sources of materials revealing past uses. These cavities come in all shapes and sizes, and are of human or non-human origin, in external environments or beneath structures. Their size, as well as the physical characteristics of the external environment in which they are found, mean that different geophysical methods can be used. We have focused on the use of two geophysical methods, electrical soundings, seismic refraction and tomography using electrical resistivity measurements, to locate and determine the cavities located in the old town of Béni Mellal. The aim of this work is to draw up a map of the vulnerability of cavities to collapse in the old medina of Béni Mellal by applying the multi-criteria analysis approach and finite element modelling to determine the weights of the parameters determining vulnerability. Indeed, the combined results have made it possible

to characterise the subsurface hazard zones, corresponding to cavities or karsts. The map of vulnerability to collapse of these cavities would make it possible to identify the main areas at risk, to assess the damage, and to avoid or reduce it. It could serve as a basic tool for the treatment of cavities.

---

**Keywords:** Iminifri, Travertines, Weathering, Stability, Geophysics

## **Introduction**

Le concept de " risques naturels " recouvre de nombreux phénomènes physiques différents, notamment tremblements de terre, effondrement des cavités, tsunamis, glissements de terrain, inondations, éruptions volcaniques, tempêtes violentes, tornades, etc. (Aitken, 2019). La présence de cavités dans le souterrain est une source éventuelle de certains dangers du point de vue environnemental, mais également du point de vue industriel et de la construction urbaine (Najine et al., 2006). La présence de vides souterrains se traduit dans quelques cas par la manifestation en surface de plusieurs désordres selon les modes de rupture et la nature du sol en place. Nous allons distinguer essentiellement trois types d'effondrement, à savoir celui localisé de type fontis, l'effondrement localisé par rupture de quelques piliers, et l'effondrement généralisé. Durant ces dernières décennies, la forte pression de l'urbanisme et le retentissement grandissant donné par les médias aux effets dévastateurs des catastrophes naturelles ont fait naître, un peu partout dans le monde, une prise de conscience nouvelle vis-à-vis de ces phénomènes. En effet, les populations n'acceptent plus la fatalité de ces catastrophes et va de pair avec le recours à « l'Etat protecteur » (Lechat, , 1991). Dans l'état actuel des connaissances, et à de très rares exceptions près, on ne sait pas prédire une catastrophe naturelle. Il est par contre possible, et c'est vrai dans le cas des effondrements causés par la présence de cavités souterraines, de déceler et de localiser les principaux secteurs où ces phénomènes ont le plus de chances de survenir. A partir de là, on peut dans le meilleur des cas chercher à les éviter ou à s'en protéger et, dans tous les cas, faire en sorte que leurs effets soient les moins dommageables possibles.

## **Contexte géographique et géologique**

La ville de Beni-Mellal est située au pied du flanc nord du Haut Atlas central sur la route nationale 8 (ex-RP 24), qui relie les villes de Marrakech et Fès, à environ 205 km au nord-est de Marrakech et à environ 210 km au sud-est de Casablanca. La ville de Beni-Mellal est la capitale de la région économique de région Béni Mellal-khénifra et est considérée comme un centre économique régional en raison de sa situation géographique de plaque tournante, de son patrimoine historique et du fait qu'elle est la capitale d'une région riche et irriguée (Barakat et al., 2021). Du fait de sa situation entre le

Haut Atlas et la plaine du Tadla, l'agglomération est caractérisée par une topographie généralement accidentée (altitude moyenne 580 NGM). Elle s'étend au sud jusqu'à la source d'Ain Asserdoune (côte 723 NGM) et s'étire au nord dans la plaine jusqu'à la côte 480 NGM



A l'ancienne Médina de Béni-Mellal, des événements dramatiques d'effondrement d'habitations occasionnant des pertes de vies humaines et de biens ont fait, ces dernières, années la une de l'actualité. D'autres cas moins dramatiques, d'effondrements partiels ou de constructions menaçant ruine, sont relatés ici et là avec une fréquence qui semble s'accroître. L'existence de ces vides souterrains serait sans conséquences si ces exploitations ne se dégradaient pas au fil du temps sous les effets conjugués des eaux pluviales et domestiques et des surcharges importantes appliquées sur leur toit (Najine et al., 2010). Malheureusement, les risques liés à leur présence peuvent apparaître brutalement, sans qu'il ne soit possible d'en prévoir la survenue, ni l'importance (Figure 2).



**Figure 2.** Photos Cas d'effondrements survenus dans l'ancienne Médina de Béni-Mellal (Filahi, 2008)

Il est à noter que selon les indications connues, aucun secteur de la Médina n'est épargné, puisque plusieurs cavités « communiqueraient » entre elles, par un réseau de galeries émaillées et ramifiées. Les limites de ces grottes sont, dans la plupart des cas, indéfinies et ne respectent pas le plan parcellaire du terrain en surface du sol. Ainsi, une cavité « exploitée » par le propriétaire d'un logement donné, occuperait même le plus souvent, plusieurs sous-sols, relevant des propriétés voisines.

Les mesures préventives prises durant les dernières décennies, se sont montrées de portée limitée. En effet, les recensements des constructions vétustes, dont la stabilité est jugée incertaine, établis périodiquement à l'approche de chaque saison hivernale, n'ont pas permis de se prémunir systématiquement des dangers liés aux effondrements des bâtiments. Il n'est pas exclu, parfois, que les bâtiments d'apparence solide s'écroulent par effondrement des toits des cavités, alors que ceux jugés menacés d'effondrement, évacués de leurs habitants, continuent à défier les méfaits de la nature et de l'action humaine (Najine et al, 2006).

L'administration décrète l'évacuation des constructions jugées dangereuses. Cette décision ne devrait pas être un acte facile à prendre. Ce n'est pas un acte administratif anodin. Souvent elle est prise dans une conjoncture où l'émotion prédomine (après un effondrement), sans une expertise rigoureuse faite par des techniciens expérimentés et formés à cette pathologie.

Les anciennes constructions de cette médina ne nécessitent donc pas seulement des travaux d'entretien, de restauration ou de maintenance mais également un traitement approprié des cavités, dont la connaissance avait nécessité une étude géophysique détaillée et précise afin de déterminer leur état et leur véritable envergure : cette étude géophysique était nécessaire et urgente, compte tenu du danger permanent que ces cavités constituaient et du fait qu'elles ne pouvaient éternellement supporter à la fois les charges des

bâtiments et les effets induits par la circulation des véhicules. La cartographie de ces vides constituait également un jalon appréciable pouvant aider à mieux contrôler et orienter les aménagements au sein du périmètre urbain.

Les autorités et les responsables chargés de l'aménagement du territoire étaient conscients de cette problématique. Ils étaient engagés dans une politique ficelée pour mettre fin aux effets engendrés par la présence des cavités, en particulier la protection des biens et des personnes, et tracer les grands axes pour un développement harmonieux et durable du territoire. A cet effet, une convention de coopération scientifique et technique a été signée entre la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal et l'Agence Urbaine de la région Tadla-Azilal. La convention portait sur l'application des méthodes géophysiques pour la détection et la cartographie des cavités encaissées dans les terrains de fondation de l'ancienne Médina. Les résultats de cette étude ont permis de définir les dispositions d'ordre technique, opérationnel et financier susceptibles d'apporter la meilleure réponse possible aux problèmes posés par ces cavités (Najine et Jaffal, 2007).

### **Contexte géologique**

La ville de Béni Mellal fait partie de la zone des collines. Le substratum de cette chaîne de l'Atlas est principalement constitué de matériel maestrichtien et de brèches attribuées par J. Bourcart à l'Eocène supérieur continental (Barakat et al., 2021). La puissance de la série continentale du Beni-Mellal est légèrement supérieure à 100 m. On observe en général une succession de couches rouges, de conglomérats plus ou moins cimentés et de calcaires lacustres généralement roses, parfois travertins (Bouchaou et al., 2014). Ces derniers apparaissent, d'une part, dans la partie inférieure et, d'autre part, dans la partie supérieure de la série.

Les forages exploratoires montrent des calcaires travertins avec un substratum de sable et de grès calcaire. On les trouve en bancs de 2 à 3 mètres d'épaisseur, cimentés au sommet et pulvérulents à la base. Ce sont des sols sursaturés en calcium et avec un pourcentage très élevé de magnésium. Ces calcaires travertins intercalés dans la série détritique sont déposés par les eaux courantes, probablement à proximité de sources lors d'une rupture d'approvisionnement en matériaux grossiers. Ils se présentent sous forme ondulée et sont présents dans presque toutes les cavités.

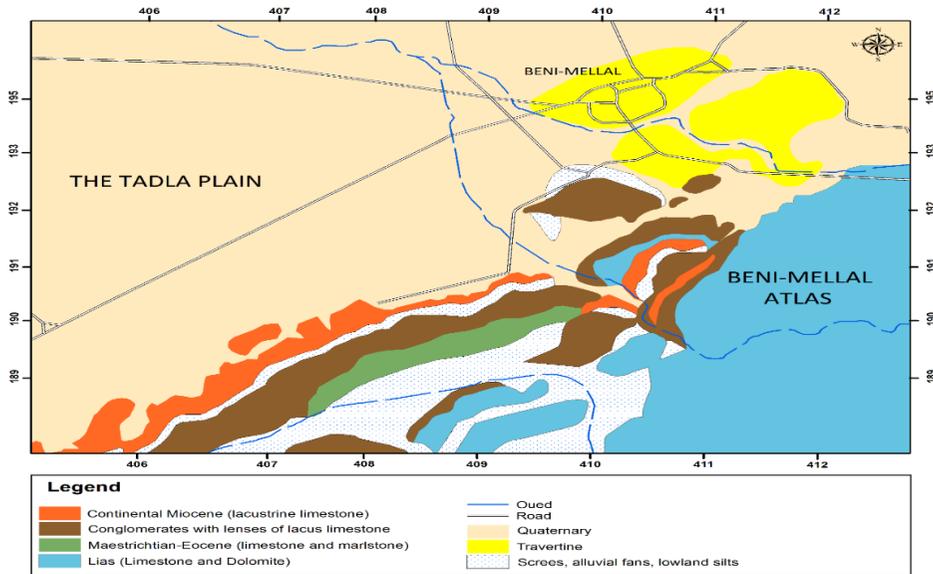


Figure 3 : Carte de géologie de la zone d'étude

## Méthodes et matériel

Le programme d'investigation géophysique élaboré pour le diagnostic du sous-sol de la Médina de Béni Mellal sera mené suivant un planning logique et intégré permettant de couvrir la totalité de la zone à prospector et de recueillir le maximum d'informations géophysiques et structurales.

Lors de la phase initiale de l'étude, la matérialisation de la grille des mesures sera placée très en amont. Elle consistera à implanter une grille de mesures de manière à prospector la totalité de l'aire de l'étude. Le choix de la densité de mesures et du pas d'échantillonnage vont respecter certaines règles de manière à augmenter le pouvoir de résolution, à exploiter le maximum de données et enfin de tenir compte de la réalité de terrain.

Dans ce sens, il est important de signaler que la bonne connaissance du site et de sa géologie, des mesures de qualité et un déploiement couplé et quasi-simultané des techniques choisies permettront un perfectionnement des outils d'investigation.

Les méthodes choisies dans la cadre du présent marché offrent une panoplie de moyens qui permettront de caractériser le contenu du proche sous-sol à partir de mesures en surface d'un champ physique, l'objectif étant de révéler toute cavité susceptible de provoquer des distorsions du signal physique en surface.

- La prospection électrique permettra d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes. C'est une technique qui sert à échantillonner la résistivité le long d'un profil sur une profondeur donnée. Les modèles du sous-

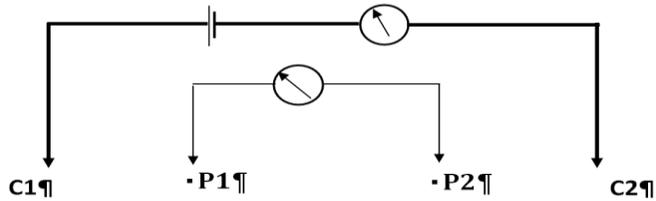
sol montrant la distribution en coupe de la résistivité seront calculées à partir des panneaux en utilisant la méthode d'inversion des données de (Barker et Loke, 1996)

L'analyse fine de ces modèles permettra de se rendre compte des variations importantes de la résistivité intrinsèque correspondant aux différentes sources enfouies résistantes et conductrices par rapport à un encaissant dont le niveau de fond moyen est plus ou moins variable selon l'emplacement des profils de résistivité. On s'intéressera particulièrement aux sources résistantes susceptibles de correspondre à des cavités souterraines vides. Ainsi, sur chaque modèle du sous-sol obtenu par inversion, ces sources résistantes seront délimitées en se basant sur les valeurs de la résistivité intrinsèque des sources, leurs formes et la densité des contours qui les délimitent.

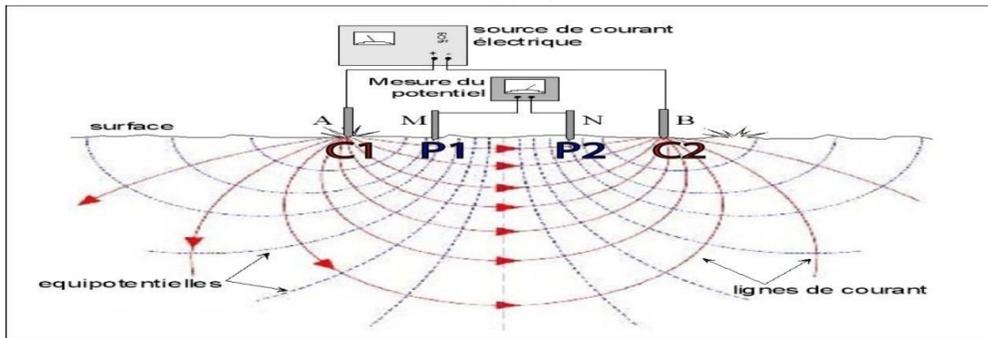
- La sismique réfraction est une méthode bien indiquée lorsqu'il s'agit de localiser des cavités pour des profondeurs allant jusqu'à une quinzaine de mètres. Dans certaines conditions exceptionnelles, ces profondeurs d'investigation peuvent atteindre une quarantaine de mètres. Les résultats se présentent sous la forme d'une dromochronique qui est la représentation du temps de trajet des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Pour l'acquisition de données, on utilisera habituellement un dispositif dans lequel les géophones sont régulièrement espacés le long du profil sondé. Un sismographe, synchronisé avec la source, effectue l'enregistrement simultané des signaux provenant des géophones actifs. Les données géophysiques seront traitées, analysées, puis interprétées par le biais de programmes spéciaux et en tenant compte des informations géologiques disponibles pour chaque site. Des corrélations seront effectuées d'une manière systématique entre les données acquises dans les mêmes sites. Ces corrélations vont permettre de lever certaines indéterminations et d'affiner les modèles du sous-sol.

### **Principe de la méthode de prospection électrique :**

Cette méthode consiste à envoyer dans le sol un courant d'intensité  $I$  au moyen de deux électrodes  $C1$  et  $C2$  et à mesurer la différence de potentiel  $V$  entre deux autres électrodes de réception  $P1$  et  $P2$  (Fig. 10 et 11).



**Figure 4.** Schéma général d'une mesure de résistivité du sol à l'aide d'un dispositif de 4 électrodes



**Figure 5.** Lignes de courant équipotentielles induites par deux électrodes de courant C1 et C2

Au niveau des points P1 et P2, le potentiel s'exprime par les formules suivantes :

$$V_{(P1)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} \right)$$

La différence de p

$$V_{(P2)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_2 C_1} - \frac{1}{R_2 C_2} \right)$$

$$\Delta V_{RR} = V_{(P1)} - V_{(P2)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} - \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right)$$

$$\rho = \frac{2\pi \cdot \Delta V_{R_1 P_2}}{I} \left( \frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} - \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right)^{-1}$$

Lorsque le sol n'est pas homogène, la résistivité mesurée est dite apparente ( $\rho_a$ ) car elle diffère de la résistivité réelle ou intrinsèque du sol. La valeur de résistivité apparente obtenue lors d'une mesure résulte en effet de la contribution de chacune des parcelles infinitésimales de sol traversées par le courant injecté, en fonction de leur résistivité et de leur localisation par rapport aux sources de courant. L'équation peut s'écrire de la façon suivante (Barker et Loke, 1996):

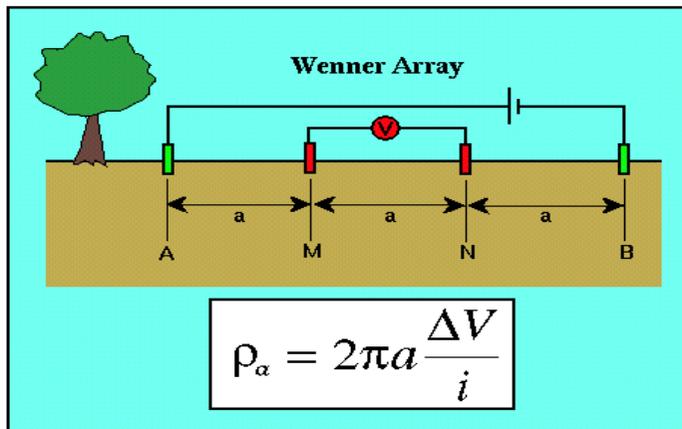
$$\rho_a = k.R = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{avec} \quad k = 2\pi \left( \frac{1}{P_1 C_1} - \frac{1}{P_1 C_2} - \frac{1}{P_2 C_1} + \frac{1}{P_2 C_2} \right)^{-1}$$

Si nous appliquons la loi d'Ohm à l'espace compris entre les deux équipotentiels correspondant aux électrodes C1 et C2, la résistivité Rho ( $\rho$ ) du volume de terrain intéressé par la mesure est définie alors par la relation :

$$\rho = K V/I$$

Le facteur géométrique K dépend du dispositif de mesure utilisé, c'est-à-dire de la disposition relative des électrodes de courant et de potentiel. Dans le cas d'un dispositif Wenner- $\alpha$ , où  $a = C1P1 = P1 P2 = P2C2$ , le facteur géométrique K équivaut à :  $2\pi a$

Pour la configuration Wenner (Fig. 12), la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité.



**Figure 6.** Dispositif Wenner et expression de la résistivité électrique apparente

L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Le dispositif Schlumberger présente l'avantage d'être très pratique sur le terrain lorsqu'on réalise des sondages électriques, on déplace deux électrodes au lieu de quatre.

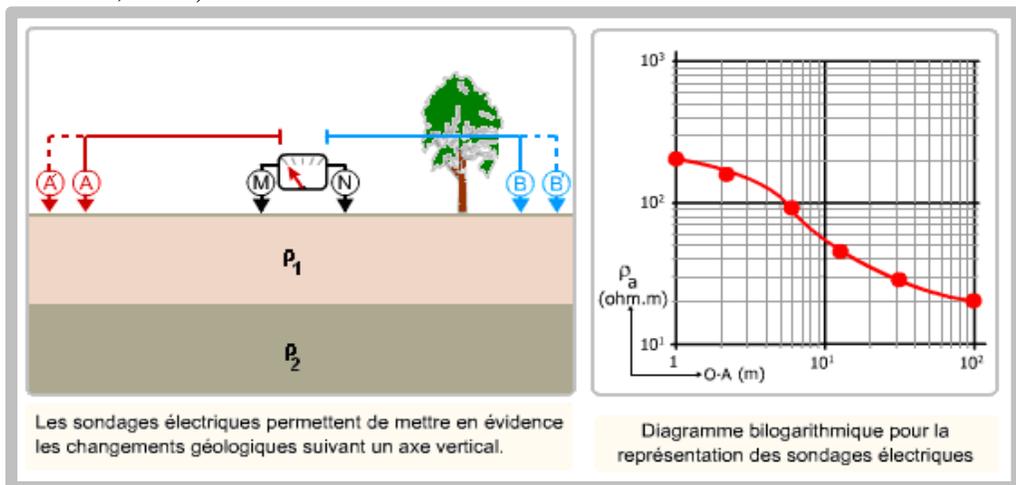
• **Méthode Des Sondages Electriques :**

Dans ce cas, au lieu de déplacer comme la méthode précédente, l'ensemble du quadripôle, le centre de symétrie O du dispositif est maintenu fixe en un même point pendant qu'on augmente progressivement l'envergure de celui-ci en écartant de plus en plus les électrodes C1 et C2 (Fig. 13). Quand on augmente la distance C1C2 (=AB/2) des terrains de plus en plus profonds

interviennent dans la définition de la résistivité. Ceci permet de construire un graphique des variations de la résistivité apparente en fonction  $AB/2$ .

La distance MN est maintenue fixe et aussi petite que possible pendant un certain nombre de mesures, cela allège le travail manuel et évite le nombre des "à-coups de prise". Nous avons vu en effet que les hétérogénéités locales perturbent les mesures bien davantage quand passent à leur aplomb les électrodes MN qu'au passage des pôles AB. Il n'est cependant guère possible pratiquement de faire un sondage complet avec une seule position de MN. En effet pour les très grandes longueurs de ligne, le  $\Delta V$  mesuré serait trop faible. On effectue alors ce que l'on appelle un débrayage.

Ces mesures appelées débrayages, effectuées avec le même AB pour deux MN successifs ont une grande importance, car elles permettent de voir et parfois de corriger les à-coups de prise dus aux changements de MN (Barker et Loke, 1996).



**Figure 7.** Présentation des résultats des sondages électriques sous forme d'un diagramme bilogarithmique

### Principe de la méthode de prospection sismique réfraction :

La sismique réfraction est une méthode bien indiquée lorsqu'il s'agit de localiser des cavités pour des profondeurs allant jusqu'à une quinzaine de mètres. Dans certaines conditions exceptionnelles, ces profondeurs d'investigation peuvent atteindre une quarantaine de mètres. Les résultats se présentent sous la forme d'une dromochronique qui est la représentation du temps de trajet des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Pour l'acquisition de données, on utilise habituellement un dispositif dans lequel les géophones sont régulièrement espacés le long du profil sondé. Un sismographe, synchronisé avec la source, effectue l'enregistrement simultané des signaux provenant des géophones actifs.

Les mesures sismiques seront conduites sur les surfaces couvertes de l'ancienne Médina, en tenant compte des conditions de terrain et en prenant les précautions nécessaires pour minimiser le bruit de surface. Ces données seront corrélées et confrontées systématiquement avec les autres données disponibles notamment celles de la tomographie électrique.

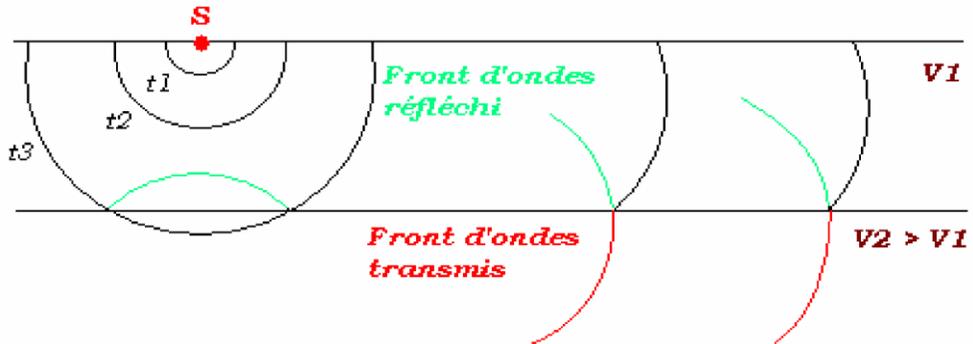


Figure 8. Principe de la méthode sismique réfraction



Figure 9. Materiel géophysique



Figure 10. Les photos de Equipement géophysique déployés dans l'investigation géophysique

## Traitement des données par les logiciels

IPI2WIN est un logiciel de traitement des données conçu pour automatiser et semi automatiser les interprétations des sondages électriques (et/ou) introduire les tableaux issus des données de la polarisation obtenues dans la prospection électrique. Autrement dit, IPI2win est un programme pour une interprétation automatique (en 1D) et manuelle des courbes VES. Son mode d'interprétation est basé sur :

- ◆ La réception des courbes (VES) avec différents tableaux :
- ◆ Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, poteau - pôle.
  - ✓ La modification des paramètres du modèle de différentes manières :
  - ✓ Dans la feuille, sur la section transversale de la résistivité, en déposant la partie de la courbe de la résistivité.
- ◆ L'obtention de la feuille de calcul pour la saisie des données.
- ◆ L'obtention de la courbe d'inversion VES-IP.

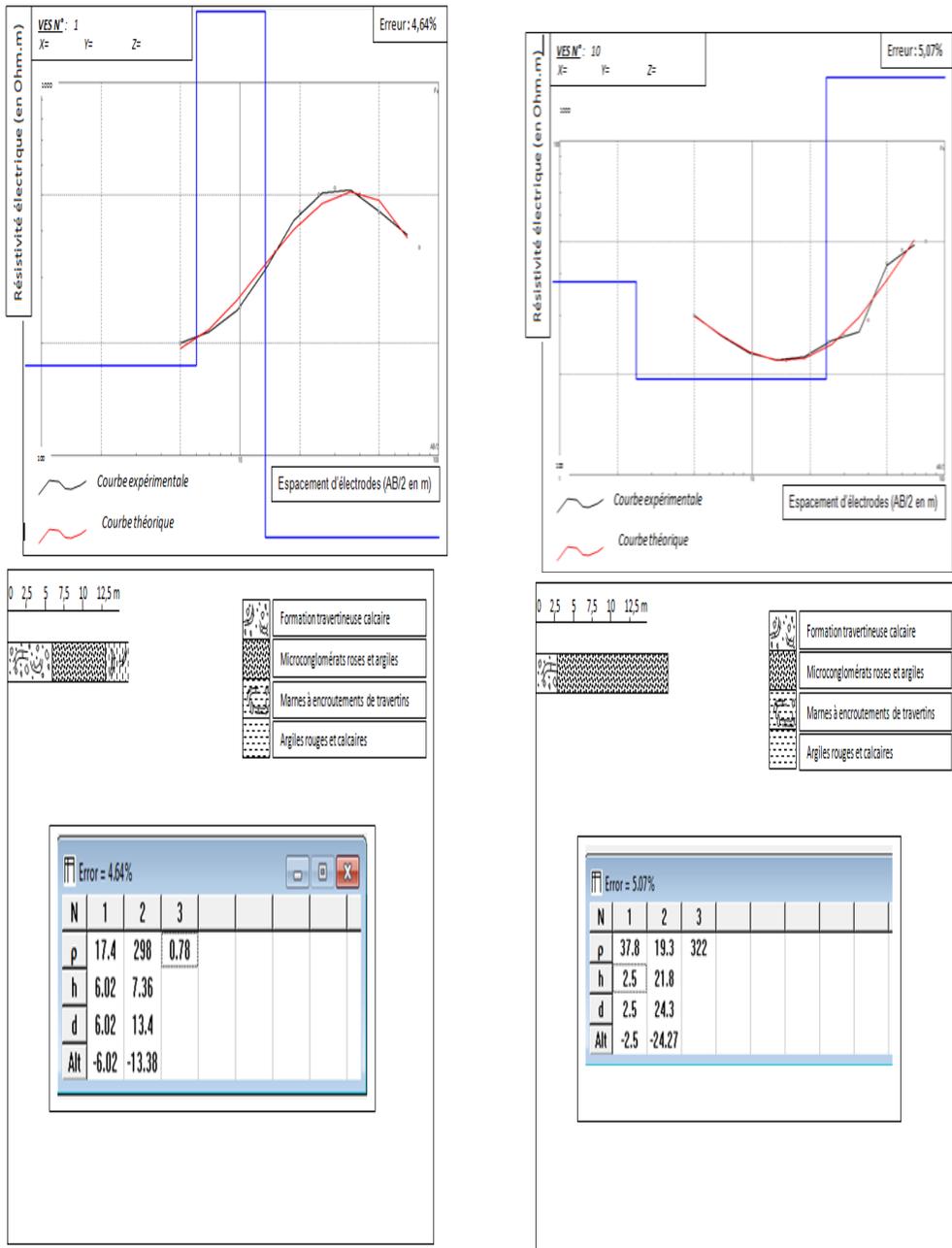
RES2DINV est un programme informatique basé sur Windows, permettant le traitement et la détermination automatique d'un modèle bidimensionnel de résistivité pour le sous-sol à partir des données obtenues des enquêtes de l'imagerie électrique. Ce logiciel d'inversion des données électriques développé par (Barker et Loke, 1996) favorise la modélisation de la distribution des résistivités électriques dans le sous-sol. Autrement dit il permet de visualiser une pseudo-section des jeux de données acquis in situ. Il est possible d'identifier les points dits aberrants, qui sont dus à un rapport signal/bruit trop faible durant la mesure. Ce bruit provient essentiellement d'un défaut de contact, soit entre l'électrode et le câble, soit entre l'électrode et le sol, qu'il faut les éliminer en phase de traitement afin de mieux contraindre les formations de sub-surface et limiter la propagation d'erreur. Avant de lancer le processus d'inversion, il est recommandé de regrouper l'ensemble des mesures dans un même fichier pour permettre une inversion globale. Les modèles obtenus après traitement des données facilitent le repérage des zones souterraines contenant de l'eau pour exploitation.

SURFER n'est pas un logiciel de traitement, mais un outil de tracés de contours et de surfaces en 3 dimensions. Ce dernier convertit les données acquises (X, Y, Z) en cartes et surfaces afin de contrôler toutes les options graphiques et obtenir le résultat recherché. Son utilisation concerne plusieurs domaines : l'hydrologie, l'ingénierie, la géologie, l'archéologie, l'océanographie, la biologie, la géophysique, la médecine, la climatologie, la sylviculture etc.

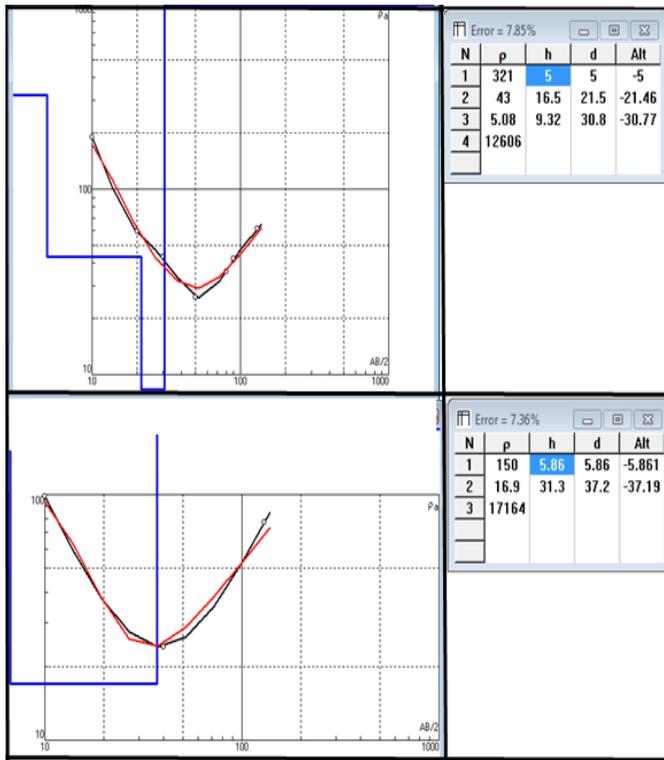
## Résultats et Discussion

Les sondages électriques A partir des résistivités obtenues par le résistivimètre et les distances entre les électrodes AB et MN appliquées sur

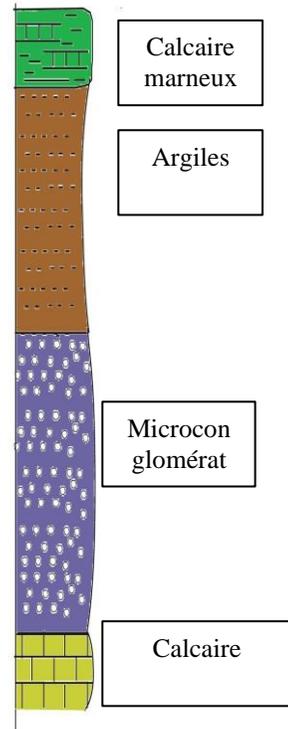
terrain, et leur insertion dans le logiciel IPI2Win. Nous avons obtenu les sondages électriques ( $\rho = f(AB/2)$ ) des dix stations :



**Figure 9.** Diagramme de résistivité apparente en fonction de la profondeur et tableau des caractéristiques correspondant à chaque profil



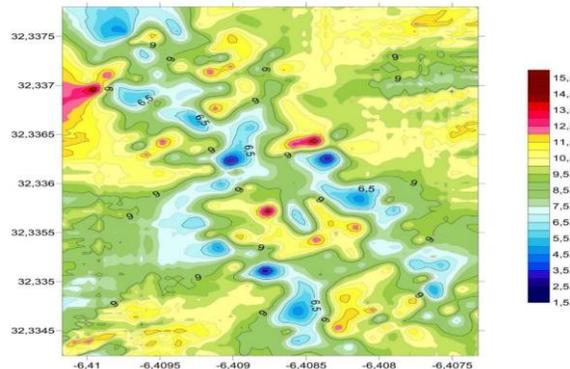
**Figure 10.** Diagramme de résistivité apparente en fonction de la profondeur et tableaux de caractéristiques correspondant à chaque profil (9 en haut et 10 en bas)



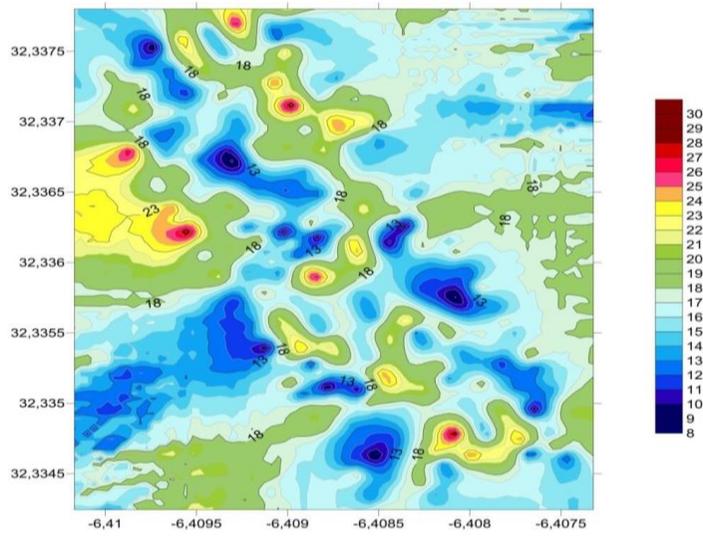
**Figure 11.** Log synthétique des différents sondages électriques

### Sismique refraction:

A partir de l'introduction des données (les coordonnées, le temps d'arrivée de l'onde) dans le logiciel Surfer, nous avons obtenu les cartes ci-dessous :



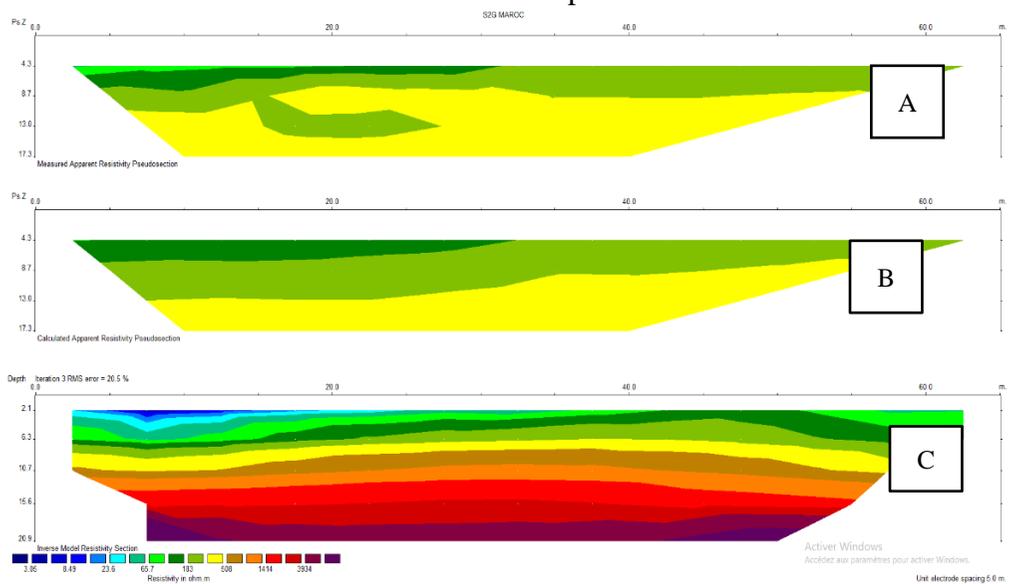
**Figure 12.** Carte de temps du géophone 1



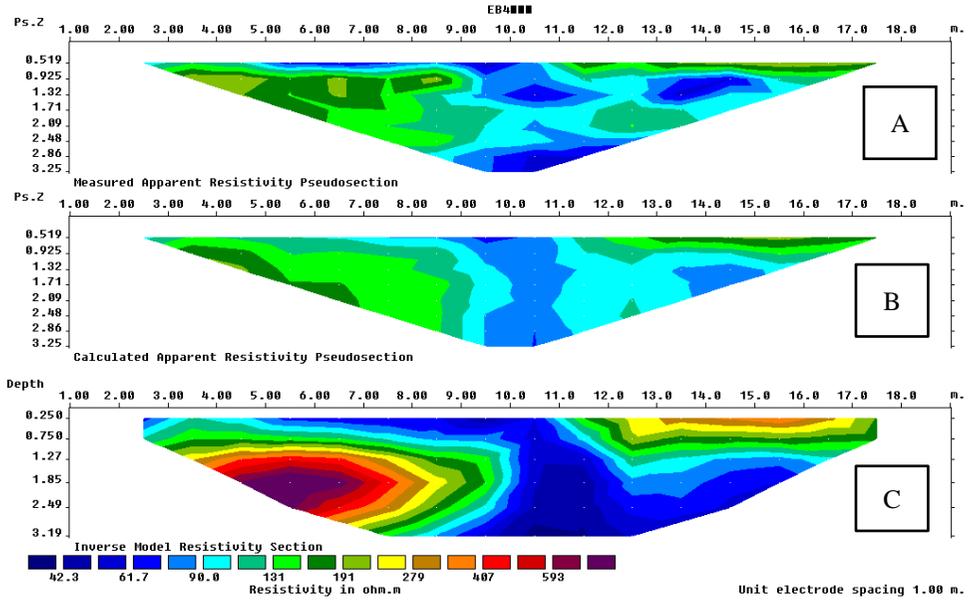
**Figure 13.** Carte de temps du géophone 2

### Le tomographie électrique

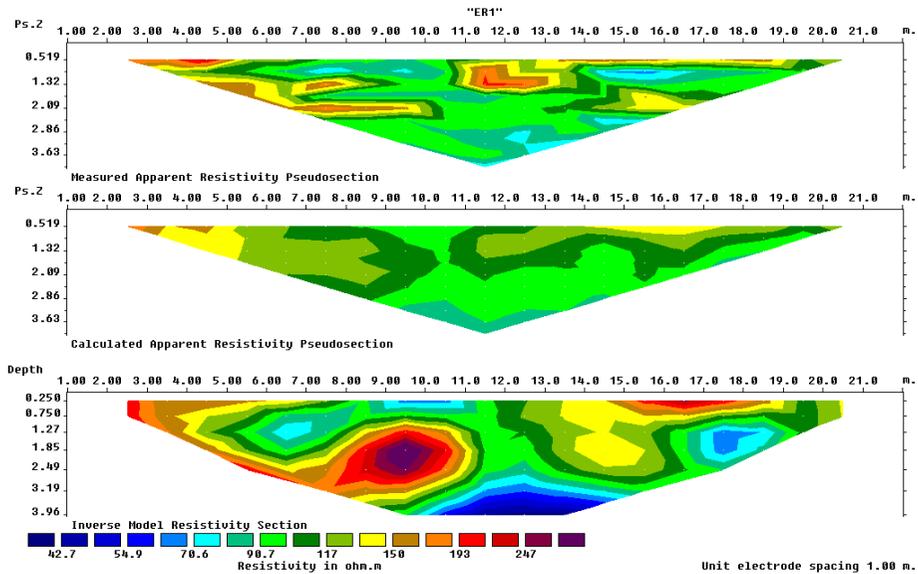
A partir des données recueillies sur terrain (résistivités et distances entre les piquets à chaque mesure) et leur application dans le logiciel Res2dinv32. Nous avons obtenues les trois profils ci-dessous :



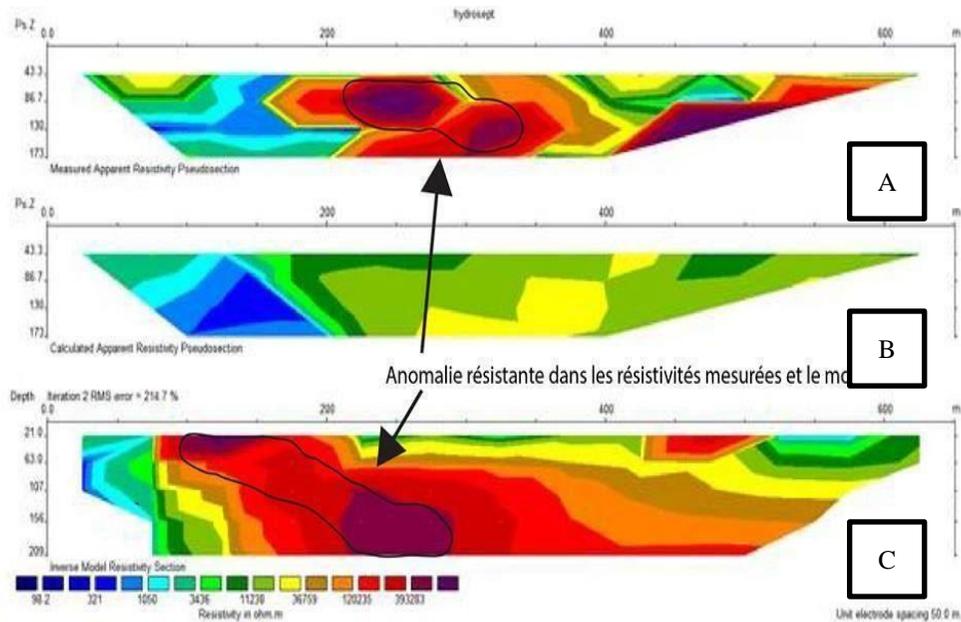
**Figure 14.** Sections de tomographie Est-West, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé.



**Figure. 15 :** Sections de tomographie Sud-Est, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé



**Fig. 16.** Sections de tomographie Sud-West, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé.



**Figure 18.** Sections de tomographie Sud, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé

En revanche le troisième profil permet de distinguer une limite verticale avec des résistivités moyennes à fortes. Chaque profondeur exprime une résistivité de chaque partie de la section Quand c'est bleu c'est conducteur et si rouge c'est résistant. On regarde l'échelle des couleurs en bas des profils. Les profils montrent la présence d'une anomalie très résistante qui pourrait correspondre à une cavité ou un corps résistant.

### **Reconnaissance préliminaire et description des phénomènes et des mécanismes d'instabilité**

Il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic de la structure sans risques de porter atteinte à son intégrité. La première investigation non destructive préliminaire qu'il faut considérer est le diagnostic visuel. C'est une opération in-situ qui permet de répertorier les différents défauts apparents que présente la structure. Les principaux désordres généralement constatés sont les suivants :

- Les fissures avec leur ouverture et leur longueur ;
- Les fractures avec leur ouverture, décalage ou rejet ;
- L'écrasement ou le bombement des façades ;
- Les zones d'altération superficielles et profondes ;
- Les zones humides ainsi que les zones de mousses ou de végétation ;
- Les zones de faïençage ;

- Les éclats de matériaux en formation ou profonds ;
- La dégradation des pierres de construction ;
- La présence d'aciers apparents dans les éléments en béton...

Cette première étape permet de définir la gravité des désordres mais aussi de classer les différents éléments à traiter selon leur priorité. L'ensemble des informations collectées par les différentes techniques d'investigation, ont été intégrées dans une base de données spéciale. Cette opération a nécessité des traitements informatiques permettant de mieux dépouiller et exploiter l'ensemble des données. L'interprétation finale s'est traduite par la réalisation d'une série de cartes de synthèse, associées à une base de données et d'informations géoréférencées (Figure 19 et 20). Ces cartes sont l'expression synthétique et informative des différentes données acquises sur l'ensemble du site.

Selon les résultats obtenus, aucun secteur de la Médina de Béni-Mellal n'est épargné, avec des concentrations parfois impressionnantes et des dimensions variables. Au total, on estime à environ 250 le nombre de cavités souterraines dans les terrains de fondation de cette médina (Najine et Jaffal, 2007). Plus d'une quinzaine d'entre elles a fait l'objet de visites et les autres ne sont connues que par la description issue de l'enquête et par l'interprétation des données géophysiques.

Certaines cavités sont totalement inoffensives alors que d'autres présentent un danger potentiel avec des risques d'affaissements, de fontis ou d'effondrements souvent spectaculaires et dangereux pour les vies comme pour les biens. Les écroulements survenus ces dernières années dans plusieurs endroits de l'ancienne Médina peu de temps après les périodes pluvieuses, nous rappellent que le danger est bien présent et qu'il engendre des coûts et des conséquences socio-économiques considérables.

Il convient également de signaler que ces cavités font partie du patrimoine de la Médina. Elles ne constituent pas seulement des nuisances passées, actuelles et potentielles. Après avoir été recensées, elles méritent d'être aménagées ou réaménagées, puis utilisées à des fins individuelles ou collectives. La valorisation de certaines d'entre elles, au titre d'anciennes exploitations de matériaux de construction peut être envisagée, du point de vue de leur valeur historique et muséographique et pourquoi pas, paradoxalement, d'un point de vue touristique !



**Figure 19.** Photo prise à l'intérieur d'une cavité à gauche ; photo d'une Huilerie abritée dans une cavité

Cependant, et malgré l'amélioration des techniques de reconnaissance et de diagnostic, la complexité des travaux souterrains et les difficultés liées à l'environnement du site laissent encore subsister de fortes incertitudes ou contraintes pour les « décideurs », non seulement techniques (qualité du diagnostic, évaluation des vides, opérabilité de la méthode, etc.), mais aussi administratives et financières. Ces contraintes peuvent rendre délicate la prise de décision nécessaire à une prévention du risque véritablement adaptée aux enjeux (Ikezouhene, 2017).

En effet, indépendamment des dispositions de sauvegarde à prendre en cas de péril imminent, lorsque l'existence d'un risque potentiel latent est avérée, le problème essentiel est celui de la prévention. Le choix de la méthode de mise en sécurité repose alors sur une alternative fondamentale à caractère technique et économique : **traiter, surveiller ou déplacer les enjeux.**

### **Maîtrise du risque**

La solution des « constructions à risque » dans l'ancienne Médina de Béni-Mellal ne peut être ni miraculeuse, ni spectaculaire. L'inadéquation ou plutôt le gouffre entre l'ampleur du phénomène et les moyens financiers de la commune oblige à rechercher des solutions pragmatiques, imaginatives, consensuelles et enfin, adaptées aux populations de la Médina sans oublier l'efficacité et la rationalité nécessaire pour circonscrire les effets engendrés par la présence des vides souterrains sous les habitations.

Dans l'objectif de maîtriser l'aléa des menaces gravitaires et évaluer leur risque, il faut suivre une politique de traitement qui se base d'abord sur la localisation et la reconnaissance des cavités souterraines existantes, et ensuite de diagnostiquer leur stabilité pour évaluer cet aléa et ses potentiels risques en surface, notamment sur la population et les biens exposés (Ikezouhene, 2017).

Ce processus diffère selon notre connaissance de la cavité souterraine, sa localisation et même son accessibilité. L'effondrement d'une ancienne construction dans une ancienne médina est un phénomène dangereux déclenché aléatoirement, et risque des enjeux et des pertes humaines, matérielles, infrastructurelles, environnementales et culturelles. L'analyse du phénomène est basée sur les diverses observations historiques, couplées aux

reconnaisances et auscultations permettant le diagnostic de l'état du cadre bâti dans son environnement. Il est préconisé en particulier d'identifier la présence d'une cavité souterraine au droit de la construction menacée, de caractériser son origine, sa taille et ses dimensions moyennant des études géotechniques et géophysiques (Kharmouch et al., 2020). Il est préconisé également de caractériser l'édifice (vétusté, caractéristiques physicomécaniques des matériaux le constituant), de déceler les pathologies reflétant sa vulnérabilité, et d'identifier les facteurs aggravants pouvant favoriser le déclenchement de l'aléa (circulation des poids lourds et vibrations dues au trafic, déversement des eaux usées dans les cavités et manque de raccordement aux réseaux d'assainissement).

Dans le cadre de cette étude, une matrice d'évaluation du risque lié aux instabilités gravitaires a été prédéfinie à partir de l'identification des enjeux et de l'analyse de la vulnérabilité de chacun parmi eux :

**Tableau 2.** Échelle d'analyse des impacts.

IMPACT RELATIF	Impact humain	Impact matériel	Impact culturel / environnemental
Très important (5)	> 10 morts > 50 blessés graves	> 10 MDH	Très sérieux
Important (4)	≤ 10 morts ≤ 50 blessés graves	≤ 10 MDH	Sérieux
Moyen (3)	≤ 5 morts ≤ 10 blessés graves	≤ 5 MDH	Moyen
Léger (2)	1 mort ≤ 5 blessés graves	≤ 1 MDH	Mineur
Faible (1)	0 mort 0 blessé grave/léger	≤ 0,2 MDH	Faible

**Tableau 3.** Critères de vulnérabilité et échelle de probabilité d'occurrence de l'aléa

Facteur déclenchant	Probabilité faible (I)	Probabilité moyenne (II)	Probabilité élevée (III)	Probabilité très élevée (IV)
Vétusté	Construction moderne	Construction moderne / ancienne	Ancienne construction	Ancienne construction
Cavité souterraine	Aucune cavité souterraine	Cavité souterraine de petite taille	Cavité souterraine grande taille	Cavité souterraine de grande taille
Signes pathologiques	Pas de signe d'instabilité gravitaire	Signes faibles d'instabilité gravitaire	Signes d'instabilité gravitaire	Signes d'instabilité évolutifs
Facteurs aggravants	Aucun facteur aggravant	Aucun facteur aggravant	Aucun facteur aggravant	- Trafic automobile et poids lourds - Déversement des eaux usées dans les cavités souterraines

**Tableau 4.** Matrice d'évaluation du risque

Impact relatif	(5)							Très élevé
	(4)							Élevé
	(3)							Moyen
	(2)							Faible
	(1)							
		(I)	(II)	(III)	(IV)			
		Probabilité d'occurrence de l'aléa						

Les critères relatifs à l'état du bâtiment (tableau 2-4), ont permis d'établir cette carte de stabilité des bâtiments (Figure 20) (Rajji et al., 2022), en corrélation avec la carte des cavités établie à partir des données géophysiques (Figure 21), nous ont permis d'établir une carte préliminaire de vulnérabilité des cavités à l'effondrement (Figure 22).



**Figure 20.** Cartes de classification de la vulnérabilité relative aux critères état de bâtiment.

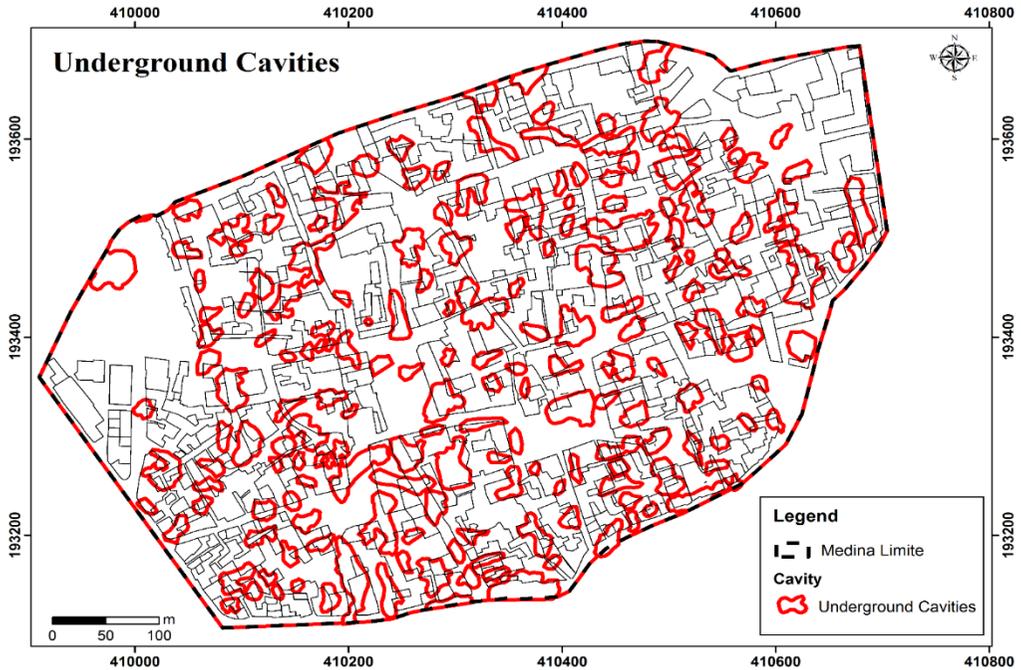


Figure 21. Carte de cavités selon les investigations géophysiques

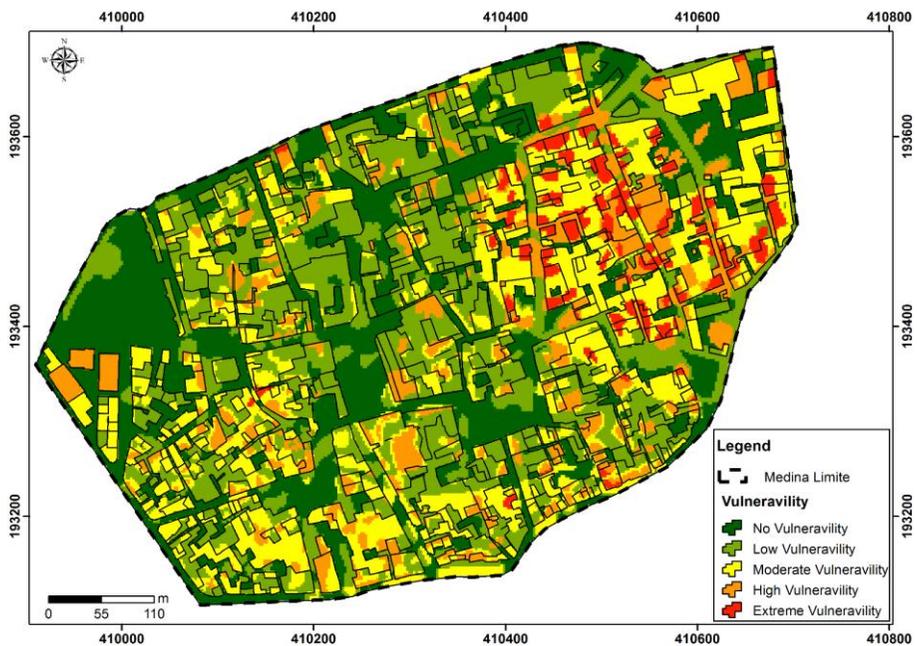


Figure 22. Carte thématique montrant les zones les plus vulnérables aux effondrements

## Conclusion

D'après les résultats obtenus des méthodes utilisées, nous avons pu tirer les points suivants : La méthode électrique a favorisé l'identification du nombre de couches et leur lithologie à travers les valeurs de la résistivité et l'estimation de leurs épaisseurs. La méthode sismique (de réfraction) a permis de donner les temps d'arrivées des ondes servant à accorder une vitesse de propagation à ces ondes afin de déterminer la nature des terrains profonds. La tomographie électrique a servi pour attribuer une image récapitulative (échographie du sous-sol) sur les endroits où l'eau est présente à travers les résultats des résistivités apparentes. Finalement, les interprétations des résultats de chaque méthode ont favorisé la localisation des formations contenant de l'eau correspondant à des cavités et ou karsts contenant de l'eau (Finigue, 2017). Ces dernières correspondent généralement aux milieux poreux de la région. Dès lors, en croisant les diverses données récoltées relatives à l'évaluation des enjeux et leurs vulnérabilités, il serait possible de caractériser les méfaits et les impacts potentiels d'un éventuel effondrement gravitaire, et d'estimer par conséquent l'impact du phénomène à l'échelle préétablie des risques. L'évaluation du risque lié au phénomène étudié va permettre de se décider sur le niveau d'intervention à adopter. Il est préconisé à cet égard de programmer des études techniques complémentaires à l'amont de chaque intervention, démarrant d'un diagnostic pour définir les solutions possibles, pour produire une étude d'exécution arrêtant les modes opératoires pour l'intervention de traitement ou réhabilitation, sauf en cas d'une intervention d'urgence ou une intervention directe sur un site de travaux déjà entamés. En effet et dans certains cas, des constructions menacées, présentent des dangers et signes nécessitant d'intervenir en urgence pour appréhender l'évolution des instabilités et des dégradations, voire l'effondrement imminent de l'édifice. Dans ce cas il est préconisé de mener des études conjointement avec l'intervention pour maîtriser le risque, avant d'entamer les opérations de restauration ou réhabilitation. Ceci corrobore avec les travaux antérieurs (Rajji et al., 2022)

**Conflit d'intérêts:** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données:** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article

**Déclaration de financement:** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

## References:

1. Aitken, A. E. (2019). Natural Hazards: Explanation and Integration, Second Edition by Burrell E. Montz, Graham A. Tobin, and Ronald R. Hagelman III, ed., The Guilford Press, New York, 2017, 445 pp., paper \$78.00 (ISBN 978-1462529179). *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 63(3), 25–26. <https://doi.org/10.1111/cag.12566>
2. Barakat, A., Khellouk, R., et Touhami, F. (2021). Detection of urban LULC changes and its effect on soil organic carbon stocks: A case study of Béni Mellal City (Morocco). *Journal of Sedimentary Environments*, 6(2), 287–299. <https://doi.org/10.1007/s43217-020-00047-y>
3. Barker, R. D., et Loke, M. H. (1996). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44(3), 499–523.
4. Bouchaou, L., Chauve, P., Mania, J., Michelot, J. M. J. L., et Michelt, J. M. J. L. (2014). Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride : cas de l ' Atlas de Béni Mellal ( Maroc ) Contribution of artificial and natural tracers to the knowledge of flow and recharge in. 8, 43–55.
5. Filahi, M. (2008). Contribution des méthodes géophysiques, en particulier du RADAR géologique, à la cartographie des cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal-MAROC. 1–204.
6. Finigue, A. (2017). Les ressources en eau dans le dir de l'atlas de Béni Mellal: problèmes de gestion et développement local. 140. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01708289%0Ahttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01708289/document>
7. Kharmouch A., Najine, A., et Wafik, A. (2020). Geological And Geotechnical Characterization Of The Beni Moussa Perimeter In The Tadla Plain(Morocco). *European Scientific Journal ESJ*, 16(27), 204–216. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p204>
8. Lechat, M.F., 1991: «The international decade for natural disaster reduction: Background and objectives», *Disasters* , vol. 14.
9. Najine A. et Jaffal, M. (2007). *Reconnaissance des vides souterrains en milieu urbain par les techniques géophysiques – cas de l ' ancienne Médina de Béni-Mellal ( Maroc )*. *First Scientific Meeting on Geophysics - April 24th and 25th , 2007. January 2018*.
10. Najine A., Jaffal M., Aïfa T., Filahi M., et Arioua A. (2006). Reconnaissance de cavités souterraines par tomographie électrique et radar géologique dans le centre ville de Béni-Mellal (Maroc). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. 260. 83–89.

11. Najine A., Filahi M., Jaffal M., et Bahi L. (2010). Cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal, origine, typologie, caractérisation et techniques de restauration. NADIR PRINT Beni Mellal. ISBN / 2010:978-9954-30-090-9. 260. 83–89, 173p.
12. Rajji, A., Najine, A., Wafik, A., et Benmoussa, A. (2022). Building height estimation from high resolution satellite images. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 35(2), 268–281. <http://www.ijias.issr-journals.org/>
13. Ikezouhene, Y., (2017). Analyse numérique discrète de l'aléa fontis et du foisonnement associés aux cavités souterraines (2001). *Ph-D Université Paris-Est unpublished*. 252 p.



13 years ESJ  
*Special edition*

## **Nouvelle Approche d'Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines : Cas de la Nappe Mio-Plio- Quaternaire du Bassin du Tadla (Maroc)**

***Amroumoussa Benmoussa***

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,  
Université, Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco

***Amina Wafik***

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

***Najine Abdsamad***

***Sahar Khrmouch***

Département de Géologie, Université Cadi Ayad,  
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n40p49](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p49)

Submitted: 20 June 2022  
Accepted: 18 May 2023  
Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)  
Under Creative Commons BY-NC-ND  
4.0 OPEN ACCESS

*Cite As:*

Benmoussa A., Wafik A., Abdsamad N. & Khrmouch S. (2023). *Nouvelle Approche d'Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines : Cas de la Nappe Mio-Plio-Quaternaire du Bassin du Tadla (Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 49.  
<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p49>

### **Résumé**

Les méthodes de protection des eaux souterraines, basées sur les cartes de vulnérabilité des nappes à la pollution, permettent de caractériser une zone selon son aptitude à l'auto-protection. Il s'agit en effet, dans ces études, d'aménager le territoire en tenant compte des risques susceptibles de menacer les aquifères directement exposés aux problèmes de pollution et d'apporter des corrections dans les zones déjà contaminées. L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du bassin Tadla a été basée principalement sur l'analyse intégrale des paramètres intrinsèques agissant directement sur la propagation d'un polluant et préconisés par la méthode DRASTIC. Cependant, le caractère peu précis et ambigu de la définition de certains paramètres a été la source principale des problèmes fréquemment observés

lors de l'application de cette méthode. Partant de ce constat, un point de vue plus physique du concept de vulnérabilité est proposé, basé sur l'examen de la capacité d'atténuation intrinsèque d'un polluant. Cette propriété reflète les mécanismes et processus d'auto-épuration des eaux souterraines et dépend principalement de la perméabilité hydraulique et la nature des matériaux aquifères. Les notations et les poids accordés aux différents facteurs ont permis d'établir une cartographie de la vulnérabilité de la nappe phréatique dégageant plusieurs zones classées suivant le degré de vulnérabilité et de sensibilité à la pollution, alors cette étude a permis d'obtenir trois classes de vulnérabilité identique avec la méthode utilisée : une classe de vulnérabilité faible, une classe de vulnérabilité moyenne et une classe de vulnérabilité élevée.

---

**Mots-clés** : Eaux souterraines, Pollution, Vulnérabilité, Sensibilité, Capacité d'atténuation intrinsèque, Cartographie

---

## **New Approach for Studying Vulnerability to Groundwater Pollution: Case of the Mio-Plio-Quaternary Aquifer of the Tadla Basin (Morocco)**

*Amroumoussa Benmoussa*

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,  
Université, Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco

*Amina Wafik*

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

*Najine Abdsamad*

*Sahar Khrmouch*

Département de Géologie, Université Cadi Ayad,  
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

---

### **Abstract**

Groundwater protection methods, based on maps of the vulnerability of aquifers to pollution, make it possible to characterize an area according to its aptitude for self-protection. The aim of these studies is to develop the territory taking into account the risks likely to threaten the aquifers directly exposed to pollution problems and to make corrections in the already contaminated areas. The assessment of the vulnerability to pollution of the groundwater in the Tadla basin was based mainly on the integral analysis of

the intrinsic parameters acting directly on the propagation of a pollutant and recommended by the DRASTIC method. However, the imprecise and ambiguous nature of the definition of certain parameters was the main source of the problems frequently observed when applying this method. Based on this observation, a more physical view of the vulnerability concept is proposed, based on the examination of the intrinsic attenuation capacity of a pollutant. This property reflects the self-purification mechanisms and processes of groundwater and depends mainly on the hydraulic permeability and the nature of the aquifer materials. The ratings and weights given to the various factors have made it possible to draw up a vulnerability map of the water table, which shows several zones classified according to the degree of vulnerability and sensitivity to pollution. then this study made it possible to obtain three identical vulnerability classes with the method used: a low vulnerability class, a medium vulnerability class and a high vulnerability class.

---

**Keywords:** Groundwater, Pollution, Vulnerability, Sensitivity, Intrinsic attenuation capacity, Mapping

## Introduction

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines permet d'identifier les zones à haut risque de contamination indépendamment du type de polluant. Elle devrait en principe conditionner les plans d'occupation des sols, ou du moins permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protection devraient être adoptées (Denny et al., 2007). La mise en œuvre de ces cartes constitue un outil d'aide efficace pour l'aménagement du territoire. Elles permettent d'intervenir en amont et d'instaurer des moyens préventifs contre tout risque de dégradation des ressources en eau. Enfin, les cartes de vulnérabilité contribuent avec d'autres variables territoriales et environnementales à une analyse intégrale permettant la délimitation des périmètres de protection (SINAN, 2000). De telles cartes peuvent être élaborées grâce à la méthode DRASTIC, développée en 1987 aux Etats-Unis par la NWWA (Natural Water Well Association). C'est une méthode standardisée d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant et qui prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines : la profondeur de l'eau, la recharge efficace, les matériaux de l'aquifère, le type de sol, la topographie, l'impact de la zone non saturée et la perméabilité de l'aquifère (Aller et al., 1987). Ces facteurs concernent trois compartiments définis selon un schéma en strates. Dans la partie inférieure se situe l'aquifère proprement dit (zone saturée) qui est séparé de la couche supérieure (sol) par une interface (zone non saturée)

assurant à des degrés différents la protection de la ressource contre d'éventuelles introductions des polluants et leur propagation dans l'aquifère.

L'évaluation des différents paramètres considérés par les méthodes DRASTIC, GOD et SI à titre exemple nécessitent les données multi-sources et leur bonne connaissance. Il s'agit des données géologiques, hydrogéologiques, pédologiques, d'occupation de l'espace, de la topographie.

D'une manière général La méthode DRASTIC a fait l'objet, cette tendance à la vulnérabilité faible est suivie par celle de vulnérabilité forte. Il est donc souhaitable de contrôler les zones et les sources de pollution et de faire le suivi des paramètres de pollution, afin de caractériser la sensibilité de l'aquifère car cette vulnérabilité peut évoluer par les effets conjugués de l'homme et des années pluviales.

L'application de la méthode DRASTIC au contexte géologique particulier de la plaine du Tadla présente des difficultés à cause du caractère peu précis et ambigu de la définition de certains paramètres. En effet, dans de nombreux endroits de la zone d'étude, il est difficile de déterminer exactement la nature du faciès des tranches saturée et non saturée et ceci pour les raisons suivantes :

1. Absence d'affleurements géologiques (plaine agricole cultivée dans sa quasi-totalité) ;
2. Rareté et répartition irrégulière des forages mécaniques (densité = 0,0125 par km<sup>2</sup>)
3. Caractère hétérogène du système aquifère : il s'agit de terrains alluvionnaires très hétérogènes présentant d'innombrables variations de faciès latérales et verticales dont le détail est encore loin d'être connu. Ainsi, il est difficile de déterminer en chaque endroit de la plaine, la nature lithologique des terrains géologiques constituant les différents compartiments du sous-sol et d'affecter par conséquent des notes exactes pour chaque maille.

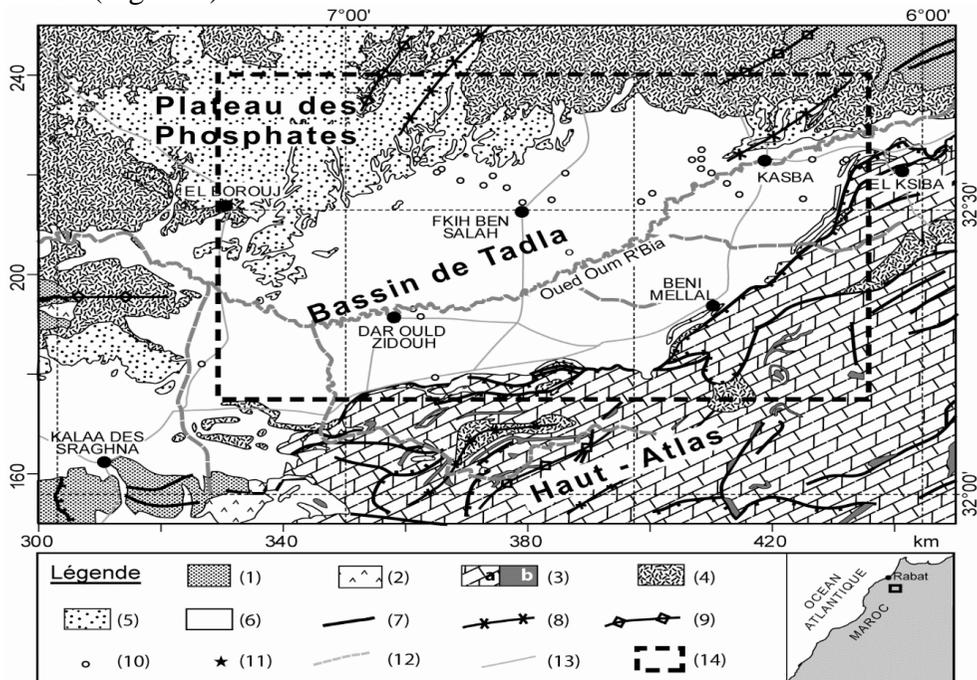
D'un autre côté, Les valeurs de la perméabilité hydraulique ont été obtenues par des essais de pompage sur une quarantaine de forages dispersés dans la plaine. Les estimations sont difficiles en raison de la forte variabilité spatiale et de l'impossibilité d'obtenir des données pour tout le territoire, laissant de vastes zones sans information. Les pondérations sont sujettes à des variations importantes et ne permettent pas d'établir des différences concrètes.

Partant de ce constat, une modification de la méthode DRASTIC est proposée dans cet article en faisant remplacer la perméabilité hydraulique et la nature de la zone non saturée par un nouveau paramètre : la Capacité d'Atténuation Intrinsèque. Cette propriété reflète les mécanismes et processus d'auto-épuration des eaux souterraines et permet de différencier les zones facilitant le transfert du polluant.

## 2- Présentation de la zone d'Etude

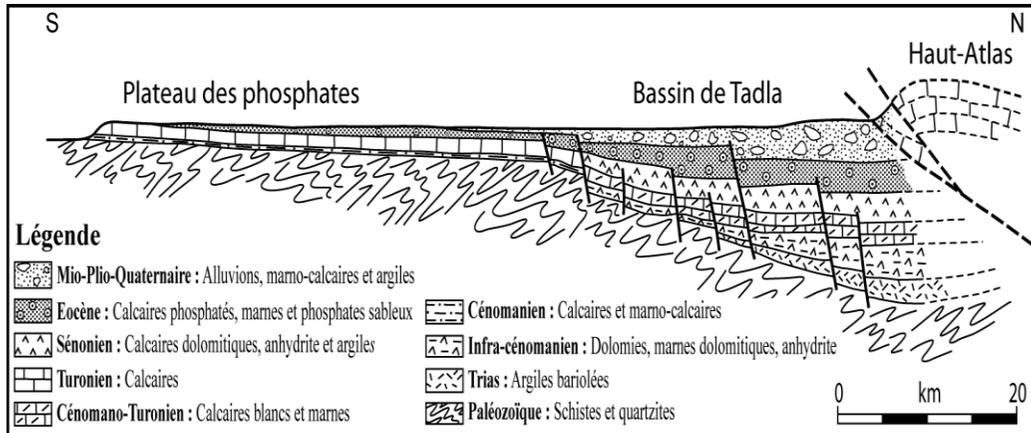
### 2.1. Cadre géographique et géologique

La plaine du Tadla couvre une superficie de 3600 km<sup>2</sup> environ, elle s'étend au Nord de la chaîne du Haut Atlas à 180 km au Sud-Ouest de Casablanca. Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates. Vers l'Est la plaine se rétrécit le long de l'Oum-er-Rbia en direction des reliefs accusés des pays Zayan. Enfin à l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite. La longueur de la plaine ainsi définie atteint environ 125 km tandis que sa largeur maximum au centre est de 50 km environ (Figure 1).



**Figure 1.** Carte géologique du bassin de Tadla. (1) Paléozoïque (schistes et quartzites). (2) Trias (argiles rouges et basalte). (3) Jurassique (a, calcaires et dolomies, b, diorite et gabbro). (4) Crétacé (faciès détritique rouge). (5) Tertiaire (calcaires, marnes et sables phosphatés). (6) Quaternaire (alluvions). (7) Faille. (8) Axe synclinal. (9) Axe anticlinal. (10) Forage. (11) Ville. (12) Rivière. (13) Route.

Géologiquement, le Tadla se présente comme une vaste dépression asymétrique recouverte de dépôts mio-plio-quaternaires hétérogènes. Il s'agit d'un synclinal dont l'axe est situé près de sa bordure sud ou sous l'Atlas et dans lequel se sont déposées de puissantes séries allant du Trias au Quaternaire (Figure 2).

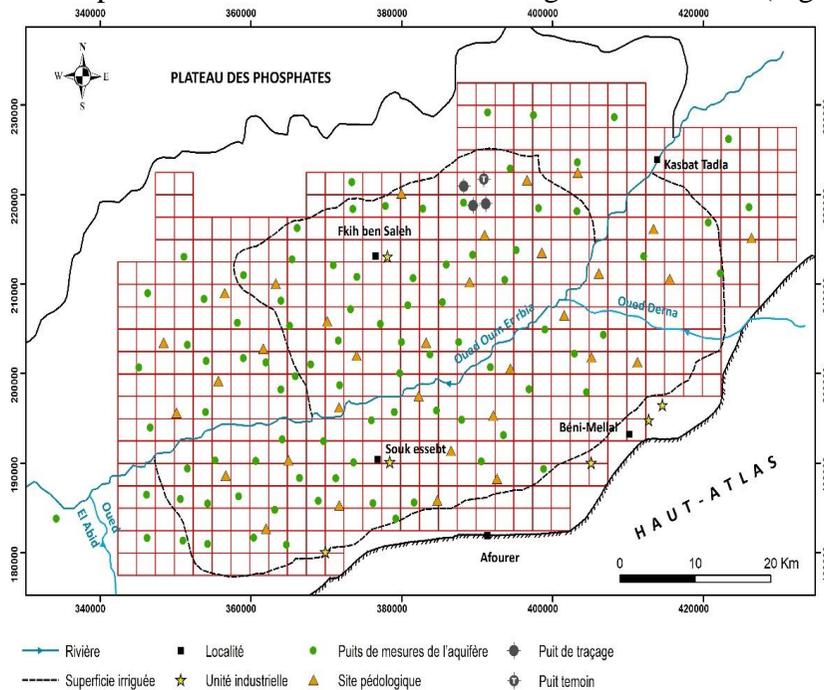


**Figure 2.** Coupe géologique montrant la structure du système aquifère du bassin de Tadla

La région étudiée se présente comme un vaste plateau stratiforme recouvert de dépôts mio-plio-quaternaires hétérogènes reposant sur un socle paléozoïque. Il s'agit d'une série géologique dans laquelle se sont déposées de puissantes séries allant au Trias au Quaternaire (Radouani et al., 2013).

- ◆ **Trias** : formé d'une série argilo-gréseuse, basaltique ou argilo-salifère ;
- **Infra-Lias** : argilo-dolomitique, devenant sub-récifal dans l'Atlas. Il se biseaute rapidement pour disparaître au Nord de Bou-Ghazi ;
- **Infra-cénomaniens** : silicoclastique à argiles rouges et grès gris avec quelques intercalations de calcaires clairs. Il est parfois mal distingué du Trias à cause de son faciès et sa datation sommairement le Crétacé inférieur ;
- **Cénomaniens transgressifs** : équivalent aux autres formations du Crétacé supérieur discordant sur les plates-formes. Il s'agit principalement de laminites argilo-carbonatées, parfois légèrement évaporitiques (sulfates) ;
- **Cénomano-turonien marin** : calcaire, à faune marine franche de plate-forme interne à moyenne, et parfois dolomitisé. Il se distingue alors au sommet du plateau par des bancs métriques très massifs ou caverneux ;
- **Sénonien lagunaire ou évaporitique** : fortement développé dans les zones à forte subsidence où il constitue une formation écran entre les aquifères. A l'affleurement, le Sénonien est argilo-calcaire ;
- **Sénonien marin** : assez puissant vers le sillon atlasique ; il est formé de biocalcarénites ; en amont, il se traduit dans le Sénonien indifférencié par des intercalations plus calcaires et plus riches en faunes qui donnent à la formation ses propriétés aquifères ;
- **Eocène** : on y distingue, au dessus d'un écran composé de marnes bitumineuses phosphatées du Maestrichtien, des dépôts alternants à débris phosphatés, lits calcaires et lits plus fins, se chargent en silex vers le haut ;
- **Mio-Plio-Quaternaire** : c'est par excellence le niveau où circulent, les nappes phréatiques de la plaine du Tadla. Le Miocène, plus ou moins conglomératique, impliqués dans la phase de déformation atlasique, n'est individualisé que dans la partie basse du sillon ou au contact de l'Atlas dans la partie épaisse du prisme sédimentaire. Ailleurs, on parle surtout de Plio-Quaternaire dans lequel les faciès fluvio-lacustre du Villafranchien prennent une grande place, notamment près de l'Oum-er-Rbia. A proximité de l'Atlas, les grandes épaisseurs de dépôts sont partiellement dues à de grands cônes de piémont formés de produits de démantèlement de la chaîne.

La plaine du Tadla est caractérisée par des précipitations irrégulières et des variations saisonnières extrêmes de température. Cependant, elle est devenue une zone agricole fertile grâce à l'installation d'un réseau d'irrigation et l'aménagement de dizaines de milliers d'hectares. Cette transformation a permis à la région de contribuer activement à la production nationale dans différents secteurs. Malheureusement, la qualité de l'eau de surface et souterraine, en particulier celle de la nappe mio-plio-quadernaire, se dégrade en raison de l'utilisation accrue des ressources en eau (salinité supérieure à 1,7 g/l) et de l'intensification de l'agriculture, ce qui génère une pollution diffuse et ponctuelle provenant d'activités humaines et agro-industrielles.(Figure 3).



**Figure 3.** Carte schématique du bassin du Tadla et maillage de l'aquifère mio-plio-quadernaire

Cette situation risque à terme de mettre en cause la durabilité de l'activité agricole dans son ensemble, porte atteinte à la santé publique et vient compromettre le pouvoir d'auto-épuration des ressources en eau.

## 2-2. Données topographiques

La topographie est généralement régulière sauf dans une bande étroite de part et d'autre des lits encaissés des principaux oueds (Oum-er-Rbia, Oued El Abid...) et dans la zone de piémont de l'Atlas où apparaît une série de grands cônes de déjection. La pente est dans l'ensemble douce et régulière (1°/°) orientée globalement NE-SW. L'altitude moyenne est de l'ordre de 400

m. Cette topographie limite le ruissellement, favorise l'infiltration et confère ainsi à la nappe une forte vulnérabilité. Un modèle numérique de terrain (MNT) a été élaboré pour l'ensemble de la plaine et a permis de dresser une carte de pentes topographiques pour traiter la cartographie de la vulnérabilité.

### **2-3. Etude pédologique**

Le fonctionnement épuratoire des sols dépend de plusieurs mécanismes, y compris les propriétés physiques, hydrodynamiques, physico-chimiques, biologiques, ainsi que du rôle des plantes et des micro-organismes qui y sont associés. La migration des polluants dans le sol est déterminée par les interactions physico-chimiques entre ses différentes phases, notamment l'adsorption, l'échange d'ions et les réactions physico-biochimiques (dénitrification, oxydo-réduction...) (Boizard et al., 2004). Dans le Tadla, des recherches ont été menées pour établir une classification des sols en fonction des facteurs liés à l'irrigation, tels que la topographie, les caractéristiques hydrauliques et les possibilités de drainage, dans le but de mettre en valeur les terres irriguées et de déterminer les aménagements fonciers nécessaires.

L'étude des sols dans la région du Tadla a permis d'établir une carte de texture montrant que la majorité des sols ont une texture équilibrée, seules les textures extrêmes étant considérées comme des critères de discrimination. Trois types de textures ont été retenus : sableuse, limoneuse et argileuse. Une carte de l'épaisseur du sol permet également de distinguer trois catégories : catégories (Hinde Cherkaoui Dekkaki, 2007) : sol peu épais (0-40 cm), sol moyennement épais (40-60 cm) et sol très épais (>60 cm)

L'identification des différents faciès pédologiques et leur profondeur a permis d'évaluer le degré de vulnérabilité lié au sol. Les principaux sols rencontrés dans la région du Tadla se caractérisent par des sols iso-humiques, des sols calcimagnésiques, des sols à sesquioxydes de fer, des sols hydromorphes, des sols peu évolués et complexes de sols.

### **2-4. Etude hydrogéologique**

Cette partie a commencé par l'identification et la caractérisation des différentes unités géomorphologiques et faciès de la plaine. Elle comprend également une étude régionale du style structural, de la stratigraphie des formations aquifères (terrains sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire (Bouchaou et al., 1997), ainsi que des dépôts fluvio-lacustres qui les recouvrent (sédiments quaternaires). Des cartes géologiques synthétiques et des coupes à différentes échelles ont été établies. Ces données constituent un support important qui permettra de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la nappe mio-plio-quaternaire.

L'essentiel de l'étude hydrogéologique s'est déroulée en quatre étapes principales :

- la compilation des données disponibles ;
- l'acquisition de données complémentaires sur le terrain ;
- l'intégration et l'analyse des données ;
- l'élaboration des cartes hydrogéologiques.

La nappe libre étudiée plio-quadernaire formé essentiellement de couches calcaires et marno-calcaire alterné par des couches d'argile. L'alimentation est assurée par :

- Les eaux d'irrigation : c'est l'alimentation principale de la nappe, elle s'agit du volume emmagasiné dans la nappe par le fait du retour des eaux d'irrigation provenant du barrage de Bine El Ouidane responsable de la remontée des niveaux piézométriques ;
- Les eaux de pluie : les infiltrations pluviales étant du second ordre pour la recharge de la nappe, ceci est confirmé par les remontées décamétriques de la nappe observées après la mise en eau des périmètres irrigués. Leur modulation interannuelle peut être négligée par ce qu'elle n'a que peu d'effets sur les fluctuations piézométriques ; cela montre que les précipitations ne participent que de façon marginale à la recharge des nappes phréatiques sauf en années fortement humides.

Il existe des hypothèses qui ne sont pas encore confirmées et qui prouvent que la nappe peut être alimentée par drainance ascendante à partir des nappes profondes.

Les sorties des nappes sont de deux types :

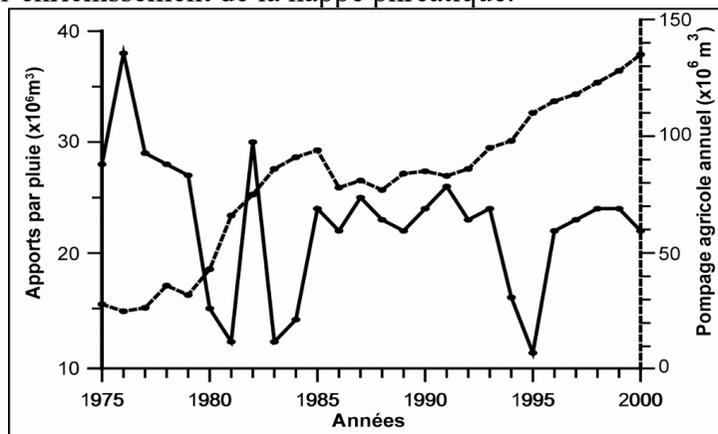
- Sortie naturelle : qui se fait principalement par drainage que se soit par l'Oum-er-Rbia, ou par drainance descendante vers les nappes profondes et secondairement par l'évapotranspiration et l'évaporation qui peut atteindre 2000 mm/an.
- Sortie artificielle : elle se présente sous forme de volume d'eau prélevé par pompage utilisé soit pour l'irrigation agricole ou pour l'eau potable.

De nombreux essais de pompage, sur puits ou forages, permettent de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des nappes phréatiques. En effet, un nombre important d'essais de pompage a été réalisé dès les années soixante-dix. Les transmissivités étaient connues dans plus de 320 points uniquement dans les Béni-Moussa. Les données datant de cette période continuent à être considérées comme une référence de base pour les études hydrogéologiques dans la région.

D'une façon générale, les transmissivités sont généralement comprises entre  $2.10^{-2}$  et  $1,6 10^{-1} m^2 /s$ . La plupart des mesures se situent entre  $10^{-3}$  et  $5.10^{-2} m^2/s$ .

Les valeurs de perméabilité sont calculées à partir des valeurs des transmissivités et des tranches d'eau ou hauteurs crépinées. Elles sont généralement comprises entre  $5.10^{-4}$  et  $10^{-2} m /s$ .

L'alimentation naturelle de la nappe est constituée par les précipitations (moyenne annuelle variant de 329 mm à 450 mm) (Figure 4) et par les apports latéraux à partir des formations ante-quaternaires du plateau des phosphates. La nappe contenue dans le Turonien, en charge sous le Tadla, ainsi que les nappes du Sénonien et de l'Eocène pourraient également contribuer par drainance à l'enrichissement de la nappe phréatique.



**Figure 4.** Evolution des apports de pluie dans le périmètre de Béni-Amir (en millions de  $m^3$ ) et Evolution annuelle du pompage agricole à partir de la nappe de Béni-Amir (en millions de  $m^3$ )

La mise en eau du périmètre du Tadla a fondamentalement modifié l'équilibre de la nappe en zone irriguée à cause des infiltrations des eaux d'irrigation et des pertes dans les canaux en terre. Le niveau de la nappe, qui varie d'ailleurs au cours des années, est remonté à moins de deux mètres du sol sur de grandes étendues (plus de 15000 hectares) en Août 1971. Les valeurs des volumes d'eau distribués annuellement pour l'irrigation sont mesurées à l'origine des canaux secondaires. Ces apports se rattachent à deux catégories :

- Les irrigations traditionnelles à partir des sources atlasiques ou encore à partir des eaux de crues provenant des bassins versants dominant la plaine.- Les irrigations modernes gravitaires à partir des eaux des barrages de Kasba Tadla sur l'Oum-er-Rbia et de Bine El Ouidane sur l'Oued El Abid. Les sorties de la nappe comprennent les exhaures par pompage, le drainage par l'Oum-er-Rbia et par un réseau de drains artificiels. Les prélèvements par pompage sont difficiles à estimer puisque les volumes pompés par les agriculteurs sont pratiquement

incontrôlables. Seul le pompage industriel pour l'Office Chérifien des Phosphates dans la région de Fkih Ben Salah a fourni des données nouvelles sur le comportement de la nappe dans une zone assez étendue et a permis notamment un calcul global du coefficient d'emmagasinement. Un pompage intensif de ce genre a pour effet d'abaisser le niveau piézométrique de la nappe et par voie de conséquence de diminuer l'évaporation et les dangers de remontées subites dues aux précipitations. De plus l'eau pompée par l'Office Chérifien des Phosphates n'est pas recyclée contrairement à celle pompée pour les besoins agricoles, mais est exportée hors de la plaine du Tadla. Le drainage de la nappe du Tadla s'effectue naturellement par l'Oum-er-Rbia qui traverse la plaine et artificiellement par un réseau de drains et collecteurs. En effet, dès l'apparition des zones marécageuses dans les bas fonds de la plaine, des actions d'assainissement ont été entreprises par la mise en place d'un premier réseau principal qui a permis d'abaisser le niveau de la nappe. Ces actions ont été menées en parallèle avec les remontées connues de la nappe. Les mesures des débits de drainage de l'Oum-er-Rbia et des collecteurs se font moyennant les stations de jaugeage. Ces mesures sont effectuées par les soins de la Direction Régionale d'Hydraulique le long de l'Oum-er-Rbia et dans les tronçons en aval des collecteurs principaux depuis 1972.

Dans l'état actuel des connaissances, il est illusoire de prétendre établir un bilan hydrique précis de la nappe phréatique du Tadla. Des données de première importance manquent ou sont trop imprécises : volumes des eaux drainées, volumes des eaux pompées, évaporation, etc. Les valeurs données au (Tableau 1) doivent être considérées comme des ordres de grandeur.

**Tableau 1.** Bilan de la nappe phréatique du Tadla

ENTREES	SORTIES
<p><b>1- Pluie efficace :</b>                      - Surface de la nappe : 3650 Km<sup>2</sup>                      - Stations pluviométriques utilisées : Fkih Ben Salah, Kasba Tadla, Béni-Mellal, Afourer                      - Valeur de l'excédent pluviométrique moyen : 130 mm                      - Répartition ruissellement et infiltration : 50% et 50% (région très plate)                      - Alimentation annuelle moyenne de la nappe du Tadla par la pluie : 6,7 m<sup>3</sup>/s  <b>2- infiltration des eaux d'irrigation :</b>                      - Surface irriguée : 114.000 hectares                      - Moyenne des volumes annuels distribués : 580 millions de m<sup>3</sup>                      - Coefficient d'infiltration : 42%</p>	<p><b>1- Exhaures par pompage :</b>                      - Valeur estimée : 17,5 m<sup>3</sup>/s  <b>2- Drainage gravitaire :</b>                      - Il s'agit de la valeur moyenne mesurée sur l'ensemble du réseau de drainage                      - Valeur calculée : 3,2 m<sup>3</sup>/s  <b>3- Drainage par l'Oum-er-Rbia et évaporation :</b>                      - Valeur estimée : 4,5 m<sup>3</sup>/s</p>

<p>- Valeur calculée : 7,4 m<sup>3</sup>/s                  3- <b>Apports occultes :</b>                  Il s'agit principalement de la drainance à partir des nappes anté-quaternaires                  Valeur estimée : 3 m<sup>3</sup>/s  <b>Total des entrées dans la nappe : 17,1 m<sup>3</sup>/s</b></p>	<p><b>Total des sorties de la nappe : 25,2 m<sup>3</sup>/s</b></p>
---	--

Suite à une analyse comparative entre différents états piézométriques, la carte piézométrique de référence retenue est celle de l'année 1991; le choix de la période où le niveau de la nappe a atteint des côtes élevées permettra de minimiser les risques de vulnérabilité liée à la zone non saturée (Ouedraogo et al., 2016). Sur la base des informations fournies par les différents sondages sur lesquels le niveau piézométrique de référence a été reporté, l'épaisseur de la zone non saturée a été déduite en chaque point, en procédant pour chaque sondage à la différence entre la surface piézométrique et l'altitude du sol. Le taux de recharge de la nappe a été ainsi calculé pour chaque maille au moyen du bilan annuel dans lequel l'infiltration est la seule inconnue en supposant pour un cycle hydrologique les variations du stock négligeables. L'équation s'écrit :

$$\text{Equation (1) : } P + I + L = E + R + I_{\text{eff}}$$

dans laquelle P : hauteur de la pluviométrie annuelle ; I : apports par irrigation ; L : apports latéraux ; E : évapotranspiration réelle et évaporation à partir de la nappe ; R : terme comprenant le ruissellement des eaux de surface et le drainage à partir de la nappe ; I<sub>eff</sub> : infiltration efficace.

D'où  $I_{\text{eff}} = P + I + L - (R + E)$ . Ce coefficient représente l'effet combiné des eaux de pluie et des eaux d'irrigation. Toutefois, la proportion des eaux de l'irrigation et celle de la pluviométrie sont très différentes. Pour cela les coefficients d'infiltration des eaux de pluie et d'irrigation seront déterminés séparément, sur la base des apports bruts, respectivement par les expressions suivantes :  $I_p = a I_{\text{eff}} / P$  et  $I_i = b I_{\text{eff}} / I$  avec  $a = P / (P+I)$  et  $b = I / (P+I)$  où a et b représentent respectivement les proportions de pluie et d'irrigation de l'ensemble des apports).

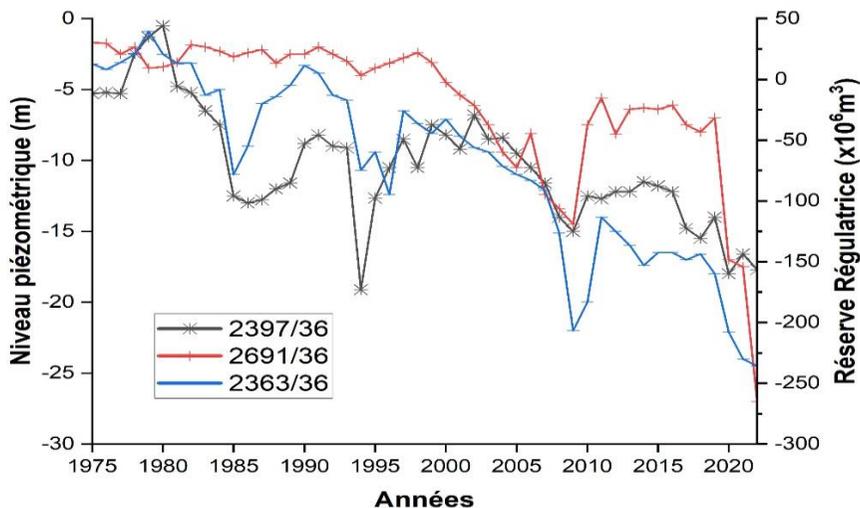
### 3. Historique de la vulnérabilité à la pollution de la Nappe Du Tadla

Avant la mise en eau du périmètre du Tadla en 1936, la nappe phréatique était à une profondeur de 30 à 50 m dans la partie amont et de 25 m dans la partie aval. L'agriculture traditionnelle pratiquée ne polluait pas la plaine, la rendant peu vulnérable à la pollution. Cependant, la mise en eau des premiers secteurs avec des canaux secondaires non cimentés a modifié l'équilibre naturel de la nappe, ce qui a entraîné une remontée régulière du niveau piézométrique d'environ 2 à 3 mètres par an. Cette remontée a transformé certaines zones en marécages. Des analyses physico-chimiques ont

été effectuées sur une centaine d'échantillons d'eaux souterraines prélevées dans différents endroits de la plaine (Hammani et al., 2008) avant la mise en eau, ce qui a confirmé que la nappe était peu vulnérable à la pollution.

L'introduction de l'irrigation a été accompagnée d'une utilisation excessive des intrants agrochimique et des produits phytosanitaire et la mise en place des premières unités industrielles. Ainsi, la quasi-totalité du périmètre irrigué devenait très vulnérable à fortement vulnérable à la pollution notamment les zones touchées par la remontée piézométrique et la bordure atlasique.

Au début des années 1980, l'avènement de la sécheresse a induit un développement relativement important des pompages pour pallier à l'insuffisance des eaux d'irrigation de surface (Figure 4) et la desserte des agglomérations urbaines et rurales en eau potable. L'analyse de l'évolution piézométrique de la nappe depuis 1981 montre un rabattement moyen annuel du niveau d'au moins 1 m, voire de plus de 5 m par endroits (Figure 5).



**Figure 5.** Evolution du niveau piézométrique (en mètres) dans les puits 2363/36, 2691/36 et 2397/36 de la plaine de Tadla et évolution de la réserve régulatrice de la nappe de Béni-Amir (en millions de m<sup>3</sup>)

Cette baisse a été généralisée par la modernisation de la majeure partie des centres de mise en valeur (canaux bétonnés et extension du réseau de drainage). Enfin, l'encouragement des services publics et les facilités de crédits accordés aux projets d'irrigation par pompage ont contribué également d'une manière remarquable au déstockage de la nappe. En 1982, la réserve régulatrice de la nappe des Béni-Amir (rive droite de l'Oum-er-Rbia) a atteint 370.106 m<sup>3</sup>. A partir de cette année-là une diminution du stock de 70.106 m<sup>3</sup>

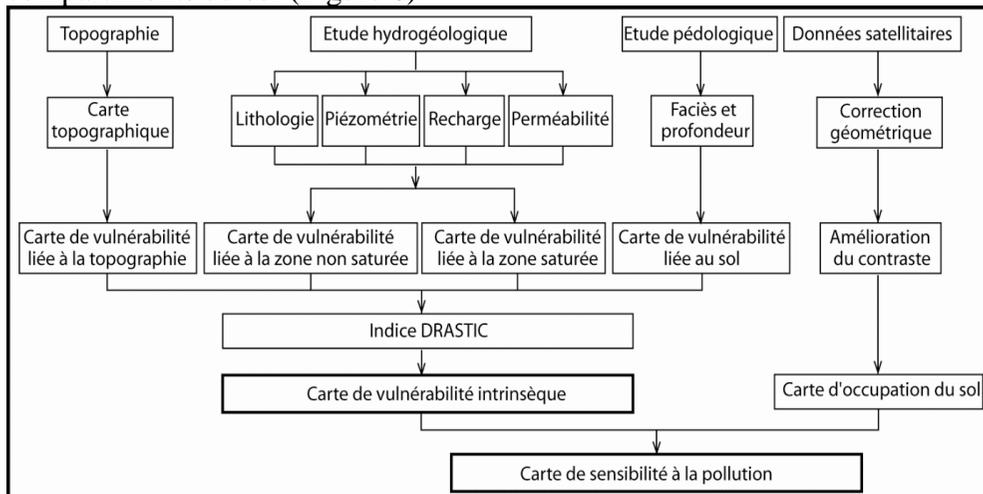
a été observée jusqu'en 1984 où elle atteint 150.106 m<sup>3</sup> (Figure 5). Dès 1986, presque la moitié des collecteurs étaient pratiquement à sec, les autres voyant leur débit chuter considérablement (Latifi & Chaab, 2017). Par conséquent, le degré de vulnérabilité des eaux de la nappe phréatique a diminué d'une manière considérable dans plusieurs zones du périmètre du Tadla. Cependant, les zones de piémont alimentées par les eaux des sources atlasiques et l'aval de la nappe demeurent très vulnérables à la pollution en raison du taux de recharge relativement important.

A partir de 1988, et malgré le retour aux conditions climatiques normales, le rabattement de la nappe s'est poursuivi mais à un rythme faible. Le taux de recharge subit des fluctuations variables mais reste tributaire aux apports d'irrigation. L'analyse de l'évolution intra-annuelle du niveau piézométrique montre qu'il enregistre les valeurs maximales pendant la période estivale (Avril à Septembre).

#### 4- Approche méthodologique

La carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe mio-plio-quaternaire a été élaborée suite à une analyse intégrale des paramètres intrinsèques agissant directement sur la propagation des polluants. Les paramètres les plus pertinents pris en considération pour l'étude de la vulnérabilité intrinsèque sont ceux susceptibles d'exercer une contrainte au transfert vertical et horizontal de la contamination (Hinde Cherkaoui Dekkaki, 2007).

La méthode DRASTIC demeure la plus employée au contexte marocain (Amharref et al., 2007) du fait qu'elle se base sur le traitement et l'analyse d'un grand nombre de facteurs en relation avec les trois compartiments du sol (Figure 6).



**Figure 6.** Organigramme d'élaboration de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines par la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987)

Les périmètres étudiés ont été jugés adéquats pour l'application de la méthode DRASTIC, qui nécessite une superficie de plus de 0,4 km<sup>2</sup> et la propagation de polluants à partir de la surface. Chaque paramètre a été évalué en fonction de son importance pour la protection des eaux souterraines et attribué à un poids correspondant. Ensuite, chaque paramètre a été divisé en classes avec une note correspondante. Les poids et les notes ont été intégrés dans un modèle additif pour calculer un indice global de vulnérabilité, appelé l'indice DRASTIC, noté ID:

$$\text{Equation (2)} : ID = D_p D_n + R_p R_n + A_p A_n + S_p S_n + T_p T_n + I_p I_n + C_p C_n$$

Avec D : Profondeur de la nappe (Depth), R : Recharge, A : Nature des matériaux de l'aquifère, S : Type de sol, T : Topographie, I : Impact de la zone non saturée, C : Conductivité des eaux souterraines, p : poids, n : note

L'indice DRASTIC minimum est de 23 tandis que le maximum est de 226. Ces extrêmes théoriques sont toutefois très rares et les indices calculés sont plutôt dans la gamme 50 à 200 (Denny et al., 2007).

La méthode DRASTIC requiert une importante collecte des données qui servent à la caractérisation des unités hydrogéologiques (Weatherington-Rice et al., 2006). L'évaluation de la vulnérabilité dépend essentiellement de la répartition et de la densité des données de base. Dans ce sens, le recueil de l'information concernant les trois compartiments du sol (sol, zone non saturée et zone saturée) doit couvrir la totalité de la zone d'étude (Latifi & Chaab, 2017).

Toutefois, il paraît évident que le caractère très hétérogène des terrains alluvionnaires de la nappe mio-plio-quaternaire du Tadla rend très difficile l'évaluation de certains paramètres intrinsèques, en particulier la perméabilité hydraulique et la nature des matériaux aquifères. En effet, l'aquifère mio-plio-quaternaire du Tadla est un complexe alluvionnaire présentant d'innombrables variations de faciès latérales et verticales dont le détail est encore loin d'être connu. On y trouve essentiellement des marno-calcaires, des argiles et des calcaires lacustres éparpillés dans la masse alluvionnaire sous forme de lentilles. Cet état confère à cette nappe les caractéristiques d'un système multicouche dont les niveaux aquifères seraient séparés les uns des autres par des horizons plus ou moins imperméables (Hammani et al., 2008). Ces horizons aquifères communiqueraient entre eux soit par drainage, soit à la faveur de variations de faciès. Les valeurs déterminées de la perméabilité hydraulique et de la nature des matériaux aquifères varient brutalement dans de larges intervalles, par conséquent, il devient difficile d'affecter des notes exactes à ces paramètres dans chaque maille. Il en résulte une pondération subjective et variable en fonction du type et de la quantité d'informations disponibles, des erreurs occasionnés sur la prise des données, et de la méthode de détermination des paramètres. Il est possible que la même classe et que le

même coefficient soient attribués à des facteurs qui sont de toute évidence différents.

Partant de ce constat, une modification de la méthode DRASTIC basé sur la capacité d'atténuation intrinsèque du polluant dans la nappe est proposée. Cette propriété physique est conditionnée principalement par la perméabilité hydraulique et la nature des matériaux aquifères, elle est évaluée en se basant sur la comparaison entre la concentration maximale ( $C_0$ ) observée après injection d'une masse donnée d'un traceur non réactif en un point donné de la nappe et la concentration mesurée ( $C_m$ ) en un autre point.

La réduction naturelle de la pollution est représentée par le rapport entre la concentration maximale ( $C_m$ ) au niveau du puit témoin et la concentration initiale au point d'injection ( $C_0$ ) :  $R = C_0 / C_m$

Ce rapport varie entre 0 (correspondant à une disparition complète du polluant) et 1 (pas de diminution de la concentration).

Une campagne de mesure de la capacité d'atténuation intrinsèque a été effectuée conjointement entre la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal et l'Office National de l'Eau Potable en Juin 2002. Une étude de traçage par Chlorure de Sodium a été réalisée dans le bassin du Tadla en utilisant un réseau de 42 puits surveillés et géoréférencés dans le but de déterminer le cheminement des produits polluants et de définir les périmètres de protection des eaux souterraines. Des analyses hydrogéochimiques ont été effectuées de manière systématique pour suivre les processus d'atténuation, qui conduisent à la réduction des concentrations en substances polluantes. (Figure 8).

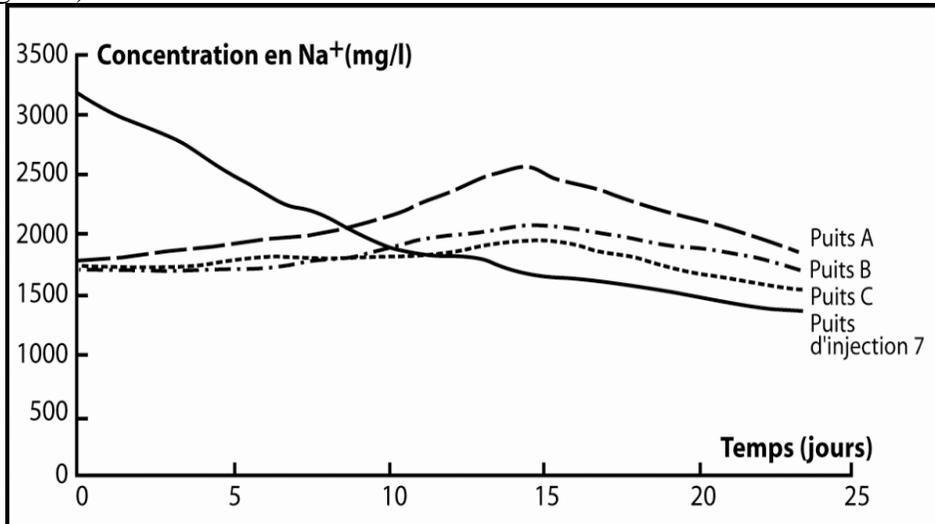


Figure 8. Evolution de la concentration en sel dans certains puits témoins

Les valeurs de la concentration mesurées en chaque point ont permis ensuite de calculer en chaque endroit la capacité d'atténuation intrinsèque de

l'aquifère. Cinq classes ont été définies (Tableau 2), caractérisée chacune par une note et définissant l'évolution de la contamination dans l'aquifère.

**Tableau 2.** Classes de la capacité d'atténuation intrinsèque

Classes	Poids	Notes	Capacité d'atténuation intrinsèque
0 - 0,2	6	1	Très forte
0,2 - 0,4		3	Forte
0,4 - 0,6		6	Moyenne
0,6 - 0,8		8	Faible
0,8 - 1		9	Très faible

Les notations et les poids accordés aux six facteurs de vulnérabilité (Epaisseur de la zone non saturée, recharge, sol, topographie, impact de la zone non saturée et capacité d'atténuation intrinsèque) (Knouz et al., 2019) sont associés dans un modèle additif permettant d'aboutir à un indice de vulnérabilité globale (Iv) variant entre 23 et 220 (Tableaux 3 et 4).

**Tableau 3.** Poids et notes des facteurs de vulnérabilité intrinsèque

Facteurs de vulnérabilité	Poids	Notes
Epaisseur de la zone non saturée	5	1-10
Recharge	4	1-9
Nature du sol	2	1-10
Topographie	1	1-10
Nature de la zone non saturée	5	1-10
Capacité d'atténuation intrinsèque	6	1-9

**Tableau 4.** Indices et classes de vulnérabilité intrinsèque à la pollution

Indice de vulnérabilité (Iv)	Degré de vulnérabilité
23-72	Peu vulnérable
73-121	Vulnérable
122-170	Très vulnérable
171-220	Fortement vulnérable

L'élaboration de la carte de vulnérabilité a été réalisée grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique combinant un système de gestion de bases de données graphiques et alphanumériques.

Dans une démarche analogue à celle de l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque, la carte de sensibilité à la pollution est obtenue suite à une superposition de la carte de l'occupation des sols (tirée à partir des images satellitaires, des photo-aériennes et des cartes topographiques) à celle de la vulnérabilité intrinsèque (Latifi & Chaab, 2017).

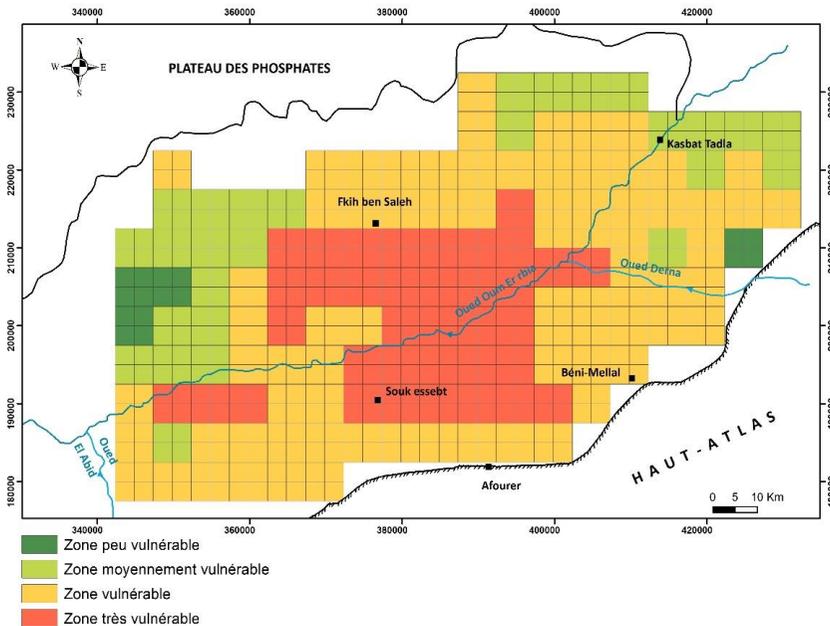
## 5- Resultats et discussion

L'étude de la vulnérabilité a permis d'établir une cartographie détaillée de la région dégageant plusieurs zones classées suivant le degré de

vulnérabilité et de sensibilité à la pollution (Figure 9), ces classes sont indéniablement en relation avec la présence de nombreux paramètres litho-géophysiques et facteurs anthropiques agissant sur la sensibilité du milieu naturel (Radouani et al., 2014). Sur la carte de vulnérabilité intrinsèque, quatre zones ont pu être identifiées (Figure 9 et Tableau 5) :

**Tableau 5.** Récapitulation de la zonalité observée sur la carte de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Indice DRASTIC	Superficie	Facteurs
Fortement vulnérable	> 150	27% (972km <sup>2</sup> )	- Recharge importante - Relief faible - Sol à granulométrie grossière
Vulnérable	120 à 150	50% (1800km <sup>2</sup> )	- Recharge importante - Faible profondeur de la nappe
Moyennement vulnérable	80 à 120	20% (720km <sup>2</sup> )	- Relief faible - Pompage intense - Sol à granulométrie moyenne
Peu vulnérable	< 80	3% (108km <sup>2</sup> )	- Zone non irriguée (faible recharge) - Nappe profonde - Sol fin



**Figure 9.** Carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution de l'aquifère mio-plio-quaternaire du bassin du Tadla. 1. Zone peu vulnérable, 2. Zone moyennement vulnérable, 3. Zone vulnérable, 4. Zone très vulnérable.

- Une zone très vulnérable située au centre de la plaine du Tadla et concerne particulièrement la zone irriguée médiane des Béni-Moussa et la zone Ouest des Béni-Amir. Dans ces zones, le relief est assez doux

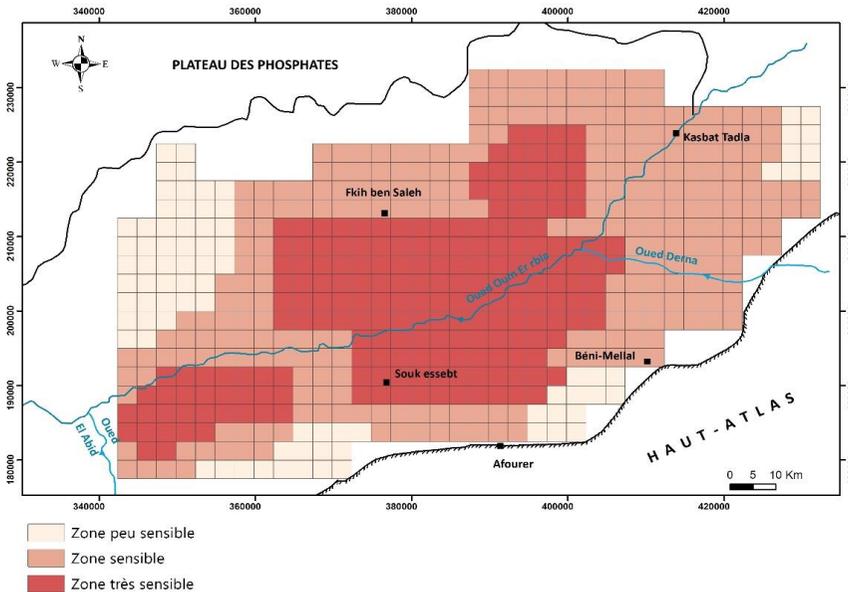
et l'ensemble des terrains pend régulièrement et légèrement vers le sud-Ouest, une forte percolation des eaux étant alors favorisée en l'absence du ruissellement. D'autant plus, le drainage superficiel à l'intérieur du périmètre est tellement négligeable que la lame d'eau excédentaire nette est pratiquement infiltrée dans la nappe. Le drainage profond de la nappe par l'Oum-er-Rbia reste à son tour très limité en raison du sens de l'écoulement de la nappe qui suit le pendage des assises géologiques plio-quadernaires vers le sud-ouest et de l'existence d'un réseau de failles qui longe l'Oum-er-Rbia. Ce réseau de failles forme avec les horizons marneux, qui jalonnent l'Oued, un écran relativement imperméable. Bien que la proportion de l'infiltration de la pluie par rapport aux apports d'irrigations ne dépasse guère 20% même pour les années pluviométriques excédentaires, la recharge de la nappe par précipitation semble marquer l'évolution du niveau de la nappe. En effet, le caractère semi-aride du climat de la plaine fait que les pluies sont souvent sous forme de fortes averses de faible durée. Celles-ci, et en l'absence de drainage superficiel, participeraient à la remontée du niveau piézométrique de la nappe qui peut même affleurer en certaines zones.

- Une zone vulnérable : présentée dans une large superficie de la plaine du Tadla. La pente topographique est très faible avec la présence dans certains endroits de larges cuvettes favorisant l'infiltration des eaux. La profondeur du niveau piézométrique est fonction directe du taux de recharge engendrée par l'infiltration des eaux de pluie et celles des sources de Dir.
- Une zone moyennement vulnérable : concerne principalement la partie Ouest et Nord -Est de la plaine du Tadla. Les différents paramètres agissant sur la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines présentent des valeurs intermédiaires. Le taux de recharge est relativement faible, et le sol est de type isohumique moyennement profond.
- Une zone peu vulnérable : située au Nord Ouest de la plaine. Ce caractère est dû principalement au faible taux de recharge (zone non irriguée et pluviométrie inférieure généralement à 350 mm) et à la grande épaisseur de la zone non saturée. La profondeur du niveau piézométrique dépasse généralement les 15 m. En plus, le faciès pédologique représenté dans cette zone a une texture fine limitant ainsi une infiltration rapide des eaux.
- Les zones sensibles sont déduites de la carte de vulnérabilité intrinsèque en tenant compte des différentes sources de pollution. Ces sources sont représentées essentiellement par les rejets domestiques des différentes agglomérations urbaines, les produits azotés et

phytosanitaires utilisés en agriculture et par les rejets industriels notamment ceux des unités sucrières. La carte dérivée (Figure 10 et Tableau 6) a permis de dégager trois zones classées selon le degré de sensibilité des eaux à la pollution.

**Tableau 6.** Récapitulation de la zonalité observée sur la carte de sensibilité

Degré de sensibilité	Indice de Sensibilité	Superficie	Facteurs
Très sensible	> 8	36% (1296km <sup>2</sup> )	- Zone irriguée (engrais+pesticides+élevage) - Présence d'unités industrielles - Drains d'évacuation des eaux usées
Sensible	4 à 8	49% (1764km <sup>2</sup> )	- Zone irriguée (engrais+pesticides+élevage) - Présence de fosses sceptiques
Peu sensible	< 4	15% (540km <sup>2</sup> )	- Zone non irriguée - Pas d'unités industrielles - Pas de grandes agglomérations



**Figure 10.** Carte de sensibilité à la pollution de l'aquifère mio-plio-quaternaire du bassin du Tadla. 1. Zone peu sensible, 2. Zone sensible, 3. Zone très sensible

- Une zone très sensible : représentée dans trois parties de la plaine :
  - A l'amont hydraulique de la nappe mio-plio-quaternaire ; cette sensibilité est induite par l'activité agricole conjuguée aux fuites des eaux de surface au niveau du canal médian d'irrigation qui amène les eaux salées de l'Oum-er-Rbia ;
  - Au centre de la zone d'étude, à proximité du drain d'évacuation des eaux usées du village de Fkih Ben Salah ; les eaux de ce drain sont

sollicitées pour l'irrigation des parcelles qui l'avoisinent. Cette situation est également observée au droit des drains d'évacuation des eaux résiduaires provenant des trois unités sucrières de la région ;

- A l'aval hydraulique de l'aquifère étudié, la sensibilité à la pollution est principalement due au recyclage des eaux de la nappe par pompage agricole et à la concentration des solutés par évapotranspiration. Dans cette zone, la nappe est peu profonde rendant la zone non saturée peu épaisse, ce qui retarde le lessivage des polluants.

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons M1, M2, et M3 (Figure 10 et Tableau 7) qui ont été prélevés respectivement à l'amont hydraulique, au Sud de Fkih Ben Salah et au Sud-Ouest du périmètre du Tadla tendent à conforter l'approche DRASTIC dans ce secteur. En effet, les analyses montrent la présence d'éléments polluants notamment les nitrates à des teneurs dépassant très nettement les normes admises (80 mg/l).

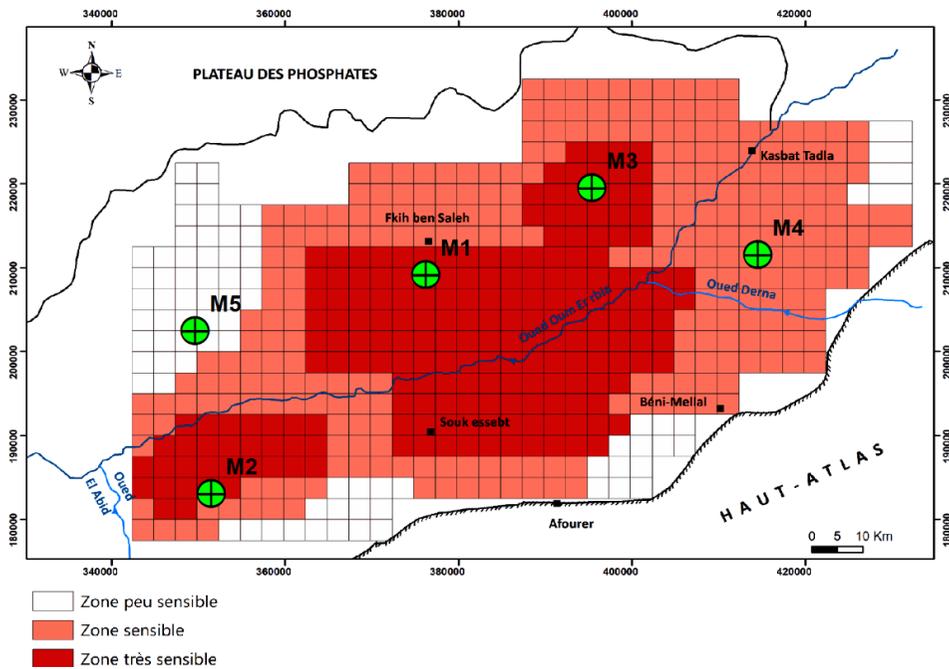
Les résultats des analyses hydrogéochimiques effectuées dans ces trois zones ont bien mis en évidence la gravité de l'état de pollution de la nappe par les nitrates. Cette situation est d'autant plus critique que les eaux souterraines constituent les seules ressources en eau disponibles pour les populations locales.

- Une zone sensible concernant une large superficie du bassin de Tadla et qui est principalement engendrée par l'activité agricole et le recyclage des eaux de la nappe par pompage. L'abondance des fosses sceptiques dans cette zone a également un impact important sur la qualité des eaux souterraines.

Les résultats de l'analyse chimique de l'échantillon M4 établis par une méthode de détermination colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre UV-VIS (LANGE HACH DR6000) (précision  $\pm 1$  nm). (Figure 10 et Tableau 7) semblent également conforter notre approche dans ce secteur de la plaine. Les nitrates dosés, quoiqu'en teneurs plus faibles que dans les échantillons M1, M2 et M3, sont à des seuils dépassant les normes admises.

**Tableau 7.** Résultats des analyses hydrogéochimiques des échantillons M1, M2, M3, M4 et M5 prélevés dans la nappe de Tadla en février

Puits	Concentration ionique (mg/l)								Résidu sec (mg/l)
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
<b>M1</b>	212	238,34	860,20	1,72	2091,52	96,00	378,20	88,62	3966,60
<b>M2</b>	248	223,74	379,50	1,32	1067,82	528,00	357,46	82,43	2888,27
<b>M3</b>	262	215,65	512,5	1,1	928,5	112,00	332,40	81,60	2445,75
<b>M4</b>	268	119,16	505,0	0,78	564,95	72,00	344,05	80,12	1954,06
<b>M5</b>	88	53,50	18,22	0,54	132,37	20,22	351,36	36,25	700,46



**Figure 11.** Carte de sensibilité à la pollution de l'aquifère mio-plio-quaternaire du bassin du Tadla. 1. Zone peu sensible, 2. Zone sensible, 3. Zone très sensible./avec les points de validation

- Une zone à faible sensibilité des eaux à la pollution est observée au Sud et au Nord-Ouest de la région étudiée. Au Sud, cette zone correspond à la bordure de la chaîne du Haut-Atlas où la nappe ne présente pas des chemins préférentiels d'écoulement. L'analyse hydrogéochimique de l'échantillon M5 (Figure 10 et Tableau 7) montre des teneurs admissibles de potabilité (Selon les normes préconisées par l'OMS) et confirme l'aspect peu sensible à la pollution de cette zone.

## Conclusion

Les travaux de recherche présentés dans cet article notent a pour ambition la mise au point d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. L'analyse de la capacité d'atténuation intrinsèque de l'aquifère s'est révélée performante dans cet environnement complexe. Ce paramètre, une fois déterminé d'une manière représentative sur l'ensemble du bassin, permettra de décrire le comportement de la pollution de la nappe phréatique et évaluer sa capacité de transfert.

A l'issue de ce premier test, l'adéquation des zones très vulnérables avec celles où sont observés des cas de pollution aggravée tend à vérifier la méthode.

La particularité de cette démarche réside dans le fait qu'elle étend le champ de vision à l'ensemble du bassin et ne se limite pas aux endroits où la pollution a déjà contaminé les eaux souterraines et où elle est mesurée. De ce fait, cette méthode ne pourrait se substituer à une expertise hydrogéologique requise pour un projet spécifique, dont les incidences concernent des superficies généralement petites. En effet, des microzones fortement vulnérables peuvent subsister dans des endroits de la plaine classés comme étant faiblement vulnérables (Hinde Cherkaoui Dekkaki, 2007).

Cette Nouvelle approche d'étude de la vulnérabilité permet aux organismes intéressés d'assurer une gestion durable de la ressource en eau souterraine. Elle constitue un support d'aide à la décision en matière de planification et d'aménagement du territoire en identifiant les zones les plus menacées par la pollution des aquifères.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

#### References:

1. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *NWWA/Epa-600/2-87-035*, 455.
2. Amharref, M., Aassine, S., Bernoussi, A. S., & Haddouchi, B. Y. (2007). Cartography of the vulnerability to pollution of groundwater: Application to the Gharb's plain (Morocco). *Revue Des Sciences de l'Eau*, 20(2), 185–199. <https://doi.org/10.7202/015812ar>
3. Boizard, H., Richard, G., Defossez, P., Estrade, J. R., & Boiffin, J. (2004). Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien. *Etudes et Gestions Des Sols*, 11(1), 11–20.
4. Bouchaou, L., Chauve, P., Mudry, J., Mania, J., & Hsissou, Y. (1997). Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride: Cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, 25(2), 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(97\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00100-0)
5. Denny, S. C., Allen, D. M., & Journeay, J. M. (2007). DRASTIC-Fm: A modified vulnerability mapping method for structurally controlled

- aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, 15(3), 483–493. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0102-8>
6. Hammani, A., Kuper, M., Li, I. A. V. H., & Li, H. (2008). *Caractérisation des pompages des eaux souterraines dans le Tadla , Maroc*. 4–7.
  7. Hinde Cherkaoui Dekkaki. (2007). (PDF) *Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution moyennant la méthode P.R.K. : Application à la nappe phréatique du Souss au niveau du champ captant Ahmar Boudhar (Souss médian)*. April 2019. [https://www.researchgate.net/publication/332211662\\_Evaluation\\_de\\_la\\_vulnerabilite\\_des\\_eaux\\_souterraines\\_a\\_la\\_pollution\\_moyennant\\_la\\_methode\\_PRK\\_Application\\_a\\_la\\_nappe\\_phreatique\\_du\\_Souss\\_au\\_niveau\\_du\\_champ\\_captant\\_Ahmar\\_Boudhar\\_Souss\\_median](https://www.researchgate.net/publication/332211662_Evaluation_de_la_vulnerabilite_des_eaux_souterraines_a_la_pollution_moyennant_la_methode_PRK_Application_a_la_nappe_phreatique_du_Souss_au_niveau_du_champ_captant_Ahmar_Boudhar_Souss_median)
  8. Knouz, N., Boudhar, A., Mostafa, E., & Aghzaf, B. (2019). *Méditerranée*. May.
  9. Latifi, S., & Chaab, S. (2017). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. *Synthèse: Revue Des Sciences et de La Technologie*, 62, 48–62.
  10. Ouedraogo, I., Defourny, P., & Vanclooster, M. (2016). Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *Science of the Total Environment*, 544, 939–953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.135>
  11. Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., Ouzerbane, Z., & Aïfa, T. (2013). Reconnaissance du système aquifère du Nord-Ouest de la plaine du Tadla (Maroc oriental) par imagerie électrique Reconnaissance du système aquifère du nord-ouest de la plaine du Tadla (Maroc central) par imagerie électrique. *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, 4(4), 33–41. <http://jhmer.univ-rennes1.fr>
  12. Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., Ouzerbane, Z., Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., & Ouzerbane, Z. (2014). *Reconnaissance du système aquifère du Nord-Ouest de la plaine du Tadla ( Maroc oriental ) par imagerie électrique*.
  13. SINAN, M. (2000). *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en SOUTENANCE DE THESE DE DOCTORAT D'ETAT Présentée par : M . Mohamed SINAN DOCTEUR ES SCIENCES APPLIQUEES Option : Hydrogéologie METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION, D'ÉVAL*. January. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3954.1843>
  14. Weatherington-Rice, J., Christy, A. D., Angle, M. P., & Aller, L.

(2006). DRASTIC hydrogeologic settings modified for fractured till:  
Part 1. Theory. *Ohio Journal of Science*, 106(2), 45–50.



13 years ESJ  
*Special edition*

## **Etude Comparative des Différentes Méthodes d'Estimation de l'Evapotranspiration en Zone Semi-Aride (cas Plaine Tadla Maroc)**

***Amroumoussa Benmoussa***

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,  
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco

***Amina Wafik***

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

***Abdessamad Najine***

***Raji Abdletife***

***Sahar Khrmouch***

Département de Géologie, Université Cadi Ayad  
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

[Doi: 10.19044/esj.2023.v19n40p74](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p74)

Submitted: 20 June 2022  
Accepted: 01 June 2023  
Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)  
Under Creative Commons CC-BY 4.0  
OPEN ACCESS

*Cite As:*

Benmoussa A., Wafik A., Najine A., Abdletife R. & Khrmouch S. (2023). *Etude Comparative des Différentes Méthodes d'Estimation de l'Evapotranspiration en Zone Semi-Aride (cas Plaine Tadla Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 74.

<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p74>

### **Resume**

Dans les régions arides et semi arides, l'eau est une ressource très limitative non seulement pour sa pénurie, mais aussi pour sa disponibilité incertaine. Dans le bassin moyen Oum Er-rbia (plaine Tadla), se caractérise par un climat semi-aride, méso thermique, chaud et sec en été et froid en hiver. Ce climat est conditionné par la présence des deux facteurs principaux : La présence de l'Atlantique à moins de 200km à l'Ouest, qui exerce une influence tempérante mais aussi qui se manifeste par des vents pluvieux en provenance de l'Ouest ; La latitude dont l'effet se traduit par une aridité croissante en se déplaçant du Nord vers le Sud ; les ressources en eau diminuent de l'amont vers l'aval et se traduisent par une raréfaction des taux de précipitation (une

moyenne de 560 mm à Ahmed Hansali et 352 mm à Béni Mellal) et une augmentation des moyennes d'évapotranspiration (465.1mm à Béni-Mellal et 571 mm à Ahmed Hansali) et de la température. Ceci exige une analyse spécifique de ces paramètres pour comprendre et prédire les instabilités des ressources dans la région d'étude. L'objectif de ce travail est de calculer l'évapotranspiration potentielle (mensuelle et annuelle), en se basant sur les séries des données hydroclimatiques, enregistrées au niveau des stations météorologiques. Les précipitations et l'évapotranspiration sont des variables très importantes dans le diagnostic des changements climatiques et leurs effets sur l'environnement. La méthodologie adaptée dans ce travail est basée sur l'étude statistique des séries chronologiques. Ces analyses comprennent la détection de tendances, la détection des ruptures par changement de moyenne, et aussi la corrélation entre les données de précipitation et celle d'évapotranspiration. Les données proviennent de deux stations trouve dans le haut bassin du bassin moyen Oum Er-rbia (Béni Mellal, Ahmed Hansali). Les résultats des analyses statistiques mettent en évidence l'existence des changements sensibles et généralisés représentés essentiellement par le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, en étroite relation avec l'activité humaine. Ces changements ont une influence négative sur l'environnement et l'Homme.

---

**Mots- clés:** Plaine Tadla, Précipitations, Evapotranspiration, Changements climatiques, Corrélation

---

## **Comparative Study of Different Methods of Estimating Evapotranspiration in Semi-Arid Zones (Case Plain Tadla Morocco)**

*Amroumoussa Benmoussa*

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,  
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,  
Béni Mellal, Morocco

*Amina Wafik*

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources  
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

*Abdessamad Najine*

*Raji Abdletife*

*Sahar Khrmouch*

Département de Géologie, Université Cadi Ayad  
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

---

### **Abstract**

In the middle Oum-rebia basin (plain Tadla), is characterized by a semi-arid, meso-thermal climate, hot and dry in summer and cold in winter. This climate is conditioned by the presence of the following two main factors: The presence of the Atlantic less than 200km to the west, which exerts a tempering influence but also manifests itself in rainy winds from the west; The latitude, the effect of which is reflected in increasing aridity as it moves from north to south; Water resources decrease from upstream to downstream and result in a rarefaction of precipitation rates (an average of 560 mm in Amed Hansali and 352 mm in Béni Mellal) and an increase in average evapotranspiration (465. 1mm in Beni-Mellal and 571 mm in Ahmed Hansali) and temperature. This requires a specific analysis of these parameters to understand and predict resource instabilities in the study area. The objective of this work is to calculate the potential evapotranspiration (monthly and annual), based on the series of hydroclimatic data, recorded at the level of the meteorological stations. Precipitation and evapotranspiration are very important variables in the diagnosis of climate change and its effects on the environment. The methodology adapted in this work is based on the statistical study of time series. These analyses include the detection of trends, the detection of breaks in the mean, and also the correlation between precipitation and evapotranspiration data. The data are from three stations in the upper basin of the middle Oum Rbia basin (Beni Mellal, Ahmed Hansali, Mechra Edahk). The results of the statistical analyses highlight the existence of significant and

widespread changes represented essentially by warming due to greenhouse gases, in close relation with human activity. These changes have a negative influence on the environment and mankind.

---

**Keywords:** Tadla Plan, Precipitation, Evapotranspiration, Climate change, Correlation

## Introduction

L'évapotranspiration, composante essentielle du bilan hydrologique, permet de comprendre les mécanismes régissant les relations eaux de surface /eaux souterraines (Xu & Chen, 2005). D'autre part, l'étude de ce paramètre présente un grand intérêt pour l'évaluation, Le changement climatique désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement dans le sens d'un réchauffement global. Ce phénomène peut entraîner des dommages importants : élévation du niveau des mers, accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones, ...), déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce, difficultés agricoles. Selon son rapport du septembre 2013, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) affirme, que le réchauffement du système climatique du globe est sans équivoque. Parmi les résultats de ce réchauffement, on note :

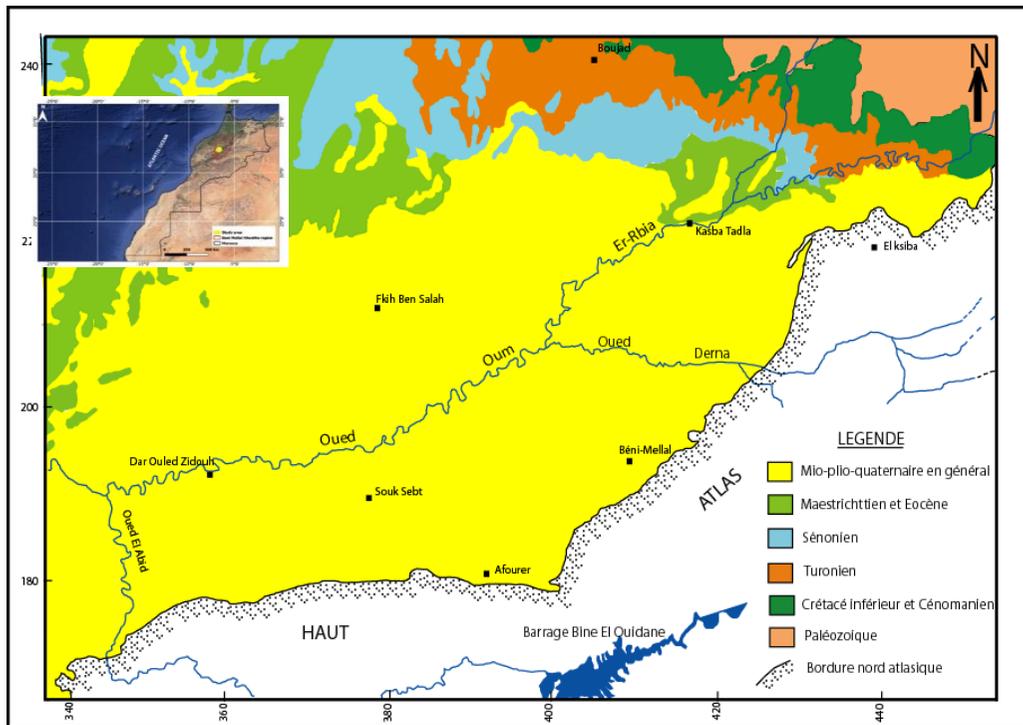
- L'augmentation de la température moyenne du globe (+0.85°C) et la diminution des précipitations surtout en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du sud ;
- La réduction de la superficie des calottes glaciers et les glaciers au rythme de 3.5 à 4.1% par décennie ;
- L'élévation mondiale du niveau moyen de la mer avec une hausse de 19 cm (Costel et al., 2008).

Les précipitations et l'évapotranspiration sont des variables très importants dans le diagnostic des changements climatiques et leurs effets sur l'environnement(Akhal et al., 2022).

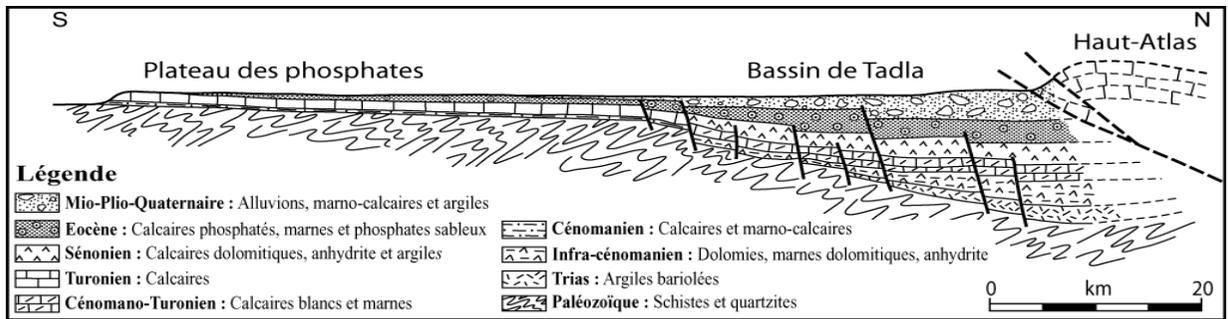
L'objectif de ce travail est de calculer l'évapotranspiration potentielle (mensuelle et annuelle), en se basant sur les séries des données hydro-climatiques, enregistrées au niveau de la station météorologique dans la plaine Tadla, En utilisant les données de 1985 à 2016 (Fatah et al., 2011), avec une analyse comparative et statistique des résultats des différents modèles l'Evaporomètre Piche (en ml) et par la Bac Colorado (en mm).

## Contexte géographique et géologique

La zone d'étude est située au Nord-Est de la plaine qui fait partie du Bassin Moyen de l'Oum Er-ribia (Fig. 1). Cette plaine se présente comme une vaste dépression mono-synclinale orienté WNW-ESE et couvrant une superficie d'environ 3600 km<sup>2</sup>. Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates, vers l'Est par la plaine se rétrécit le long de l'Oum Er-ribia en direction des reliefs à l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite, mais le cours inférieur d'Oued El Abid sera pris comme limite régionale de cet ensemble. Au Sud, elle est limitée par la chaîne montagneuse de l'Atlas, essentiellement jurassique (Hammani et al., 2006).



Géologiquement, la région se présente comme un vaste plateau stratiforme recouvert de dépôts mio-plio-quadernaires hétérogènes reposant sur un socle paléozoïque. Il s'agit d'une série géologique dans laquelle se sont déposées de puissantes séries allant du Trias au Quaternaire (Hsissou et al., 1996). (Fig. 2)



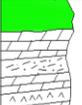
**Figure 2.** Coupe synthétique du bassin sédimentaire de Tadla  
(Radouani, Najine, Aifa, et al., 2013)

Géologiquement, la région se présente comme un vaste plateau stratiforme recouvert de dépôts mio-plio-quaternaires hétérogènes reposant sur un socle paléozoïque. Il s'agit d'une série géologique dans laquelle se sont déposées de puissantes séries allant au Trias au Quaternaire.

- ❖ **Trias** : formé d'une série argilo-gréseuse, basaltique ou argilo-salifère ;
- ❖ **Infra-Lias** : argilo-dolomitique, devenant sub-récifal dans l'Atlas. Il se biseaute rapidement pour disparaître au Nord de Bou-Ghazi ;
- ❖ **Infra-cénomaniens** : silicoclastique à argiles rouges et grès gris avec quelques intercalations de calcaires clairs. Il est parfois mal distingué du Trias à cause de son faciès et sa datation sommairement le Crétacé inférieur ;
- ❖ **Cénomaniens transgressifs** : équivalent aux autres formations du Crétacé supérieur discordant sur les plates-formes. Il s'agit principalement de laminites argilo-carbonatées, parfois légèrement évaporitiques (sulfates) ;
- ❖ **Cénomano-turonien marin** : calcaire, à faune marine franche de plate-forme interne à moyenne, et parfois dolomitisé. Il se distingue alors au sommet du plateau par des bancs métriques très massifs ou caverneux ;
- ❖ **Sénonien lagunaire ou évaporitique** : fortement développé dans les zones à forte subsidence où il constitue une formation écran entre les aquifères. A l'affleurement, le Sénonien est argilo-calcaire ;
- ❖ **Sénonien marin** : assez puissant vers le sillon atlasique ; il est formé de biocalcarénites ; en amont, il se traduit dans le Sénonien indifférencié par des intercalations plus calcaires et plus riches en faunes qui donnent à la formation ses propriétés aquifères ;
- ❖ **Eocène** : on y distingue, au-dessus d'un écran composé de marnes bitumineuses phosphatées du Maestrichtien, des dépôts alternants à débris phosphatés, lits calcaires et lits plus fins, se chargeant en silex vers le haut ;

❖ **Mio-Plio-Quaternaire** : c'est par excellence le niveau où circulent, les nappes phréatiques de la plaine du Tadla. Le Miocène, plus ou moins conglomératique, impliqués dans la phase de déformation atlasique, n'est individualisé que dans la partie basse du sillon ou au contact de l'Atlas dans la partie épaisse du prisme sédimentaire. Ailleurs, on parle surtout de Plio-Quaternaire dans lequel les faciès fluvio-lacustre du Villafranchien prennent une grande place, notamment près de l'Oum-er-Rbia. A proximité de l'Atlas, les grandes épaisseurs de dépôts sont partiellement dues à de grands cônes de piémont formés de produits de démantèlement de la chaîne.

**Figure 3.** Log synthétique des formations géologique de la plaine de Tadla (M. Hafid et al., 2008)

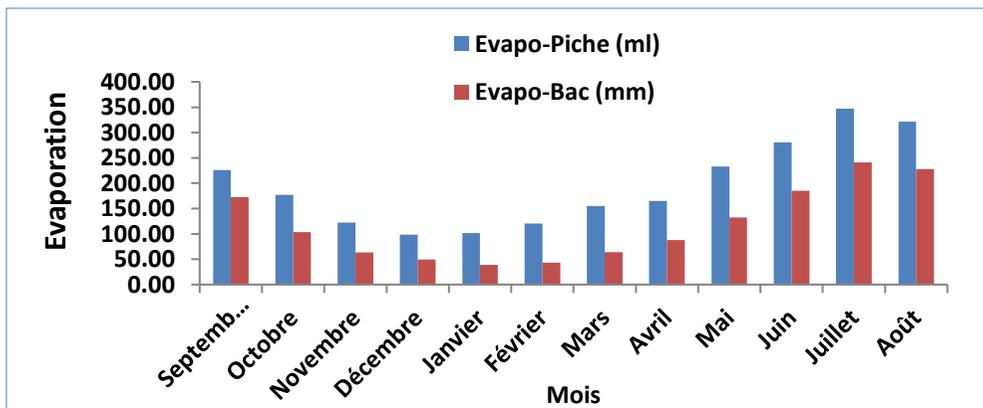
Plaine du Tadla			
FORMATION	LITHOLOGIE		EPAISSEUR
	LOG INSCRIPTION		
Formation Mio-Plio -Quaternaire		Croute calcaire calcaires sableux Conglomérates polygéniques à ment argileux Marnessableuses	0 à 400 m
Formation Phosphatée (Mastrichtien-Eocène)		Argiles dolomitiques et dolomites a silex avec débris phosphatée Niveau de calcaire et de dolomies phosphatés imprégnation de matière organique	60 à 300 m
Formation Sénorien marin		Calcaires lumchelliens	70 à 400 m
2ème Formation évaporitique "Sénorien lagunaire"		Anyhdrites, dolomies calcaires dolomitiques et marnen	
Cénomaniens - Turonien		Dolomie et dolomies marnesuses	50 à 200 m
1ère Formation évaporitique "infracénomaniens lagunaire"		Dolomie et marnes dolomitiques argiles sableuses , anhydrite Conglomérat de base	20 à 180 m
Trias		Basaltes doléritiques Argiles rouge et vertes légèrement anhydritique conglomérats de base	0 à 500 m
Primaire		Schistes et quartzites	> 100 m

## Matériels et méthodes

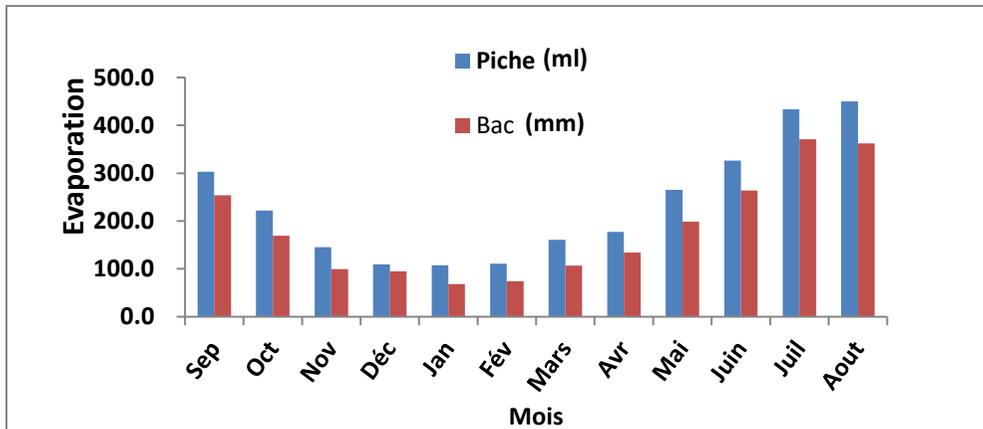
L'évaporation est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique (Igbadun et al., 2006). La température, l'insolation, l'hygrométrie et les vents jouent un rôle important dans les quantités annuelles évaporées. L'étude du paramètre d'évaporation est importante pour connaître le régime climatique, il est mesuré par **l'évaporomètre**. Les stations climatiques de Béni Mellal et Ahmed Al Hansali ont enregistré des valeurs d'évaporation durant la période 1985-2016 par deux appareils, l'Evaporomètre Piche (en ml) et par la Bac Colorado (en mm).

- **Evaporimètre type Piche** : Cet appareil est constitué essentiellement par une surface poreuse, imbibée d'eau, en équilibre constant avec l'atmosphère et placé dans des conditions telles que l'évaporation soit conditionnée uniquement par les caractéristiques météorologiques : humidité de l'air, température, insolation...
- **Evaporimètre type Bacs** : Parallèlement aux évaporomètres, l'emploi de bacs d'évaporation est fréquent en hydrologie. Ce sont des bacs circulaires de diamètre de 1 à 2 m au max. et de faible profondeur.

L'analyse des données enregistrées dans la station de Béni Mellal montre une quantité annuelle évaporée de l'ordre de 1409mm/an par la Bac Colorado et 2365ml/an mesuré au Piche, alors que l'autre station montre une quantité annuelle évaporée de l'ordre de 2094mm/an par la Bac Colorado et 2678ml/an mesuré au Piche ;



**Figure 4.** Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station de Béni Mellal (1985- 2016)



**Figure 5.** Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station d'Ahmed Al Hansali (1985- 2016)

La moyenne mensuelle de l'évaporation enregistrée par les deux appareils présente une même variation au cours des mois, les valeurs minimales sont enregistrées pendant les mois de décembre, janvier, février et Mars alors qu'au cours des mois juin, juillet et août, les deux appareils enregistrent des valeurs maximales.

La méthodologie adaptée dans ce travail est basée sur l'étude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas plaine Tadla Maroc) : Les données proviennent deux stations se trouve dans plain Tadla. Ainsi que la zone d'étude connue un pompage agricole très important, dans des projets agricoles (céréales, Olivier, Agrumes Betterave, Grenadier...)(Mengoub et al., 2021).se trouvent entravés par l'insuffisance des ressources hydriques (Boukaa et al., 2001).Ce déficit hydrique nécessite, par ailleurs, une gestion rationnelle, qui nécessite l'établissement d'un bilan hydrologique défini par :

$$P = Q + ETP + \Delta R$$

Où **P** : représente les précipitations en mm, **ETP** : l'évapotranspiration en mm **Q** : le débit de lame d'eau écoulée, **ΔR** : la variation de la réserve en eau en mm (Xu & Chen, 2005).

### ***Formules utilisées pour le calcul Évapotranspiration potentielle ETP***

L'évapotranspiration potentielle représente l'évaporation plus la transpiration qui se produisaient si l'approvisionnement en eau était suffisant pour compenser les pertes maximums et répondaient aux pleins besoins de la végétation(Mutti et al., 2022).

Depuis 1950, plusieurs formules ont été développées pour estimer l'évapotranspiration: Thornthwaite (1944),Turc (1962)

### ➤ **Méthode de Thornthwaite (1948)**

D'après Thornthwaite (1948) le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait selon la formule suivante :

$$ETP = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda)$$

Avec :

**T** : température moyenne mensuelle (°C)

**ETP** : Evapotranspiration Potentielle moyenne mensuelle (en mm)

**F(λ)** : Coefficient de correction tenant compte de la latitude et du mois

**Tm** : Moyenne interannuelle des températures du mois (en °C)

**I** : Somme des 12 indices thermiques mensuels  $I = \sum_{k=1}^{12} ik$  avec  $ik = \left(\frac{tk}{5}\right)^{1.514}$

**a** : Fonction complexe de l'indice I  $a = 1.6/100 * I + 0.5$

La valeur de l'évapotranspiration annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration potentielle mensuelles.

### **Formules utilisées pour le calcul L'évapotranspiration réelle (ETR)**

#### **La formule de Turc annuelle**

Elle permet de calculer l'ETR en tenant compte des valeurs moyennes annuelles de la température et des précipitations (**Igbadun et al., 2006**).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{\left(0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)\right)^2}}$$

Avec :  $L = 300 + 25T + 0,05T^3$ , **L** : pouvoir évaporant de l'atmosphère., **ETR** : évapotranspiration réelle annuelle en (mm), **T** : température moyenne annuelle (°C). **P** : hauteur de précipitation annuelle en (mm).

### **Résultats et discussions**

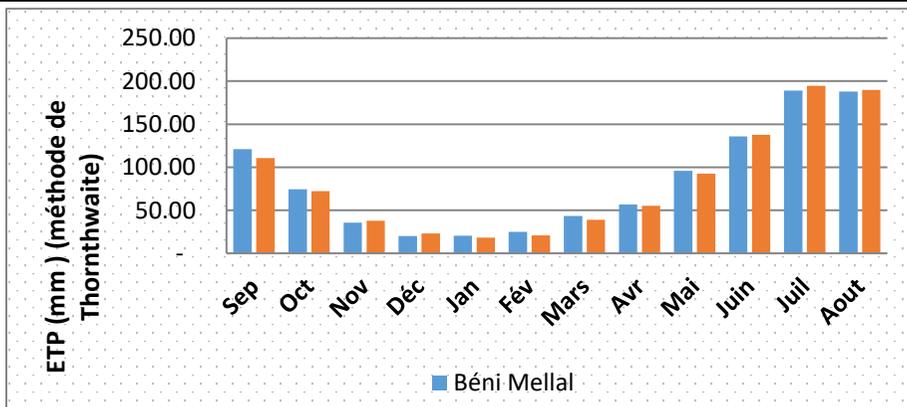
Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP durant la période (1985- 2016) sont récapitulés dans les **tableaux 1 et 2**.

**Tableau 1.** Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la station de Béni Mellal (Latitude = 32° 32'N) (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
<i>T</i>	26,15	21,41	16	12,40	12,31	13,67	16,29	18,06	21,98	25,81	29,84	30,44	****
<i>K</i>	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
<i>I</i>	12,24	9,04	5,84	3,95	3,91	4,59	5,98	6,99	9,41	12,00	14,95	15,41	****
<i>ETP (mm)</i>	120,9	74,56	35,8	20,24	20,40	24,75	43,35	56,83	95,92	135,9	189,2	187,8	1005,2

**Tableau 2.** Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la station d'Ahmed AL-Hansali (Latitude = 32° 40'N) (Source : ABHOR 1985-2016)

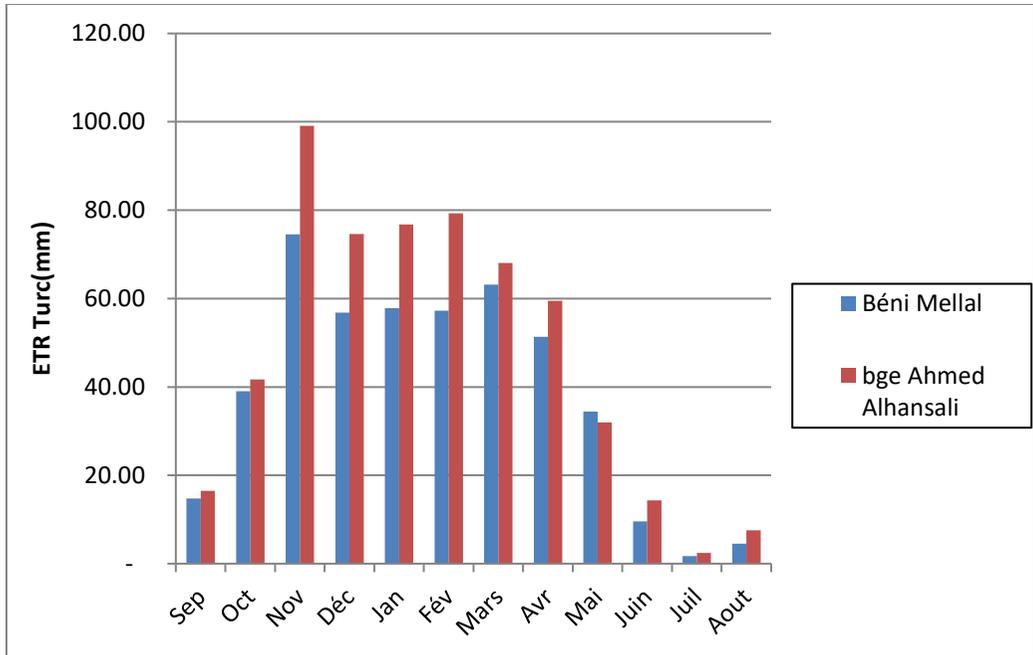
Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
<i>T</i>	24,8	20,8	16,0	12,8	11,4	12,2	15,1	17,4	21,3	25,7	30,0	30,4	****
<i>K</i>	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
<i>I</i>	11,31	8,64	5,84	4,15	3,46	3,86	5,34	6,62	8,96	11,93	15,09	15,39	****
<i>ETP (mm)</i>	110,8	72,4	37,72	23,11	18,38	20,65	38,91	55,09	92,5	137,8	194,5	189,9	991,7



**Figure 6.** La variation de l'évapotranspiration potentielle mensuelle, entre 1985 et 2016, de la station d'Al-Hansali et la station de Béni Mellal

**Tableau 3.** Calcul de l'évapotranspiration réelle mensuelle, entre 1985 et 2016, par la méthode de Turc pour l'ensemble des stations étudiées. (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
<i>Béni Mellal</i>	14,76	39,03	74,55	56,83	57,85	57,26	63,16	51,34	34,45	9,60	1,75	4,51	465,10
<i>Ahmed Al-hansali</i>	16,47	41,70	99,10	74,62	76,75	79,32	68,02	59,45	32,00	14,31	2,45	7,58	571,77



**Figure 7.** Évapotranspiration réelle, entre 1985 et 2016, du barrage Ahmed Al-Hansali, et la station de Béni Mellal

L'analyse du diagramme d'évapotranspiration potentielle par la méthode de Thornthwaite montre que les mois de décembre à février des deux stations présentent des valeurs relativement basses d'évapotranspiration potentielle surtout à Ahmed Al-Hansali (18,38mm), cependant les Mois de Juin à septembre présentent des valeurs relativement élevées (194,49 mm) (Tableau 2).

L'évapotranspiration reste très importante par rapport à la pluviométrie annuelle (déficit) enregistrée durant la période 1985-2016. C'est ce qui caractérise les zones arides et semi-arides.

- **Diagramme ombro-thermique**

Ce diagramme met en relief la variation des températures et des précipitations au cours de l'année (Fig.8), mais aussi la durée de la période de sécheresse qui n'est pas toujours réduite à la saison estivale. Selon Bagnouls et Gaussen (1953) la saison sèche correspond au nombre de mois dont la pluviométrie moyenne mensuelle (en mm) est inférieure à deux fois la valeur de la température moyenne mensuelle (en °C) ( $P \leq 2T$ ).

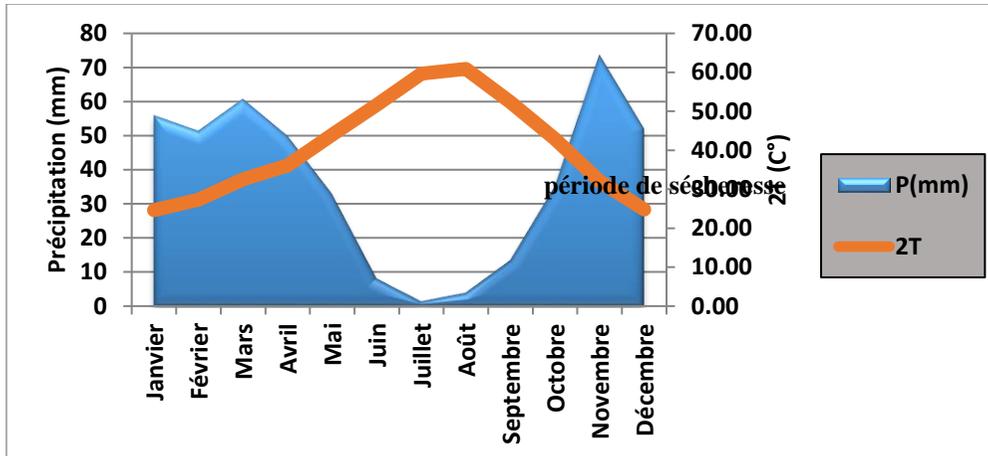


Figure 8. Diagramme Ombro-thermique (Station de Béni Mellal)

La combinaison des moyennes des températures et des précipitations dans le diagramme ombro-thermique de Bagnouls-Gaussen permet un premier dépistage de sous-ensembles basés, à ce niveau, sur l'importance de la saison sèche dans le domaine étudié. Le diagramme ombro-thermique établi montre l'importance des saisons sèches et humides en durée et en intensité : quand la courbe de températures passe au-dessus de celle de précipitations, la période est sèche, dans le cas contraire la période est humide (Science, 2022).

#### ➤ Méthode de Thornthwaite 1948 :

La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P) permet de calculer l'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR), plusieurs cas peuvent se présenter :

- $ETR < P$
- $ETR = ETP$

La quantité d'eau correspondant à  $P - ETP$  est emmagasinée dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci, la partie de « Excédent » dépassent éventuellement la réserve cumulée maximale en eau du sol, constitue le «water-surplus» et est disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

- $ETR = ETP$
- $ETR = ETP = P$

Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

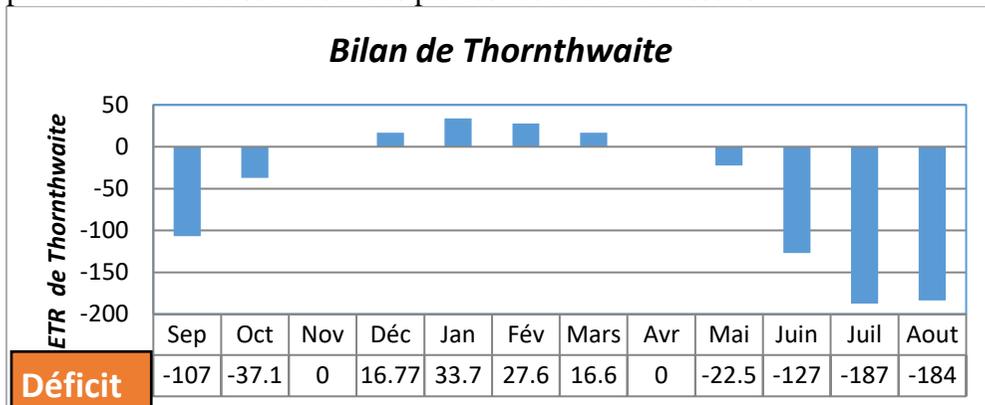
- $ETR > P$

$ETR = P +$  tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci. Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que  $ETP > ETR$ ,  $ETP - ETR =$  « water- deficiency ».

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOT
<b>T °C</b>	26.1	21.4	16	12.4	12.3	13.7	16.3	18.1	22	25.8	29.8	30.4	244.3
<b>P</b>	14.00	37.00	71.00	54.10	55.10	54.50	60.10	48.80	32.70	9.10	1.70	4.30	442.40
<b>ETP (mm)</b>	120.94	74.56	35.79	20.24	20.40	24.75	43.35	56.83	95.92	135.89	189.17	187.84	1005.68
<b>RFU</b>	0	0	35.21	50	50	50	50	41.97	0	0	0	0	277.18
<b>ETR</b>	14.00	37.00	35.79	20.24	20.40	24.75	43.35	56.83	74.67	9.10	1.70	4.30	342.13
<b>Déficit</b>	106.94	37.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.25	126.79	187.47	183.54	663.55
<b>Excédent</b>	0	0	0	19.07	34.70	29.75	16.75	0	0	0	0	0	100.27

**Tableau 4.** Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2015, pour la station de Béni Mellal

La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration réelle mensuelles. Les valeurs de l'ETR obtenues par cette méthode sont données par les tableaux ci-dessous.



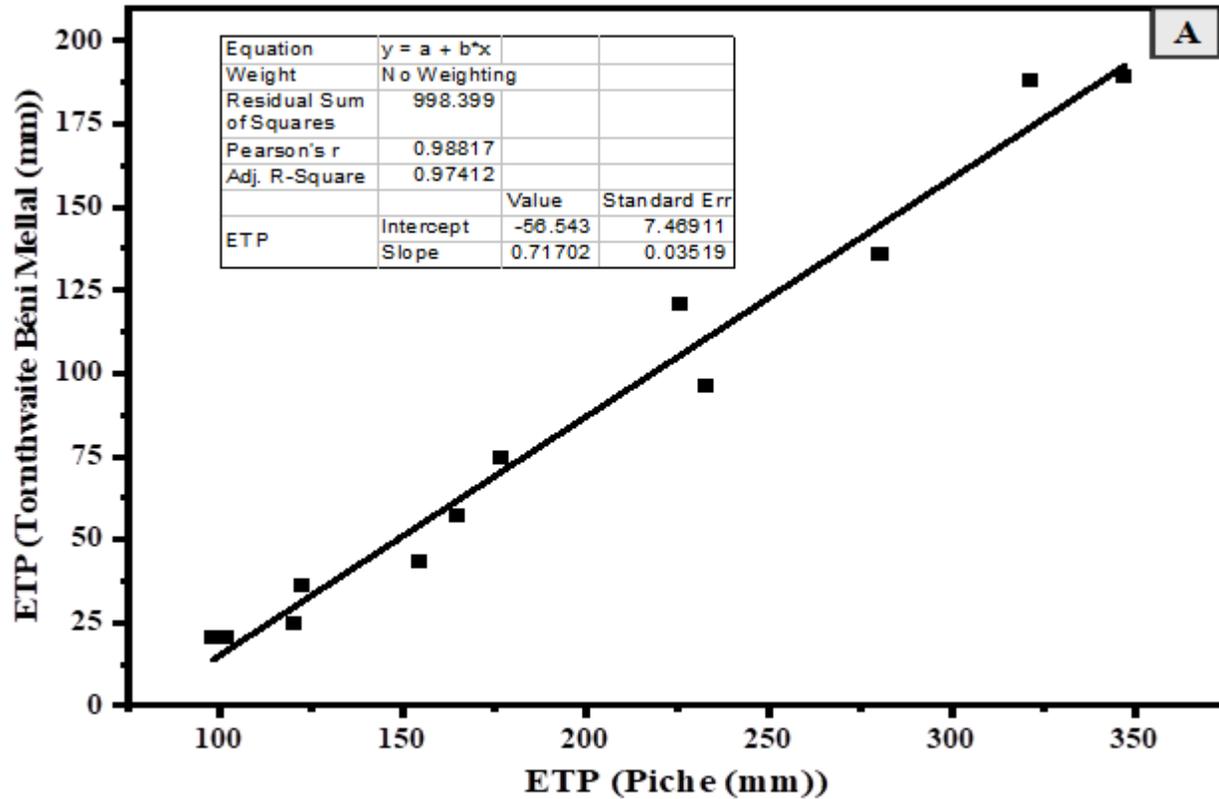
**Figure 9.** Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2016, de la station de Béni Mellal

À partir du bilan de Thornthwaite appliqué à la station de Béni Mellal, on constate que la région connaît un excédent d'eau qui s'étend surtout de Décembre à Mars où la pluviométrie satisfait les réserves hydriques du sol (RFU) qui atteint son maximum (50mm) car le climat de la région est semi-aride (Ouchouia & Chaouki, 2022), et durant la période allant de Mai à Novembre on remarque un déficit très important qui peut atteindre (663,35 mm).

• **Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée**

À partir des relations entre l'ETP (Piche) et celle estimée à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents modèles de calcul (coefficient de corrélation > 0.98). (Figure 10).

**Les figures de Corrélation entre l’ETP mesurée et celle de différentes formules**



**Figure A.** Corrélation entre ETP (Thornthwaite Béni-Mellal ) et ETP (Piche)

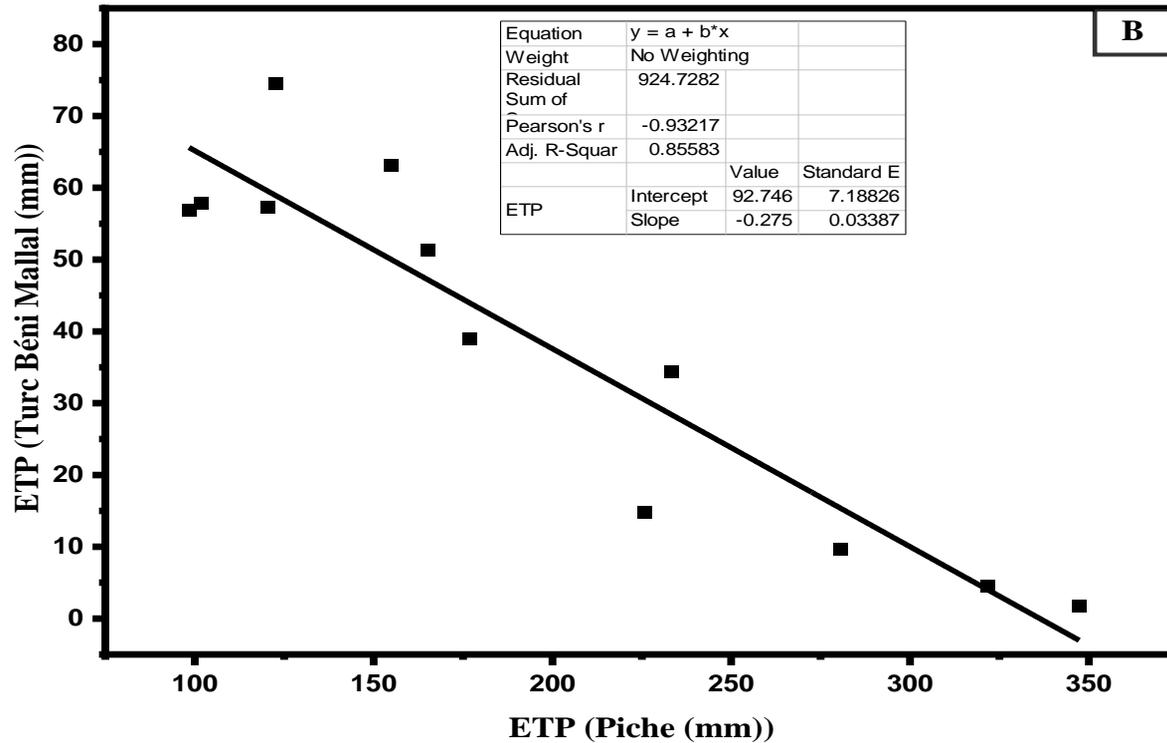


Figure B. Corrélation entre ETP (Turc Béni-Mellal) et ETP (Piche)

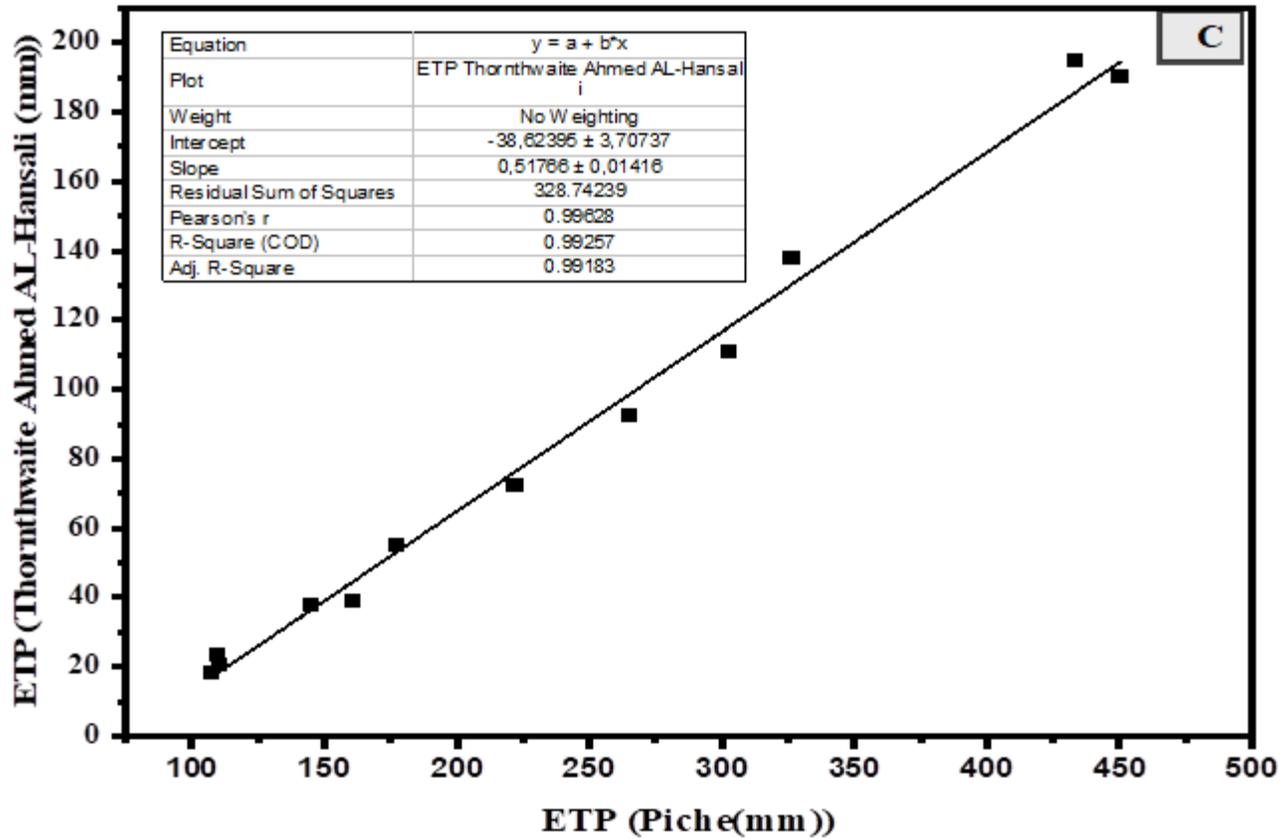
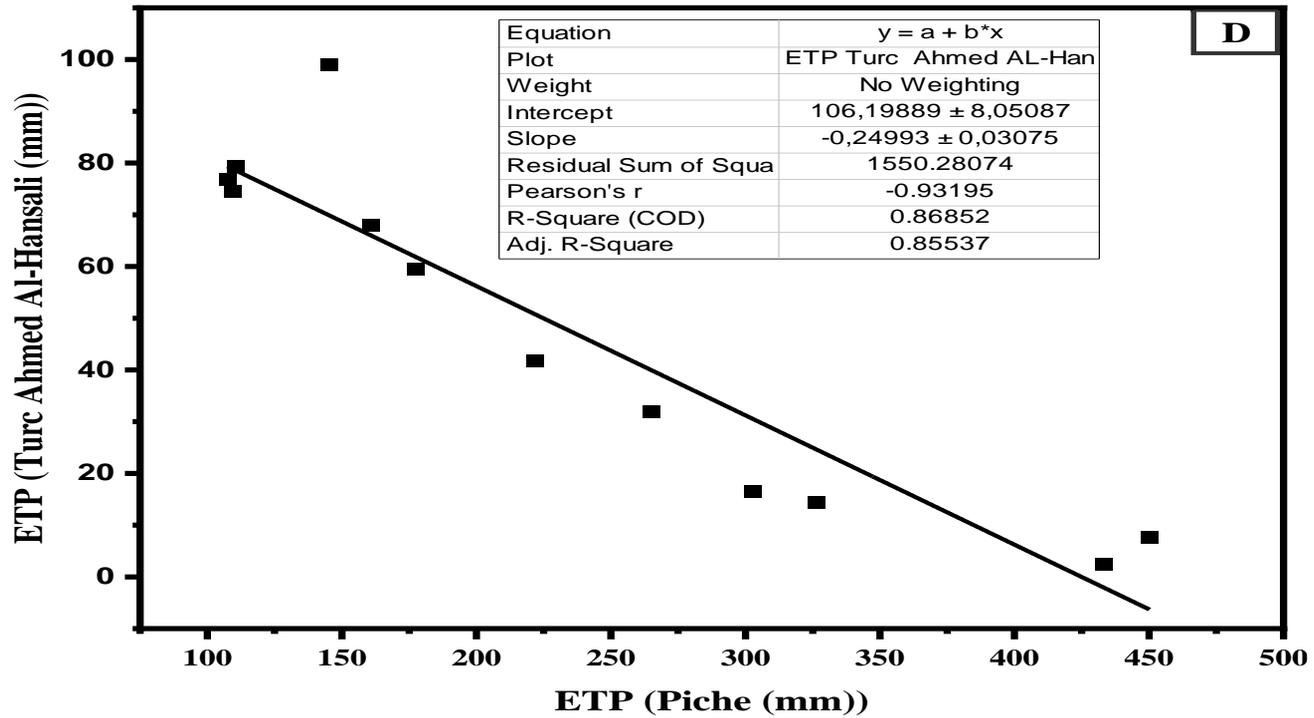


Figure C. Corrélation entre ETP (Thornthwaite Ahmed Al-Hansali ) et ETP (Piche)



**Figure D.** Corrélation entre ETP(Turc Ahmed Al-Hansali) et ETP (Piche)

**Figure 10 :** Courbes (A,B,C,D) des corrélations des résultats obtenus par différentes méthodes par rapport à Piche

## Conclusion

Cette étude a permis l'estimation de l'évapotranspiration par les méthodes de Thornthwaite, Turc, Piche (méthodes empiriques); en se basant sur les variables climatiques (température, humidité relative, vitesse du vent, durée d'insolation), qui à des influences climatiques diverses variant du Nord au Sud et de l'Ouest vers l'Est. Cela se manifeste par une tendance à la hausse des températures avec un réchauffement de l'ordre de 2 °C et une tendance généralisée à la baisse des précipitations de 20 %.

Les précipitations sont caractérisées également par une extrême irrégularité qui se manifeste au cours d'une même année et d'une année à l'autre (Boundi & Yacine, 2020). L'analyse des informations pluviométriques disponibles depuis le début du siècle a montré que la plaine du Tadla a connu des excédents et des déficits pluviométriques qui s'équilibraient. Mais depuis les années quatre-vingt, cet équilibre a été rompu et l'on a assisté à un très fort déséquilibre entraînant une sécheresse très aiguë. Cette sécheresse, la plus importante enregistrée depuis le début du siècle a entraîné une baisse spectaculaire des ressources en eaux souterraines (Hammani et al., 2006)

L'analyse de l'évolution pluriannuelle des volumes de précipitations en certaines stations de la plaine confirme clairement les tendances à la baisse des apports pluviométriques. La décroissance de ces apports associée au pompage intensif de la nappe s'est traduite par une baisse spectaculaire et généralisée du niveau de la nappe phréatique. Dans les prochaines décennies, l'incertitude des fluctuations climatiques, la croissance démographique, l'augmentation des besoins socio-économiques et les risques de pollution exacerberont les problèmes de disponibilité de cette ressource en quantité et qualité. Ceci accentuera la tension entre l'offre et la demande et laisse présager des situations extrêmes dans un horizon proche. De telles situations se reproduiront dans l'avenir et peut-être même plus fréquemment si on les rattache au phénomène de désertification qui affecte l'Ouest africain et à l'ampleur des changements climatiques à l'échelle planétaire.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

## References:

1. Akhal, N., Tofail, U. I., & Territoire, D. (n.d.). Les eaux souterraines au périmètre irrigué de Tadla entre le risque du réchauffement climatique et la demande en eau d'irrigation. 191–197.
2. Boukaa, H., Chemseddine, M., Abbassi, M., & Brun, J. (2001). La pyrale des dattes dans la région de Tafilalet au Sud-Est du Maroc. *Fruits*, 56(3), 189–196. <https://doi.org/10.1051/fruits:2001122>
3. Boundi, A., & Yacine, Z. A. I. T. (2020). Variability of rainfall regime in an agricultural region with a semi-arid climate : Case of Tadla irrigated perimeter ( continental Morocco ). 19(1), 31–45.
4. Costel, L. A., Robin, M., Université, P., Rapporteur, D. N., Loveland, T., De, D., Sioux, U., & Examineur, F. (2008). Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution. 2.
5. Fatah, B., Mohamed, B., & Abdelhamid, G. (2011). Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride ( cas de la région de Djelfa ). *March* 2020, 109–116.
6. Hammani, A., Kuper, M., Bekkar, Y., Zaz, H., Hammani, A., Kuper, M., Bekkar, Y., & Exploitation, H. Z. (2006). Exploitation des eaux souterraines dans le perimetre irrigue de Tadla (Maroc). Etat des lieux et elements de methodologie pour contribuer a une reflexion sur une gestion integree et durable des eaux souterraines et de surface. *Economies d'eau En Systèmes IRrigués Au Maghreb. Deuxième Atelier Régional Du Projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31 Mai 2006*.
7. Hsissou, Y., Chauve, P., & Mania, J. (1996). L'aquifere des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla, Maroc). *Alimentations locales et lointaines a partir de l'Atlas. Journal of Hydrology*, 183(3–4), 433–443. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03010-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03010-7)
8. Igbadun, H. E., Mahoo, H. F., Tarimo, A. K. P. R., & Salim, B. A. (2006). Performance of Two Temperature-Based Reference Evapotranspiration Models in the Mkoji Sub-Catchment in Tanzania. *Agricultural Engineering International*, 8, 1–19.
9. M. Hafid, G. Tari, D. Bouhadioui, I. El Moussaid, H. Echarfaoui, A. Aıt Salem, M. N. and M. D. (2008). Continental Evolution: The Geology of Morocco. In *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (Vol. 116, Issues 3–4). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77076-3>
10. Mengoub, F. E., Agronomique, I., & Ii, H. (2021). Impacts De La Politique De Reconversion Des Systèmes D'irrigation Gravitaire vers l'irrigation Localisée : Cas Du Sous Bassin Du Tadla Azilal  
Economic and Resource Impacts of the Policy of Conversion to

- Localized Irrigation Systems : Case of the Tadla Azilal Region. 46–70.  
<https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n24p46>
11. Mutti, P., Dubreuil, V., Bezerra, B., Mutti, P., Dubreuil, V., Bezerra, B., La, C. D. E., Le, D., Du, B., São, F., Évolution, B., & Bilan, D. U. (2022). CARACTÉRISATION DE LA SÉCHERESSE DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÃO FRANCISCO , BRÉSIL : ÉVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE SUR LA PÉRIODE 1942-2016 To cite this version : HAL Id : halshs-03615769.
  12. Ouchouia, I., & Chaouki, A. (2022). De la variabilité climatique au changement du régime hydrologique dans le bassin de l ’ oued Ouzoud / Haut Atlas Central / Maroc To cite this version : HAL Id : hal-03581861.
  13. Radouani, F., Najine, A., Aïfa, T., & Ouzerbane, Z. (2013). Reconnaissance du système aquifère du nord-ouest de la plaine du Tadla ( Maroc central ) par imagerie électrique. 4(1), 33–41.
  14. Radouani, F., Najine, A., Aïfa, T., Ouzerbane, Z., & Badrane., S. (2013). Reconnaissance géophysique et hydrogéologique par imagerie électrique du secteur nord-ouest de la plaine du Tadla (Centre du Maroc). Sixième Colloque Maghrébin de Géophysique Appliquée, 157–159.
  15. Science, E. (2022). Potential Alternative Evapotranspiration Estimation Methods for Batu Pahat Climatic Condition: A Quantitative Comparison Potential Alternative Evapotranspiration Estimation Methods for Batu Pahat Climatic Condition: A Quantitative. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1022/1/012078>
  16. Xu, C. Y., & Chen, D. (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*, 19(18), 3717–3734. <https://doi.org/10.1002/hyp.5853>