UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Université Sultan Moulay Slimane
Beni Mellal

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Thèse de Doctorat de l'Université Sultan Moulay Slimane - Maroc
et de l'Université de Lorraine - France

Centre doctoral des Lettres et des Sciences Humaines
Dynamiques des Paysages et Patrimoine
Laboratoire : DPRP-url-cnrst

Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine-URL-CNRST

École doctorale :
Humanités Nouvelles - Fernand Braudel
Laboratoire : LOTERR

LOTERR
Centre de recherche en géographie

Discipline : Géographie
Spécialité : Hydrologie

Quantification, modélisation et usages des ressources en eau dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Amont du barrage Ahmed El Hansali, Maroc)

Thèse réalisée en co-tutelle internationale n° 2019-00570

Préparée par :
Tarik EL ORFI

sous la direction de :

Mohamed EL GHACHI, USMS, DPRP - Maroc
Ionel HAIDU, Université de Lorraine, LOTERR - France
Sébastien LEBAUT, Université de Lorraine, LOTERR - France

soutenue publiquement le : 14 décembre 2023

Membres du jury :

Directeurs de thèse :	**Mohamed EL GHACHI**	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal
	Ionel HAIDU	Professeur, Université de Lorraine, Metz
Co-directeur :	**Sébastien LEBAUT**	Maître de conférences, Université de Lorraine, Metz
Président de jury :	**Farid JAA**	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal
Rapporteurs :	**Alain DEVOS**	Professeur, Université de Reims, Reims
	Rachida EL MORABET	Professeure Habilitée, Université Hassan II, Mohammedia

Année universitaire 2022-2023

Remerciements

Je rends grâce à Dieu de m’avoir donné la force, la patience et la persévérance qui m'ont permis de mener à bien ces travaux de thèse. Sans Sa bénédiction, cela n'aurait pas été possible.

La sincère gratitude envers tous ceux qui ont apporté leur soutien, chacun à leur manière, est incomparable. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail grâce à leur collaboration et leur appui. En ce moment propice, je souhaite tout particulièrement adresser mes remerciements aux :

Responsables du projet "RECHERCHE", les professeurs **Mohamed El Ghachi** et **Emmanuel Gille**, pour les efforts qu'ils ont déployés en vue de la réussite du projet. Leur expertise scientifique, leur sens de l'humanité et leurs encouragements ont été d'une grande valeur. J'exprime également ma sincère gratitude envers tous les membres de la coopération franco-marocaine du projet pour leur aimable inclusion de ma personne dans cette initiative.

Directeurs de thèse, les professeurs **Mohamed El Ghachi**, **Ionel Haidu** et **Sébastien Lebaut**, pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement tout au long des années de thèse. Leur expertise scientifique, leur sens de l'humanité, leurs encouragements, leur enthousiasme et leur disponibilité exemplaire ont été des éléments précieux pour la réalisation de ce travail. J'ai eu la chance d’être guidé par des professeurs de premier plan, et je leur suis profondément reconnaissant pour leur générosité intellectuelle, leur bienveillance et leur engagement dans ce travail, qui ont grandement enrichi mon parcours académique. Aucune expression ne pourra traduire, la profondeur des sentiments que j’éprouve pour vous.

Il est également de mon devoir et un privilège pour moi d'exprimer ma sincère gratitude envers tous les professeurs de géographie à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Béni Mellal, pour leurs conseils, leurs encouragements et leur soutien, ainsi qu'envers tous les membres du laboratoire "DPRP-url-cnrst".

Je souhaite exprimer ma plus sincère gratitude envers tous les membres de l'équipe de recherche "LOTERR", pour leur accueil chaleureux et leur générosité inestimable en partageant leurs compétences et connaissances. Leurs qualités, tant sur le plan scientifique qu'humain, ainsi que leur exemplaire humilité, sont dignes d'admiration. Je remercie également les membres du comité de suivi, les professeurs **Gille Drogue** et **Claire Delus**, pour avoir accepté de suivre l'évolution de nos travaux. Leurs remarques pertinentes et leurs orientations avisées ont grandement amélioré la qualité de notre travail.

Je tiens également à exprimer ma plus profonde gratitude envers les membres distingués du jury, les professeurs **Farif Jaa**, **Rachida El Mourabit** et **Alain Devos**, pour avoir accepté de m'honorer en évaluant ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes anciens professeurs du département de géologie à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, avec une mention spéciale pour le professeur **Abdelhalim Benyoucef**, que je tiens en haute estime.

J'exprime également ma reconnaissance envers le personnel de l'ABHOER, de l’ANEF de Béni Mellal-Khénifra, de la DPA de Khénifra, et de l'ORMVAT à Fkih Ben Salah. Leur précieuse contribution en fournissant les données nécessaires a grandement contribué à la réussite de ce travail. Je souhaite exprimer une reconnaissance particulière envers M. **Ahmed Elkhider**, dont l'aide précieuse lors du travail sur le terrain a été inestimable. Je tiens à souligner que je n'oublierai jamais sa disponibilité et sa présence à mes côtés. Je vous remercie du fond du cœur.

Je remercie également Dr. Omar **Ghadban**, ainsi que nos ancien docteurs, Prof Nadia **Lahlou**, Prof Bouazza **Sallak**, Dr. Mohamed **Chakir**, Dr. Hassan **Ouakhir**, Dr. Jawad **El Hawari**, Dr. Rachid **Bissour**, pour leur précieuse assistance et leur soutien. De même, je tiens à remercier tous nos "Artistes" passionnés d'hydrologie sous la direction de M. Mohamed **El Ghachi**, ainsi que tous les membres de l'Association des Chercheurs Géographes sur l'Eau et l'Environnement "ACG_2E", pour leur aimable soutien et leurs encouragements.

Je ne peux échapper à diriger mes pensées vers mes parents dont l'amour et les prières ont représenté une source inestimable de soutien tout au long de mon parcours. Merci mes parents, mon frère **Yassin** qui m'a soutenue à fond, ma sœur et notre cher **Ziad**, ma femme et sa famille. Je vous aime tous profondément, et je m'excuse si parfois je vous ai accordé moins d'attention lors de périodes chargées.

À toutes ces personnes, ainsi qu'à l'ensemble de mes amis, que je ne peux pas tous citer en raison de leur grand nombre, je dédie humblement ce travail.

Quantification, modélisation et usages des ressources en eau dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Amont du barrage Ahmed El Hansali, Maroc)

Résumé

Les changements climatiques résultant des activités humaines sont un fait établi, avec une augmentation rapide de la température à la surface du globe. En raison de son emplacement géographique, le Maroc est naturellement aride, caractérisé par des précipitations irrégulières et des ressources en eau limitées. Cette situation est d'autant plus préoccupante avec l'effet conjugué de la croissance démographique, qui exerce une pression accrue sur ces précieuses ressources en eau.

Cette thèse traite une problématique visant l'évaluation de la ressource en eau disponible dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia "HaB-OER", en amont du barrage Ahmed El Hansali "b'AEH". Ce bassin constitue l'un des bassins majeurs qui alimentent en permanence l'Oum Er Rbia grâce notamment aux fameuses sources de l'Oum Er Rbia. Il s'étend sur une superficie de 3380 km², et se situe au cœur du Maroc, au niveau de la jonction entre le Moyen Atlas et la Meseta centrale. Les contrastes Géo "graphiques, logiques, morphologiques" du HaB-OER entre les deux domaines sont à l'origine de différences spatiales d'un ensemble de facteurs. Contrairement au domaine de la Meseta, le domaine du Moyen Atlas se caractérise par un climat plus humide, une densité élevée de couverture forestière, et une prédominance des formations calcaires karstiques. Cela favorise l'infiltration des précipitations et la recharge de la nappe phréatique. L'émergence de cette nappe conduit à la formation de nombreuses sources, parmi lesquelles les plus importantes sont celles de l'Oum Er Rbia, qui contribuent à la régulation et à la pérennité de l'écoulement de cette rivière tout au long de l'année.

Ces travaux contribuent à la compréhension des transformations territoriales au niveau du HaB-OER, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, et de leur interaction dans ces zones de montagne. Pour ce faire, une démarche "hydrologique géographique" basée sur des données multi-sources a été mise en place. L'essentiel des travaux porte sur les données hydro-climatiques observées sur la période 1975-76 à 2018-19 par les services institutionnels, ainsi que sur les informations dérivées des images satellites depuis le début des années 1980. Notre analyse s'appuie également sur des données originales produites dans le cadre des travaux de terrain réalisés dans la zone entre 2018 et 2022, pour le suivi des cours d'eau, des sources, des lacs et des puits. Elles concernent la connaissance des rendements hydrologiques à l'échelle spatiale fine et les modalités d'usages et de gouvernance de la ressource. L'approche a impliqué l'utilisation de méthodes d'hydrologie analytique, de modélisation hydrologique et de modélisation climatique prédictive pour quantifier les ressources en eau de surface et souterraine et les mettre en relation avec les facteurs naturels et anthropiques sur une période allant du passé récent (1975) à un futur proche (2050), moyen (2070) et lointain (2100).

En ce qui concerne les principaux résultats, le barrage d'AEH, destiné à l'irrigation d'un vaste périmètre agricole, est alimenté par un écoulement annuel moyen de 760 hm^3, dont 128 hm^3 proviennent des crues, ce qui représente environ 17% du total. La contribution maximale provient de l'Oum Er Rbia, avec 500 hm^3, soit 66% des apports. Les volumes annuels moyens en eau souterraine contribuant aux débits sont d'environ 600 hm3, dont la part de l'Oum Er Rbia dépasse les 80%. Ces données soulignent l'importance cruciale de la contribution des nappes souterraines à l'alimentation des cours d'eau du HaB-OER. Par ailleurs, en plus de la diminution qu'a connue le b'AEH au cours des dernières années, les projections futures indiquent que les apports en eau continueront à décroître. Cette diminution atteint, à la fin des années 2050, 16 % à 26 % par rapport au débit de référence, selon les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Elle s'accentue davantage vers les années 2100, atteignant simultanément 23 % et 53 %.

Mots clés : Moyen Atlas (Maroc), Oum Er Rbia, Ressources en eau, Quantification, Modélisation, Projections futur, Usages.

Quantification, modeling, and uses of water resources in the Upper Oum Er Rbia Basin (Upstream of Ahmed El Hansali dam, Morocco)

Abstract

Climate change due to human activity is an established fact, with a rapid increase in global surface temperature. Because to its geographical location, Morocco is considered as an arid zone, characterized by irregular rainfall and limited water resources. This situation is becoming increasingly concerning with the combined effects of demographic growth, which are exerting greater pressure on these valuable water resources.

This thesis evaluate the available water resources in the Upper Oum Er Rbia Basin "UpB-OER", upstream of the Ahmed El Hansali Dam "AEH'd". This basin is one of the most basins that permanently feed the Oum Er Rbia River, in particular, because of to the Oum Er Rbia sources. It covers an area of 3380 km², sited in the heart of Morocco, at the junction between the Middle Atlas and the Central Meseta. The Geo "graphic, logical, morphological" contrasts of the UpB-OER between the two domains are at the origin of spatial differences of a set of factors. In contrast to the Meseta domain, the Middle Atlas is characterized by a humid climate, a very dense forest cover, and a predominance of karstic limestone formations. This favors rainfall infiltration and groundwater recharge. The emergence of this water table leads to the creation of numerous sources, the most important of which are those of the Oum Er Rbia, which help to regulate and maintain the flow of this river throughout the year.

This work contributes to the understanding of territorial transformations at UpB-OER, whether of natural or anthropogenic origin, and their interaction in these mountain areas. To achieve this, a "geographical hydrology" approach based on multi-source data has been implemented. Most of the work focuses on hydro-climatic data observed over the period 1975-76 to 2018-19 by institutional services, as well as information derived from satellite images since the early 1980s. Our analysis also draws on original data produced as part of fieldwork carried out in the area between 2018 and 2022, for monitoring rivers, sources, lakes and wells. They concern knowledge of hydrological yields on a fine spatial scale, and the ways in which the resource is used and governed. The approach involved the use of analytical hydrology, hydrological modelling and predictive climate modelling methods to quantify surface and groundwater resources and relate them to natural and anthropogenic factors over a period ranging from the recent past (1975) to the near (2050), medium (2070) and distant (2100) future.

Regarding the main results, the AEH'd, designed to irrigate a vast agricultural area, is fed by an average annual runoff of 760 hm^3, of which 128 hm^3 comes from flooding, representing around 17% of the total. The maximum contribution comes from the Oum Er Rbia, with 500 hm^3, or 66% of inflows. The average annual volume of groundwater contributes to flows is around 600hm^3, of which the Oum Er Rbia accounts for over 80%. These figures underline the crucial importance of groundwater in supplying the UpB-OER's watercourses. What's more, in addition to the decline experienced by the AEH'd in recent years, future projections indicate that water supplies will continue to fall. By the end of the 2050s, this decrease reached 16% to 26% compared with the reference flow, according to the two scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. By the 2100s, the decline is even more pronounced, reaching 23% and 53% simultaneously.

Keywords: Middle Atlas (Morocco), Oum Er Rbia, Water resources, Quantification, Modeling, Future projections, Uses.

تكميم ونمذجة واستغلال الموارد المائية بحوض أم الربيع (عالية سد أحمد الحنصالي، المغرب)

ملخص

إن التغيرات المناخية الناجمة عن الأنشطة البشرية هي حقيقة ثابتة، حيث أدت إلى ارتفاع سريع في درجة حرارة سطح الأرض. وفي هذا السياق، ونظرا لموقعه الجغرافي، يتميز المغرب بمناخ جاف يتسم بعدم انتظام التساقطات المطرية ومحدودية الموارد المائية. وقد أصبح الوضع معقدا للغاية، نظرا لتأثير النمو الديموغرافي المتزايد والضغط الكبير على هذه الموارد المائية الثمينة.

تتناول هذه الأطروحة إشكالية تقييم الموارد المائية المتاحة في حوض أم الربيع "HaB-OER" عالية سد أحمد الحنصالي "b'AEH". يشكل هذا الحوض أحد الروافد الرئيسية التي تساهم في استدامة صبيب واد أم الربيع بفضل مجموعة من العيون ذات الأصل الكارستي، أهمها عيون أم الربيع. يمتد حوض أم الربيع (عالية سد أحمد الحنصالي) على مساحة تقدر بـ 3380 كلم²، و يتميز بتنوع خصائصه الطبوغرافية، حيث يضم جزء من الأطلس المتوسط والميسيتا الوسطى. كما يتميز بتباين واختلاف خصائصه الجيولوجية (هيمنة التكوينات الكلسية الكارستية) والمورفولوجية والمناخية، إذ يتسم الأطلس المتوسط بشكل عام بمناخ رطب تقابله كثافة في الغطاء النباتي الغابوي، الأمر الذي يعزز النفاذية وتغذية الفرشات المائية الباطنية.

تهدف هذه الدراسة إلى فهم التفاعلات والتحولات المجالية بالمناطق الجبلية بعالية حوض أم الربيع، وذلك في إطار علاقتها بالعوامل الطبيعية والبشرية. لتحقيق ذلك، تم الاعتماد على منهج "هيدرولوجي جغرافي" بالاستعانة بمعطيات متعددة المصادر، تشمل أساسا المعطيات الهيدرومناخية التي تم رصدها خلال الفترة الممتدة من 1974-1975 إلى 2018-2019 من طرف وكالة الحوض المائي لأم الربيع. و قد تم أيضا استخدام المعطيات التي تم استخراجها باعتماد الأقمار الاصطناعية منذ ثمانينات القرن الماضي. كما استندت دراستنا كذلك على المعطيات الخام التي تم إنتاجها من خلال العمل الميداني بمجال الدراسة لمدة خمس سنوات من 2018 إلى 2022، حيث تم تتبع الوضع الوضعية المائية للأودية والمنابع والبحيرات والآبار. يهدف ذلك إلى تحديد العائد الهيدرولوجي بدقة على المستوى المجالي وفهم أفضل لطرق استغلال وإدارة الموارد المائية. كما تم الاعتماد في هذه الدراسة أيضا على المقاربة التحليلية والنمذجة الهيدرولوجية والمناخية التنبؤية لتقدير كمية الموارد المائية السطحية والجوفية و تحديد علاقتها بالعوامل الطبيعية والبشرية على مدى فترة زمنية تمتد من الماضي القريب (1975) إلى المستقبل القريب (2050) والمتوسط (2070) والبعيد (2100).

فيما يتعلق بأهم النتائج، فقد تبين أن سد أحمد الحنصالي، الموجه لري دوائر فلاحية واسعة، يستقبل واردات مائية سنوية بمعدل قدره 760 hm^3، منها 120 hm^3 ناتجة عن الامتطاحات، وهو ما يمثل حوالي 17% من إجمالي الواردات، مع مساهمة قصوى لحوض أم الربيع تبلغ 500 hm^3، أي ما يعادل 66% من إجمالي الواردات. بينما يقدر المعدل السنوي لحجم المياه الجوفية المساهمة في الصبيب بـ 600 hm^3، حيث تتجاوز حصة المجرى الرئيسي لواد أم الربيع 80% منها. تؤكد هذه المعطيات إذن من جهة على الأهمية البالغة للإمدادات المائية الجوفية في تغذية المجاري المائية لعالية حوض أم الربيع. و من جهة أخرى، وبالإضافة إلى انخفاض مخزون سد أحمد الحنصالي في السنوات الأخيرة، تشير التنبؤات المستقبلية إلى أن الواردات المائية ستستمر في الانخفاض. حيث من المتوقع أن تنخفض في أفق سنة 2050، ما بين 16% إلى 26% مقارنة بالصبيب المرجعي، وفق السيناريوهين RCP 4.5 و RCP 8.5. وستكون النزعة نحو الانخفاض أكثر قوة في أفق سنة 2100، لتصل على التوالي إلى 23% و53%.

الكلمات المفتاحية: الأطلس المتوسط (المغرب)، أم الربيع، الموارد المائية، النمذجة، السيناريوهات المستقبلية، استغلال.

Table des matières

Remerciements 1
Résumé 3
Abstract 4
ملخص 5
Liste des abréviations 10

Introduction générale 13

Chapitre 1 : Contexte de l'étude, problématique, objectifs et méthodologie 15

1.1 Introduction 16
1.2 Cadre de la thèse 16
1.3 Cadre conceptuel du sujet 17
1.3.1 Concept et typologie des ressources en eau 17
1.3.2 Quantification des ressources en eau 18
1.3.3 Modèles et modélisation hydrologique 18
1.3.4 Usage et utilisation de l'eau 19
1.4 Présentation de la zone d'étude 20
1.5 Problématique de l'étude 21
1.6 Le Moyen Atlas : une source riche d'études et de références bibliographiques 23
1.6.1 Les spécificité Géo "graphiques, logiques, morphologiques" du Moyen Atlas 23
1.6.2 Exploration du climat méditerranéen montagnard 26
1.6.3 Le Moyen Atlas : le cœur hydrologique du Maroc 28
1.6.4 L'écosystème des cèdres, une richesse de biodiversité 30
1.6.5 Population au Moyen Atlas : de la transhumance à la sédentarisation 32
1.7 Objectifs et méthodologie de travail 34
1.7.1 Objectifs 34
1.7.2 Justification et intérêt du sujet 34
1.7.3 Méthodes adoptées et démarche suivie 35
1.8 Structure de la thèse 37
1.9 Conclusion 38

Chapitre 2 : Le complexe physico-humain du HaB-OER 39

2.1 Introduction 40
2.2 Les caractéristiques morphologiques du HaB-OER 40
2.2.1 Paramètres géométriques du HaB-OER 40
2.2.2 Caractéristiques topographiques : Contraste entre la Meseta et le Moyen Atlas 42
2.3 Contexte géologique du HaB-OER et spécificité des sources de l'Oum Er Rbia 46
2.3.1 Le HaB-OER : une diversité lithologique dominée par les calcaires liasiques 46
2.3.2 Le contexte géologique des sources de l'Oum Er Rbia 48
2.4 Les caractéristiques hydro-morphométriques du HaB-OER 49
2.4.1 L'Oum Er Rbia et le Srou : les deux cours d'eau les plus importants du HaB-OER 49
2.4.2 Cours d'eau principaux et profils en long 50
2.4.3 Indices hydro-morphométriques des cours d'eau du HaB-OER 50
2.5 Le couvert forestier dans le HaB-OER 51
2.5.1 Caractéristiques des principales forêts du Hab-OER 51
2.5.2 Principales essences forestières et leur prédominance dans le HaB-OER 52
2.6 Les caractéristiques démographiques du HaB-OER 54
2.7 Conclusion 55

Chapitre 3 : Données d'observations aux stations et satellitaires pour l'étude climatique du HaB-OER 56

3.1 Introduction 57
3.2 Contexte climatique général 57
3.3 Analyse et interprétation des données climatiques observées aux stations dans le HaB-OER 58
3.3.1 La pluviométrie : le premier paramètre à considérer pour l'étude de la ressource en eau 58
3.3.2 L'évapotranspiration, l'autre élément crucial dans l'équation des ressources en eau 68

3.4 La révolution satellitaire : un nouveau monde de données climatiques 73
3.4.1 Les données pluviométriques satellitaires 73
3.4.2 Les données de températures et d'évapotranspiration 76
3.5 Monitoring pour la mesure des principales propriétés de la neige 81
3.5.1 Mesure des principales propriétés de la neige 81
3.5.2 Implantation d'équipement pour le suivi des propriétés de la neige 82
3.5.3 Lame d'eau des précipitations neigeuses dans le HaB-OER entre 2019 et 2021 83
3.5.4 Couverture neigeuse et son influence sur les ressources en eau 85
3.6 Conclusion 86

Chapitre 4 : Étude hydrologique pour l'évaluation des ressources en eau dans le HaB-OER 87

4.1 Introduction 88
4.2 Disponibilité des données et contexte hydrologique 88
4.2.1 Disponibilité et critique des données 88
4.2.2 Analyse des modalités des écoulements dans le HaB-OER 89
4.3 Les crues comme opportunité pour maximiser l'utilisation de la ressource en eau 92
4.3.1 Intérêt des recherches sur les crues 92
4.3.2 Variabilité temporelle des débits instantanés maxima 92
4.3.3 Analyse des épisodes de crue 93
4.3.4 Evaluation des ressources en eau 96
4.3.5 Evolution spatio-temporelle des volumes des écoulements totaux 98
4.4 Les réserves régulatrices, l'autre ressource en eau exploitée pendant les étiages 99
4.4.1 Importance de l'analyse des étiages pour la gestion de l'eau 99
4.4.2 Caractéristiques des étiages dans le HaB-OER 100
4.4.1 Tarissement des débits des cours d'eau 102
4.5 Mise en place d'un réseau hydrométrique complémentaire au réseau institutionnel 108
4.5.1 Intérêt du suivi de l'organisation spatiale de la ressource en eau 108
4.5.2 Mise en œuvre du dispositif de mesure sur des bassins homogènes 108
4.5.3 Exploration hydrologique pour mieux comprendre le HaB-OER 110
4.6 Conclusion 113

Chapitre 5 : Suivi et analyse de l'évolution des lacs et des sources du HaB-OER 115

5.1 Introduction 116
5.2 Détection de la dynamique des étendues d'eau des principaux lacs du HaB-OER 116
5.2.1 Ecosystèmes limniques représentatifs du HaB-OER 116
5.2.2 Méthodologie de suivi de l'évolution des étendues des lacs du HaB-OER 120
5.2.3 Impact de la variabilité climatique sur la dynamique de la superficie des lacs 123
5.2.4 Evolution du volume du LAZ 125
5.3 Suivi et mesures des principales sources du HaB-OER 128
5.3.1 Présentation des sources du HaB-OER 128
5.3.2 Hydrologie des sources 130
5.4 Conclusion 133

Chapitre 6 : Modélisation pluie débit : choix, structure et performance 135

6.1 Introduction 136
6.2 Modélisation hydrologique pluie-débit et choix de modèles 136
6.3 La structure des modèles 137
6.3.1 Description des modèles GR 137
6.3.2 Le modèle SWAT 139
6.4 Les variables et paramètres 140
6.4.1 Les variables de forçage 140
6.4.2 Les paramètres 141
6.5 Choix des méthodes, périodes de calage et de validation 142
6.5.1 Les modèles GR 142
6.5.2 Le modèle SWAT 144
6.6 Les indices de performances des modèles 145

6.7 Mise en œuvre et résultats 146
6.7.1 Modèles GR 146
6.7.2 SWAT 148
6.8 Comparaison entre GR et SWAT 151
6.9 Conclusion 152

Chapitre 7 : Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le HaB-OER 154

7.1 Introduction 155
7.2 Méthodologie de l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau 155
7.3 Modèles et projections climatiques 156
7.3.1 Modèles de circulation globale (MCG) 156
7.3.2 Modèles de circulation régional (MCR) 157
7.3.3 Programme CORDEX : avancée majeure dans la réduction d'échelle 158
7.4 Modélisation climatique prédictive dans le HaB-OER 159
7.4.1 Choix des modèles et scénarios climatiques 159
7.4.2 Correction du biais et simulations de données climatiques 160
7.4.3 Evaluation de la pertinence des débits estimés 162
7.5 Changement spatio-temporel futur des paramètres climatiques 163
7.5.1 Projections climatiques dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 163
7.5.2 Cartographie des changements spatiaux des paramètres climatiques futurs 167
7.6 Impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau dans le HaB-OER 169
7.6.1 Caractéristiques des sécheresses sous l'impact des changements climatiques 169
7.6.2 Impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau dans le HaB-OER 172
7.7 Convergence sur les impacts hydrologiques des changements climatiques à l'échelle régionale 174
7.8 Conclusion 175

Chapitre 8 : L'érosion hydrique : un vrai défi pour la ressource en eau du b'AEH 176

8.1 Introduction 177
8.2 Intérêt du b'AEH dans la gestion des ressources en eau régionales 177
8.2.1 Le b'AEH : un atout stratégique national 177
8.2.2 Suivi temporel des volumes d'eau stockés dans le b'AEH 178
8.2.3 Bilan hydrique du b'AEH 182
8.3 Etude de la dynamique du couvert forestier 185
8.3.1 Intérêt de l'étude du changement de couvert forestier 185
8.3.2 Classification supervisée des images Landsat 185
8.3.3 Apport de "GEE" pour préciser la dynamique du couvert forestier 189
8.4 Impact de la dynamique du couvert végétal sur l'érosion hydrique 190
8.4.1 Le modèle "RUSLE" 190
8.4.2 Description et analyse des facteurs d'érosion au niveau du HaB-OER 190
8.4.3 Quantification de l'érosion au niveau du HaB-OER en 1985 et 2020 193
8.5 L'envasement : un autre facteur de réduction de la capacité du b'AEH 195
8.5.1 Estimation de l'envasement à l'aide du modèle RUSLE 195
8.5.2 Estimation de l'envasement à l'aide des mesures bathymétriques 195
8.6 Conclusion 196

Chapitre 9 : Ressources en eau dans le HaB-OER : opportunités agro-touristiques et menaces écologiques 197

9.1 Introduction 198
9.2 Présentation de la méthodologie adoptée 198
9.2.1 Collecte de données socio-économiques 199
9.2.2 Apport de la télédétection 199
9.2.3 Enquête 200
9.3 Méthodologie et protocole d'enquête 200
9.3.1 Méthode et techniques sociogéographiques 200
9.3.2 Méthode de passation et taille de l'échantillon 201
9.3.3 Prétraitement des données collectées 202

9.4 Le HaB-OER : un espace en transformation continue 202
9.4.1 Statut juridique et structure foncière 202
9.4.2 L'élevage : du pastoralisme vers les stabulations 203
9.4.3 La production agricole : d'une culture de subsistance à une culture commerciale 203
9.5 D'une gestion collective à un accaparement privé de l'eau 204
9.5.1 Origine de l'eau d'irrigation 204
9.5.2 Les puits dans le HaB-OER 205
9.5.3 Le réseau de canaux d'irrigation 207
9.5.4 Le système goutte à goutte 209
9.5.5 Les périmètres irrigués 211
9.6 L'eau : une ressource vitale d'intérêts écotouristique 213
9.6.1 Approvisionnement en eau potable dans la province de Khénifra 213
9.6.2 Livraisons d'eau pour l'OCP 214
9.6.3 Le HaB-OER : un trésor hydrique en terre de tourisme 215
9.7 Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques et à l'action de l'homme 217
9.7.1 Impact des changement climatiques sur les RE : cas des cascades 217
9.7.2 Impact des activité anthropiques sur les ressources en eau : cas du lac d'Aguelmam Abakhan 218
9.8 Conclusion 221

Chapitre 10 : GIRE : une alliance entre plans participatifs et sensibilisation proactive 223

10.1 Introduction 224
10.2 Lois de l'eau et plan stratégique : vers une GIRE au Maroc 224
10.2.1 Évolution institutionnelle et juridique de la gestion de l'eau au Maroc 224
10.2.2 Planification visionnaire pour une utilisation responsable de l'eau au Maroc 227
10.2.3 Intérêt et contraintes des contrats de gestion participative au Maroc 230
10.3 L'éducation et la sensibilisation à l'eau : piliers de la réussite des plans stratégiques 232
10.3.1 L'Éducation pour l'enrichissement des connaissances sur l'eau 232
10.3.2 La sensibilisation pour la préservation de l'eau au Maroc 234
10.4 Conclusion 239

Conclusion générale 242

Références bibliographiques 246
Annexes 280
Liste des cartes 349
Liste des figures 350
Liste des tableaux 353
Liste des photos 355
Liste des planches photos 356

Liste des abréviations

Stations et lacs

HaB-OER	Haut Bassin versant de l'Oum Er Rbia	**OER**	Oum Er Rbia
Ahm	Ahmed El Hansali	**b'AEH**	Barrage Ahmed El Hansali
Ava	Aval El Héri	**LAZ**	Lac d'Aguelmam Azigza
Cha	Chacha n'Amellah	**LaT**	Lacs de Tiglmamine
Tag	Taghzoute	**LaTiC**	Lacs de Tiglmamine Cenral
Tam	Tamchachat	**LAO**	Lac d'Aguelmam Ouiouan
Tar	Tarhat	**LAB**	Lac d'Aguelmam Abekhane

Mesures

Pa	Pluviométrie annuelle	**QtVar**	Débits à pas de temps variable
Pm	Pluviométrie mensuelle	**Qmj**	Débits journaliers
Tm	Température moyenne	**Qmens**	Débits mensuels
Tn	Température minimale	**CERC**	Coefficient d'Écoulement Rapide de Crue
Tx	Température maximale	**QMNA**	Débit mensuel minimal annuel
ET	Evapotranspiration	**VCNd**	Volume moyen minimal de l'année pendant "d" jours consécutifs
ETP	Evapotranspiration potentielle	**CV**	Coefficient de Variation
ETR	Evapotranspiration réelle	**σ**	Ecart type

Programmes nationaux et développement durable

GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat	**AEPI**	Alimentation en Eau Potable et Industrielle
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment	**BV**	Bassin Versant
MCG	Modèles de Circulation Globale	**CGP**	Contrats de Gestion Participative des nappes
MCR	Modèles de Circulation Régional	**GEE**	Google Earth Engine
RCP	Representative Concentration Pathway	**GIRE**	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
URH	Unité de réponse hydrologique	**PDAIRE**	Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
ODD	Objectifs de Développement Durable	**PIB**	Produit Intérieur Brut
EDD	Education au Développement Durable	**PMV**	Plan Maroc Vert
EEDD	Education à l'Environnement vers un Développement Durable	**PNE**	Plan National de l'Eau
SON	Automne : Septembre, Octobre et Novembre	**PNEEI**	Programme National d'Économie d'Eau en Irrigation
DJF	Hiver : Décembre, Janvier et Février	**RE**	Ressources en Eau
MAM	Printemps : Mars, Avril et Mai	**SIBE**	Sites d'Intérêt Biologique et Ecologique
JJA	Eté : Juin, Juillet Août	**SNE**	Stratégie Nationale de l'Eau

Etablissements

ABH	Agence du Bassin Hydraulique
ABHOER	Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia
ACG$_2$E	Association des Chercheurs Géographes sur l'Eau et l'Environnement
AFD	Agence Française de Développement
ANCFCC	Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie de Rabat
ANEF	Agence Nationale des Eaux et Forêts
BAD	Banque Africaine de Développement
BM	Banque Mondiale
CEIBM	Centre d'Echange d'Information sur la Biodiversité du MAROC
CEMAGREF	Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts
CESE	Conseil Economique, Social et Environnemental
CRI	Centre Régional d'Investissement
CSEC	Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat
DEFM	Direction des Eaux et Forêts du Maroc
DGH	Direction Générale de l'Eau
DGM	Direction Générale de la Météorologie
DPA	Direction Provinciale de l'Agriculture
DPEFLCD	Direction Provinciale des Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification
DRA	Direction Régionale de l'Agriculture
DSS	Direction de la Stratégie et des Statistiques
ESTK	Ecole Supérieure de Technologie de Khénifra
FAO	Food and Agriculture Organization
HCEFLCD	Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification
HCP	Haut-Commissariat au Plan
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRES	Institut Royal des Etudes Stratégiques
LDPRP	Dynamiques des Paysages, Riques et Patrimoine
MAP	Agence Maghreb Arabe Presse
MAPMDREF	Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural, des Eaux et Forêts
MDMEMEE	Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement
MEMDD	Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement Durable
MTEDD	Ministère de la Transition Energétique et du Développement Durable
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONEEP	Office National de l'Electricité de l'Eau Potable
ONU	Organisation des Nations Unies
ORMVAT	Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Introduction générale

Introduction générale

Le concept de "point chaud" (Hot Spot) se définit comme une zone où les effets du changement climatique sur l'environnement ou sur différents secteurs d'activité peuvent être particulièrement prononcés (Giorgi, 2006). Selon un indice régional de changement climatique, la région méditerranéenne se classe parmi les 25 points chauds les plus préoccupants à l'échelle mondiale (GIEC, 2013). Les pays situés au Sud de la Méditerranée, y compris le Maroc, où la rareté de l'eau constitue déjà un facteur limitant, sont plus vulnérables aux effets du changement climatique par rapport aux pays du Nord (Saadi *et al*., 2015). En raison de ces changements, la diminution des ressources en eau représente le risque le plus critique, et ses conséquences ont déjà commencé à se faire sentir dans les pays qui en dépendent. L'effet combiné des perturbations naturelles et de la pression humaine a mis à l'épreuve les ressources hydriques disponibles dans ces régions.

En raison de sa situation géographique, le Maroc se caractérise par un climat influencé par l'océan Atlantique, la mer Méditerranée, le Sahara et les reliefs escarpés de la région de l'Atlas (Martin, 1981). Au cours des vingt dernières années, l'analyse des périodes de sécheresse révèle une augmentation de leur fréquence et de leur étendue géographique (Jouilil *et al.*, 2013). Les données climatiques des dernières décennies montrent une nette diminution des précipitations et du nombre de jours pluvieux au Maroc (Driouech, 2010). Si le Maroc a toujours été confronté à des défis importants liés à l'eau, ces variations climatiques récentes renforcent sa précarité vis-à-vis des ressources en eau et cela d'autant plus que les études basées sur les simulations des modèles climatiques prévoient une poursuite de cette tendance à la baisse des précipitations à l'avenir (Raible *et al*., 2010; Tramblay *et al*., 2012).

Les activités socio-économiques au Maroc reposent largement sur les ressources en eau, et la pluviométrie joue un rôle crucial pour divers secteurs (Driouech, 2010). L'agriculture, en particulier, occupe une place centrale sur les plans économique, social et territorial. Elle contribue significativement au PIB (environ 12 %) et est le principal pourvoyeur d'emplois (Attioui *et al*., 2020), ce qui la rend d'une importance primordiale dans l'économie marocaine. Toutefois, l'irrigation consomme à elle seule 86 % des ressources en eau (Harbouze *et al.*, 2019), ce qui dépasse la quantité disponible en ressources renouvelables d'eau douce. Étant donné que la production agricole et l'économie locale sont étroitement liées à la disponibilité de l'eau, elles sont susceptibles d'être impactées par les changements climatiques en cours et à venir *(Born et al*., 2008).

Dans ce contexte, le Moyen Atlas marocain occupe une position centrale en termes de ressources en eau et est souvent qualifié de "château d'eau du Maroc" (Bentayeb & Leclerc, 1977). Il joue un rôle essentiel en alimentant les trois principaux cours d'eau du pays : l'Oued Sebou, l'Oued Oum Er Rbia et l'Oued Moulouya, ce qui en fait le nœud hydrographique du Maroc. L'Oum Rbia, (Blache, 1919), également écrit comme l'Oum-er-Rbia (Blache, 1937; Bentayeb & Leclerc, 1977), l'Oum er Rebia (Loup, 1962), l'Oum er Rbia (Archambault, 1972), l'Oum er R'bia et l'Oum-Er-R'bia (Moniod, 1973),… est unanimement reconnu comme le deuxième fleuve le plus important du Maroc après le Sebou. Sa partie amont, le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia "HaB-OER", en amont du barrage Ahmed El Hansali "b'AEH", constitue l'un des bassins majeurs qui alimentent en permanence l'Oum Er Rbia grâce notamment aux fameuses sources de l'Oum Er Rbia considérées comme les plus importantes du Maroc.

En plus des rivières et des sources, cette région qui peut recevoir plus de 900 mm de précipitations en moyenne annuelle, est considérée comme la région montagneuse la plus riche en zones humides en Afrique du Nord, notamment en lacs naturels (Chillasse & Dakki, 2004). Sur le HaB-OER plusieurs lacs naturels endoréiques sont de véritables indicateurs sensibles des variations hydro-climatiques ; fonctionnant comme des pluviomètres naturels *(*Benkaddour *et al*., 2008), ils offrent ainsi un aperçu précieux des évolutions hydro-climatiques (Adallal *et al*., 2019). Outre leur importance sur le plan scientifique, ces lacs ont également un attrait touristique, offrant des espaces propices à diverses activités sportives et de loisirs de plein air, dans un cadre naturel magnifique et unique. Pour les préserver et sauvegarder leur biodiversité, la plupart de ces sites sont désignés comme des Sites d'Intérêt Biologique et Ecologique (SIBE) (Alaoui, 2015).

Pour optimiser les potentialités de ces ressources en eau malgré tout très variables dans le temps, depuis les années 1960, le Maroc a mis en œuvre une politique de construction de barrages qui a conduit à une capacité totale de stockage actuelle de 19,1 milliards de m^3, répartie entre 149 grandes retenues d'eau (Amara, 2021). Le bassin de l'Oum Er Rbia compte 5 ouvrages de régulation des débits et 13 ouvrages de prise ou de compensation, ce qui offre une capacité totale de mobilisation des ressources hydrauliques estimée à environ 4,86 milliards de m^3 en 2020 (ABHOER, 2018g), représentant ainsi 25% du stockage national total. Le complexe comprenant b'AEH (mis en service en 2001) et le barrage d'Aït Messaoud (mis en service en 2003) a pour objectif principal de maximiser la mobilisation des eaux de surface pour approvisionner en eau potable et industrielle plusieurs agglomérations, irriguer près de 36 100 hectares de terres agricoles, et produire de l'énergie électrique (ABHOER, 2018a).

Au tournant des années 1990, engagé sur la voie du développement durable, le Maroc a déployé des efforts sur les plans juridiques et réglementaires pour répondre aux enjeux du secteur de l'eau, notamment avec la refonte de la loi n° 10-95 et l'adoption de la nouvelle loi n° 36-15 relative à l'eau (MEMDD, 2017). Depuis lors, le pays a mis en place de nombreuses politiques et stratégies visant à garantir une Gestion Intégrée de Ressources en Eau (GIRE). Récemment, la nouvelle stratégie "Génération Green 2020-2030" vise à améliorer l'efficacité hydrique en mettant en œuvre le volet irrigation du Programme National pour l'Approvisionnement en Eau Potable et l'Irrigation pour la période "PNAEPI" 2020-2027, en poursuivant les programmes d'irrigation et d'aménagement, ainsi qu'en mobilisant les ressources en eau non conventionnelles (MAPMDREF, 2021).

A ce stade du déploiement de mesures structurelles et de politiques publiques concernant la ressource en eau, les travaux présentés ici contribuent à la compréhension des transformations territoriales au niveau du HaB-OER, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, et de leur interaction dans ces zones de montagne. Ils s'inscrivent dans la perspective de la GIRE, promue par "The Global Water Partnership - GWP", dont l'objectif est de trouver des solutions durables pour les générations futures en ce qui concerne la gouvernance de l'eau et sa gestion.

Chapitre 1 : Contexte de l’étude, problématique, objectifs et méthodologie

1.1 Introduction

Les notions de ressource en eau, d'usage et d'utilisation de l'eau, de besoin et de demande en eau, de prélèvement et de consommation… sont des concepts fondamentaux pour analyser et évaluer les situations préalables aux actions de gestion de l'eau (Erhard-Cassegrain & Margat, 1979). La complexité des questions liées à la gestion et à la préservation des ressources en eau requiert une approche globale permettant aux principaux acteurs de collaborer harmonieusement (A. Bouslihim & Torra, 2020). A l'échelle du HaB-OER, bassin versant représentatif du Moyen Atlas, la quantification et la modélisation des ressources en eau et des usages revêtent une importance cruciale dans la gestion durable de cette ressource vitale. Ce chapitre a pour objectif de mettre en lumière les travaux antérieurs dans le domaine de l'hydrologie et des sciences associées présents dans la littérature existante, dans le but d'identifier les sujets et les domaines où la recherche actuelle peut apporter une contribution significative de l'évaluation des ressources en eau et de leur gestion.

1.2 Cadre de la thèse

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé dans le cadre de l'Appel à Projet "RECHERCHE" au profit des CEDocs. Il a été financé par le Ministère de l'Education Nationale de la Formation Professionnelle, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MENFPESRS), le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) et le Service de Coopération et Action Culturelle de l'Ambassade de France au Maroc (SCAC). Programme de recherche bilatéral franco-marocain établi entre l'Université de Lorraine et l'Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal. Il a été porté par l'équipe du laboratoire : "Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine (DPRP)" de l'Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal et celle du laboratoire "LOTERR", de l'Université de Lorraine. Ce projet s'inscrit dans une longue collaboration entre le laboratoire "LOTERR" et des équipes d'universités marocaines sur les thématiques générales de l'eau et des milieux.

Outre les études anciennes sur les milieux naturels du Moyen Atlas (comme celles de Martin, 1981 ; Lecompte, 1986) ou sur les mutations des campagnes du Moyen Atlas (Jennan, 1986 et 2004; Labhar, 1998), de nombreux travaux plus récents sont à l'origine de constats sur les évolutions récentes dans le Moyen Atlas (Tag, 1996 ; El Jihad, 2010 ; Laouina, 2010 ; Chahhou, 2011 ; Bechchari *et al*., 2014). Parmi ces travaux, les études menées par le laboratoire LOTERR portent sur l'hydrologie (AI n°1005-95, programme Volubilis, 1995 à 1999) : "La sécheresse hydrologique récente : causes, évolution et conséquences sur l'équilibre du milieu naturel dans le Moyen Atlas septentrional" ; "La sécheresse hydrologique récente dans le bassin supérieur du Haut Sebou (Moyen Atlas)" par A. Devos en 1998 ou encore "La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin du Haut Sebou (Moyen Atlas septentrional - Maroc) " par A. Nejjari en 2002. De plus, la thèse de A. Qadem (2015) "Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc)" préparée dans le cadre du projet SIGRES (AI n° MA 244/ 10, programme Volubilis, 2010 à 2013) et celle de B. Sallak, effectuée dans le cadre d'un projet porté par les équipes de Béni Mellal et du LOTERR : "Diagnostic socio-environnemental pour un développement soutenable du périmètre irrigué du Tadla-Azilal" (PHC Toubkal). Leurs travaux portent également sur les évolutions de l'occupation agricole des sols et des espaces forestiers dans le cadre de l'AI n°03-86 (2003-2006) : "La gestion des ressources forestières et le développement soutenable de la montagne marocaine : le cas du Moyen Atlas central". Récemment, A. El-Bouhali a soutenu une thèse dans le cadre du projet "PHC Toubkal" portant sur "L'évolution des surfaces irriguées et leur impact sur les ressources en eau dans le contexte climatique actuel au Moyen Atlas tabulaire".

Notre contribution s'appuie sur cette base solide pour poursuivre l'exploration scientifique du cœur hydrologique du Maroc. Nous aspirons à approfondir notre compréhension des interactions complexes entre l'eau, les changements climatiques et les transformations des utilisations des terres pour éclairer les modalités d'une gestion soutenable des ressources en eau, en tenant compte des défis posés par le changement global.

1.3 Cadre conceptuel du sujet

1.3.1 Concept et typologie des ressources en eau

La notion de ressource en eau est une idée moderne qui a émergé lorsque les besoins d'utilisation ont atteint un niveau similaire à celui des flux naturels disponibles (Erhard-Cassegrain & Margat, 1979). Selon le dictionnaire français d'hydrologie de surface (1986), la ressource en eau englobe l'ensemble des disponibilités en eaux, locales ou régionales, et est également appelée "ressources hydrauliques" (M. Roche, 1986). En revanche, le glossaire international d'hydrologie la définit comme l'ensemble des eaux mobilisables pour répondre en quantité et en qualité à une demande spécifique en un lieu donné, pendant une période appropriée (OMM, 2012). Cette notion de ressource en eau, d'après Erhard-Cassegrain & Margat (1979), découle de la relation entre la définition des besoins en eau et leur mesure, ainsi que de la disponibilité des écoulements et des réserves d'eau dans l'environnement pour répondre à ces besoins.

La ressource en eau possède une dualité : elle est unitaire lorsqu'on se réfère à un système de ressource, mais elle est également diverse, car elle ne se limite pas à une quantité d'eau simple et indistincte. C'est pourquoi on utilise fréquemment le terme ressources en eau pour englober ces diverses formes, qui peuvent être distinguées de différentes manières. En tant que concept lié au milieu naturel, la ressource en eau est fréquemment subdivisée en (Erhard-Cassegrain & Margat, 1979) :

- ✓ ressources renouvelables ou dynamiques (débit = flux), associées aux écoulements, et ressources non renouvelables ou statiques (volume = stock), liées aux réserves ;
- ✓ ressources en eau de surface et en eau souterraine ;
- ✓ ressources permanentes (régularisées naturellement) et ressources variables.

Ces ressources sont identifiées par les chercheurs, grâce à une approche qualifiée de naturaliste (Haghe, 2017). D'après Blanchon (2019), pour faire l'inventaire des ressources existantes ou potentielles, des spécialistes développent les concepts de :

- ✓ "**eaux vertes**" : représentent les précipitations essentielles au fonctionnement des écosystèmes. Elles sont stockées dans le sol et la biomasse, puis évaporées ou absorbées et évapotranspirées par les plantes.
- ✓ "**eaux bleues**" : désignent les précipitations qui ne s'évaporent pas, ruissellent vers les cours d'eau ou s'infiltrent dans les nappes souterraines.
- ✓ "**eaux grises**" : font référence aux eaux prélevées et restituées dans l'environnement avec une qualité parfois dégradée.
- ✓ "**eaux virtuelles**" : représentent l'eau utilisée pour produire des biens dans un endroit, mais consommée "virtuellement" dans un autre lieu.

Lorsqu'il pleut, une fraction de l'eau qui atteint le sol contribue à la catégorie des "eaux bleues" (par ruissellement en surface ou drainage vers les nappes souterraines), tandis que le reste constitue les "eaux vertes" (Falkenmark & Rockström, 2006) (Fig. 1.1). La notion de "ressource en eau" se réfère classiquement aux "eaux bleues", eaux liquides en écoulement, accessibles aux usages humains (P.-A. Roche *et al*., 2012a).

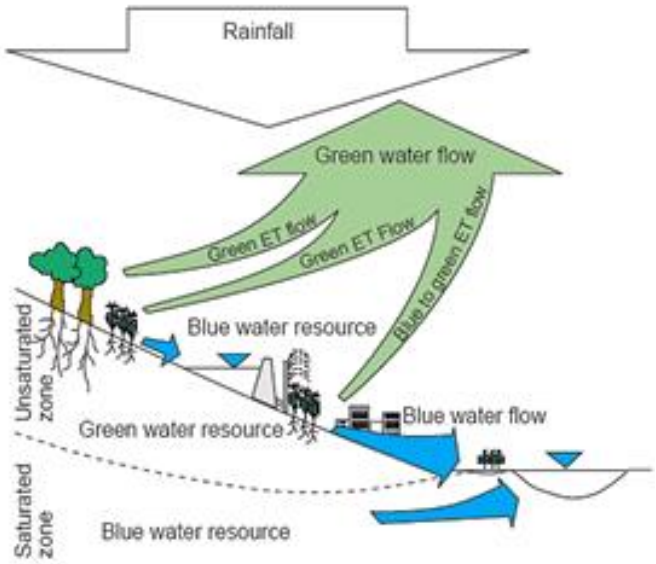


Figure 1.1 Eau verte et eau bleue (Falkenmark & Rockström, 2006)

1.3.2 Quantification des ressources en eau

D'après le dictionnaire Hachette (2007), le concept de "quantification" implique l'attribution d'une certaine quantité (ou mesure) à un terme (ou phénomène mesurable) (Mével, 2006). Lorsqu'on l'applique au domaine de l'hydrologie, qui se définit selon M. Roche (1986) comme l'étude ou la recherche liée à l'eau, au cycle hydrique et à leurs applications, la "quantification" désigne l'action de mesurer, d'évaluer et de déterminer numériquement les divers aspects du cycle hydrique, tels que les précipitations et les débits des cours d'eau. En effet, quantifier les ressources en eau vise à décrire et évaluer ces éléments en termes et dimensions qui permettent de les comparer aux besoins et demandes actuels ou anticipés d'utilisation, en prenant en compte des échelles et cadres spatio-temporels appropriés (Margat, 1993). Soulignons qu'à l'inverse de la quantification, l'évaluation des ressources en eau concerne la détermination de leurs sources, de leur étendue, de leur vulnérabilité et de leur qualité, en vue d'évaluer les possibilités de leur utilisation et de leur gestion (OMM, 1994).

1.3.3 Modèles et modélisation hydrologique

En science hydrologique le concept de "modèle" a émergé vers les années cinquante (Mouelhi, 2003a), et a depuis reçu plusieurs définitions. D'après le glossaire international d'hydrologie, un modèle hydrologique désigne une représentation simplifiée d'un hydrosystème (OMM, 2012). Selon le dictionnaire français d'hydrologie de surface (1986), un modèle est une représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, voire son comportement, afin d'en tirer toute conséquence sur ses paramètres, son évolution, les prévisions de son exploitation etc. Une autre définition pertinente est celle proposée par P.-A. Roche *et al*. (2012) : un modèle hydrologique est une schématisation, en général mathématique, de tout ou partie d'un système hydrologique, capable de simuler des "états" successifs de ce système à partir d'un état initial et de forçages connus ou d'estimer la probabilité d 'occurrence des "états" de ce système.

Depuis l'émergence de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés (Beckers & Degré, 2011). Ces modèles diffèrent par leurs objectifs, leurs principes, les données et les méthodes qu'ils utilisent (P.-A. Roche *et al*., 2012a). Pour mieux comprendre la complexité des divers modèles hydrologiques disponibles - qui sont presque aussi nombreux que les

hydrologues eux-mêmes -, il est utile de les classifier en catégories principales (Ambroise, 1999). Cependant, la classification des modèles est complexe en raison de l'ambiguïté de certains critères (notion de conceptuel ou de physique), ce qui engendre une certaine confusion quant à l'appartenance de certains modèles à une catégorie donnée (Payraudeau, 2002). Les approches habituellement utilisées en modélisation hydrologique apparaissent en vert dans la figure 1.2 (Gaume, 2002).

Ces modèles peuvent être regroupés en fonction de la manière dont le bassin versant est représenté spatialement, selon la description des processus hydrologiques et selon leur représentation temporelle (V. P. Singh, 1995; Payraudeau, 2002). En termes de subdivision spatiale, les modèles sont soit globaux soit distribués, pour les variations dans la représentation temporelle donnent lieu à des modèles continus ou événementiels et ils se différencient en ce qui concerne l'expression des phénomènes hydrologiques, qui peuvent être basés soit sur des équations empiriques, soit sur des équations physiques, soit sur une simplification plus ou moins poussée de ces équations physiques dans l'approche conceptuelle (Beckers & Degré, 2011).

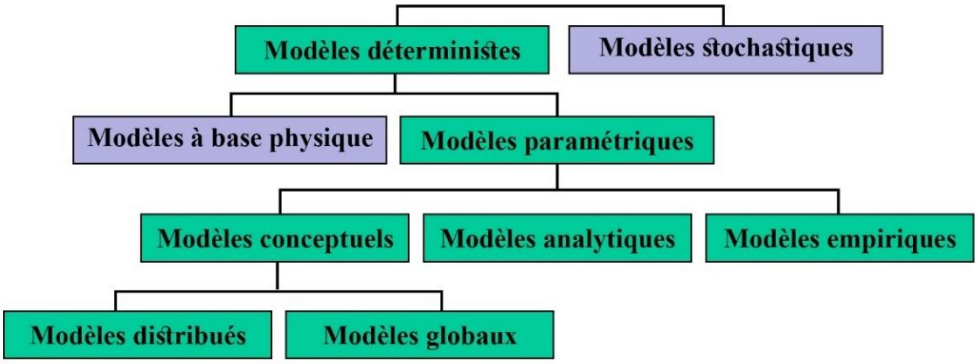


Figure 1.2 Les différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002)

La variété des approches entraîne la présence de nombreuses classifications. Une autre classification simple, proposée par Perrin (2000), divise les modèles en trois principaux types en fonction de leur représentation du bassin versant, qui peut être plus ou moins liée aux paramètres de description physique du bassin considéré. Plusieurs chercheurs (Ambroise, 1999; Gaume, 2002; Payraudeau, 2002; Beckers & Degré, 2011; P.-A. Roche *et al*., 2012) ont décrit ces modèles de la manière suivante:

- ✓ **les modèles à base physique** : ils décomposent le fonctionnement physique du système et le traduisent en équations s'appuyant sur une discrétisation fine du milieu. Ces modèles représentent les différents processus du cycle hydrologique en utilisant des équations aux dérivées partielles non linéaires.
- ✓ **les modèles empiriques** (à boite noire) : dans ces modèles, le fonctionnement physique n'est pas reproduit en détail, mais est plutôt remplacé par des relations fonctionnelles déduites de l'analyse des entrées et des sorties observées.
- ✓ **les modèles conceptuels** : dans ces modèles, les différents processus du cycle hydrologique sont représentés par des éléments de stockage. Les transferts entre ces différents réservoirs sont décrits à l'aide de fonctions mathématiques.

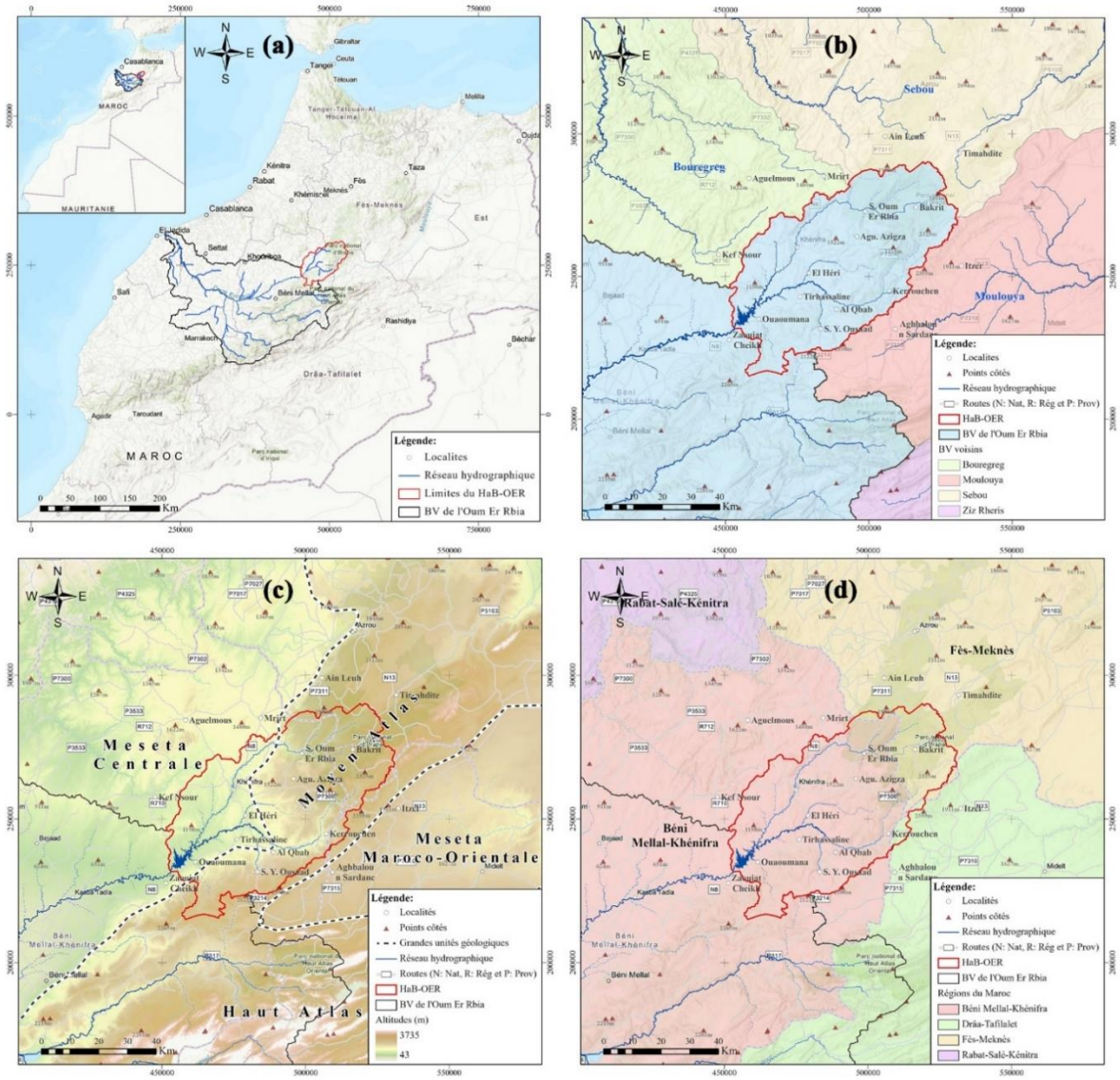
1.3.4 Usage et utilisation de l'eau

D'après le dictionnaire Hachette (2007), le verbe "user" signifie "se servir de" ou "avoir recours à" dans un premier sens, puis "utiliser" ou "consommer" dans un deuxième sens. De manière similaire, le verbe "utiliser" implique "se servir de", "employer" ou "faire servir à un usage

particulier" (Mével, 2006). Pour l'usage de l'eau, le dictionnaire français d'hydrologie de surface la définit comme la qualité de l'utilisation de l'eau pour un besoin spécifique, par exemple : usage domestique, usage industriel ... (M. Roche, 1986). Morel (2007) a défini l'usage de l'eau comme les prélèvements d'eau utilisés pour des besoins domestique, industriel et agricole. En réalité, ces prélèvements désignent la quantité soustraite au milieu pour répondre à l'usage prévu (P.-A. Roche *et al*., 2012a). Plusieurs aspects de l'utilisation d'eau se manifestent en fonction des situations et des activités désignées, tels que les utilisations par les collectivités comprenant les utilisations domestiques, celles des services publics et municipaux et celles des entreprises ... (HCP, 2006b). En résumé, "usage" se rapporte à la destination prévue de l'eau en fonction de son objectif principal (domestique, agricole, industriel), tandis que "utilisation" se réfère à la mise en œuvre spécifique de l'eau dans diverses situations ou activités.

1.4 Présentation de la zone d'étude

Le HaB-OER s'étend sur une superficie de 3380 km², et se situe au cœur du Maroc entre les longitudes 5°2'O et 5°54'O, et les latitudes 32°30'N et 33°13'N (Carte 1.1.a).



Carte 1.1 Situation géographique du HaB-OER à l'échelle : (a) du Maroc, (b) du bassin versant de l'Oum Er Rbia, (c) des grandes unités géologiques et (d) régionale

Cette zone d'étude correspond à la partie amont, moyen atlasique, de l'oued Oum Er Rbia, l'une des rivières les plus importantes du Royaume du Maroc. Elle est délimitée par le bassin de la Moulouya à l'Est, le bassin du Sebou au Nord et le bassin du Bouregreg à l'Ouest (Carte 1.1.b). Appartenant au plateau central et au Moyen Atlas du Maroc, le HaB-OER est représentatif du paysage du Moyen Atlas et de ses abords. L'altitude moyenne de cette région est d'environ 1350m, tandis que les sommets les plus élevés atteignent une altitude de 2400 m (Carte 1.1.c). Administrativement, le HaB-OER s'étend principalement sur deux régions, à savoir Béni Mellal-Khénifra et Fès-Meknès. Il englobe 27 communes réparties entre les provinces de Khénifra, Ifrane, Beni Mellal et Midelt, et sa plus grande partie, soit 78%, appartient à la province de Khénifra (Carte 1.1.d)

1.5 Problématique de l'étude

Le réchauffement climatique mondial résultant des activités humaines est un fait établi, et la température à la surface du globe a augmenté rapidement depuis 1970 (GIEC, 2023). Cette hausse, combinée à la croissance de la population, impacte la disponibilité de l'eau, notamment dans les régions dépendantes de l'agriculture (BM, 2021), mettant en péril la sécurité alimentaire (Duchenne-Moutien & Neetoo, 2021). Les changements climatiques aggravent le stress hydrique dans les régions déjà touchées et créent du stress dans des régions aux ressources en eau réputées abondantes (UNESCO, 2020). Ces changements constituent un défi global intergouvernemental complexe, dont l'influence s'exerce sur divers aspects des domaines écologique, environnemental, sociopolitique et socio-économique (Abbass *et al*., 2022).

A l'instar de nombreux pays, le Maroc est fortement touché par les impacts des changements climatiques et présente déjà de nombreux effets au niveau national (MDMEMEE, 2014). Les signes du changement climatique sont déjà clairement visibles : la température moyenne du pays a augmenté de +0,42 °C par décennie depuis 1990, et la diminution des précipitations est estimée à plus de 20% entre 1961 et 2005 (Woillez, 2019). Plusieurs études de projections des modèles climatiques menées au Maroc (Schilling *et al*., 2012; Tramblay *et al*., 2013; Marchane *et al*., 2017; Moucha *et al*., 2021; Choukri *et al*., 2020) confirment la persistance de la réduction des précipitations et de l'augmentation des températures. La tendance à l'aridification devrait s'amplifier au cours du 21ème siècle, ce qui risque d'exacerber les tensions déjà existantes sur les différents usages de l'eau et représente une menace particulière pour le secteur agricole (Attioui *et al*., 2020).

L'agriculture occupe une place économique et sociale cruciale au Maroc, représentant environ 38% de l'emploi total au niveau national et près de 74% en milieu rural (Louali, 2019). En plus de sa contribution à l'économie de près de 14 %, son impact socio-économique réel est largement supérieur grâce, notamment, à ses effets multiplicateurs en amont, en aval et à travers la consommation finale des ménages (MAPMDREF, 2018). Cependant, le Maroc, classé en situation de stress hydrique, est confronté à une forte pression sur ses ressources en eau, en particulier pour l'agriculture, qui utilise entre 80 et 85% des ressources mobilisées et se trouve en concurrence avec d'autres secteurs tels que l'eau potable, le tourisme et l'industrie (BAD, 2012).

Outre la raréfaction des ressources hydriques, la croissance démographique exerce une influence notable sur la disponibilité en eau. Actuellement, le potentiel des ressources en eau renouvelables au Maroc est évalué à 22 milliards de m^3 par an, équivalent à environ 650 m^3/hab/an, nettement en dessous du "seuil de pauvreté de l'eau" de 1000 m^3/hab/an, par rapport aux 2560 m^3/hab/an

enregistrés en 1960, marquant ainsi une baisse de 74,6% (Harraou, 2019). Même sans modification de la disponibilité des ressources en eau, une population projetée atteignant près de 44 millions d'habitants d'ici 2050 conduirait à un ratio de 510 m^3/hab/an, se rapprochant du "seuil de rareté extrême de l'eau" de 500 m^3/hab/an (Dahan, 2017). La sécurité hydrique devient par conséquent une priorité majeure pour le Maroc, tant pour le présent que pour l'avenir.

Pour faire face à cette situation, une attention particulière a été accordée aux secteurs extrêmement vulnérables aux changements climatiques et dont l'économie du pays en dépend, à savoir les secteurs de l'eau et de l'agriculture (Attioui *et al*., 2020). Ainsi, le Maroc a mis en place depuis les années 1960 une politique de construction de barrages, portant la capacité totale de stockage actuelle à 19,1 milliards de m^3 à travers 149 grandes retenues d'eau (Amara, 2021). Les avantages de cette politique représentent sans doute l'un des grands succès du pays dans les domaines de l'eau et de l'agriculture (Ed-Dahmouny *et al*., 2019). Néanmoins, cette politique est confrontée à plusieurs problèmes, notamment la demande croissante en eau, la réduction de la capacité de stockage due à l'envasement, et le déclin des apports hydriques en raison de l'augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse sous l'effet des changements climatiques.

Le caractère irréversible de la raréfaction des ressources hydriques s'accentuera davantage si aucune mesure appropriée n'est prise à temps ou si les réformes visant la pérennité des ressources en eau tardent à être mises en place, comme le confirment plusieurs études examinant l'impact du changement climatique sur les débits des rivières. Les travaux menés par E. M. El Khalki *et al*. (2021) ont estimé une diminution de débit de l'oued El Abid entre -57% et -72% et les estimations de Tuel *et al*. (2022) sont du même ordre de grandeur (entre -20% et -70%) pour l'oued Oum Er Rbia. Selon différentes simulations de scénarios de gestion de l'eau, Hadri *et al*. (2022) ont montré que la demande en eau pourrait être supérieure de 22 % d'ici 2050 par rapport à celle enregistrée entre 2010 et 2017. Dans le secteur agricole, l'étude menée par Balaghi *et al*. (2016) a établi que la hausse des températures et la diminution des précipitations entraînent une réduction des rendements simulés pour la majorité des régions agricoles marocaines, en particulier celles qui sont vulnérables aux effets du changement climatique.

Dans cette optique, une analyse approfondie du HaB-OER s'avère importante, car elle offre un terrain d'étude représentatif des enjeux liés à l'eau et des conséquences du changement climatique. L'oued Oum Er Rbia est une artère hydrographique vitale pour le développement régional et l'économie nationale. Son grand bassin hydraulique couvre une superficie de l'ordre de 48000 km², équivalant à près de 7% du territoire national (ABHOER, 2018g). A l'échelle nationale la zone dispose de 29 % de la capacité de stockage des barrages, de 20 % des apports moyens en eau de surface et de 9 % du potentiel mobilisable en eau souterraine (ABHOER, 2018f). Il occupe une place stratégique au Maroc en étant considéré comme "la clé de voûte" du réseau hydroélectrique, contribuant à 70% de la production nationale d'énergie hydroélectrique, et en tant que pilier du secteur agricole avec 20% de la SAU irriguée du pays (Arif & Doumani, 2012). Le HaB-OER, situé en amont du b'AEH, constitue le cœur productif de cette région.

L'approvisionnement en eau dans le HaB-OER est d'origine météorique (pluie ou neige) (Bentayeb & Leclerc, 1977). Ces précipitations sont particulièrement abondantes dans le plateau d'Ajdir, là où l'Oum Er Rbia prend ses sources (Moniod, 1973). Les sources de cette région sont alimentées par les eaux infiltrées provenant d'une zone géographique appartenant au bassin de l'oued Guigou, un des affluents de l'oued Sebou, avec une partie des précipitations s'écoulant vers l'Oum Er Rbia tandis que l'autre partie s'infiltre directement pour alimenter ses sources

(Archambault, 1972). Le b'AEH, situé à 100 km de celles-ci, est un ouvrage assurant une retenue de 668 Mm³ (en 2014), et sa construction sur l'Oum Er Rbia est stratégique pour l'hydroélectricité, l'irrigation ainsi que l'approvisionnement en eau potable et industrielle (ABHOER, 2014). Cependant, ce potentiel hydrique a été mis à mal par des années de sécheresses successives, dont les plus marquantes se situent sur la période 1980-2008 ainsi que ces dernières années. Durant ces périodes, la diminution des débits des cours d'eau, le tarissement total de plusieurs sources et la régression prononcée du volume d'eau dans des lacs ont été observés. À long terme, les ressources en eau risquent de subir encore de graves déficits ce qui exige une évaluation quantitative rationnelle de ces ressources.

Dans cette perspective, cette thèse est une contribution à une Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) promue par "The Global Water Partnership - GWP" dont le but est d'atteindre des solutions soutenables pour les générations futures en matière de gouvernance et de gestion de l'eau. Elle repose donc sur une problématique de développement soutenable en relation avec la gestion de l'eau comme ressource commune, ce qui implique des études sur l'utilisation des sols, les ressources en eau souterraine et de surface, les écoulements rapides de crue, les précipitations et l'usage de l'eau dans les activités agro-pastorales. Cette thèse propose une articulation originale d'éléments de géographie à la fois physique et humaine pour étudier la gouvernance de l'eau, problématique essentielle pour le Maroc contemporain. Nous posons la question de l'influence anthropique sur les ressources en eau dans un bassin dynamique qui témoigne d'une conversion remarquable en terres agricoles, des évolutions dans les pratiques agricoles, l'adoption de nouveaux outils et techniques, ainsi que l'intensification des cultures. A cet égard la synthèse bibliographique qui suit fait un état de l'art sur les cinq aspects couvrant la problématique de la ressource en eau telle que nous l'avons défini.

1.6 Le Moyen Atlas : une source riche d'études et de références bibliographiques

Situé au centre du Maroc, le HaB-OER fait partie du plateau central et du Moyen Atlas marocain. Compte tenu de sa position géographique stratégique, de ses atouts socio-économiques, de sa richesse en ressources naturelles et de son potentiel touristique, de son rôle dans la préservation de la biodiversité, ainsi que des défis spécifiques qu'il affronte telle que la gestion des ressources en eau, le Moyen Atlas, souvent qualifié de "château d'eau du Maroc" et de nœud hydrographique du pays, a suscité l'intérêt de chercheurs de diverses disciplines. Récemment, cette région, tout particulièrement le HaB-OER, a été scrutée par de nombreux chercheurs en réponse aux mutations spatiales actuelles. Pour cadrer notre travail, nous commençons par présenter les résultats d'une synthèse bibliographique, afin de faire le point sur les recherches antérieures concernant le Moyen Atlas en tant qu'entité géographique et dans le contexte régional du HaB-OER.

1.6.1 Les spécificité Géo "graphiques, logiques, morphologiques" du Moyen Atlas

Le Moyen-Maroc correspond à ce que Choubert & Marcais (1952) ont défini sous le nom de "domaine atlasique". Cette entité a été divisé par Michard (1976) en deux domaines qui correspondent d'ailleurs à des régions géographiquement bien distinctes :

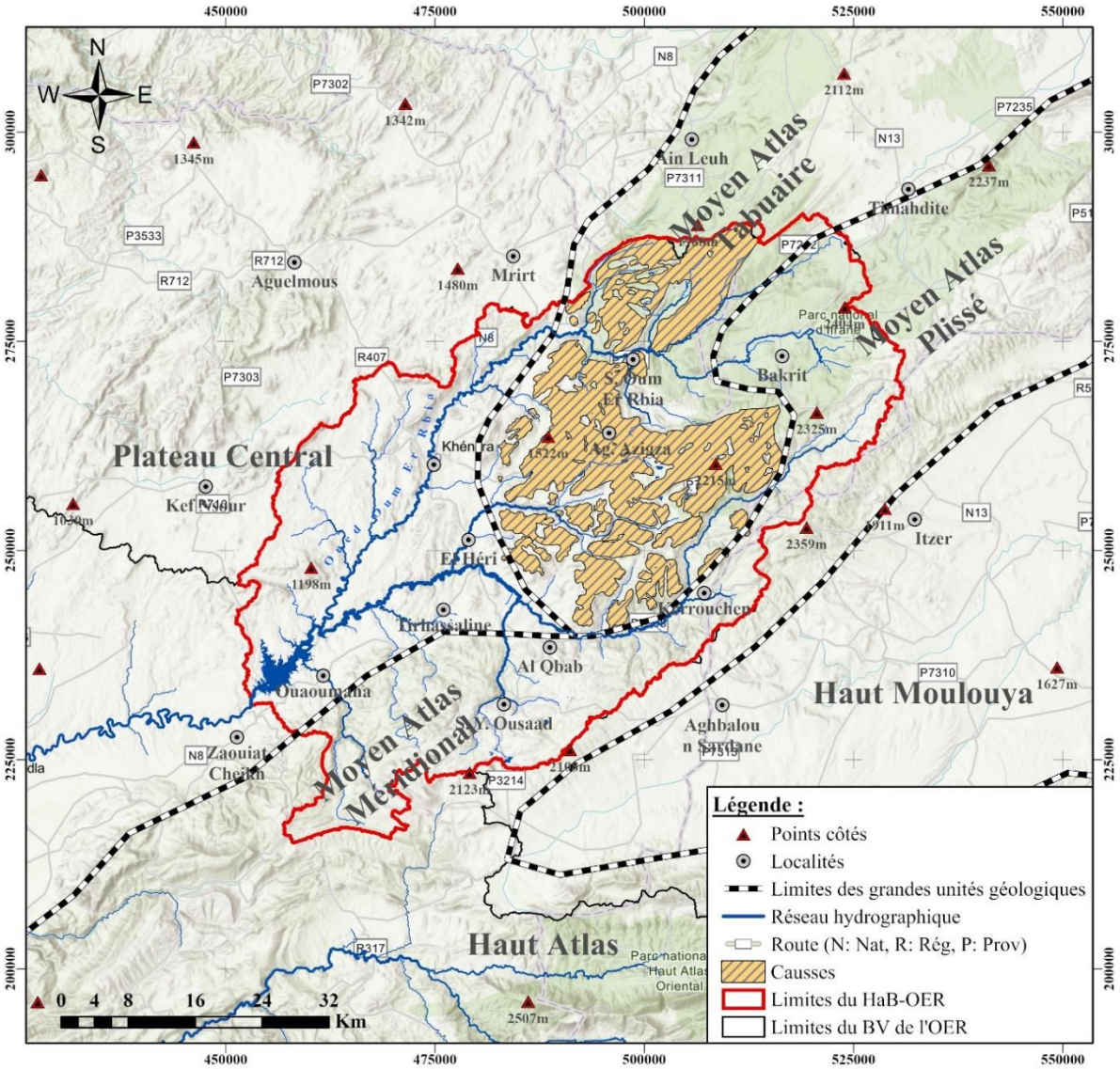
- ✓ **le domaine mésétien** présente un socle primaire pénéplané sur lequel repose une couverture alpine quasi tabulaire, soumise à une tectonique cassante.
- ✓ **le domaine de la chaîne atlasique** se caractérise par une élévation significative du socle et par le plissement de sa couverture secondaire épaisse.

Le Moyen Atlas, une étendue de terres élevées allongée sur 400 km de la plaine de Sraghna au SO à la plaine de Guercif au NE, traverse en diagonale le centre du pays, créant un isthme entre le Haut Atlas et le Rif, tout en isolant le Maroc oriental du Maroc Atlantique (Martin, 1981).

Les contrastes entre les différentes unités orographiques du Moyen Atlas ont entrainé de nombreuses ambiguïtés. Termier (1936) divise la chaîne en 2 tronçons : le Moyen Atlas méridional, couramment appelé Atlas de Béni Mellal, s'étendant jusqu'à la trouée de l'oued Srou, et le Moyen Atlas septentrional pour le tronçon plus au nord. En prenant en compte les précisions apportées par Colo (1961) et la mise au point de Martin (1981) concernant la structure géologique et les unités topographiques, le Moyen Atlas peut être subdivisé en deux grandes parties (Carte 1.2) :

- ✓ le Moyen Atlas méridional (ou Atlas de Béni Mellal)
- ✓ le Moyen Atlas septentrional, comprenant :
  - au NO, le Moyen Atlas tabulaire (causse moyen atlasique)
  - au SE, le Moyen Atlas plissé.

La région des Causses et la zone plissée sont séparés par un sillon tectonique orienté SO-NE, emprunté par l'oued Guigou et l'oued Zloul (Kabbaj & Combe, 1977).



Carte 1.2 Les grandes unités géologiques du Hab-OER (Beaudet, 1969; Michard, 1976; Martin, 1981)

Les sédiments primaires du socle hercynien dominent la Méséta centrale et n'affleurent que très peu dans le Moyen Atlas tabulaire (Kabbaj & Combe, 1977). Pendant le Trias, l'ouverture de l'océan Atlantique et la formation de fossés continentaux dans les régions du Moyen et Haut Atlas ont entraîné une sédimentation continentale rouge, accompagnée de l'éruption de roches volcaniques (Serbout, 2001). Les épanchement éruptifs, d'âge permo-triasique puis triasique, ont largement contribué à recouvrir les pénéplaines antérieures (Blache, 1937). Dans le Moyen Atlas central, les couches triasiques forment une séquence de roches tendres, formant un coussin entre le socle et la couverture jurassique (Martin, 1981). Le passage du Trias supérieur au Jurassique s'est caractérisé par une transition de sédimentation argilo-salifère à une sédimentation carbonatée, en raison d'une régression générale qui a marqué la fin de la période "laguno-marine" du Trias, suivie par le déclenchement d'une transgression au cours du Lias inférieur (Michard, 1976). Le Jurassique commence avec une série calcaréo-dolomitique puissante attribuée au Lias inférieur et au Domérien, présentant un intérêt majeur en tant que réservoir souterrain (Kabbaj & Combe, 1977). Les chaînes plissées présentent un substratum imperméable constitué de basaltes, de marnes et d'argiles, surmonté par une séquence dolomitique du Lias inférieur et des calcaires domériens, ce qui favorise une circulation souterraine de l'eau qui émerge ensuite sous forme de sources telles que le groupe des "Quarante Sources" de l'Oum Er Rbia (Loup, 1957).

Après cette période de dépôt, le Moyen Atlas a connu une importante interruption de la sédimentation allant jusqu'au Crétacé supérieur (Fedan, 1988). Contrairement aux formations jurassiques qui sont largement présentes dans le causse moyen atlasique, les dépôts du Crétacé supérieur sont confinés aux structures synclinales (Khalil, 2002). Les formations tertiaires et quaternaires se manifestent par des accumulations de conglomérats, de calcaires lacustres et de travertins, formant des buttes ou de vastes étendues, remplissant plusieurs dépressions situées au nord du causse (Menjour, 2018) (Fig. 1.3).

Age	Log	Epaisseur (m)	Description
Quaternaire		0 à 50	Coulées basaltiques, travertins et tufs, limon et cailloutis.
Pliocéne		10 à 50	Calcaires lacustres et sables fauves.
Miocéne		100 à 1000	Marnes bleues avec intercalation de quelques niveaux gréseux (Tortonien).
		20 à 50	Calcaires gréseux et molasse à la base.
Lias		20 à 80	Dolomies litées recouvertes de calcaires à silex et calcaires dolomitiques, le tout est surmontés de calcaires gris (Lias Moyen).
		50 à 100	Dolomies sableuses friables recouvertes par des dolomies massives et surmontées par des dolomies litées (Lias Inférieur).
Trias		Dizaines à centaines	Alternance d'argiles rouges gypsifères et salifères avec des basaltes doléritiques.
Paléozoique		Quelques centaines	Schistes bruns, parfois violacés, des grés, des quartzites et des calcaires gréseux. (Viséen).

Figure 1.3 Log litho-stratigraphique synthétique (Amraoui, 2005) in (A. Tahiri, 2021)

L'orogenèse du Moyen Atlas s'est manifesté dans ses aspects morphologiques les plus visibles au cours du cénozoïque (Du Dresnay, 1988). Parallèlement aux mouvements tectoniques qui ont entraîné la surrection et la mise en horst de la chaîne moyen atlasique, les grandes vallées se sont creusées (Y. El Khalki, 2001). En effet, la morphogenèse pléistocène des Causses est caractérisée par une dissection par des réseaux de vallées sèches, résultant de la combinaison de processus mécanique et chimique pendant les périodes pluvieuses (Martin, 1981). De plus, un volcanisme quaternaire important, orienté perpendiculairement au NO-SE recouvre une zone assez étendue au centre du Moyen Atlas (Du Dresnay, 1988).

Encadré 1 : l'importance hydrogéologique de la partie moyen atlasique du HaB-OER

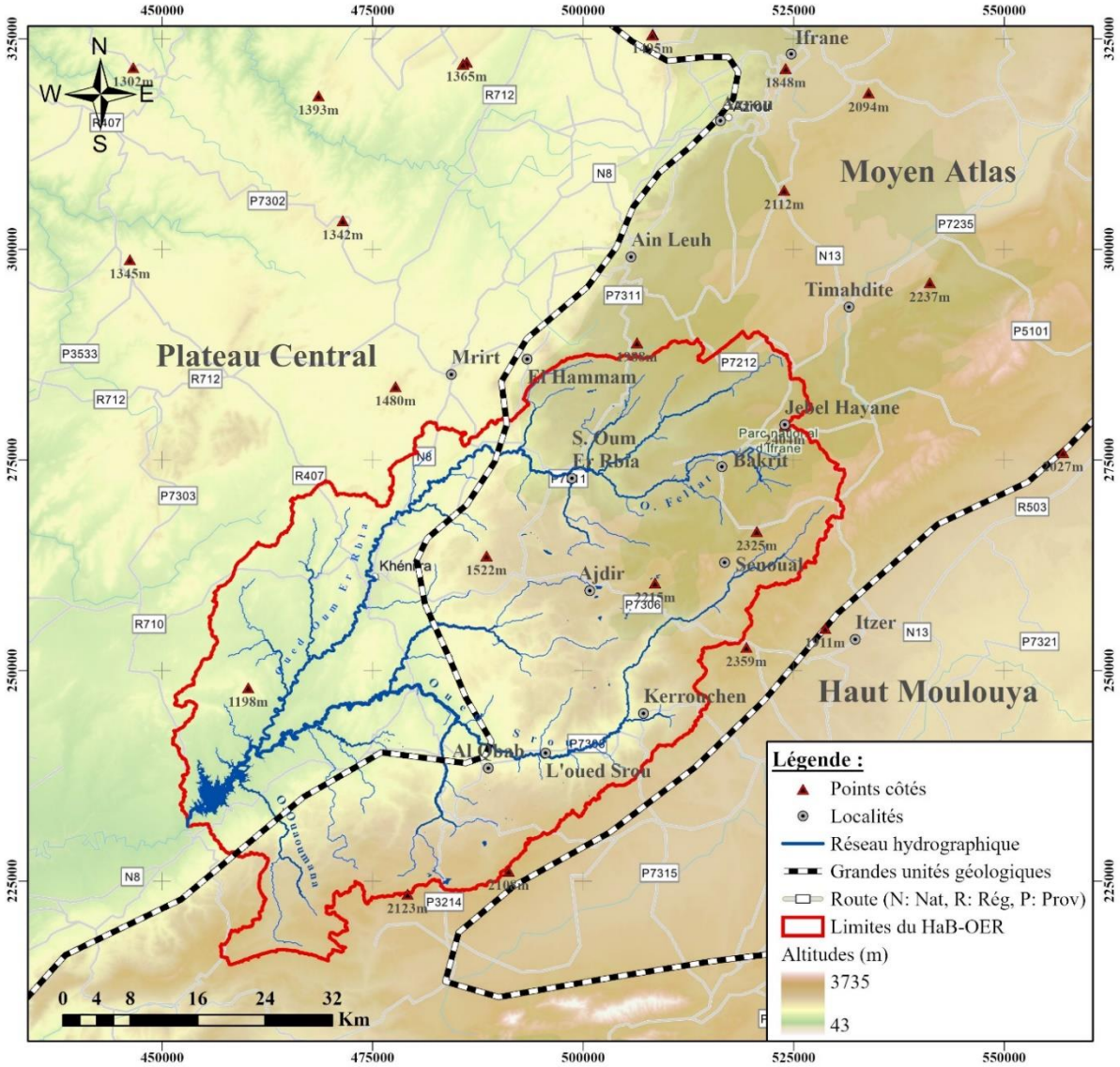
Le HaB-OER occupe une position géologique particulière, étant situé à la jonction entre différentes sections du Moyen Atlas (méridional, plissé et tabulaire) et la Meseta centrale. Une caractéristique hydrologique distinctive du Moyen Atlas est la présence de nombreuses sources résultant d'une karstification significative, parmi lesquelles les plus importantes sont les "sources de l'Oum Er Rbia". Ces sources sont alimentées par les eaux infiltrées provenant principalement d'une zone géographique appartenant au bassin versant de Sebou. Les mouvements tectoniques qui ont affecté cette zone ont entraîné l'élévation et la formation des chaînes de montagnes qui jouent un rôle essentiel dans le climat. Ainsi, les masses d'air venant de l'ouest génèrent des précipitations abondantes (pluie, neige) au contact du Moyen Atlas. Cette barrière naturelle crée une dissymétrie sur le plan climatique : la façade atlantique, exposée aux vents venant du NO, est plus humide. Quant à la façade SE, soumise à l'influence du climat saharien, elle présente des conditions plus arides. En effet, l'accumulation et la formation de cumulus nuageux engendrent des pluies importantes, dont une partie ruisselle pour alimenter l'Oum Er Rbia et l'autre s'infiltre pour recharger les nappes.

1.6.2 Exploration du climat méditerranéen montagnard

Le Maroc occupe une position géographique de transition entre le climat aride de l'Afrique du Nord et le climat plus tempéré et pluvieux de l'Europe centrale (Giorgi & Lionello, 2008). Les caractéristiques climatiques du pays sont influencées par la localisation de deux systèmes météorologiques dominants : l'anticyclone des Açores et la dépression sud-saharienne (Ben Sari, 2004). Cette configuration engendre une grande variabilité climatique à travers le territoire. Le Moyen Atlas, en raison de son altitude, de sa situation géographique et de son exposition aux influences océaniques, présente un climat humide et froid, classé comme méditerranéen de montagne (Martin, 1981). Les diagrammes pluviométriques, établis pour des stations de situation analogue, reflètent tous un régime des précipitations de type méditerranéen (Martin, 1981).

Dans le bassin de l'Oum Er Rbia, la région la mieux arrosée est le Moyen Atlas, plus précisément le plateau d'Ajdir (Moniod, 1973). En contraste avec les valeurs inférieures à 400 mm dans la majeure partie du Maroc, les précipitations dans le Moyen Atlas dépassent 800 mm par an, ce qui le fait souvent comparer à un "château d'eau" (Loup, 1957). L'analyse statistique des données pluviométriques d'une station représentative du Moyen Atlas sur la période 1976-1990 a permis de distinguer une période humide (1976-1979) et une autre sèche (1980-1990) (Serbout, 2001). Les sécheresses affectent aussi bien la Meseta que le Causse mais leur intensité et leur longueur décroissent avec l'altitude (M.-D. El Jihad, 2003). Au SE du Moyen Atlas la sécheresse estivale est longue et tenace (M.-D. E. El Jihad, 2016). La caractérisation des séquences sèches par la méthode de l'écart à la moyenne (Em) et de l'indice de pluviosité (Ip) pour la période 1975/76 à 2000/01 montre que 54 % des années sont sèches (Elbouqdaoui *et al*., 2006).

La température est considérée comme le facteur prédominant influençant l'évaporation, que l'on parle de la température moyenne ou des températures maximales (Loup, 1957). Les caractéristiques thermiques sont principalement influencées par l'interaction entre l'anticyclone des Açores et la dépression saharienne, qui déterminent l'origine, l'orientation et la vitesse des flux d'air dans la région (Delannoy *et al*., 1979). L'évapotranspiration réelle, estimée par Bentayeb & Leclerc (1977), peut atteindre 67% de la pluviométrie selon la méthode de Thornthwaite et 84% selon la méthode de Turc. Ces pertes ont un impact plus important sur l'écoulement pendant la saison chaude que pendant la saison froide. Les températures les plus basses surviennent lors de conditions anticycloniques, et c'est en janvier que l'on observe le plus grand nombre de jours de gel (Martin, 1981).



Carte 1.3 Localisation des stations témoignant de l'enneigement au Moyen Atlas (source : MNT)

Au-delà de 1800 m d'altitude, les précipitations en hiver sont généralement sous forme de neige et la couverture neigeuse persiste pendant une période prolongée (Kabbaj & Combe, 1977). La station d'Itzer, située à la même altitude qu'Ifrane sur le versant SE, ne connaît que 10 jours de neige, ce qui souligne l'influence de l'exposition (Martin, 1981). La concentration des précipitations hivernales favorise les chutes de neige dans les massifs à 1635 m d'altitude, il y a en moyenne 20 jours de neige par an et la neige reste en place pendant environ 40 jours en moyenne de façon discontinue (Loup, 1962). L'enneigement est important dans la région centrale

du Moyen Atlas plissé, comme le Jbel Hayane et autour de Senoual, et modéré dans les causses d'Ajdir et d'Aïn Leuh, tandis qu'il est exceptionnel dans les causses d'El Hammam, d'Aghbal et de Srou (Martin, 1981) (Carte 1.3). Lors des précipitations, l'air est plus chaud qu'en temps ensoleillé, et la neige, étant humide et dense, fond rapidement sur le sol après quelques jours en raison des températures maximales moyennes d'environ 9°C en janvier et février (Kabbaj & Combe, 1977).

Encadré 2 : le climat méditerranéen montagnard du HaB-OER

Le HaB-OER se distingue par ses précipitations abondantes, combinant pluie et neige, avec une moyenne annuelle de 800 mm. Les variations spatiales des précipitations et des températures sont façonnées par l'altitude et la situation géographique, avec une tendance à des températures décroissantes du SO au NE et des précipitations croissantes. Sur une moyenne de 730 mm de précipitations annuelles sur les Causses et une température moyenne de 12°C, environ 510 mm/an s'évaporent, tandis que les 220 mm/an restants ruissellent ou s'infiltrent. Au cours des dernières décennies, une baisse notable des précipitations annuelles et des jours humides a été observée, tandis que la fréquence des années sèches devient de plus en plus préoccupante depuis les années 1980. Ces conditions ont eu un impact négatif sur les débits des cours d'eau et des sources, augmentant le risque de tarissements et d'étiages sévères.

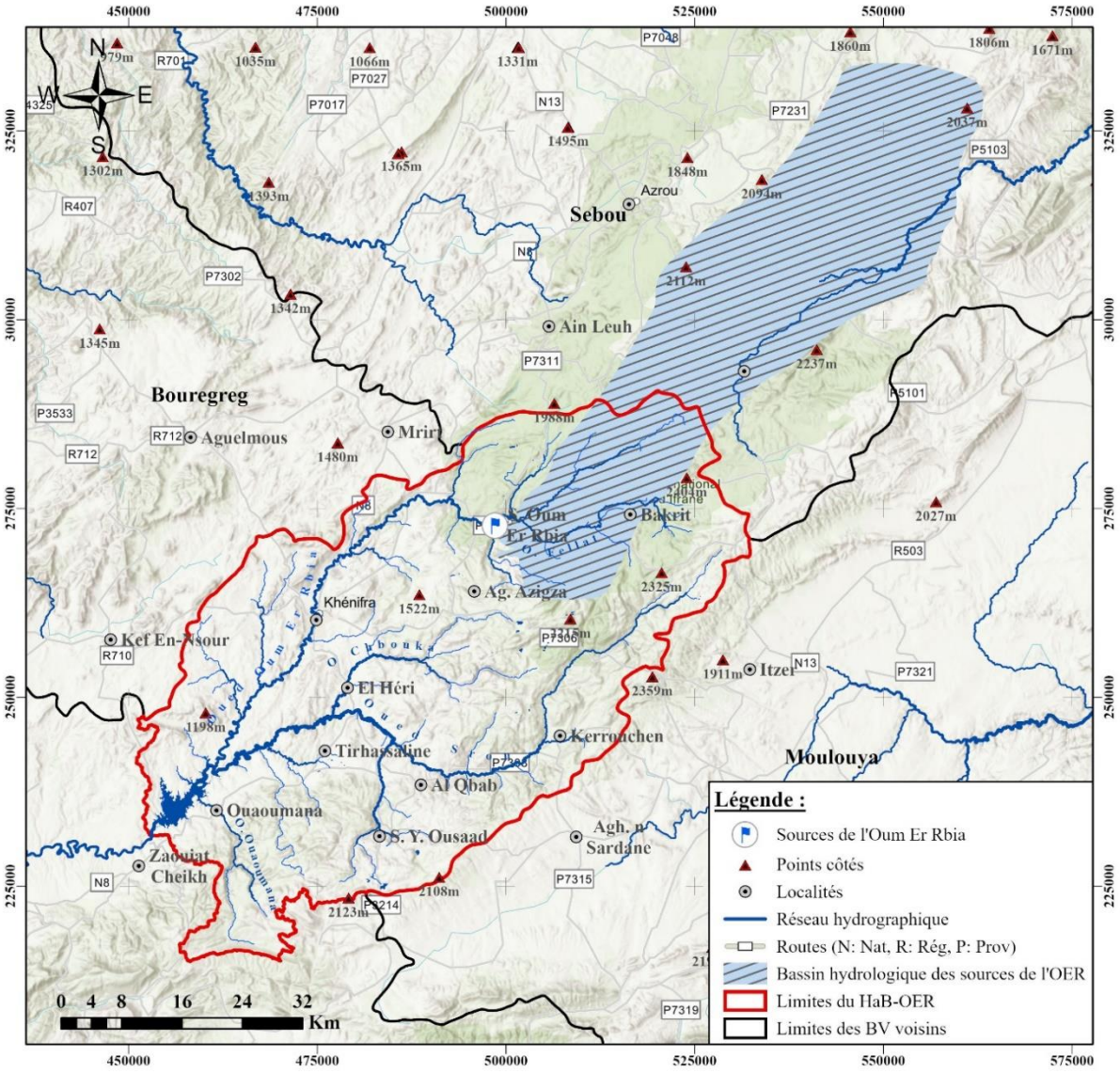
1.6.3 Le Moyen Atlas : le cœur hydrologique du Maroc

Les montagnes du Moyen Atlas sont considérées comme le "château d'eau du Maroc" par excellence (Bentayeb & Leclerc, 1977) ; Elles alimentent les deux artères hydrologiques du pays : l'oued Oum Er Rbia et l'oued Sebou. Bien que l'Oum Er Rbia ne se classe qu'au 2ème rang des fleuves chérifiens, il offre pourtant beaucoup plus d'intérêt que l'oued Sebou, c'est une rivière régulière, c'est le fleuve le mieux aménagé et le plus utile du Maroc (Loup, 1962). L'oued Srou est le principal affluent du HaB-OER, présentant un débit annuel moyen de 7,92 m^3/s (Lahlou, 2021). À Khénifra, le débit spécifique en période d'étiage est beaucoup moins sévère que d'autres stations en aval, ce débit est assuré en bonne partie par les réserves souterraines contenues dans le massif calcaire du Moyen Atlas (Moniod, 1973).

Les sources de l'Oum Er Rbia, du type débordement, regroupées dans un périmètre effectif de 928 km² sur le contact anormal Lias-Trias de Jbel Kedoud (Y. El Khalki, 2001) présentent un débit annuel moyen de 7,6 m^3/s. Elles sont considérées comme les sources les plus importantes du Maroc. Le bassin hydrogéologique des sources de l'Oum Er Rbia s'étend sur une vaste zone, couvrant environ 1020 km² de terrain karstique, dont les trois quarts de ces réserves se situent en dehors du bassin versant de l'Oum Er Rbia, dans l'oued Guigou (Bentayeb & Leclerc, 1977) (Carte 1.4). A la station de Tarhat (Khénifra), les débits de ces sources représentent environ 85% du débit de l'oued en période d'étiage (Bentayeb & Leclerc, 1977) et environ 65 % de l'écoulement total annuel (ORSTOM, 1995). Les temps de réponses hydrologiques journalières des sources aux épisodes pluvieux sont très étalés ce qui confirme la présence d'un impluvium très vaste, et l'étude des débits classés indique une mise en réserve relativement réduite (Khalil, 2002).

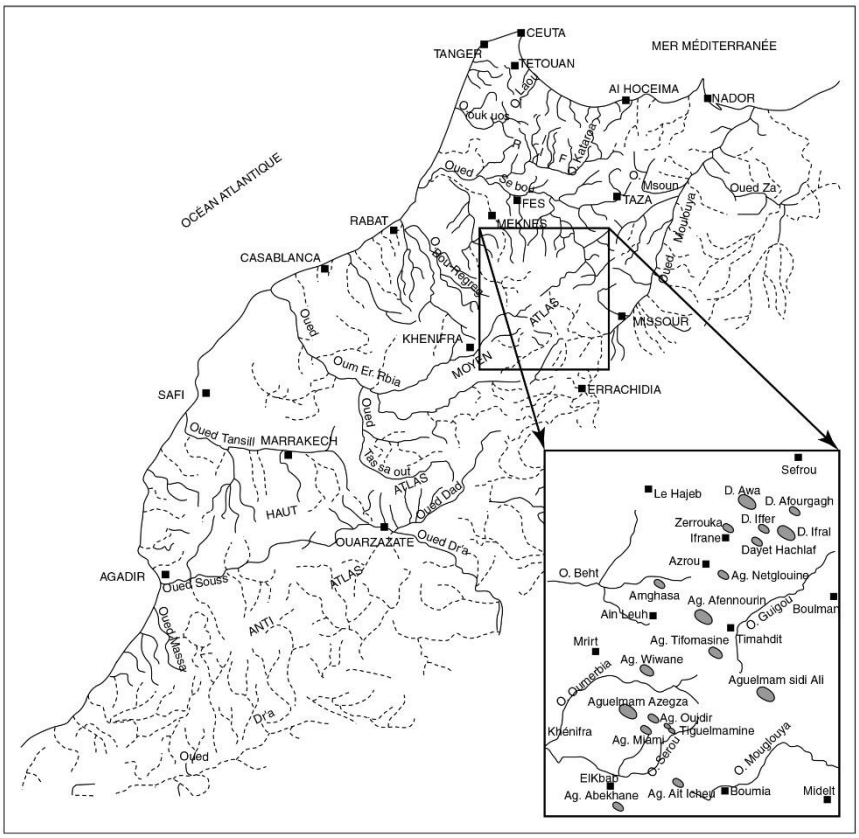
La différence de nature chimique des eaux des sources indique l'existence de deux systèmes hydrogéologiques indépendants : la circulation d'eau des sources douces se fait uniquement dans les calcaires dolomitiques et liasiques, alors que la circulation d'eau des sources salées très riches en chlorure de sodium (17500 mg/l) se fait dans le Lias et le Trias salifère (Archambault, 1972). Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines et de surface attestent du rôle joué par les

niveaux lithologiques du Trias dans la contamination et la dégradation de la qualité des eaux (Khalil *et al*., 2004). La concentration en sel dans l'eau de l'Oum Er Rbia à Khénifra varie en sens inverse du débit, de 500 mg/l à 17000 mg/l lorsque le débit décroit de 100 m^3/s à 8 m^3/s (Moniod, 1973). Les sources d'eau douce contribuent à hauteur de 76% à l'alimentation de base de l'oued Oum Er Rbia, tandis que les sources d'eau salée contribuent pour 24% (A. Tahiri, 2021).



Carte 1.4 Bassin versant topographique du HaB-OER et bassin versant hydrologique des sources de l'OER (Bentayeb & Leclerc, 1977)

L'Atlas marocain recèle un chapelet de lacs (Blache, 1919) modestes et permanents "Daya ou Aguelamam" (Martin *et al*., 1964) (Carte 1.5). Ces hydrosystèmes ont une grande importance socio-économique et écologique à l'échelle nationale (Chillasse *et al*., 2001a). Dans ce contexte, les lacs du Moyen Atlas ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche paléolimnologiques incluant des approches pluridisciplinaires (sédimentologie, géochimie, paléobiologie…). La plupart de ces études se sont focalisées sur la reconstitution des conditions paléoclimatiques et paléoenvironnementales (Detriche, 2007 ; Etebaai *et al*., 2008; Benkaddour *et al*., 2008; Rhoujjati *et al*., 2012; Sayad *et al*., 2011; Damnati & Reddad, 2017; Vidal *et al*., 2016; Mimoun *et al*., 2016; Jouve *et al*., 2019). En outre, certaines études ont examiné la relation entre les variations climatiques et les fluctuations du niveau d'eau (Chillasse & Dakki, 2004; Sayad *et al*., 2012; Mimoun *et al*., 2016; Adallal *et al*., 2019). Cette relation a également été étudiée en utilisant des techniques de télédétection pour le lac Aguelmam Sidi Ali (Menjour *et al*., 2016).



Carte 1.5 Carte de répartition des lacs au Moyen Atlas (Chillasse & Dakki, 2004)

Encadré 3 : les hydrosystèmes du HaB-OER se portent-ils bien ?

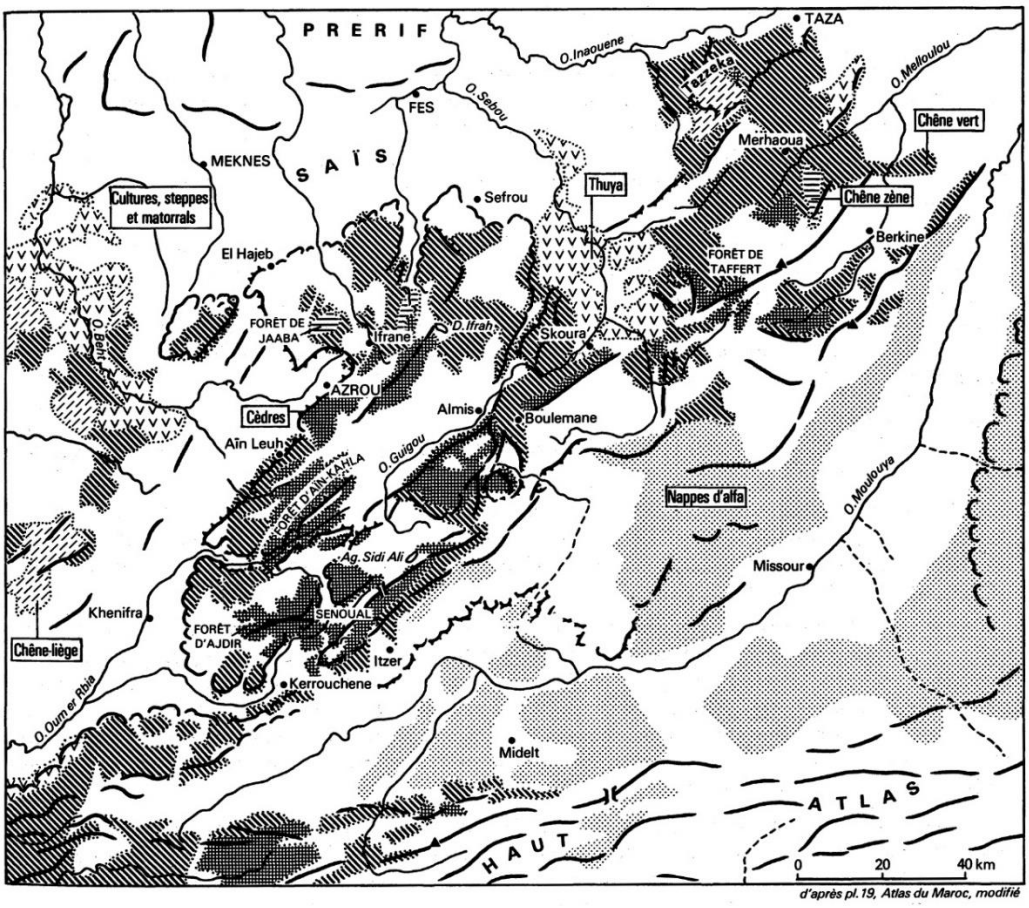
Au cours des dernières décennies, marquées par des périodes souvent sèches, les écosystèmes lacustres qui caractérisent le Moyen Atlas connaissent des perturbations significatives. Les effets directs de la sécheresse sur les zones humides se traduisent principalement par la diminution du niveau des lacs, la réduction du débit des rivières et la baisse du débit des sources, ce qui entraîne des crises écologiques plus ou moins graves. La diminution du niveau d'eau des lacs, voire leur assèchement, a un impact sur les activités socio-économiques des riverains. À l'échelle du HaB-OER, la succession d'années déficitaires en termes de précipitations, associée à l'impact de l'activité humaine, a conduit à l'assèchement de plusieurs sources et lacs, contribuant ainsi au déséquilibre naturel de ces environnements aquatiques.

1.6.4 L'écosystème des cèdres, une richesse de biodiversité

Le Maroc possède tous les "types" de climats méditerranéens, il est donc un pays méditerranéen complet du point de vue écologique (Emberger, 1964). Cette variété a contribué à une biodiversité riche en favorisant le développement d'un grand nombre d'espèces animales et végétales (Ben Sari, 2004). Les variations spatiales du climat sont reflétées par la végétation, et l'étude climatologique du Moyen Atlas marocain confirme ces liens. Ainsi, la répartition des espèces végétales permet de déterminer avec précision les limites des différentes zones climatiques (Lecompte, 1988). La carte phytogéographique du Maroc réalisée par Emberger (1939) et celle des étages bioclimatiques définis par Sauvage (1963) indiquent les grandes lignes de la végétation potentielle et les climats correspondants.

Dans le Moyen Atlas, le paysage végétal est marqué par la coexistence de forêts de cèdres de l'Atlas (Cedrus atlantica), chênes verts (Quercus rotundifolia), chênes zéens (Quercus canariensis) et pins-maritimes du Maghreb (Pinus pinaster) … (Lamb *et al*., 1991; Lecompte,

1986). Les massifs de cèdres et de chênes verts les plus importants se trouvent principalement en haute montagne, notamment dans le fameux nœud hydrographique du Moyen Atlas (DEFM, 1927) (Carte 1.6). Le versant NO du Moyen Atlas est nettement plus arrosé que le Haut Atlas, ce qui favorise le développement de ses magnifiques forêts de Quercus et de Cedrus (Maire, 1924). En termes de hauteur, le cèdre est l'espèce prédominante, mais en considérant la densité du couvert, le chêne vert est également très abondant (Hossayni, 1983). Souvent qualifié de patrimoine naturel mondial, l'importance environnementale du cèdre de l'Atlas est universellement reconnue. Les cédraies forment des écosystèmes centraux pour la régulation du cycle de l'eau et les écosystèmes des montagnes marocaines (M'hirit & Benzyane, 2006).



Carte 1.6 La forêt du Moyen-Atlas (Martin et al., 1964 in (Lecompte, 1986))

Le cèdre se répartit entre le Rif, le Moyen Atlas oriental, le Moyen Atlas central et le Haut Atlas oriental. L'importance de l'amplitude altitudinale du cèdre (1500-2000 m) (Benabid, 1985; Lamb *et al*., 1991; M'Hirit, 1999), la variété des conditions bioclimatiques et édaphiques auxquelles la cédraie est soumise et la situation géographique permettent la création d'écosystèmes sylvatiques diversifiés (Hossayni, 1983). Pujos (1966) a d'ailleurs élaboré une classification des cédraies en se basant sur des critères édaphiques, altitudinaux et climatiques, ce qui a conduit à distinguer différentes catégories (Quezel, 1998; Marghadi, 2009) :

- ✓ **la cédraie basse ou tempérée** (1600-1900 m), développée sur le causse Atlasique en mélange avec le chêne vert et le chêne zéen.
- ✓ **la cédraie moyenne ou intermédiaire** (1900-2000 m), située sur la versant atlantique et occidental du Moyen Atlas, se caractérise par une forte densité.
- ✓ **la cédraie haute ou d'altitude** (2000-2500 m) occupe les hautes régions du Moyen Atlas plissé. Elle peut être mélangée au genévrier thurifère ou au chêne vert.

Le Cèdre ne forme en aucun point la limite supérieure de la forêt, mais le genévrier thurifère prend toujours sa place à cette limite (Till, 1986).

Le cèdre de l'Atlas, une essence forestière endémique des montagnes de l'Afrique du Nord, est tolérante à la sécheresse et produit du bois de haute qualité (Derak *et al*., 2008). Cependant, le changement climatique a comme impact majeur le déplacement vers le haut de toutes les ceintures de végétation. Par conséquent, le cèdre risque de disparaître sur de larges zones de son aire actuelle, comme en témoignent les dépérissements observés dans le Moyen Atlas (Et-Tobi *et al*., 2008). Cette détérioration est accentuée par les activités humaines comme le pâturage excessif, la déforestation volontaire pour convertir des terres forestières en terres agricoles, ainsi que par les prélèvements illégaux de bois de chauffage (Ellatifi, 2012). Les incendies et les parasites constituent également une menace pour l'ensemble des espèces forestières (Marghadi, 2009).

Encadré 4 : les menaces forestières impactent le comportement hydrologique du HaB-OER

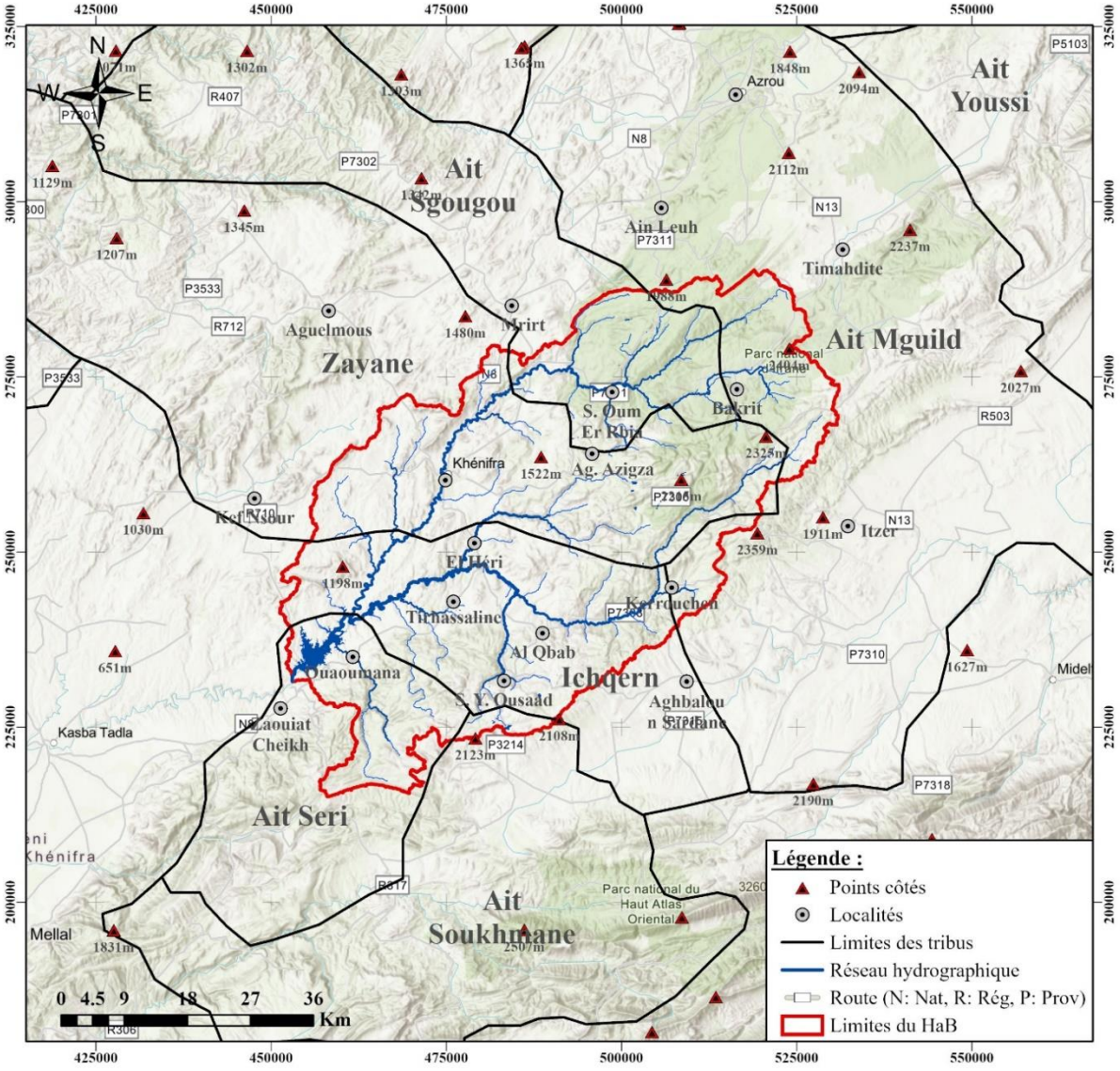
Le cèdre, prédominant en hauteur, et le chêne vert abondant jouent un rôle environnemental crucial dans la régulation du cycle de l'eau dans les montagnes du HaB-OER. Ces forêts capturent, stockent, libèrent et redistribuent l'eau, maintenant l'équilibre hydrique des écosystèmes montagneux. Cependant, les forêts du HaB-OER font face à des défis naturels qui entravent leur régénération, entraînant un déclin. Cette situation est exacerbée par les actions humaines. Les transformations et les changements de mode de vie dans cette région ont considérablement altéré l'environnement, exerçant davantage de pression sur les ressources naturelles, y compris les ressources en eau. En réduisant la capacité de rétention d'eau et en augmentant le ruissellement en surface, le recul des forêts peut perturber le régime hydrologique des sous-bassins du HaB-OER.

1.6.5 Population au Moyen Atlas : de la transhumance à la sédentarisation

En raison de sa diversité climatique et de la richesse de ses pâturages, le Moyen Atlas est largement reconnu comme une région propice à l'élevage (Jennan, 1986). Les populations du Moyen Atlas, qu'elles soient sédentaires ou semi-nomades, dépendent principalement de l'élevage extensif des ovins par le jeu d'une transhumance de moyenne amplitude (Alaoui, 2015). La transhumance implique le déplacement saisonnier entre deux régions, où les variations climatiques créent des périodes favorables à la croissance de l'herbe et au pâturage (Célérier, 1927). Cette rotation saisonnière des populations et des troupeaux entre la montagne et ses abords était bien orchestrée, les hauteurs (jbel) servant de pâturages estivaux, tandis que les plateaux (l'azaghar) étaient réservés aux pâturages hivernaux (Jennan, 1986). L'azaghar, en tant que refuge contre le froid et la neige, correspond à un plateau situé à une altitude moyenne. Il est encadré par les plaines du Saïs et des Beni-Mtir au nord, du Tadla au SE, par le sillon de l'Oum Er Rbia à l'est et par la corniche des Zayan (Laoust, 1935).

Au cours des dernières décennies, les déplacements des hommes et des troupeaux se sont réduits et le processus de sédentarisation s'est généralisé (Maurer, 1996). Bien que l'élevage demeure important et contribue à la préservation des espaces pastoraux, la pratique de la transhumance est en déclin depuis de nombreuses années (Alaoui, 2015). L'introduction récente de la culture des céréales, du maraîchage, de l'arboriculture fruitière, ainsi que le développement de l'élevage moderne intensif ou semi-intensif dans cette région ont conduit à une sédentarisation accélérée (Aït Hamza, 2012). Le Moyen Atlas se caractérise par une régression dramatique de l'élevage

mobile. Les communautés rurales se sont installées depuis longtemps sur le piémont et dans les vallées intramontagnardes, où elles ont créé des foyers de sédentarisation et aménagé de petites zones irriguées. Beaucoup de ces localités ont rapidement évolué pour devenir des centres d'échange et ont connu une croissance démographique accélérée. Cela a été particulièrement le cas pour Azrou (Béni Mguild), El Hajeb (Béni M'tir), Khénifra (Zayan) et Sefrou (Ait Youssi) (Jennan, 1986) (Carte 1.7).



Carte 1.7 Les tribus d'Aït Oumalou, qui résident dans les massifs montagneux (Guennoun, 1929)

Encadré 5 : la sédentarisation favorise-t-elle les ressources du HaB-OER ?

En raison de ses riches pâturages, le HaB-OER est reconnu comme une région propice à l'élevage, où une rotation saisonnière est traditionnellement pratiquée entre la montagne en été et les plateaux d'azaghar en hiver. Cependant, au fil des décennies, les déplacements des hommes et des troupeaux se sont réduits, la sédentarisation s'est généralisée et la pratique de la transhumance a diminué. L'accélération de la sédentarisation a engendré plusieurs changements dans le mode de vie de ces éleveurs nomades, notamment en adoptant des pratiques d'élevage et d'agriculture plus "modernes" comme moyen de subsistance. Pourtant, ces nouvelles pratiques ont contribué à accroître la demande en ressources en eau dans cette zone.

1.7 Objectifs et méthodologie de travail

1.7.1 Objectifs

Dans le but d'éclairer les modalités d'une gestion rationnelle de la ressource en eau dans le cadre d'un changement global, il est nécessaire de comprendre les mécanismes naturels gouvernant cette ressource. Ainsi, l'objectif principal de notre recherche, à l'interface environnement-société, est la connaissance fine de ces ressources et de leurs utilisations sur la flèche du temps, d'un passé récent (1975) à un futur proche (2050), moyen (2070) et lointain (2100). Cet objectif peut être détaillé en plusieurs sous-objectifs :

- ✓ Caractériser les paramètres physiographiques ayant un impact direct sur l'écoulement et la mobilisation des eaux ;
- ✓ Analyser l'évolution historique des données climatiques pour évaluer les tendances passées et leur relation avec la disponibilité en eau ;
- ✓ Comprendre le fonctionnement hydrologique des principaux hydrosystèmes en examinant les fluctuations passées ;
- ✓ Quantifier les bilans hydriques/hydrologiques depuis 50 ans ;
- ✓ Evaluer les performances d'une modélisation pluie-débit pour la simulation des débits futures afin de prévoir l'état des ressources en eau de la retenue du b'AEH ;
- ✓ Analyser les interactions entre les changements d'utilisation des terres, les activités socio-économiques et l'utilisation de l'eau ;
- ✓ Étudier les impacts des activités humaines, notamment l'agriculture, sur la disponibilité en eau, en identifiant les zones et les périodes où ces pressions sont les plus significatives.

1.7.2 Justification et intérêt du sujet

L'eau est très abondante sur notre planète "bleue", sa surface étant à 70% couverte d'eau. Cependant, les eaux douces ne représentent que 3% du volume total de l'hydrosphère, essentiellement emprisonnées dans les inlandsis, les glaciers et les aquifères profonds. En conséquence, l'humanité ne peut compter que sur environ 0,028% de ces ressources. Au Maroc, le potentiel des ressources en eau naturelles a été évalué à 21 milliards m^3 par Jellali (1997) (Fig. 1.4) et à 20 milliards m^3 par Agoumi & Debbagh, (2006). Alors que le 4ème rapport sur l'état de l'environnement du Maroc a estimé ce potentiel à 22 milliards de m^3 par an, équivalent à une moyenne de 620 m^3/habitant/an, ce qui met le pays dans la case de la pénurie hydrique selon l'OMS (MTEDD, 2020). Avec des projection futurs, ce ratio devrait encore diminuer pour atteindre le seuil de rareté extrême de l'eau, soit 500 m^3/an/hab (Dahan, 2017). Par conséquent, étudier en profondeur les potentiels hydrologiques du HaB-OER, qui sont précieux à l'échelle nationale, s'avère essentiel.

Plusieurs études ont été faites au Maroc sur les ressources en eau. Quel est alors l'intérêt de traiter à nouveau cette question ? En fait, et à la différence des recherches déjà effectuées, notre contribution :

- ✓ étudie un bassin clé, au lieu d'un grand territoire, car le HaB-OER est à l'origine de l'un des plus importants fleuves au Maroc, en termes de débits absolus et d'enjeux associés ;
- ✓ actualise l'ensemble des termes du bilan hydrologique dans le contexte des changements récents, car ce qui était vu comme conjoncturel dans les années 80/90 apparaît comme structurel dans le cadre du changement global ;
- ✓ utilise les nouvelles mesures issues du spatial qui apportent un nouveau regard à l'échelle du territoire sur la base de données répétitives, homogène et à résolution spatiale fine. Les données les plus intéressantes étant celles sur les variables climatiques (pluie et ET) ; sur les niveaux des lacs et celles qui caractérisent les états de surfaces du sol,

- ✓ approfondit la compréhension scientifique du fonctionnement hydrologique dans la perspective d'une meilleur modélisation prospectiviste ;
- ✓ met l'accent sur l'action anthropique, à travers notamment les nouvelles pratiques définies dans l'agriculture.

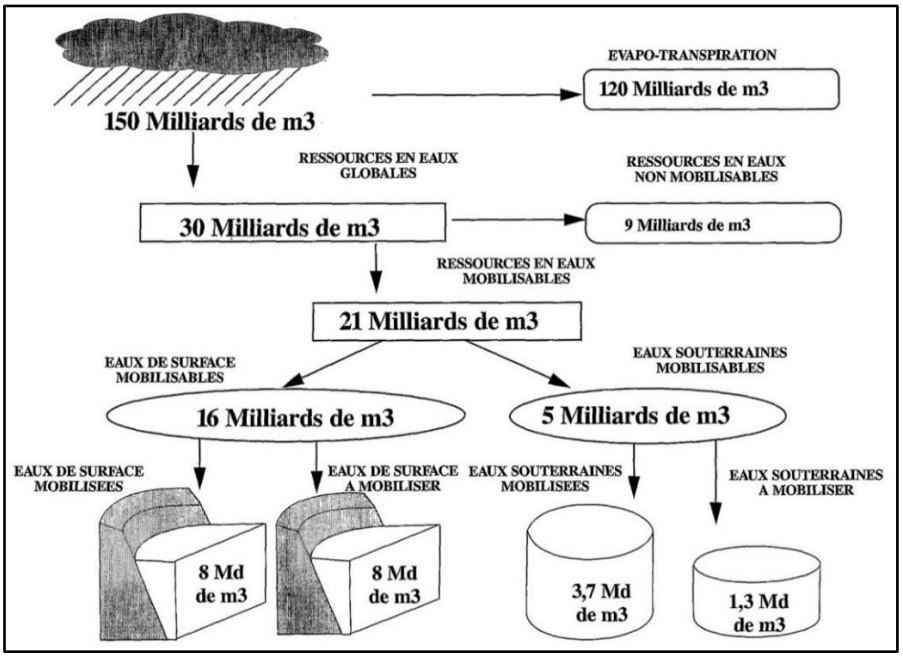


Figure 1.4 : Potentiel et état d'utilisation des ressources en eau au Maroc (Jellali, 1997)

1.7.3 Méthodes adoptées et démarche suivie

Notre méthodologie s'articule sur la valorisation de données multi-sources. Elle est basée sur la quantification des écoulements de surface et des lacs et leur mise en relation avec les facteurs naturels et anthropiques. Pour quantifier la ressource en eau souterraine dans le bassin nous nous appuierons sur l'hydrologie de surface, à l'échelle des bassins versants instrumentés (Fig. 1.5).

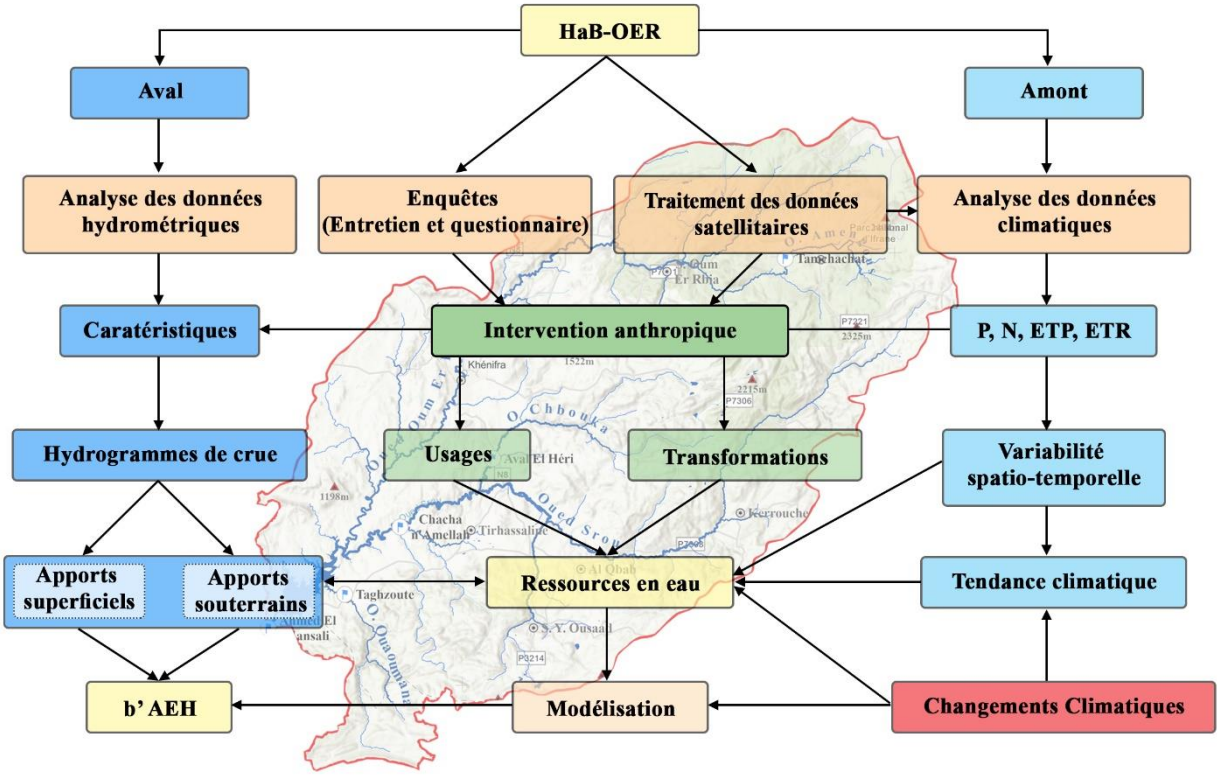


Figure 1.5 Organigramme général de travail

Les entrées des bilans hydrologiques, précipitation et évapotranspiration, sont très largement tirées des données issues des technologies de la télédétection ; très récentes, en cours de développement pour la plupart, leur utilisation nécessite une étape de validation qui est une contribution à la recherche fondamentale. Pour atteindre les objectifs attendus cette thèse adoptera une méthodologie pluridisciplinaire menée en 4 étapes qui sont précisées dans les points suivants.

1.7.3.1 Collecte de l'information existante : bibliographie, données

Cette étape, qui s'est poursuivie tout au long de la thèse, a consisté en la collecte de deux types d'informations. Le premier concerne classiquement la consultation des travaux universitaires (thèses, mémoires et articles scientifiques) et des rapports administratifs : Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia (ABHOER), Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD) de Fès-Meknès et de Khénifra, Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA) de Khénifra et d'Azrou, Office National de l'Electricité de l'Eau Potable - Branche Eau (ONEEP) de Khénifra et l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla (ORMVAT). Nous avons également consulté des documents émanant d'autres établissements régionaux et nationaux telles que : l'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie de Rabat (ANCFCC), la Province de Khénifra. On peut aussi y mettre les informations déjà organisées sous forme cartographique, telles la topographie, la géologie et la géomorphologie.

Le deuxième type d'informations concerne les données, c'est-à-dire les variables mesurées, qu'elles soient hydrologiques, météorologiques, hydrogéologiques... ou d'ordre "humain" comme celles des recensements de la population. Un autre type de données a été utilisé, celles dérivées des mesures faites à partir des techniques de télédétection spatiale, qui fournissent des informations sur l'état du sol (occupation, altitude) ou de l'atmosphère (précipitations, températures, etc). Pour tirer plus d'informations sur la topographie de la zone d'étude, une convention a été signée avec le Centre Aérospatial Allemand "DLR", pour avoir un Modèle Numérique de Terrain "MNT" de bonne résolution (12m) couvrant la totalité du HaB-OER.

Signalons que l'accès à la donnée a pu s'apparenter à une véritable quête tant celle-ci "a du mal à sortir des administrations". L'acquisition des données concernées auprès des différents services a été très difficile et chronophage.

1.7.3.2 Production de données : mesures hydro-climatiques et enquêtes

Il est indéniable que l'originalité d'un travail de recherche en géographie est inspirée de l'originalité des données de terrain et des résultats que l'on peut en tirer. En effet, cette originalité est fondée sur la spécificité, la pertinence et l'authenticité de ces données, qui constituent le socle sur lequel les analyses, interprétations et conclusions peuvent reposer. Cette étape cruciale consiste principalement à mener des travaux sur le terrain, en organisant plusieurs campagnes tout au long des années de la thèse et ayant divers objectifs, parmi lesquels les principaux sont :

- ✓ **Mesures hydrométriques** : des campagnes de jaugeages, effectuées sur les cours d'eau et les sources caractéristiques de la zone d'étude, ont été programmées en régime non directement influencé par les précipitations, dans le but de mieux comprendre la distribution et la contribution des réserves souterraines aux écoulements totaux ;
- ✓ **Mesures nivométriques** : des campagnes ont été programmées pour avoir des informations sur le couvert nival, en installant des instruments conformes aux normes de l'OMM ;

- ✓ **Validation des résultats de télédétection** : des campagnes de terrain spécifiques à la télédétection ont également été menées pour la reconnaissance des états de surface et la validation des résultats des classifications ;
- ✓ **Enquête** : En plus de la production de ces données quantitatives, une enquête par questionnaire et entretien a été réalisé auprès des utilisateurs et des acteurs de l'eau. Cette approche apporte un point de vue original sur la manière dont la ressource en eau est perçue. La méthodologie et le protocole d'enquête sont décrits dans le chapitre 9, cependant certains résultats sont présentés dans des chapitres précédents.

1.7.3.3 Analyse et traitement des données

Ce travail repose sur un vaste éventail de données de différentes natures, notamment des documents cartographiques, des images satellitaires, des photographies aériennes, des données météorologiques acquises et produites, des données hydrométriques acquises et produites, des modèles numériques de terrain (MNT), des variables dérivées des missions satellitaires, des données issues d'enquêtes et de questionnaires, ainsi que des données provenant de recensements de la population, ...etc. Pour traiter, manipuler, analyser et représenter toutes ces données spatialement référencées, nous avons fait appel à un Système d'Information Géographique (SIG).

Les cartes présentées dans ce document ont été générées à l'aide du logiciel "ArcGIS Pro". L'analyse statistique des données hydro-climatiques s'est appuyée sur le logiciel généraliste "Excel", ainsi que sur des outils spécifiques tels que "Hydracces", "Khronostat" et "XLSTAT". Pour le dépouillement des données hydrologiques, le logiciel "Depjau" a été utilisé. Les logiciels "ENVI" et "SNAP" ont été employés pour le traitement des images satellitaires. Enfin, la plateforme "Google Forms" et le logiciel "SPSS" ont été utilisés pour le dépouillement et l'analyse des résultats des enquêtes sur le terrain.

1.7.3.4 Modélisation hydrologique

Il s'agit d'un processus visant à simplifier la représentation d'un système complexe de bassin versant, dans le but de mieux appréhender sa dynamique en matière de ressources en eau. En raison de la demande croissante en eau, l'accent principal réside sur une planification efficace pour garantir une gestion durable de cette ressource. Cependant, la réalisation de cet objectif est entravée par une difficulté majeure liée aux importantes lacunes dans les connaissances fondamentales des ressources en eau.

Afin de pallier ces manques, les modèles hydrologiques sont parmi les outils à disposition pour obtenir une compréhension adéquate des caractéristiques du bassin versant. Une partie de cette étude se focalise sur la modélisation de la relation "pluies/débits" à différentes échelles temporelles. L'objectif est d'harmoniser l'ensemble de nos observations dans une représentation cohérente du fonctionnement hydrologique des bassins versants du HaB-OER aux stations hydrométriques. Les modèles sélectionnés, GR et SWAT, permettent de saisir la réalité opérationnelle des bassins, et d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans le HaB-OER en utilisant les sorties des modèles climatiques régionaux EURO-CORDEX comme données d'entrée.

1.8 Structure de la thèse

La structure de cette thèse est conçue pour présenter de manière systématique et organisée les différents aspects abordés. Elle est composée de dix chapitres, chacun explorant des domaines clés liés au fonctionnement hydrologique de la région du HaB-OER, à l'utilisation des ressources

en eau du b'AEH et à leur impact sur l'irrigation. Chaque chapitre se concentre sur des sujets spécifiques, tels que l'évaluation des ressources en eau, l'analyse des changements climatiques et la modélisation hydrologique. Cette structure guide le lecteur à travers les différentes étapes de la recherche, assurant une progression logique et une compréhension complète de l'étude.

- ✓ **Chapitre 1** : Contexte de l'étude, problématique, objectifs et méthodologie ;
- ✓ **Chapitre 2** : Le complexe physico-humain du HaB-OER ;
- ✓ **Chapitre 3** : Données d'observations aux stations et satellitaires pour l'étude climatique du HaB-OER ;
- ✓ **Chapitre 4** : Étude hydrologique pour l'évaluation des ressources en eau dans le HaB-OER ;
- ✓ **Chapitre 5** : Suivi et analyse de l'évolution des lacs et des sources du HaB-OER ;
- ✓ **Chapitre 6** : Modélisation pluie débit : choix, structure et performance ;
- ✓ **Chapitre 7** : Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le HaB-OER ;
- ✓ **Chapitre 8** : L'érosion hydrique : un vrai défi pour la ressource en eau du b'AEH ;
- ✓ **Chapitre 9** : Ressources en eau dans le HaB-OER : opportunités agro-touristiques et menaces écologiques ;
- ✓ **Chapitre 10** : La GIRE : Une alliance entre plans participatifs et sensibilisation proactive.

1.9 Conclusion

Ce chapitre sert de cadre conceptuel et scientifique pour notre travail. Il nous permet de situer notre recherche dans son contexte scientifique global, ainsi que de comprendre la problématique des ressources en eau d'un point de vue théorique. Il nous offre également un aperçu des travaux préalables réalisés dans le domaine d'étude, ainsi que des méthodologies qui ont été employées dans ces travaux. Cette compréhension préalable nous aide à sélectionner et à affiner la méthodologie que nous allons utiliser dans notre propre recherche.

L'examen de la modélisation hydrologique et des impacts des changements climatiques dans ce chapitre est justifié par leur pertinence actuelle dans le domaine de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Ils jouent un rôle crucial dans la gestion durable des ressources en eau, d'où leur importance pour notre étude.

Chapitre 2 : Le complexe physico-humain du HaB-OER

2.1 Introduction

Lorsque nous examinons les enjeux liés aux ressources en eau, il est essentiel de se baser sur l'unité clé des processus hydrologiques : le bassin versant. Ce dernier, représente à la fois une zone délimitée par des lignes de partage des eaux sur le plan topographique, et une zone de réception des précipitations (M. Roche, 1986), dont l'écoulement de surface converge vers un exutoire (OMM, 2012). En effet, Le bassin versant agit comme un collecteur, capturant les précipitations et les convertissant en écoulements vers un exutoire, avec des pertes d'eau influencées par les conditions climatiques et les caractéristiques physiques du bassin (M. Roche, 1963). Ces caractéristiques influencent considérablement la répartition entre le ruissellement direct et l'infiltration, ainsi que les chemins souterrains empruntés par l'eau qui alimente son cours d'eau exutoire (P.-A. Roche *et al*., 2012b).

La croissance démographique dans le HaB-OER, comme partout au Maroc, engendre une augmentation significative des besoins en eau au fil des années. Avec le développement des communautés et l'expansion des agglomérations, la demande en eau potable a connu une hausse importante. De plus, le HaB-OER connaît d'importants mouvements migratoires, notamment vers les centres urbains, qui offrent de meilleures opportunités éducatives, sanitaires et sociales, ainsi que vers des zones d'intérêt économique propices à la pratique des activités agricoles. Ces flux migratoires exercent également des pressions sur les ressources en eau, en particulier dans les zones d'attraction.

2.2 Les caractéristiques morphologiques du HaB-OER

2.2.1 Paramètres géométriques du HaB-OER

Avant de procéder aux calculs des processus hydrologiques, il est essentiel de dériver certaines caractéristiques géométriques et hydrographiques à partir des données topographiques. Dans cette étude, la topographie et les pentes ont été dérivées du MNT "TanDEM-X DEM" (© DLR, 2021), développé par le Centre Aérospatial Allemand (DLR : **D**eutsches Zentrum für **L**uft- und **R**aumfahrt). La mission satellitaire TanDEM-X a pour objectif de créer un MNT global. Ce qui le distingue particulièrement des autres MNT, c'est sa résolution spatiale exceptionnellement fine de 12 m (Podgórski *et al*., 2019). Lorsqu'on le compare à d'autres MNT mondiaux, il se démarque par sa précision supérieure (Vassilaki & Stamos, 2020). Le MNT a été utilisé pour délimiter le bassin versant ainsi que ses sous-bassins, pour calculer divers indices et pour extraire le réseau hydrographique.

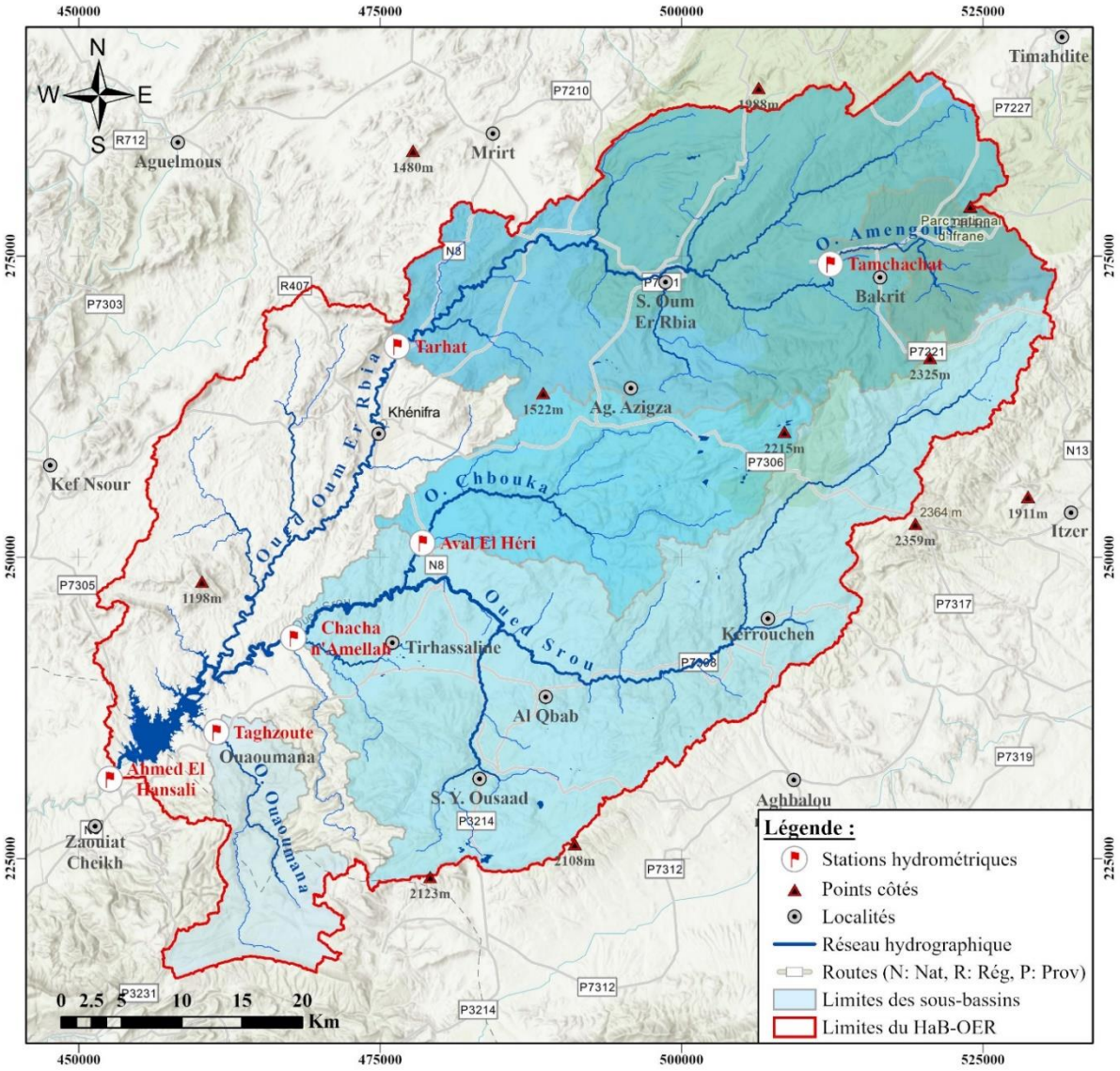
La détermination des caractéristiques morphologiques d'un bassin versant revêt une importance cruciale pour l'analyse de son comportement hydrologique (Baulig, 1959). La géométrie du bassin versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment sur la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements en période de crue (Saidi *et al*., 2003), ce qui influe directement sur la disponibilité des ressources en eau. Plusieurs formules et indices sont disponibles pour quantifier les aspects morphologiques des bassins versants, et nous privilégions ici les mesures introduites par M. Roche (1963).

La superficie d'un bassin versant (en km²) correspond à la zone délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. En parallèle, le périmètre (en km) représente la longueur totale de la ligne de contour du bassin. L'indice de compacité de Gravelius, noté "K_C", est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin versant et celui d'un cercle de même superficie que le bassin en question (Annexe 2.1, Équ. 2.1). Cet indice fournit des informations sur la forme du bassin

versant, laquelle exerce une influence directe sur les débits en période de crue et, par conséquent, sur la forme de l'hydrogramme résultant d'une précipitation donnée.

Le rectangle équivalent est une forme rectangulaire ayant la même superficie, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que le bassin versant. Son objectif est de simplifier la comparaison des bassins versants en termes d'impact sur l'écoulement. On désigne par L et l (Annex 2.1, Équ. 2.2 et 2.3) respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent (en km).

Les calculs de la superficie, du périmètre, de l'indice de compacité de Gravelius et des dimensions du rectangle équivalent ont été réalisés pour le HaB-OER ainsi que pour ses sous-bassins qui ont été définis en fonction de la localisation des stations hydrométriques (Carte 2.1). Les résultats de ces calculs sont récapitulés dans le tableau 2.1.



Carte 2.1 Délimitation du HaB-OER et de ses sous-bassins

Le HaB-OER couvre une superficie de 3387 km² à la station d'Ahmed El Hansali, avec un périmètre de 378 km. Parmi ses sous-bassins, le plus vaste est celui de Chacha n'Amellah, avec une superficie de 1421 km² et un périmètre de 272 km, tandis que le sous-bassin le plus petit est Tamchachat, avec une superficie de 134 km² et un périmètre de 83 km (Tab. 2.1).

Un bassin versant est considéré comme quasiment circulaire lorsqu'il présente un indice de compacité (Kc) égal à 1. Plus cette valeur est supérieure à 1, plus le bassin versant adopte une

forme allongée (Annexe 2.2). Le HaB-OER et ses sous-bassins ont un Kc supérieur à 1,8, ce qui indique que tous ces bassins versants ont une forme allongée. L'indice du rectangle équivalent confirme cette forme allongée des sous-bassins, avec une longueur presque dix fois supérieure à la largeur. Cette caractéristique ne favorise pas des temps de concentration élevés ce qui implique des temps de réponse assez long en cas de précipitations.

Tableau 2.1 Caractéristiques géométriques des bassins étudiés

	Superficie (Km^2)	Périmètre (Km)	Kc	Longueur (km)	Largeur (km)	Ir = L/l
HaB-OER	3387	378	1,82	169	20	8,5
Aval El Héri	354	129	1,92	58,3	6	9,7
C. n'Amellah	1421	272	2,02	124,4	11,4	10,9
Taghzoute	171	96	2,06	44,3	3,9	11,4
Tamchachat	134	83	1,99	37,7	3,6	10,5
Tarhat	1016	217	1,91	98,1	10,4	9,4

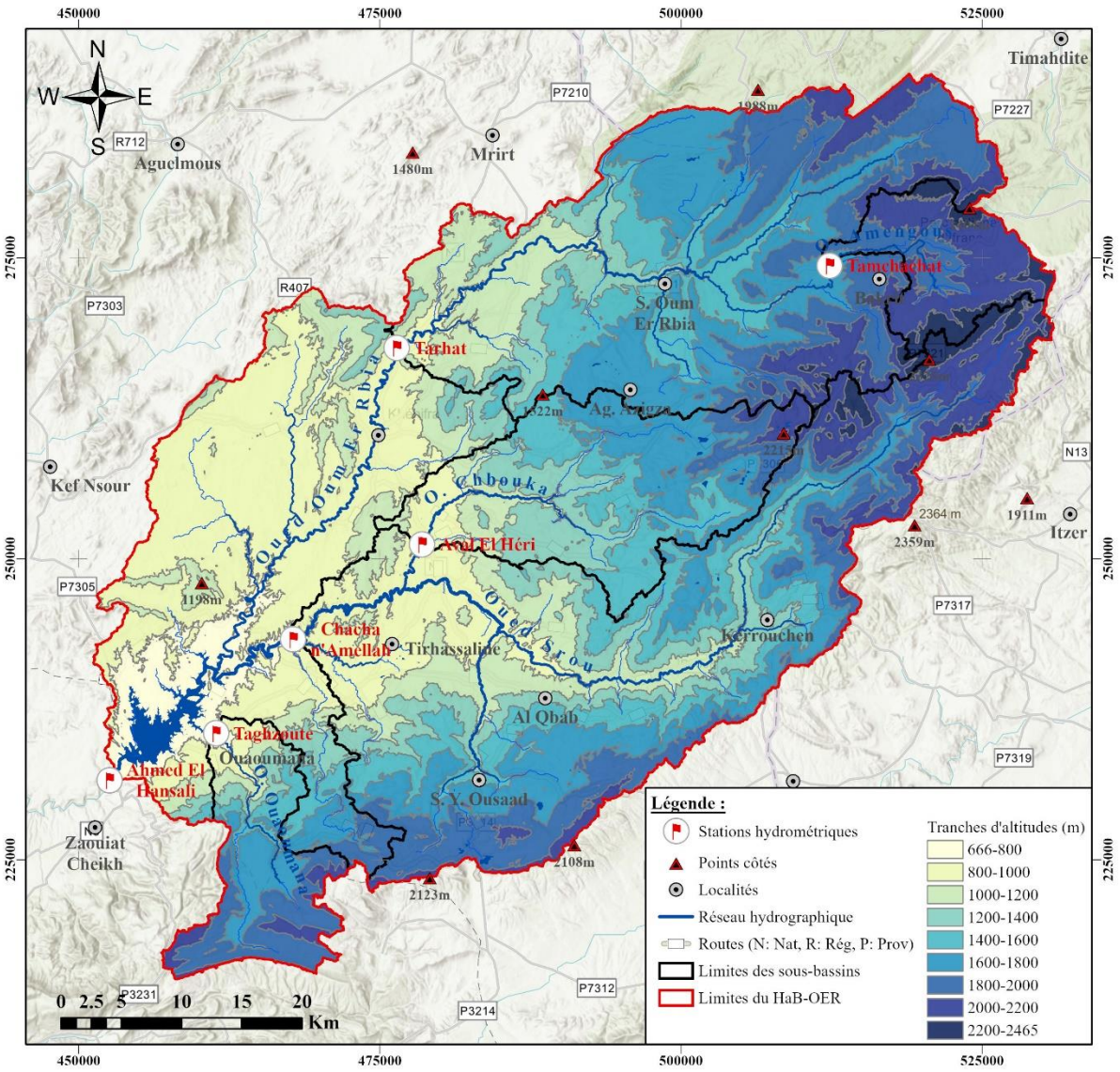
2.2.2 Caractéristiques topographiques : Contraste entre la Meseta et le Moyen Atlas

2.2.2.1 Hypsométrie

Les altitudes du relief sont un facteur géographique régional déterminant pour le climat, influençant les mouvements des masses d'air et les emplacements abrités face aux flux prédominants (Hufty, 2001). Les altitudes élevées au sein d'un bassin versant accélèrent le débit dans les cours d'eau, modifiant leurs profils en long et conférant au bassin un caractère torrentiel (Cheikh, 2018). L'analyse topographique revêt donc une importance cruciale dans les études hydro-climatiques, car elle exerce une influence significative sur les gradients thermiques, les précipitations, les processus de ruissellement, et joue ainsi un rôle majeur dans le comportement hydrologique des bassins versants.

Afin d'analyser les altitudes des bassins versants du HaB-OER et leur topographie, ceux-ci ont été subdivisé en tranches d'altitudes équidistante de 200m. Des disparités d'altitude se manifestent entre les deux régions qui caractérisent le HaB-OER. Les altitudes les plus élevées se situent principalement dans la partie du Moyen Atlas où 77% de la superficie du bassin est couverte par des altitudes dépassant les 1000 m, tandis que des altitudes inférieures à 1000 m prédominent dans la région du plateau central (Carte 2.2 et Annexe 2.3). Dans la partie amont du HaB-OER, le sous-bassin de Tamchachat présente l'altitude moyenne la plus élevée, à 2092m, ce qui le rend favorable aux précipitations neigeuses.

Le relief est fréquemment caractérisé par la courbe hypsométrique d'un bassin versant selon une méthode développée par Strahler (1952) (Z. Qadem, 2020) mise en œuvre pour évaluer la dissection et l'évolution du relief. Cette courbe permet d'analyser la distribution des altitudes en fonction de la superficie. Pour la créer, on représente une altitude donnée en abscisse et en ordonnée la surface du bassin pour laquelle chaque point est à une altitude égale ou supérieure à cette valeur (M. Roche, 1963). La courbe hypsométrique peut ensuite être utilisée pour déterminer les altitudes représentatives à différents pourcentages, à savoir $H_{5\%}$, $H_{50\%}$, et $H_{95\%}$. Ces valeurs reflètent l'aspect général de la topographie des bassins versants ainsi que leurs systèmes de pentes.



Carte 2.2 Hypsométrie du HaB-OER

À l'échelle du HaB-OER, la courbe hypsométrique révèle une prédominance des altitudes dépassant 1100 m, couvrant ainsi 70 % de sa superficie totale. En ce qui concerne l'histogramme de fréquence du HaB-OER, il présente une distribution bimodale, mettant en évidence deux classes d'altitude principales : [800m-1000m] et [1600m-1800m], qui représentent respectivement 19 % et 17 % de la répartition. Cette distribution est principalement influencée par les caractéristiques géologiques des régions constitutives du HaB-OER, à savoir le plateau central et le Moyen Atlas (Fig. 2.1).

En se basant sur les courbes hypsométriques des sous-bassins du HaB-OER (Annexe 2.4), la comparaison des altitudes dominantes révèle trois cas distincts. Environ les deux tiers des bassins de Chacha n'Amellah et d'Aval El Héri se caractérisent par des altitudes dépassant 1350 m, tandis que les bassins de Tarhat et de Taghzout présentent des altitudes dépassant 1600 m, et celui de Tamchachat dépasse les 2040 m. De plus, en considérant les altitudes caractéristiques (Tab. 2.2), la moyenne des altitudes pour les deux premiers sous-bassins est d'environ 1500 m, tandis que celle du deuxième cas est de l'ordre de 1660 m, et celle du troisième cas est de 2090 m.

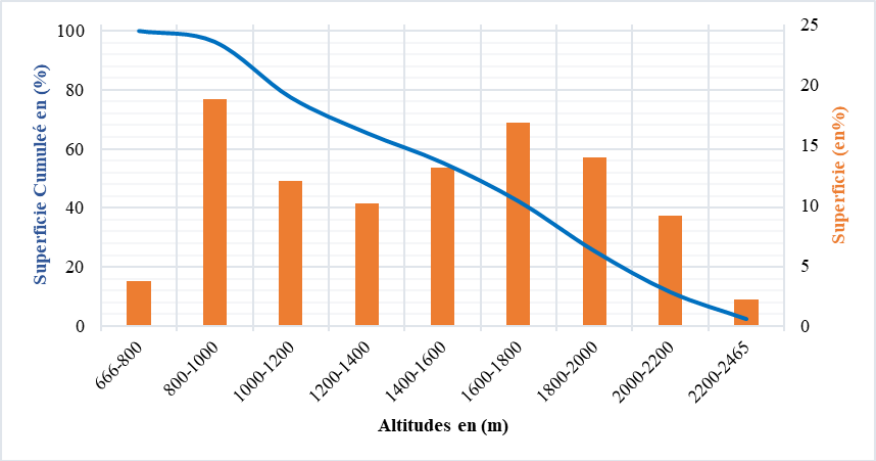


Figure 2.1 Courbe hypsométrique et histogramme des fréquences des classes d'altitude du HaB-OER

2.2.2 Système de pentes dans le HaB-OER

Les pentes jouent un rôle essentiel dans la configuration du réseau hydrographique, des lignes d'écoulement et de ruissellement résultant des précipitations (A. Qadem, 2014). Elles permettent d'évaluer deux éléments clés : l'énergie érosive et le temps de réponse des écoulements (Z. Qadem, 2020). La topographie du bassin est fortement influencée par cette caractéristique, ce qui a un impact significatif sur son comportement hydrologique. Plusieurs indices ont été proposés pour évaluer ce système de pentes, et nous utilisons les plus couramment employés.

La pente moyenne est une caractéristique essentielle qui fournit des informations sur la topographie d'un bassin versant tout en offrant une estimation pertinente du temps nécessaire pour le ruissellement direct. M. Roche (1963) a élaboré une formule simple permettant de calculer cette pente (en m/km) (Annexe 2.1, Équ. 2.4).

L'indice de pente globale, exprimé en m/km, est calculé en se basant sur la distribution des altitudes à l'intérieur du bassin versant, et il tend généralement à se rapprocher de la pente moyenne (Annexe 2.1, Équ. 2.5).

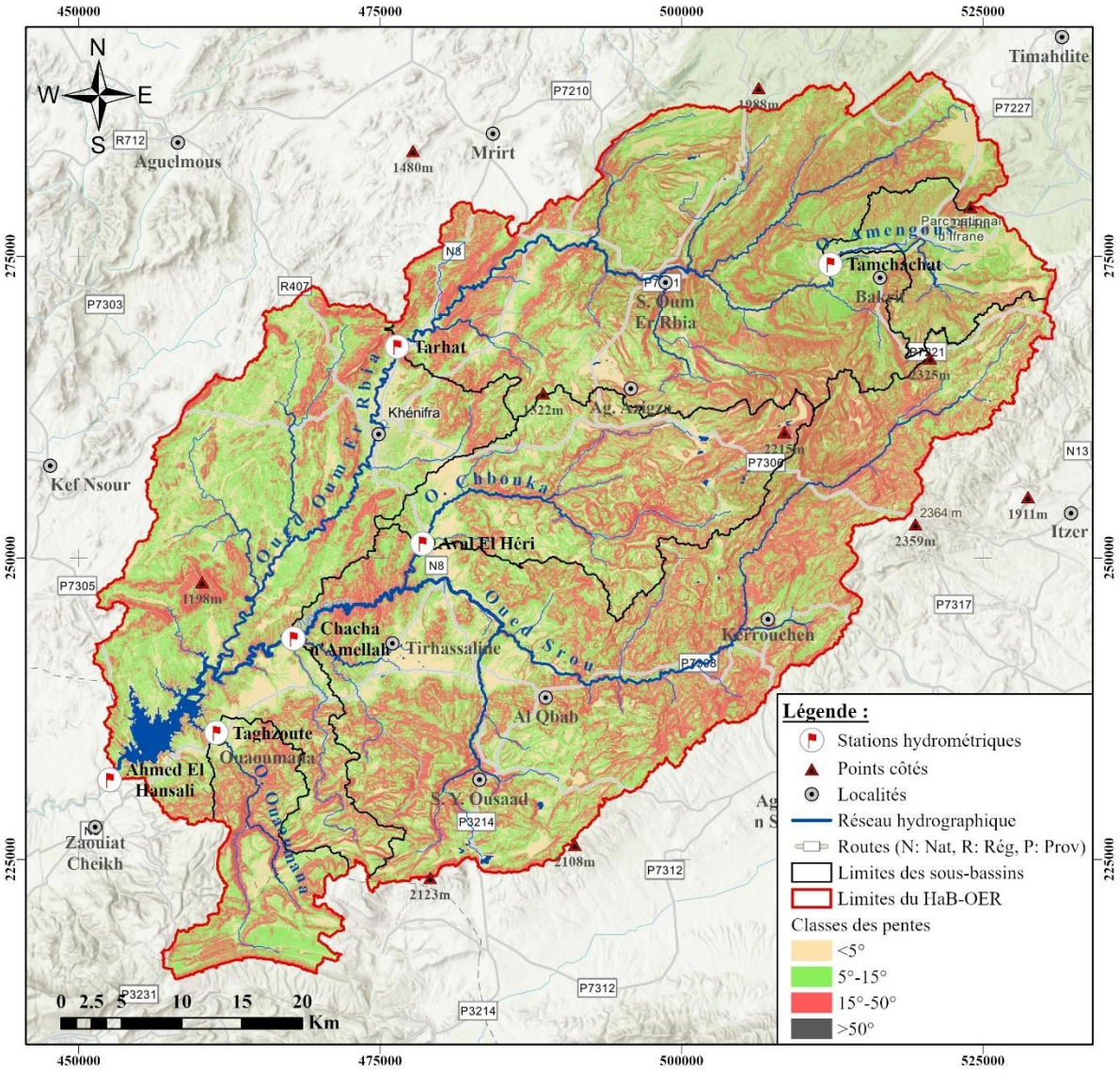
La dénivelée spécifique est exprimée en mètres et, en théorie, elle est indépendante de la superficie du bassin (Annexe 2.1, Équ. 2.6). On peut identifier différentes catégories de relief en fonction de la valeur de Ds (Annexe 2.5).

En comparant les sous-bassins du HaB-OER, on remarque que le sous-bassin de Chacha n'Amellah présente les valeurs les plus basses pour la pente moyenne et l'indice de pente globale, tandis que le sous-bassin de Taghzoute affiche les valeurs les plus élevées. En ce qui concerne la dénivelée spécifique, toutes les valeurs des sous-bassins indiquent des reliefs marqués, avec le sous-bassin de Chacha n'Amellah enregistrant la valeur la plus élevée (Tab. 2.2). Donc, à l'échelle de l'Hab-OER, l'énergie du relief favorise un écoulement de surface plus rapide.

Tableau 2.2 Altitudes et pentes caractéristiques du HaB-OER et ses sous-bassins

	H_{max} (m)	H_{min} (m)	H_{moy} (m)	$H_{5\%}$ (m)	$H_{50\%}$ (m)	$H_{95\%}$ (m)	S (m/km)	Ig (m/km)	Ds (m)
HaB-OER	2465	666	1471	2120	1480	820	10,6	7,7	447,6
Aval El Héri	2328	890	1485	1960	1500	940	24,7	17,5	328,8
C. n'Amellah	2391	747	1514	2120	1540	900	13,2	9,8	369,7
Taghzoute	2291	744	1640	2080	1750	900	34,9	26,7	348,9
Tamchachat	2463	1741	2092	2380	2090	1860	19,1	13,8	159,9
Tarhat	2465	919	1693	2180	1720	1080	15,8	11,2	357,3

Afin d'obtenir un aperçu de la répartition spatiale des pentes, une carte des pentes a été créée à partir du MNT TanDEM-X, en adoptant les classes de pentes définies dans des études antérieures, à savoir 5 %, 15 % et 50 % (Vernoux *et al*., 2007) (Annexe 2.6). À l'échelle du HaB-OER, les pentes s'accroissent avec le relief montagneux. En revanche, les larges dépressions et les plateaux se caractérisent par des pentes faibles (Carte 2.3).



Carte 2.3 Répartition spatiale des classes des pentes dans le HaB-OER

En général, les pentes présentent des inclinaisons allant de moyennes (5°-15°) à fortes (15°-50°), couvrant plus de 80 % du HaB-OER. Les pentes les plus prononcées se trouvent principalement dans les sous-bassins de Chacha n'Amellah et de Taghzoute, couvrant respectivement 42 % et 40 % de leur superficie (Fig. 2.2). Les pentes supérieures à 50% restent marginales.

Les pentes fortes, des sous-bassins de Chacha n'Amellah et de Taghzoute favorisent un écoulement rapide des eaux de pluie et de fonte des neiges vers les cours d'eau ; plus faibles dans les autres sous-bassins elles concourent à une meilleure infiltration de l'eau dans le sol, favorisant la recharge des nappes souterraines. Il est important de noter que d'autres facteurs interviennent également dans ces processus de ruissellement et d'infiltration, et qu'il ne faut pas se fier uniquement aux pentes pour les évaluer.

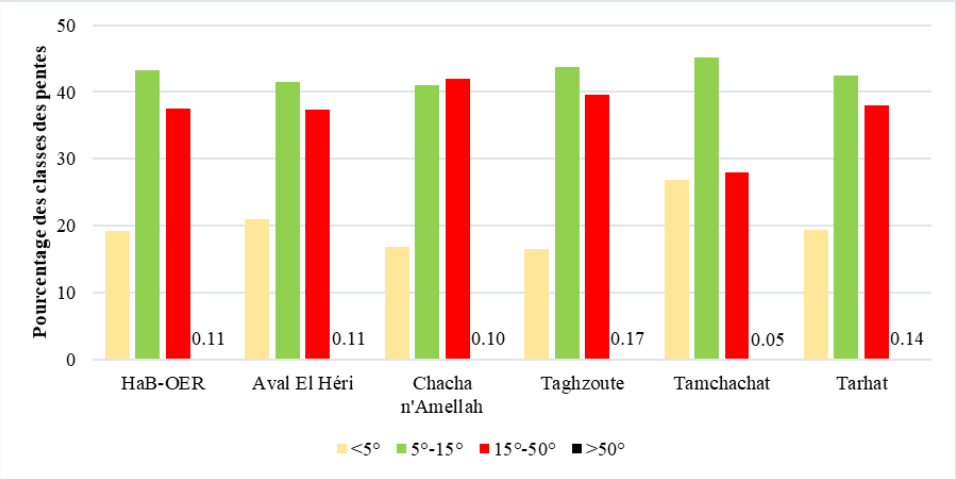


Figure 2.2 Réparation des classes des pentes dans le HaB-OER et ses sous-bassins

En relation avec les pentes, l'exposition des versants aux perturbations atmosphériques influence les précipitations dans le HaB-OER. Environ 52,5 % de sa superficie est exposée au nord et à l'ouest, ce qui peut favoriser des conditions plus humides et des précipitations plus abondantes (Annexe 2.7 et 2.8).

2.3 Contexte géologique du HaB-OER et spécificité des sources de l'Oum Er Rbia

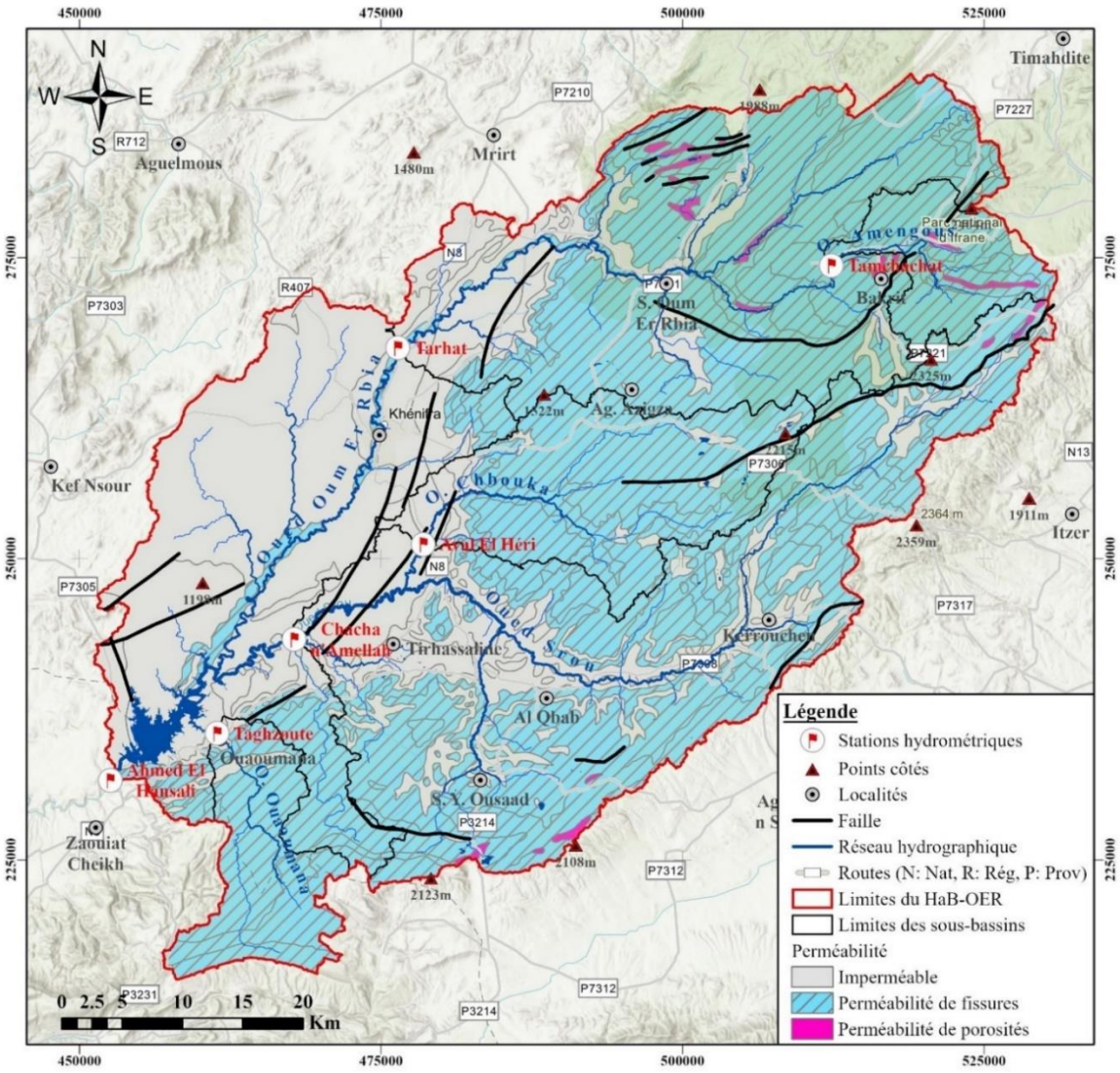
2.3.1 Le HaB-OER : une diversité lithologique dominée par les calcaires liasiques

Le contexte géologique joue un rôle essentiel dans la méthodologie adoptée dans cette étude. Cependant, en raison de l'indisponibilité de cartes géologiques détaillées couvrant l'intégralité du HaB-OER, on a utilisé les données géologiques extraites de la carte géologique à l'échelle de 1/500000 de Rabat (Annexe 2.9). Les formations lithologiques du HaB-OER se distinguent par leur diversité à la fois en termes de faciès et de lithologie. L'analyse de la répartition spatiale de ces formations met en évidence la prédominance des roches calcaires, qui couvrent environ 50% de la superficie du HaB-OER, suivies des schistes à hauteur de 20%, des argiles à 12% et des basaltes à 11% (Annexe 2.10).

Les propriétés de composition, structure et texture des roches exercent une influence significative tant sur le ruissellement en surface que sur l'écoulement souterrain. L'analyse préalable des affleurements du HaB-OER nous a permis de les classer en trois catégories en fonction de leur lithologie :

- ✓ **Imperméable** : comprend les schistes, les argiles rouges, les schistes limoneux, les dépôts encroûtés, les terrasses limoneuses, etc.
- ✓ **Perméabilité de fissures** : inclut les calcaires blancs ou beiges, les travertins, les calcaires, les basaltes doléritiques, les granites, les calcaires lacustres, les marno-calcaires, etc.
- ✓ **Perméabilité de porosités** : Cette catégorie couvre les alluvions, les éboulis, les conglomérats, etc

Dans la partie SO du HaB-OER, les affleurements de la Méséta centrale sont principalement composés de schistes et de flyschs paléozoïques imperméables. Cependant, ces formations sont recouverts par des dépôts calcaires jurassiques épais, prédominant dans la région du Moyen Atlas, et classés comme perméables en raison de leur perméabilité par fractures, formant ainsi un aquifère soutenant les écoulements à travers des sources. Les formations perméables couvrent 64 % de la superficie du HaB-OER (Carte 2.4).



Carte 2.4 Degré de perméabilité des roches dans le HaB-OER et ses sous-bassins

L'ensemble des sous-bassins est dominé par des formations perméables, principalement constituées de roches carbonatées karstifiées. En amont du HaB-OER, le sous-bassin de Tamchachat est presque entièrement recouvert de formations perméables, tandis que le sous-bassin de Chacha n'Amellah contient le plus grand pourcentage de formations imperméables, avec une proportion de 27,5 %, principalement composées d'argiles triasiques (Fig. 2.3).

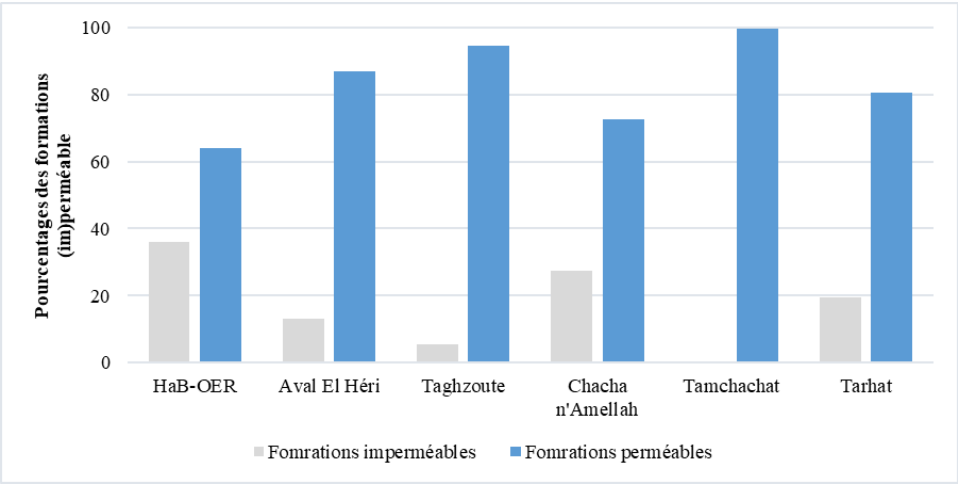


Figure 2.3 Répartition des formations (im) perméables à l'échelle du HaB-OER et ses sous-bassins

2.3.2 Le contexte géologique des sources de l'Oum Er Rbia

Les calcaires du Lias, dont l'épaisseur peut excéder 300 m, sont des roches perméables et karstfiables, formant le principal aquifère à l'origine de nombreuses sources, parmi lesquelles les plus importantes sont celles de l'Oum Er Rbia (Khalil, 2002). En effet, l'hydrogéologie du Moyen Atlas est particulièrement complexe, et l'écoulement en profondeur circule différemment de celui en surface (Chap. 1). Les sources de l'Oum Er Rbia sont alimentées par un bassin karstique, dont les trois quarts se trouvent dans le bassin du Sebou (Carte 1.4).

A la base de la région des sources, le substratum imperméable est composé d'argiles rouges gypsifères et salifères du Permo-Trias. Ensuite, on trouve les calcaires dolomitiques très perméables du Lias inférieur, suivis des marnes et des calcaires peu perméables du Lias supérieur au Crétacé, et enfin des basaltes quaternaires imperméables (Serbout, 2001) (Fig. 2.4). Au site de ces sources, le Lias inférieur entre en contact anormal avec le Trias par une faille de direction SO-NE. A la zone de contact entre le Lias et le Trias, les sources émanant de la partie ouest sont beaucoup plus salées que les sources douces situées dans la partie est, qui sont les véritables sources de l'Oum Er Rbia (Bentayeb & Leclerc, 1977). Les basaltes jouent le rôle d'écran imperméable, empêchant ainsi toute contamination des eaux de l'aquifère liasique par les formations salifères (Khalil, 2002).

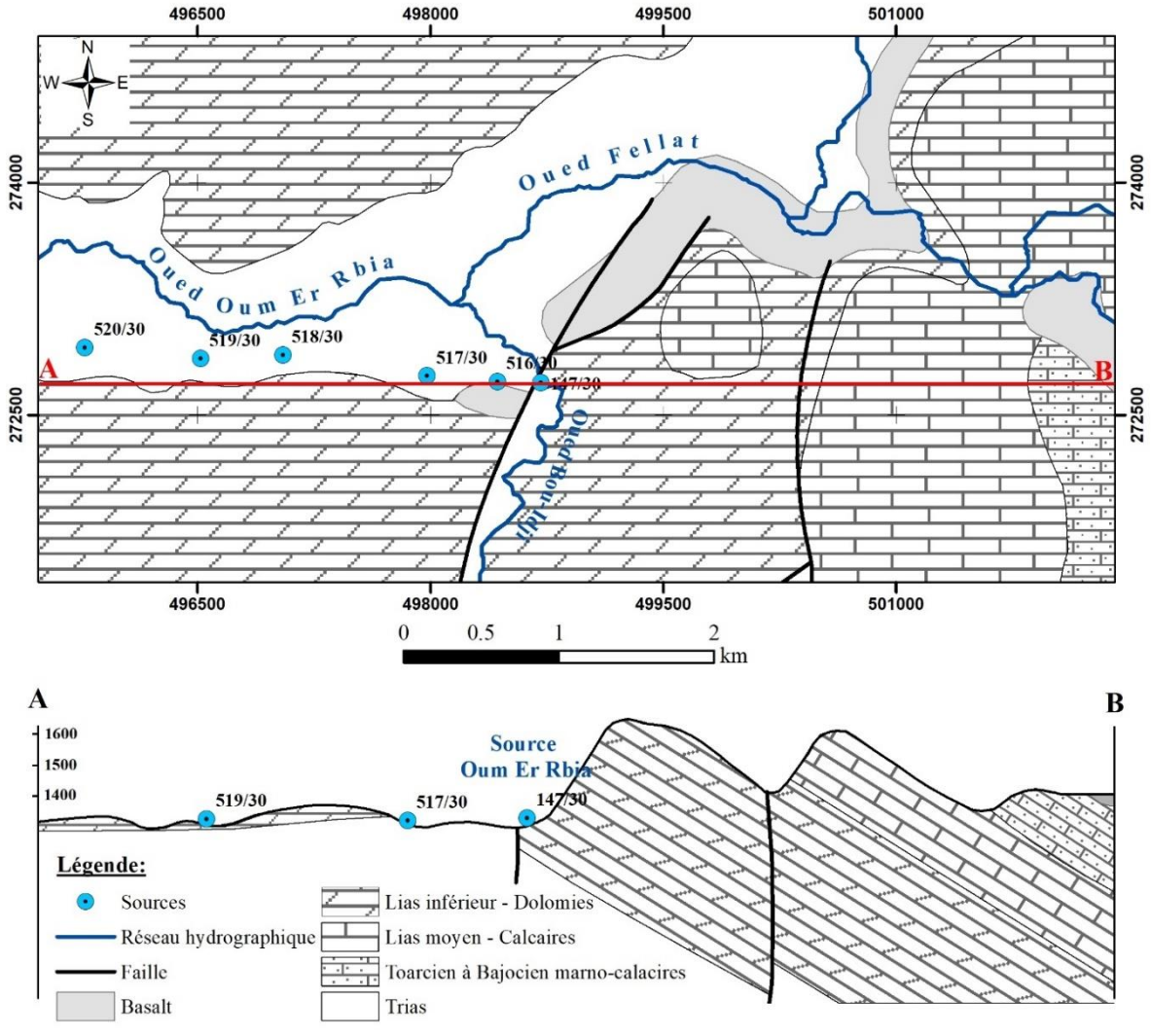
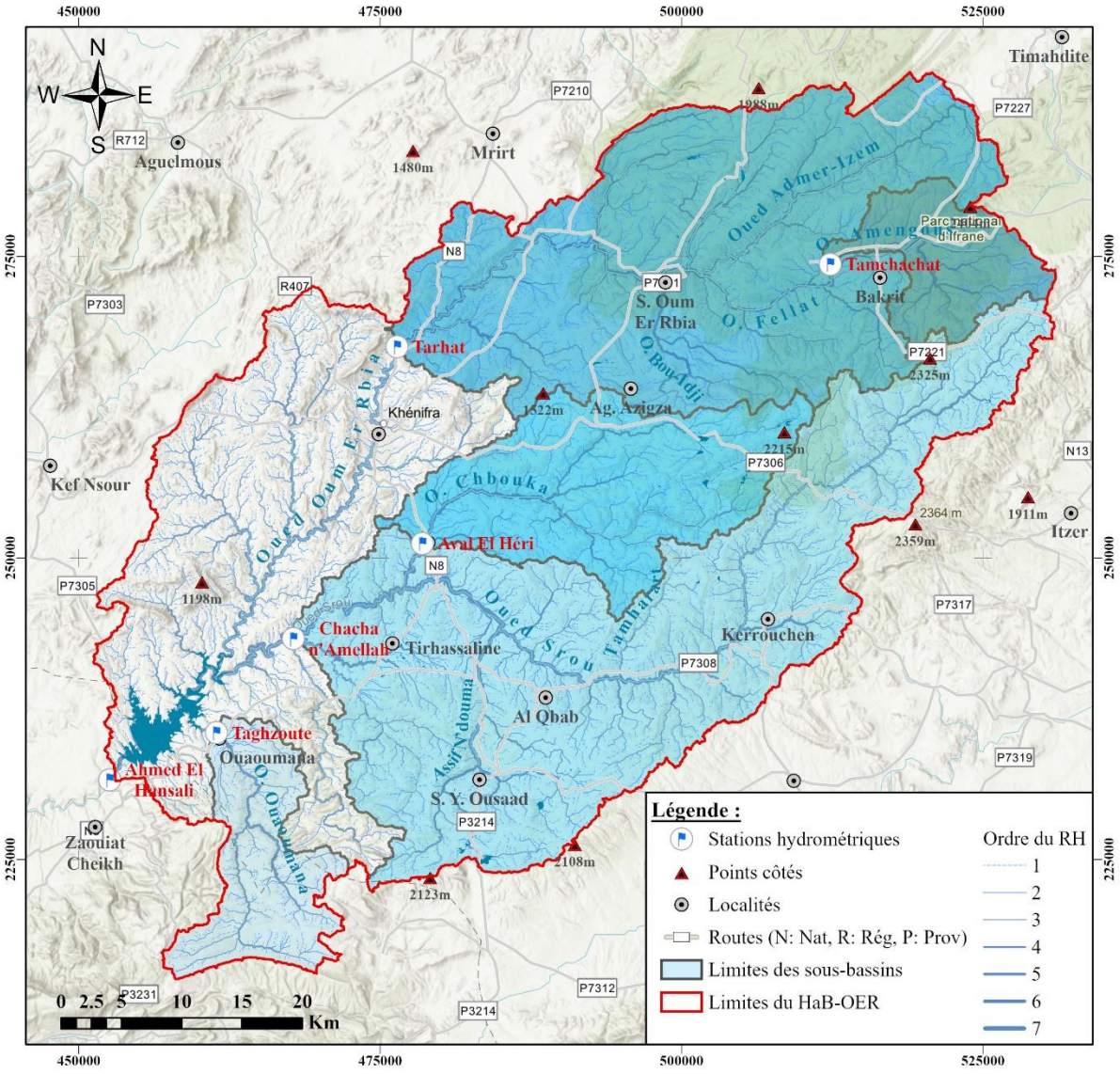


Figure 2.4 Coupe géologique des sources de l'Oum Er Rbia (Bentayeb & Leclerc, 1977) et contexte géologique (d'après la carte géologique 1/500000 de Rabat)

2.4 Les caractéristiques hydro-morphométriques du HaB-OER

2.4.1 L'Oum Er Rbia et le Srou : les deux cours d'eau les plus importants du HaB-OER

Les caractéristiques morphométriques, topographiques et géologiques étudiées précédemment, ainsi que d'autres facteurs, déterminent la configuration du réseau hydrographique. Ce réseau se définit comme l'ensemble des cours d'eau qui draine un bassin versant, y compris tous les canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent les eaux de ruissellement ou restituées par les nappes souterraines (M. Roche, 1963). Pour cartographier le réseau hydrographique du HaB-OER, on a utilisé onze cartes topographiques à l'échelle 1/50000 couvrant la totalité de la zone, ainsi que le MNT TanDEM-X. La méthode de classification employée est celle de Strahler (1957) (Carte 2.5).



Carte 2.5 Classification du réseau hydrographique du HaB-OER selon la méthode de Strahler

Dans la partie amont de l'Oum Er Rbia, l'oued Merzoulli se joint à l'oued Amengous pour former l'oued Fellat, qui, avec son affluent de rive droite, l'oued Admer-Izem, constitue le collecteur principal des précipitations dans l'amont du bassin. L'oued Fellat reçoit les apports des sources de l'Oum Er Rbia qui sont situées le long de l'oued Bou-Idji, et c'est à partir de cette confluence que le cours d'eau prend le nom de l'Oum Er Rbia. À l'extrémité sud-ouest du Moyen Atlas plissé, l'oued Srou, accompagné de ses affluents Tamharart, Assif N'douma et Chbouka,

représente le principal affluent de rive gauche de l'Oum Er Rbia. Vers le sud du HaB-OER, un autre affluent de moindre taille, l'Oued Ouaoumana, contribue également à l'alimentation de l'Oum Er Rbia (Carte 2.5 et Annexe 2.11).

2.4.2 Cours d'eau principaux et profils en long

Pour identifier les cours d'eau principaux du HaB-OER, on remonte depuis leur exutoire jusqu'à l'amont du bassin en suivant celui qui a l'ordre le plus élevé, mesurant ainsi la distance totale depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, que l'on appelle la longueur du cours d'eau principal (L). Quant au profil en long, il s'agit d'un relevé topographique réalisé le long de l'axe d'un cours d'eau, indiquant l'altitude en fonction de la distance (M. Roche, 1986). Ce relevé est ensuite représenté graphiquement, avec la distance à l'exutoire en abscisse et l'altitude correspondante en ordonnée (M. Roche, 1963). Le profil en long est essentiel pour caractériser la pente du fond d'un cours d'eau de l'amont à l'aval.

Les calculs des longueurs des cours d'eau principaux et les profils en long des cours d'eau principaux du HaB-OER ont été établis en utilisant les données issues du MNT TanDEM-X. Ces résultats nous ont permis de détecter de manière précise les variations de la pente ainsi que les principales ruptures (Tab. 2.3 et Annexe 2.12 et 2.13).

Le profil en long du cours d'eau principal de l'Oum Er Rbia, jusqu'au b'AEH, est constitué de deux parties distinctes. La première partie se caractérise par des pentes fortes, traduisant l'écoulement des cours d'eau dans les terrains du Moyen Atlas tabulaire, jusqu'aux sources de l'Oum Er Rbia, zone de contact entre le domaine du Moyen Atlas et le domaine du plateau central. Dans cette zone, les pentes deviennent plus faibles, ce qui traduit la transition de l'écoulement vers la partie du plateau central (Fig. 2.5). La variation de la pente des autres cours d'eau principaux dépend des conditions structurales locales (Annexe 2.13).

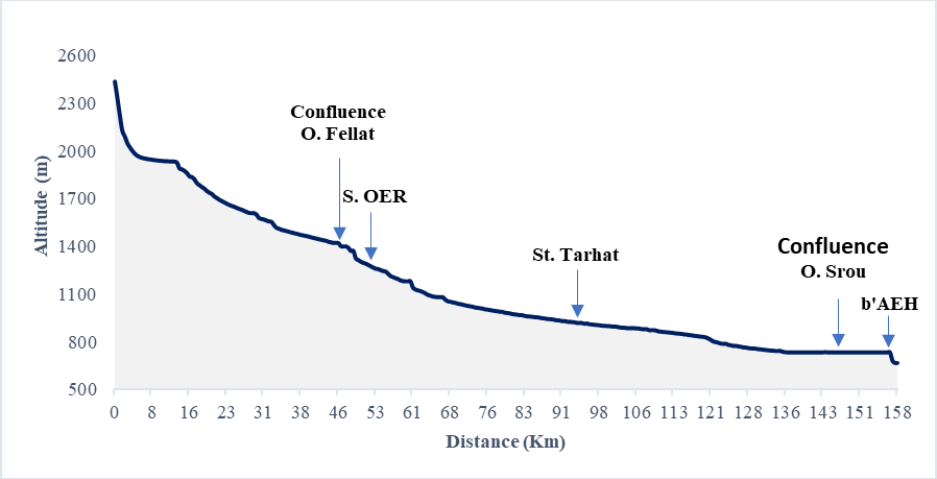


Figure 2.5 Le profil en long du cours d'eau principal de l'Oum Er Rbia

2.4.3 Indices hydro-morphométriques des cours d'eau du HaB-OER

Parmi les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser le réseau hydrographique on peut citer la densité de drainage et la pente moyenne des cours d'eau.

La densité de drainage (Dd) est définie comme la longueur du réseau par kilomètre carré (km/km^2) pour un bassin donné (Annexe 2.1, Équ. 2.7) (M. Roche, 1963). Cette densité dépend de facteurs telles que la géologie, la topographie du bassin versant, et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques (Musy & Higy, 2004).

La pente moyenne des cours d'eau (P_{moy}) peut être estimée à partir des profils en long des principaux cours d'eau. Cette mesure revêt une importance particulière dans l'évaluation des temps de concentration d'un bassin versant (Laborde, 2009) et influence la vitesse à laquelle l'eau atteint l'exutoire (Annex 2.1 : Équ. 2.8). Elle s'exprime en m/km.

Le HaB-OER et ses sous-bassins se caractérisent par une densité de drainage similaire, de l'ordre de 2 km/km² (Tab. 2.3). Cette valeur indique que ces bassins ont un réseau hydrographique relativement dense. Cette densité élevée peut s'expliquer par la topographie montagneuse de la région qui favorise la présence de nombreuses rivières et de ruisseaux.

Tableau 2.3 Caractéristiques hydro-morphométriques du réseau hydrographique du HaB-OER

	A en (km^2)	L en (km)	Dd en (km/km^2)	P_{moy} en (m/km)
HaB-OER	3387	158,4	2,11	11,2
Aval El Héri	354	52,9	2,05	24,2
C. n'Amellah	1421	115,3	2,09	12,9
Taghzoute	171	35,6	2,04	34,2
Tamchachat	134	30,3	2,19	16,2
Tarhat	1016	93,1	2.08	16,4

À l'inverse de la densité de drainage, les pentes moyennes des cours d'eau du HaB-OER varient considérablement d'un cours d'eau à l'autre. Cependant, cette diversité reflète précisément la topographie des sous-bassins et concorde largement avec les résultats de la pente moyenne "S" des sous-bassins. Ainsi, le sous-bassin de Taghzoute se distingue par des cours d'eau présentant une pente moyenne très forte par rapport aux autres bassins. Cela laisse présager d'une réponse hydrologique plus rapide aux précipitations, entraînant des écoulements plus prompts.

En résumé, les altitudes, les pentes, la lithologie et la densité de drainage sont autant de paramètres qui conditionnent le mode d'écoulement dans le HaB-OER. Ces caractéristiques sont étroitement liées au contraste entre ses deux composantes majeures. La partie moyen atlasique se caractérise par des altitudes élevées, des pentes prononcées et une prédominance de calcaires karstifiés, favorisant ainsi l'infiltration de la majeure partie des précipitations pour alimenter les principaux aquifères de la région. En revanche, le plateau central présente des pentes faibles et des altitudes inférieures à 1000 m, avec une dominance de roches friables imperméables. Ces conditions encouragent le ruissellement superficiel des eaux. À l'exception du sous-bassin de Tamchachat, situé en amont du HaB-OER, l'ensemble des autres sous-bassins témoignent de ce double processus, notamment le sous-bassin de Chacha n'Amellah, dont l'aval est riche en argiles triasiques.

2.5 Le couvert forestier dans le HaB-OER

2.5.1 Caractéristiques des principales forêts du Hab-OER

L'impact de la forêt sur le fonctionnement hydrologique des bassins méditerranéens, que ce soit pour les crues, les étiages ou même le bilan d'écoulement annuel, est encore sujet à débat (Cosandey *et al*., 2003). Néanmoins, les caractéristiques de la végétation, y compris la forêt, influent sur la redistribution des précipitations à l'échelle du bassin (A. Qadem, 2015). Plus précisément, la densité forestière contribue à atténuer la variabilité hydrologique (Andréassian, 2004). Parmi les activités humaines ayant un impact sur le fonctionnement hydrologique, la modification du couvert forestier est probablement l'une des plus répandues (Cosandey &

Robinson, 2012). Dans le HaB-OER, l'absence de cette couverture forestière a un impact direct sur les écoulements et prédispose le sol à diverses formes d'érosion hydrique (Serbout, 2001).

Les forêts occupent presque un tiers du HaB-OER, principalement dans les zones de haute altitude (Annexe 2.14). En se basant sur la carte des types de peuplements forestiers du Maroc (DPEFLCD, 2014), plusieurs forêts méritent d'être mentionnées, notamment :

- ✓ **La forêt d'Ajdir** : cette forêt est la plus vaste du HaB-OER, s'étendant sur une superficie de plus de 24000 hectares, soit plus de 7% de la surface totale de la zone d'étude. Elle est principalement composée de cèdre, qui représentent 68% de sa superficie, ainsi que de chêne vert couvrant 31% de la superficie totale. La forêt d'Ajdir abrite une diversité d'espèces animales, notamment des mammifères (singes, sangliers, lièvres), des oiseaux (corbeaux, grives, geais) et des espèces piscicoles (truites fario, barbeaux, rotengles) (Marghadi, 2009). Elle joue un rôle socio-économique significatif à l'échelle locale, régionale et nationale.
- ✓ **La forêt de Sidi Mguild** : cette forêt est la deuxième en termes de superficie, couvrant environ 11000 hectares, soit plus de 3% de la surface totale de la zone d'étude. Elle est principalement constituée de cèdre en mélange, représentant 76% de sa superficie, ainsi que de chêne vert couvrant 23% de la superficie totale.

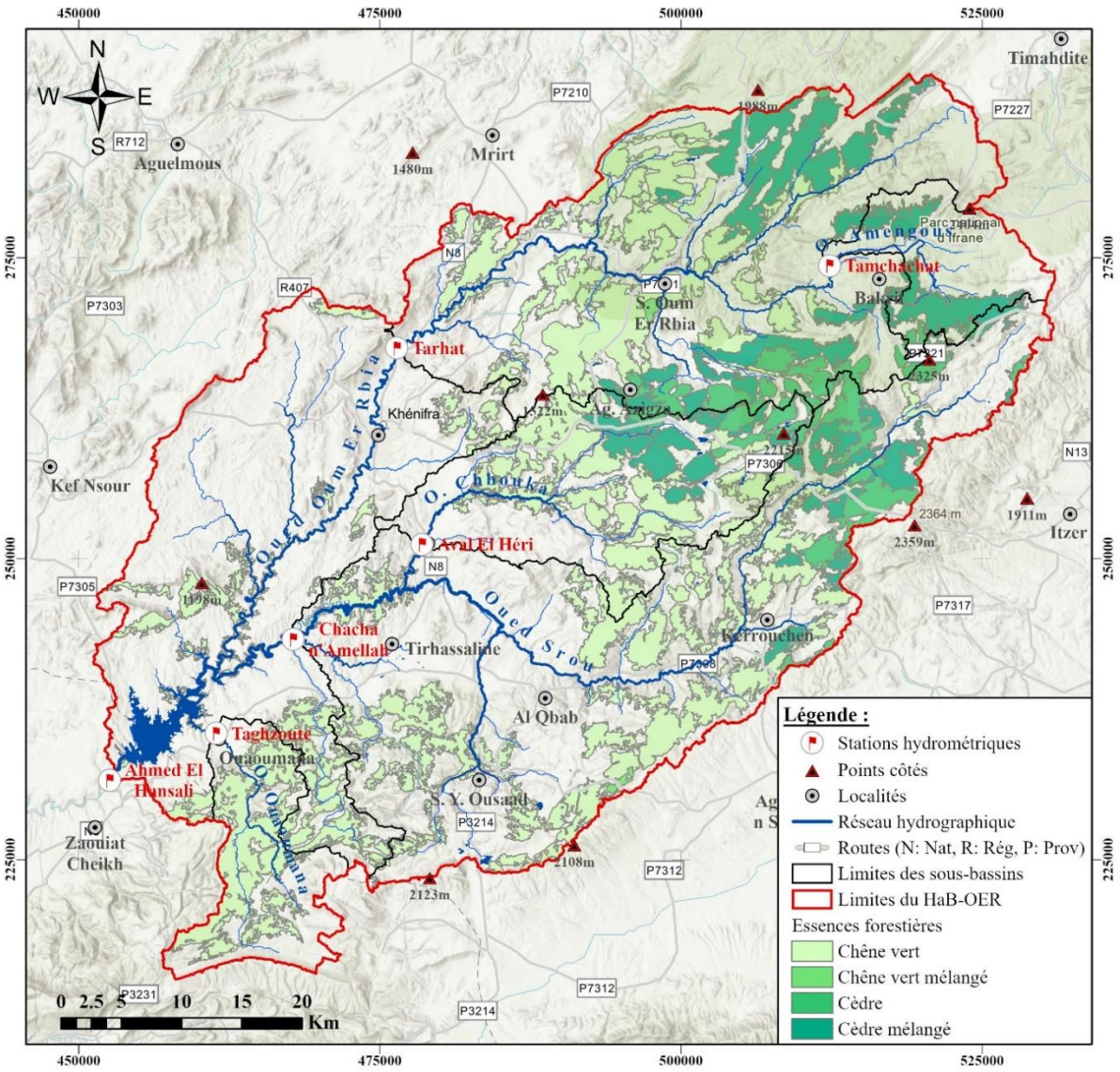
2.5.2 Principales essences forestières et leur prédominance dans le HaB-OER

Le HaB-OER est réputé pour sa diversité et sa richesse en essences forestières, abritant notamment des trésors naturels tels que le majestueux cèdre de l'Atlas et le robuste chêne vert. Ces arbres emblématiques illustrent la variété exceptionnelle de la flore qui peuple cette région montagneuse du Maroc.

Le chêne vert (Quercus rotundifolia Lamk) est une espèce emblématique de la région méditerranéenne, et on la retrouve dans toutes les régions montagneuses du Maroc (Marghadi, 2009). Dans le HaB-OER, le chêne vert prospère dans une plage altitudinale comprise entre 700 et 2200 m. Cette essence, ainsi que le chêne vert en mélange, couvrent une superficie de plus de 75000 hectares, ce qui représente 66% de la couverture forestière totale et occupe 22% de la superficie totale de la zone d'étude. Cette répartition se concentre essentiellement au centre et au sud du HaB-OER (Carte 2.6).

Le cèdre de l'Atlas (Cedrus Atlantica), qui est considéré comme l'arbre noble des forêts du Maroc, se distingue par ses dimensions imposantes en termes de hauteur et de circonférence. Il peut atteindre une hauteur remarquable de 65 m et présente une circonférence pouvant atteindre 8 m. Dans le HaB-OER, le cèdre de l'Atlas prospère de manière optimale dans une plage altitudinale située entre 1600 et 2400 m. Il est particulièrement abondant dans la partie NE du bassin et occupe, en association avec d'autres espèces, environ 10% de la superficie totale de la zone d'étude (Carte 2.6).

La répartition de ces espèces est influencée par l'altitude et, par conséquent, par les conditions climatiques. Ces deux essences, qu'elles se trouvent seules ou en mélange, occupent l'ensemble des sous-bassins du HaB-OER, mais avec des proportions variables (DPEFLCD, 2014). Le sous-bassin d'Aval El Héri est le plus boisé, avec plus de 50 % de couverture forestière, dont 34 % est constitué de chêne vert, tandis que le sous-bassin de Tamchachat est le moins boisé, avec une couverture forestière de 28 % composée exclusivement de cèdre et de cèdre en mélange. En revanche, la station de Taghzoute se caractérise par la présence exclusive de chêne vert, qui couvrent 45 % de sa superficie (Fig. 2.6).



Carte 2.6 Principales essences forestières dans le HaB-OER (DPEFLCD, 2014)

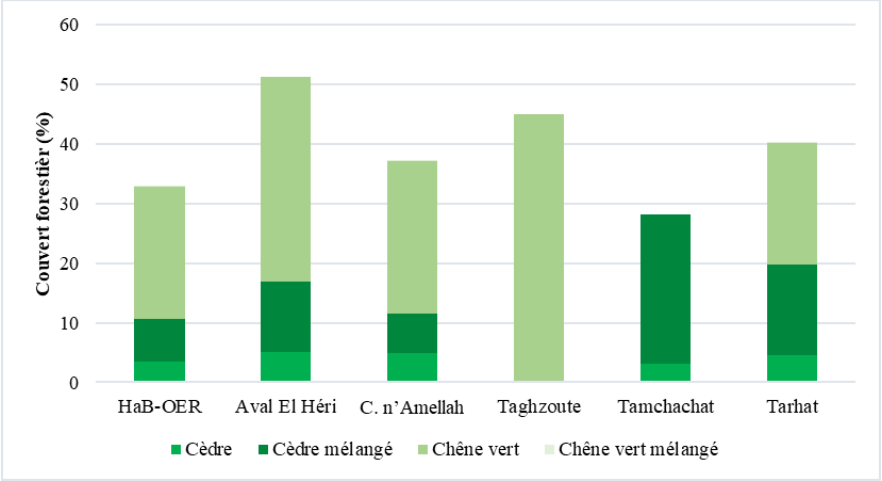


Figure 2.6 Répartition du couvert forestier dans le HaB-OER et ses sous-bassins(DPEFLCD, 2014)

En général, les forêts denses se localisent au niveau de la partie moyen atlasique du HaB-OER. Malgré une pente relativement forte et une pluviométrie importante, la présence de ces forêts associée à des calcaires fissurés favorise l'infiltration par rapport au ruissellement en surface, ce qui contribue à la protection du sol contre l'érosion.

2.6 Les caractéristiques démographiques du HaB-OER

Le HaB-OER s'étend sur 27 communes réparties dans les provinces de Khénifra, Béni Mellal, Ifrane et Midelt. La province de Khénifra prédomine dans la zone d'étude avec 17 communes, couvrant près de 80% de la superficie totale. Les recensements effectués au Maroc en 1994, 2004 et 2014 montrent une augmentation remarquable de la population du HaB-OER. En 1994, le nombre d'habitants était de 332 007, ce qui correspondait à une densité de 38 hab/km². Ce chiffre est passé à 354 030 en 2004 entraînant une densité de 40 hab/km², puis à 389 213 en 2014, soit une densité de 44 hab/km².

Malgré la tendance à l'augmentation de la population, l'évolution démographique diffère d'une commune à l'autre. En effet, seulement 20% des communes ont enregistré une augmentation de leur population entre 2004 et 2014 (Fig. 2.7). La plus forte augmentation de la population est principalement observée dans la ville de Khénifra, où la population a presque doublé entre 1994 et 2014, passant de 60835 habitants à 117510 habitants (pour des raisons d'échelle, ces chiffres élevés n'ont pas été inclus dans la figure 2.7). En revanche, la plupart des autres communes ont enregistré une diminution de leur population, principalement due à l'immigration vers les centres urbains et les grandes villes, ainsi que vers l'Europe comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.7).

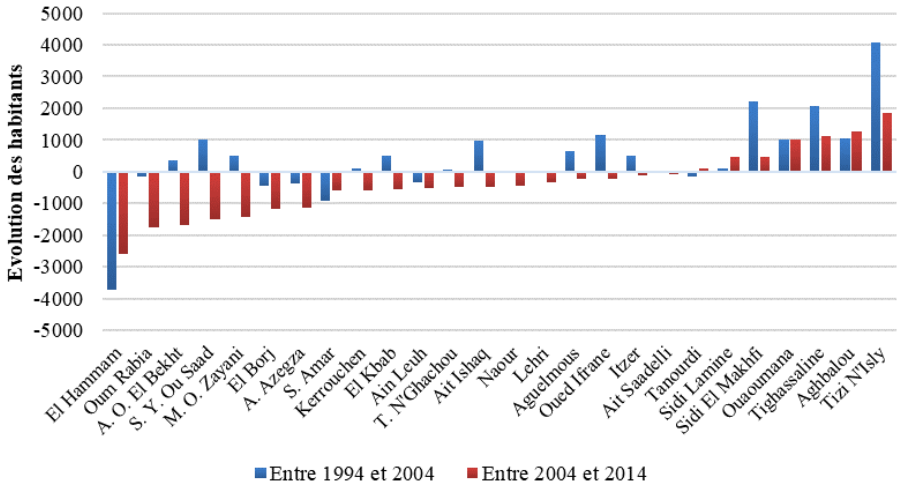
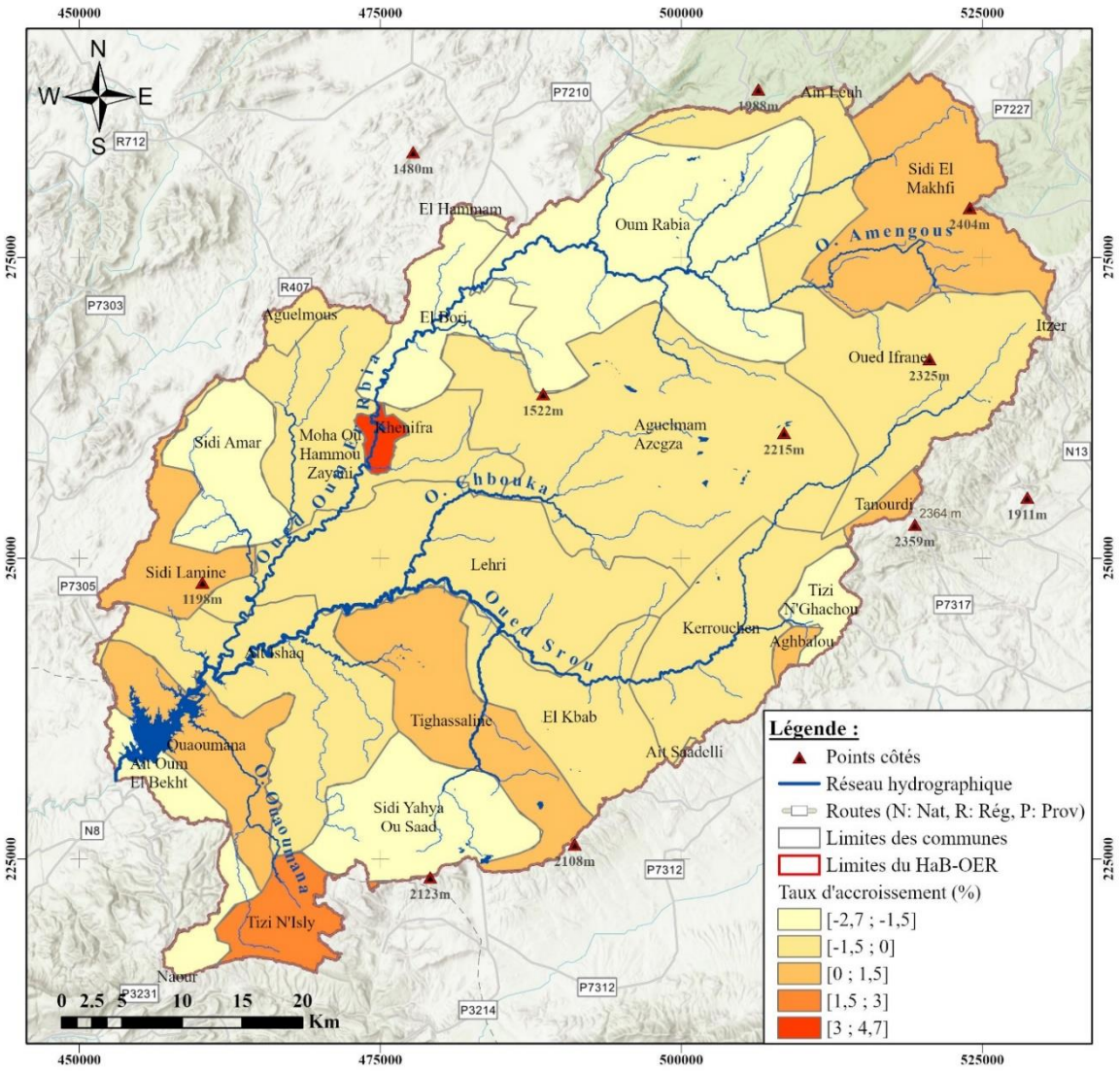


Figure 2.7 Évolution de la population à l'échelle communale entre 1994/2004 et 2004/2014

L'augmentation de la population est étroitement liée au taux d'accroissement de la population, car ce dernier permet d'évaluer la variation relative du nombre d'habitants d'une région ou d'un pays sur une période donnée. Il s'exprime en pourcentage et reflète l'augmentation ou la diminution de la population au cours de cette période. Le taux d'accroissement se calcule en utilisant l'équation 2.6 (Annexe 2.1).

À l'échelle du HaB-OER, on note une grande hétérogénéité dans le taux d'accroissement de la population entre les différentes communes. Ce taux varie de -2.7% pour la commune d'El Borj à 4.7% pour la commune de Khénifra. Afin de mieux présenter cette variation du taux d'accroissement, une carte de classification a été réalisée pour l'ensemble de la zone (Carte 2.7).

Les classes les plus représentatives sont celles correspondant aux taux d'accroissement négatifs, témoignant des diminutions de la population dans environ 80% de la zone étudiée. En revanche, les communes présentant un taux d'accroissement positif ne représentent que 20% de la zone. Elles sont localisées principalement dans le centre urbain de Khénifra ainsi que dans des sites favorables à la pratique des activités agricoles, tels que Ouaoumana et Tighassaline.



Carte 2.7 Taux d'accroissement annuel moyen de la population des communes du HaB-OER

2.7 Conclusion

L'analyse des caractéristiques physiographiques des sous-bassins du HaB-OER révèle un contraste entre les zones du plateau central, caractérisées par de faibles pentes, une lithologie imperméable et un manque de couvert forestier, et celles d'origine des cours d'eau du Moyen Atlas, avec des altitudes élevées, des pentes fortes, une lithologie calcaire karstifiée et une végétation dense. Ces facteurs physiques génèrent deux systèmes distincts : l'un favorisant l'infiltration des eaux et l'alimentation des ressources souterraines dans le Moyen Atlas, et l'autre favorisant l'écoulement en surface dans la Meseta.

L'accroissement démographique au sein du HaB-OER, avec la sédentarisation des nomades, les flux migratoires et l'attraction d'investisseurs, en particulier dans l'agriculture, ont augmenté les besoins en eau et la demande en ressources hydriques. Cette croissance démographique, surtout marquée en zones urbaines, a entraîné une augmentation de la demande en eau aussi bien pour la consommation domestique et l'assainissement, que pour l'agriculture en expansion afin de soutenir la production alimentaire.

Après avoir examiné les facteurs physiques et anthropiques influant sur la disponibilité en eau dans la région du HaB-OER, il est essentiel d'étudier le climat pour comprendre ses variations et leurs impacts sur les ressources hydriques de la région.

Chapitre 3 : Données d'observations aux stations et satellitaires pour l'étude climatique du HaB-OER

3.1 Introduction

Après avoir examiné les caractéristiques physiographiques du HaB-OER, l'étude des facteurs climatiques et de leur interaction avec les ressources en eau revêt une importance cruciale. En effet, ce sont les caractéristiques des variables climatiques telles que la pluie et la température qui déterminent le comportement hydrologique d'un bassin versant, plutôt que leurs propriétés spécifiques (P.-A. Roche *et al*., 2012b). Ainsi, l'évaluation des ressources en eau dans le HaB-OER repose sur la quantification des flux d'eau en circulation et la compréhension de leur potentiel énergétique.

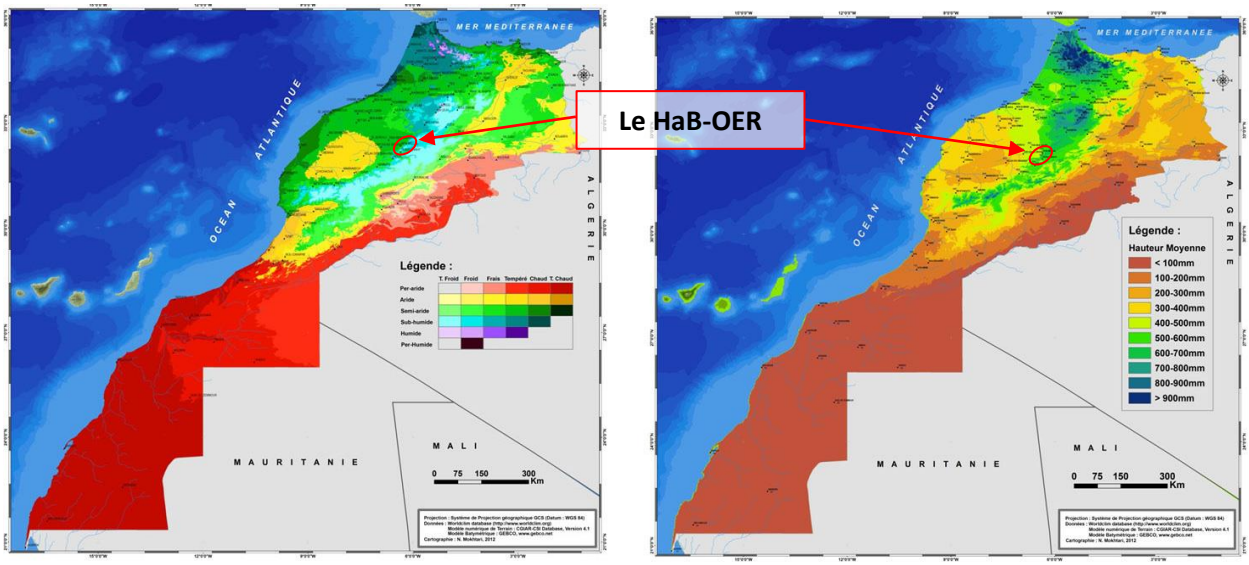
Dans cette optique, ce chapitre se concentre sur l'étude des variations spatio-temporelles des précipitations et de l'évapotranspiration à l'échelle du HaB-OER. Cette analyse s'appuie sur les données collectées auprès des stations hydrométriques sur une période de 44 ans. Tout d'abord, nous examinons la qualité de ces données en évaluant leur homogénéité et en comblant les lacunes présentes dans certaines séries pluviométriques. Ensuite, nous procédons à une analyse approfondie de ces données pour en tirer des conclusions visant à quantifier et à spatialiser l'impact du climat sur le régime hydrologique. Enfin, nous faisons appel à des données satellitaires pour combler les lacunes dans le suivi de certaines variables, notamment l'évapotranspiration et la couverture neigeuse.

3.2 Contexte climatique général

Le bassin méditerranéen, y compris le Maroc, se situe dans une zone de transition entre le climat aride et sec de l'Afrique du Nord et le climat tempéré et pluvieux de l'Europe centrale (Giorgi & Lionello, 2008). La Méditerranée est caractérisée par un système climatique complexe influencé par les interactions entre les processus des latitudes moyennes et tropicales (Vidal *et al*., 2016). En raison de sa position géographique au NO du continent africain, le Maroc se trouve à l'extrémité sud des latitudes moyennes de trajectoire de tempête (Knippertz *et al*., 2003).

Dans ce contexte, le climat marocain se caractérise par une grande diversité régionale, marquée par des contrastes accentués dus à la proximité de l'océan, du désert, de la latitude et du relief (Martin *et al*., 1964). Ainsi, on observe localement un climat de type méditerranéen, doux et humide sur le versant Atlantique, devenant continental et plus extrême vers l'intérieur (Ellatifi, 2012). En effet, le Maroc présente une palette complète de climats méditerranéens, incluant le climat saharien, aride, semi-aride, sub-humide, humide et de haute montagne (Emberger, 1964) (Carte 3.1). Par conséquent, cette diversité climatique se traduit par une forte irrégularité du régime des précipitations aussi bien dans le temps que dans l'espace (El Fellah Idrissi *et al*., 2017). La répartition spatiale des précipitations révèle que 48% du territoire marocain reçoit moins de 100 mm/an, alors que les régions où les précipitations dépassent 600mm/an ne représentent pas plus de 6% (Mokhtari *et al*., 2014) (Carte 3.2).

En ce qui concerne les températures, selon le dernier rapport de la DGM (2023), la température annuelle moyenne au Maroc est de 19°C, avec des températures mensuelles moyennes allant de 12°C (janvier) à 25°C (août). Les températures, oscillant entre 5°C et 45°C au centre du pays et atteignant 50°C au sud, se sont accrues de 1°C en moyenne sur une période de 50 ans (FAO, 2015). L'année 2022 est la plus chaude jamais enregistrée au Maroc depuis plus de 40 ans, dépassant l'année 2020, avec une anomalie de la température moyenne annuelle atteignant +1,63°C par rapport à la normale climatologique sur la période 1981-2010, contre +1,4°C pour l'année 2020 (DGM, 2021, 2023).



Carte 3.1 Etages bioclimatiques du Maroc (Mokhtari et al., 2014)

Carte 3.2 Pluviométrie moyenne annuelle du Maroc (Mokhtari et al., 2014)

Le HaB-OER, représentatif du Moyen Atlas et ses bordures, se caractérise par un climat humide et froid, correspondant à un climat méditerranéen de montagne (Martin, 1981). Il présente deux zones distinctes : une zone subhumide dans la partie du Moyen Atlas et une zone semi-aride au sud, entre la bordure du Plateau Central et la plaine de la Moulouya (Serbout, 2001). Afin d'examiner en détail les caractéristiques spatio-temporelles des précipitations dans le HaB-OER, une analyse approfondie des données collectées auprès des services concernés a été menée.

3.3 Analyse et interprétation des données climatiques observées aux stations dans le HaB-OER

3.3.1 La pluviométrie : le premier paramètre à considérer pour l'étude de la ressource en eau

3.3.1.1 Traitement des données pluviométriques observées

a. Réseau de mesures pluviométriques et choix de la période d'étude

Le climat est un facteur essentiel qui influe sur la disponibilité de l'eau, et ses caractéristiques sont évaluées en prenant en compte des paramètres telles que les précipitations et les températures (Mokhtari *et al*., 2014). La première étape de notre étude consiste à collecter les données nécessaires, suivie d'un diagnostic climatique spatial visant à garantir leur fiabilité avant leur utilisation. Compte tenu de la position géographique du HaB-OER les données proviennent de quatre Agences du Bassin Hydraulique "ABH" : de l'Oum Er Rbia "ABHOER", du Sebou "ABHS", de la Moulouya "ABHM" et du Bouregreg et de la Chaouia "ABHS" (Carte 3.3). Le choix des stations s'est basé sur plusieurs critères qui sont la proximité géographique par rapport à la zone d'étude, la longueur de la série de données disponibles et la qualité des données. Sur cette base 23 stations ont pu être retenues, dont 6 sont situées à l'intérieur de la zone d'étude et 17 dans ses environs (Carte 3.3 et Annexe 3.1 et 3.2).

Pour mener des approches statistiques rigoureuses, il est nécessaire de disposer de séries de données pluviométriques longues et homogènes. La plus longue période commune entre la plupart des stations s'étend de 1975/76 à 2019/20 (Fig. 3.1) ; Cette période de 44 année est donc la référence pour la caractérisation de la pluviométrie sur le HaB-OER.



Carte 3.3 Localisation des stations de mesures

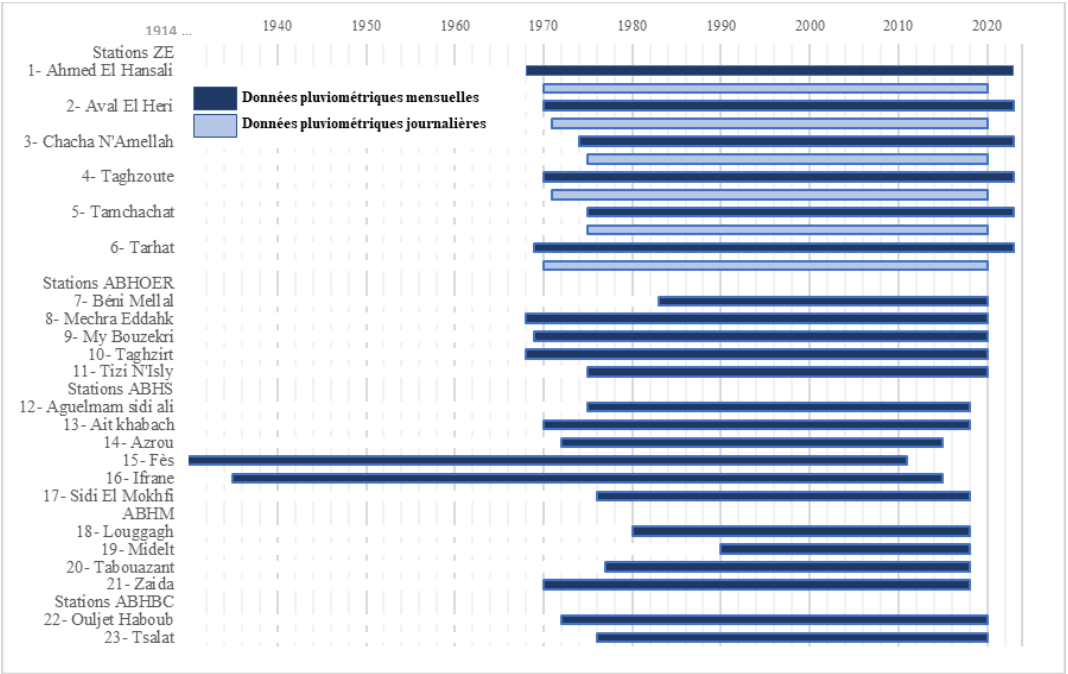


Figure 3.1 Chronogramme des stations pluviométriques utilisées

b. Critique des données et comblement des lacunes

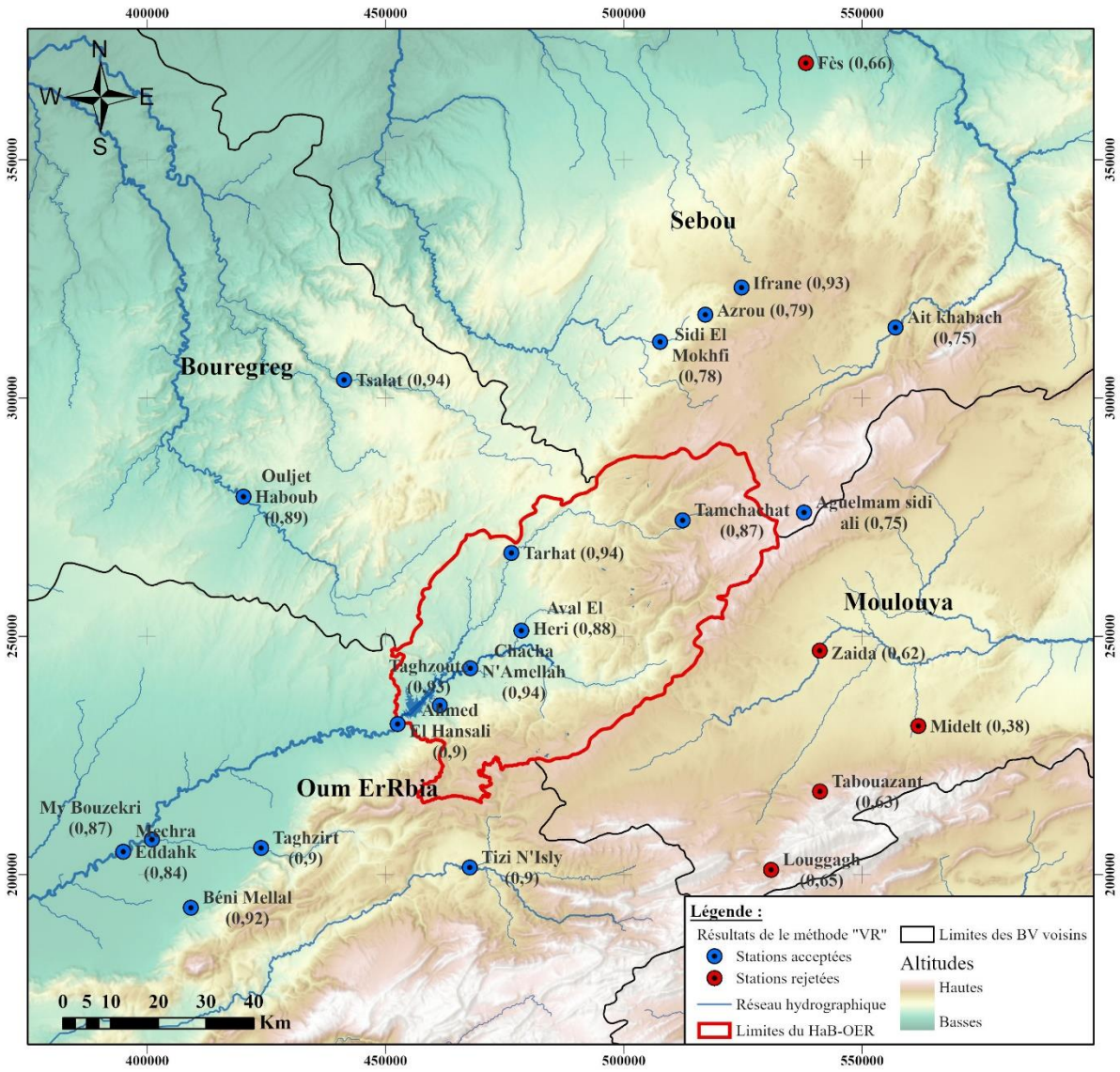
Un réseau d'observations pluviométriques est comparé à un système d'information dans lequel les données transmises peuvent être sujettes à diverses altérations (Hiez, 1977). En conséquence, toute analyse statistique doit reposer sur des données fiables et vérifiées. Ainsi, le contrôle et la critique des séries de données retenues constituent une étape préliminaire essentielle à toute analyse (Castellani, 1986). En général, les méthodes de critique de données se fondent sur le principe de vérification de la cohérence des données d'une station par rapport à celles des stations environnantes. L'une des approches couramment utilisées repose sur l'utilisation de sommes cumulées simples et doubles (Hiez, 1977) (Annexe 3.3). Ces méthodes s'appuient sur des données issues de groupes de stations appartenant à la même zone climatique, celle-ci étant déterminée sur des critères tels que la distance entre les stations, les effets du relief et le régime intra-annuel.

Le vecteur régional est une méthode reconnue pour sa sensibilité à la détection d'erreurs systématiques dans les séries de précipitations annuelles, et elle se distingue par sa simplicité et sa rapidité par rapport à d'autres approches disponibles (Le Goulven *et al*., 1988). Cette méthode établie par Hiez (1977) et améliorée par Brunet-Moret (1979), se présente sous la forme d'un modèle simple de type A=B+E où A représente la matrice des observations, B est la matrice des données, et E est la matrice des erreurs. Son principal objectif est de déterminer la tendance pluviométrique la plus probable d'une région donnée tout en évaluant l'homogénéité des séries de données et en confirmant les régions climatiques. Le vecteur régional présente plusieurs avantages, notamment l'optimisation de l'information existante et la capacité à reconstituer des valeurs manquantes (Mahe & L'Hôte, 1995).

L'évaluation de la qualité et de l'homogénéité des données, ainsi que le comblement des lacunes dans les données pluviométriques provenant des 23 stations dont nous disposons, ont été réalisés en utilisant la méthode du vecteur régional avec le logiciel Hydraccess (Vauchel, 2005). Dans ce processus, Hydraccess a calculé la corrélation de chaque station par rapport au vecteur régional et a généré des indices annuels et mensuels sur lesquels nous avons pu baser la reconstitution des valeurs manquantes de précipitations. Ainsi, la méthode a jugé que 70 % des stations étaient de bonne qualité et homogènes, excluant celles qui ne sont pas dans le même "domaine climatique" et dont les coefficients de corrélation sont inférieurs à 0,7 (Tab. 3.1 et Carte 3.4). Ce logiciel a également permis de combler les lacunes dans les séries de données de deux stations présentes dans notre zone d'étude : Ahmed El Hasnsali et Chacha n'Amellah.

Tableau 3.1 Coefficients de corrélation obtenus par la méthode de vecteur régional

Station	Corrél. /Vecteur	Qualité (/10)	Station	Corrél. /Vecteur	Qualité (/10)
Midelt	0,38	3,5	**Taghzirt**	0,9	8,6
Zaida	0,62	7,2	**Tizi N'Isly**	0,9	8,6
Tabouazant	0,63	7,1	**Béni Mellal**	0,92	8,7
Louggagh	0,65	5,7	**Ifrane**	0,93	9,2
Fès	0,66	5,6	**Tsalat**	0,94	9,4
Ait khabach	0,75	7,6	**Tamchachat**	0,87	7,3
Aguelmam sidi ali	0,75	6,4	**Aval El Heri**	0,88	9
Sidi El Mokhfi	0,78	7,3	**Ahmed El Hansali**	0,9	9,3
Azrou	0,79	8,9	**Taghzoute**	0,93	9
Mechra Eddahk	0,84	8,2	**Tarhat**	0,94	9
My Bouzekri	0,87	8	**Chacha N'Amellah**	0,94	9,1
Ouljet Haboub	0,89	8,7			



Carte 3.4 Résultat de la méthode du vecteur régional

Les résultats de la méthode du vecteur régional seront utiles pour nos prochaines études, en particulier pour la spatialisation des précipitations. Il convient de noter que nous n'inclurons pas les stations rejetées par cette méthode dans notre analyse.

c. Choix de la station représentative

En se basant sur les résultats de l'analyse du vecteur régional, les stations jugées homogènes indiquent qu'elles font partie du même domaine pluviométrique, suggérant ainsi qu'elles suivent la même tendance à l'échelle annuelle. Par conséquent, nous pouvons étudier la variabilité temporelle des précipitations en utilisant la série de données pluviométriques d'une seule station "représentative". Notre choix s'est porté sur les données observées à la station de Tarhat pour les raisons suivantes :

- ✓ la série de données est complète et ne présente aucune lacune ;
- ✓ la série de données est homogène et est caractérisée par de bons coefficients de corrélation (0,94) et de qualité (9) ;
- ✓ la station est située au cœur de la zone d'étude, à une altitude de 1036 m, dont 74 % de sa superficie dépassant cette altitude (Chap. 2) ;
- ✓ elle dispose de la plus longue période d'enregistrement des données, couvrant 53 ans, de 1969-70 à 2022-23.

De plus, Loup (1962) a affirmé que le débit à Tarhat est représentatif de la région, ce qui s'explique par la régularité des précipitations du Moyen Atlas et la particularité du régime des sources.

3.3.1.2 Analyse de la variabilité temporelle des précipitations

a. Les précipitations annuelles

La variabilité annuelle des précipitations dans la région HaB-OER est étudiée en utilisant les données de la station de référence de Tarhat. Sur la période de 1970-71 à 2022-23, la moyenne annuelle des précipitations s'élève à 576 mm, avec un écart type de 186 mm et un coefficient de variation élevé de 32 %, ce qui reflète une grande amplitude allant de 288 mm en 2021/22 à 1117mm en 1995/96 (Fig. 3.2). Étant donné l'objectif hydrologique de cette étude, les totaux pluviométriques sont calculés sur l'année hydrologique, entre septembre et août.

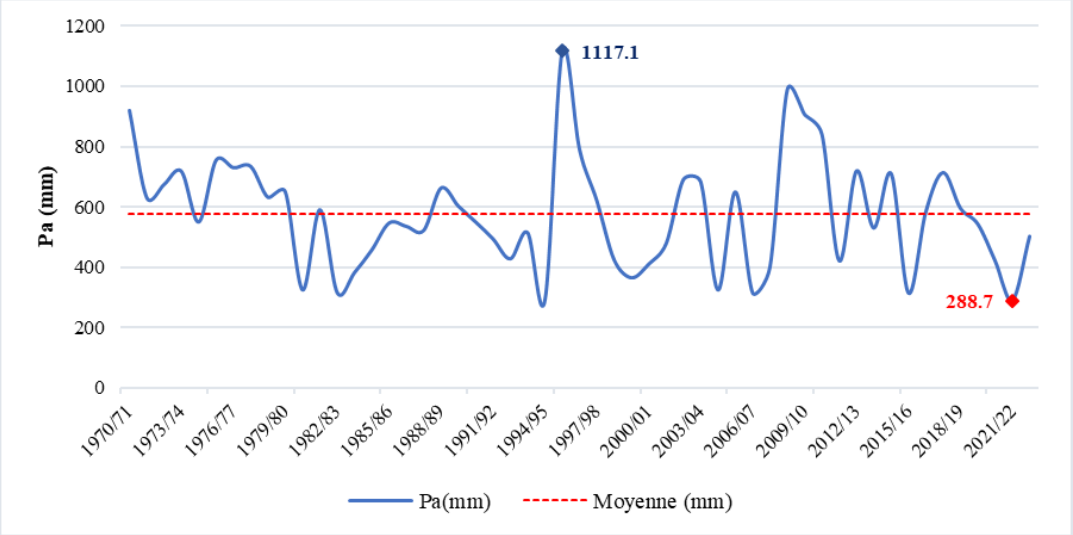


Figure 3.2 Précipitations annuelles à la station de Tarhat entre 1970/71 et 2022/23

Le coefficient de variation enregistré à la station de Tarhat est cohérent avec ceux démontrés par d'autres études sur la variabilité annuelle des précipitations au Maroc, variant entre 25 % près de la côte atlantique selon Knippertz *et al*. (2003) et atteignant 40 % à l'ouest selon Driouech *et al*. (2009). En effet, la forte variabilité interannuelle est une caractéristique des précipitations méditerranéennes (Driouech, 2010).

Cependant, cette variabilité ne permet pas de discerner clairement la succession des années sèches et humides, et l'identification de périodes homogènes s'avère complexe. En utilisant des indices climatiques et des tests statistiques, de nombreux chercheurs ont examiné les tendances des précipitations à différentes échelles géographiques. Parmi eux, on peut citer Driouech (2010) au Maroc, Chaponnière (2005) et Ouatiki *et al*. (2019) dans le bassin de l'Oum Er Rbia, ainsi que Nejjari (2002) et Qadem (2015) dans le haut bassin du Sebou. L'ensemble de ces études converge vers une tendance à la baisse des précipitations depuis le début des années 1980.

Pour repérer les tendances sèches et humides au sein de la série de données, on peut utiliser la méthode du CUSUM (Équ.3.1) développée par Lettenmeyer (1976). Cette méthode est définie comme l'écart du cumul des valeurs (Cj) avec la droite moyenne, et vise à évaluer l'hétérogénéité interne de la série en se basant sur la définition d'un intervalle de confiance (bande passante Cjx, Équ. 3.2) (François *et al*., 1993).

$$Cj = \sum_{j=1}^{N} (X_j - \bar{X}) \qquad \textit{(Équation 3.1)}$$

Avec :
X_j : pluie annuelle ;
$\bar{X}$: moyenne pluviométrique de la période étudiée.

$$Cjx = \pm S\left(\frac{u\sqrt{N}}{4} + \frac{u^2}{2\sqrt{2}} + \frac{u^3}{8\sqrt{N}}\right) \qquad \textit{(Équation 3.2)}$$

Avec :
S : écart type ;
u : variable réduite de Gauss ;
N : nombre de valeur de la série

L'analyse du CUSUM révèle que les données de la station Tarhat forment une série hétérogène, composée de quatre périodes de tendances contrastées (Fig. 3.3). Une période humide dépasse le seuil supérieur de confiance jusqu'à l'année 1979-80, suivie de deux périodes sèches entre 1980-81 et 2022-23, avec une période humide intercalée entre 2008-09 et 2014-15. En effet, ces intervalles sont similaires à ceux observés dans les études antérieures sur les tendances pluviométriques au Maroc.



Figure 3.3 CUSUM de la série des précipitations observée à la station de Tarhat entre 1970-71 et 2022-23

Le contraste entre les précipitations lors des périodes humides et sèches est de 200 mm, ce qui équivaut à une réduction de 30 % (Tab. 3.2 et Annexe 3.4). La diminution des précipitations pendant les périodes sèches peut avoir d'importantes répercussions sur la disponibilité de l'eau dans le HaB-OER. Cela peut se traduire par une baisse du débit des cours d'eau, ce qui affecte directement l'alimentation du b'AEH et, par conséquent, l'approvisionnement en eau.

Tableau 3.2 Résultat du découpage des données des précipitations annuelles à la station de Tarhat

	Moyenne (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Ecart type (mm)	CV (%)
1970-71/2022-23	576.1	288.7	1117.1	186.7	32
Série 1 : 1970-71/1979-80	699.2	549.3	920.4	99.7	14
Série 1 : 1980-81/2007-08	516.6	290	1117.1	178	34
Série 2 : 2008-09/2014-15	730.9	420.6	989.4	203.1	28
Série 3 : 2015-16/2022-23	494.9	288.7	713.7	145.9	30

Une autre approche pour étudier la variabilité d'une série de données est l'analyse fréquentielle. C'est une méthode statistique de prédiction qui repose sur l'examen des événements passés caractéristiques d'un processus donné en vue de déterminer les probabilités d'apparition future (El Ghachi & Morchid, 2015). Cet aspect prédictif est particulièrement pertinent dans le contexte des études axées sur la gestion des ressources en eau (A. Qadem, 2015).

En utilisant le logiciel "Hyfran-plus", les données pluviométriques de la station Tarhat ont été ajustées à différentes lois statistiques. Ce logiciel permet de comparer l'ajustement de plusieurs distributions afin de choisir le modèle le mieux adapté pour représenter la série de données (El Adlouni & Bobée, 2014). Ce choix est guidé par divers tests, notamment les critères d'information d'Akaike (AIC) et bayésien (BIC) (Benameur *et al*., 2017). Pour ces deux critères les valeurs les plus faibles caractérisent un meilleur ajustement (Ehsanzadeh *et al*., 2010). Pour les pluies annuelles enregistrées à la station de Tarhat c'est la loi Lognormale qui s'ajuste le mieux (Tab. 3.3 et Annexe 3.5). Cette méthode nous a permis également de déduire les périodes de retour des précipitations annuelles à la station de Tarhat (Tab. 3.4).

Tableau 3.3 Résultats du choix de la distribution statistique la plus adéquate

	BIC	**AIC**
Lognormal (Maximum Likelihood)	708.44	704.5
Gumbel (Maximum Likelihood)	709.07	705.12
Weibull (Maximum Likelihood)	711.46	707.52
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	711.53	705.62
Normal (Maximum Likelihood)	711.66	707.72
Log-Pearson type 3 (Method of moments)	711.87	705.96
GEV (Method of weighted moments)	712.46	706.55

Les valeurs extrêmes des précipitations enregistrées à la station de Tarhat pour la période de 1970-71 à 2022-23 sont d'ordre cinquantennal pour le minimum (289 mm) et centennal pour le maximum (1117 mm), tandis que la moyenne (576 mm) est d'ordre médian. Ces données révèlent que le bassin HaB-OER bénéficie de quantités de précipitations plus élevées par rapport à d'autres bassins versants, notamment son voisin du nord, le haut Sebou. Les fréquences des précipitations de différents ordres enregistrées à la station de Tarhat sont plus élevées que celles enregistrées dans la plupart des stations du haut Sebou (A. Qadem, 2015; Z. Qadem *et al*., 2019; Ztait *et al*., 2020).

Tableau 3.4 Périodes de retour des précipitations annuelles à la station de Tarhat selon la loi Lognormale

	Vers le sec						**Vers l'humide**				
Fréquence	1/100	1/50	1/20	1/10	1/5	**1/2**	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
Période de retour (ans)	100	50	20	10	5	**2**	5	10	20	50	100
Pa (mm)	253	286	313	323	409	**547**	722	836	943	1080	1180

b. Les précipitations mensuelles

Après avoir examiné la variabilité interannuelle des précipitations, il est essentiel d'examiner la pluviométrie à l'échelle mensuelle. En effet, cette approche permet d'obtenir des informations détaillées sur les schémas de précipitations tout au long de l'année et de distinguer les mois les plus humides des mois les plus secs. En d'autres termes, elle permet d'identifier les mois qui contribuent le plus à l'alimentation des ressources en eau. L'analyse de la variation mensuelle des précipitations à la station Tarhat révèle que la période de novembre à avril se caractérise par des précipitations significatives, atteignant jusqu'à 78 mm pour le mois de janvier (Fig. 3.4). En revanche, la période de juin à septembre enregistre des précipitations beaucoup plus faibles, descendant à son minimum en juillet avec seulement 9 mm. C'est donc la période hivernale qui reçoit le plus de précipitations, avec une moyenne de 224,3 mm, suivie par les saisons printanière et automnale. En revanche, la période estivale présente les précipitations les plus faibles, avec une moyenne de seulement 43 mm.

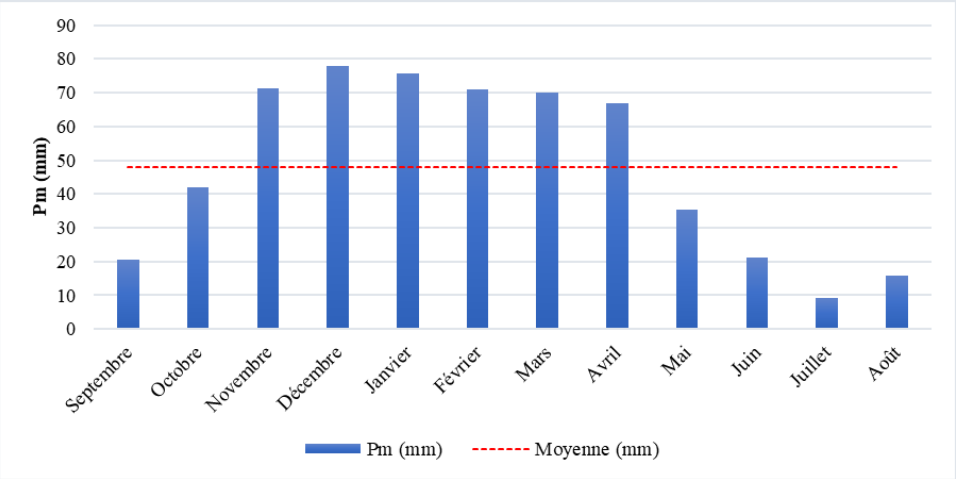


Figure 3.4 Variabilité des précipitations mensuelles à la station de Tarhat (1970-70/2022-23)

3.3.1.3 Spatialisation des précipitations

La gestion efficace des ressources en eau disponibles dans le HaB-OER dépend grandement d'une compréhension précise de la répartition géographique des précipitations. Cependant, il est important de noter que la densité des stations de mesure des précipitations est insuffisante, avec chaque station couvrant une vaste superficie de 560 km², alors que l'OMM (2008b) recommande une superficie de 250 km² pour les zones montagneuses. Par conséquent, il est impératif de procéder à une estimation spatiale précise des précipitations.

Pour répondre à cette nécessité, plusieurs méthodes d'interpolation sont disponibles pour mieux appréhender cette distribution spatiale (Metahni *et al.*, 2019). Ces méthodes d'interpolation permettent de prédire les valeurs de précipitation à n'importe quel endroit non échantillonné en utilisant une combinaison linéaire des valeurs pondérées provenant des endroits voisins (Douaik, 2021). Dans le contexte de la spatialisation des précipitations dans le HaB-OER, nous avons choisi de tester les techniques d'interpolation basées sur le polygone de Thiessen et le krigeage.

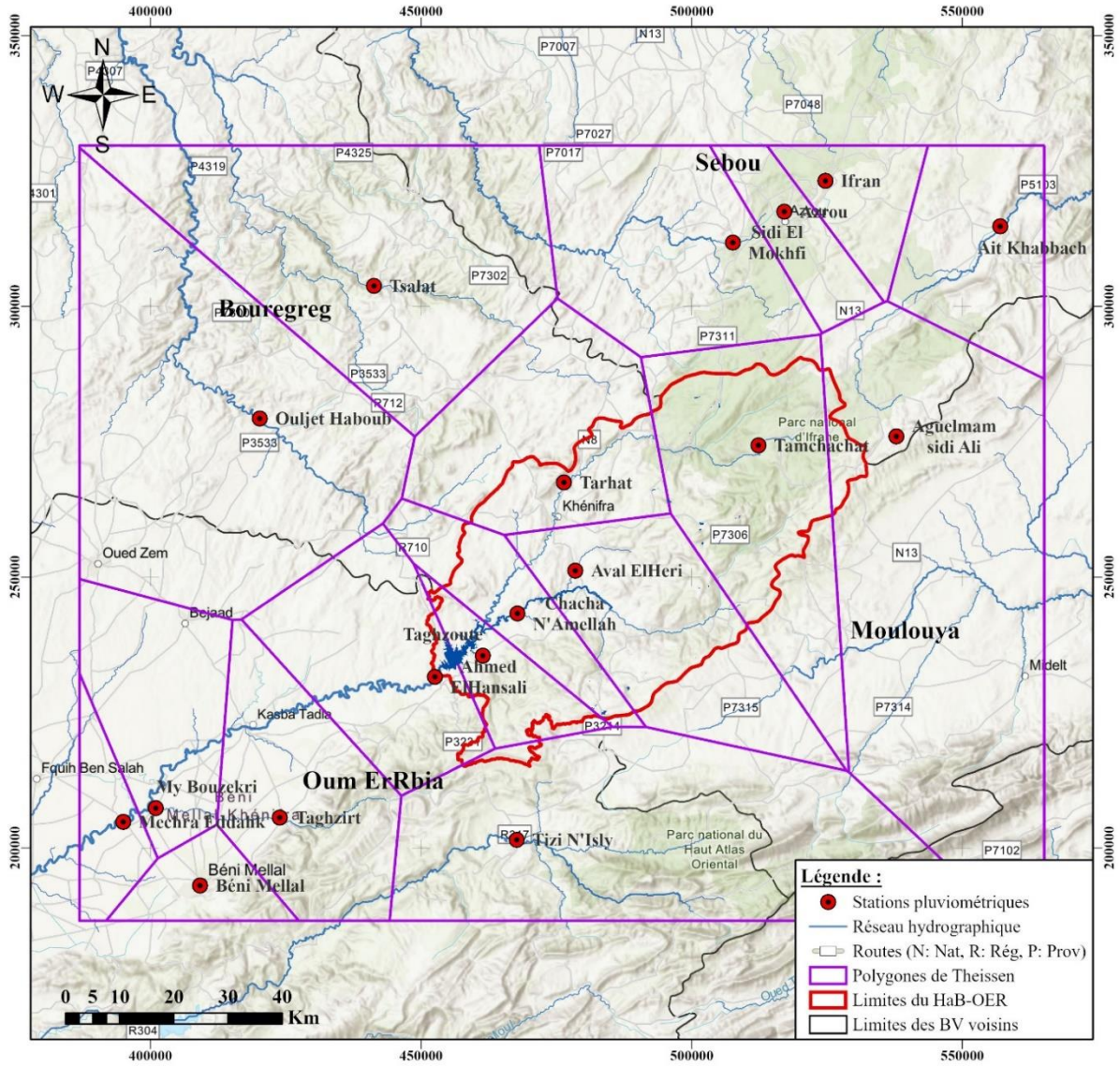
a. Une approche simple : la méthode de Thiessen

En 1911, Thiessen a développé une méthode pour représenter les données de précipitations provenant de stations météorologiques inégalement réparties en créant des régions délimitées par des lignes à mi-chemin entre chaque station et ses voisines (Brassel & Reif, 1979), communément appelées les polygones de Thiessen.

Les polygones de Thiessen ont été créés pour le HaB-OER et ses sous-bassins en utilisant le logiciel ArcGIS, en se basant sur les données de 18 stations retenues par la méthode du vecteur régional, couvrant la période de référence de 1975-76 à 2019-2020 (Carte 3.5). A partir de ces polygones la pluviométrie sur le bassin total et les sous-bassins est calculée selon l'équation 3.3 suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i P_i}{A} \qquad \textit{(Équation 3.3)}$$

Avec :
A_i : surface du polygone associé à la station i ;
P_i : précipitation enregistrée à la station i ;
A : surface totale du bassin versant.

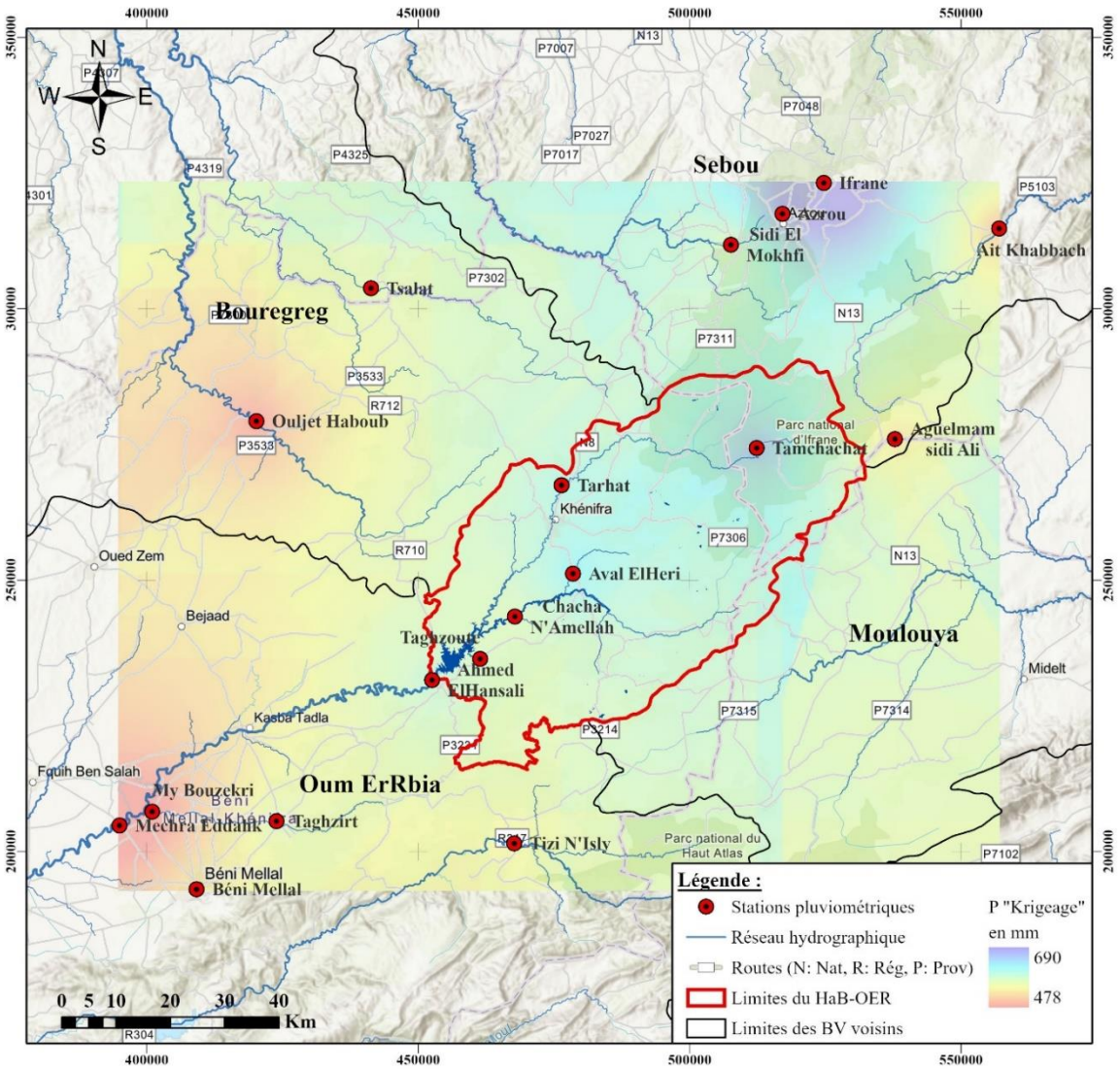


Carte 3.5 Spatialisation de la pluviométrie selon la méthode de Thiessen (1975-76/2019-20)

b. Une approche géostatistique : la méthode de Krigeage

La géostatistique permet de décrire et de modéliser la variabilité spatiale grâce au variogramme (Douaik, 2021). Le krigeage, une technique géostatistique privilégiée en raison de sa capacité à estimer les valeurs en fonction de l'interdépendance spatiale ou temporelle définie par le semi-variogramme, ce qui permet d'assurer une meilleure précision (Carmello *et al.*, 2015). Contrairement à l'approche du polygone de Thiessen, le krigeage génère des valeurs prédites qui varient en fonction de leur proximité par rapport aux sources de données (Tatalovich *et al.*, 2006). Des études l'ont qualifié comme étant le meilleur estimateur et le plus avancé par rapport aux autres méthodes d'interpolation (Metahni *et al.*, 2019).

L'interpolation des données pluviométriques des stations dans le HaB-OER et ses environs a été réalisée à l'aide de l'outil de géostatistique analytique intégré dans le logiciel ArcGIS. Pour évaluer la corrélation spatiale des précipitations dans le HaB-OER, le semi-variogramme a été calculé. L'objectif était ensuite de trouver un modèle adapté à ce semi-variogramme (Annexe 3.6). Ensuite, la spatialisation des précipitations a été effectuée en utilisant l'algorithme d'interpolation Krigeage (Carte 3.6).



Carte 3.6 Spatialisation de la pluviométrie d'après la méthode "Krigeage" (1975-76/2019-20)

En utilisant la même relation précédente (Équ. 3.3), on a calculé la pluviométrie moyenne dans le bassin du HaB-OER et ses sous-bassins (Tab. 3.5).

Tableau 3.5 Précipitations annuelle calculées d'après les deux méthodes d'interpolation

	Ahm	Ava	Cha	Tag	Tam	Tar
Surface (Km²)	3387	354	1421	171	134	1016
Pa Thiessen (mm)	597.6	625.9	604.1	504.1	630.7	653.4
Pa Krigeage (mm)	554.2	573.4	549.9	494.5	575.2	587.5
Ecart (%)	7.3	8.4	9	1.9	8.8	10.1

La spatialisation des précipitations dans le HaB-OER révèle l'impact de l'orographie sur leur distribution. En effet, la partie NE, atlasique, reçoit des précipitations plus importantes, arrivent en moyenne à 690 mm. En revanche, le plateau central, situé au SO, est plus sec, avec une moyenne d'environ 480 mm de précipitations. En ce qui concerne les moyennes pluviométriques calculées, les deux méthodes sont généralement en accord avec un écart qui ne dépasse 10%, bien que la méthode de Thiessen tende à surestimer les valeurs par rapport à la méthode du krigeage. En moyenne, le HaB-OER bénéficie d'environ 580 mm de précipitations annuelles selon les deux méthodes. Le sous-bassin de Taghzoute vers le sud enregistre la moyenne la plus faible avec 500 mm, tandis que celui de Tarhat vers le nord enregistre la moyenne la plus élevée avec 620 mm.

3.3.2 L'évapotranspiration, l'autre élément crucial dans l'équation des ressources en eau

3.3.2.1 Températures en hausse, évapotranspiration en augmentation

La température de l'air est une variable météorologique essentielle pour comprendre de nombreux processus (Hadria *et al*., 2019). Les trois forme de cette variable, température moyenne (Tm), maximale (Tx) et minimale (Tn), sont fréquemment utilisées pour surveiller le stress hydrique des plantes, évaluer le bilan énergétique de la surface terrestre et estimer l'évaporation (Hadria *et al*., 2018). En tant que régulateur de la demande en eau atmosphérique (Gallego *et al*., 2023), l'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de la demande d'évaporation (Condon *et al*., 2020). Par conséquent elle est l'un des facteurs climatiques qui influent sur les ressources en eau.

Malgré l'importance que revêt la connaissance de la température de l'air pour de nombreux domaines, la disponibilité des mesures de cette variable climatique pour un territoire est souvent limitée en raison du manque de données causé par la faible densité des stations de mesure (Hadria *et al*., 2019). Pour notre étude, à l'échelle du HaB-OER, nous ne disposons que de données de température provenant de deux stations sur une période de 37 ans, 1985-86 à 2022-23. En dehors de notre zone d'étude, nous avons recueilli les données de quatre autres stations sur une période commune de 20 ans entre de 1994-95 à 2014-15 (Annexe 3.7).

Dans les régions montagneuses, la méthode du gradient thermique est couramment utilisée pour estimer les températures à différentes altitudes (P. Singh, 2001). Afin d'utiliser cette méthode pour spatialiser les températures sur le HaB-OER, nous avons établi le gradient thermique à partir des données de température des six stations (Fig. 3.5). Les données de température présentent une forte corrélation avec l'altitude (coefficient de détermination R^2 de 0,98). Ainsi, la diminution de 10,5°C associée à une différence d'altitude de 1644 m équivaut à un gradient de température de 0,64°C/100m ; c'est une valeur similaire à celle observée dans des études antérieures menées dans l'Atlas du Maroc (Boudhar, 2010; Rhanem, 2011).

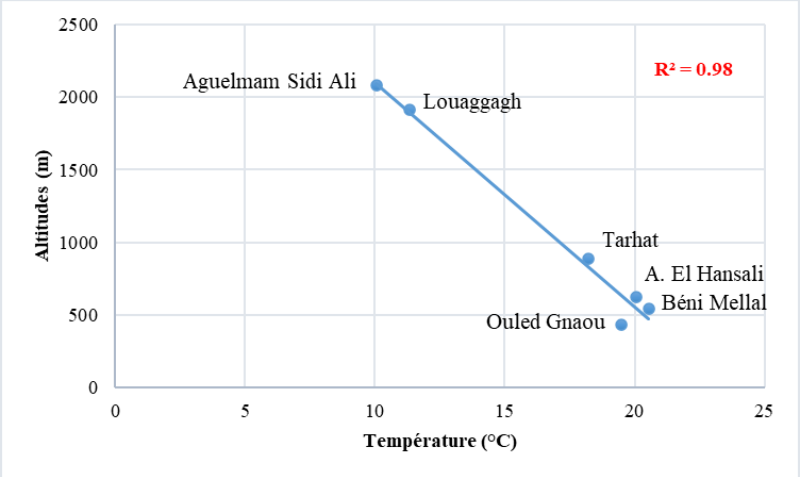


Figure 3.5 Corrélation entre altitude et température

Comme c'est le cas pour les données de précipitation, la série de données de température provenant de la station de Tarhat est la plus longue et ne présente aucune lacune. Par conséquent, nous la considérons comme une référence pour extrapoler les données de température sur l'ensemble du bassin en nous basant sur le gradient thermique.

En ce qui concerne les caractéristiques de ces séries, la température moyenne annuelle s'élève à 18,3°C, avec une valeur maximale de 19,2°C enregistrée en 2022-23. La température maximale moyenne atteint 42,3°C, tandis que la température minimale moyenne est de -1,1°C (Tab. 3.6). Contrairement aux précipitations, il est notable que les valeurs de la Tm et de la Tx fluctuent sensiblement d'une année à l'autre, ce qui se traduit par des coefficients de variation de l'ordre de 2 %. Pour la Tn, ce coefficient affiche une valeur négative élevée en raison des fluctuations annuelles entre des valeurs négatives et positives.

Tableau 3.6 Caractéristiques statistiques des températures mesurées à la station de Tarhat entre 1985-86 et 2022-23

	Moy (°C)	Min (°C)	Max (°C)	σ (°C)	CV (%)
Tm	18.3	17.5	19.2	0.5	2.8
Tx	42.3	40	43.6	0.9	2.1
Tn	-1.1	-5	1.9	1.4	-129.6

L'évolution de la température moyenne annuelle révèle une augmentation significative entre 1985-86 et 2022-23 (Fig. 3.6). Cette augmentation est due à l'augmentation des Tx plutôt qu'aux Tn. En effet, sur une période de 37 ans, les Tm sont passées de 18°C en 1985-86 à 18,6°C en 2022-23, soit une augmentation de 0,16°C/décennie. En revanche, les Tx ont augmenté sur la même période, passant de 41,6°C en 1985-86 à 43°C en 2022-23, soit une augmentation de 0,38°C/décennie. Cependant, les Tn ont enregistré une diminution, passant de 0,6°C à 1,5°C, soit une baisse de 0,24°C/décennie.

Ces résultats correspondent aux études antérieures sur les tendances des températures au Maroc. Selon Rifai *et al*. (2015), les Tx augmentent plus rapidement que les autres températures. Les estimations des tendances annuelles à l'échelle du Maroc entre 1961 et 2008, selon Driouech (2010), varient de 0,1°C à 0,4°C/décennie. De plus, Woillez (2019) indique que la tendance est nettement supérieure à la moyenne mondiale au cours des 30 dernières années, avec une augmentation moyenne de 0,42°C/décennie, par rapport à 0,28°C/décennie en moyenne sur l'ensemble des continents.

En ce qui concerne le bassin de l'Oum Er Rbia, Hamid & El Ghachi (2023) ont démontré une tendance générale à la hausse des températures dans la majorité de la région. Cette augmentation des températures entraînera très probablement une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui aura un impact négatif sur les ressources en eau dans le HaB-OER.

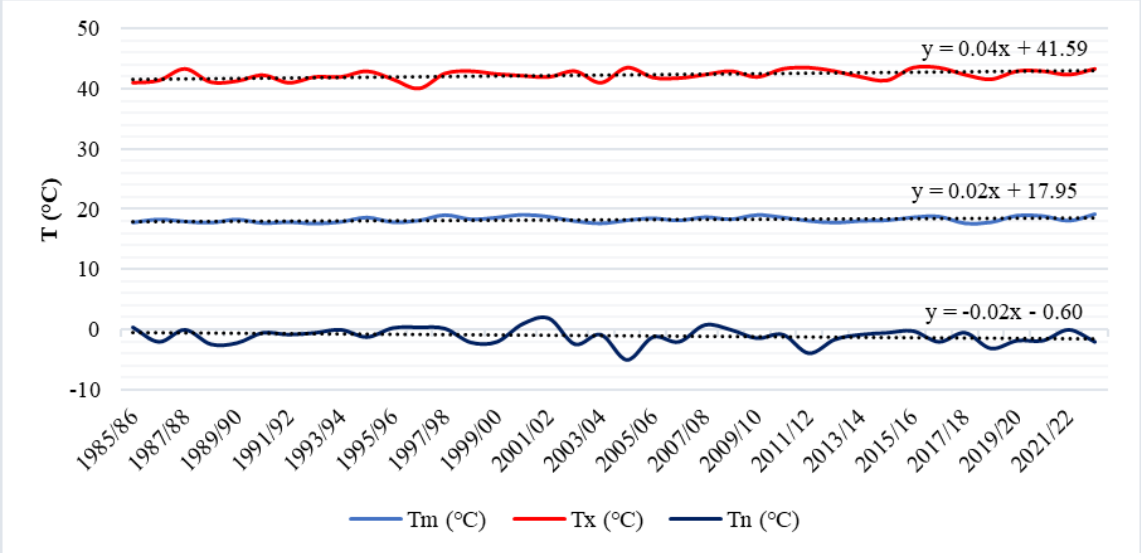


Figure 3.6 Variation des températures annuelles et tendances dans la station de Tarhat entre 1985-86 et 2022-23

3.3.2.2 Calcul et analyse de la variabilité temporelle de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration "ET" représente la composante la plus importante du bilan hydrique après les précipitations, et elle devient plus importante dans les zones arides et semi-arides (Marini *et al*., 2017), puisqu'elle renvoie plus de 60 % des précipitations sur terre dans l'atmosphère et exerce donc une contrainte importante sur la disponibilité de l'eau à la surface des terres (Mu *et al*., 2011). Par conséquent, une compréhension approfondie de ce phénomène revêt une grande importance pour la planification et la gestion des ressources en eau. Cependant, l'ET reste la composante la plus problématique du cycle de l'eau en raison de l'hétérogénéité du paysage et du grand nombre de facteurs de contrôle impliqués (Chen *et al*., 2014). Fondé sur l'interaction sol-plantes-atmosphère, ce concept engendre des incertitudes en ce qui concerne les méthodes de mesure et de simulation, et parfois même des confusions conceptuelles (Mjejra, 2015). Notre travail envisage deux formes d'ET : l'évapotranspiration potentielle "ETP" et l'évapotranspiration réelle "ETR".

a. L'évapotranspiration potentielle

L'ETP, également nommée ET de référence "ET_0" selon Mjejra (2015), est définie comme l'ET d'un couvert végétal continu suffisamment alimenté en eau (OMM, 2008a). Il existe plusieurs équations pour estimer l'ETP dans la littérature (Oudin *et al*., 2005), dont certaines sont complexes et nécessitent plusieurs paramètres. Cependant, il est possible d'adopter des modèles ETP empiriques simples, en particulier lorsque certaines données climatiques ne sont pas disponibles (Shi *et al*., 2022), comme celui développé par Oudin *et al*. (2005) (Équ. 3.4). Ce modèle a été choisi en raison de sa simplicité et de sa visibilité dans des études récentes, notamment dans les domaines de la modélisation hydrologique (Kelleher & Shaw, 2018; Belaroui *et al*., 2019; Flores *et al*., 2021) et des études sur les changements climatiques (Zhao *et al*., 2021, 2021; Lemoine *et al*., 2022; L'Hermite *et al*., 2022; Lemaitre-Basset *et al*., 2022; Motschmann *et al*., 2022). Dans l'étude de Flores *et al*. (2021), le modèle d'Oudin a démontré sa performance en obtenant la meilleure efficacité dans la simulation de l'écoulement par rapport à d'autres modèles testés. Au Maroc, ce modèle a été appliqué avec succès dans la modélisation hydrologique dans le Haut Atlas, notamment dans les bassins de Rheraya (Hajhouji, 2018) et du barrage de Bin El Ouidan (Ahbari *et al*., 2021).

si $T_a + 5 > 0$ $\quad ETp = \dfrac{R_e\, T_a + 5}{\lambda\, \rho\, 1000}$ (en mm. j^{-1}) *(Équation 3.4)*

si non ETP = 0

Avec :
R_e : le rayonnement extraterrestre ($MJ.m^{-2}.j^{-1}$) ;
T_a : la température de l'air (°C) ;
λ : le flux de chaleur latente ($MJ.kg^{-1}$) ;
ρ: la masse volumique de l'eau ($kg.m^{-3}$).

Les valeurs d'ETP calculées selon la méthode d'Oudin pour la période de 1985-86 à 2019-2020 à la station de Tarhat présentent une légère variabilité inter-annuelle, caractérisée par un coefficient de variation de 2% (Fig. 3.7). La moyenne enregistrée à Tarhat s'élève à 1152 mm/an, ce qui concorde avec les valeurs obtenues par la méthode de Turc dans le nord du HaB-OER pour les stations de Fès, Meknès et Ifrane (A. Qadem, 2015). Parallèlement aux températures, on observe une tendance à l'augmentation des valeurs d'ETP, avec une valeur maximale jamais enregistrée atteignant 1220 mm/an en 2022-23.

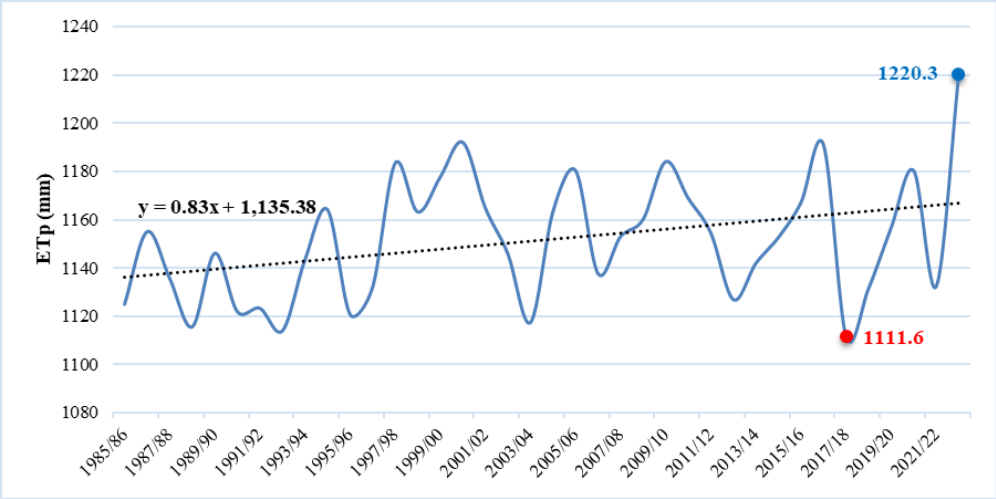


Figure 3.7 Variation annuelle de l'ETP calculée selon la méthode "Oudin" pour la période 1985-86 à 2022-23

À l'échelle mensuelle, le minimum d'ETP est enregistré en janvier, avec seulement 36,7 mm, tandis que le maximum est enregistré en juillet, atteignant cinq fois cette valeur, soit 178 mm (Annexe 3.8). Cette combinaison de pertes élevées, de faibles apports (Fig. 3.4) aggrave la situation des ressources en eau dans le HaB-OER, en particulier pendant la période estivale.

b. L'évapotranspiration réelle

L'ETR représente la quantité d'eau réellement évaporée à partir du sol et du couvert végétal (OMM, 2008a). Plusieurs méthodes ont été élaborées pour mesurer l'ETR, notamment l'utilisation de lysimètres, des équations de bilan hydrique sur le terrain, et des méthodes micro-météorologiques ; toutefois, ces méthodes se sont avérées coûteuses (Gudulas *et al*., 2013). La difficulté à mesurer directement l'ETR a conduit à la mise en œuvre de méthodes empiriques, d'algorithmes, et de modèles intégrant des données provenant de stations météorologiques et de télédétection (Jung *et al*., 2016). Parmi les méthodes fréquemment employées pour évaluer l'ETR, on peut citer l'équation de Turc (1954) (Équ. 3.5), qu'on a choisi pour le calcul de l'ETR dans le HaB-OER. Récemment, plusieurs études ont employé cette équation pour valider les données d'ETR satellites (Dimitriadou & Nikolakopoulos, 2021; Ruggieri *et al*., 2021).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \qquad \textit{(Équation 3.5)}$$

Avec :
$L = 300 + 25T + 0{,}05T^2$
P : pluviométrie moyenne annuelle en mm ;
T : température moyenne annuelle en °C.

L'ETR moyenne annuelle à la station de Tarhat sur la période de 1985-86 à 2022-23 s'élève à 504 mm (Tab. 3.7). Il est important de noter que la variabilité inter-annuelle de l'ETR est plus marquée que celle de l'ETP, ce qui est normal étant donné l'influence conjointe des températures et des précipitations (Fig. 3.8). Cette variation s'étend de 292 mm, enregistrée comme valeur minimale en 2021-22, à 774 mm, atteinte lors de l'année la plus humide 1995-96. Les valeurs de l'ETR indiquent une légère tendance à la diminution au fil du temps, avec une réduction moyenne de 0,34 mm/an.

Tableau 3.7 Caractéristiques statistiques des ETR calculées selon la méthode "Turc" pour la période 1985-86 à 2022-23

	Moy (mm)	Min (mm)	Max (mm)	σ (mm)	CV (%)
ETR	503.5	292.2	773.7	124.9	25

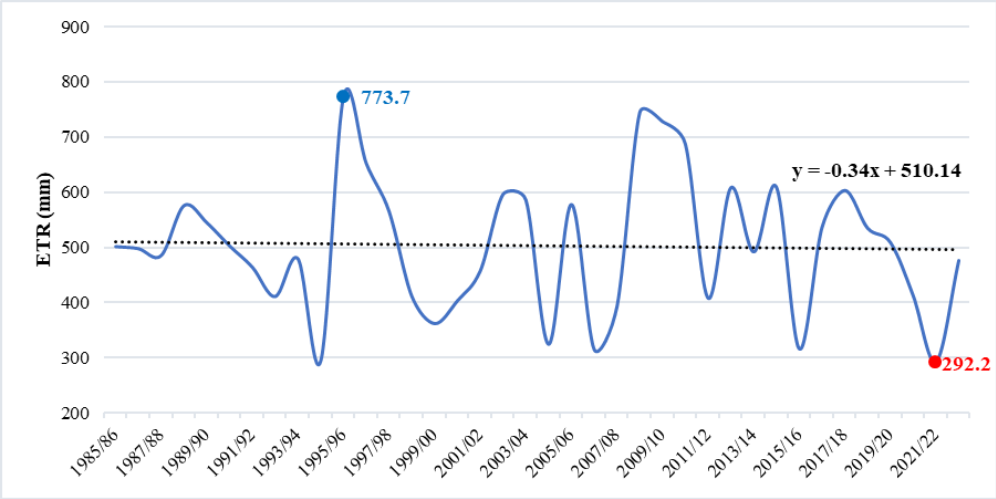


Figure 3.8 Variation annuelle de l'ETR calculée selon la méthode "Turc" pour la période 1985-86 à 2022-23

Bien que la formule de "Turc" soit une méthode pratique pour estimer l'ETR, elle présente des limites en termes de précision, car elle ne prend pas en compte de nombreuses variables importantes qui influencent l'ETR. En outre, selon les résultats de Dimitriadou & Nikolakopoulos (2021), la méthode Turc a produit des estimations l'ET plus élevées que d'autres méthodes, telles que la méthode de Coutagne. De plus, son application est fortement influencée par les conditions climatiques locales (Gudulas *et al*., 2013). Par conséquent, compte tenu de ces limitations, nous l'avons utilisé avec prudence.

c. Estimation de la pluie efficace

Afin d'évaluer l'évolution des ressources en eau dans le HaB-OER, en mettant l'accent sur la station de Tarhat, nous pouvons premièrement considérer le total des précipitations effectives. Entre les années 1985-86 et 2022-23, la précipitation nette (P-ETR) enregistrée à la station de Tarhat totalise 121 mm (Fig. 3.9). Il est essentiel de noter qu'au cours de certaines années, un déficit a été observé, avec l'ETR dépassant les précipitations. Néanmoins, les années humides se sont distinguées par des apports considérablement plus élevés, atteignant respectivement 453mm et 423 mm pendant 2010-11 et 2009-10, ce qui équivaut à des volumes de 460 hm^3 et 430hm^3.

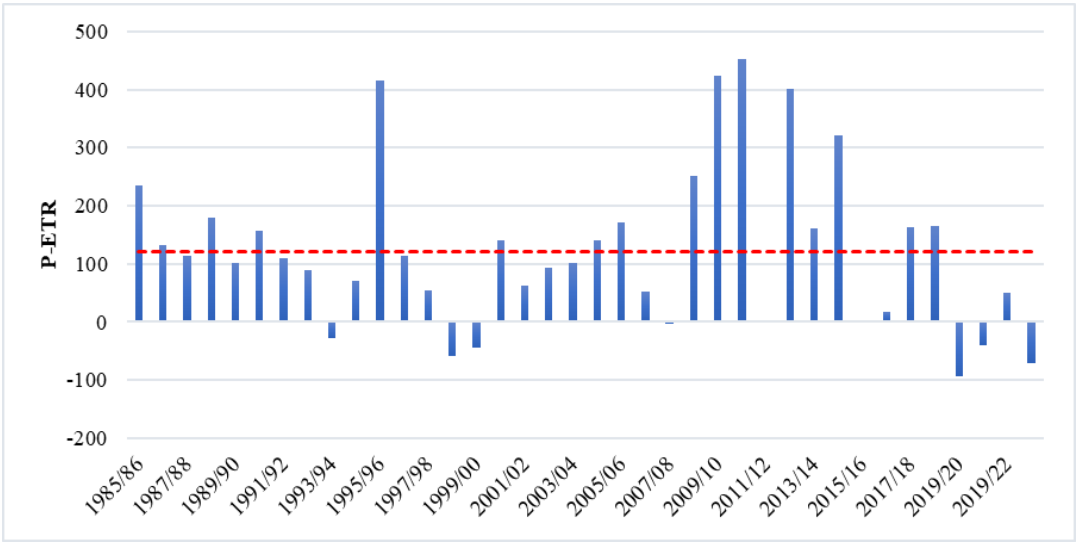


Figure 3.9 Évolution de la pluie efficace à la station de Tarhat entre 1985-86 et 2022-23

3.4 La révolution satellitaire : un nouveau monde de données climatiques

3.4.1 Les données pluviométriques satellitaires

3.4.1.1 L'intérêt des produits pluviométriques satellitaires

Dans de nombreuses régions, la densité des pluviomètres est inférieure à la norme, ce qui entraîne l'absence d'estimations précises des précipitations (Khalighi-Sigaroodi *et al*., 2019). De plus, les stations climatiques fournissent des mesures continues des précipitations dans le temps, mais celles-ci restent ponctuelles et ne peuvent pas représenter de manière exhaustive l'ensemble du bassin. Depuis les années 90, les techniques de télédétection ont été largement utilisées dans le domaine climatique, en particulier pour la mesure des précipitations (Huffman & Bolvin, 2015). Ces techniques représentent une excellente alternative pour obtenir des données de la pluviométrie à une résolution spatiale et temporelle élevée.

Au cours des dernières décennies, plusieurs estimations des précipitations par satellite sont devenues disponibles. Des études comparatives à l'échelle mondiale (Alijanian *et al*., 2017; Ringard *et al*., 2015) et plus spécifiquement sur le pourtour méditerranéen (Tramblay *et al*., 2016) concluent que les données de la mission Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) se rapprochent le plus des mesures au sol. Cependant, avec la fin de l'ère TRMM, son successeur, la Global Precipitation Measurement (GPM), vise à fournir une nouvelle génération d'estimations des précipitations par satellite avec une résolution spatiale et temporelle plus élevée ainsi qu'une couverture spatiale plus large (Z. Shen *et al*., 2022). Le GPM est un programme majeur de la NASA et de l'agence spatiale japonaise JAXA, qui met à disposition gratuitement divers produits de données (Berges, 2019).

La performance des produits GPM a été validée par des chercheurs du monde entier, y compris au Maroc (Saouabe *et al*., 2020; Rachdane *et al*., 2022; Benkirane *et al*., 2023). Malgré certaines limites, les données GPM, précises, fiables et dotées d'une haute résolution spatiale et temporelle sur les précipitations, s'avèrent essentielles pour de nombreuses applications, notamment l'étude des événements climatiques extrêmes, la modélisation hydrologique, la gestion des ressources en eau et la recherche hydroclimatique en général (Pradhan *et al*., 2022).

3.4.1.2 Evaluation et correction des données de précipitation GPM à l'échelle du HaB-OER

Bien que largement utilisées pour compléter les systèmes traditionnels de mesure des précipitations, les données GPM doivent être validées sur chaque domaine d'étude avant d'être utilisées (Ramadhan *et al*., 2022). L'évaluation permet de comparer les données satellitaires avec celles mesurées par les stations, d'identifier d'éventuels biais, et de choisir le produit de données le mieux adapté à une application spécifique.

Avant d'utiliser la version mensuelle "V_6" du produit "Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM : IMERG", caractérisée par une résolution de 10 km, notre objectif est de comparer ces données avec les mesures ponctuelles de précipitations pour les six stations du HaB-OER. Cette comparaison entre les deux ensembles de données mensuelles est réalisée pour la période commune allant de 2000-01 à 2019-20 en calculant les indices statistiques couramment utilisés : le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de Nash Sutcliffe (NSE) et le biais (PBIAS) (Tab. 3.8).

Tableau 3.8 Critères statistiques utilisés pour évaluer la performance des données IMERG

Critère	Intervalle admis	Valeur optimale
$\boldsymbol{R^2 = \frac{[\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_s - \bar{Q}_s)^2}}$	0 à 1	1
$\boldsymbol{NSE = 1 - \frac{\sum_i (\sqrt{Q_m} - \sqrt{Q_s})_i^2}{\sum_i (\sqrt{Q_m} - \sqrt{\bar{Q}})^2}}$	-∞ à 1	1
$\boldsymbol{PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_m}}$	-∞ à ∞	0

La comparaison avec les données mesurées montre que le produit IMERG a de bonnes performances en ce qui concerne la capture des précipitations à l'échelle mensuelle (Tab. 3.9). Toutes les stations ont enregistré des résultats satisfaisants, allant de très bons pour le R^2 à bons pour NSE. Néanmoins, ces forts coefficients masquent des écarts pouvant être importants entre les deux jeux de données comme l'illustre les résultats insatisfaisants du Pbias pour la plupart des stations, atteignant même 40 mm pour la station d'Ahmed El Hansali. La station de Tarhat a enregistré les meilleurs résultats, tandis que Tamchachat a obtenu des résultats plus faibles par rapport aux autres stations, principalement en raison de l'impact des précipitations neigeuses abondantes qui perturbent les estimations satellitaires.

Ces résultats ne sont pas surprenants car de nombreuses études d'évaluation indiquent que les produits pluviométriques satellitaires sont affectés par des erreurs systématiques et aléatoires significatives (Habib *et al*., 2014). Cela souligne la nécessité de corriger le biais du produit IMERG avant son utilisation. Plusieurs techniques d'ajustement ont été développées pour corriger le biais entre les données observées et les données satellitaires, notamment LS (Linear Scaling), QM (Quantile Mapping), SLR (Simple Linear Regression),… (Ouatiki *et al*., 2019).

Le LS, une approche simple à mettre en œuvre, consiste à calculer un facteur d'échelle linéaire pour deux ensembles de données, permettant ainsi de corriger le biais des données satellitaires (Lober *et al*., 2023). Cette technique se révèle particulièrement efficace pour corriger les valeurs moyennes mensuelles (Teutschbein & Seibert, 2012). L'application de la méthode LS à nos données a clairement amélioré leur qualité en augmentant leurs performances (Tab. 3.9, Annexe 3.9 et 3.10).

Tableau 3.9 Résultats de la performance des données de précipitations IMERG aux différentes stations avant et après la correction du biais

		Ahm	Ava	Cha	Tag	Tam	Tar
Avant la correction du biais	**R^2**	0.82	0.82	0.81	0.83	0.65	0.84
	NSE	0.55	0.65	0.68	0.67	0.51	0.76
	Pbias	-39.9	-29	-25.4	-27.9	-26.7	-19.2
Après la correction du biais	**R^2**	0.83	0.83	0.82	0.85	0.7	0.85
	NSE	0.83	0.83	0.82	0.84	0.69	0.85
	Pbias	0	0	0	0	0	0

Après avoir corrigé le biais des précipitations satellitaires, une comparaison graphique avec les données mesurées montre que les deux ensembles de données s'alignent bien et suivent la même évolution, présentant également des moyennes similaires (Fig. 3.10). Par conséquent, nous pouvons recommander l'utilisation prudente de ces données pour l'étude de certains phénomènes hydroclimatiques dans les régions où les stations de mesure sont absentes.

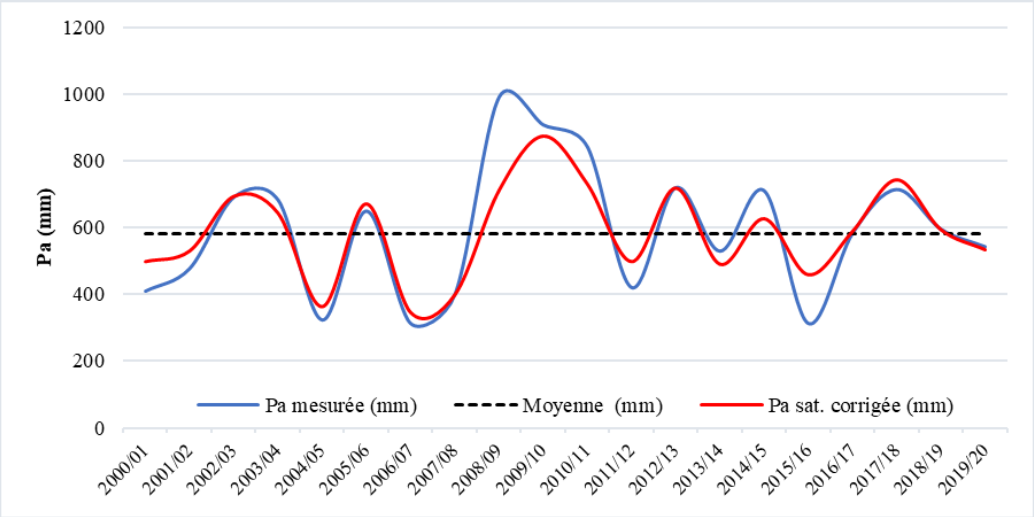


Figure 3.10 Comparaison entre les précipitations mesurées et satellitaires corrigées à Tarhat entre 2000-01 et 2019-20

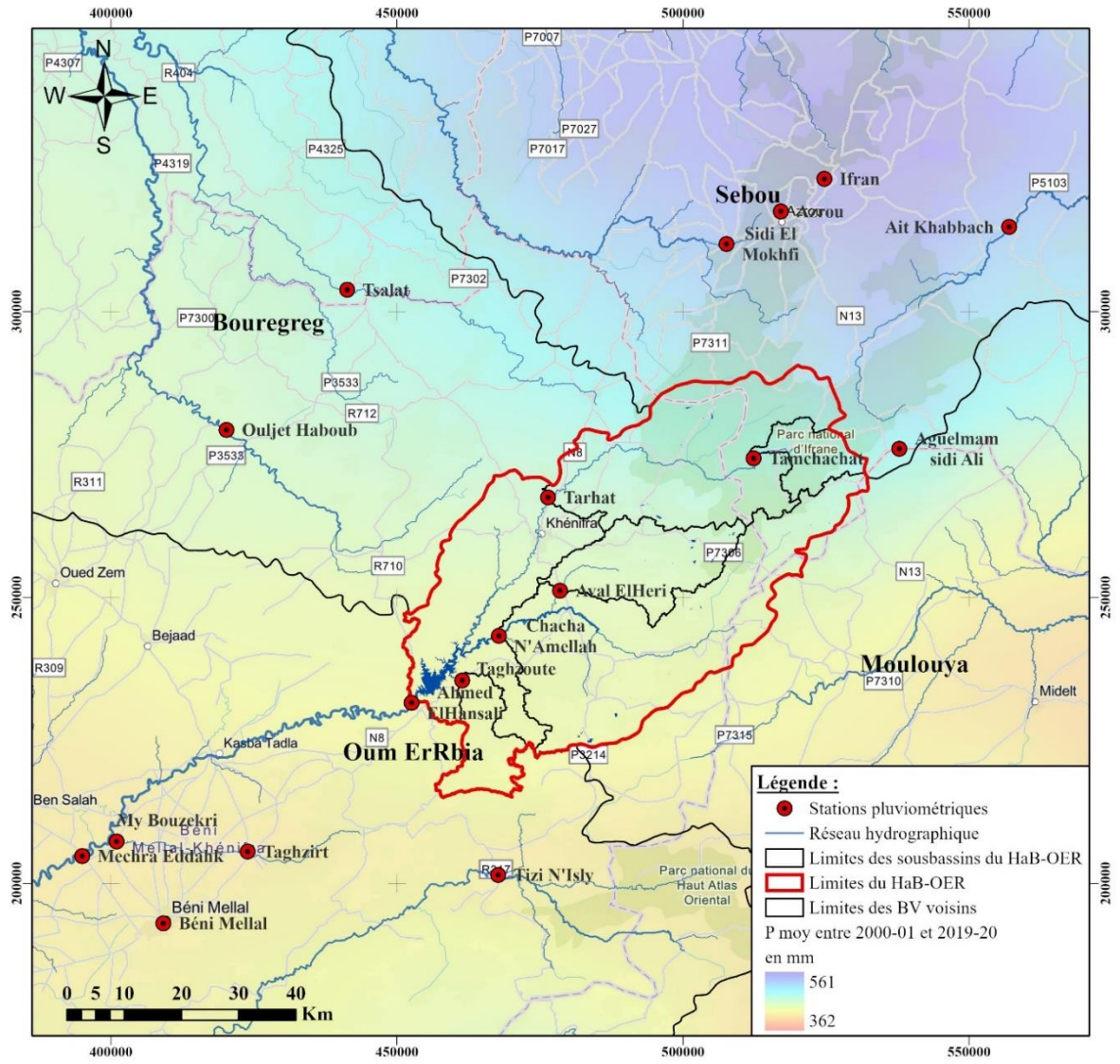
3.4.1.3 Analyse spatiale des précipitations satellitaires

Les valeurs des précipitations satellitaires pour la période 2000-01 à 2019-20 (Carte 3.7) confirme la spatialisation des précipitations obtenue par la méthode du Krigeage (Carte 3.6). Les valeurs élevées sont localisées principalement au nord du HaB-OER, tandis que les valeurs les plus faibles sont observées au sud. Cependant il est important de noter que les valeurs de précipitations satellitaires sont généralement sous-estimées par rapport à celles obtenues par krigeage. Sur la période 2000-01 à 2019-20, ces valeurs varient respectivement de 372 mm à 522 mm pour les deux stations de Taghzoute et Tarhat, tandis que les valeurs obtenues par krigeage varient entre 509 mm et 610 mm pour les mêmes stations. En effet, les données IMERG ne parviennent souvent pas à refléter de manière précise la répartition spatiale des précipitations, créant ainsi des surfaces uniformes et ne capturant pas les détails locaux des précipitations observés (Duarte *et al*., 2022).

Les deux sous-bassins du nord du HaB-OER enregistrent de faibles écarts entre les données des précipitations satellitaires et celles estimées par la méthode de krigeage, de l'ordre de 14%, par rapport à ceux du sud qui enregistrent des écarts plus importants, de l'ordre de 25%. L'écart moyen à l'échelle du HaB-OER est de 23% (Tab. 3.10). Kazamias *et al*. (2022) ont démontré que les écarts les plus importants sont observés dans les zones où les précipitations annuelles sont les plus faibles, tandis que dans les zones où les précipitations annuelles sont les plus élevées, les valeurs IMERG sont relativement proches des valeurs de la jauge.

Tableau 3.10 Comparaison entre les précipitations annuelle calculées par la méthode de krigeage et celle satellitaire entre 2000-01 et 2019-20

	Ahm	Ava	Cha	Tag	Tam	Tar
P Krigeage (mm)	569.6	582.7	558.8	509.1	588.2	610.7
P Sat (mm)	440.4	436.2	416.8	372.1	508.1	522.2
Ecart (%)	22.7	25.1	25.4	26.9	13.6	14.5



Carte 3.7 Spatialisation des moyennes de précipitations satellitaires IMERG pour la période 2000-01 à 2019-20

3.4.2 Les données de températures et d'évapotranspiration

3.4.2.1 Les températures journalières

La disponibilité limitée de données météorologiques journalières constitue souvent un obstacle pour fournir des informations météorologiques précises. Le projet Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA/POWER) de la NASA résout ce problème en fournissant des données journalières sur les températures maximales et minimales ainsi que d'autres variables météorologiques. Ces données sont compilées à partir d'une variété de sources, notamment des images satellitaires, des observations au sol, des sondes de vent et des modèles de simulation … (White *et al*., 2008).

Pour mieux exploiter ces données, en particulier dans le cadre de la modélisation hydrologique (Chapitre 6), nous avons téléchargé les données relatives aux températures journalières maximales et minimales pour la période de 1981 à 2020. Ensuite, nous les avons validées en les comparant aux températures mesurées dont nous disposons pour les stations de Tarhat et d'Ouled Gnaou, couvrant la période de 2000-01 à 2019-20. Les mêmes critères de performance utilisés précédemment ont été calculés (Tab. 3.8). Les résultats indiquent que les données de température "NASA/POWER" sont en bonne concordance avec celles observées, avec des performances généralement très satisfaisantes (Tab. 3.11 et Annexe 3.11).

Tableau 3.11 Résultats de la performance des données de températures NASA/POWER aux différentes stations

	R^2	NSE	Pbias
Tarhat	0.96	0.81	-15.3
Ouled Gnaou	0.93	0.85	-8.6

3.4.2.2 L'évapotranspiration

Contrairement aux mesures d'ET au sol, qui sont réalisées à des échelles fines mais limitées en nombre, notamment à l'aide de lysimètres et de tours à flux, la télédétection offre la possibilité d'estimer l'ET à différentes échelles spatio-temporelles (Che *et al*., 2022). Le produit MOD16A2GF Version 6 pour l'ET est une compilation de données composites sur une période de 8 jours, avec des zones comblées en cas de lacunes, générées à une résolution de 500m. L'algorithme utilisé repose sur l'équation de Penman-Monteith et intègre des données météorologiques de réanalyse journalières ainsi que des produits de télédétection MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), notamment la dynamique des caractéristiques de la végétation, l'albédo et la couverture des sols (Running *et al*., 2019). Les performances exceptionnelles du produit MOD16A2GF-006 ont été confirmées par une série d'évaluations menées par des chercheurs du monde entier (Kim *et al*., 2012; Nadzri & Hashim, 2014; Aguilar *et al*., 2018; Degano *et al*., 2021).

Dans notre étude, le produit MOD16A2GF-006 a été soumis à une comparaison. D'une part, nous l'avons confronté à l'ET0 calculée à partir des mesures locales de l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole de Tadla (ORMVAT) pour la station d'Ouled Gnaou (Annexe 3.7). D'autre part, en l'absence de données mesurées pour l'ETR, nous l'avons comparé à l'ETR Turc calculée à Tarhat pour la période de 2000-01 à 2019-20, à l'échelle annuelle. Les résultats obtenus montrent un ajustement très satisfaisant en termes de R^2, tandis que le NSE et le Pbias ont révélé des résultats moins convaincants (Tab. 3.12 et Annexe 3.12 et 3.13). Cependant, suite à la correction du biais dans les données mensuelles d'ETP, les résultats ont considérablement été améliorés.

Tableau 3.12 Résultats de la performance des données d'ET Modis aux différentes stations

			R^2	NSE	Pbias
ETP	**Ouled Gnaou**	**Avant la correction du biais**	0.97	-0.57	62
		Après la correction du biais	0.98	0.98	0
ETR	**Tarhat**		0.8	-5.8	-53

Bien que les performances des produits de l'ETR ne soient pas entièrement satisfaisantes, cette étude ne peut pas évaluer de manière définitive les performances du MOD16A2, car elle repose sur une seule station qui ne mesure ni l'ETR ni les facteurs qui l'influencent (humidité, ensoleillement, pression, etc.). Il convient de noter que les estimations de l'ETR Turc et de l'ETR satellitaire (Fig. 3.11) sont en bonne concordance, bien que les estimations de l'ETR Modis soient nettement plus faibles. Cependant, de nombreuses études suggèrent l'utilisation des produits de télédétection MODIS pour le suivi de l'ETR, car ils ont démontré de meilleures performances par rapport à d'autres produits (Gallego *et al*., 2023).

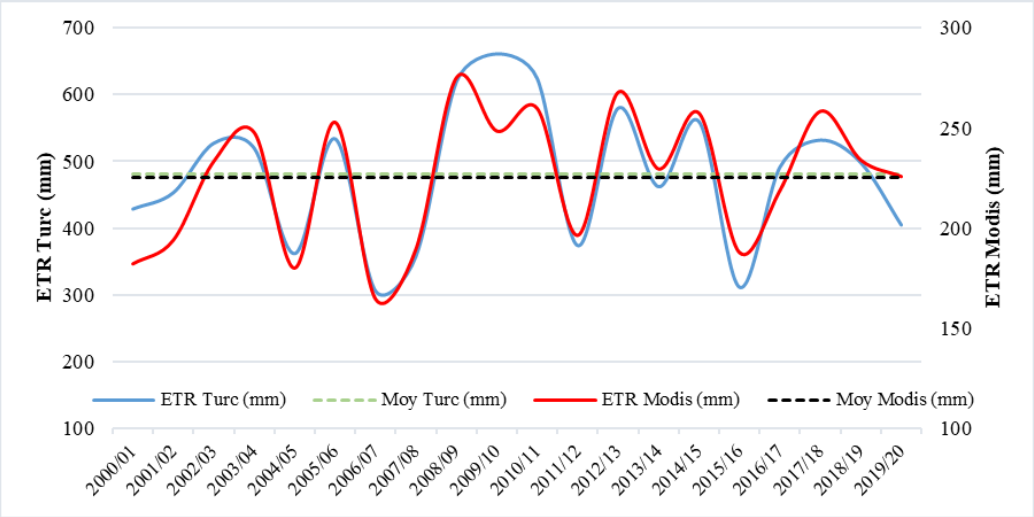


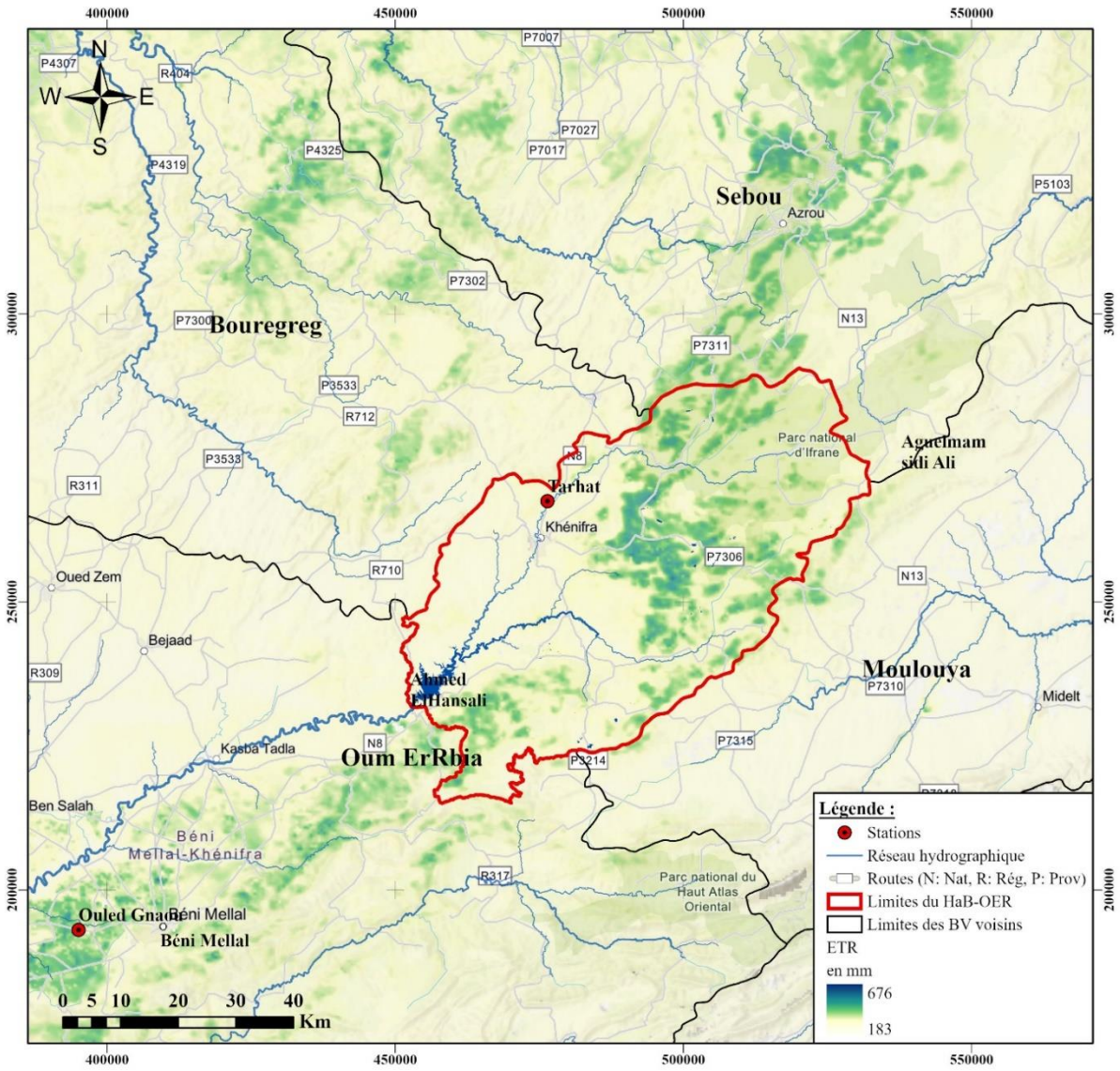
Figure 3.11 Comparaison entre l'ETR Turc et l'ETR satellitaires à Tarhat entre 2000-01 et 2019-20

La variabilité de l'ETR est directement influencée par les différents types de végétation présents, dont la quantité d'eau transpirée diffère. Par conséquent, l'étude de la variabilité spatiale de l'ETR au sein du HaB-OER, où environ un tiers de la région est couvert de forêts, revêt une grande importance. La cartographie de l'ETR basée sur le produit annuel "MOD16A3GF" de MODIS à une résolution de 500 m pour la période 2000-2020 révèle une variabilité de l'ETR au sein du HaB-OER, avec des valeurs oscillant entre 183 mm et 676 mm (Carte 3.8). Les valeurs élevées correspondent aux zones forestières du centre et du nord du bassin, ainsi qu'aux zones cultivées situées au sud, à proximité du b'AEH. Ces valeurs élevées sont directement liées à la disponibilité en eau dans ces zones. En revanche, les valeurs faibles sont généralement observées dans les zones urbaines et sur les terrains à faible couvert végétal.

En conclusion, l'analyse des données climatiques des sous-bassins du HaB-OER révèle une variabilité marquée des facteurs climatiques, se manifestant par d'importants écarts dans les précipitations, les températures et les taux d'évapotranspiration (Tab. 3.13). En conséquence, les sous-bassins du nord de la région présentent des caractéristiques climatiques nettement différentes de celles des sous-bassins du sud. Les sous-bassins du sud, en particulier Taghzoute et Chacha n'Amellah, se distinguent par des températures et des ETP particulièrement élevées, ainsi que par des précipitations et des ETR plus faibles en comparaison avec les sous-bassins du nord. Cette diversité climatique peut avoir un impact significatif sur les ressources en eau dans le HaB-OER.

Tableau 3.13 Récapitulatif des caractéristiques climatiques pour les sous-bassins du HaB-OER

	Surface (Km²)	P Stations (mm)	P Krigeage (mm)	T (°C)	ETP (mm)	ETR (mm)
HaB-OER	3387	548.2	554.2	20.4	1245.6	483.2
Aval El Héri	354	574.2	573.4	18.6	1163.8	515.5
Chacha n'Amellah	1421	477.6	549.9	19.5	1208.3	452
Taghzoute	171	505.1	494.5	19.5	1207.6	467.5
Tamchachat	134	669.4	575.2	12.8	898.3	467.6
Tarhat	1016	574.2	587.5	18.3	1149	503.5



Carte 3.8 Cartographie des moyennes de l'ETR Modis pour la période 2000 à 2020

3.4.2.3 Le manteau neigeux

Dans les régions arides et semi-arides, la couverture neigeuse revêt une importance cruciale en tant que source essentielle d'eau pour la croissance végétale (Sa *et al*., 2021), l'alimentation des cours d'eau, la recharge des nappes souterraines (Baba, 2018) et l'approvisionnement en eau des populations (Boudhar, 2010). Cependant, dans le cas du HaB-OER, l'état du manteau neigeux demeure mal connu en raison de l'absence totale de mesures in situ. Néanmoins, les progrès récents de la télédétection offrent des solutions prometteuses pour pallier ce manque de données (Annexe 3.15).

Parmi les produits satellitaires sur la neige, MODIS présente l'avantage d'une résolution spatiale fine, à 500 m, et propose des produits validés tels que le MOD10A (Fugazza *et al*., 2021). Le produit MOD10A1 et le produit MOD10A2 présentent une résolution spatiale similaire, mais se distinguent par leur résolution temporelle. En effet, le produit de couverture neigeuse MOD10A1 propose une résolution journalière, tandis que le produit MOD10A2 offre une résolution de 8 jours (Hall & Riggs, 2016). De nombreuses études sur la cartographie et la dynamique de la couverture neigeuse ont été menées avec succès à partir de ces produits (Calizaya *et al*., 2023; Fugazza *et al*., 2021; Thapa *et al*., 2021) ainsi que pour la modélisation hydrologique dans

diverses régions (Tong *et al*., 2020). Afin d'analyser la dynamique de la couverture neigeuse dans le HaB-OER, 4200 images MOD10A1 et 530 images MOD10A2 ont été téléchargées à partir de la plateforme "https://www.earthdata.nasa.gov". En préalable à leur utilisation pour déterminer la couverture neigeuse maximale "CNM" mensuelle et annuelle, ces images ont été comparées avec nos propres résultats obtenus en appliquant l'indice NDSI (Équ. 3.6) aux images de très haute résolution spatiale de Landsat et Sentinel, avec des dates de chevauchement identiques (Annexe 3.14). L'indice de différence de neige normalisé "NDSI" met en évidence les zones enneigées (Dozier, 1989) car la signature spectrale de la neige est caractérisée par une réflectance élevée dans les bandes visibles et une faible réflectance dans l'infrarouge à ondes courtes.

$$NDSI = \frac{\rho_V - \rho_{MIR}}{\rho_V + \rho_{MIR}} \qquad \textit{(Équation 3.6)}$$

Avec :
ρ_V : la réflectance dans le vert ;
ρ_{MIR} : la réflectance dans le Moyen Infra Rouge.

Cette démarche a permis de générer une série de données sur la couverture neigeuse sur une période de 20 ans, allant de 2000-01 à 2020-21.

La période favorable aux chutes de neige dans le HaB-OER s'étend de novembre à mars, avec le maximum de CNM enregistré en décembre, janvier et février (Annexe 3.16). En moyenne, le mois de janvier présente le plus grand taux d'enneigement, avec environ 41%, suivi de février à 32% et décembre à 27%. À l'échelle annuelle, la moyenne de la CNM entre 2000-01 et 2020-21 représente environ 24%, tandis que la moyenne des jours enneigés est de 40 jours (Fig. 3.12 et 3.13). L'année qui a connu une CNM maximale est 2016-17 avec 37 %, tandis que l'année qui a connu une longue période de jours enneigés est 2008-09 avec 111 jours. En revanche, l'année 2018-19 a enregistré la CNM la plus minimale avec seulement 11 % et la période la plus courte de jours enneigés avec seulement 6 jours. Il est à noter que le HaB-OER a connu une tendance à la baisse du nombre de jours enneigés, avec une diminution d'environ 1 j/an sur la période allant de 2000-01 à 2020-21.

Spatialement, en raison de sa situation en haute altitude, le sous-bassin de Tamchatat enregistre une CNM proche de 100% la plupart des années. Quant aux sous-bassins de Tarhat et Taghzoute, leur CNM peut atteindre environ 75% de leur superficie, tandis que les sous-bassins d'Aval El Héri et Chacha n'Amellah enregistrent une couverture d'environ 60%.

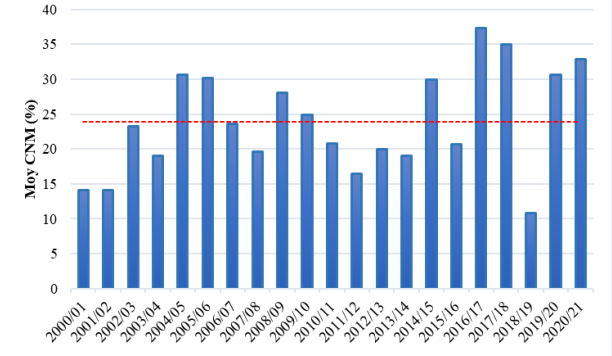


Figure 3.12 Evolution des moyennes de CNM annuelle du HaB-OER entre 2000-01 et 2020-21

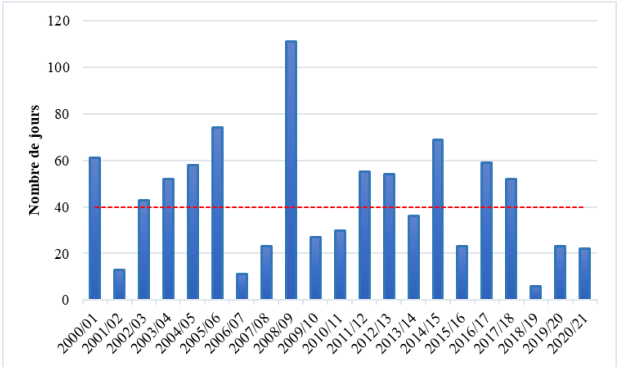


Figure 3.13 Evolution des nombres des jours enneigés dans le HaB-OER entre 2000-01 et 2020-21

Afin d'examiner la couverture neigeuse en tant que ressource en eau, il est indispensable de prendre en compte d'autres paramètres telles que la densité de la neige, l'épaisseur de la neige, la fonte de la neige (Boudhar, 2010), autant de paramètres que la télédétection ne fournit pas. C'est pourquoi il est nécessaire de collecter in situ des données précises sur les propriétés de la neige.

3.5 Monitoring pour la mesure des principales propriétés de la neige

3.5.1 Mesure des principales propriétés de la neige

3.5.1.1 Epaisseur du manteau neigeux

Les mesures de l'épaisseur de la neige revêtent une importance cruciale dans l'évaluation des ressources en eau (Lievens *et al*., 2019). Cette mesure représente la distance verticale entre la surface d'une couche de neige et le sol, en supposant que cette couche soit uniformément répartie sur le sol (OMM, 2012). Il est important de noter que l'épaisseur de la neige n'est pas influencée par les conditions météorologiques d'une seule journée, mais elle est le résultat de l'ensemble des processus physiques qui ont conduit à l'accumulation, la compression, la fonte partielle, et le regel de la neige (E. Martin *et al*., 1994).

Pour mesurer directement l'épaisseur de la neige fraîche sur un sol non couvert, une règle graduée ou une échelle est généralement utilisée, avec plusieurs mesures verticales relevées et une moyenne calculée (OMM, 2008b). L'épaisseur de la neige est étroitement liée à l'équivalent en eau et elle peut être mesuré plus facilement et rapidement que la densité de la neige (Bruland *et al*., 2015). Sturm *et al*. (2010) ont démontré que le temps nécessaire pour effectuer une mesure de densité équivaut à celui de trente mesures de hauteur de neige.

3.5.1.2 Densité de la neige

La densité de la neige se réfère à sa masse par unité de volume (OMM, 2012), et elle varie généralement entre 20 et 700 kg/m^3 (Marbouty, 1984). Cette mesure revêt une grande importance en hydrologie, car elle est utilisée pour convertir l'épaisseur de la neige en équivalent en eau (Bruland *et al*., 2015). Lorsque la densité de la neige augmente, l'albédo diminue, et la teneur en eau liquide de la neige augmente également. Par conséquent, la densité de la neige offre des indices sur les propriétés changeantes qui favorisent la fonte de neige (DeWalle & Rango, 2008).

Pour les stations météorologiques qui mesurent les hauteurs de neige, il est possible de les convertir en équivalent en eau à l'aide de modèles. Toutefois, ces modèles doivent être calibrés en utilisant des mesures de densité et de hauteur de neige obtenues sur le terrain (Boudhar, 2010). Lorsque la densité de la neige est connue, les observations du volume total de neige (épaisseur × surface) dans une zone peuvent être utilisées pour estimer le stockage d'eau correspondant (Lievens *et al*., 2019).

3.5.1.3 Equivalent en eau

L'équivalent en eau du manteau neigeux, communément désigné sous le terme "Snow Water Equivalent : SWE" (ou "ÉEN" en français), est l'une des propriétés de la neige les plus cruciales pour les hydrologues (Boudhar, 2010), car il représente la quantité d'eau disponible lors de la fonte des neiges (V. P. Singh, 2011).

La mesure de l'équivalent en eau, selon les directives de l'OMM (2008b), peut être effectuée de deux manières. Premièrement, en pesant ou en faisant fondre des échantillons cylindriques de neige fraîche à l'aide d'un dispositif approprié, avec une mesure effectuée par pesée après fusion. Deuxièmement, en utilisant des pluviomètres qui font immédiatement fondre la neige collectée, suivi de la mesure au moyen d'une éprouvette graduée. Cependant, il est important de noter que ces méthodes de mesure sont souvent chronophages. En conséquence, l'ÉEN peut être calculé à partir de l'épaisseur de la neige si la densité apparente de la neige est connue (Équ. 3.7) (Jonas *et al*., 2009).

$$ÉEN = H \times \rho_s \quad \textit{(Équation 3.7)}$$

Avec :
H : la hauteur en m ;
ρ_s : la densité en kg/m^3.

Actuellement, d'autres approches ont été développées pour faciliter la détermination de ÉEN, notamment son estimation à partir du produit des épaisseurs de neige obtenues à partir du lidar et des champs de densité de neige modélisés (Hedrick *et al*., 2018).

3.5.2 Implantation d'équipement pour le suivi des propriétés de la neige

3.5.2.1 Choix du site d'installation

Les visites d'exploration de terrain programmées en 2018 nous ont permis de constater à quel point le HaB-OER bénéficie des précipitations neigeuses (Annexe 3.17). Cependant, malgré l'importance de ces précipitations, à la fois pour les besoins humains et pour l'alimentation du système hydrogéologique de la zone, aucune station ni aucune mesure n'avaient été mises en place pour surveiller la neige dans cette région. Par conséquent, afin de documenter les caractéristiques de l'enneigement à l'amont du BV nous avons procédé à l'équipement d'une zone que l'on peut considérer comme représentative.

Les critères de choix pour l'emplacement de la station nivométrique sont les mêmes que ceux utilisés pour les stations pluviométriques. Nous nous sommes basés sur les directives de l'OMM (2008b) ainsi que sur les recommandations des habitants de la région. Le choix s'est finalement porté sur les environs de la station de Tamchachat, située à une altitude de 1685 m, pour y installer les instruments de mesure de la neige. Ce choix est justifié par la représentativité de cette zone au cœur du Moyen Atlas tabulaire (Fig. 3.14), son sous-bassin est entièrement recouvert de neige lors des épisodes neigeux, la présence d'une station pluviométrique, ainsi que par des considérations de sécurité et d'accessibilité pour les opérateurs.

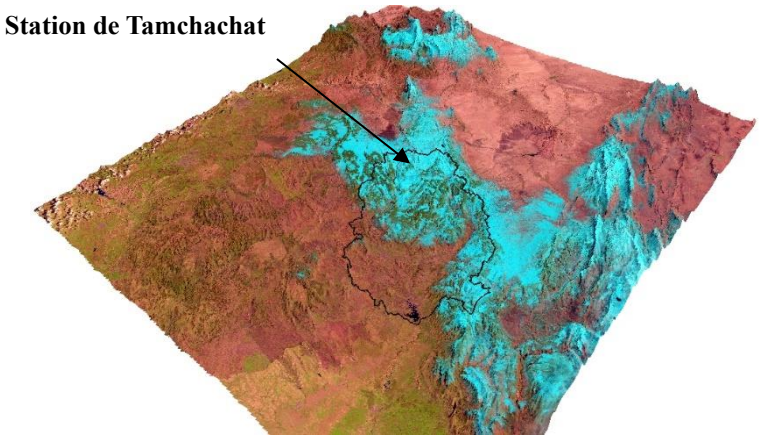


Figure 3.14 Représentation 3D du site choisi pendant l'enneigement de février 2018

3.5.2.2 Description et implantation des dispositifs de mesure

Après avoir déterminé le site pour les mesures nivométriques, nous nous sommes heurtés à des difficultés pour obtenir le financement nécessaire à l'acquisition d'instruments normalisés en raison de leur coût élevé (frais d'importation conséquents). Néanmoins pour ne pas abandonner notre objectif de mesurer l'impact de la neige sur les ressources en eau, nous avons conçu un dispositif de mesure alternatif qui respecte les normes de l'OMM (2008b) (Annexe 3.18). Ce dispositif comprend :

- ✓ une table à neige et des perches à neige graduées pour mesurer l'épaisseur de la couverture neigeuse ;
- ✓ un échantillonneur (Tube) et une balance électrique pour mesurer la masse volumique des échantillons prélevés, permettant ainsi de déterminer la densité de la neige ;
- ✓ une sonde de température "Elitech RC-5 USB Temperature Data Logger", des thermomètres, et un évaporomètre "Piche" pour surveiller les températures.

Le 1er décembre 2019, nous nous sommes rendus sur le site sélectionné avec tout le matériel nécessaire pour installer le dispositif de mesure (Annexe 3.19). Nous avons ensuite expliqué aux observateurs volontaires le protocole à suivre pour mesurer l'épaisseur de la neige, prélever des échantillons de neige autour du site de mesure, peser les échantillons, etc. Parallèlement à ces mesures nous avons également effectué des missions d'observation.

3.5.3 Lame d'eau des précipitations neigeuses dans le HaB-OER entre 2019 et 2021

3.5.3.1 A l'échelle de la station de Tamchachat entre 2019 et 2020

Entre décembre 2019 et février 2020, deux chutes de neige ont été enregistrées sur le HaB-OER, pour lesquelles une campagne de collecte d'échantillons in situ a été faite. Pour évaluer la hauteur moyenne de la neige, des relevés verticaux sont effectués à l'aide d'un cylindre. Trois carottes de neige sont prélevées à chaque site d'échantillonnage, couvrant un rayon d'environ 2 m autour du point d'origine. Pour convertir ces hauteurs en ÉEN, la masse de chaque échantillon est mesurée à l'aide d'une balance, permettant ainsi de déterminer sa densité. Une fois ces deux mesures disponibles, l'estimation de l'ÉEN est calculée en utilisant la formule (Équ. 3.7). Les caractéristiques des deux chutes de neige enregistrées entre décembre 2019 et février 2020 sont consignées dans le tableau 3.14.

La densité de la première chute de neige s'élève à 250 kg/m³, une valeur typique pour la neige fraîchement tombée qui peut varier de 20 kg/m³ à 250 kg/m³ (Fassnacht & Soulis, 2002). Par conséquent, l'estimation de l'équivalent en eau, l'épaisseur de la d'eau équivalente à la neige précipitée, pour cette période est de 132,7 mm. Il convient de noter que les caractéristiques de la deuxième chute n'ont pas pu être mesurées par l'observateur en raison de la faible épaisseur de la couverture neigeuse, qui n'a pas dépassé 2 cm.

Tableau 3.14 Principales caractéristiques des deux chutes de neige enregistrée sur le HaB-OER entre 2019-20

Chutes	Epaisseur (m)	Masse (Kg)	Densité (k/m^3)	ÉEN (mm)
Dec-19	0.53	0.14	250.4	132.7
Jan-20	0.02	-	-	-

Pour obtenir des détails supplémentaires sur ces deux épisodes, nous avons essayé de mettre en relation l'évolution de la couverture neigeuse sur une base journalière à partir du produit "MOD10A1" avec les températures moyennes journalières enregistrées par la sonde et les précipitations journalières fournies par l'ABHOER (Fig. 3.15 et 3.16). Les données montrent une corrélation marquée, où chaque chute de neige est précédée par des précipitations liquides et une diminution des températures, généralement en dessous de 0°C, marquant le début de la chute de neige. La couverture neigeuse des deux épisodes a persisté pendant environ 17 j dans le sous-bassin de Tamchachat, atteignant une couverture maximale de l'ensemble du bassin pendant 5 jours. Les résultats du deuxième épisode ont soulevé des questions concernant la fiabilité de ces caractéristiques, en particulier en raison de l'absence d'engagement de l'observateur. Cela nous a poussé à revoir légèrement notre méthodologie, en mesurant d'autres points et en n'étant pas limités uniquement au sous-bassin de Tamchachat.

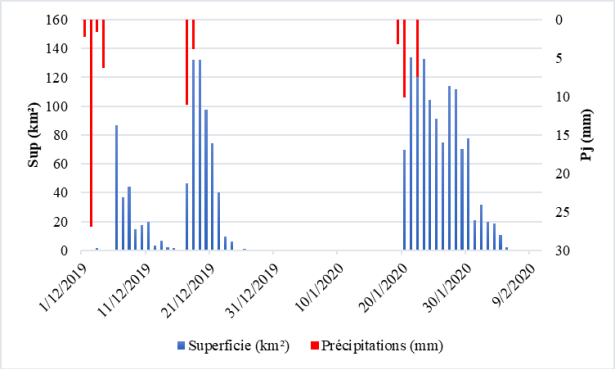


Figure 3.15 Evolution de la couverture neigeuse et des précipitations à Tamchachat entre 12/2019 et 02/2020

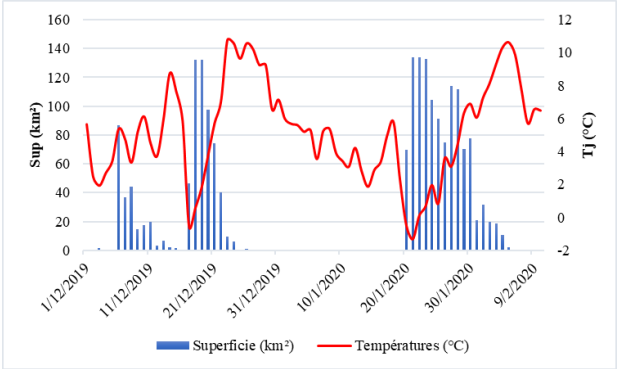
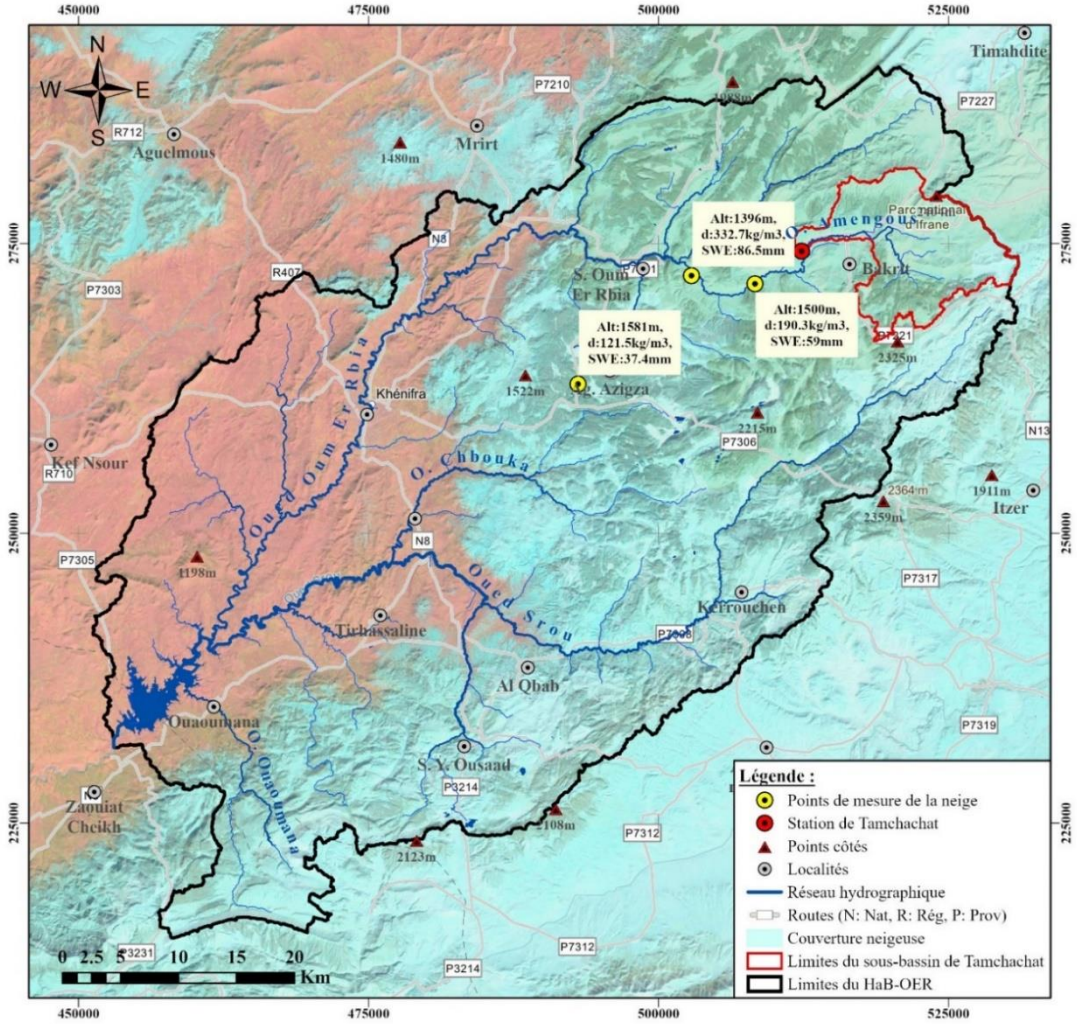


Figure 3.16 Evolution de la couverture neigeuse et des températures à Tamchachat entre 12/2019 et 02/2020

3.5.3.2 A l'échelle de l'amont du HaB-OER entre 2020 et 2021

En janvier 2021, une importante chute de neige a été enregistrée dans le HaB-OER, marquant la couverture maximale la plus étendue au cours des 20 dernières années, dépassant les 72% de la superficie totale du HaB-OER (Fig. 3.13). Le sous-bassin de Tamchachat a été complètement recouvert de neige pendant 10 j, et cette couverture a persisté pendant environ 20 j. Nous avons maintenu la même méthodologie de mesure, et les caractéristiques de la neige ont été évaluées en trois points seulement en raison des difficultés d'accès causées par la fermeture des routes en raison de l'accumulation de neige (Carte 3.9 et Annexe 3.20). Nous avons constaté que la densité moyenne était de 214,5 kg/m³, tandis que l'équivalent en eau atteignait 61 mm. Il est à noter que ces valeurs sont comparables à celles observées lors de l'épisode de décembre 2019.



Carte 3.9 Résultats de caractéristiques de la neige dans le HaB-OER pour l'épisode de janvier 2021

À l'échelle du HaB-OER, l'ÉEN varie entre 37,4 mm à Ajdir et 86,5 mm près de Fellat, illustrant ainsi la grande variabilité spatio-temporelle de ce paramètre, comme souligné par Vachon (2009). Cette variabilité est caractéristique des bassins versants semi-arides et se distingue par son amplitude bien plus élevée que celle observée dans d'autres régions montagneuses méditerranéennes (Baba *et al*., 2018). En plus, il est pertinent de comparer ces résultats à des relevés d'ÉEN effectués dans le Haut Atlas, où les altitudes sont nettement plus élevées, ce qui permet à la neige de persister plus longtemps. Cette différence de contexte peut expliquer la cohérence de nos résultats avec une moyenne d'ÉEN de 124 mm, variant de 51 mm à 220 mm sur la période de 2003 à 2007 selon Boudhar (2010), ainsi qu'avec l'intervalle de 80 à 120 mm enregistré pendant les hivers de 2000 à 2018 selon Baba (2018).

3.5.4 Couverture neigeuse et son influence sur les ressources en eau

En tant que réserve naturelle d'eau douce, l'accumulation de la neige sur une période d'environ quarante jours en moyenne annuelle joue un rôle essentiel dans l'alimentation en eau du HaB-OER. Au cours de la période de 2000-01 à 2020-21, la saison des chutes de neige dans le HaB-OER peut être divisée en trois sous-périodes distinctes (Fig. 3.17). Elle débute timidement en novembre avec seulement six jours de neige en moyenne, suivie par la véritable période d'enneigement entre décembre et février, au cours de laquelle le nombre de jours enneigés augmente, atteignant une moyenne de 21 jours en février. Cette période se caractérise également par la stabilité des Tx qui restent proches de leurs valeurs minimales. Enfin, la fin de la saison se traduit par une diminution rapide du nombre de jours enneigés en mars, accompagnée d'une augmentation des Tx. En conséquence, la couverture neigeuse, avec ses caractéristiques de densité et d'ÉEN très variables, se maintient généralement entre décembre et février, pour ensuite fondre en mars et disparaître totalement en avril.

Il convient de noter que l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques du HaB-OER influence le processus de fonte de la neige. Dans les zones amont du HaB-OER, telles que le sous-bassin de Tamchachat et l'amont du sous-bassin de Chacha n'Amellah, caractérisées par des altitudes élevées et des températures basses, la couverture neigeuse persiste plus longtemps, et la fonte s'effectue lentement. La prédominance de formations calcaires fissurées suggère que cette partie du bassin contribue à l'alimentation de la nappe. Cependant, dans les zones de basse altitude, comme l'aval du sous-bassin de Chacha n'Amellah, où les températures sont plus élevées et où des formations argileuses triasiques prédominent, la couverture neigeuse fond rapidement et contribue à l'alimentation des cours d'eau superficiels.

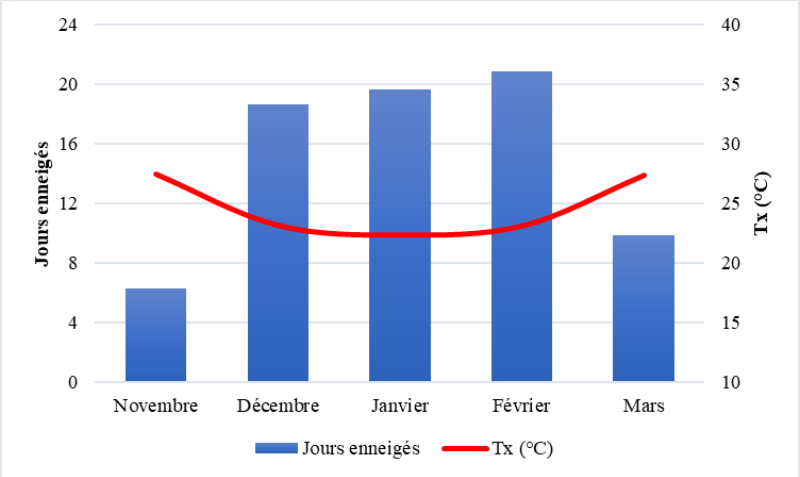


Figure 3.17 Variabilité des jours enneigés et des températures maximales sur la période 2000-01 à 2020-21

3.6 Conclusion

Les précipitations et l'ETR jouent un rôle crucial dans la disponibilité de l'eau dans le HaB-OER, mais leur variation annuelle est significative. En effet, l'analyse des données de précipitations à la station de Tarhat, représentative de la région, révèle une variabilité annuelle marquée, avec des valeurs allant de 288 mm à 1117 mm au cours de la période étudiée. De même, l'ETR, calculée selon l'équation de Turc en raison de la disponibilité des données, fluctue de 294 mm à 774 mm. À l'échelle spatiale, ces facteurs subissent la forte influence du contexte géomorphologique. Dans le Moyen Atlas, les précipitations liquides et solides sont abondantes, ce qui favorise le développement de vastes forêts et entraîne des valeurs élevées d'ETR. En revanche, la Meseta, avec une couverture végétale moins importante dominée par des steppes, est caractérisée par des précipitations et des ETR plus faibles.

La révolution satellitaire a ouvert une nouvelle voie d'acquisition de données, notamment climatiques, offrant des avantages significatifs en termes de couverture spatiale. L'utilisation de données satellitaires pour surveiller divers paramètres climatiques tels que les précipitations liquides et solides, l'ETP, l'ETR, les températures, etc., a considérablement amélioré notre capacité à suivre ces variables dans le temps et à en cartographier la distribution spatiale. Les données satellitaires permettent également de renseigner l'évolution de la couverture neigeuse, un facteur jusqu'alors peu étudié dans le HaB-OER.

Ces informations satellitaires sont complétées par des travaux de terrain visant à mesurer d'autres propriétés de la neige, notamment son épaisseur, sa densité et son équivalent en eau. Malgré les défis logistiques rencontrés lors des campagnes sur le terrain, cette combinaison de données satellitaires et de mesures in situ s'est avérée essentielle pour évaluer l'équivalent en eau de la neige dans le HaB-OER. Cette évaluation revêt une grande importance, car elle est directement liée à l'alimentation des principaux cours d'eau de la région. Pour approfondir notre compréhension de cette relation, une étude hydrologique, voire hydrogéologique, s'avère particulièrement pertinente.

Chapitre 4 : Étude hydrologique pour l'évaluation des ressources en eau dans le HaB-OER

4.1 Introduction

Les interactions entre les facteurs d'alimentation (les précipitations et la fonte des neiges), de dissipation (les températures) et les paramètres physiques (géomorphologie et physiographie) d'un bassin, conditionnent la disponibilité des ressources en eau. Faisant partie du cœur hydrographique du Maroc, le bassin de HaB-OER est l'un des bassins les plus riches en termes de ressources en eau. Il abrite l'origine de l'Oum Er Rbia, l'une des rivières les plus importantes du pays, revêtant ainsi une importance économique majeure pour le Maroc. Dans un contexte climatique semi-aride, le HaB-OER se distingue par une variabilité spatio-temporelle marquée des facteurs climatiques. Les abondantes précipitations en haute altitude, ainsi que la présence fréquente de formations rocheuses calcaires karstifiées, jouent un rôle prédominant dans la recharge des nappes souterraines et le débit des cours d'eau.

Ce chapitre est consacré à une analyse approfondie de l'hydrologie analytique du HaB-OER, avec une étude minutieuse des relations complexes entre les données climatiques et les caractéristiques hydrologiques spécifiques de la région. La mise en relation entre les propriétés physiques du HaB-OER et les données hydroclimatiques provenant de cinq stations hydrométriques, couvrant une période de 43 ans, permet d'évaluer l'état des ressources en eau de surface et d'estimer les réserves d'eau souterraine. Ceci est essentiel pour anticiper les variations futures de la disponibilité en eau

4.2 Disponibilité des données et contexte hydrologique

4.2.1 Disponibilité et critique des données

4.2.1.1 Présentation des stations hydrométriques

Une station hydrométrique bien entretenue fait l'objet de jaugeages réguliers, et il est courant de disposer de plusieurs dizaines de débits mesurés pour une même station (P.-A. Roche *et al.*, 2012a). L'étude hydrologique du HaB-OER repose sur les données hydrométriques provenant d'un réseau composé de 5 stations hydrométriques (Annexe 4.1 et 4.2), dont les caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 4.1. Ce réseau hydrométrique est géré par l'ABHOER qui nous a fourni des séries de données de débits complètes et sans lacunes depuis 1975, avec une variété d'intervalles de temps, y compris les débits à pas de temps variable (QtVar), journaliers (Qmj) et mensuels (Qmens) jusqu'en 2018-19 (Fig. 4.1). Chacune de ces stations est implantée sur l'un des cours d'eau du bassin versant de l'Oum Er Rbia.

Tableau 4.1 Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées

Cours d'eau	Stations	Date de mise en service	Lambert X (m)	Lambert Y (m)	Alt. (m)	Sup. (km²)
Chbouka	Aval El Heri	1970-71	478500	251200	830	354
Srou	Chacha N'Amellah	1974-75	467800	243300	685	1421
Ouaoumana	Taghzoute	1970-71	461400	235500	690	171
Amengous	Tamchachat	1975-76	512330	274340	1685	134
Oum Er Rbia	Tarhat	1969-70	476400	267500	1036	1016

4.2.1.2 Critique des données hydrométriques

Les Qmens fournis par l'ABHOER offrent des informations stables et continues sur les débits du HaB-OER, tout en réduisant les incertitudes liées aux variations à court terme. Même si ces données sont complètes pour toutes les stations, il est essentiel de vérifier leur cohérence et leur

fiabilité à l'aide des méthodes des simples et des doubles cumuls. L'analyse des corrélations établies entre les différentes paires de stations révèle une forte liaison entre elles. Comme l'a démontré Serbout (2001), en utilisant la station Tarhat comme référence, l'examen des corrélations de débit n'a montré aucune discontinuité dans les observations, et les coefficients de corrélation varient entre 0,98 et 1 (Annexe 4.3).

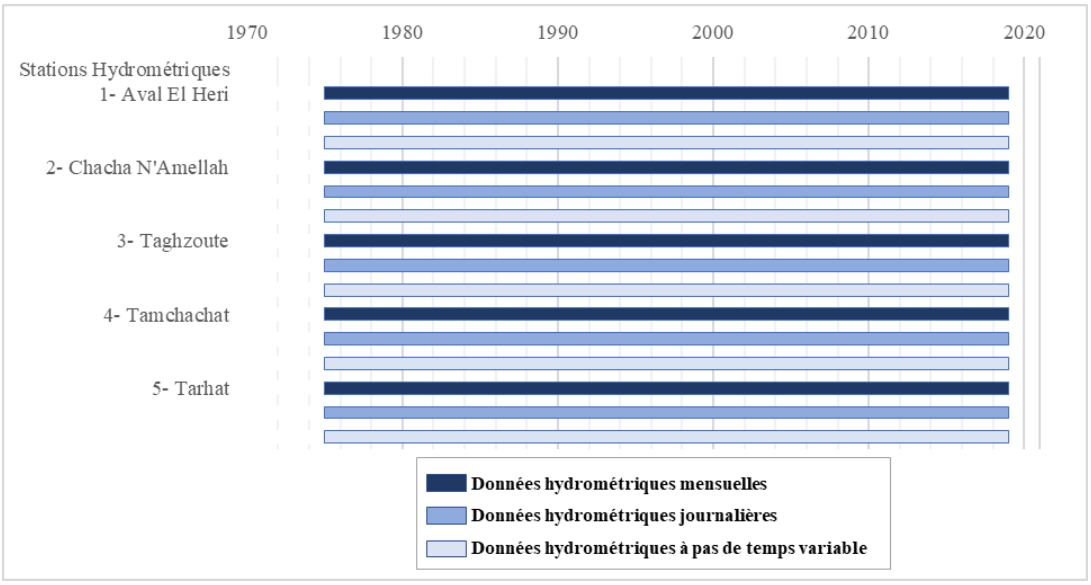


Figure 4.1 Chronogramme des stations hydrométriques utilisées

4.2.2 Analyse des modalités des écoulements dans le HaB-OER

4.2.2.1 Variabilité annuelle et tendance des débits

Située en aval des célèbres sources de l'Oum Er Rbia, la station de Tarhat a enregistré un débit moyen annuel de 15,72 m³/s sur la période allant de 1975-76 à 2018-19 (Fig. 4.2). L'écart-type associé est de 6,24 m³/s pour un coefficient de variation de 40%. Cette variabilité est moins prononcée par rapport aux débits enregistrés sur les autres stations, principalement en raison de l'apport continu des eaux des sources. La contribution de ces sources fait de la station de Tarhat un cas très particulier ; le bassin affiche en effet un débit spécifique 3 fois supérieur aux autres bassins de la région (Tab. 4.2).

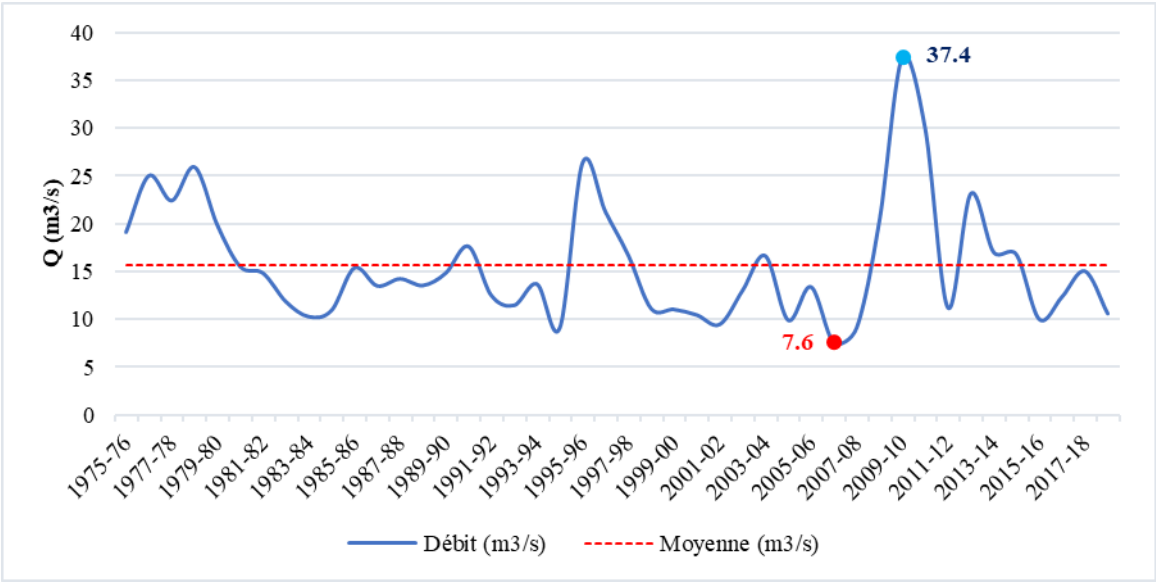


Figure 4.2 Modules annuels et interannuel à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19

Les débits spécifiques enregistrés aux stations d'Aval El Héri, de Chacha n'Amellah et de Tagzoute sont fortement corrélés aux précipitations et présentent un déficit d'écoulement similaire. Cependant, la station de Tamchachat se distingue par le déficit le plus marqué, principalement dû à la prédominance des formations calcaires karstifiées perméables et à un excès de précipitations par rapport aux autres sous-bassins (Chap.3).

Tableau 4.2 Caractéristiques statistiques des débits des stations dans le HaB-OER pour la période de 1975-76 à 2018-19

	Sup (km²)	Moy (m^3/s)	ET (m^3/s)	CV (%)	L. d'eau (mm)	Q spé (l/s/km²)	Pluie (mm)	DE (mm)
Ava	354	2.42	1.32	55	215.9	6.8	601.7	385.8
Cha	1421	7.43	5.21	70	164.9	5.2	491.6	326.7
Tag	171	0.96	0.66	69	176.1	5.6	506.9	330.8
Tam	134	0.75	0.67	90	175.6	5.6	689.7	514.1
Tar	1016	15.72	6.24	40	487.7	15.5	574.0	86.3

L'année la plus humide, marquée par des débits maximaux dans la plupart des stations, est 2009-10, tandis que les deux années les plus sèches sont 1994-95 et 2007-08 (Annexe 4.4). Ces périodes sont confirmées par la méthode "CUSUM" pour la station de Tarhat, et les débits annuels suivent les mêmes tendances pluviométriques. Cette méthode révèle l'hétérogénéité de la période considérée et la divise en 4 séries distinctes (Fig. 4.3).



Figure 4.3 CUSUM des débits observés à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19

Après une période humide qui s'est interrompue en 1979-80, le HaB-OER a traversé une période de sécheresse de près de trente ans, s'étendant de 1979-80 à 2007-08. Cette séquence aride a été interrompue en 2008-09 par une période humide de sept ans, qui s'est maintenue jusqu'en 2014-15, pour ensuite être suivie d'une nouvelle période sèche. Globalement, des tendances similaires ont été observées pour l'oued Bouregreg (Bounouira, 2007), l'oued Sebou (A. Qadem, 2015) et l'oued Moulouya (Zamrane, 2016).

Le coefficient de variation des sous-périodes montre d'importantes fluctuations entre les sous-bassins du HaB-OER. La première sous-période humide "H_1", présente les valeurs les plus faibles, de 13% à la station de Tarhat à 39% à la station de Tamchachat, et en faisant la période la plus stable. Cependant, les autres sous-périodes, notamment la première sous-période sèche "S_1", révèlent une variabilité significative, avec des coefficients atteignant jusqu'à 78% pour la station de Taghzoute (Tab. 4.3 et Annexe 4.5).

Tableau 4.3 Caractéristiques statistiques des résultats du découpage de la série étudiée par la méthode CUSUM

	Ava		Cha		Tag		Tam		Tar	
	Moy	CV	Moy	CV	Moy	CV	Moy	CV	Moy	CV
1975-76 à 2018-19	2,42	55	7,43	70	0,96	69	0,75	90	15,72	40
H_1 : 1975-76 à 1979-80	3,87	28	12,09	33	1,56	27	1,27	39	22,45	13
S_1 :1980-81 à 2007-08	1,85	44	5,49	60	0,89	78	0,46	74	13,41	30
H_2 :2008-09 à 2014-15	3,92	40	13,01	58	1,06	54	1,60	63	22,26	40
S_2 : 2015-16 à 2018-19	2,02	39	5,39	44	0,47	52	0,59	52	12,01	19

En plus de l'analyse de la variabilité annuelle et de l'application de la méthode CUSUM, une analyse fréquentielle des séries de modules a été réalisée en suivant la même approche que pour les précipitations. Plusieurs lois d'ajustement ont été testées, et le meilleur ajustement a été obtenu avec la loi "Lognormale" (Annexe 4.6 et 4.7). Les valeurs extrêmes des débits enregistrées aux stations du HaB-OER pour la période de 1975-76 et 2018-19 sont généralement d'ordre cinquantennal et centennal (Tab. 4.4). Le rapport $Q^{1/2}$ / $Q^{1/10}$ varie de 0,33 pour la station de Tamchachat à 0,63 pour la station de Tarhat. Contrairement à la station de Tamchachat, le débit médian à la station de Tarhat est relativement proche du débit décennal, ce qui indique une stabilité relative des débits au fil du temps.

Tableau 4.4 Périodes de retour des modules aux stations du HaB-OER selon la loi "Lognormale"

Fréquence	**1/100**	**1/50**	**1/20**	**1/10**	**1/5**	**1/2**	**1/5**	**1/10**	**1/20**	**1/50**	**1/100**
Période de retour (ans)	**100**	**50**	**20**	**10**	**5**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Aval El Héri	0.5	0.7	0.8	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	5.1	6.3	7.3
Chacha N'Amellah	1.5	1.7	2.1	2.6	3.5	6.1	10.3	13.5	16.9	21.8	25.7
Taghzoute	0.18	0.2	0.22	0.25	0.4	0.8	1.4	1.9	2.4	3.2	3.8
Tamchachat	0.04	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	1.1	1.5	2.1	2.9	3.6
Tarhat	6.6	7	8.1	9.2	10.9	14.7	19.9	23.2	26.5	30.6	33.8

4.2.2.2 Les régimes hydrologiques

Généralement, le régime mensuel des débits pour les stations du HaB-OER se caractérise par 7 mois de basses eaux, de mai à novembre, tandis que les 5 autres mois sont considérés comme une période de hautes eaux, avec un pic généralement enregistré en février (Annexe 4.8). En ce qui concerne l'Oum Er Rbia (Fig. 4.4), la diminution des débits pendant la saison des basses eaux s'explique principalement par la réduction des précipitations et l'augmentation des températures. Toutefois, le débit est significativement soutenu par la nappe d'eau souterraine, garantissant un écoulement régulier qui ne descend pas en dessous de 5,5 m³/s, soit 5,4 l/s/km². Les réserves d'eau souterraine se rechargent durant la saison des hautes eaux, grâce à des précipitations importantes, parfois supérieures à 400 mm. En effet, le régime hydrologique de l'Oum Er Rbia est essentiellement pluvial et est régulé par des apports souterrains.

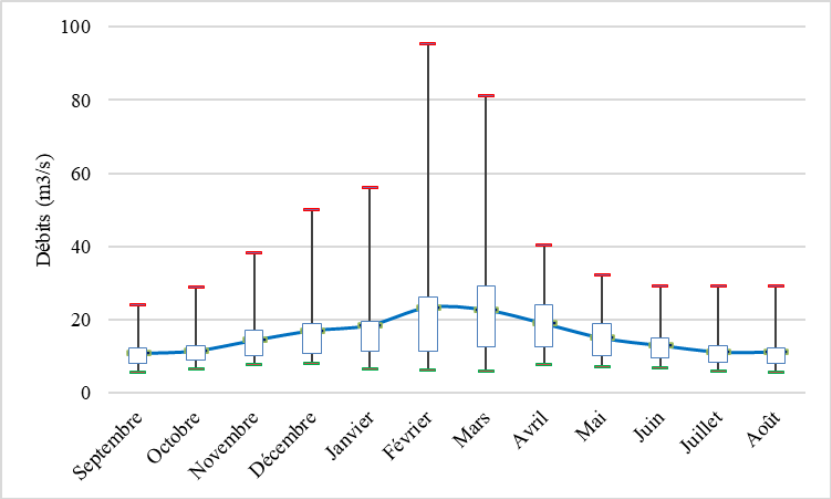


Figure 4.4 Régime hydrologique à la station de Tarhat

4.3 Les crues comme opportunité pour maximiser l'utilisation de la ressource en eau

4.3.1 Intérêt des recherches sur les crues

Les crues, bien qu'ayant diverses définitions, sont généralement définies par l'OMM (2011) comme une montée rapide et souvent brève du débit d'un cours d'eau jusqu'à un maximum dont il redescend plus lentement. Ces crues sont des événements naturels qui ont d'importantes répercussions sur l'environnement, la société et l'économie (Boithias *et al*., 2017), car elles peuvent se transformer rapidement en inondations graves, mettant en péril les communautés locales. De manière générale, ces phénomènes sont considérés comme des risques naturels significatifs, pouvant provoquer des dégâts matériels, des pertes de vies humaines et endommager les infrastructures (Talbot *et al*., 2018). Cependant, il est important de noter que les crues peuvent également présenter des avantages, telles que la contribution à la recharge des eaux souterraines et des zones humides, l'augmentation de la production piscicole et la création d'habitats précieux pour la faune (Poff, 2002).

Pendant les périodes humides, le HaB-OER connaît d'importantes précipitations qui entraînent des crues significatives, comme celles documentées en 1995-96 et 2009-10 (Chap. 3). En alimentant le b'AEH, ces crues jouent un rôle "positif" essentiel en tant que source d'eau pour satisfaire les besoins en eau potable, industrielle et agricole de la région (Chap. 8). Par conséquent, il est essentiel de quantifier ces ressources afin d'aider les gestionnaires à planifier et gérer de manière plus efficace l'utilisation de ces réserves d'eau.

4.3.2 Variabilité temporelle des débits instantanés maxima

Avant d'analyser les phases d'écoulement de crue, l'étude de la variabilité et de l'analyse fréquentielle des débits instantanés maxima annuels permettent de mieux comprendre la réponse hydrologique des sous-bassins du HaB-OER lors d'évènements pluvieux majeurs. À l'échelle des stations du HaB-OER, les débits instantanés maxima annuels présentent une variation considérable d'une année à l'autre (Annexe 4.9). A la station de Tarhat, ces débits varient de 36,7m^3/s en 1982/83 à 631,2 m^3/s en 2009/2010 (Fig. 4.5). Pour les débits instantanés maxima annuels spécifiques, la station de Tamchachat a enregistré la moyenne la plus basse, avec 130l/s/km², tandis que la station de Tagzoute a enregistré le maximum, atteignant 320 l/s/km². Ces observations sont principalement liées aux caractéristiques des sous-bassins. En effet, le sous-bassin de Tamchachat est largement recouvert de formations perméables, tandis que celui de Taghzoute présente des pentes plus fortes (Tab. 2.2).

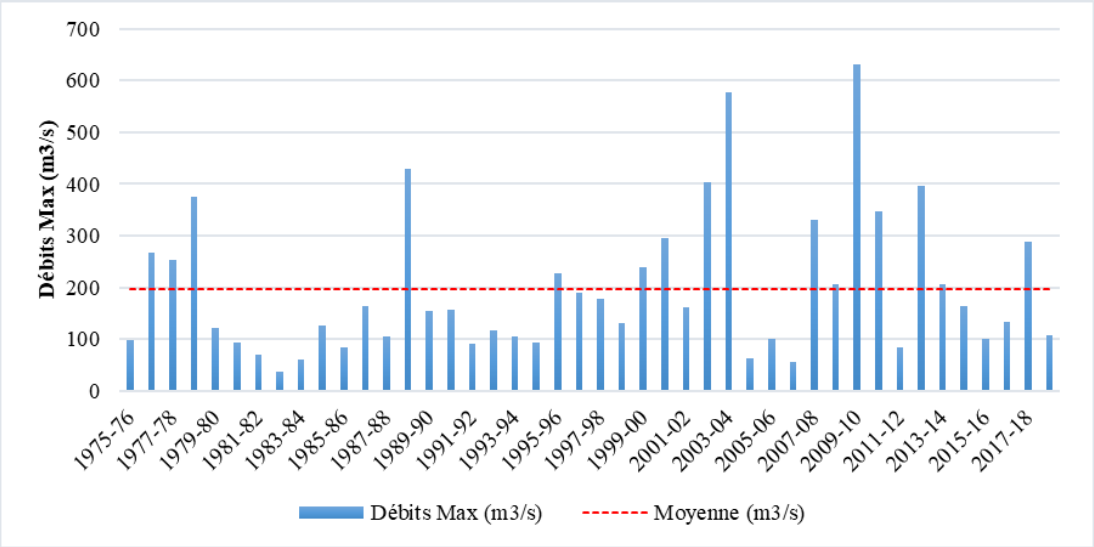


Figure 4.5 Débits instantanés maxima annuels à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19

En ce qui concerne l'analyse fréquentielle, différentes lois ont été examinées pour déterminer celle qui convient le mieux à ces données de débits instantanés maxima. En général, les données s'ajustent mieux à la loi "Lognormale", à l'exception des données de la station de Chacha n'Amellah, qui s'ajustent mieux à la loi des "Generalized Extreme Values" (GEV) (Annexe 4.10 et 4.11). Les débits les plus élevés observés aux stations d'Aval El Héri, de Chacha n'Amellah et de Tamchachat sont d'ordre centennal. En revanche, ces mêmes débits enregistrés à Tagzoute et à Tarhat ont des périodes de retour, respectivement, d'environ 40 ans et 60 ans (Tab. 4.5). Par conséquent, les trois premiers sous-bassins, en particulier Chacha n'Amellah, sont plus susceptibles de connaître des crues exceptionnellement importantes en termes de débits.

Tableau 4.5 Périodes de retour des débits instantanés maxima annuels aux stations du HaB-OER

Fréquence	**1/2**	**1/5**	**1/10**	**1/20**	**1/50**	**1/100**
Période de retour (ans)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Aval El Héri	50.3	94	130	171	231	283
Chacha N'Amellah	194	373	534	730	1060	1390
Taghzoute	33.7	80.9	128	187	286	379
Tamchachat	17.4	33.9	42.6	49.7	57.8	63.1
Tarhat	158	275	368	468	613	733

4.3.3 Analyse des épisodes de crue

4.3.3.1 Hydrogramme de crue

L'hydrologie analytique vise à transformer les données relatives à l'averse en un hydrogramme à partir d'un hyétogramme (M. Roche, 1963). Cet hydrogramme permet de quantifier le volume d'écoulement résultant de l'averse (Jacquet, 1960). Pour ce faire, les hydrogrammes doivent être analysés après avoir séparé l'écoulement de base (Dubreuil, 1974). Il est à noter que la séparation des hydrogrammes en deux phases distinctes, les débits de crue et les débits de base, est couramment réalisée en utilisant une approche graphique, comme le révèle la littérature scientifique (El Adlouni *et al*., 2011).

Après avoir identifié les épisodes pluvieux sur les hyétogrammes de toutes les stations pluviométriques du HaB-OER pour la période de 1975-76 à 2018-19, et extrait les phases de crue correspondantes, cette méthode, basée sur la décomposition logarithmique des

hydrogrammes (Fig. 4.6) telle que proposée par M. Roche (1963), a été mise en œuvre sur les données de débits "QTvar" à l'aide d'un tableur Excel. Ainsi, afin de mieux caractériser les crues identifiées, en tant que ressource en eau, l'analyse visait à déterminer leurs principales caractéristiques, notamment le temps de base, de montée, de descente, le volume de la crue, ainsi que le Coefficient d'Écoulement Rapide de Crue (CERC).

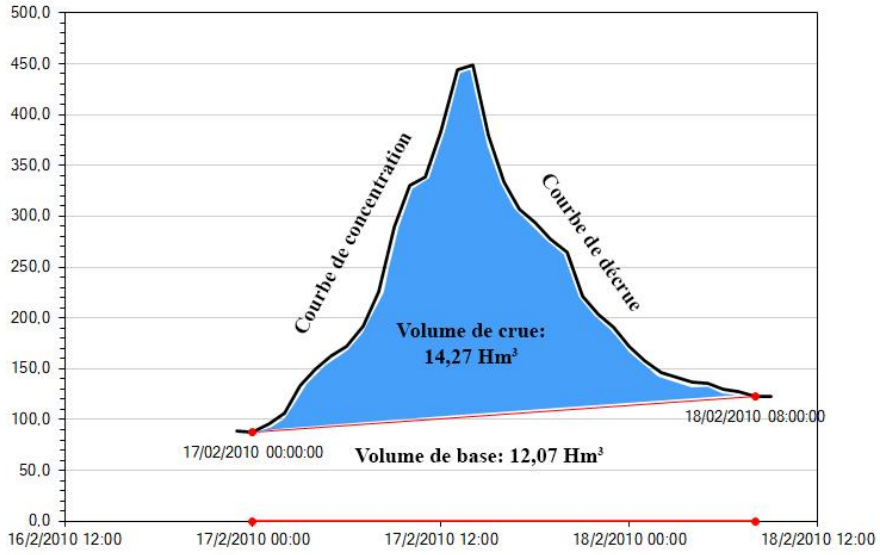


Figure 4.6 Décomposition d'un hydrogramme de crue, épisode du 17- 18/02/2010 à la station de Tarhat

4.3.3.2 Caractéristiques générales des crues

Mis à part la station de Tamchachat, plus de 650 crues ont été répertoriées pour les stations du HaB-OER sur la période de 1975-76 à 2018-19, dont les 2/3 voire les 3/4 sont des crues simples (Annexe 4.12). La fréquence des crues varie considérablement d'une année à l'autre, et au sein de la même année, elle peut varier d'une saison à l'autre ou même d'un mois à l'autre. Par exemple, pour la station de Tarhat, l'année 2011-12 n'a enregistré que 6 crues, tandis que l'année 2008-09 en a enregistré 26 (Fig. 4.7 et Annexe 4.13). Le plus grand nombre de crues survient généralement en hiver, principalement en janvier (Annexe 4.14).

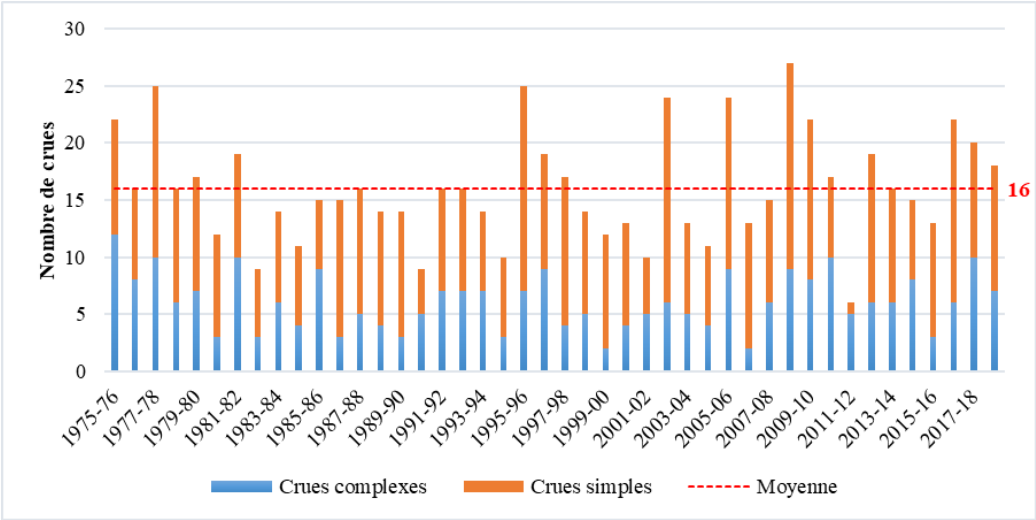


Figure 4.7 Effectifs annuels de crues à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19

En ce qui concerne les caractéristiques temporelles, la durée moyenne des crues enregistrées entre 1975-76 et 2018-19 varie de 02j 14h 25mn pour la station de Taghzoute à 05j 11h 23mn

pour la station de Chacha n'Amellah (Tab. 4.6). Les durées des crues dépendent d'interactions complexes entre plusieurs facteurs, notamment les paramètres physiographiques, l'occupation du sol et la perméabilité des formations lithologiques… Cependant, il existe une certaine relation entre les temps de montée des crues, les pentes et le pourcentage de la couverture imperméable enregistrés dans le HaB-OER : ils sont inversement proportionnels. Le temps de montée de la crue diminue si la pente moyenne du sous-bassin augmente (ou la pente du cours d'eau) et si la couverture imperméable est dominante (Annexe 4.15). Ces temps de montée représentent généralement entre le 1/4 et le 1/3 de la durée totale de la crue.

Tableau 4.6 Caractéristiques temporelles des crues enregistrées dans le HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

	Durée	**La montée**		**La descente**	
		Temps	% de la durée	Temps	% de la durée
Ava	03j 22h 22mn	01j 00h 56mn	26	02j 22h 02mn	74
Cha	05j 11h 23mn	01j 13h 30mn	28.6	03j 21h 52mn	71.5
Tag	02j 14h 25mn	00j 19h 12mn	30.8	01j 19h 13mn	69.2
Tam	03j 17h 27mn	01j 08h 24mn	36.2	02j 09h 03mn	63.8
Tar	03j 05h 18mn	01j 00h 32mn	31.8	02j 04h 45mn	68.2

4.3.3.3 Caractéristiques volumétriques des crues

Dans le but d'améliorer notre compréhension des crues et de leur relation avec les précipitations, le Coefficient d'Écoulement Rapide de Crue "CERC" a également été calculé. Ce coefficient est défini comme le rapport entre le volume d'eau de la crue et le volume des précipitations qui l'ont déclenchée. Le CERC moyen pour l'ensemble des crues varie de 6,3% pour la station de Tamchachat à 10,8% pour la station de Tarhat. En classifiant les crues en fonction de leurs CERC, nous constatons que la caractéristique commune à tous les sous-bassins du HaB-OER est la prédominance des crues ayant un CERC inférieur à 5% (Fig. 4.8), avec de légères variations, notamment l'occurrence de crues ayant un CERC supérieur à 20% et 30% pour les stations de Chacha n'Amellah et de Taghzoute par rapport aux autres stations.

L'analyse de la variabilité mensuelle du CERC pour l'ensemble des stations révèle deux pics. Le premier se produit en février en raison des précipitations hivernales, tandis que le second survient en août (juillet pour Tarhat) en raison des épisodes orageux estivaux (Annexe 4.16).

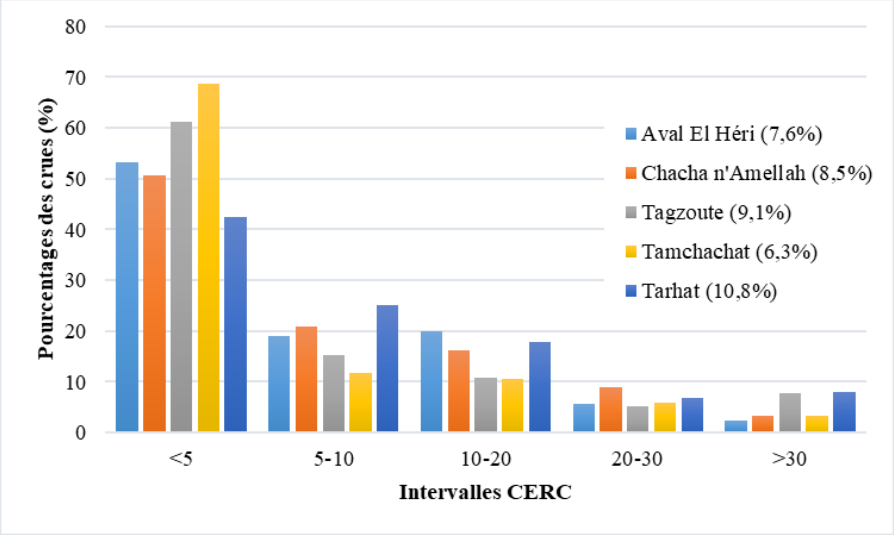


Figure 4.8 Classification des crues en fonction des CERC

En ce qui concerne la ressource en eau, élément crucial de notre étude, la méthode de séparation des hydrogrammes de crue nous a permis de calculer la contribution des crues à l'écoulement total. Les volumes annuels de crues varient considérablement d'une année à l'autre, et même au sein de la même année, d'un mois à l'autre, en fonction de l'abondance des précipitations. À l'échelle du HaB-OER, les moyennes annuelles des volumes des crues varient entre 5 hm^3 pour la station de Tamchachat et 70,4 hm^3 pour la station de Chacha n'Amellah (Tab. 4.7 et Annexe 4.17). À l'échelle mensuelle, les volumes de crues les plus importants se produisent en janvier et en février (Annexe 4.18).

Tableau 4.7 Caractéristiques statistiques des volumes de crue aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

	Moy. (hm^3)	*ET (hm^3)*	*CV (%)*	*Min(hm^3)*	*Date*	*Max (hm^3)*	*Date*
Ava	17,75	13,48	76	1,41	1994-95	65,26	2009-10
Cha	70,42	63,19	90	3,24	1992-93	292,41	1995-96
Tag	8,66	8,58	99	1,58	1994-95	56,30	1995-96
Tam	5,00	4,44	89	1,04	1980-81	20,66	2012-13
Tar	50,12	44,58	89	9,75	2006-07	228,49	2009-10

4.3.4 Evaluation des ressources en eau

4.3.4.1 Validation des volumes d'eau extraits

La séparation des hydrogrammes de crues des stations du HaB-OER a permis d'extraire les volumes d'eau des crues et de base. Afin de valider notre méthode, une comparaison a été faite entre la somme des volumes d'eau des sous-bassins qui alimentent directement le b'AEH, à savoir Tarhat, Chacha n'Amellah et Tagzoute, avec les apports fournis par l'ABHOER sur la période de 2002-03 à 2018-19. La corrélation entre les deux ensembles de données à l'échelle annuelle est très bonne, variant entre 0,86 pour le volume de base et 0,92 pour le volume de crue et le volume total annuel (Fig. 4.9). Ces résultats renforcent la validité de notre méthode d'analyse des crues ainsi que leur contribution à l'alimentation du b'AEH.

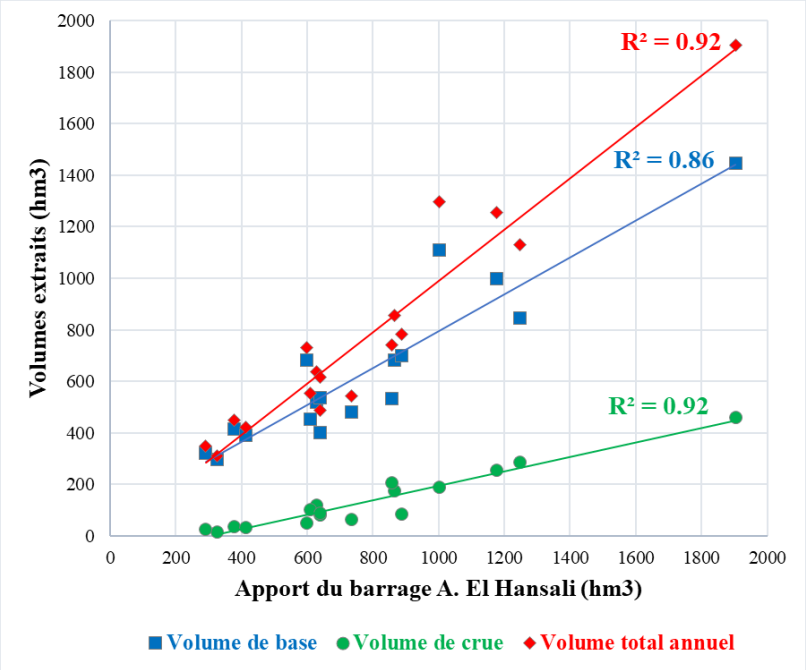


Figure 4.9 Corrélation entre les volumes extraits et les données des apports du b'AEH

4.3.4.2 Relation entre la lame d'eau précipitée et les lames d'eau écoulées

La méthode de Thiessen a été appliquée pour spatialiser les lames d'eau précipitées sur chaque sous-bassin (M. Roche, 1963) à partir des données disponibles aux stations. Le calcul des coefficients de détermination "R^2" entre ces lames et les lames d'eau écoulées à l'échelle annuelle (Annexe 4.19) a permis d'évaluer la relation entre ces deux paramètres importants, laquelle varie en fonction des caractéristiques du bassin telles que le type de sol, la pente, la couverture végétale, et le réseau hydrographique. Globalement, à l'échelle annuelle, une bonne adéquation entre les lames d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées (de base, de crue et totales) a été observée (Tab. 4.8). Pour l'écoulement de base, le R^2 dépasse 0.7 pour les stations de Tarhat et Tamchachat. Alors que pour les lames écoulées de crue R^2 égale à 0.76 pour la station d'Aval El Héri comme valeur maximale. Concernant les lames écoulées totales, les deux stations d'Aval El Héri et Taghzoute témoignent des faible R^2 : 0.68 et 0.62.

Tableau 4.8 . Coefficients de détermination R^2 entre la lame d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

	Lame d'eau écoulée de base	Lame d'eau écoulée de crue	Lame d'eau écoulée totale
Aval El Héri	0,56	0,76	0,68
Chacha n'Amellah	0,65	0,74	0,75
Taghzoute	0,57	0,53	0,62
Tamchachat	0,73	0,51	0,69
Tarhat	0,7	0,7	0,74

Mis à part le sous-bassin d'Oum Er Rbia (st Tarhat) alimenté par les fameuses sources de l'Oum Er Rbia, qui contribuent à la régulation et la pérennité de l'écoulement pendant toute l'année, environ 70% des précipitations qui tombe sur les autres sous-bassin s'évapore (théoriquement la lame d'eau évaporée dépasse le déficit d'écoulement déduit), est intercepté (le couvert forestier représente 50% de la superficie du bassin d'Aval El Héri) ou s'infiltre (plus que 95% du substratum de Taghzoute et Tamchachat représente des calcaires fissurés), le 30% restant alimente les écoulements superficiels, dont 24% alimente les écoulements de base et 6% les écoulement de crue (Fig. 4.10).

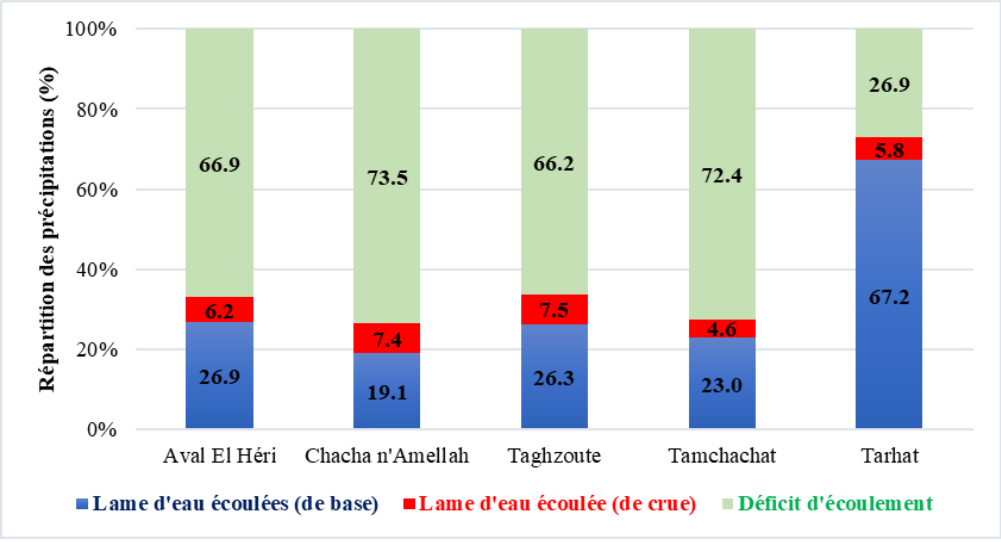


Figure 4.10 Répartition des précipitations dans les bassins du HaB-OER

4.3.5 Evolution spatio-temporelle des volumes des écoulements totaux

Pendant les périodes sèches, les volumes d'eau diminuent en raison des faibles précipitations, les années 1994-95 et 2007-08 témoignent de faibles volumes. En revanche, pendant les périodes humides, les volumes d'eau augmentent en raison de la disponibilité des précipitations, les années 1995-1996 et 2009-2010 présentent des volumes importants (Annexe 4.20). À titre d'exemple, la station de Tarhat a enregistré un volume total de 234 hm^3 en 2006-07 (dont 224 hm^3 est un volume de base et 10 hm^3 est un volume de crue), tandis qu'en 2009-10, elle a enregistré un volume total de 1178 hm^3 (dont 949 hm^3 est un volume de base et 229 hm^3 est un volume de crue) (Fig. 4.11). Sur la période de 1975-76 à 2018-19, la station de Tarhat a enregistré la plus grande moyenne de volume total, soit environ 500 hm^3, dont 10 % provenant de crues. En revanche, Tamchachat a enregistré la moyenne la plus basse avec 24 hm^3, dont 18,5 % provenant de crues. À l'échelle mensuelle, les volumes augmentent proportionnellement avec les précipitations, atteignant leur maximum en janvier, février ou mars (Annexe 4.21).

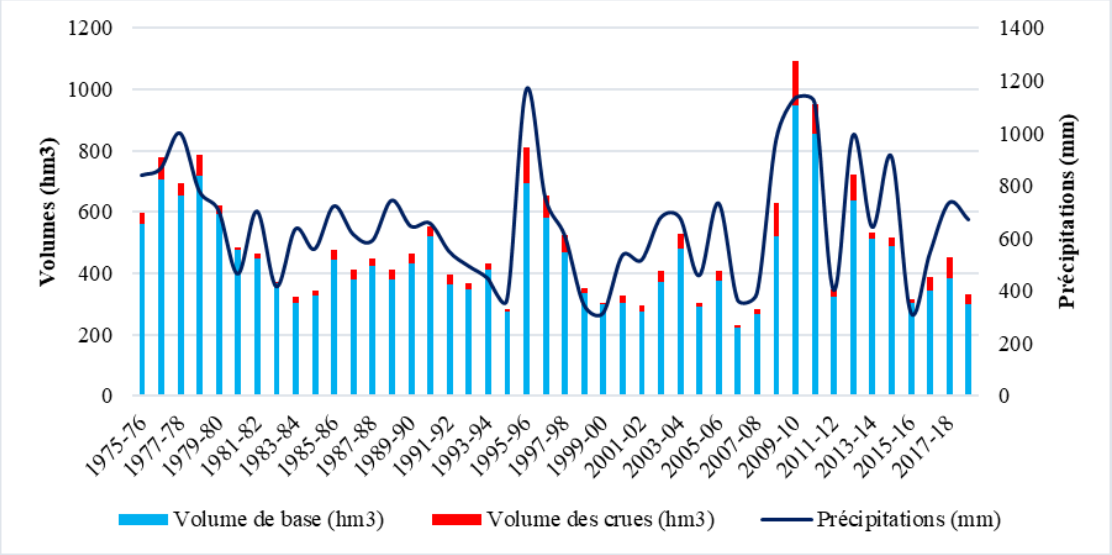


Figure 4.11 Évolution des précipitations et des volumes des écoulements à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19

D'un point de vue spatial, les volumes totaux varient en fonction de l'importance des sous-bassins. A la station de Tarhat, le sous-bassin de l'Oum Er Rbia demeure le plus important avec 499 hm^3, représentant ainsi 58 % de l'ensemble des écoulements dans la zone d'étude, dont 10% proviennent des crues (Tab. 4.9). Il est suivi par le sous-bassin de Chacha n'Amellah, avec 229hm^3, représentant 27 % des écoulements, dont 30 % sont d'origine de crue. Pour les autres sous-bassins, la contribution des crues aux écoulements est de 29 % pour le Taghzoute et d'environ 20 % pour l'Aval El Héri et Tamchachat (Fig. 4.12).

Tableau 4.9 Volumes moyens annuels des écoulements au niveau des stations de mesures

	Ava	**Cha**	**Tag**	**Tam**	**Tar**
V. de base (hm^3)	59,9	160,1	22,4	19,5	448,5
V. de crue (hm^3)	17,8	68,8	9,1	4,4	50,1
V. total (hm^3)	77,7	229	31,5	24	498,6

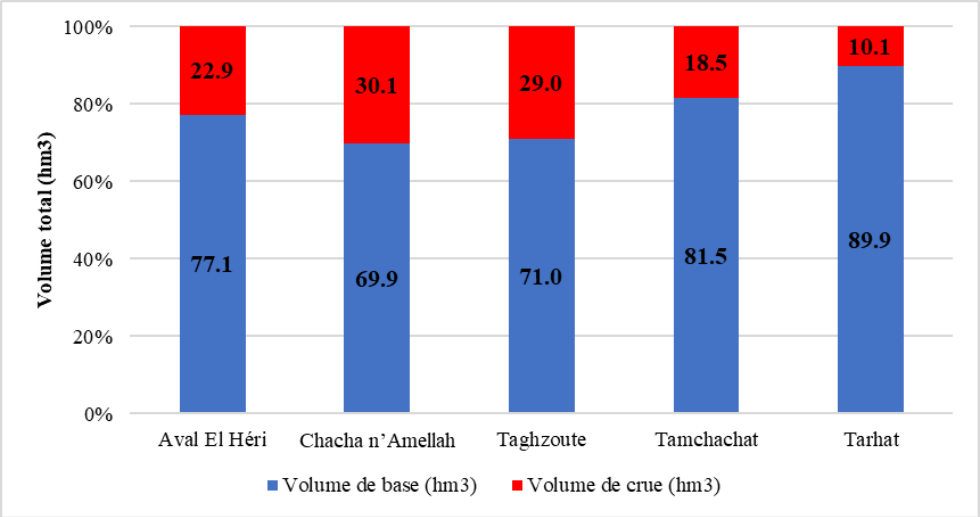


Figure 4.12 Contribution des volumes de crue à l'alimentation des écoulements dans le HaB-OER

4.4 Les réserves régulatrices, l'autre ressource en eau exploitée pendant les étiages

4.4.1 Importance de l'analyse des étiages pour la gestion de l'eau

Les étiages sont des phénomènes complexes à décrire et leur genèse particulièrement longue les rend difficiles à identifier, et même leurs définitions peuvent parfois être imprécises (Lang Delus, 2011). L'OMM (2012) définit l'étiage comme le plus bas niveau d'eau atteint par un cours d'eau, un lac ou un réservoir au cours d'une sécheresse, sans précision temporelle, tandis que M. Roche (1986) le considère sur une base annuelle comme le niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau. En général, les définitions de l'étiage font référence à l'état du cours d'eau, mais elles n'expliquent pas les processus sous-jacents (Lang, 2007). Dans ce contexte, la définition de l'étiage proposer par George & Verger (2000) est intéressante car elle le décrit comme la période pendant laquelle les débits sont très bas et peu variables, principalement en raison de tarissement progressif des nappes souterraines.

Contrairement aux crues qui constituent depuis longtemps un thème majeur de recherches, ce n'est que récemment que les hydrologues se sont attachés aux étiages (El Ghachi, 2007). Cette prise de conscience résulte de la pressions croissante sur les ressource en eau, ce qui contraint l'homme à adapter ses activités en fonction des ressources disponibles (Hingray *et al*., 2009). En période de basses eaux, les débits d'étiage sont liés à la disponibilité des ressources en eau souterraine, ce qui correspond au niveau le plus bas des eaux disponibles dans le bassin versant (A. Qadem, 2015). En effet, il est essentiel de connaître ces ressources disponibles pour les gérer de manière équilibrée et responsable tout en préservant l'équilibre écologique (Hingray *et al*., 2009).

Pour ce faire, plusieurs indicateurs ont été développés pour identifier les étiages et évaluer leurs impacts sur les ressources en eau. La littérature recense ces variables en fonction des objectifs de l'étude, parmi lesquels les plus couramment utilisés sont répertoriés dans le tableau 4.10 (Hingray *et al*., 2009).

L'analyse des étiages dans le HaB-OER permettra de compléter les études sur les débits à différents pas de temps, qui ont déjà mis en évidence l'influence des eaux souterraines sur les écoulements des cours d'eau en particulier l'Oum Er Rbia à la station de Tarhat.

Tableau 4.10 Quelques débits d'étiage caractéristiques (Hingray et al., 2009)

Débits caractéristiques	Signification
Débit annuel d'étiage	Le débit journalier le plus faible observé au cours de l'année
Débit absolu d'étiage	Le débit journalier le plus faible au cours d'une longue période d'observation (environ 20 ans)
Q_n, NM_nQ, VCN_n	La valeur la plus faible sur la période considérée du débit d'étiage moyen sur n (1, 7, 14 ou 30) jours successifs. La détermination de ce débit est effectuée en identifiant la plus petite valeur obtenue sur la série des moyennes mobiles de n jours de mesures consécutifs.
QCN_n	La valeur la plus faible sur la période considérée du débit maximal sur n débits journaliers consécutifs, c.-à-d. le débit minimal qui n'est pas dépassé sur n jours consécutifs.
QMNA	Débits (Q) mensuel (M) minimal (N) annuel (A), la valeur la plus faible des 12 débits mensuels d'une année.

4.4.2 Caractéristiques des étiages dans le HaB-OER

4.4.2.1 Débits d'étiage au pas de temps mensuel : le QMNA

À l'échelle du HaB-OER, comme c'est souvent le cas pour les cours d'eau du Moyen Atlas, les débits les plus bas surviennent généralement en août ou en septembre. Ces débits mensuels minimaux annuels "QMNA" sont fortement influencés par la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques, précipitations et températures, ainsi que par les apports d'eau souterraine. À la station de Tarhat, les QMNA varient entre 5,6 m^3/s et 21,7 m^3/s, avec une moyenne de 9,5 m^3/s (Fig. 4.13). Cependant, cette moyenne diminue considérablement à l'échelle du HaB-OER, atteignant seulement 0,1 m^3/s à la station de Tamchachat (Annexe 4.22).

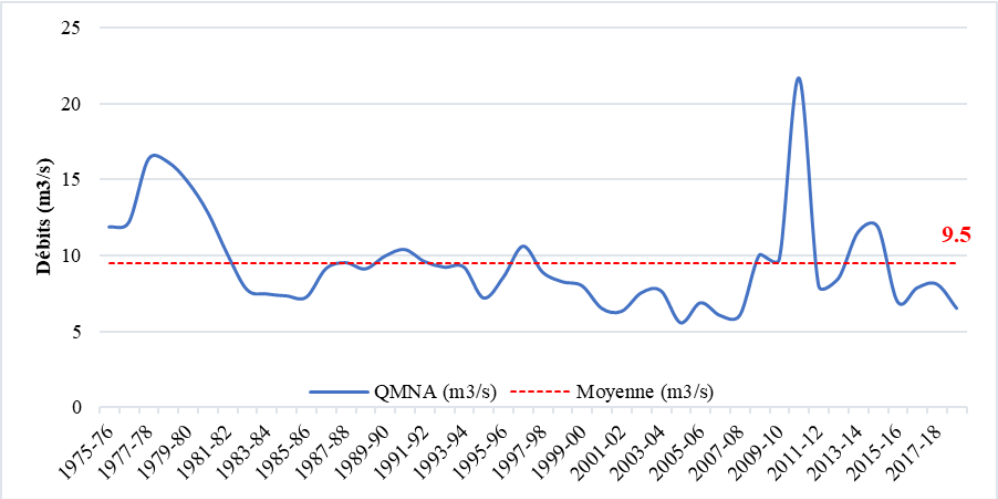


Figure 4.13 Variabilité des QMNA à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19

L'analyse fréquentielle des QMNA présente l'avantage de mesurer le caractère plus ou moins exceptionnel d'un étiage (El Ghachi, 2007). Il convient de noter que plusieurs lois statistiques peuvent être utilisées pour l'ajustement des QMNA (A. Qadem, 2015; Ghadbane, 2022). Les ajustements effectués pour les stations du HaB-OER sur la période d'étude semblent bien adaptés aux lois Lognormale et Gumbel (Annexe 4.23 et 4.24) et permettent de calculer des débits pour différentes périodes de retour (Tab. 4.11). Ces débits servent de référence pour la gestion de l'eau pendant les périodes d'étiage.

Par exemple en France, la loi sur l'eau de 1992, définit le QMNA de fréquence 1/5ème comme débit de référence d'étiage pour l'application de la police de l'eau (Lang Delus, 2011). Malheureusement, le Maroc ne dispose pas de textes législatifs spécifiques concernant les débits d'étiage, même avec la loi sur l'eau 35-15 en vigueur. Cependant, en suivant une approche similaire à celle de la France, le débit de référence d'étiage pour la station de Tarhat est de 11,2m^3/s et sera utilisé pour fixer les volumes de prélèvements autorisés dans les eaux de surface.

Tableau 4.11 Périodes de retour des QMNA (m^3) aux stations du HaB-OER

Fréquence	1/100	1/50	1/20	1/10	1/5	1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
Période de retour (ans)	**100**	**50**	**20**	**10**	**5**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Aval El Héri	0.32	0.35	0.45	0.5	0.6	0.84	1.16	1.37	1.57	1.83	2.03
Chacha N'Amellah	0.36	0.4	0.5	0.61	0.81	1.31	2.12	2.72	3.36	4.24	4.96
Taghzoute	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.16	0.3	0.41	0.54	0.73	0.89
Tamchachat	0.01	0.012	0.018	0.022	0.03	0.07	0.13	0.18	0.25	0.34	0.42
Tarhat	4.8	5	5.5	6.4	7.2	8.92	11.2	12.8	14.3	16.2	17.6

4.4.2.2 Débits d'étiage au pas de temps journalier : les VCNd

Le QMNA est certes une valeur facile à obtenir, mais elle peut être peu représentative d'un étiage car elle est liée à l'échelle calendaire (Lang, 2007). Pour une perspective journalière, il est possible d'examiner les débits d'étiage à partir des "VCNd", qui correspondent au minimum annuel d'une moyenne glissante sur une période de "d" jours (Garcia, 2016). En général, la valeur de "d" peut être de 1, 3, 5, 10, ou 30 jours, et des durées plus longues peuvent être utilisées pour caractériser les étiages plus étendus (Ghadbane, 2022).

Parmi les VCN les plus couramment utilisés, ceux calculés sur des périodes de 7 ou 10 jours correspondent à des valeurs réglementaires dans de nombreux pays (Lang Delus, 2011) et sont également appropriés pour atténuer les erreurs de mesure des débits et minimiser les influences des activités humaines (Laaha, 2000 in Garcia, 2016). A l'échelle du HaB-OER, les valeurs des VCN pour d=3, 10 et 30 jours ont été calculées pour toutes les stations à l'aide d'un fichier Excel spécialement conçu à cet effet.

Globalement, on observe peu de différences entre les VCN à différents pas de temps pour l'ensemble des sous-bassins du HaB-OER (Fig. 4.14 et Annexe 4.25). Cette constatation s'explique par la grande stabilité et l'étendue des périodes d'étiage. Pour la station de Tarhat, les valeurs des VCN varient entre des minimums enregistrés en 2007, d'environ 5 m^3/s, et des maximums enregistrés en 2010, atteignant des valeurs de 24 m^3/s pour le VCN30.

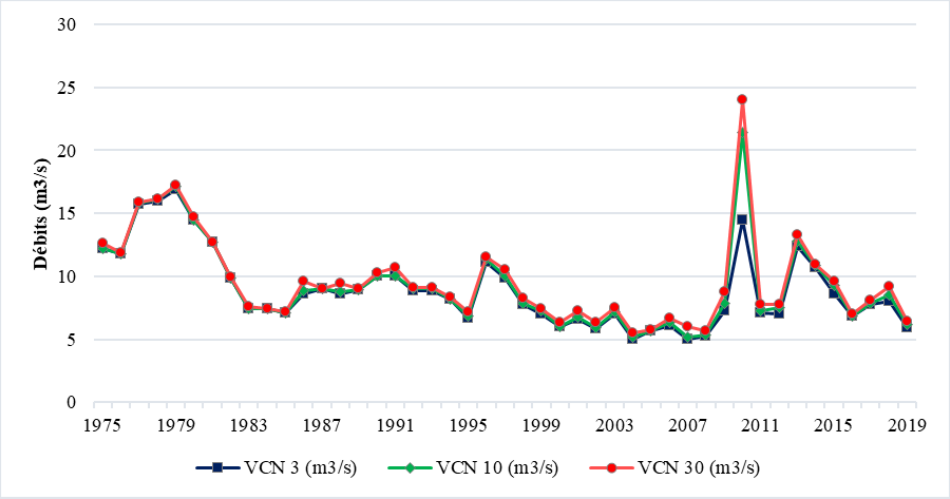


Figure 4.14 Variabilité des VCN retenues pour la station de Tarhat

Soulignons également la comparabilité des valeurs entre les VCN d'une part et les VCN et les QMNA d'autre part (Annexe 4.26 et 4.27). Le coefficient de détermination R^2 dépasse 0,85 pour toutes les stations entre les VCN. En revanche, le R^2 entre les VCN et les QMNA est considéré comme satisfaisant pour les stations d'Aval El Héri de Taghzoute et de Tarhat, mais insatisfaisant pour les deux autres stations, atteignant des minimums pour la station de Tamchachat avec 0,46.

Le calcul des débits fréquentiels d'étiage à partir des VCN 3, 5 et 10 a été réalisé en choisissant les lois les plus appropriées pour chaque cas (Annexe 4.28). Dans un contexte climatique semi-aride, les débits fréquentiels des stations du HaB-OER présentent une grande stabilité en période d'étiage (Tab. 4.12). Ainsi, l'utilisation du QMNA semble être représentative pour caractériser les débits de référence d'étiage au Maroc. En effet, si l'on souhaite comparer le QMNA(5) aux indices VCN3(5) et VCN10(5), qui sont également utiles pour la gestion des ressources (Garcia, 2016), les résultats ne présentent pas de différences significatives. Ils correspondent respectivement à la station de Tarhat : 11,2 m³/s, 11 m³/s et 11,3 m³/s.

Tableau 4.12 Périodes de retour des VCN3, 10 et 30 aux stations du HaB-OER

Fréquence		**1/100**	**1/50**	**1/20**	**1/10**	**1/5**	**1/2**	**1/5**	**1/10**	**1/20**	**1/50**	**1/100**
Période de retour (ans)		100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100
Aval El Héri	VCN3	0.31	0.35	0.41	0.49	0.59	0.86	1.22	1.46	1.68	1.98	2.2
	VCN10	0.31	0.35	0.41	0.5	0.6	0.88	1.25	1.49	1.72	2.02	2.24
	VCN30	0.35	0.38	0.42	0.51	0.61	0.92	1.3	1.55	1.78	2.09	2.33
C. n'Amellah	VCN3	0.32	0.39	0.5	0.6	0.8	1.4	2.14	2.63	3.1	3.71	4.17
	VCN10	0.34	0.4	0.5	0.6	0.8	1.41	2.17	2.66	3.14	3.76	4.22
	VCN30	0.36	0.4	0.5	0.63	0.82	1.47	2.26	2.77	3.27	3.91	4.40
Taghzoute	VCN3	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.15	0.29	0.42	0.56	0.79	0.98
	VCN10	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.15	0.3	0.43	0.58	0.8	1
	VCN30	0.03	0.03	0.05	0.06	0.09	0.17	0.32	0.45	0.59	0.81	1
Tamchachat	VCN3	0.008	0.01	0.015	0.02	0.03	0.06	0.13	0.2	0.27	0.39	0.49
	VCN10	0.008	0.01	0.015	0.02	0.03	0.07	0.14	0.21	0.28	0.41	0.52
	VCN30	0.01	0.012	0.02	0.022	0.035	0.07	0.15	0.23	0.31	0.44	0.56
Tarhat	VCN3	4.1	4.4	5	5.6	6.5	8.42	11	12.6	14.2	16.3	17.9
	VCN10	4.1	4.4	5.1	5.8	6.7	8.65	11.3	13.1	14.8	17	18.6
	VCN30	4.4	4.7	5.3	6	7	8.63	11.5	14	16.8	21.3	25.4

4.4.1 Tarissement des débits des cours d'eau

4.4.1.1 La réserve régulatrice : une ressource à prendre en considération

La réserve régulatrice, notion introduite par Castany (1982), correspond au volume d'eau souterrain renouvelable dans les conditions climatiques de la période considérée (A. Qadem *et al*., 2023). Étant donné que, pendant les périodes d'étiage, les débits des cours d'eau dépendent principalement de la vidange des réserves aquifères, cet apport peut être analysé à partir du phénomène de tarissement (Gischer *et al*., 2012).

Le tarissement est "la phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorique et d'intervention humaine" (Dacharry, 1997). La règle de succession des débits moyens journaliers décroissants est décrite par le coefficient de tarissement. Dans le cas de la loi la plus couramment utilisée, la loi de Maillet (Équ. 4.1), le coefficient de tarissement correspond à la raison d'une suite géométrique, dont la transformation logarithmique des débits se traduit par une linéarisation de la décroissance (Lang & Gille, 2006). Par conséquent, ce coefficient renferme des informations concernant le stockage et les caractéristiques des aquifères (L. M. Tallaksen, 1995). Elle représente le volume d'eau vidangé des nappes en régime non-influencé au fil du temps.

$$Qt = Q_0 . e^{-\alpha t} \qquad \textit{(Équation 4.1)}$$

avec :
Qt : le débit (m^3/s) ;
Q_0 : le débit initial à l'origine des temps t_0 (m^3/s) ;
t : le temps (s) ;
α : le coefficient de tarissement.

L'estimation des réserves en eau souterraine régulatrices repose sur les phases hydrologiques qui ne sont pas directement influencées par les précipitations, répondant au critère du tarissement. Ces phases se caractérisent par des débits correspondant à la vidange des aquifères peu profonds. Tout l'enjeu de cette quantification à partir des hydrogrammes journaliers réside dans la bonne formulation du tarissement et dans la séparation de celui-ci en débit de ruissellement et débit de base (Lebaut *et al*., 2021). Pour calculer la réserve régulatrice, le choix s'est porté sur la formule suivante :

$$V = {Q_0}/{\alpha} \qquad \textit{(Équation 4.2)}$$

avec :
Q_0 : le débit au début du tarissement ;
α : le coefficient de tarissement.

4.4.1.2 Extraction des phases de tarissements

a. Homogénéisation des résultats de tarissement par l'extraction automatisée

L'analyse des épisodes de tarissement permet d'appréhender l'apport provenant des nappes, et le rythme de vidange des réservoirs souterrains (Lang & Gille, 2006). Cependant, cette analyse est confrontée à la difficulté de sélectionner les épisodes de tarissement, qu'ils comprennent de légères précipitations (méthode des courbes enveloppes) ou qu'ils se limitent à de courtes périodes de "tarissement pur" (méthode des courbes séquences) (Lang, 2007). Afin de garantir l'homogénéité de la sélection des épisodes, une procédure automatique d'extraction des phases de tarissement a été mise en place (Fig. 4.15). L'algorithme de cette approche repose sur un ensemble de critère (seuil de précipitations significatives, durée minimale des phases de tarissement, temps de ressuyage, etc.) pour extraire les courbes de séquence, une méthode plus rigoureuse, objective et conforme à la définition du tarissement est utilisée, et l'identification de leurs caractéristiques (Lang, 2007).

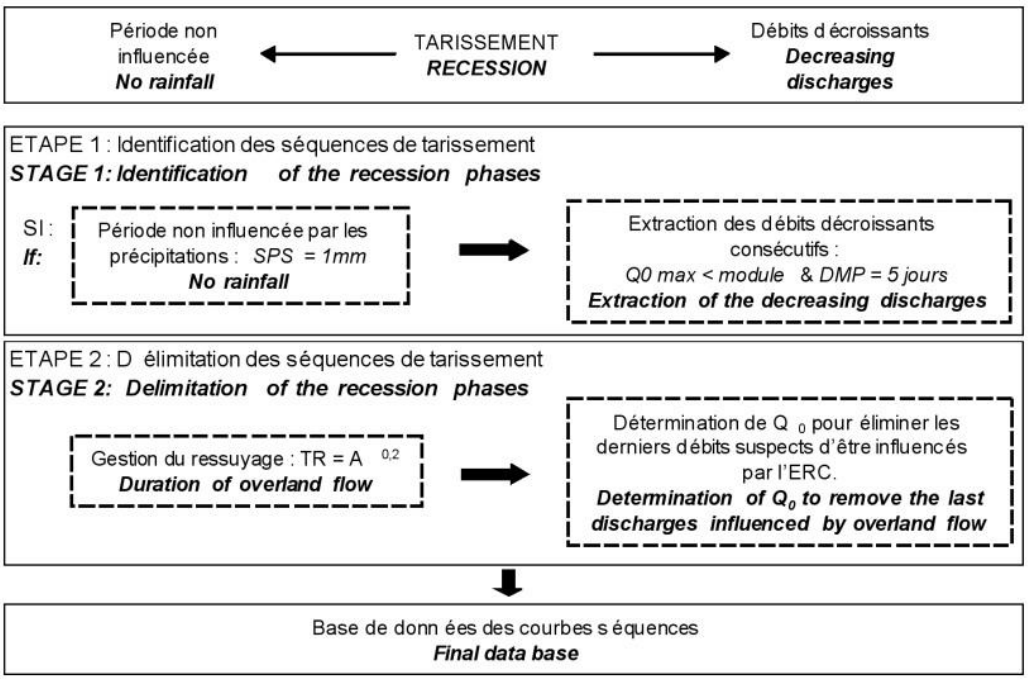


Figure 4.15 ALgorithme d'Extraction des Courbes Séquences (ALECS) (Lang & Gille, 2006)

b. Paramétrisation de l'algorithme

A l'échelle du HaB-OER, l'extraction des épisodes de tarissement a été effectuée automatiquement en utilisant l'algorithme développé par Lang & Gille (2006). Cet algorithme a été appliqué aux débits journaliers de toutes les stations du HaB-OER sur la période de 1975-76 à 2018-19, en prenant en considération les critères spécifiques à chaque sous-bassin, tels que décrits par Lang (2007) :

✓ Seuil de Q_0, débit débutant la phase de tarissement "Q_0 max" :
Ce processus vise à exclure toutes les périodes où le débit dépasse la valeur du module. Selon plusieurs auteurs, tels que Gamez & Zumstein (1993), il ont supposé que dans une série de débits journaliers "Qmj" classés, la limite entre les débits causés par le ruissellement et ceux induits uniquement par la vidange des nappes est représentée par le débit modal. Compte tenu de la distribution dissymétrique des Qmj, ce débit marquant le début de la phase de tarissement, comme l'ont fait Qadem (2015) et Lebaut *et al*. (2021), a été déterminé à partir de la loi de Fréchet (Annexe 4.29).

✓ Seuil de Précipitations Significatives "SPS" :
En dessous d'un seuil déterminé, les précipitations ne sont pas capables d'avoir un impact sur l'écoulement. Dans ce contexte climatique régional, nous avons adopté le seuil de 5mm, déjà établi par Ghadbane (2022) dans ses études sur les étiages dans le bassin de Serou ;

✓ Durée Minimum de la Phase de tarissement "DMP" :
Afin de supprimer les phases trop courtes, la durée minimum a été fixée à 5 jours ;

✓ Introduction d'un délai relatif au Temps de Ressuyage "TR" :
Afin d'écarter les débits susceptibles d'être influencés par de l'eau de ressuyage, il faut introduire un délai entre la fin de la pluie significative et la sélection de Q_0. Parmi les formules empiriques existe pour définir la durée de ressuyage, celle de Mau & Winter (1997) est couramment utilisée, elle liant la surface du bassin versant à la durée nécessaire pour que le ressuage cesse : $T = A^{0,2}$ (A : surface du bassin en Km²).

4.4.1.3 Débit initial "Q_0" et coefficients de tarissement "α"

Sur la période considérée, une moyenne de 144 phases de tarissements supérieures à 5 j ont été individualisées par stations au niveau du HaB-OER ; celle-ci varie entre 56 épisodes à Tamchachat et 253 épisodes à Chacha n'Amellah. Parmi ces épisodes, 38% ont été enregistrés en MAM et notamment en mai (Annexe 4.30), tandis que JJA, DJF et SON ont respectivement enregistré 24%, 21% et 17%. La durée moyenne par épisodes varie entre 6,7 j à Taghzoute et 9,2 j à Chacha n'Amellah. Cette dernière a même enregistré une durée maximal "record" de 75j, débutant en juin 2004. Le débit initial Q_0, contrôlé en respectant la double condition du temps de ressuyage et d'être inférieur à celui déterminer par la loi de Fréchet, varie de 0,4 m³/s pour la station de Tamchachat à 11,4 m³/s pour la station de Tarhat (Tab. 4.13).

Concernant les coefficients de tarissement "α", malgré les précautions prises pour une sélection rigoureuse des phases de tarissement, ils ne sont pas constants dans le temps et présentent des variations significatives, que ce soit d'une année à l'autre ou d'un mois à l'autre (Annexe 4.31 et 4.32). Les valeurs moyennes annuelles du coefficient "α" varient de 0,03 pour les stations d'Aval El Héri et Tarhat à 0,11 pour Tamchachat, avec un coefficient de variation dépassant 37% pour l'ensemble des stations (Tab. 4.13). Cette variabilité temporelle des coefficients "α" a déjà été mise en évidence dans des recherches portant sur le tarissement des cours d'eau du Moyen Atlas

(A. Qadem, 2015; Ghadbane, 2022). Elle est causée par de nombreux facteurs, tels que l'évapotranspiration, la distribution inégale des précipitations, la présence de plusieurs aquifères et l'hétérogénéité lithologique (Lebaut *et al*., 2021).

Afin de remédier à cette variabilité et d'obtenir un coefficient de tarissement "α moyen", on a élaboré une "courbe maîtresse de tarissement" qui utilise l'ensemble des phases de tarissement définies à partir des chroniques de Qmj. Pour ce faire, on a appliqué la méthode des corrélations, qui permet de déterminer la pente moyenne d'un épisode de tarissement particulier (L. Tallaksen & Lanen, 2004), ou de calculer un rapport αt en corrélant les débits Q_0 et Q à t jours (Q_t) pour chaque phase observée. Le principe consiste à organiser le nuage de points (Q_t, Q_t +dt) de manière à tracer une droite de régression, dont le coefficient de tarissement α est exprimé par la relation suivante :

$$K = exp(-\alpha) = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{1/t} \qquad \textit{(Équation 4.3)}$$

La démarche présentée pour l'élaboration de cette courbe utilise le principe appliqué par Lebaut (2000) en répétant les corrélations pour toutes les valeurs de t, de 1 jour à t max (durée maximale en jours). Cependant, les rapports calculés ont été arrêtés à 10 j, car au-delà de cette période, l'échantillon devient insuffisant pour obtenir une moyenne représentative, comme l'a souligné Lang (2007). La méthode des corrélations renvoie des coefficients α maître de l'ordre de 0,06 pour l'ensemble des stations, à l'exception de celle de Tamchachat qui atteint 0,2, ce qui est en accord avec des formations aquifères à "perméabilité de fissures" (Tab. 4.13, Fig. 4.16 et Annexe 4.33). Le coefficient α élevé de Tamchachat reflète un tarissement rapide, attribuable à l'abondance de formations calcaires karstiques. En revanche, les faibles coefficients α illustrent le rôle du soutien des sources dans les débits des cours d'eau du HaB-OER.

Tableau 4.13 Caractéristiques des phases de tarissement retenues

Station	Nombre des phases	Durée Max (j)	Moy (j) / épisode	Q_0 (m^3/s)	α moy	CV (%)	α maître	R^2
Ava	204	25	8,5	1,5	0,03	57	0,04	0,98
Cha	253	75	9,2	3,77	0,05	41	0,05	0.99
Tag	120	17	6,7	0,44	0,08	37	0,08	0,97
Tam	56	32	7,7	0,36	0,11	41	0,2	0,9
Tar	87	36	7,6	11,37	0,03	51	0,07	0,96

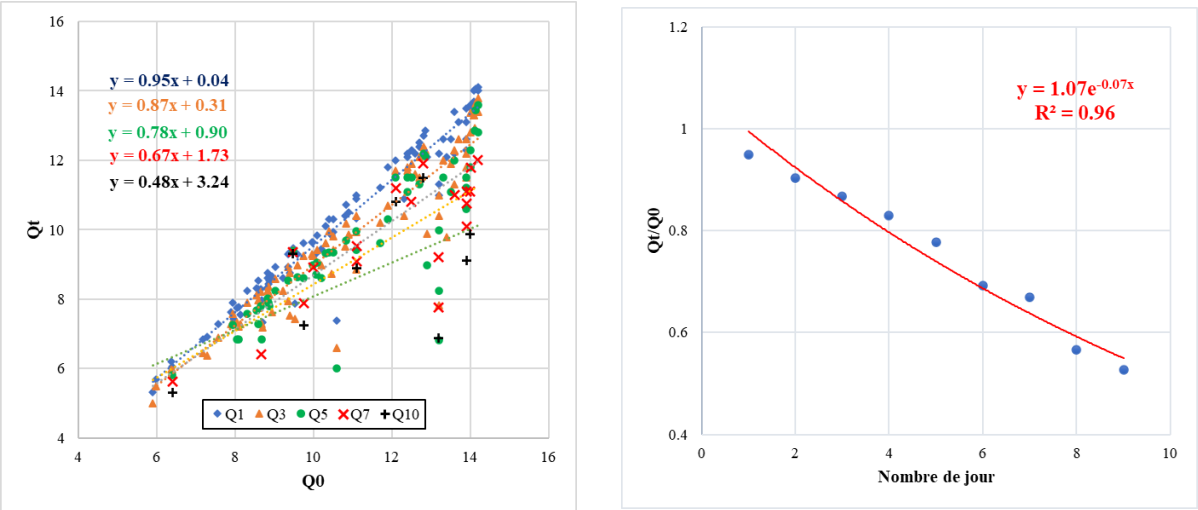


Figure 4.16 Résultats de l'application de la méthode des corrélations pour la station de Tarhat

Afin de nuancer les valeurs du coefficient "α" en fonction des saisons, et donc en fonction du remplissage des aquifères, la méthode "matching strip : MSM" a été appliquée sur l'ensemble des stations du HaB-OER (Fig. 4.17 et les Annexes 4.34, 4.35, 4.36 et 4.37). Cette méthode consiste à exprimer les débits de la phase de tarissement en "LnQ" de manière à former une droite (Lebaut, 2000). Ensuite, la méthode implique de juxtaposer tous les épisodes jusqu'à ce qu'ils forment une seule droite (Toebes & Strang, 1964). Le coefficient α de Maillet est calculé en ajustant une courbe de forme exponentielle à l'ensemble des phases.

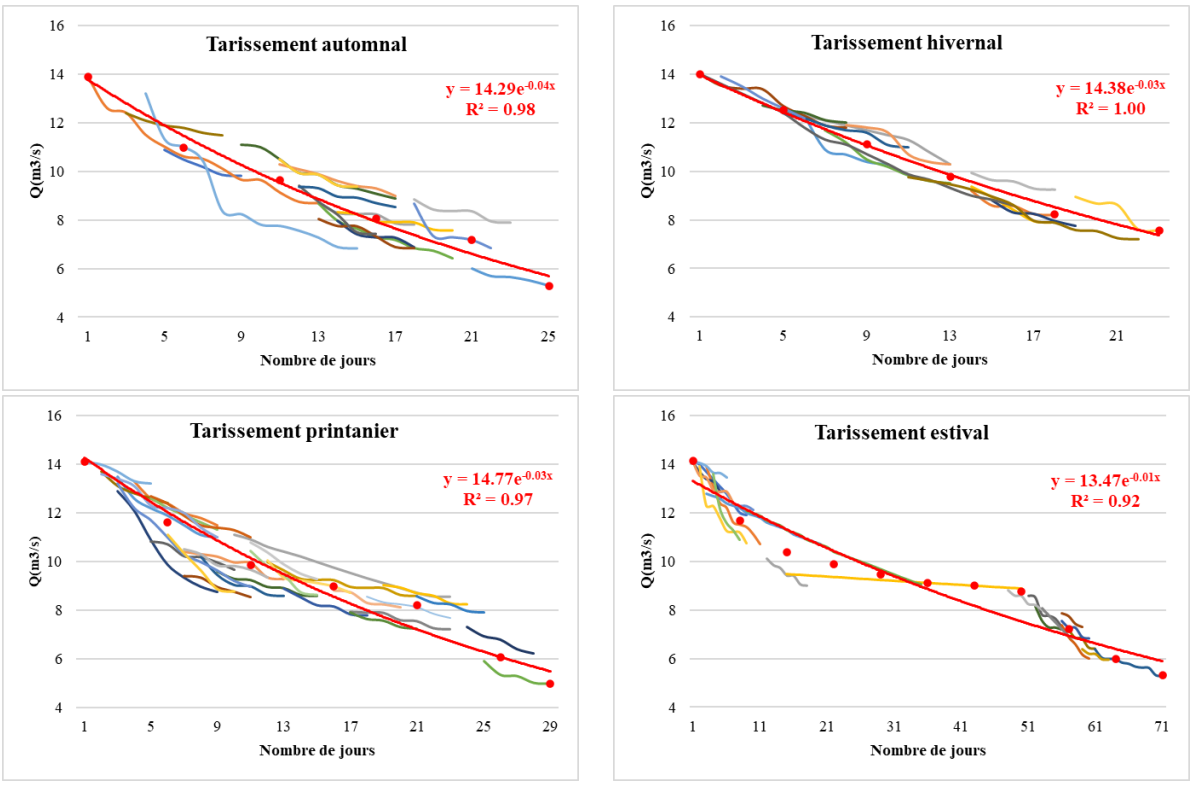


Figure 4.17 Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode "MSM" pour la station de Tarhat

À l'échelle saisonnière, le phénomène de tarissement dans le HaB-OER ne présente pas de grandes différences entre les saisons, à l'exception d'une augmentation pendant l'automne, avec un coefficient α moyen d'environ 0,08, contrairement aux autres saisons où ce coefficient est d'environ 0,05 (Tab. 4.14). Cette augmentation du coefficient de tarissement observée en automne indique que les débits des cours d'eau du HaB-OER diminuent plus rapidement en réponse à des prélèvements d'eau associés au début de la saison agricole.

Quant aux moyennes annuelles des coefficients α issues de la méthode "MSM" pour l'ensemble des stations, elles confirment les résultats précédemment obtenus, en particulier les coefficients α moyens.

Tableau 4.14 Résultats des coefficients de tarissement saisonniers moyens d'après la méthode "MSM" pour les stations du HaB-OER

	Automne		Hiver		Printemps		Eté		α Moy annuel
	α	R^2	α	R^2	α	R^2	α	R^2	
Ava	0.03	0.99	0.02	0.98	0.03	0.98	0.02	0.97	0.03
Cha	0.06	0.94	0.03	0.97	0.05	0.99	0.03	0.95	0.04
Tag	0.08	0.98	0.08	0.99	0.07	0.98	0.06	0.99	0.07
Tam	0.17	0.93	0.11	0.99	0.09	0.99	0.12	0.99	0.12
Tar	0.04	0.98	0.03	1	0.03	0.97	0.01	0.92	0.03

4.4.1.4 Réserves en eau régulatrices

Les volumes annuels moyens présentent des variations spatiales d'une station à l'autre, ainsi que des variations temporelles d'une année à l'autre. En ce qui concerne l'échelle spatiale, les volumes annuels moyens de la réserve régulatrice varient significativement, allant de 3,6 hm^3 pour le sous-bassin de Taghzoute à 498 hm^3 pour le sous-bassin de Tarhat (Tab. 4.15). En ce qui concerne l'échelle temporelle, la variabilité annuelle des réserves se révèle relativement élevée, se traduisant par des coefficients de variation d'environ 50% pour l'ensemble des stations du HaB-OER (Annexe 4.38 et 4.39). Les minimums sont enregistrés pendant les années 1994-95 et 2007-08, inclus dans la période sèche qui a commencé en 1980 (Chap. 3).

La variabilité des volumes de la ressource régulatrice de la station de Tarhat, présentée dans la figure 4.18.a, est en accord avec la nature calcaire complexe des aquifères du Moyen Atlas marocain, ce qui implique des transferts d'eau entre les bassins voisins. Le bassin versant contigu de l'oued Guigou draine environ 1020 km^2 de karst vers les sources de l'Oum Er Rbia. Ces nombreuses sources à forts débits alimentent en permanence le sous-bassin de l'Oum Er Rbia.

À l'échelle mensuelle, la variabilité est moins marquée, et les volumes de la réserve régulatrice restent quasiment constants autour de 380 hm^3, avec un coefficient de variation ne dépassant pas 18 %. Cette contribution reste inférieure à la valeur de 400 hm^3 jusqu'au mois de février, où elle augmente pour atteindre un maximum de 535 hm^3, puis diminue à nouveau, mais avec des valeurs plus élevées qu'avant (Fig. 4.18.b). Ces observations confirment l'importance des sources et de la relative inertie des nappes des calcaires dans la stabilité des débits de l'Oum Er Rbia pendant la période d'étiage.

Tableau 4.15 Volume (hm^3) de la réserve régulatrice dans le HaB-OER

	V (hm^3)	Min	Année	Max	Année	ET	CV
Ava	58.2	10.8	2007-08	234.5	1978-79	39.3	67
Cha	97.2	34.2	1994-95	207.4	1978-79	44.6	46
Tag	5.8	2.2	1994-95	13.3	2003-04	2.8	47
Tam	3.6	0.6	2007-08	8.9	1990-91	1.8	51
Tar	498.4	143.2	2007-08	1256.4	1989-90	241.2	48

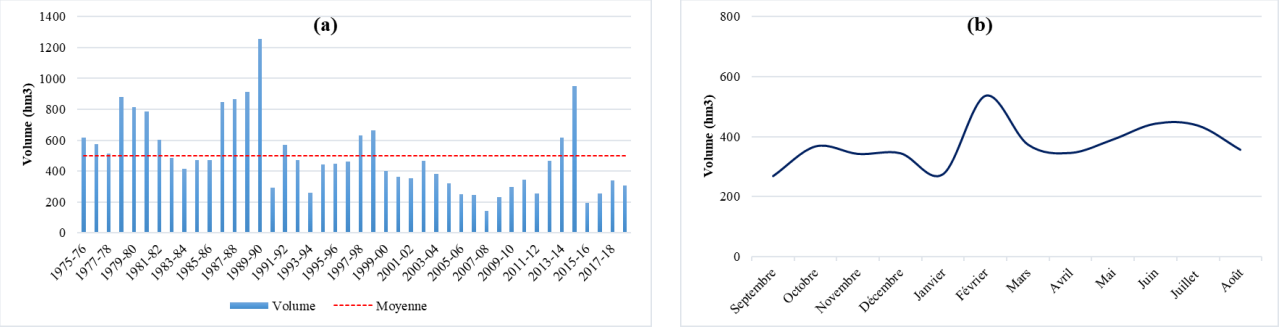


Figure 4.18 Les ressources régulatrices (a) annuelle et (b) mensuelle moyenne à la station de Tarhat

Récemment, une diminution des ressources en eau a été observée dans presque toutes les régions du Maroc, en particulier dans les bassins de l'Oum Er Rbia, de Souss-Massa, de Tensift et de la Moulouya (IRES, 2020). Depuis 2015-16, une forte diminution des ressources en eau souterraine est constatée dans la plupart des sous-bassins du HaB-OER. Les réductions les plus significatives sont observées dans les sous-bassins d'Aval El Héri et de Chacha n'Amellah, avec une réduction atteignant les 3/4 par rapport aux moyennes enregistrées entre 1975-76 et 1979-80.

4.5 Mise en place d'un réseau hydrométrique complémentaire au réseau institutionnel

4.5.1 Intérêt du suivi de l'organisation spatiale de la ressource en eau

Pour une gestion efficace des ressources en eau, il est essentiel de prendre en compte certaines informations, notamment une compréhension précise et spécifique de leur emplacement. Cependant, les données fournies par les stations hydrométriques d'un réseau institutionnel ne sont pas toujours représentatives, car ces stations surveillent généralement des bassins de grande envergure, négligeant ainsi les spécificités spatiales de ces ressources. Pour combler cette lacune en matière de données spatiales, la mise en œuvre d'un dispositif de mesure s'est avérée particulièrement intéressante. Afin de mieux appréhender les variations spatio-temporelles des processus hydrologiques souterrains et de surface, notre travail vise à produire des données hydrologiques à une échelle appropriée, reflétant de manière fidèle un environnement homogène, communément désigné comme un bassin versant unitaire.

4.5.2 Mise en œuvre du dispositif de mesure sur des bassins homogènes

4.5.2.1 Éléments d'hydrométrie

L'hydrométrie, qui englobe l'ensemble des techniques de mesure des débits des cours d'eau, revêt une importance fondamentale pour l'hydrologie (Bois, 2000). Elle constitue une discipline distincte mais complémentaire de l'hydrologie (la science de l'eau dans son environnement naturel) et de l'hydraulique (la physique des écoulements) et se consacre à la mesure des débits des rivières (Lallement, 2017). Dans certaines études, il est nécessaire d'effectuer des mesures instantanées de ces débits, ce qui implique la réalisation de jaugeages à des moments précis. Cependant, dans la plupart des cas, ce qui nous intéresse, c'est l'évolution des débits au fil du temps, ce qui conduit à la mise en place de stations hydrométriques (Laborde, 2009).

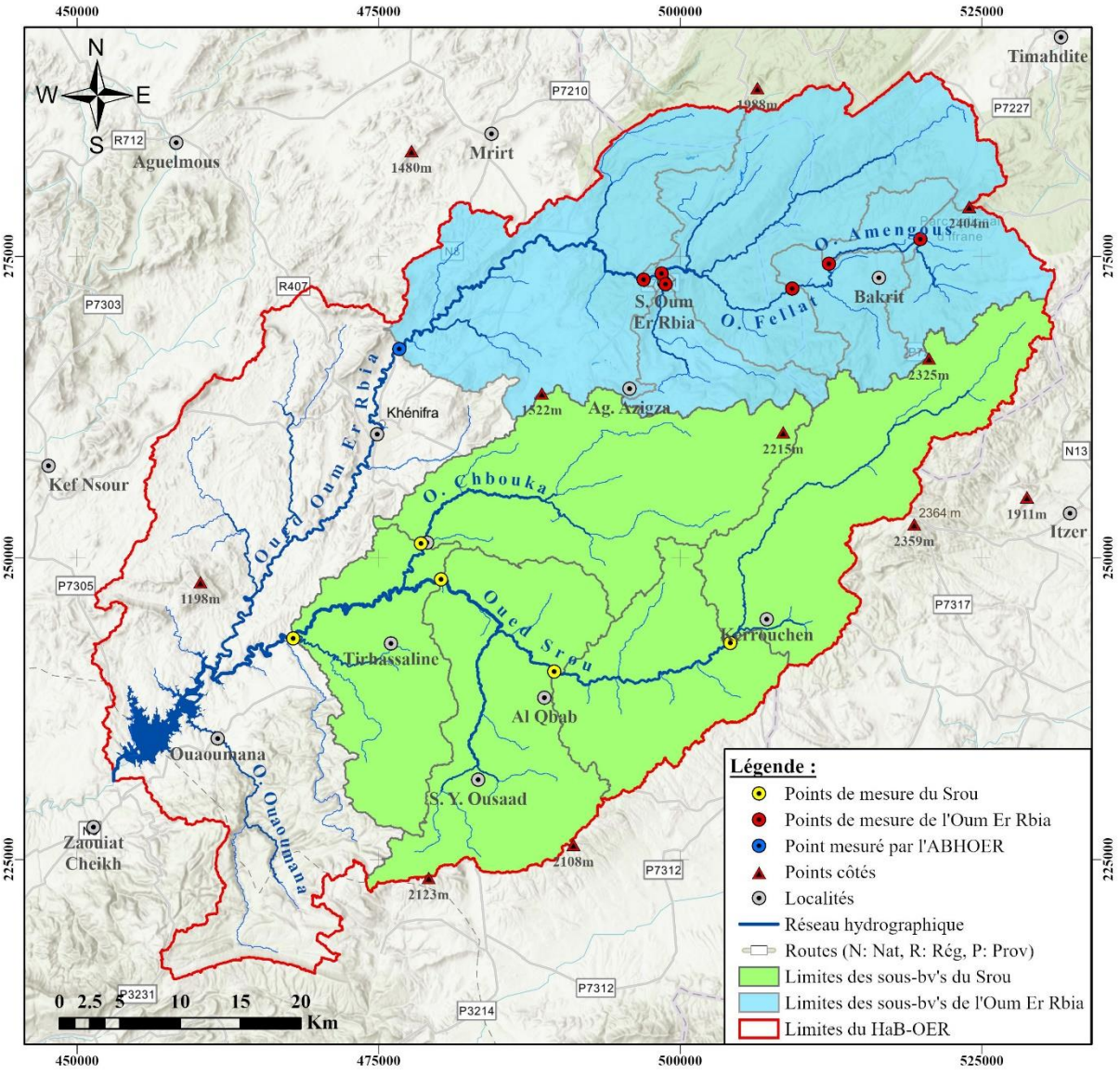
Ces stations sont conçues pour mesurer deux paramètres essentiels : la cote de la surface d'eau libre (h) et le débit du cours d'eau (Q). Étant donné que le débit d'une rivière varie continuellement, l'étude des régimes hydrologiques nécessite de disposer de données précises à chaque instant. Comme il serait très coûteux de faire à chaque observation une mesure de débit par exploration du champ des vitesses, on établit donc empiriquement une relation entre la cote de l'eau dans la rivière et le débit (M. Roche, 1963). L'idée consiste à réaliser une série de mesures ponctuelles pour obtenir simultanément des valeurs précises de la cote (h) et du débit (Q) (Bennis, 2009). Ces données couvrent généralement toute la gamme, depuis le débit minimal en période d'étiage annuel jusqu'au débit maximal en période de crue annuelle (P.-A. Roche *et al*., 2012a).

À partir de ces données, on construit la courbe de tarage, qui relie la hauteur d'eau au débit, pour un site donné et une période donnée (Rousselle, 1998). De la mesure des hauteurs d'eau au calcul des débits, tout le processus de l'hydrométrie repose sur l'établissement et la gestion de ces courbes de tarage.

4.5.2.2 Définition et mise en place du réseau hydrométrique en rivière

Pour définir un site idéal pour les mesures hydrométriques le long d'un cours d'eau donné, le choix doit se baser sur les critères de l'OMM (1994), notamment : le lit doit être rectiligne, exempt de végétation aquatique, à l'abri des risques d'affouillement et de comblement, l'écoulement doit être concentré dans un seul chenal et facilement accessible. Étant donné que l'on trouve rarement un site parfaitement idéal, le choix se porte parmi les sites possibles en fonction de leur adéquation.

Notre choix de sites de mesure s'est centré sur la moitié nord du HaB-OER en amont de la station de Tarhat, où l'influence des sources de l'Oum Er Rbia est prépondérante. En raison de l'étendue considérable de la zone d'étude et des contraintes matérielles, on a opté pour l'utilisation des débits mesurés par Omar *et al*. (2020) des cours d'eau de la moitié sud du HaB-OER, à savoir l'Oued Srou et Chbouka (Carte 4.1) en complément des nôtres. Inclure ces données dans notre analyse est d'autant plus pertinent que les conditions hydrologiques entre les années 2018-19, lorsqu'on a lancé nos campagnes de mesure, et 2016-17, pour lesquelles nous disposons de données hydrométriques de ladite étude, sont très similaires. En effet, les débits annuels enregistrés à la station d'Aval El Héri (O. Chbouka) pour ces deux années s'élèvent respectivement à 1,77 m^3/s et 2,04 m^3/s, tandis qu'à la station de Chacha n'Amellah (O. Srou), ils sont identiques et atteignent 4,8 m^3/s (Chap.3).



Carte 4.1 points de mesure choisis pour le jaugeage

Pour établir la relation entre la hauteur et le débit des six sites sélectionnés sur l'Oum Er Rbia et ses affluents, l'implantation des échelles limnimétriques ainsi que des mesures périodiques de débits sont nécessaires. Il convient de noter qu'un de ces points est dédié aux mesures de débit de l'Oum Er Rbia en aval des sources, sans qu'une échelle ne soit installée.

La mesure des hauteurs a longtemps consisté en des lectures visuelles effectuées sur des échelles graduées. Ces échelles dites "limnimétriques" sont des plaques graduées en métal émaillé, en

bois, en ciment ou en pierre, installées de manière à ce que leur extrémité inférieure soit toujours immergée, même lors des étiages les plus sévères (M. Roche, 1963). En général, la tôle émaillée est la plus couramment utilisée (Ph. 4.1 et 4.2). Pour des raisons pratiques, et afin de prévenir tout retrait ou vol, des échelles limnimétriques mobiles ont été employées, avec des repères solidement fixés sur les sections répondant aux normes de l'OMM (1994).



Photo 4-1 Echelles limnimétriques installée dans l'amont de l'Oued Amengous (El Orfi, 2019)



Photo 4-2 Lecture de l'échelle limnimétriques installée sur l'Oued Amngous (El Orfi, 2019)

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour mesurer le débit instantané, le choix de la méthode dépendant des conditions propres à chaque site (OMM, 1994). Le jaugeage par "exploration du champ des vitesses" demeure la technique de mesure des débits des cours d'eau la plus courante, surtout pour les petits cours d'eau (Le Coz *et al*., 2014). Cette méthode consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section tout en mesurant la surface de la section mouillée. Les vitesses sont mesurées à l'aide d'un micro-moulinet, simultanément avec les profondeurs, en un ou plusieurs points le long de la verticale (Ph. 4.3 et 4.4). La mesure des largeurs, des profondeurs et des vitesses, lors des campagnes de jaugeage programmées entre juin 2019 et août 2020, permet de calculer le débit des cours d'eau au niveau des sites choisis.



Photo 4-3 Micro-moulinet de type OTT (El Orfi, 2019)



Photo 4-4 Mesure du débit de l'amont de l'Oued Fellat (El Orfi, 2019)

4.5.3 Exploration hydrologique pour mieux comprendre le HaB-OER

4.5.3.1 Courbes de tarage aux 5 sites

Les données des hauteurs d'eau et de débit mesurées entre 2019 et 2020 ont été ajustées pour prendre en considération la relation Q=f(h) au niveau des sites sélectionnés (Annexe 4.40 et 4.41). Par conséquent, des courbes de tarage ont été élaborées pour les sites équipés d'une échelle limnimétrique (Fig. 4.19). Ces courbes permettent, par une simple lecture du niveau d'eau sur l'échelle, d'estimer le débit d'un cours d'eau à un instant donné.

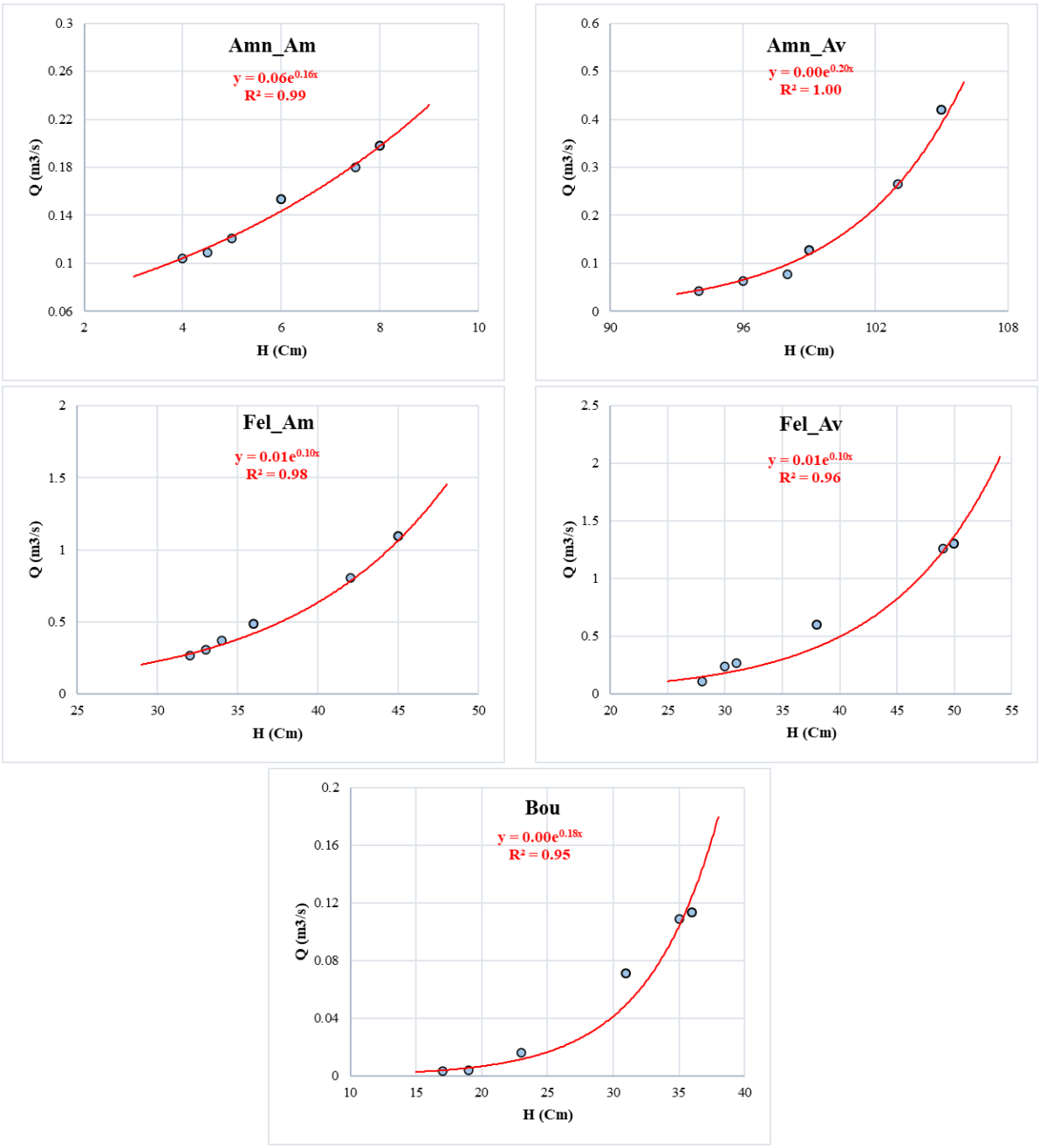


Figure 4.19 Courbes de tarage des sites équipés d'une échelle limnimétrique (2019-2020)

Le suivi de l'évolution de la courbe par d'autres campagnes de jaugeage est nécessaire pour vérifier sa validité dans le temps. L'attribution d'observateurs à chaque site devait permettre l'extraction de débits journaliers à partir desquels il était prévu de travailler notamment les courbes de tarissement. Cependant, les circonstances exceptionnelles liées au Covid-19 nous ont empêché de poursuivre cette dimension exploratoire des écoulements.

4.5.3.2 Profils hydrologiques et cartes de rendement

L'élaboration du profil hydrologique nécessite la réalisation de campagnes de mesure de débits en différents points de la rivière, couvrant différentes situations hydrologiques en période de basses eaux (François & Sary, 1994). L'analyse de ces profils hydrologiques, en tenant compte de la géologie des affleurements traversés par le cours d'eau, fournit des informations sur le rendement hydrologique des terrains (Lebaut, 2000). En période d'étiage non influencée par les précipitations, lorsque les profils hydrologiques sont parallèles, cela révèle une évolution homogène des débits dans l'espace et dans le temps (Arts & Sary, 2000).

La méthode des profils hydrologiques permet de valoriser les données mesurées dans le HaB-OER. Ainsi, des profils hydrologiques ont été établis pour l'Oum Er Rbia en amont de la station de Tarhat, avec six points de jaugeage répartis en amont et en aval des trois cours d'eau principaux : l'Amengous, le Fellat et l'Oum Er Rbia. Ces profils sont exprimés en débits spécifiques (l/s/km²) pour faire ressortir les contrastes entre les tronçons (Lebaut, 2000) (Fig. 4.20). Notons que les trois campagnes de jaugeages de l'OER_S nous ont grandement aidés à estimer la contribution des nappes à l'alimentation du cours d'eau principal pendant la période d'étiage. En effet, le complexe sourcier de l'Oum Er Rbia contribue à presque la totalité de l'écoulement de avec environ 9 m^3/s, ce qui confirme l'estimation de Loup, (1962).

En analysant les profils hydrologiques obtenus, on remarque une tendance similaire entre les différentes campagnes de jaugeages, ce qui peut traduire une stabilité hydrologique pendant la période d'étiage. Cependant, ces profils présentent également une grande variabilité spatiale, notamment des augmentations significatives entre l'Amn_Av et le Fel_Am d'une part, et le Fel_Av et l'OER_S d'autre part. Ces augmentations reflètent le contexte géologique karstique de la région et la présence abondante de sources alimentant ces cours d'eau. La deuxième augmentation se caractérise par une pente très prononcée, ce qui indique une contribution significative des sources, estimée à 14 l/s/km².

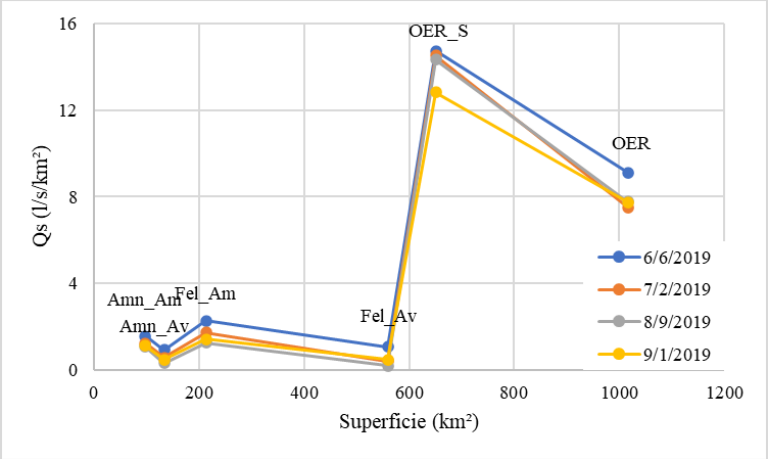
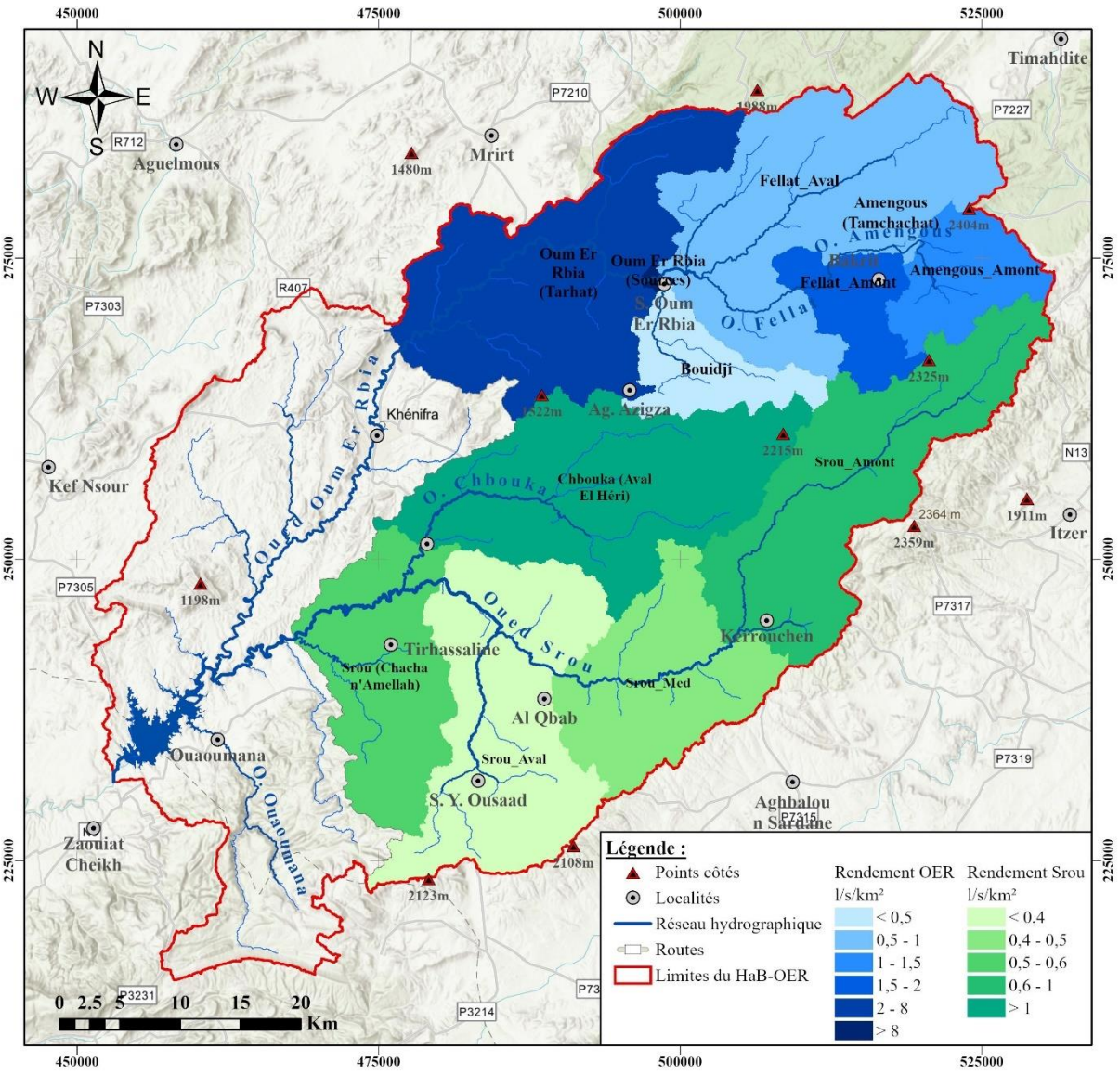


Figure 4.20 Profils hydrologiques en débits spécifiques au niveau de l'Oum Er Rbia en amont de Tarhat en 2019

Pour étendre l'analyse effectuée sur les profils hydrologiques à l'ensemble des bassins unitaires de la zone d'étude, il est possible de recourir à la représentation cartographique des débits (Lebaut, 2000). La cartographie hydrologique permet de représenter les données disponibles sur les débits et contribue à l'estimation quantitative des ressources en eau de surface, notamment pendant la période d'étiage (Zumstein, 1976).

La carte des rendements moyens (en l/s/km²) par bassins unitaires dans le HaB-OER révèle une grande disparité spatiale des ressources en eau (Carte 4.2). À l'échelle du HaB-OER, les sous-bassins de l'Oum Er Rbia se caractérisent par des débits spécifiques élevés, pouvant atteindre 14l/s/km², par rapport aux sous-bassins du Srou où ce débit atteint 3 l/s/km². Plus précisément, à l'échelle de l'Oum Er Rbia, le sous-bassin en aval des sources ainsi que celui en amont de la station de Tarhat présentent les débits les plus élevés, respectivement 14 l/s/km² et 8 l/s/km². À proximité, vers le sud, le sous-bassin de Chbouka enregistre le débit spécifique le plus élevé parmi ceux du Srou, atteignant 3 l/s/km² (Ghadbane, 2022). Les différents sous-bassins, constituant l'impluvium de l'Oum Er Rbia ont des productivités fort différentes et indépendantes de leur surface. L'essentiel du débit de l'oued principal est dû à l'apport important fourni par les sources de l'Oum Er Rbia (Khalil *et al.*, 2004).



Carte 4.2 Rendement hydrologique estival dans le bassin de l'Oum Er Rbia (2019) et le bassin de Srou (2017)

4.6 Conclusion

L'analyse des données hydrologiques révèle une forte variabilité temporelle étroitement liée aux précipitations. Cette hétérogénéité se manifeste également à l'échelle spatiale, où les débits spécifiques sont trois fois plus élevés dans le sous-bassin de l'Oum Er Rbia que dans les sous-bassins de Srou.

La gestion de cette ressource rare est un défi majeur en raison de l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations et des effets des changements climatiques. Pour y faire face, la construction de grands barrages pour le stockage des apports pendant les années humides est essentielle. Depuis 2001, le barrage d'AEH reçoit un volume annuel moyen de 760 hm^3, dont 128 hm^3 proviennent des crues, représentant environ 17% du total. Trois sous-bassins alimentent en permanence le barrage : le sous-bassin d'Oum Er Rbia (st. de Tarhat), y compris Amengous, est le plus important avec un volume annuel moyen de 500 hm^3, soit 66% des apports. Il est suivi par le sous-bassin de Srou (st. de Chacha n'Amellah), incluant Chbouka, avec un volume annuel moyen de 229 hm^3, représentant 30 % des apports, et enfin le sous-bassin d'Ouaoumana (st. de Taghzoute) avec un volume annuel moyen de 31 hm^3, soit 4% des apports.

L'approche adoptée pour étudier les phases de tarissement dans ces trois sous-bassins a permis de caractériser le comportement des aquifères en période de vidange grâce au coefficient de tarissement α de Maillet. Cette démarche permet de quantifier les réserves en eau souterraine, montrant que les volumes annuels moyens de la réserve régulatrice sont de 3,6 hm^3 pour le sous-bassin de Ouaoumana, 97,2 hm^3 pour le sous-bassin de Srou, et 498 hm^3 pour le sous-bassin de l'Oum Er Rbia. Ces chiffres mettent en lumière l'importance de la contribution des nappes souterraines à l'alimentation des cours d'eau du HaB-OER.

Les campagnes de jaugeage effectuées entre 2019 et 2020 nous ont permis de recueillir des données précises sur les débits d'eau dans les principaux cours d'eau de l'Oum Er Rbia en amont de la station de Tarhat. En suivant l'évolution des débits, nous avons pu avoir une compréhension approfondie des ressources en eau du HaB-OER, notamment grâce à l'élaboration de profils hydrologiques et de cartes de rendement qui ont mis en évidence l'importance des sources dans cette zone. De plus, ces campagnes nous ont également révélé la richesse du HaB-OER en d'autres ressources, justifiant ainsi des études plus approfondies, notamment concernant les lacs.

Chapitre 5 : Suivi et analyse de l'évolution des lacs et des sources du HaB-OER

5.1 Introduction

En plus des rivières, le château d'eau du Maroc est considéré comme la montagne nord-africaine la plus riche en zones humides, notamment en lacs naturels et sources (Chillasse & Dakki, 2004). Ces deux formes hydriques sont le résultat d'un processus complexe de karstification qui caractérise le HaB-OER, et elles peuvent être interconnectées. Les lacs sont des étendues d'eau stagnant dans les dépressions, tandis que les sources représentent des points d'émergence de l'eau souterraine à la surface. Ces dernières contribuent de manière significative à l'alimentation des cours d'eau du HaB-OER (Chap. 4). De plus, l'analyse des variations du débit de ces sources peut nous permettre d'obtenir des paramètres caractéristiques du réservoir aquifère (Daum, 1994). En effet, la mesure du débit des sources revêt une importance fondamentale dans les études visant à évaluer les ressources en eau.

Le Moyen Atlas abrite plusieurs lacs naturels dépourvus d'exutoire en surface, agissant comme des pluviomètres naturels très sensibles aux variations hydro-climatiques (Benkaddour *et al*., 2008). Ils peuvent être considérés comme des sentinelles des changements hydro-climatiques (Adallal *et al*., 2019). Ces plans d'eau sont le support d'une grande biodiversité floristique et faunistique et favorisent des activités économiques et de loisirs non négligeables dans cette région (Chillasse *et al*., 2001a). Cependant, au cours des quatre dernières décennies, le nombre et la superficie de ces zones humides ont sérieusement diminué (Chillasse & Dakki, 2004). L'impact du changement climatique, combiné à l'activité humaine, a engendré leur dégradation, l'assèchement des sols et la perte de biodiversité (Mleczko & Mróz, 2018).

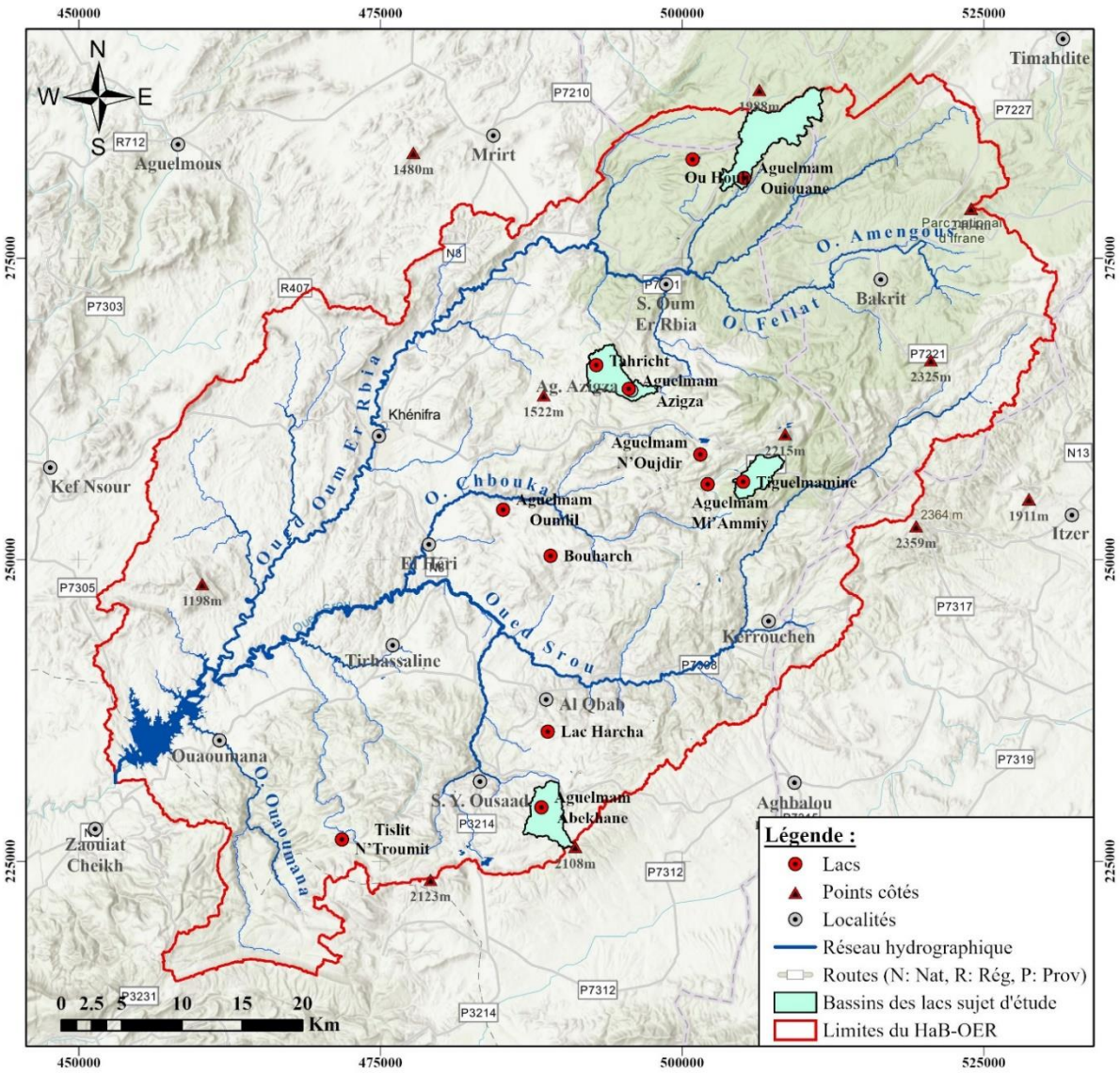
Des recherches récentes ont porté sur la relation entre les variations climatiques et les fluctuations de niveau de certains lacs moyens atlasiques (Sayad *et al*., 2011, 2012; Vidal *et al*., 2016; Mimoun *et al*., 2016; Adallal *et al*., 2019) mais aucune n'a encore abordé la variabilité des superficies/volumes d'un lac de cette région à l'échelle mensuelle sur les 40 dernières années. Notre objectif est d'étudier la réponse de certains lacs aux variations pluviométriques depuis les années 1980 en utilisant des images satellites Landsat, ce qui contribuera à améliorer notre compréhension hydrologique de cette région riche en ressources en eau.

5.2 Détection de la dynamique des étendues d'eau des principaux lacs du HaB-OER

5.2.1 Ecosystèmes limniques représentatifs du HaB-OER

L'Atlas marocain renferme un chapelet de lacs modestes et permanents "Daya ou Aguelamam" (Martin *et al*., 1964), dont le nombre est estimé à 40 selon les observations de Baali (1998) (in Detriche, 2007). L'origine des lacs moyen atlasique peut être attribuée soit à des creux topographiques de dissolution dans le calcaire, comme c'est le cas de l'Aguelmam Azigza (Carte. 5.1), soit à des cuvettes formées par des barrages volcaniques, comme l'Aguelmam Sidi Ali (Martin *et al*., 1964). Par conséquent, les divers facteurs responsables de leur formation influent sur leur répartition : ils se concentrent dans les régions où les précipitations sont les plus abondantes ou le long d'accidents tectoniques (Detriche, 2007).

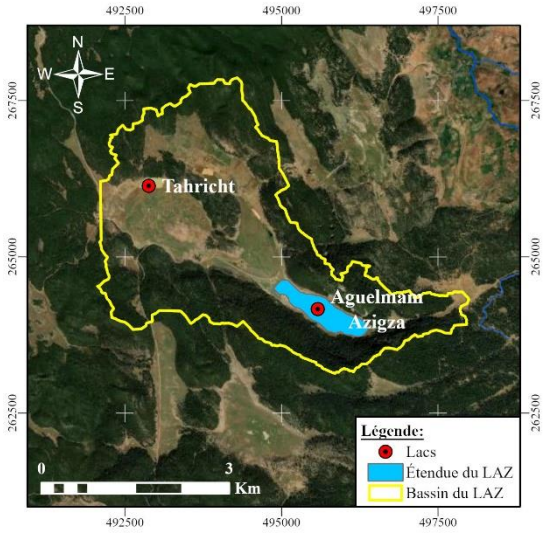
A l'échelle du HaB-OER, l'abondance de formations carbonatées liasiques fortement karstifiées, combinée à l'activité tectonique, a conduit à la création de cuvettes de tailles variées (Detriche, 2007). Ces cuvettes, principalement des dolines, sont souvent des sites propices à la formation de lacs, où l'existence et la dynamique de ces derniers sont étroitement liées aux fluctuations des nappes souterraines. Ces hydrosystèmes occupent des fonctions socio-économiques et écologiques très importantes à l'échelle du pays (Chillasse *et al*., 2001a), en particulier dans la province de Khenifra, qui abrite le plus grand nombre de lacs dans la zone d'action de l'ABHOER (2019). Dans les sections à suivre, nous nous concentrerons sur l'étude de quatre lacs que nous considérons représentatifs de la diversité spatiale du HaB-OER.



Carte 5.1 Localisation des principaux lacs à l'échelle du HaB-OER (ABHOER, 2019)

5.2.1.1 Lac d'Aguelmam Azigza

Le lac d'Aguelmam Azigza "LAZ" (Ph. 5.1) est situé au cœur du Moyen Atlas tabulaire (32°58′ N, 5°26′ O, 1570 m) et s'inscrit dans des formations calcaires et dolomitiques jurassiques reposant sur des argilites triasiques et des unités du socle paléozoïque (Lepoutre & Martin, 1967). Le LAZ, qui signifie le "lac vert" en Amazigh, est un lac de montagne naturel d'origine tectono-karstique (Adallal, 2019) qui occupe une profonde dépression allongée NO-SE (Benkaddour *et al*., 2008) environné de crêtes atteignant 1800 m. Le bassin versant du LAZ est de 13 Km², sa surface moyenne au miroir d'environ 30 ha, sa profondeur moyenne est de l'ordre de 26 m, sa profondeur maximale est d'environ 42 m (Carte 5.2). Sans exutoire de surface (Flower & Foster, 1992) son alimentation en eau est assurée par les précipitations (pluies et neiges), le ruissellement et les apports souterrains (Benkaddour *et al*., 2008). Selon le plan de la direction des Aires Protégées Marocaines (APM), le LAZ est classé en tant que patrimoine naturel "SCMN" et parmi les sites d'intérêt biologique et écologique "SIBE" avec un niveau de priorité de protection égale à 3 (Chillasse & Dakki, 2004).



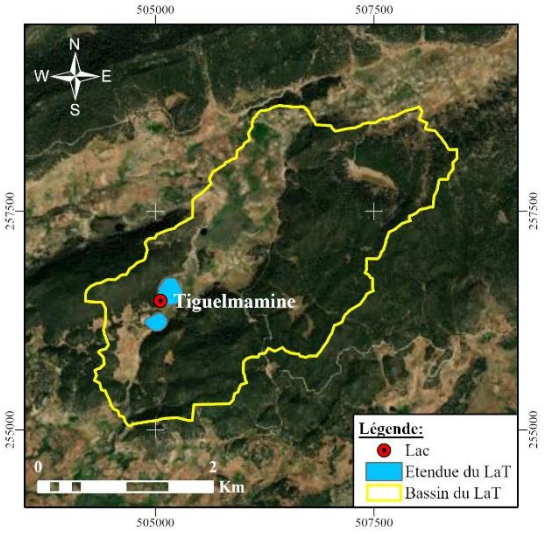
Carte 5.2 Bassin versant du LAZ



Photo 5-1 Lac d'Aguelmam Azigza (Ismoun N'aari, 2018)

5.2.1.2 Lacs de Tiglmamine

Vers le SE, les lacs de Tiglmamine "LaT" (Ph. 5.2) (32°54′ N, 5°20′ O, 1640 m), pluriel du terme berbère "Aguelmame", forment un ensemble de trois lacs juxtaposés, ne communiquant pas en surface et creusés dans les dolomies du Lias inférieur. Les LaT font partie d'un petit bassin versant d'environ 8 km² (Carte 5.3). Le lac au sud est plus profond (20 m), celui au centre comporte une partie profonde (18 m) et une autre marécageuse et le dernier au nord est le plus petit (Chillasse *et al*., 2001b). L'alimentation de ces lacs est assurée par des sources et par le ruissellement hivernal, qui déborde vers le sud à travers le lac voisin (Lamb & van der Kaars, 1995). Durant les périodes de basses eaux, les trois lacs sont clairement délimités, mais en période de hautes eaux, ils communiquent entre eux par des zones marécageuses (Soulié-Märsche *et al*., 2008). En cas de fortes précipitations, les lacs et les marécages débordent, et l'excès d'eau est évacué vers le sud par un exutoire pour rejoindre l'oued Chbouka. Les deux lacs permanents présentent une forme circulaire, ce qui leur vaut le surnom de "Lunettes de l'Atlas". Dans cette étude nous nous focalisons sur le suivi du lac central "LaTiC", qui est considéré comme le lac le plus important (Benkaddour, 1993).



Carte 5.3 Bassin versant des LaT

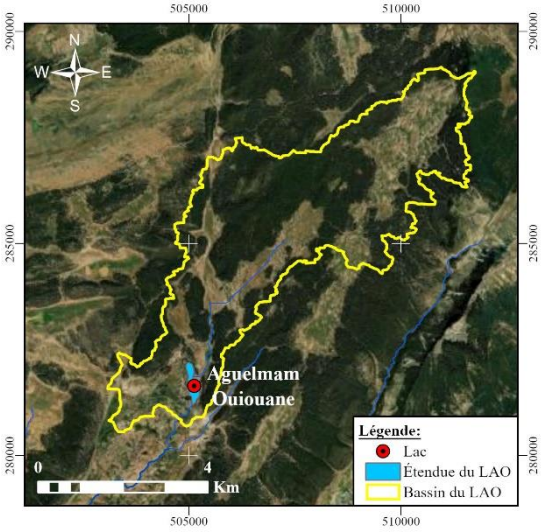


Photo 5-2 Lacs Tiglmamine (El Orfi, 2022)

5.2.1.3 Lac d'Aguelmam Ouiouane

Au nord du HaB-OER, dans la zone la plus arrosée du bassin, se trouve le lac d'Aguelmam Ouiouane ou Wiwane "LAO" (Ph. 5.3) (33°07′ N, 5°20′ O, 1620 m). Ce lac semi-artificiel s'étend

sur une superficie de 13 ha, avec un bassin versant de 26,7 km² (Carte 5.4). Il est peu profond, relativement envasée et abrite une abondance de faune planctonique et benthique. Le LAO est un composant d'un complexe karstique qui comprend outre le lac Ouiouane, l'Aguelmam n'Harcha et l'Aguelmam Ou Houli. Il est situé au niveau de la source de l'oued du même nom, encastré au fond d'une dépression calcaire aux versants escarpés (CEIBM, 2006). Selon le plan de l'APM, le LAO est classé parmi les SIBE avec un niveau de priorité de protection égale à 3 (Chillasse & Dakki, 2004).



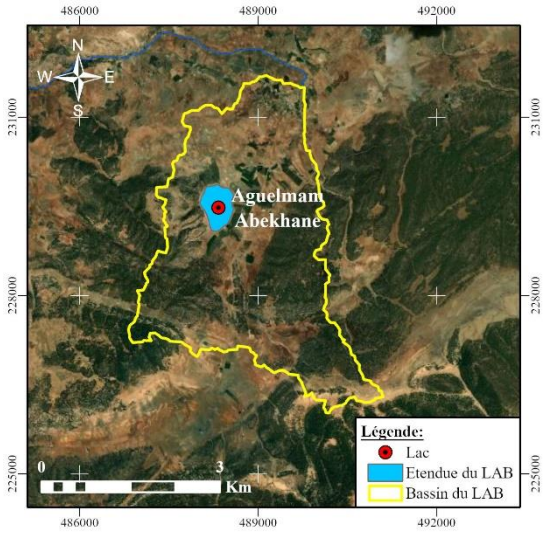
Carte 5.4 Bassin versant du LAO



Photo 5-3 Lac d'Aguelmam Ouiouane (El Orfi, 2021)

5.2.1.4 Lac d'Aguelmam Abekhane

Situé sur la partie du Moyen Atlas Méridional, au sud du HaB-OER, le lac d'Aguelmam Abekhane "LAB" (Ph. 5.4) (32°40′ N, 5°31′ O,1670 m), qui signifie "le lac noir" en Amazigh, est un lac naturel endoréique d'origine karstique. Avec un bassin versant de 12,6 km², ce lac de montagne présente une surface moyenne de 23 ha et une profondeur maximale d'environ 4 m (Carte 5.5). Son alimentation en eau provient des précipitations et des eaux de ruissellement, incluant la fonte des neiges. Il est à noter que lorsqu'il se remplit, il est vidangé à travers un exutoire situé sur sa bordure nord, qui alimente un petit ruisseau (CEIBM, 2006). À l'ouest du LAB, on trouve des reliefs couverts de chênes verts, tandis qu'à l'est, les terrains plats situés à proximité sont utilisés pour l'agriculture. Tout comme le LAZ et le LAO, le LAB est classé parmi les SIBE avec un niveau de priorité de protection évalué à 3 (Chillasse & Dakki, 2004).



Carte 5.5 Bassin versant du LAB



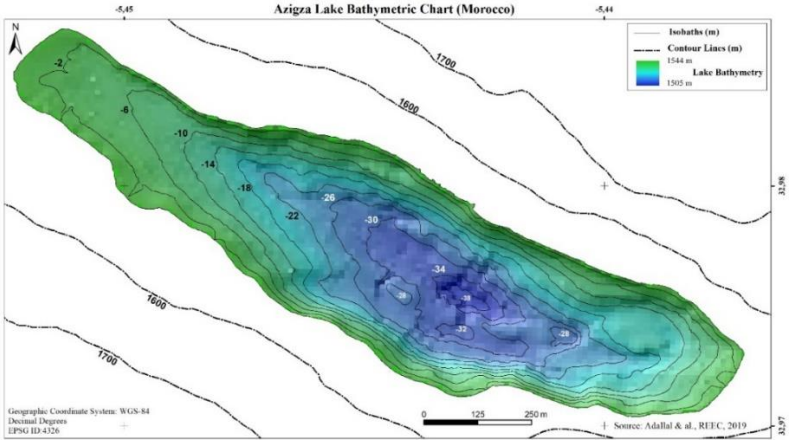
Photo 5-4 Lac d'Aguelmam Abakhan (El Orfi, 2022)

5.2.2 Méthodologie de suivi de l'évolution des étendues des lacs du HaB-OER

5.2.2.1 Données utilisées

Afin de pouvoir reconstituer un régime mensuel des variations des lacs, des images Landsat ont été acquises sous les conditions suivantes : la couverture nuageuse ne devait pas excéder 10% de la surface des lacs, et l'angle de visée ne devait pas entraîner d'effet d'ombrage sur les lacs. Au total, 282 images (Path: 201 et Row: 037) provenant des satellites Thematic Mapper (TM), Thematic Mapper (ETM^{+}), et Landsat Operational Land Imager (OLI) ont été téléchargées depuis le site du United States Geological Survey (USGS). L'année 1984 marque le point de départ des images de bonne qualité et de résolution de 30 m, tandis que les plus récentes couvrent jusqu'à l'année 2023. Leurs caractéristiques sont présentées dans l'annexe 5.1.

Les données sur la profondeur des lacs à l'échelle mondiale sont rares et incohérentes (Messager *et al*., 2016), et la détermination du volume d'eau d'un lac est impossible sans une bathymétrie précise (Crétaux *et al*., 2016). En 2015, Adallal *et al*. (2019) ont effectué des mesures bathymétriques par échosondeur embarqué sur un Zodiac, les données produites ont permis de produire une bathymétrie de haute résolution spatiale (1m) du LAZ (Carte 5.6). Cependant, nous n'avons pas eu accès au fichier numérique original. Toutefois, en se basant sur une carte de bonne qualité, nous avons digitalisé les points d'amer et les isobathes, ce qui nous a permis de créer un MNT géoréférencé du lac. Ainsi, nous pouvons désormais déterminer les volumes différentiels pour chaque valeur limnimétrique.



Carte 5.6 Bathymétrie du LAZ (Adallal et al., 2019)

Pour mettre en évidence l'impact des facteurs climatiques sur la dynamique de la superficie des lacs du HaB-OER, nous avons utilisé les données des précipitations et des températures déjà mentionnées dans le chapitre 3. Dans un premier temps, nous avons utilisé les données de précipitations annuelles de la station de Tarhat, représentative du HaB-OER, pour évaluer qualitativement leur influence sur l'évolution de l'étendue des lacs. Ensuite, pour déterminer quantitativement l'impact des précipitations sur l'évolution des volumes du LAZ, nous avons calculé la moyenne arithmétique des données de précipitations des trois stations pluviométriques les plus proches, situées à environ 20 km du LAZ : El Héri, Tamchachat et Tarhat (Annexe 5.2).

Enfin, La température moyenne annuelle estimée par le gradient thermique au niveau du LAZ est de 13,7 °C. Cette valeur est très proche des 13°C fournis par ECMWF "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" pour la même zone (Vidal *et al*., 2016) ou des 15°C estimés par les données satellitaires au niveau du Moyen Atlas semi-aride (Hadria *et al*., 2019). Les valeurs de température à l'échelle du LAZ ont été utilisées pour calculer l'ETP selon la méthode d'Oudin (Équ. 3.4).

5.2.2.2 Extraction des surfaces en eau

Afin de disposer d'images étalonnées en réflectance pour toute la série, une étape de prétraitement a été réalisée avant leur interprétation. Cette étape a consisté en une calibration radiométrique visant à corriger les variations entre les générations d'instruments. De plus, pour éliminer l'influence de l'état de l'atmosphère au moment des prises de vue, une correction atmosphérique a été appliquée. Ces deux types de corrections ont été effectués en utilisant les fonctions "Radiometric Calibration" et "Dark Subtraction" implémentées dans le logiciel ENVI.

Ensuite, ces images prétraitées ont fait l'objet d'une classification pour délimiter et extraire les surfaces d'eau. Il existe de nombreuses méthodes et techniques pour cela, classées en méthodes monobandes ou multibandes en fonction du nombre de bandes spectrales utilisées (Z. Du *et al*., 2012). Les méthodes couramment utilisées sont basées sur un indice qui combine un rapport multibande, tel que l'indice de différence normalisé de l'eau (NDWI : Normalized difference water index) et l'indice de l'eau à différence normalisée modifiée (MNDWI : Modified Normalized Difference Water Index). L'eau se caractérise alors par une réflectance relativement plus forte dans le visible que dans le proche infrarouge et le moyen infrarouge. L'absorption du rayonnement solaire dans la bande proche infrarouge est complète. En 1996, McFeeters a proposé l'indice NDWI (Équ. 5.1) pour délimiter les surfaces d'eau en se basant sur le rapport entre la réflectance dans le vert et le proche infrarouge (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{\rho_V - \rho_{PIR}}{\rho_V + \rho_{PIR}} \qquad \textit{(Équation 5.1)}$$

avec :
ρ_V : la réflectance dans le vert ;
ρ_{PIR} : la réflectance dans le Proche Infra Rouge.

En 2006, Xu a constaté que le NDWI de McFeeters était incapable de distinguer complètement les accumulations des éléments d'eau, et a proposé de remplacer la réflectance du proche infrarouge par la réflectance de l'infrarouge moyen et a suggéré le changement de la nomenclature de NDWI par MNDWI (Équ. 5.2).

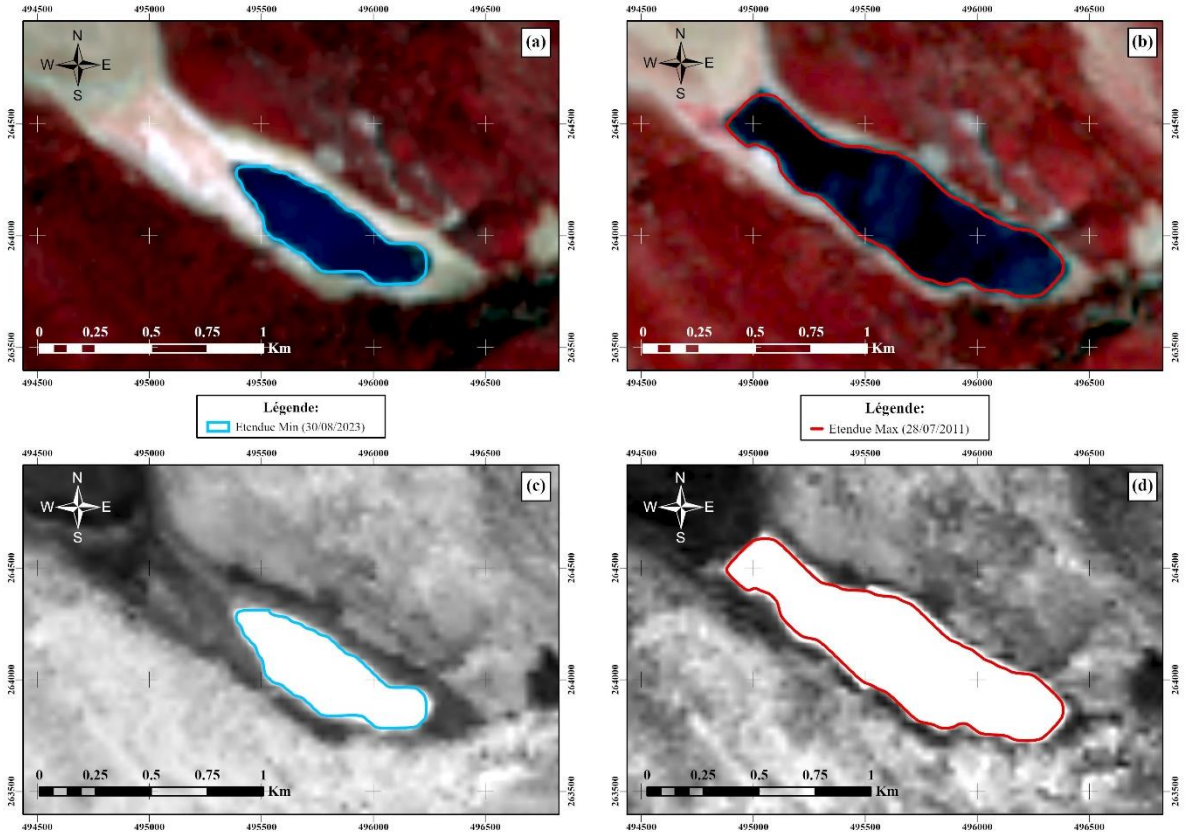
$$MNDWI = \frac{\rho_V - \rho_{MIR}}{\rho_V + \rho_{MIR}} \qquad \textit{(Équation 5.2)}$$

avec :
ρ_V : la réflectance dans le vert ;
ρ_{MIR} : la réflectance dans le Moyen Infra Rouge.

L'estimation de la surface au miroir des lacs repose dans un premier temps sur le calcul de l'indice MNDWI aux images prétraitées. Dans un deuxième temps, nous avons déterminé le seuil de segmentation, ce seuil a été fixé à 0 (Sarp & Ozcelik, 2017), où les valeurs positives sont considéré comme de l'eau et les négatives comme des sols nus ou végétalisés (Bai *et al*., 2021). Cependant, certaines valeurs ont été optimisées grâce à un ajustement manuel. Enfin, pour calculer les volumes du LAZ, nous avons croisé les étendues du lac avec sa bathymétrie.

5.2.2.3 Evaluation de la précision

L'essence de la méthode basée sur le MNDWI est de générer des images rehaussées des étendues d'eau (Li *et al*., 2013). L'extraction des pixels "eau" est faite sur la base d'une valeur seuil, par conséquent la validité de la méthode peut être évaluée du point de vue de la segmentation des images (Li *et al*., 2013). En première approche, une interprétation visuelle des résultats de l'application du MNDWI avec les compositions colorées des images Landsat a été faite sur les étendues minimal et maximal du LAZ enregistrées respectivement les 30/08/2023 et 28/07/2011 (Carte 5.7), les surfaces correspondantes sont de 21ha et 48ha. Globalement pour ces deux situations extrêmes les étendues d'eau extraites sont superposables avec celles visibles sur les images Landsat.



Carte 5.7 Superposition de l'étendue minimale du LAZ avec : (a) la composition IR (4,3,2) et (c) le MNDWI et la superposition de l'étendue maximale du LAZ avec : (b) la composition IR (4,3,2) et (d) le MNDWI

Une évaluation quantitative de la précision des étendues d'eau générées pour les 175 images a été réalisée, en utilisant les indicateurs d'évaluation comprenant la précision globale et le coefficient Kappa. La précision globale a été déterminée en divisant le nombre total de pixels ayant le même niveau d'eau par le nombre total de pixels. Cette évaluation a été limitée aux pixels de la rive NO du LAZ, où la pente est la plus faible, permettant ainsi d'obtenir la meilleure précision possible dans la relation extension/altitude. En raison de la différence de résolution entre les données MNDWI (30 m) et le MNT (quelques mètres), nous avons tenu compte du fait que le nombre de pixels correspondant à un niveau d'eau (NE) donné sur le MNT est égal à la somme des pixels pour l'intervalle [NE^{-1}, NE^{+1}].

En outre, le coefficient de concordance Kappa "K", créé par Cohen (1960) (Équ. 5.3), a été choisi comme méthode pour vérifier la fiabilité des résultats obtenus. Ce coefficient permet de tester de manière significative les différences statistiques dans la matrice d'erreurs (Khalid *et al*., 2021). À la différence d'autres coefficients, il prend en compte les accords entre les ensembles de données et permet de contrôler le facteur d'accord aléatoire (Acharya *et al*., 2018). En effet, plusieurs études l'ont utilisé pour évaluer les performances des techniques d'extraction des étendues d'eau (Acharya *et al*., 2018; Khalid *et al*., 2021; Liu *et al*., 2022; Naik & Anuradha, 2019).

$$K = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \qquad \textit{(Équation 5.3)}$$

avec :
p_o : la proportion d'accord observée ;
p_e : la proportion aléatoire.

Notre méthodologie est considérée comme étant robuste en raison des excellents résultats obtenus. La précision globale des niveaux d'eau extraits à l'aide du MNDWI est de 83,3 %, et le coefficient Kappa atteint 0,82. Ainsi, l'incertitude associée à l'estimation des volumes d'eau du LAZ s'élève à environ 9.10^{-3} hm^3.

5.2.3 Impact de la variabilité climatique sur la dynamique de la superficie des lacs

5.2.3.1 Evolution des superficies des lacs du HaB-OER

La variabilité des superficies moyennes annuelles des lacs du HaB-OER varie considérablement en fonction de leur forme et du temps. En ce qui concerne la taille des lacs, on constate que la variabilité des superficies annuelles est moins importante pour les deux petits lacs, LAO et LaTiC, par rapport aux autres lacs plus grands, ce qui se traduit par de faibles coefficients de variation variant entre 6 % et 13 % pour les petits lacs, tandis qu'il varie entre 21 % et 31 % pour les grands lacs (Tab. 5.1). Il convient de noter que la faible variabilité observée pour le LAO est principalement due à la construction d'une digue à son exutoire pour augmenter son volume avant débordement. De plus, les images satellite de ce lac montrent des altérations entre 1984 et 1989 ; par conséquent, son suivi a commencé en 1989-90. Les superficies maximales ont été enregistrées pendant les années humides, notamment en 2010-11, tandis que les superficies minimales ont été enregistrées durant les deux dernières années et pendant la période sèche des années 2000 (Annexe 5.3), en conformité avec les tendances pluviométriques démontrées par la méthode CUSUM (Chap. 3).

Tableau 5.1 Caractéristiques statistiques de l'évolution des superficies moyennes annuelles des lacs du HaB-OER entre 1984-85 et 2022-23

	Moy (ha)	Min (ha)	Année	Max (ha)	Année	σ (ha)	CV (%)
LAZ	31.3	21.8	2022-23	46	2012-13	6.6	21
LaTiC	6.1	4.6	2007-08	8	2010-11	0.8	13
LAB	21.8	1.1	2021-22	30.4	2010-11	6.7	31
LAO	13.8	11.9	2005-06	15	2010-11	0.8	6

Du point de vue temporel, les superficies des lacs du HaB-OER varient significativement à un pas de temps annuel (Annexe 5.4) et à un pas de temps mensuel (Fig. 5.1). À l'exception du LAO, qui présente une quasi-stabilité des superficies, on observe des tendances générales similaires pour les autres lacs. Après l'augmentation remarquée en 2008 qui a atteint son maximum en 2010-11, une diminution a été enregistrée au cours des dernières années, avec les superficies les plus faibles jamais enregistrées. Contrairement aux autres lacs, on constate une chute brutale de la superficie du LAB après 2018. Cette tendance vers l'assèchement du lac nous a amenés à nous interroger sur les causes de cette évolution, en commençant par l'impact des facteurs climatiques.



Figure 5.1 Evolutions des moyennes mobiles des superficies des lacs du HaB-OER entre 1984 et 2023

5.2.3.2 Impact de la variabilité climatique sur les lacs du HaB-OER

Pour mettre en évidence l'impact de la variabilité climatique sur l'évolution des superficies des lacs, en particulier sur le LAB, nous proposons de comparer ces évolutions avec les tendances pluviométriques démontrées par la méthode CUSUM pour la station de Tarhat, représentative du HaB-OER.

En général, l'évolution des superficies du LAZ et du LaTiC correspond bien aux tendances pluviométriques caractéristiques du HaB-OER, bien que cette corrélation soit légèrement moins marquée pendant la première moitié de la période d'étude pour le LAB. Cependant, on ne constate pas de correspondance nette avec le LAO, déjà mentionnée de nature semi-artificiel. Cette relation met en évidence l'impact de la pluviométrie du HaB-OER sur les superficies des lacs. Les années humides, comme la période 2008-2011, favorisent le remplissage des lacs jusqu'à leur maximum, tandis que les années sèches, comme les cinq dernières années, contribuent à leur vidange jusqu'à leur minimum (Fig. 5.2).

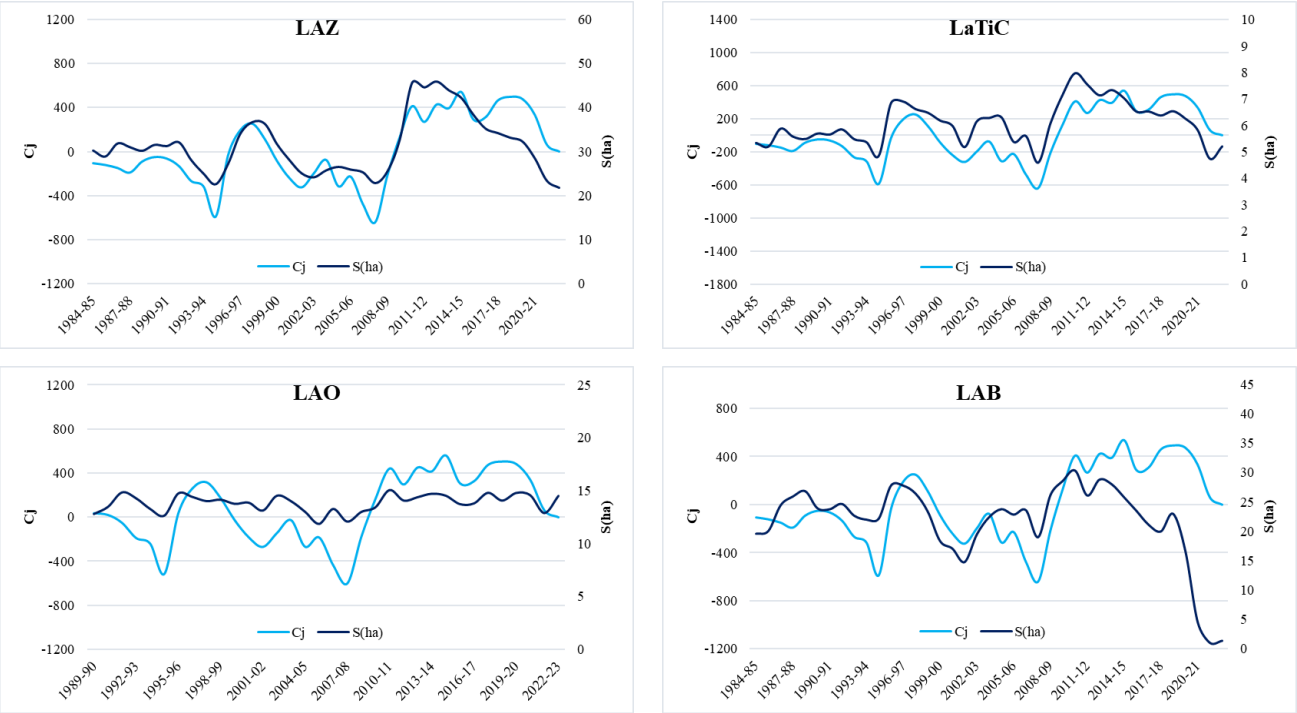


Figure 5.2 CUSUM des précipitations de la station de Tarhat et évolution des superficies des lacs du HaB-OER entre 1984-85 et 2022-23

Au cours des dernières décennies, des changements rapides dans les lacs ont été identifiés dans le monde entier, en raison du changement climatique et de l'intensification des activités humaines (Pi *et al*., 2022). De même, depuis les années 2012-13, les LAZ, LaTiC et LAB ont progressivement diminué en extension. Cependant, même si le contexte pluviométrique est similaire, la régression de la superficie du LAB est devenue très rapide par rapport aux autres stations après 2018-19. Sachant qu'à une altitude de 1670 m, la plus élevée entre les stations, les pertes évaporatives au niveau du LAB devraient être moins importantes. Cette particularité du LAB nous a poussés à approfondir la question au-delà de l'influence des conditions climatiques et à envisager d'évaluer l'influence anthropique sur cette évolution (Chap. 9).

5.2.4 Evolution du volume du LAZ

5.2.4.1 Les conditions climatiques du LAZ

La pluviométrie annuelle retenue pour le bassin du LAZ varie entre 305 mm en 2021-22 et 1290 mm enregistrés en 1995-96, avec une période de retour centennale. En raison de son altitude, le LAZ connaît des précipitations neigeuses abondantes pendant les hivers des années humides. En ce qui concerne l'ETP, elle oscille autour de 948 mm/an, avec l'enregistrement d'une valeur maximale de 1022 mm en 2022-23. Le bassin du LAZ présente une tendance à la hausse de l'ETP et une tendance à la baisse des précipitations sur la période d'étude (Fig. 5.3).

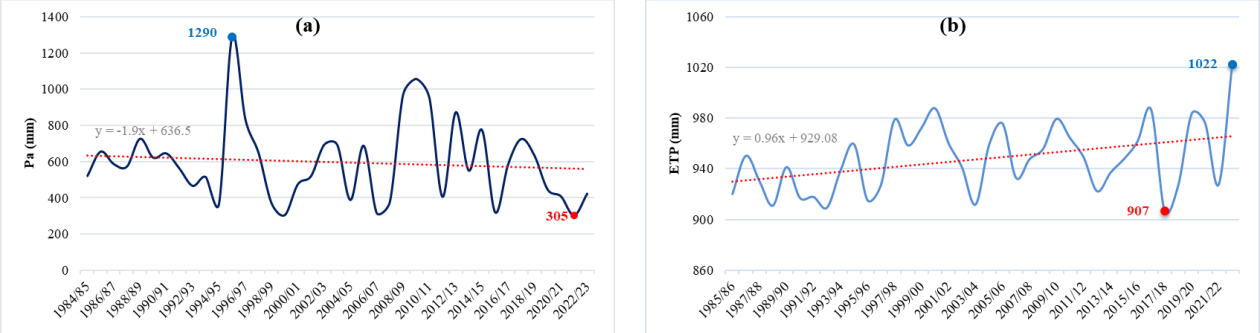


Figure 5.3 Variabilité des précipitations (a) et de l'ETP (b) à l'échelle du LAZ entre 1984-85 et 2022-23

Afin d'obtenir davantage d'informations sur les périodes humides et sèches, les chroniques des précipitations et de l'ETP ont été découpées en trois séries, délimitées en fonction des intervalles d'années extraits par la méthode CUSUM (Annexe 5.5 et Tab. 5.2). Le contraste entre les valeurs de pluie pour les périodes sèches et humides atteint 300 mm, tandis qu'il varie d'une dizaine de millimètres pour l'ETP.

Tableau 5.2 Résultat du découpage des données des précipitations et de l'ETP annuelles au niveau du LAZ

	P (mm)					ETP (mm)				
	Min (mm)	Max (mm)	Moy (mm)	σ (mm)	CV (%)	Min (mm)	Max (mm)	Moy (mm)	σ (mm)	CV (%)
1984-85/2019-20	305.1	1289.5	598	222.9	37	907	1022.2	947.8	27.2	2.9
1984-85/2007-08	306.4	1289.5	578	207.4	36	909.6	988	942.1	23.9	2.5
2008-09/2014-15	407.6	1057.1	798	238	30	922.6	979.6	951	18.4	1.9
2015-16/2021-22	305.1	726.3	482	151.4	31	907	1022.2	961.6	38.4	4

L'ETP moyenne calculée selon la formule d'Oudin (948 mm) pour le LAZ (1570 m) est inférieure aux 1217 mm calculés par la méthode de Penman pour la même zone en 2015 par Adallal *et al.* (2019), mais elle est similaire à l'ETP calculée pour la station de Ouiouane (1635 m) selon la méthode de Turc : 1136 mm par Serbout (2001) et 1013 mm par El Jihad (2003). En général, les pertes par évaporation dépassent largement les apports de précipitation dans le LAZ.

5.2.4.2 Effet des conditions climatiques sur le volume du LAZ

Le volume moyen estimé durant la période d'étude est de 4 hm^3. Au cours de cette période, il varie d'un rapport de 1/3, passant d'un maximum de 7,1 hm^3 en 2012-13 à un minimum de 2,3hm^3 en 2022-23 à (Fig. 5.4). L'évolution du volume du lac au début de la période d'étude est restée relativement stable, autour de 3,7 hm^3, jusqu'en 1991-92. Entre 1992-93 et 1994-95, le volume a diminué pour atteindre un minimum de 2,4 hm^3, puis il a commencé à augmenter jusqu'en 1998-99 pour atteindre 4,8 hm^3. Le volume a ensuite connu une nouvelle diminution jusqu'en 2007-08, atteignant une autre valeur minimale de 2,5 hm^3, avant d'augmenter à nouveau pour atteindre le maximum de 7,1 hm^3 en 2010-11. Depuis une dizaine d'années, le volume du LAZ ne cesse de diminuer pour atteindre la valeur la plus basse de 2,3 hm^3 en 2022/23.

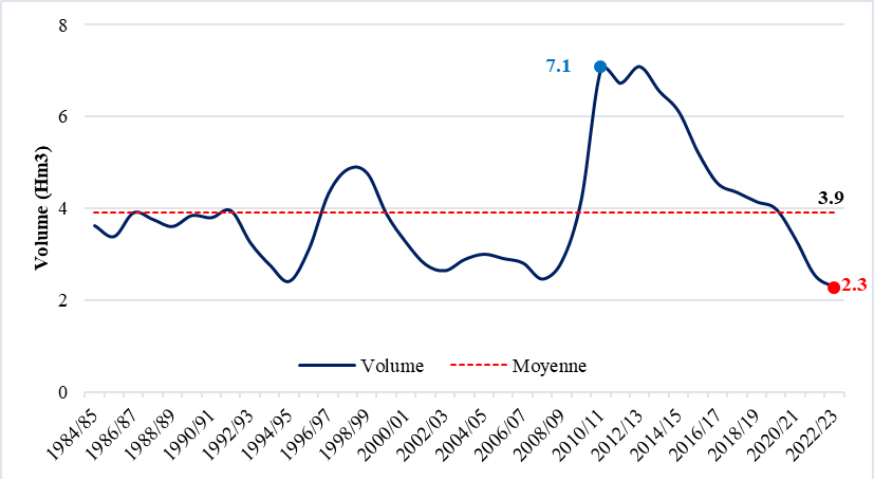


Figure 5.4 Evolution du volume du LAZ entre 1984-85 et 2022-23

Le découpage de la série illustre clairement la variation du volume entre les périodes sèches et la période humide. Le volume du LAZ a augmenté de 2,4 hm^3 entre la première période sèche, qui affichait 3,4 hm^3, et la période humide, qui atteignait 5,8 hm^3, représentant ainsi une augmentation de 71 %. Ensuite, il a diminué de 2 hm^3 pendant la deuxième période sèche, ce qui équivaut à une baisse de 34 % (Tab. 5.3 et Annexe 5.6).

Tableau 5.3 Résultat du découpage des volumes moyens annuelles du LAZ

	Moy (hm^3)	Min (hm^3)	Max (hm^3)	σ (hm^3)	CV (%)
1984-85/2022-23	3.9	2.3	7.1	1.3	33
1984-85/2007-08	3.4	2.4	4.8	0.7	20
2008-09/2014-15	5.8	2.8	7.1	1.6	28
2015-16/2022-23	3.8	2.3	5.2	1	27

L'évolution de l'écart par rapport à la moyenne des précipitations annuelles concorde bien avec les variations du volume du LAZ au cours de la période d'étude (Fig. 5.5.a). Les années humides entraînent l'augmentation du volume du LAZ, tandis que les années sèches déterminent sa diminution. Cependant, les variations du volume du LAZ ne correspondent pas à l'évolution des écarts annuels par rapport à la moyenne des ETP annuelles (Fig. 5.5.b). Par conséquent, même si les valeurs d'ETP sont significatives, la température n'a pas un impact majeur sur les variations du volume du LAZ. Selon Adallal (2019), le lac est de type monomictique chaud, et les pertes en eau du lac sont principalement dues à l'infiltration (représentant 71 % des pertes annuelles d'eau du lac), le reste s'évapore.

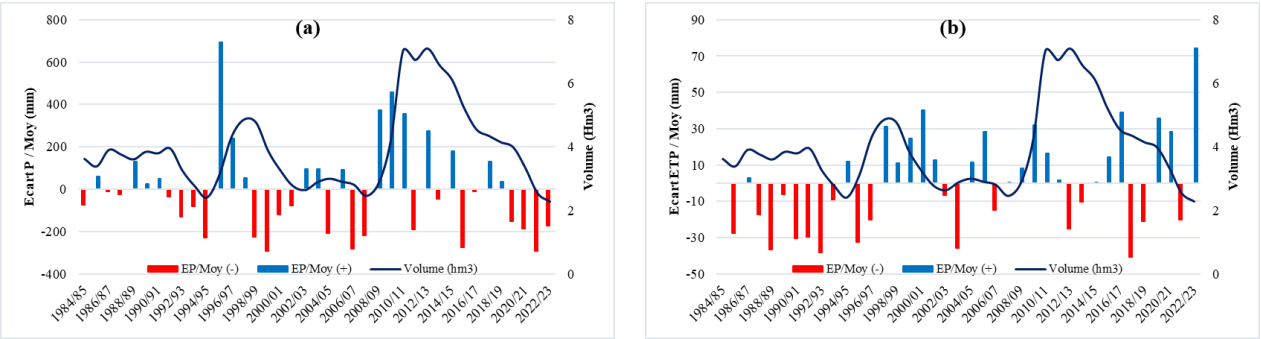


Figure 5.5 Variabilité de l'écart par rapport à la moyenne des précipitations (a) et de l'ETP (b) et du volume du LAZ de 1984/85 à 2022/23

Les analyses isotopiques réalisées sur plusieurs lacs marocains ont permis d'obtenir des informations sur les taux d'évaporation et les temps de séjour des eaux lacustres. Le LAZ se distingue parmi les lacs nationaux en présentant l'un des taux d'évaporation et des temps de séjour les plus faibles (Benkaddour *et al*., 2008). En effet, cette courte durée de séjour de l'eau, estimée à 2 ans, explique la réponse rapide du niveau du LAZ aux variations climatiques (Adallal, 2019).

5.2.4.3 Bilan hydrique

L'année hydrologique se divise en deux périodes distinctes : l'hiver hydrologique, de novembre à mars inclus (P > ETP), et l'été hydrologique, d'avril à octobre inclus (ETP > P). Pendant l'hiver hydrologique, l'excès pluviométrique atteint 60 mm en décembre et janvier. En revanche, pendant l'été hydrologique, le déficit pluviométrique dépasse 110 mm entre juin et août, atteignant des valeurs maximales moyennes de 150 mm en juillet. Sur l'ensemble de l'année, le déficit moyen s'établit à 350 mm.

Pour la période de l'été hydrologique nous n'observons que peu de différence entre les séries. En revanche, pour la période de l'hiver hydrologique de la période humide entre 2008-19 et 2014-15, on constate que les valeurs mensuelles moyennes sont plus élevées, dépassant les 100 mm pour le mois de novembre. En ce qui concerne la deuxième période sèche, ces valeurs sont moins élevées et ne dépassent pas les 50 mm (Fig. 5.6).

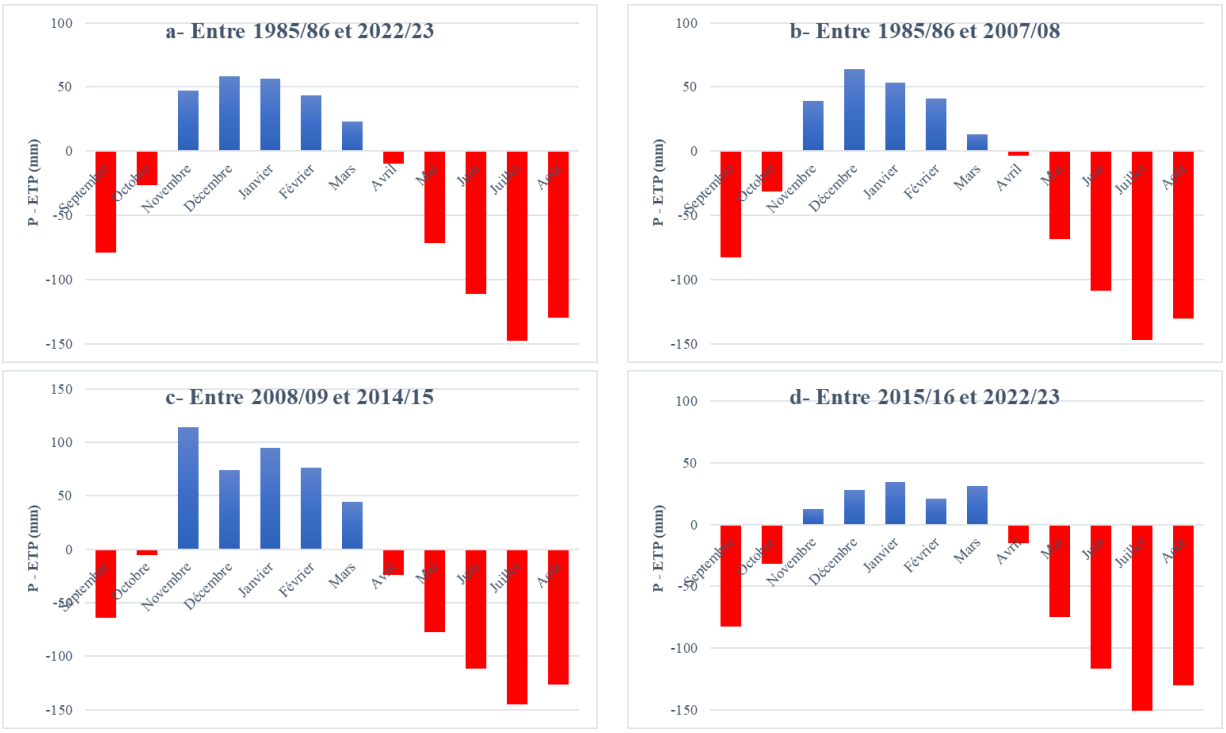


Figure 5.6 Bilans hydriques mensuels moyens (P - ETP) au LAZ de 1985/86 à 2022/23

Les bilans hydriques mensuels moyens du LAZ pour la période 1985/86 à 2007/08 concordent mieux avec ceux du lac d'Aguelmam Sidi Ali entre 1975/76 et 2009/10 (Sayad *et al*., 2011). Cependant, il est à noter que les valeurs mensuelles sont plus élevées au niveau du LAZ par rapport au lac d'Aguelmam Sidi Ali (Fig. 5.7).

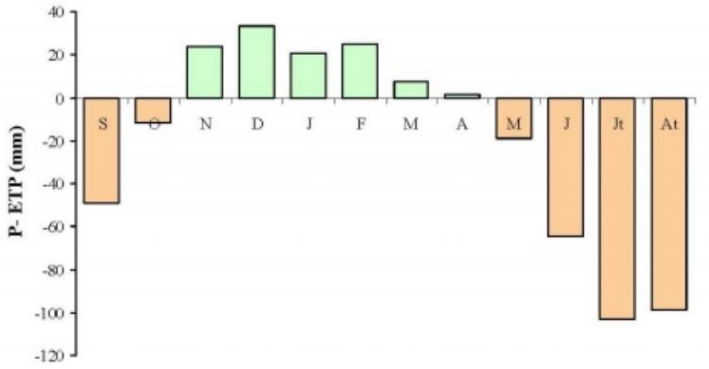


Figure 5.7 Bilans hydriques mensuels moyens (P - ETP) à Sidi Ali de 1975/76 à 2009/10 (Sayad et al., 2011)

5.3 Suivi et mesures des principales sources du HaB-OER

5.3.1 Présentation des sources du HaB-OER

5.3.1.1 Intérêt de l'étude des sources du HaB-OER

Les eaux souterraines, qui présentent le double avantage par rapport aux eaux de surface de mieux répondre à la demande, jouent un rôle crucial dans la stratégie d'exploitation des ressources hydriques des régions semi-arides (Bouchaou, 1995). En effet, la nappe Liasique du Moyen Atlas alimente plusieurs sources de débits variables, parmi lesquelles les plus importantes sont celles de l'Oum Er Rbia (ABHOER, 2018e). Ces sources sont capables de soutenir efficacement les débits d'étiage des cours d'eau du HaB-OER, ainsi que de contribuer au remplissage des barrages (Chap. 4). D'autres sources sont utilisées pour l'approvisionnement en eau potable de plusieurs agglomérations et sont également d'un grand intérêt pour l'irrigation (Enquête, 2022). De plus, les sources de l'Oum Er Rbia disposent d'atouts touristiques importants qui leurs ont permis d'occuper une place distinguée à l'échelle nationale.
Cependant, les études sur les aquifères de montagne restent limitées, bien que la majorité des populations de ces régions dépendent de ces sources pour leur approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation agricole. Il est également à noter qu'aucun équipement hydrométrique n'est installé dans la région du HaB-OER, et aucune source n'est équipée de tels dispositifs. Dans ce contexte, pour une meilleure compréhension de leur fonctionnement hydrologique, des échelles limnimétriques ont été mises en place sur les principales sources de la zone.

5.3.1.2 Le HaB-OER, une zone de sources par excellence

Le système hydrogéologique du HaB-OER se caractérise principalement par la prédominance de calcaires liasiques fracturés et karstifiés (Chap. 1 et 2). Ce système donne naissance à de nombreuses sources (Annexe 5.7), parmi lesquelles certaines présentent une teneur élevée en sel. El Khalki (2001) a utilisé les critères établis par Castany (1982) pour identifier les unités géologiques alimentant ces sources karstiques. Parmi ces unités, on compte l'unité d'Ajdir et l'unité de l'Oum Er Rbia, où se trouvent la plupart des sources les plus importantes du HaB-OER. L'exutoire principal de ce système aquifère est un ensemble de sources, qui sont en fait des sources de débordement par contact structural ou stratigraphique (Khalil, 2002).
Au site des quarante sources de l'Oum Er Rbia, le Lias inférieur est mis en contact avec le Trias par une faille SO-NE. Du compartiment ouest émergent des sources de faible débit mais très salées, à une altitude bien supérieure à celles des sources de l'est, qui sont les sources de l'Oum Er Rbia, caractérisées par leur eau douce et leurs forts débits (Bentayeb & Leclerc, 1977). La mesure et le suivi de ces sources sont compliqués car elles se rejoignent directement dans le cours d'eau. Cependant, l'ABHOER assure le suivi mensuel de plusieurs autres sources réparties

sur la moitié nord du HaB-OER (Tab. 5.4). Il est à souligner que les formations triasiques sont responsables de la salinité d'une grande partie des ressources en eau souterraine dans la zone d'étude (A. Tahiri, 2021).

Tableau 5.4 Les sources mesurées et suivies par l'ABHOER

N°IRE	Nom	Lam. X (m)	Lam. Y (m)	Alt (m)	Chronique
516/30	Ain Oum Er Rbia "Lac"	498475	272750	1300	1988-2023
517/30	Tiguelmamine	497875	272800	1290	1988-2023
536/30	Bou Ighzil	490500	256860	1155	1995-2023
514/30	Ain Assoul	487600	259040	1360	1995-2023
520/30	Sidi Ahmed Ou Moussa	496300	272600	1300	1988-2023
518/30	Ain Ou Mila	497050	272800	1273	1988-2023
1725/29	Ain Tahar	484350	258650	1115	1995-2023
27/30	Ain Ajdir	495600	262000	1670	1995-2023
519/30	Aghbalou Ou Oumaregh	486550	272750	1275	1988-2023
553/30	Aghbalou n'Talouate	518160	276040	1800	2000-2023

5.3.1.3 Equipement et suivi hydrométrique de sources

En plus des critères de l'OMM (1994), déjà exposés dans le chapitre 4, les sources présélectionnées pour les mesures et le suivi doivent être accessibles, disposer d'un emplacement approprié pour l'installation d'une échelle limnimétrique, et ne pas être sujettes à des conflits entre tribus. Ces critères nous ont permis de sélectionner quatre sources : deux salées à côté du complexe source de l'Oum Er Rbia, à savoir Oum Er Rbia "Lac" et Tiguelmamine, ainsi que deux sources douces plus proches de Khénifra, à savoir Bou Ighzil et Assoul (Carte 5.8). Ces sources ont été équipées d'échelles limnimétriques pour suivre leur niveau d'eau (Ph. 5.5).



Photo 5-5 Echelle limnimétrique dans les sources de l'Oum Er Rbia "Lac" (El Orfi, 2020)



Photo 5-6 Mesure du débit de la source d'Assoul par un seau (Ghadbane, 2018)



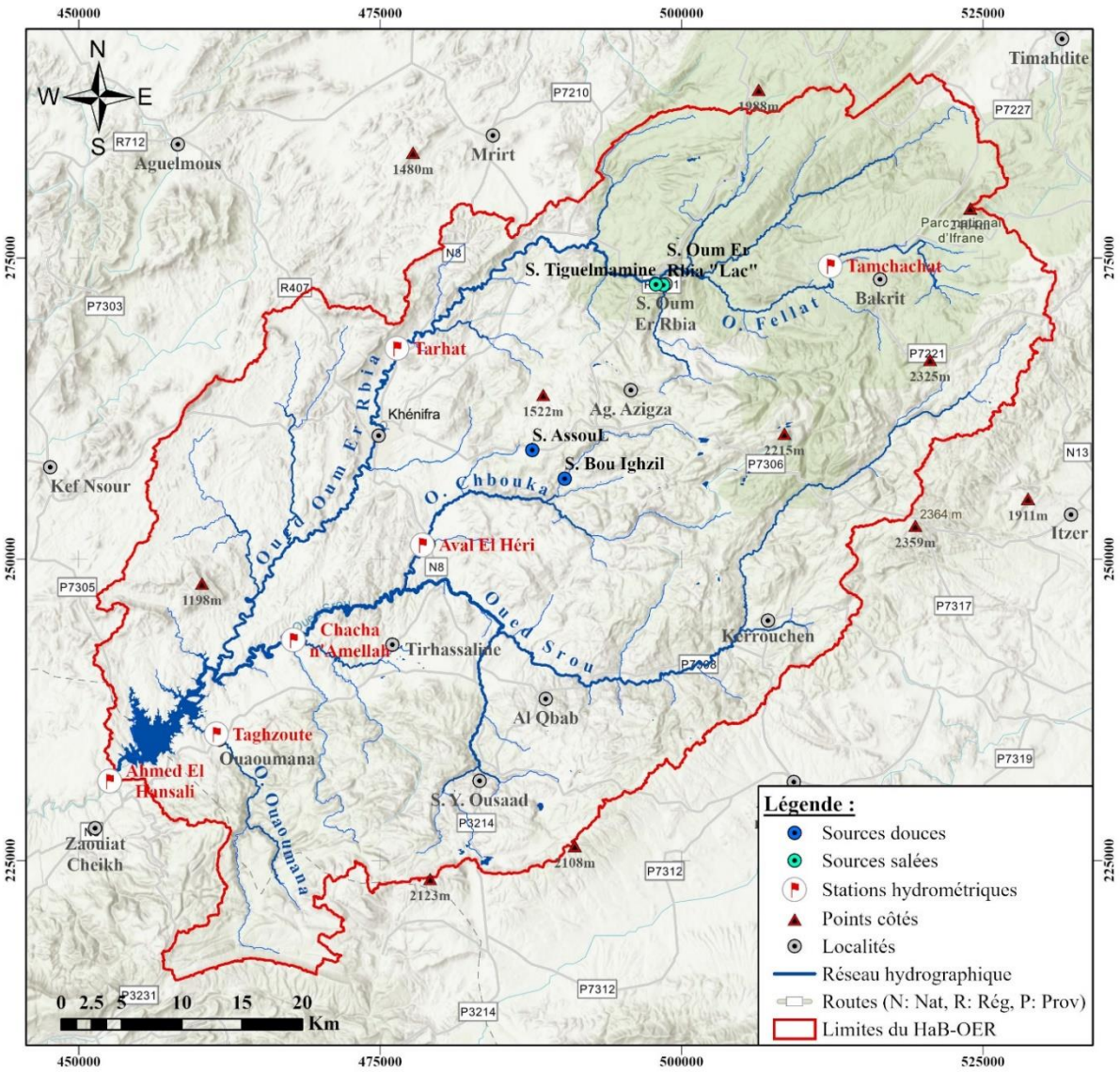
Photo 5-7 Mesure de débit de la source de Tiguelmamine par le micro-moulinet (El Khidar, 2020)



Photo 5-8 Mesure de débit de la source de Bou Ighzil par le micro-moulinet (El Orfi, 2020)

De plus, sept campagnes de jaugeages ont été programmées entre 2019 et 2020 pour mesurer les débits. Deux méthodes ont été utilisées : le jaugeage par exploration du champ des vitesses à l'aide de micromoulinet, et des mesures volumétriques réalisées avec un seau (Ph.5.6, 5.7 et 5.8).

Comme pour les stations hydrométriques installées sur les rivières (chap. 4) ce dispositif n'a pu être exploité du fait des circonstances exceptionnelles liées au Covid-19.



Carte 5.8 Localisation des quatre sources choisies pour le suivi hydrométrique

5.3.2 Hydrologie des sources

5.3.2.1 Évolution des débits des quatre sources étudiées

Sur la base des mesures mensuelles effectuées par l'ABHOER, la comparaison avec les autres sources dans le HaB-OER (Annexes 5.8 et 5.9) montre que les débits des quatre sources faisant l'objet de l'étude sont plus élevés. Les sources d'Oum Er Rbia dites "Lac", car elles déversent leur eau dans un lac artificiel, présentent le débit le plus important, avec une moyenne de 249l/s, suivies respectivement de Bou Ighzil, Tiguelmamine et Assoul, avec des débits de 72,7 l/s, 35,8l/s et 12,3 l/s (Tab. 5.5). Le coefficient de variation des deux sources à débit important indique une faible variabilité, atteignant seulement 13% et 18 %, tandis que les deux autres sources présentent des coefficients bien plus élevés, allant jusqu'à 80 % pour la source Assoul.

Tableau 5.5 Caractéristiques statistiques des débits des quatre sources étudiées de 1994-95 à 2022-23

	Moy (l/s)	Min (l/s)	Max (l/s)	σ (l/s)	CV (%)
Ain Oum Er Rbia "Lac"	249	193.6	310	31.3	13
Tiguelmamine	35.8	13	73	16.1	45
Bou Ighzil	72.7	48.2	96.2	13.2	18
Ain Assoul	12.3	1.1	40.3	9.9	80

Les sources étudiées ne présentent pas de caractéristiques communes. Cependant, deux sources ont enregistré les débits les plus faibles en 2022-23, tandis que deux autres ont enregistré les débits les plus élevés entre 2009 et 2010 (Fig. 5.8). Parmi les quatre sources étudiées, le Lac, Bou Ighzil et Assoul présentent une tendance à la diminution des débits, tandis que Tiguelmamine montre une tendance à l'augmentation. Cette tendance à la hausse est également observée chez d'autres sources salées, notamment Sidi Ahmed Ou Moussa, Aghbalou Ou Oumaregh et Ain Ou Mila (Annexe 5.9). Cette évolution peut être attribuée à la complexité et à la disparité de la géomorphologie karstique caractéristique de la région (Y. El Khalki, 2001). Par conséquent, le fonctionnement du système dans le HaB-OER se caractérise par des pertes et des résurgences (Khalil, 2002).



Figure 5.8 Evolution des débits des quatre sources choisies pour le suivi hydrométrique (ABHOER, 2023)

En raison des caractéristiques géologiques particulières de la région HaB-OER, le régime des sources étudiées présente une irrégularité typiquement karstique. Les débits augmentent progressivement pour la source du Lac, tandis qu'ils fluctuent pour les sources de Bou Ighzil et d'Assoul, atteignant un pic enregistré en mars et mai (Fig. 5.9). La période des hautes eaux pour ces sources commence en février et dure 5 mois pour Bou Ighzil et 6 mois pour les deux autres sources. En revanche, la source de Tiguelmamine présente un régime complètement différent par rapport aux autres sources. Elle commence avec un maximum en septembre, puis diminue jusqu'à décembre avant de remonter jusqu'en avril, atteignant son maximum. La période des hautes eaux ne dure que 4 mois, répartis en deux épisodes distincts.

Cette variation des débits est le reflet des caractéristiques karstiques de la région, où les précipitations, la recharge souterraine, et les réseaux de fractures jouent un rôle complexe dans le comportement hydrologique des sources.

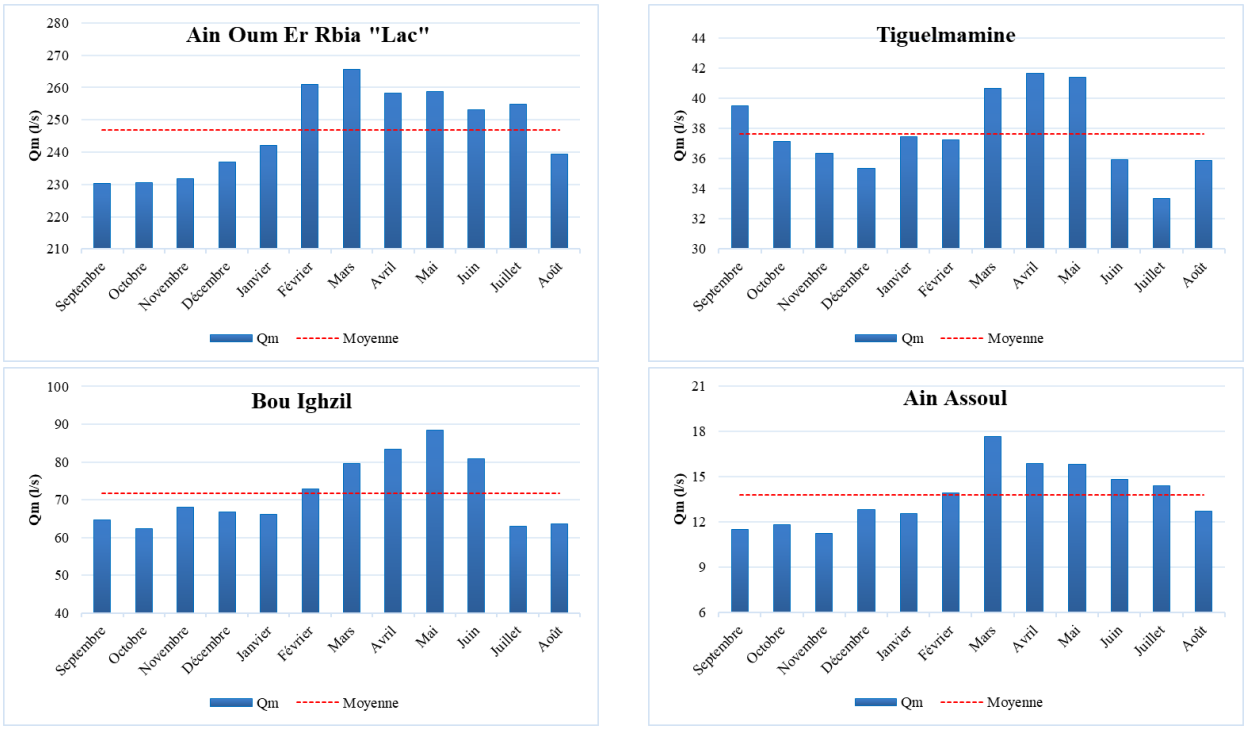


Figure 5.9 Régime hydrologique des sources étudiées sur la période 1995-96 à 2022-23

Pour mettre en relation l'impact de la variabilité annuelle des précipitations et l'évolution des débits des sources étudiées, nous avons utilisé les données pluviométriques des deux stations les plus proches des sources : Tamchachat pour les deux sources salées au nord, et Aval El Héri pour les deux sources douces au sud (Carte 5.8). Cependant, l'évolution de l'écart par rapport à la moyenne des précipitations annuelles ne révèle pas une corrélation significative entre les précipitations et les débits des sources étudiées (Fig. 5.10). En effet, ces sources fournissent un apport essentiel aux cours d'eau du HaB-OER. Les sources situées au nord contribuent directement à l'alimentation de l'Oum Er Rbia, tandis que celles situées au sud contribuent à l'alimentation de l'oued Chbouka, qui est l'un des principaux affluents de l'oued Srou.

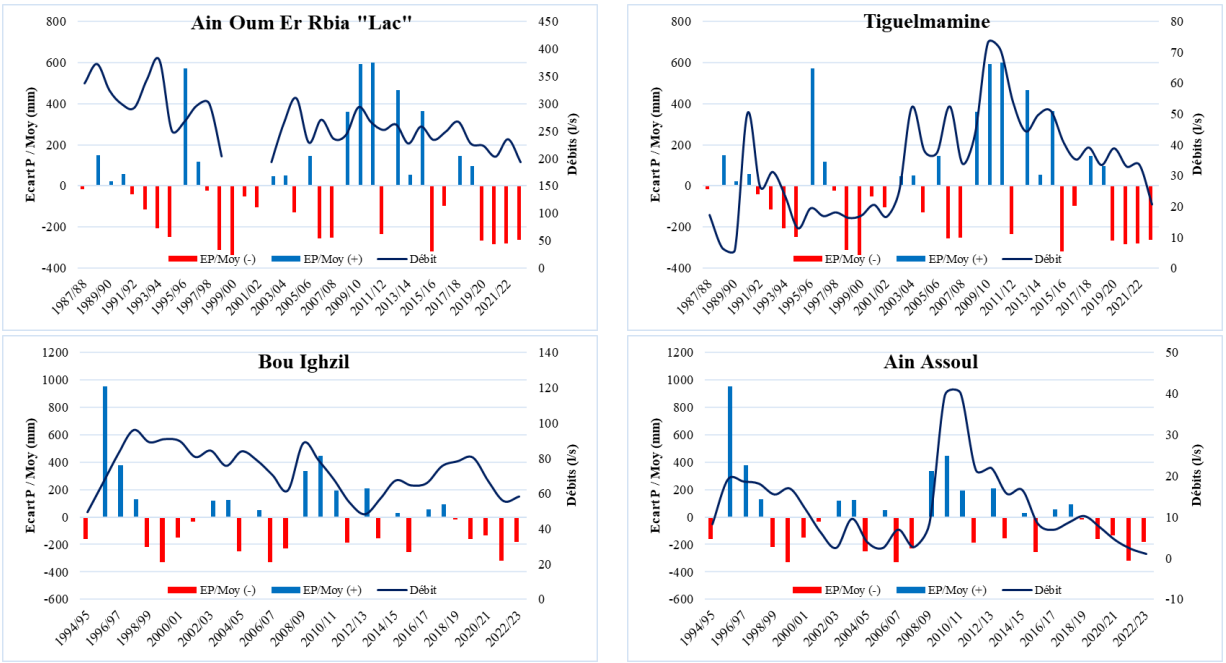


Figure 5.10 Variabilité de l'écart par rapport à la moyenne des précipitations et des débits sources suivies

5.3.2.2 Courbe de tarage

Conformément à la méthodologie utilisée pour les cours d'eau (Chap. 4), les données de hauteur d'eau et de débit collectées lors des campagnes de mesure menées entre 2019 et 2020 ont été soumises à un ajustement prenant en compte la relation Q=f(h) pour les quatre sources équipées. En conséquence, des courbes de tarage ont été élaborées pour ces sources (Fig. 5.11).

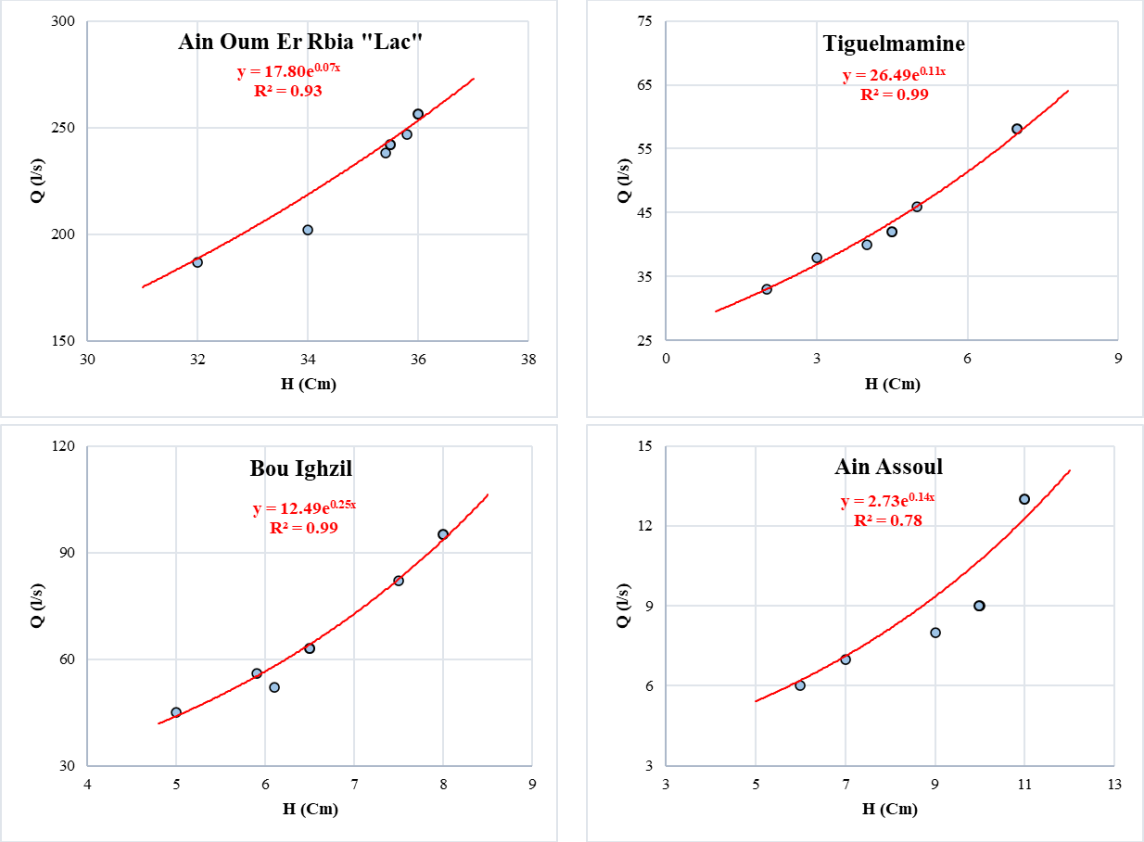


Figure 5.11 Courbe de tarage des sources étudiées pour la période 2019-20

Les instruments utilisés lors des campagnes de mesure nous ont permis de mesurer avec une précision suffisante les débits et les côtes correspondants, ce qui a permis d'obtenir des courbes de tarage avec des coefficients de corrélation satisfaisants. Cependant, en raison des contraintes précédemment mentionnées, nous n'avons pas pu exploiter pleinement ces courbes pour créer une base de données à une résolution temporelle plus fine.

5.4 Conclusion

La connaissance sur le fonctionnement hydrologique des lacs présente un défi considérable pour les études classiques basées sur des données de terrain, en raison de l'absence de stations de mesure et des coûts élevés des équipements nécessaires. Une fois de plus, l'application des techniques de télédétection a démontré son efficacité dans le domaine de l'hydrologie en permettant le suivi des superficies des lacs les plus représentatifs du HaB-OER. De plus, l'utilisation d'un fichier bathymétrique nous a permis d'estimer les volumes du LAZ sur la période d'étude. Les résultats indiquent des variations significatives de la superficie des lacs au cours de cette période. Les taux de précipitation annuels ont été identifiés comme l'un des principaux facteurs de ces changements.

Le HaB-OER est une région riche en sources, à la fois douces et salées, avec des débits très variables. Ces sources karstiques se caractérisent par leur diversité et leur complexité. Pour

mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de certaines de ces sources, les données obtenues auprès de l'ABHOER ont révélé que les débits varient en fonction des unités hydrologiques et des conditions climatiques, notamment la variabilité des précipitations. De plus, la mise en place d'un réseau de suivi et de mesure conforme aux critères scientifiques de l'OMM a permis de garantir la collecte de données de haute qualité et la création de courbes de tarages pour quatre sources, dont deux sont salées au nord et deux sont douces au centre du HaB-OE.

Au cours des cinq dernières années, on a observé une diminution notable de l'étendue des lacs et des débits des sources. De nombreux lacs et sources du HaB-OER ont été asséchés en raison de la succession d'années sèches. Les modèles climatiques futurs prévoient une poursuite de la diminution des précipitations et une augmentation des températures. Pour mieux gérer les ressources en eau menacées dans le HaB-OER, il est essentiel de recourir à des outils de modélisation.

Chapitre 6 : Modélisation pluie débit : choix, structure et performance

6.1 Introduction

Après avoir exploré les différentes caractéristiques et problématiques liées aux ressources en eau dans le HaB-OER, nous sommes à présent sur le point d'explorer le domaine de la modélisation hydrologique. Depuis les années 1960, de nombreux hydrologues ont développé des modèles pour mieux appréhender les processus du cycle de l'eau. Ces modèles ont permis des avancées significatives dans divers domaines de l'hydrologie, telles que la prévision des inondations, l'évaluation des impacts du changement climatique et la gestion des ressources en eau (Astagneau *et al*., 2021). Le modèle hydrologique se révèle être un outil incontournable pour relever divers défis scientifiques et opérationnels en simplifiant le temps, l'espace et les processus hydrologiques afin de représenter le comportement du cycle de l'eau (S. K. Singh *et al*., 2017), de se concentrer sur les débits extrêmes qu'il s'agisse de crues (Rozalis *et al*., 2010) ou de faibles débits (Nicolle *et al*., 2014), de faire des études sur les impacts du changement climatique, etc. Dans ce chapitre, nous présentons l'approche hydrologique menée sur l'HaB-OER dans le cadre de modélisations afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique en première intention et en deuxième intention d'élaborer un outil en mesure d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau à l'échelle du HaB-OER.

6.2 Modélisation hydrologique pluie-débit et choix de modèles

En pratique, la modélisation hydrologique consiste à simuler les débits à l'échelle d'un bassin versant à partir d'une simplification du système naturel complexe qu'il représente. En effet, la représentation du cycle hydrologique se heurte à la difficulté de la compréhension fine des processus conduisant des précipitations à l'écoulement au sein d'un bassin versant. Pour autant la modélisation doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages (Mouelhi, 2003b).

Si le concept de modèle apparaît dans les années 50, c'est depuis le début des années 60 que les moyens de calculs informatiques ont rendu possible le développement d'un grand nombre de modèles hydrologiques (Perrin, 2000). Plusieurs approches reposant sur divers concepts permettent de représenter la réponse d'un bassin versant à un évènement pluvial. Sans entrer dans le détail des nombreuses typologies existantes nous pouvons distinguer les modèles déterministes ou stochastiques (nature des variables et des paramètres), globaux, semi-distribués ou spatialisés (représentation homogène ou hétérogène du bassin versant) et empiriques, conceptuels ou théoriques (nature des relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit).

Selon la communauté hydrologique, il n'existe pas de modèle "meilleur" en soi et le choix de celui-ci dépend davantage des objectifs et du contexte de l'étude ainsi que de la disponibilité des données nécessaires à sa mise en œuvre. Pour mener à bien les objectifs de notre travail qui sont la quantification des flux d'eau en continu et donc de la ressource nous avons fait le choix d'utiliser deux types de modèles hydrologiques.

Le premier type renvoie aux modèles "GR" du Génie Rural. Il s'agit de modèles empiriques dont la structure à réservoir s'apparente à celle des modèles conceptuels (Perrin *et al*., 2007). Dans la mesure où une même structure de modèle peut présenter des performances contrastées en fonction du pas de temps retenu nous avons testé GR2M pour le pas de temps mensuel et GR4J pour le pas journalier. Ces modèles globaux présentent l'intérêt d'être parcimonieux, ne nécessitant comme variables d'entrée que des données climatiques de base, pluie et ETP. Le

modèle conceptuel GR2M a été largement utilisé dans différentes conditions hydroclimatiques à travers le monde avec des résultats satisfaisants (Pérez-Sánchez *et al*., 2019). De même, GR4J a été évalué dans diverses conditions et a montré de bons résultats comparativement à d'autres structures de modèles (Pushpalatha *et al*., 2011).

Ces dernières années, des recherches ont été menées pour améliorer les performances de la modélisation hydrologique avec GR. Le langage de programmation open-source R s'est imposé comme un élément central dans les sciences hydrologiques, en raison de la disponibilité de diverses archives de données et du développement d'outils informatiques (Slater *et al*., 2019). L'utilisation du package R pour la modélisation peut mettre l'accent sur l'optimisation de l'efficacité du modèle.

Le deuxième type de modèle retenu est le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool de l'USGS) qui présente l'intérêt de représenter de nombreux processus physiques grâce à son approche semi-distribuée basée sur des principes physiques (Arnold *et al*., 2012). Ce type de modèles, en divisant le terrain en parcelles à résolution fine, ont le potentiel de simuler et prédire de manière efficace les processus hydrologiques à différentes échelles (Chen, 2018).

Le modèle SWAT, avec sa discrétisation spatiale basée sur la réalité topographique et les ressources de calcul modérées malgré sa représentation complexe des processus hydrologiques, est un choix approprié pour notre étude. Le modèle SWAT est capable de traiter divers processus liés à l'érosion et à la modélisation globale du bilan hydrique, … ce qui lui confère une grande polyvalence par rapport à d'autres modèles hydrologiques (Mannschatz *et al*., 2016). Comparé aux autres modèles, SWAT est largement reconnu comme étant le modèle le plus couramment utilisé (Paul *et al*., 2021). Il a fait ses preuves en étant largement appliqué à travers le monde sur différents bassins versants (Aloui *et al*., 2023).

Au Maroc, SWAT a été utilisé pour le bassin du Sebou (Brouziyne *et al*., 2018; Chadli, 2018; Boufala *et al*., 2022), le bassin du Nord-Ouest : (Aqnouy *et al*., 2019; Boukhari Taleb *et al*., 2019; Briak *et al*., 2019), le bassin du Bouregreg : (Y. Bouslihim *et al*., 2020; Brouziyne *et al*., 2020). Le modèle SWAT a été également utilisé pour modéliser certaines parties du bassin de l'Oum Er Rbia (Kharchaf *et al*., 2013; Milewski *et al*., 2019; Strohmeier *et al*., 2020; Oularbi *et al*., 2022). Néanmoins, la majorité de ces études se sont principalement concentrées sur l'évaluation des pertes de sol. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser SWAT pour des investigations hydrologiques à des échelles spatio-temporelles fines.

6.3 La structure des modèles

6.3.1 Description des modèles GR

Le développement des modèles Génie Rural "GR" a été lancé à la fin des années 1980. Michel (1983) a adopté une approche empirique en partant de structures de modèles très simples et en augmentant progressivement leur complexité pour améliorer leurs performances. Il existe plusieurs versions des modèles GR, chacune proposant des résolutions temporelles différentes : GR1A (Mouelhi, 2003b; Mouelhi *et al*., 2006a), GR2M (Mouelhi, 2003b; Mouelhi *et al*., 2006b), GR4J (Perrin *et al*., 2003), GR5J (Le Moine, 2008; Pushpalatha *et al*., 2011), GR6J (Pushpalatha *et al*., 2011) et GR4H (Mathevet, 2005). Ces modèles ont été largement utilisés dans diverses conditions climatiques et hydrologiques. Leur application couvre un large éventail d'objectifs de modélisation, telles que l'évaluation des ressources en eau, l'estimation et la prévision des crues et des étiages, la gestion des terres et l'évaluation des impacts du changement climatique (Coron *et al*., 2017).

6.3.1.1 Présentation du modèle GR2M

Le modèle GR2M est un modèle pluie-débit global à deux paramètres au pas de temps mensuel. Son développement a été initié au CEMAGREF à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages (Perrin *et al*., 2007). Le développement initial du modèle a été lancé par Michel (1983), et depuis lors, plusieurs chercheurs ont proposé des versions successives à la performance croissante. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al*., (2006b) ; elle fonctionne autours de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées (Fig. 6.1).

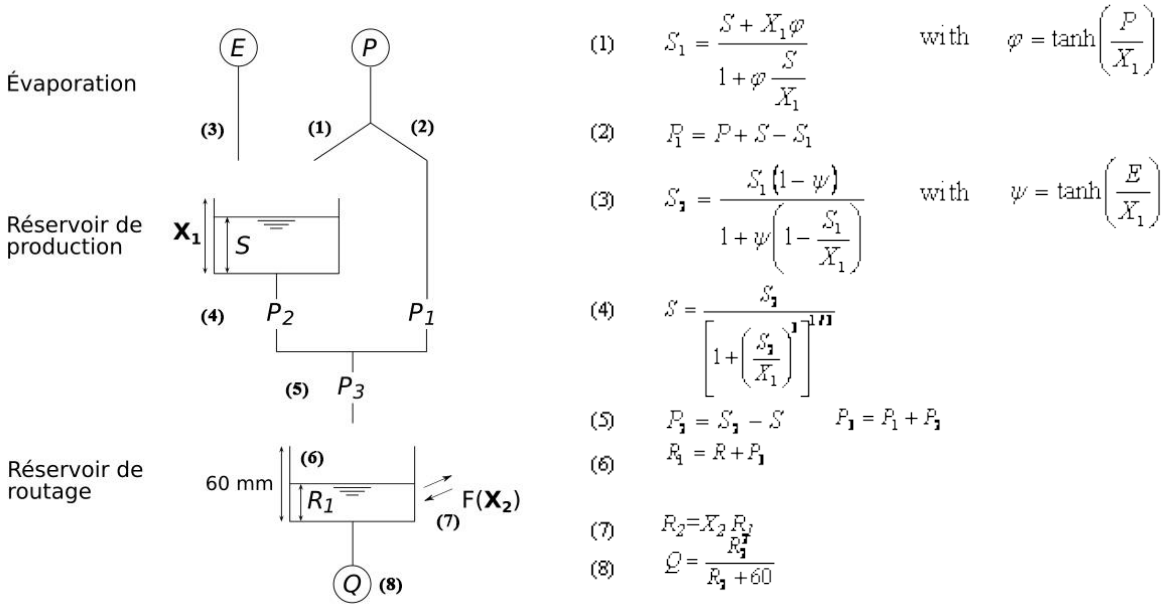


Figure 6.1 Fonctionnement et équations mathématiques du modèle GR2M (Mouelhi et al., 2006b)

A partir des variables d'entrée P et E, la simulation des débits s'opère à partir de deux paramètres optimisables :

- ✓ X_1 : capacité du réservoir de production (mm),
- ✓ X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-).

Sur un large échantillon de bassins versants, Perrin *et al*., (2007) ont obtenu l'intervalle des valeurs des deux paramètres (Tab. 6.1).

Tableau 6.1 valeurs des deux paramètres du modèle GR2M

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140 - 2640
X_2 (-)	0.92	0.21 - 1.31

6.3.1.2 Présentation du modèle GR4J

Le modèle GR4J, développé au CEMAGREF dans les années 1980, est un modèle global de simulation pluie-débit à 4 paramètres au pas de temps journalier. Son objectif initial était de créer un modèle robuste et fiable pour la gestion des ressources en eau, le dimensionnement des ouvrages, la prévision des crues et étiages, la gestion des réservoirs, et la détection des impacts (Perrin *et al*., 2007). Malgré son caractère empirique, la structure du modèle GR4J présente des similitudes avec celle des modèles conceptuels à réservoirs.

La structure du modèle GR4J repose sur deux réservoirs : un réservoir de production nommé aussi réservoir 'Sol', un réservoir de vidange, et sur deux hydrogrammes unitaires (Fig. 6.2).

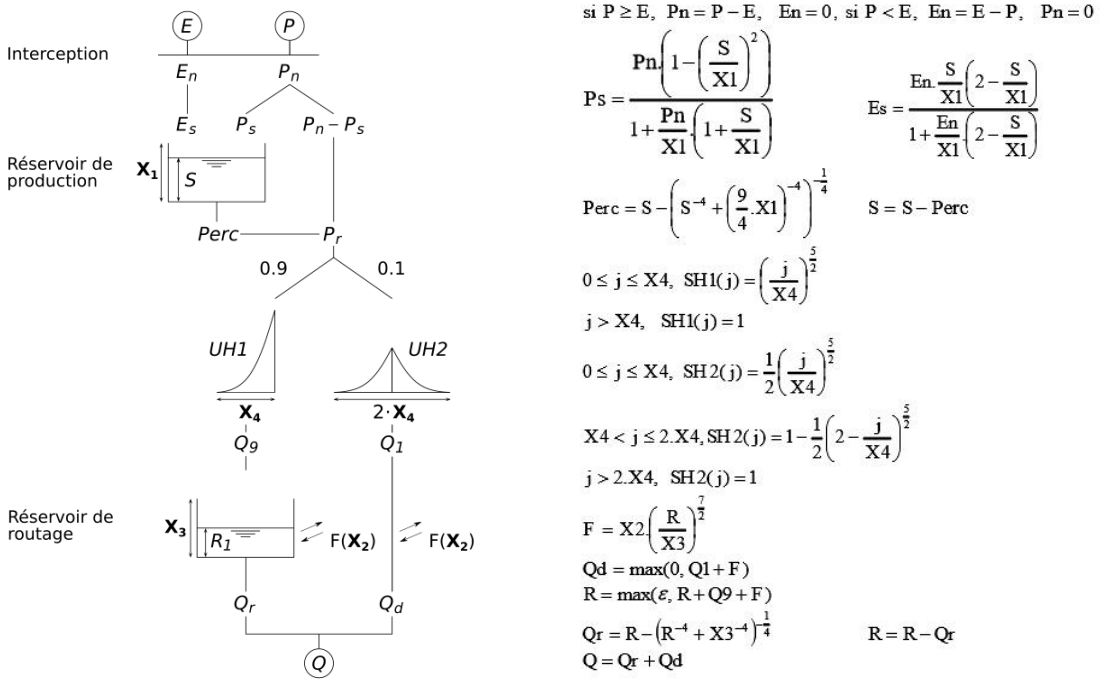


Figure 6.2 Fonctionnement et équations mathématiques du modèle GR4J (Perrin et al., 2003)

On désigne par P (mm/jour) la hauteur de la pluie et par E (mm/jour) l'ETP. La simulation des débits se fait à partir de ces deux variables en utilisant quatre paramètres :

- ✓ X_1 : capacité du réservoir de production (mm),
- ✓ X_2 : coefficient d'échanges souterrains (mm/jour),
- ✓ X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm),
- ✓ X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours).

Sur un large échantillon de bassins versants, Perrin *et al*., (2007) ont obtenu l'intervalle des valeurs des deux paramètres (Tab. 6.2).

Tableau 6.2 Valeurs des deux paramètres du modèle GR4J

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X_1 (mm)	350	100 à 1200
X_2 (mm)	0	-5 à 3
X_3 (mm)	90	20 à 300
X_4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

6.3.2 Le modèle SWAT

Le modèle SWAT est un modèle hydrologique continu, semi-distribué et fonctionne à un pas de temps journalier. Ce modèle est développé par Arnold *et al*., (1998) pour le service de recherche agricole de l'USDA (United States Department of Agriculture). SWAT permet d'intégrer les données climatiques, les processus hydrologiques et biologiques ainsi que des phénomènes complexes tels que l'érosion, l'infiltration et les pratiques agricoles, ... (Arnold *et al*., 2012). Il est utilisé pour prédire les effets des pratiques de gestion des terres sur les eaux de surface, les sédiments et les rendements des produits chimiques agricoles sur une longue période dans de grands bassins versants (Neitsch *et al*., 2011).

SWAT offre la possibilité de simuler un grand nombre de processus physiques dans un bassin versant avec une haute résolution spatiale (Sambou *et al*., 2021). Pour cela, le bassin versant est divisé en plusieurs sous-bassins versants qui sont eux-mêmes subdivisés en unités de réponse hydrologique "URH" (Arnold *et al*., 2012). Celles-ci sont des unités spatiales homogènes, caractérisées par un sol, un couvert végétal, et une pente, à partir desquelles les calculs du modèle sont effectués (Annexe 6.1).

Le cycle hydrologique du modèle SWAT est basé sur l'équation de bilan hydrique suivante (Neitsch *et al*., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \qquad \textit{(Équation 6.1)}$$

où t est le temps en jours, SW_t (mm) et SW_0 (mm) représentent respectivement l'humidité contenue dans le sol à l'instant t et à l'instant initial, R_{day} (mm) la lame précipitée à l'instant i, W_{seep} (mm) la lame infiltrée dans le sol à partir de la surface à l'instant i, Q_{surf} (mm) est la lame disponible pour le ruissellement à l'instant i, Q_{gw} (mm) le débit de base provenant de la nappe d'eau souterraine à l'instant i, et E_a (mm) est l'évapotranspiration à l'instant i.

Pour estimer l'évapotranspiration, SWAT adopte trois méthodes : Hargreaves, Priestley et Taylor et Penmann-Monteith. Compte tenu de la disponibilité des données l'évaporation a été estimée par la méthode Penman (1956). Parmi les deux méthodes d'estimation de ruissellement et d'infiltration, la méthode du "Curve Number" (CN) et la méthode d'infiltration de Green et Ampt, nous avons retenu la méthode "CN" mise au point par le SCS (Soil Conservation Service) (Mockus, 1972). Enfin, pour estimer le ruissellement à travers le réseau hydrographique la méthode du coefficient de stockage variable développée par Williams (1969) a été choisie dans cette étude.

6.4 Les variables et paramètres

Le modèle GR se caractérise par sa simplicité en ce qui concerne les données, car il se limite essentiellement aux variables climatiques nécessaires à la modélisation hydrologique. En revanche, SWAT nécessite non seulement ces variables climatiques, mais également des données plus détaillées, telles que des informations sur la topographie, l'occupation du sol, la pédologie, la géologie et la couverture végétale.

6.4.1 Les variables de forçage

Les modèles utilisés nécessitent deux variables de forçage essentielles, les précipitations et les températures, ou la demande évaporatoire de l'air (ETP). Les précipitations et l'ETP sont exprimées en millimètres (mm), tandis que les températures sont exprimées en degrés Celsius (°C) à l'échelle mensuelle ou journalière en fonction du modèle. La période commune pour ces ensembles de données couvre une durée de 37 ans, de 1982 à 2019.

6.4.1.1 Précipitations

Les données de précipitation journalières utilisées proviennent de six stations pluviométriques situées dans le HaB-OER (Ahm, Ava, Cha, Tag, Tam et Tar) ainsi que de douze stations situées dans ses environs (Chap. 3). Ces données ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG) afin de calculer les moyennes de précipitation sur les bassins versants aux pas de temps journalier et mensuelle à partir de la méthode de Thiessen. Les précipitations sur les bassins relèvent donc d'une moyenne arithmétique des valeurs aux stations correspondantes pour chaque sous-bassin versant.

6.4.1.2 Températures et ETP

Les stations d'Ahmed El Hansali et de Tarhat sont les seules stations mesurant les températures à l'échelle du HaB-OER. Les données manquantes ont été obtenues à partir du projet POWER de la NASA (Chap. 3). Ces données ont été utilisées pour calculer l'ETP par la méthode d'Oudin *et al*., (2005). Il s'agit d'une méthode empirique simple qui présente des avantages significatifs en termes d'accessibilité des données, de performance validée et d'applicabilité dans divers domaines de la gestion des ressources en eau.

6.4.2 Les paramètres

6.4.2.1 Modèle Numérique de Terrain

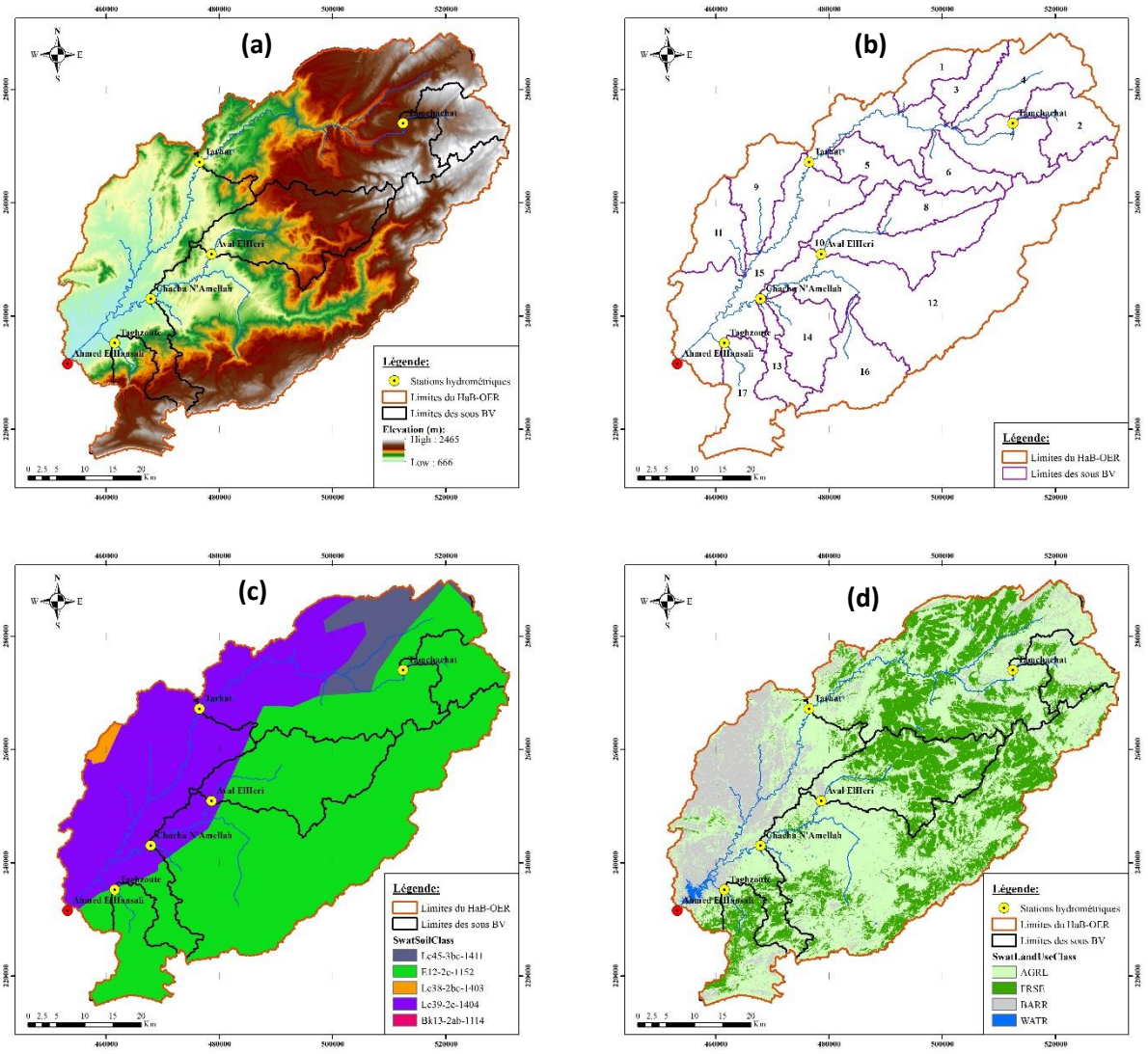
Avant de procéder aux calculs des processus hydrologiques, il est nécessaire de déterminer certaines caractéristiques géographiques et hydrologiques à partir des données du Modèle Numérique de Terrain (MNT) (Carte 6.1.a). Dans cette étude, la topographie et les pentes ont été dérivées du Modèle Numérique de Terrain "TanDEM-X DEM" (© DLR, 2021) produit par le Centre Aérospatial Allemand (Chap. 2). Le MNT a été utilisé pour délimiter le bassin versant et les sous-bassins (Carte 6.1.b), ainsi que pour extraire le réseau hydrographique. De plus, la carte des pentes du bassin a été créée en utilisant une classification en quatre classes de pentes.

6.4.2.2 Sols

Les caractéristiques précises des sols (horizon, profondeur et texture) sont essentielles dans la modélisation hydrologique puisqu'elles déterminent le rôle répartiteur de la pluie entre ruissellement et infiltration. Il existe cependant peu d'études pédologiques spécifiques au bassin de l'Oum Er Rbia amont c'est la raison pour laquelle nous avons eu recours à la base de données mondiale harmonisée des sols "HWSD" (FAO *et al*., 2009). Elle a été élaborée dans le cadre d'une collaboration entre la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) et l'IIASA (Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués) et en partenariat avec l'ISRIC (Centre international de référence et d'information sur les sols), l'ESBN (Réseau du Bureau européen des sols) et l'ISC-CAS (Institut de la science des sols - Académie chinoise des sciences) (Carte 6.1.c). D'une résolution spatiale de 1 km² ses données ont été utilisées avec succès dans des modélisations SWAT (Brouziyne *et al*., 2021). Au HaB-OER, trois types de sols ont été identifiés : limoneux, limoneux argileux et limoneux argileux sableux, et les caractéristiques des deux horizons qui les constituent sont reportées dans l'annexe 6.2.

6.4.2.3 Occupation du sol

L'occupation du sol a un impact significatif sur le cycle hydrologique, influençant ainsi les processus hydrologiques tels que l'infiltration, le stockage de l'humidité du sol, et les pertes par évapotranspiration, ce qui a des conséquences sur les ressources en eau du bassin (Swain *et al*., 2022). En effet, une meilleure estimation des paramètres relatifs à l'occupation du sol améliore les performances des modèles hydrologiques (El-Sadek & Irvem, 2014), en particulier ceux basés sur des processus physiques tels que SWAT. Récemment, la télédétection et les techniques géospatiales, telles que la classification, ont été largement reconnues pour leur capacité à fournir des informations précises sur l'occupation du sol. Ces méthodes incluent divers algorithmes, dont l'algorithme des "forêt d'arbres décisionnels" (Random Forest, RF) (Breiman, 2001). Cet algorithme nous a permis de générer une carte d'occupation du sol pour le HaB-OER, comprenant quatre classes : forêts, zones cultivées et pâturages, sols nus et eau (Carte 6.1.d), à partir d'une image satellite Landsat-8 datant du 05/08/2020, avec une précision globale de 99%. Nous aborderons en détail cette section sur la classification dans le chapitre 9.



Carte 6.1 a) Hypsométrie ; b) Sous-bassins ; c) Sols et d) Occupation du sol dans le HaB-OER

6.5 Choix des méthodes, périodes de calage et de validation

6.5.1 Les modèles GR

6.5.1.1 Le package "airGR"

Parmi les différents langages de programmation dans lesquels les modèles hydrologiques sont codés, on trouve le langage R (R Core Team, 2022), qui est un langage interprété open source. Facile à utiliser et intéressant une communauté grandissante, l'essor de son utilisation en hydrologie est visible à travers la publication croissante de nouveaux packages hydrologiques (Slater *et al*., 2019), dont certains sont conçus pour la modélisation hydrologique. Les fonctionnalités du langage R sont contenues dans des paquets, dont certains comprennent des fonctionnalités liées à l'hydrologie (Astagneau *et al*., 2021). C'est le cas du package airGR (Coron *et al*., 2023) qui implémente les modèles constituant la suite des modèles hydrologiques GR (GR4H, GR5H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M, GR1A et CemaNeige). Le développement du package "airGR" visait deux objectifs principaux : faciliter son utilisation par des utilisateurs non-experts et offrir une flexibilité pour l'ajout de critères ou d'algorithmes d'ajustement (Coron *et al*., 2017).

Le package utilisé est le "airGRteaching" (Delaigue *et al*., 2018, 2020) dont la mise en œuvre est facilitée par une interface graphique ergonomique facilitant d'une part sa paramétrisation et d'autre part une calibration automatique par un choix de fonctions objectif. Ce package présente également comme point notable des sorties graphiques pré-implémentées offrant la possibilité d'explorer les données et d'analyser les résultats de la modélisation à partir de plusieurs panneaux graphiques pour visualiser les données des précipitations, les hydrogrammes simulés et observés,... (Astagneau *et al*., 2021). Cet environnement de modélisation est donc propice à un déploiement sur de nombreux bassins versants et se révèle utile pour généraliser les résultats en les confrontant à plusieurs bassins versants.

6.5.1.2 Choix des périodes de calage et de validation

Les modélisateurs subdivisent leur base de données d'observations en deux périodes distinctes : une pour la calibration et l'autre pour la validation. Cette séparation prend de nombreuses formes, notamment celle de Klemeš (1986) nommée méthode "split-sample test". La méthode propose de diviser les données en deux périodes égales (C_{50}/V_{50}) lorsque la durée est suffisamment longue, tandis que pour une durée insuffisante, une division basée sur 70% pour la calibration et 30% pour la validation est utilisée (C_{70}/V_{30}) (H. Shen *et al*., 2022).

Après avoir tester les deux méthodes, celle de C_{50}/V_{50} a été adoptée pour GR4J. La période entre 1982 et 1984 a été utilisée pour l'initialisation du modèle, la période de 1985 à 2003 a été utilisée pour la calibration, tandis que la période de 2003 à 2019 a été utilisée pour la validation. Pour le GR2M, environ les deux tiers des données ont été utilisés pour la calibration, et le reste pour la validation. La période entre 1982 et 1986 a été utilisée pour l'initialisation du modèle, la période de 1987 à 2007 a été utilisée pour la calibration, tandis que la période de 2008 à 2019 a été utilisée pour la validation.

6.5.1.3 Utilisation du code "airGR"

Après avoir préparé les fichiers de données, déterminé les périodes de calibration et de validation, et importé l'ensemble de données dans RStudio, les deux modèles sont prêts pour la simulation.

Le package airGR est principalement basé sur trois familles de fonctions (Coron *et al*., 2017) (Fig. 6.3):

- Les fonctions RunModel () sont utilisées pour appeler un modèle donné et effectuer une simulation à partir d'un ensemble de paramètres. RunModel_GR1A() et RunModel_GR4J() sont des exemples de ces fonctions.

- Les fonctions ErrorCrit () sont utilisées pour calculer un critère d'efficacité donné sur la base des séries de débits observées et simulées. Les critères d'efficacité peuvent être utilisés pour le calibrage ou l'évaluation des modèles. Le paquet comprend l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le critère de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) et le critère de Kling-Gupta (Gupta *et al*., 2009), avec les fonctions correspondantes : ErrorCrit_RMSE(), ErrorCrit_NSE() et ErrorCrit_KGE().

- La fonction Calibration_Michel() est utilisée pour calibrer un modèle avec l'algorithme et la fonction objectif sélectionnés. La calibration automatique peut être réalisée à l'aide d'algorithmes de calibration provenant d'autres packages sur R ou grâce à l'algorithme spécifique au package, qui est dérivé de l'approche de Michel (Astagneau *et al*., 2021).

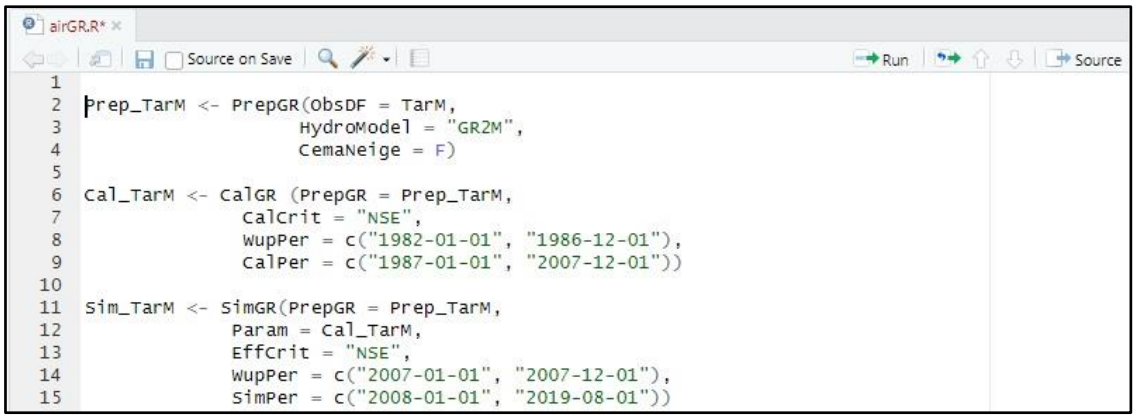


Figure 6.3 Extrait du code utilisé pour exécuter le modèle GR2M

6.5.2 Le modèle SWAT

6.5.2.1 Choix des périodes de calage et de validation

La performance d'un modèle dépend fortement de la période de calibration choisie (Myers *et al*., 2021). Ainsi, le choix de la division des données est une décision clé lors de l'élaboration d'un modèle. En outre, il a été démontré que les différences climatiques entre les périodes de calibration et de validation peuvent influencer les performances des modèles. (Coron *et al*., 2012). Par conséquent, certains chercheurs ont développé des codes qui permettent aux utilisateurs de générer des sous-périodes de calibration et de validation qui prenne en considération les variétés de conditions climatiques (Dakhlaoui *et al*., 2020). D'autres chercheurs ont développé des algorithmes pour déterminer le fractionnement optimal qui peut être appliqué sur l'ensemble de données (Fathi *et al*., 2023).

A l'inverse des deux propositions de GR, on propose une approche mixte dans laquelle les années de calibration et de validation sont échantillonnées de manière aléatoire (Arsenault *et al*., 2018) tout en prenant en considération l'homogénéité des périodes sèches et humides, la moyenne et l'écart type des chroniques (Tab. 6.3). La période entre 1982 et 1984 a été utilisée pour l'initialisation du modèle, les sous périodes 1985-95 et 2007-12 ont été utilisées pour la calibration, alors que les périodes 1996-06 et 2013-19 ont été utilisées pour la validation.

Tableau 6.3 Caractéristiques statistiques des sous périodes de calibration / validation choisies

	Ava		**Cha**		**Tag**		**Tam**		**Tar**	
	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	Moy	Moy	ET
Calage	2,27	1,66	6,88	6,26	0,9	0,86	0,71	0,71	15,46	7,04
Validation	2,25	1,52	7,14	6,2	0,91	0,87	0,69	0,69	14,4	5,93

6.5.2.2 Mise en œuvre de "ArcSWAT 2012"

Selon K. Abbaspour *et al*., (2017), les principales étapes de construction du modèle SWAT sont les suivantes :

- ✓ la création du modèle à l'aide d'un programme hydrologique, dans notre cas "ArcSWAT" ;
- ✓ la réalisation d'une analyse de sensibilité ;
- ✓ la réalisation d'une calibration et d'une analyse d'incertitude ;
- ✓ la validation.

L'exécution du modèle implique la délimitation des bassins versants, ce qui est essentiel pour définir les URH utilisées dans les calculs du modèle SWAT. Ces opérations requièrent

l'intégration de toutes les données présentées précédemment. En fait, le bassin versant a été subdivisé en 17 sous-bassins et 142 URH, chaque URH ayant une combinaison d'occupation du sol, type de sol et classe de pente.

La calibration a été appliquée pour optimiser les paramètres les plus sensibles en utilisant la procédure SUFI-2 sous le logiciel SWAT-CUP. En plus des données pédologiques, topographiques, climatiques et d'occupation du sol, plus de 600 paramètres peuvent être calibrés. Les paramètres d'écoulement de surface, tels que "CN2", ceux influençant l'évapotranspiration et les paramètres de débits de base sont généralement les plus modifiés (Arnold *et al*., 2012). Parmi les cinq procédures algorithmiques que comprend SWAT-CUP (SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol et MCMC) nous avons retenu le programme SUFI-2 "Sequential Uncertainty Fitting V_2" (K. C. Abbaspour & Johnson, 2004) pour le calibrage et la validation du modèle. L'incertitude des paramètres d'entrée est représentée par des distributions uniformes tandis que l'incertitude des résultats du modèle est quantifiée par l'incertitude de prédiction à 95 % (95PPU) calculée aux niveaux 2,5 % et 97,5 % de la distribution cumulative des variables de sortie (K. C. Abbaspour *et al*., 2007). Le modèle a été calibré et validé sur les jeux de données de débit des stations (Fig. 6.4). Chaque station a été calibrée indépendamment en changeant les paramètres liés à ses sous-bassins. Une fois les paramètres optimaux validés, leurs valeurs sont fixées avant de passer aux stations suivantes (Taia *et al*., 2023).

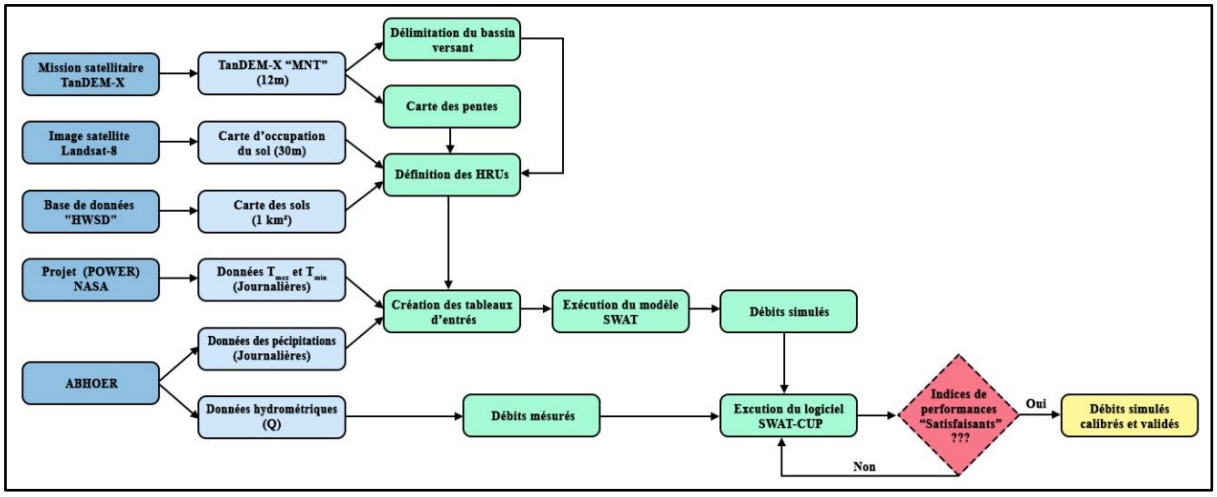


Figure 6.4 Organigramme général de la modélisation basée sur SWAT

6.6 Les indices de performances des modèles

La calibration des modèles hydrologiques est un défi mondial en raison de l'incertitude liée à la multitude des paramètres (Boukhari Taleb *et al*., 2021). Les modèles hydrologiques font souvent appel à des critères de performance pour évaluer et ajuster la similarité entre les débits observés et les débits simulés. En effet, il existe divers critères qui se basent sur les métriques d'erreur des séries temporelles. Jackson *et al*., (2019) ont passé en revue plus de 60 critères différents ainsi que diverses modifications courantes, avec leurs forces et leurs faiblesses. Ils recommandent d'utiliser une caractérisation complète comprenant plusieurs mesures et une analyse graphique.

La performance des modèles choisis a été évaluée en premier lieu graphiquement, ensuite par des indices statistiques. Sur la base d'une synthèse de mesures de performance, Moriasi *et al*., (2015) recommandent plusieurs coefficients statistiques dont quatre sont les plus utilisés sont : le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de Nash Sutcliffe (NSE), le biais (PBIAS) et l'erreur quadratique (RSR) (Tab. 6.4 et 6.5).

Tableau 6.4 Critères statistiques utilisés pour évaluer la performance hydrologique du modèle SWAT (Moriasi et al., 2012)

Critère	Intervalle admis	Valeur optimale
$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_s - \bar{Q}_s)^2}$	0 à 1	1
$NSE = 1 - \frac{\sum_i \left(\sqrt{Q_m} - \sqrt{Q_s}\right)_i^2}{\sum_i \left(\sqrt{Q_m} - \sqrt{\bar{Q}}\right)^2}$	-∞ à 1	1
$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_m}$	-∞ à ∞	0
$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - \bar{Q}_m)^2}}$	0 à ∞	0

Où Q_m, Q_s sont les valeurs mesurées et simulées.

Tableau 6.5 Les performances des indices statistiques utilisés (Moriasi et al., 2007)

Évaluation des performances	R^2	NSE	PBIAS	RSR
Insatisfaisant	≤ 0.5	≤ 0.5	≥ ±25	> 0.7
Satisfaisant	0.5 <R^2≤ 0.7	0.5 <NSE≤ 0.65	±15 ≤PBIAS< ±25	0.6 <RSR≤ 0.7
Bonne	0.7 <R^2≤ 0.8	0.65 <NSE≤ 0.75	±10 ≤PBIAS< ±15	0.5 <RSR≤ 0.6
Très bonne	> 0.8	0.75 <NSE≤ 1	< ±10	0 <RSR≤ 0.5

6.7 Mise en œuvre et résultats

6.7.1 Modèles GR

6.7.1.1 GR2M

Après avoir modifié l'ensemble des fonctions responsables de la mise en œuvre du modèle GR2M dans le logiciel RStudio, les paramètres X_1 et X_2 ont été automatiquement calibrés en utilisant le critère NSE comme fonction objectif. Les valeurs obtenues ont été utilisées pour valider le modèle sur la période 2007-2019.

Les résultats des critères de performance obtenus pour les stations du HaB-OER sont globalement acceptables (Tab. 6.6). Au cours de la période de calibration, les valeurs de R^2 et NSE dépassent respectivement 0,51 et 0,56, ce qui indique une certaine adéquation entre les données observées et les simulations. De plus, les valeurs de PBIAS et RSR sont inférieures à -11 et 0,66 respectivement, ce qui suggère une bonne correspondance entre les valeurs simulées et observées.

Pour la période de validation, les valeurs de R^2 dépassent 0,57 pour l'ensemble des stations, ce qui est considéré comme satisfaisant. Le PBIAS est très bon pour la station de Tarhat et satisfaisant pour la station de Tamchachat. En ce qui concerne le NSE, à l'exception de la station de Taghzout avec une valeur négative et la station d'Aval El Héri avec une valeur inférieure à 0,5, les résultats des autres stations sont considérés comme satisfaisants. Les résultats de l'indice RSR sont satisfaisants voir bons pour les stations de Chacha n'Amellah, Tamchachat et Tarhat.

Tableau 6.6 Résultats de la performance du modèle GR2M aux différentes stations

	Calibration				Validation			
	R^2	PBIAS	NSE	RSR	R^2	PBIAS	NSE	RSR
Aval El Héri	0.61	-11	0.56	0.66	0.63	-34.4	0.47	0.73
Chacha n'Amellah	0.7	-2.2	0.68	0.56	0.7	-25.3	0.6	0.63
Taghzoute	0.82	-2.5	0.81	0.44	0.81	69.8	-0.27	1.12
Tamchachat	0.68	-9	0.68	0.56	0.57	-19.2	0.56	0.66
Tarhat	0.79	0.5	0.79	0.45	0.75	7.9	0.69	0.55

Les critères de performance indiquent donc des résultats acceptables pour la plupart des stations du HaB-OER. Les hydrogrammes des débits simulés et observés aux stations sélectionnées démontrent que le modèle GR2M parvient à reproduire les débits observés que cela soit pour les crues ou les étiages (Annexe 6.3). Le modèle présente les meilleures performances pour la station de Tarhat (Fig. 6.5).

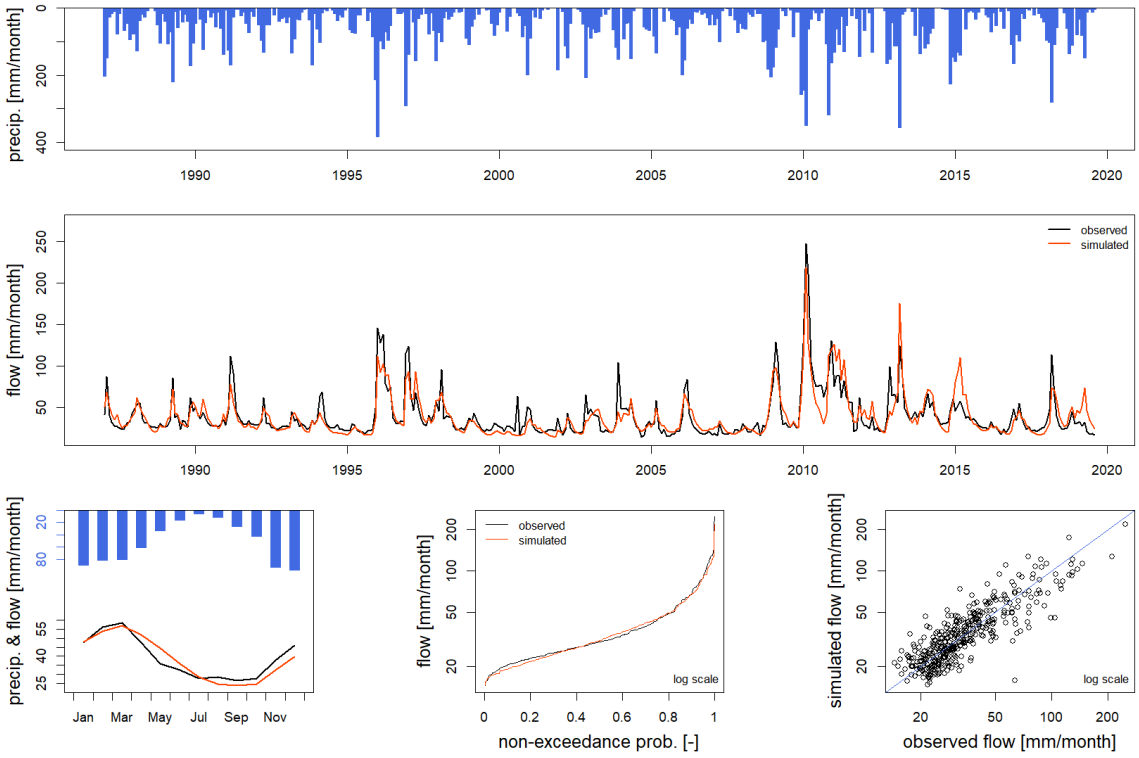


Figure 6.5 Hydrogramme des débits simulés et observés par le modèle GR2M pour la station de Tarhat sur la période 1982-2019

6.7.1.2 Modèle GR4J

Tout comme pour GR2M, les paramètres X_1, X_2, X_3 et X_4 de GR4J ont été automatiquement calibrés en utilisant le critère NSE comme fonction objectif. Les valeurs obtenues ont été utilisées pour valider le modèle sur la période de 2003 à 2019. Une comparaison graphique et statistique a été effectuée entre les débits observés et simulés, avec un pas de temps journalier et mensuel.

À l'échelle journalière, les résultats des critères de performance varient considérablement d'une station à une autre et selon les périodes analysées (Tab. 6.7). Pour la période de calibration, à l'exception de la station de Taghzout qui a enregistré des valeurs insatisfaisantes, les autres stations ont obtenu des résultats globalement satisfaisants. Cependant, pour la période de validation, la plupart des critères de performance sont insatisfaisants.

Tableau 6.7 Résultats de la performance du modèle GR4J aux différentes stations à l'échelle journalière

	Calibration				Validation			
	R^2	PBIAS	NSE	RSR	R^2	PBIAS	NSE	RSR
Aval ElHéri	0.52	-7.2	0.52	0.69	0.5	-34.3	0.37	0.8
Chacha n'Amellah	0.55	-7.5	0.55	0.67	0.55	-30.8	0.45	0.74
Taghzoute	0.5	34.2	0.48	0.72	0.47	75.6	0.19	0.9
Tamchachat	0.54	-10.9	0.53	0.69	0.38	-17.7	0.37	0.79
Tarhat	0.64	-13.6	0.47	0.73	0.53	-6.1	0.41	0.77

Les débits de pointe correspondent aux données observées pour la station de Tarhat. Cependant, un problème de capture de faibles débits a été remarqué (Fig. 6.6). De plus, le modèle GR4J reproduit de manière acceptable les débits pour la station de Tamchachat, tandis qu'il surestime les débits des autres stations (Annexe 6.4). La divergence constatée entre les données observées et les simulations est en accord avec les défis de modélisation à l'échelle journalières, en raison de la complexité de la variabilité temporelle et spatiale des débits, conditionnée par la variabilité de nombreux facteurs météorologiques et physiographiques.

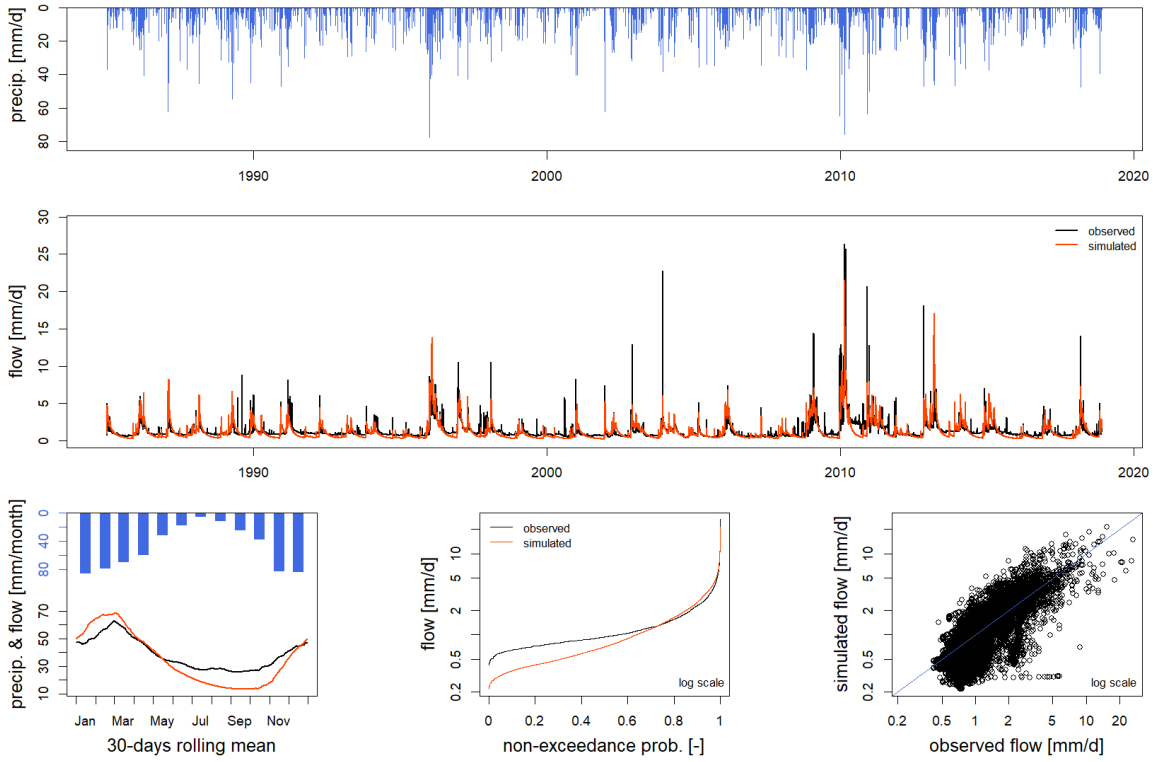


Figure 6.6 Hydrogrammes des débits simulés et observés par le modèle GR4J pour la station de Tarhat sur la période 1982-2019

6.7.2 SWAT

6.7.2.1 Analyse de la sensibilité des paramètres

Dans les bassins montagneux, les précipitations et les températures sont étroitement liées aux altitudes. Pour tenir compte de cet effet orographique sur les variables climatiques, des bandes d'altitude ont été générées pour chaque URH. Les deux paramètres PLAPS et TLAPS ont ensuite été appliqués sur l'ensemble des URH afin d'ajuster les valeurs de précipitations et de températures. Sur la base de ces variables de forçages la méthode suivie pour la calibration du modèle s'est appuyée sur les travaux d'Arnold *et al.*, (2012), qui ont permis d'identifier une vingtaine de paramètres les plus influents, et les études sur le bassin de l'Oum Er Rbia dans lesquelles le modèle SWAT a déjà été appliqué avec succès (Kharchaf *et al.*, 2013; Milewski *et*

al., 2019; Strohmeier *et al*., 2020). Le programme SUFI-2 a été utilisé pour analyser la sensibilité des paramètres retenus a priori ; plus la valeur absolue du t-stat est grande et plus la "p-value" est petite plus le paramètre est sensible (K. Abbaspour *et al*., 2017). L'analyse de la sensibilité nous a permis d'identifier les neuf paramètres qui gouvernent le plus l'hydrologie du bassin du HaB-OER (Tab. 6.8).

Tableau 6.8 Les paramètres de calibration les plus sensibles

Paramètres	Signification	t-Stat	p-Value
R__CN2.mgt	SCS runoff curve number	-96.03	0.00E+00
R__SOL_AWC(..).sol	Available water capacity of the soil layer	7.24	0.00E+00
R__SOL_K(..).sol	Saturated hydraulic conductivity	-5.52	3.90E-08
V__ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	-5.39	7.90E-08
R__SOL_BD(..).sol	Moist bulk density	-2.87	4.19E-03
R__HRU_SLP.hru	Average slope steepness	-2.68	7.53E-03
V__CH_K$_2$.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	1.94	5.19E-02
V__EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	1.93	5.41E-02
V__RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction	1.68	9.33E-02

6.7.2.2 Calibration et validation

Durant le processus de calage, le modèle a été utilisé avec les paramètres les plus sensibles pour définir leurs valeurs optimales. Plus d'une dizaine d'itérations de 350 simulations ont donné des fonctions objectives satisfaisantes en utilisant SUFI-2. Les meilleures valeurs de paramètres obtenues ont été utilisées pour valider le modèle. La comparaison des débits observés et simulés a été effectuée sur un pas de temps mensuel.

La plupart des valeurs des critères statistiques se situent dans les catégories "bon" et "très bon" (Tab. 6.9) ce qui suggère que le modèle décrit raisonnablement les processus hydrologiques dans le Hab-OER.

Tableau 6.9 Résultats de la performance du modèle SWAT aux stations du HaB-OER

	Calibration 1982-95 et 2007-12				**Validation 1996-06 et 2013-19**			
	R^2	PBIAS	NSE	RSR	R^2	PBIAS	NSE	RSR
Aval El Héri	0.92	-4.48	0.92	0.28	0.85	-19.84	0.56	0.66
Chacha n'Amellah	0.89	1.23	0.89	0.34	0.82	-6.07	0.67	0.57
Taghzoute	0.72	3.64	0.71	0.54	0.72	-14.94	0.68	0.56
Tamchachat	0.62	-1	0.62	0.61	0.71	-35.54	0.62	0.62
Tarhat	0.87	4.11	0.86	0.37	0.81	-14.18	0.68	0.56

Pour la période de calibration, les performances des critères des trois stations d'Aval El Héri, Chach n'Amellah et Tarhat sont très bonnes. Le PBIAS est très bon pour l'ensemble des stations, tandis que les autres critères sont bons pour la station de Taghzoute et satisfaisants pour la station de Tamchachat. En ce qui concerne la période de validation, à l'exception du PBIAS insatisfaisant pour la station de Tamchachat, les autres critères sont satisfaisants et bons pour la même station, satisfaisants et très bons pour la station d'Aval El Héri, bons pour la station de Taghzoute, et bons à très bons pour la station de Chach n'Amellah.

De plus, la comparaison graphique démontre une bonne concordance entre les débits observés et simulés (Fig. 6.7 et Annexe 6.5). Les moyennes et les écarts types des débits simulés sont très proches de ceux observés de toutes les stations. En effet, la plupart des débits de pointe et des faibles débits correspondent bien aux données observées pendant les périodes de calibration et de validation. Cette bonne concordance entre les simulations et les observations témoigne de la performance satisfaisante de la calibration du modèle et de sa capacité à représenter les différentes conditions climatiques.

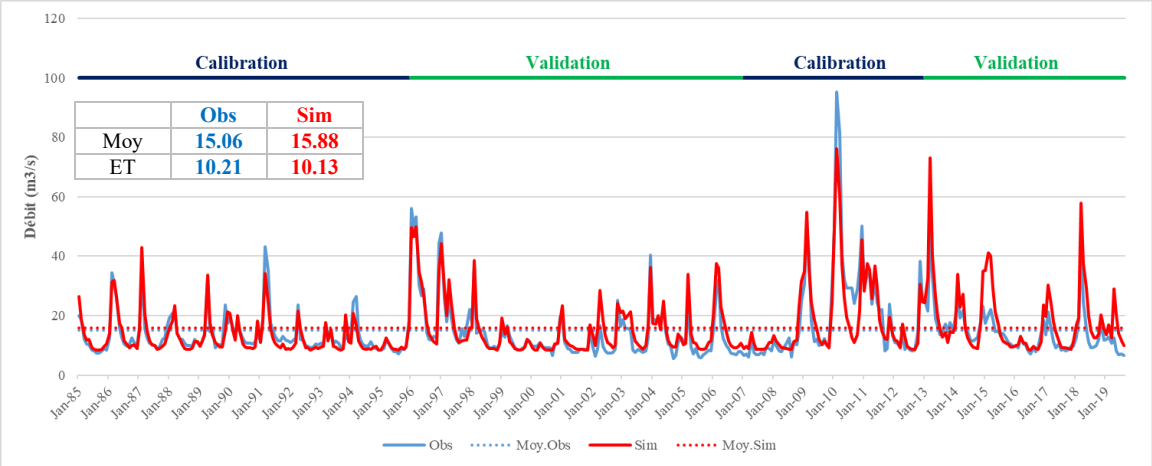


Figure 6.7 Hydrogrammes des débits mensuels observés et simulés à la station de Tarhat entre 1982 et 2019

6.7.2.3 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique généré par le modèle SWAT pour le HaB-OER montre que la moyenne annuelle des précipitations entre 1982 et 2019 est de 543 mm (Fig. 6.8). A l'instar de la plupart des études effectuées dans les zones arides et semi-arides, les différents termes du bilan sont dominés par l'évapotranspiration qui élimine 322 mm, soit 60% des précipitations, très proche aux 65% et 61% estimées respectivement par Serbout (2001) et Khalil (2002) pour la même zone. Le ruissellement de surface représente 58 mm, soit 10 % des précipitations et 32% d'un débit total de l'ordre de 181mm. La quantité de précipitations infiltrée ou percolée représente 163 mm, soit 30 % des précipitations. La contribution des eaux percolées et la part infiltrée dans le débit est de 68 %. L'alimentation par les apports souterrains contribue à la régulation et la pérennité de l'écoulement pendant toute l'année. Généralement, ces résultats sont proches avec ceux de l'étude d'El Orfi *et al*. (2021), qui ont prouvé qu'environ 70% des précipitations qui tombent sur le HaB-OER s'évaporent, s'interceptent ou s'infiltrent, le 30% restant alimente les écoulements, dont 24% aliment les écoulements de base et 6% les écoulement de crue.

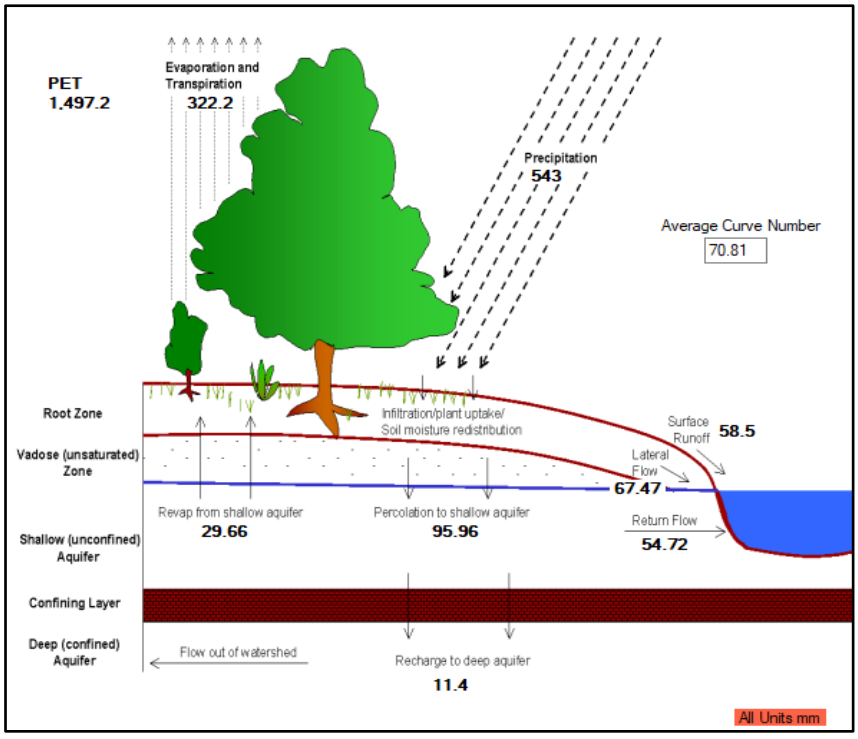


Figure 6.8 Bilan hydrique du HaB-OER pour la période 1982-2019

6.8 Comparaison entre GR et SWAT

Une gestion efficace des ressources en eau dans le HaB-OER requiert des évaluations fiables des ressources en eau, tandis que la modélisation hydrologique peut apporter une aide précieuse à cet égard. Grâce aux avancées technologiques en informatique et en programmation, les chercheurs ont développé divers modèles hydrologiques, tels que GR et SWAT, qui sont largement utilisés dans différentes régions du monde. La performance de ces modèles a été démontrée à plusieurs reprises, bien que le modèle parfait n'existe pas.

La performance d'un modèle dépend fortement de la période de calibration choisie (Myers *et al.*, 2021). Les modèles GR et SWAT ont été calibrés sur des périodes différentes afin d'obtenir les meilleures performances pour chacun d'entre eux. Les débits simulés par les trois modèles sur la période commune entre 1987 et 2019 ont été harmonisés à l'échelle mensuelle et annuelle. Les résultats des trois modèles sont satisfaisants, avec une nette préférence pour le modèle SWAT (Fig. 6.9). Pour les trois modèles, les meilleures performances sont observées à la station de Tarhat, tandis que les performances les plus faibles sont enregistrées à la station de Taghzoute, en particulier pour les modèles GR.

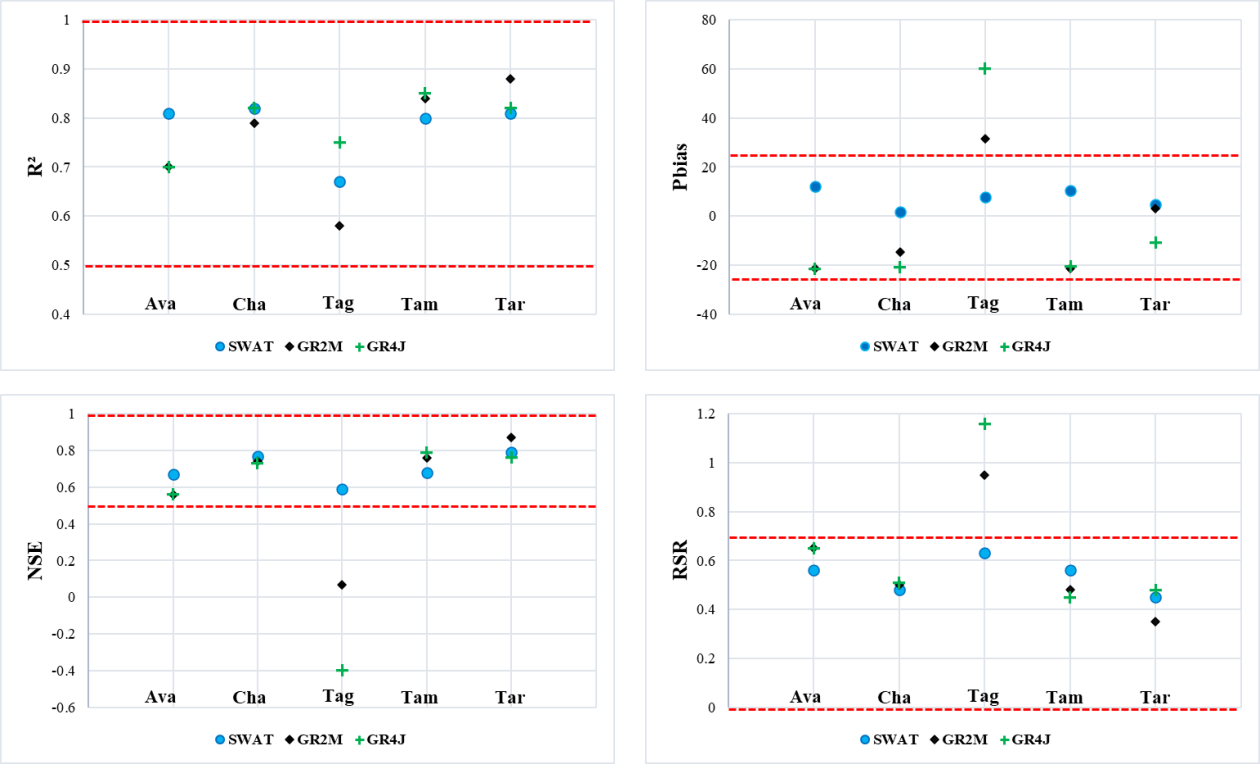


Figure 6.9 Critères de performance et leurs seuils de satisfaction des trois modèles pour les stations du HaB-OER

D'après l'analyse graphique des débits observés et simulés aux stations du HaB-OER (Fig. 6.10 et Annexe 6.6), il semble qu'il existe une concordance satisfaisante à l'échelle annuelle entre les débits observés et les débits simulés. De plus, la comparaison graphique des données mensuelles confirme cette cohérence entre les différents ensembles de données, en particulier pour le modèle SWAT (Fig. 6.11 et Annexe 6.7). Ces résultats démontrent que les simulations sont en accord avec les observations réelles faites sur le HaB-OER, tant au niveau annuel qu'au niveau mensuel.

L'évaluation du pouvoir prédictif des modèles pluie-débit revêt une importance cruciale en hydrologie. Selon les résultats obtenus, les modèles utilisés s'adaptent aux conditions climatiques du HaB-OER et peuvent servir à simuler et prévoir les débits dans cette zone.

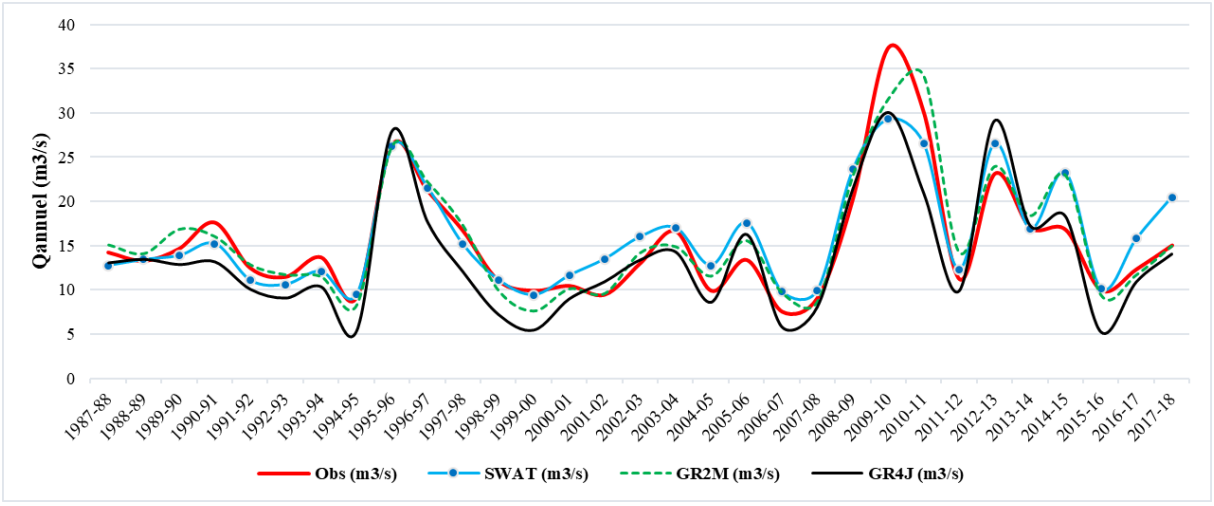


Figure 6.10 Comparaison des débits moyens annuels observés et simulés pour la station de Tarhat

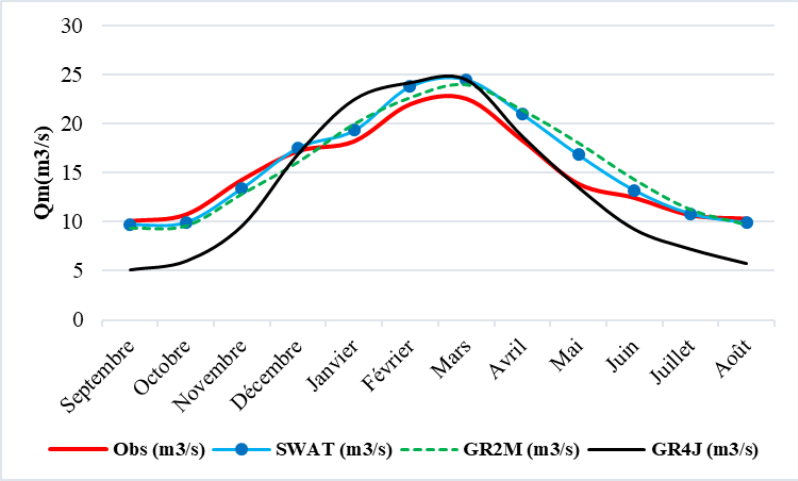


Figure 6.11 Comparaison des débits moyens mensuels observés et simulés pour la station de Tarhat

Les modèles distribués, tels que SWAT, permettent de prédire les différentes composantes hydrologiques du bassin versant qui varient dans l'espace (Anshuman *et al*., 2019). Grâce à sa représentation spatiale des caractéristiques physiques du bassin, SWAT a démontré des résultats convaincants (Otmane *et al*., 2019). Contrairement aux modèles conceptuels, il est capable de prédire de manière satisfaisante l'interaction entre le débit et les eaux souterraines (Anshuman *et al*., 2019). De plus, il présente une performance supérieure dans les bassins versants soumis à des interventions anthropiques tels que les barrages (Vilaseca *et al*., 2022). Par conséquent, le modèle SWAT est largement utilisé pour évaluer l'impact futur des changements climatiques sur les ressources en eau.

6.9 Conclusion

Il n'existe pas un accord absolu sur le meilleur modèle hydrologique, et le choix d'un modèle dépend davantage des objectifs et du contexte de l'étude, ainsi que de la disponibilité des données nécessaires à sa mise en œuvre. À l'échelle du bassin de l'HaB-OER, l'évaluation des performances des modèles hydrologiques GR2M, GR4J et SWAT a révélé des résultats satisfaisants ; les trois modèles sont en effet capables de reproduire de manière réaliste la variabilité des débits des cours d'eau.

Les modèles GR considèrent effectivement les caractéristiques physiques comme étant homogènes sur l'ensemble du bassin, permettant ainsi de simuler directement la réponse globale

sans prendre en compte la variabilité spatiale. En revanche, dans le modèle SWAT, les caractéristiques physiques de l'HaB-OER sont utilisées en tant que données d'entrée pour représenter ces caractéristiques physiographiques, ce qui conduit à un découpage spatial précis et, par conséquent, à une meilleure reproduction des débits. Il est à noter que l'approche semi-distribuée semble donner des résultats légèrement supérieurs à l'approche globale.

L'application du modèle SWAT sur le bassin HaB-OER a permis de modéliser le fonctionnement hydrologique du bassin versant en utilisant 142 unités de réponse hydrologique réparties dans 17 sous-bassins versants. Les performances du modèle ont été évaluées en utilisant les indicateurs de performance R^2, PBIAS, NSE et RSR, qui comparent les débits simulés par le modèle aux débits journaliers observés pendant les périodes de calibrage de 1982-1995 et 2007-2012, ainsi que de validation de 1996-2006 et 2013-2018. La plupart des valeurs des critères statistiques se situent dans les catégories "bon" et "très bon". Ces résultats convaincants sont probablement attribuables à la spatialisation des caractéristiques physiques du HaB-OER et à la meilleure représentation de la fonction de transfert des processus hydrologiques dans le modèle SWAT.

La modélisation hydrologique est un outil précieux et indispensable pour la gestion des ressources en eau dans le HaB-OER. À la lumière des résultats de calibration/validation, nous constatons que l'approche semi-distribuée produit des bons résultats. Le modèle SWAT peut être utilisé par la suite pour la simulation des débits et la prévision des débits futurs.

Chapitre 7 : Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le HaB-OER

7.1 Introduction

Le réchauffement climatique mondial dû aux activités humaines est un fait établi, avec une augmentation de la température moyenne à la surface du globe estimée à 1,1 °C pour la période 2011-2020 par rapport à 1850-1900 (GIEC, 2023). En augmentant le taux d'évaporation, ce phénomène global influence significativement la disponibilité des ressources en eau. Outre le réchauffement climatique, l'accroissement démographique exacerbe la situation, surtout dans les régions où l'eau est rare. La région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) souffre d'un manque d'eau, et la croissance démographique ainsi que l'utilisation de l'eau, en particulier pour l'irrigation, ont contribué au stress hydrique par des prélèvements supérieurs aux réserves renouvelables annuelles (Milewski *et al*., 2019). La tendance au réchauffement climatique s'est confirmée, de même que l'irrégularité des précipitations et l'augmentation des événements extrêmes, avec pour conséquence une dysrégulation du cycle saisonnier (Echakraoui *et al*., 2018).

En raison de sa situation sur la rive sud de la Méditerranée, le Maroc est typiquement un pays semi-aride qui a toujours souffert d'événements climatiques extrêmes. L'empreinte du changement climatique global est déjà clairement visible: la température moyenne du pays a augmenté de +0,42 °C/décennie depuis 1990 et la diminution des précipitations est estimée à plus de 20% entre 1961 et 2005 (Woillez, 2019). Depuis les années 1980 le Maroc connaît une situation de stress hydrique caractérisée par une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des sécheresses (Boufala *et al*., 2019). Corrélativement les ressources en eau sont surexploitées et approchent de la limite du prélèvement écologiquement durable des eaux souterraines et de surface (Chadli, 2018). La disponibilité en eau est passée de 2500 m^3 par personne en 1960 à 645 m^3 par personne en 2015, bien en dessous du "seuil de pauvreté de l'eau" de 1000 m^3/an/hab. Même sans modification de la disponibilité des ressources en eau, une population projetée de près de 44 millions d'habitants d'ici 2050 donnerait lieu à un ratio de 510 m^3 /an/hab. ce qui est proche du "seuil de rareté extrême de l'eau" de 500 m^3/an/hab (Dahan, 2017).

7.2 Méthodologie de l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau

En raison de leurs caractéristiques uniques, les bassins versants méditerranéens nécessitent des méthodologies de modélisation et des stratégies de gestion spécifiques. L'outil SWAT s'est avéré suffisamment adaptatif pour simuler les divers processus hydrologiques des bassins versants méditerranéens (Aloui *et al*., 2023). Afin de se préparer et de s'adapter à un climat changeant, il est essentiel de comprendre et de définir les impacts du changement climatique. Pour étudier l'impact hydrologique de ce changement, les chercheurs font appel à des modèles hydrologiques intégrés à des projections climatiques futures provenant de modèles climatiques globaux et/ou régionaux (Acharki *et al*., 2023). Lorsque les modèles hydrologiques démontrent une bonne performance dans le passé, cela renforce la fiabilité des impacts projetés et diminue l'incertitude associée à ces modèles hydrologiques (Jose & Dwarakish, 2020). Dans cette optique, nous envisageons de projeter des scénarios d'impact du climat futur sur les débits des cours d'eau du HaB-OER en utilisant le modèle hydrologique "SWAT", qui a été préalablement calibré et validé (Fig. 7.1). Les résultats de cette étude seront précieux pour orienter l'élaboration de pratiques de gestion adaptées, visant à assurer une gestion durable des ressources en eau dans le HaB-OER en réponse au changement climatique.

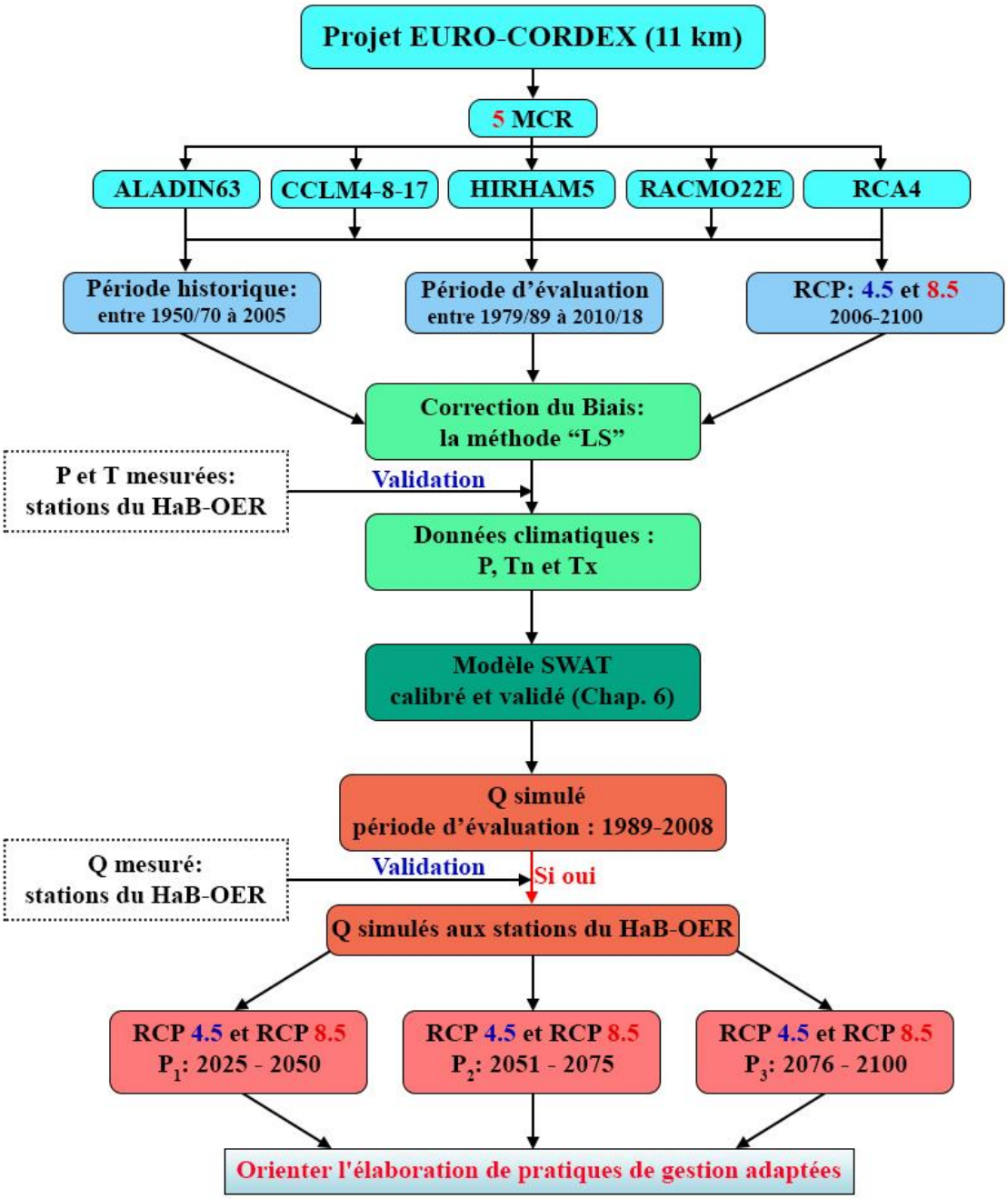


Figure 7.1 Organigramme général de l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau

7.3 Modèles et projections climatiques

7.3.1 Modèles de circulation globale (MCG)

Afin d'améliorer notre capacité à prévoir les changements climatiques causés par l'influence humaine, des équipes de recherches améliorent constamment les modèles du climat (Aalbers *et al*., 2018). Les résultats des simulations mathématiques du système climatique facilitent notre compréhension des processus climatiques et permettent d'estimer le climat futur (Castaneda-Gonzalez, 2018). Le premier pas dans la prédiction des tendances climatiques consiste à utiliser des modèles de circulation climatique à l'échelle globale, connus sous le nom de Modèles de Circulation Globale "MCG" (Fig. 7.2). Ces modèles jouent un rôle crucial dans la recherche sur l'évolution du climat actuel en fournissant des simulations essentielles pour estimer les impacts futurs des changements climatiques (Rifai *et al*., 2015).

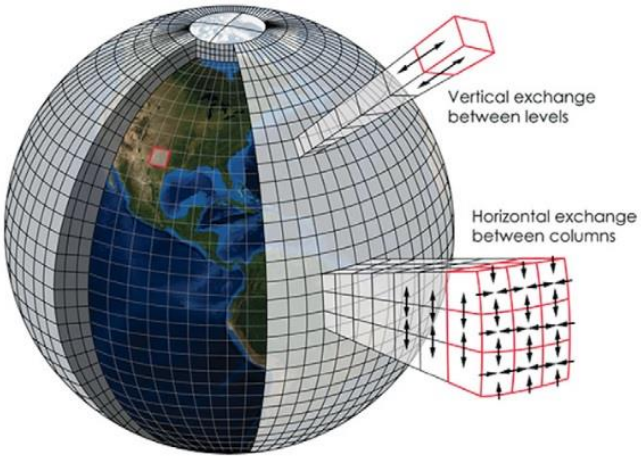


Figure 7.2 Schéma montre le principe des MCG (Wuebbles et al., 2021)

Ces modèles tridimensionnels s'appuient sur des équations physiques fondamentales. Ils divisent la Terre en grilles discrètes représentant des unités de calcul, incluant l'atmosphère, l'océan, la surface terrestre et la cryosphère ou glace (Wuebbles *et al*., 2021). Étant donné leur résolution spatiale relativement grossière (plus de 100 km), les MCG fournissent des informations à grande échelle pour les projections climatiques (Rifai *et al*., 2015) et sont par exemple utilisés pour soutenir les politiques d'atténuation du changement climatique à l'échelle mondiale et régionale. Cependant, les études portant sur des bassins versants donnés nécessitent des résolutions plus fines, car les caractéristiques régionales qui influencent et définissent le régime hydrologique des petites zones ne sont pas prises en compte dans les MCG (Lyra & Loukas, 2023). Par conséquent, l'usage de techniques de downscaling (réduction d'échelle) sont indispensables pour obtenir les variables climatiques futures à une résolution appropriée dans les études hydrologiques à l'échelle régionale.

7.3.2 Modèles de circulation régional (MCR)

Les méthodes de réduction d'échelle peuvent être classées en deux principales catégories : statistique et dynamique. La technique couramment utilisée pour la réduction d'échelle dynamique est bien connue (Giorgi & Gutowski, 2015). Elle repose sur l'utilisation de modèles climatiques à haute résolution qui décrivent en détail les processus atmosphériques inclus dans les sorties des MCG (Castaneda-Gonzalez, 2018).

Le Programme mondial de recherche sur le climat, connu sous le nom de "World Climate Research Programme (WCRP)", a lancé plusieurs programmes coordonnés visant à fournir des projections climatiques historiques et futures à l'aide de grands ensembles de modèles MCG et MCR (Samuel *et al*., 2023). Parmi ces programmes figure le projet de comparaison de modèles couplés, appelé "Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)", qui vise à collecter et à comparer les modèles climatiques développés dans le monde. Le projet CMIP5 produit un ensemble de données multi-modèles destiné à faire progresser nos connaissances sur la variabilité du climat et le changement climatique (Taylor *et al*., 2012). CMIP6 a été lancé comme une amélioration de CMIP5, en mettant particulièrement l'accent sur l'amélioration des processus physiques, des paramétrisations, des résolutions spatiales accrues et l'inclusion de processus biogéochimiques supplémentaires (Eyring *et al*., 2016).

Les modèles climatiques nécessitent des indications sur l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre "GES" dans l'atmosphère, car ils ne peuvent pas anticiper ces changements par

eux-mêmes. Cette information est exprimée à travers le forçage radiatif qui représente le changement du bilan radiatif (Grusson, 2016). Pour le 5ème exercice du Giec, les estimations d'émissions ont été définies selon quatre scénarios socio-économiques (aussi appelés scénarios d'émissions, RCP en anglais). Chaque scénario correspond à une concentration atmosphérique en gaz à effet de serre à l'horizon 2100 (Lebel *et al*., 2019) (Tab. 7.1). Le nouveau CMIP6 inclut des données basées sur les scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathway) qui sont compatibles avec les trajectoires représentatives de concentration (RCP) CMIP3 et CMIP5 (Acharki *et al*., 2023), en plus d'autres données socio-économiques complémentaires (Wuebbles *et al*., 2021).

Tableau 7.1 Les quatre scénarios socio-économiques (Moss et al., 2010)

	Forçage radiatif	**Concentration (p.p.m.)**	**Scénarios**
RCP 8.5	> 8.5 W m^{-2} à 2100	> 1370 CO_2-equiv. à 2100	En hausse
RCP 6	≈ 6 W m^{-2} à la stabilisation après 2100	≈ 850 CO_2-equiv. (à la stabilisation après 2100)	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	≈ 4.5 W m^{-2} à la stabilisation après 2100	≈ 650 CO_2-equiv. (à la stabilisation après 2100)	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.5	Pic à ≈ 3 W m^{-2} avant 2100 et diminue ensuite	Pic à ≈ 490 CO_2-equiv. avant 2100 et diminue ensuite	Pic et déclin

7.3.3 Programme CORDEX : avancée majeure dans la réduction d'échelle

Les projections des ressources en eau futures sont essentielles pour une meilleure gestion dans le contexte du changement climatique. Elles reposent sur l'utilisation des résultats des modèles climatiques comme données d'entrée pour la modélisation hydrologique (Chiew *et al*., 2022). Les MCR, dotés d'une résolution spatiale plus élevée, ont été développés pour résoudre efficacement l'hétérogénéité des différentes régions géographiques, ce qui contribue à réduire l'incertitude associée aux MCG (Lee *et al*., 2019) (Fig. 7.3). L'expérience régionale coordonnée de réduction d'échelle "Coordinated Regional Downscaling Experiment : CORDEX" (Gutowski Jr. *et al*., 2016) se concentre sur l'étude approfondie des incertitudes interdépendantes allant des MCG aux MCR (Senatore *et al*., 2022).

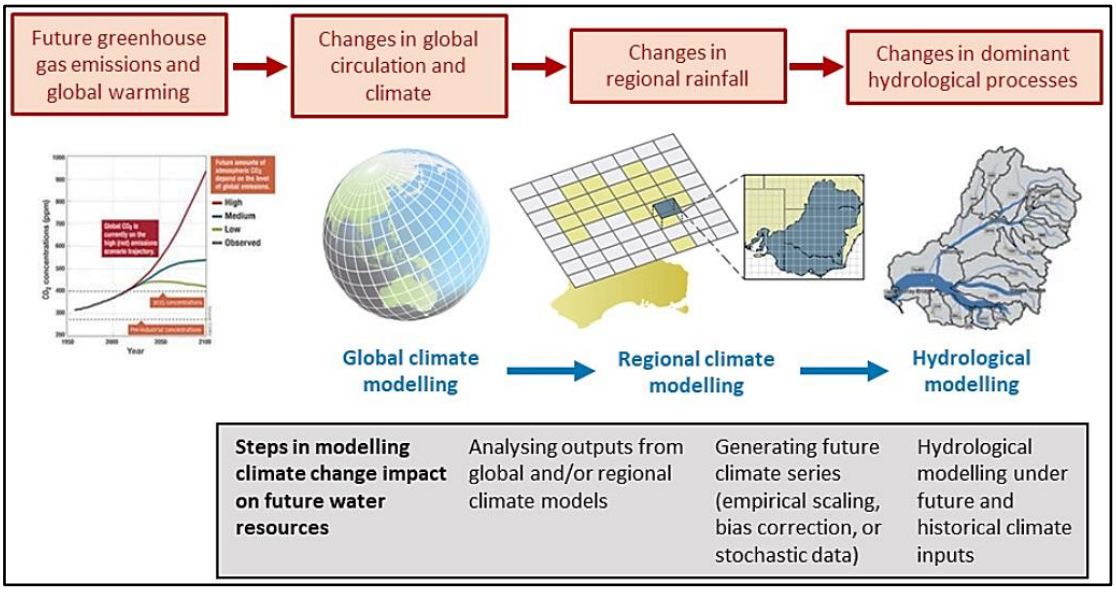


Figure 7.3 Modélisation de l'impact du changement climatique sur le débit des cours d'eau (Chiew et al., 2022)

Le projet CORDEX a été initié par le WCRP pour promouvoir la science et l'application de la réduction d'échelle du climat régional à travers des partenariats mondiaux, devenant rapidement un cadre de référence majeur pour la recherche dans ce domaine (Giorgi, 2019). Plusieurs domaines de modèles régionaux ont été sélectionnés pour CORDEX, couvrant la plupart des zones terrestres du monde, dont le Maroc est totalement ou partiellement inclus dans quatre d'entre eux : EURO-CORDEX, CORDEX Africa, MED-CORDEX (Méditerranée) et MENA CORDEX (Moyen-Orient et Afrique du Nord) (Fig. 7.4). L'initiative CORDEX a permis la mise à disposition de données à bonne résolution horizontale, allant de 10 à 25 km, qui est désormais considérée comme la norme pour les applications liées au changement climatique. EURO-CORDEX (Jacob *et al*., 2014) est un exemple notable, avec la production en cours de données à une résolution d'environ 12 km (Giorgi, 2019).

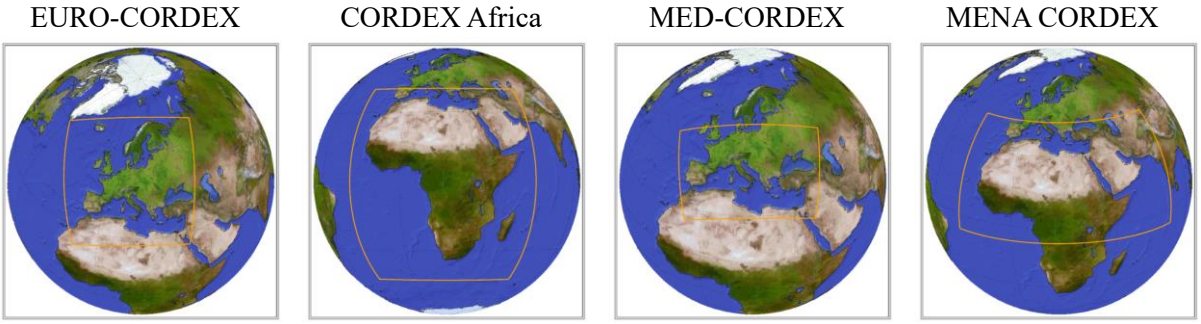


Figure 7.4 Exemples de domaine CORDEX (cordex.org, 2023)

7.4 Modélisation climatique prédictive dans le HaB-OER

7.4.1 Choix des modèles et scénarios climatiques

Comme le recommande le GIEC, une bonne évaluation devrait inclure des sources de données provenant de plusieurs modèles et de différentes méthodes (Milewski *et al*., 2019) car la référence à un seul modèle peut entraîner des incertitudes dans les données futures (Haider *et al*., 2020). Il est également recommandé de prendre en compte une gamme de scénarios climatiques plutôt que de se limiter à un seul scénario optimal ou moyen. Il convient de noter que les émissions mondiales actuelles ne suivent pas une trajectoire similaire au scénario RCP2.6 (Woillez, 2019).

Les modèles climatiques ont été sélectionnés en prenant en compte plusieurs critères, tels que la disponibilité des simulations d'évaluation, historiques et RCPs, leur résolution spatiale, leur utilisation dans plusieurs études hydrologiques, ainsi que leurs performances dans les recherches menées dans les régions nord-africaines et méditerranéennes, en mettant notamment l'accent sur le contexte spécifique du Maroc (Tramblay *et al*., 2013; Marchane *et al*., 2017; Milewski *et al*., 2019; Brouziyne *et al*., 2020; Choukri *et al*., 2020; El Moçayd *et al*., 2020; Moucha *et al*., 2021; E. M. El Khalki *et al*., 2021; Tuel *et al*., 2022; Erraioui *et al*., 2022; Acharki *et al*., 2023).

Ainsi, l'initiative EURO-CORDEX a été identifiée comme répondant le mieux aux critères mentionnés précédemment. Les projections climatiques journalières des précipitations et des températures minimales et maximales ont été obtenues à partir de cinq MCR EURO-CORDEX avec une résolution spatiale d'environ de 12 km × 12 km (Tab. 7.2). Ces modèles ont été téléchargés à partir du site web de la Earth System Grid Federation (ESGF) (https://esgf-node.llnl.gov/).

Tableau 7.2 Liste des RCM choisis (cordex.org, 2023)

Domain	GCM	RCM	Evaluation	Historique	RCP4.5 / 8.5	Institution
EUR-11	CNRM-CM5	ALADIN63_v2	1979-2018	1951-2005	2006-2100	CNRM
EUR-11	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17_v1	1989-2008	1949-2005	2006-2100	CLMcom
EUR-11	NorESM1-M	HIRHAM5_v3	1989-2011	1951-2005	2006-2100	DMI
EUR-11	EC-EARTH	RACMO22E_v1	1979-2012	1950-2005	2006-2100	KNMI
EUR-11	CNRM-CM5	RCA4_v1	1980-2010	1970-2005	2006-2100	SMHI

Chaque modèle se compose des simulations suivantes :

- ✓ Evaluation : alimentée par les données de réanalyse ERA-Interim (Dee *et al*., 2011), qui fournissent des conditions atmosphériques "parfaites" (Yang *et al*., 2022). Ces expériences permettent d'évaluer la qualité du modèle (Herrera *et al*., 2020).
- ✓ Historique : alimentée par les données historiques provenant des MCG. Ces expériences permettent d'analyser le fonctionnement des MCR pour le climat passé (Copernicus Climate Change Service, 2019) entre 1950 et 2005.
- ✓ Scénario : regroupe un ensemble d'expériences de projection climatique CORDEX utilisant les RCP. Les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sont utilisés pour la période allant de 2006 à 2100.

7.4.2 Correction du biais et simulations de données climatiques

Les MCR offrent des informations à haute résolution spatiale sur les variables climatiques, cependant leurs limites doivent être prises en compte lorsqu'ils ont une étude d'impact comme finalités (Senatore *et al*., 2022). Lorsque les effets du changement climatique sont pris en compte, par exemple dans les études sur les impacts hydrologiques, des biais similaires peuvent être amplifiés (Acharki *et al*., 2023). Ceux-ci doivent donc faire l'objet d'une correction. Les méthodes de correction des biais sont des méthodes de réduction d'échelle statistique, car elles établissent une fonction de transfert des attributs statistiques des variables observées aux variables simulées des modèles climatiques (Maraun & Widmann, 2018). Ces méthodes sont largement utilisées dans les études d'impact pour surmonter les différences d'échelle spatiale et temporelle entre les modèles climatiques et hydrologiques, ainsi que pour corriger les biais présents dans les sorties des modèles climatiques (Castaneda-Gonzalez, 2018).

CMhyd (Climate Model data for hydrologic modeling) est un outil permettant l'extraction et la correction des données provenant des modèles climatiques (Rathjens *et al*., 2016). Il offre différentes méthodes pour corriger les biais des sorties des modèles, allant de la simple méthode de mise à l'échelle linéaire "linear scaling" à la méthode non linéaire de cartographie de la distribution "distribution mapping" (Mami, 2020). Certaines études ont adopté a priori une méthode de correction des biais sans en évaluer sa performance. Dans notre cas l'évaluation des performances de trois méthodes de correction des données de précipitations et de températures en utilisant des paramètres statistiques ont été réalisées pour choisir la plus performante.

Dans cette étude, les méthodes Linear Scaling, Power Transformation et Distribution Mapping ont été utilisées pour corriger les biais existants dans les données des précipitations, tandis que les méthodes (Linear Scaling, Variance Scaling et Distribution Mapping) ont été utilisées pour les températures minimales et maximales. L'évaluation a été réalisée en utilisant les résultats des cinq MCR sélectionnés pour la période commune de données de bonne qualité entre 1989 et 2008 caractérisant la période d'évaluation. Le degré de similitude statistique entre les données observés et simulées a été déterminé à l'aide du diagramme de Taylor (2001), qui offre un résumé statistique précis basé sur le coefficient de corrélation, l'écart-type et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Fig. 7.5).

Pour les précipitations aucune des trois techniques ne se distinguent par ces performances. Les valeurs statistiques varient légèrement d'une station à l'autre et d'un MCR à l'autre. En général, les valeurs du coefficient de corrélation, de l'écart-type et de la RMSE se situent respectivement autour de 0,85, 55 mm et 32mm

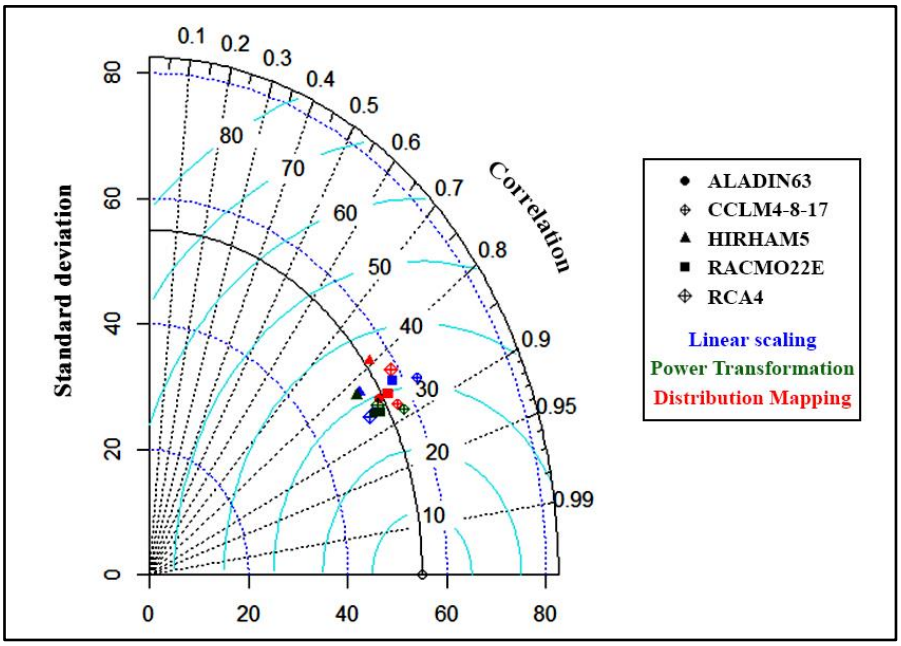


Figure 7.5 Diagrammes de Taylor des précipitations corrigées par rapport aux précipitations observées à la stations de Tarhat entre 1989-2008 pour chaque simulation MCR

En raison de leur origine satellitaire, les données de température présentent beaucoup plus de similitudes. Le coefficient de corrélation dépasse 0,95 et le RMSE reste inférieur à 2 °C (Fig. 7.6). En ce qui concerne l'écart-type, il est d'environ 6 °C pour les températures minimales et de 8 °C pour les températures maximales.

a- Températures Max b- Températures Min

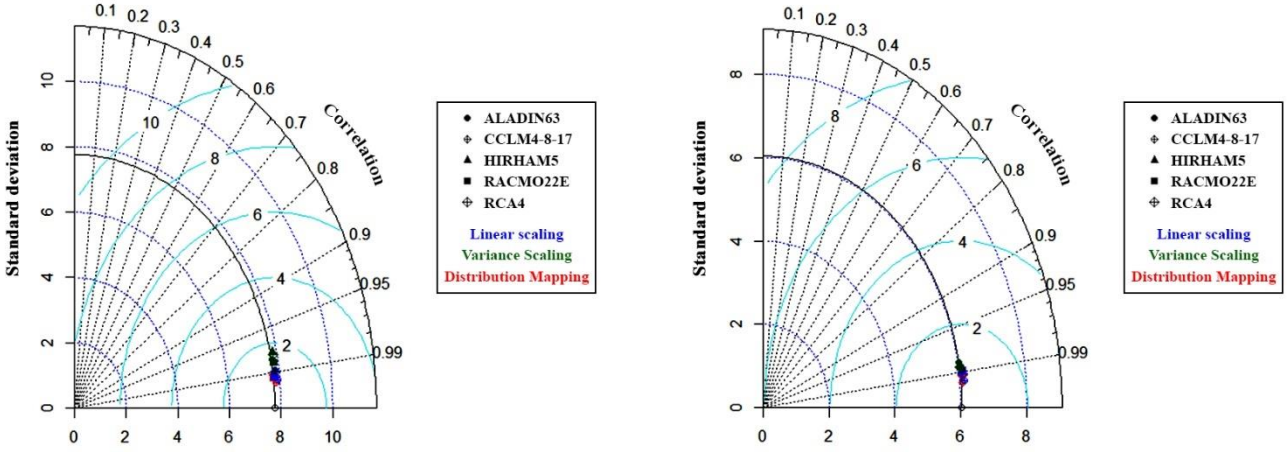


Figure 7.6 Diagrammes de Taylor des températures corrigées par rapport aux températures observées à la stations de Tarhat entre 1989-2008 pour chaque simulation MCR

Toutes les méthodes ont donné des résultats acceptables pour les 3 variables, mais la méthode LS (Linear Scaling) s'est avérée légèrement plus précise et performante que les autres. Pour les précipitations, ceci va dans le sens de plusieurs études qui ont confirmé une meilleure correction des biais grâce à la méthode de l'échelle linéaire (LS) (Amengual *et al*., 2012; Jaw *et al*., 2015; Brouziyne *et al*., 2018).

7.4.3 Evaluation de la pertinence des débits estimés

Les données actuelles et futures des MCR sélectionnées ont été mises à l'échelle en se basant sur les données observées des stations du Hab-OER sur une période de 37 ans (1982-2019) et en utilisant la technique de débiaisage "LS" dans le programme CMhyd. La période de chevauchement entre les données observées et historiques (1982-2005) dépasse les 20 années recommandés par Rathjens *et al*. (2016) pour que les résultats soient considérés comme appropriés. Les données simulées sont ensuite utilisées pour estimer les débits à l'aide du modèle SWAT calibré et validé.

La crédibilité des projections climatiques peut être évaluée en fonction de la capacité des modèles à reproduire fidèlement le climat actuel (Senatore *et al*., 2022). Bien que les performances des modèles à reproduire le climat observé ne garantissent pas une meilleure précision pour les projections futures, les modèles capables de reproduire les caractéristiques clés du climat inspirent une plus grande confiance (Tramblay *et al*., 2013). La performance de l'estimation des débits basée sur les MCR CORDEX dans le HaB-OER est évaluée sur une période de 19 ans (1989-2008). L'évaluation repose sur des critères de performance tels que le coefficient R^2, le biais relatif PBIAS et l'efficacité NSE, à l'échelle annuelle et mensuelle, pour comparer les ensembles de données de simulation aux données observées des stations dans le HaB-OER.

À l'échelle annuelle, à l'exception de la station de Tagzoute qui a enregistré des résultats satisfaisants pour le modèle CCLM par rapport aux autres MCR, les autres stations ont généralement obtenu de bons résultats pour l'ensemble des modèles. La station de Tarhat a enregistré les résultats les plus pertinents, avec des valeurs de R^2, PBIAS et NSE variant simultanément entre 0.74 et 0.90, 4.8 et 10.6 et 0.6 et 0.85. Les données climatiques issues de l'ensemble des MCR retenus ont bien reflété la situation hydrologique dans la région du HaB-OER, avec des moyennes de coefficients variant respectivement entre 0.64 et 0.87, 8.9 et 20.9 et 0.42 et 0.73 pour R^2, PBIAS et NSE pour les stations d'Aval El Héri, Chacha n'Amellah, Tamchachat et Tarhat. Le modèle Aladin s'est révélé le plus adapté par rapport aux autres MCR (Tab. 7.3).

Tableau 7.3 Critères de performance de la simulation des débits annuels à travers les données MCR

	Aladin			**Cclm**			**Hirham**			**Racmo**			**Rca**		
	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE
Ava	0.8	5.9	0.8	0.8	21	0.25	0.8	21.7	0.4	0.9	11.2	0.7	0.6	10.2	0.4
Cha	0.8	1.4	0.7	0.8	17.8	0.51	0.6	19.8	0.4	0.9	4.7	0.9	0.5	4.2	0.5
Tag	0.7	-30.4	0.4	0.7	-16	0.67	0.5	-19.4	0.4	0.9	-29	0.6	0.5	-27.2	0.3
Tam	0.8	22.4	0.6	0.8	34.5	0.32	0.9	29.5	0.6	0.9	36	0.4	0.7	24.3	0.6
Tar	0.8	6.1	0.8	0.7	10.6	0.59	0.9	7.5	0.9	0.8	6.8	0.8	0.7	4.9	0.7

La corrélation entre les débits observés et ceux estimés à l'aide des MCR indique que, à l'échelle mensuelle, les résultats sont encore acceptables, voire satisfaisants. La station de Tarhat a toujours enregistré les résultats les plus pertinents, avec des valeurs de R^2, PBIAS et NSE variant simultanément entre 0.71 et 0.82, 4.9 et 10.6 et 0.63 et 0.78. Le modèle Aladin a maintenu sa performance et a réussi à reproduire de manière satisfaisante les débits pour l'ensemble des stations, en particulier les trois stations d'Aval El Héri, Chacha n'Amellah et Tarhat, avec des moyennes de coefficients d'environ 0.76, 3.65 et 0.73 respectivement pour R^2, PBIAS et NSE (Tab. 7.4).

Tableau 7.4 Critères de performance de la simulation des débits mensuels à travers les données MCR

	Aladin			Cclm			Hirham			Racmo			Rca		
	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS	NSE
Ava	0.8	5.9	0.8	0.7	21	0.4	0.7	21.7	0.4	0.7	11.2	0.6	0.5	10.2	0.4
Cha	0.7	1.4	0.7	0.8	17.7	0.5	0.6	19.8	0.04	0.7	4.7	0.6	0.5	4.2	0.3
Tag	0.7	-30.4	0.5	0.7	-15.9	0.7	0.5	-19.4	0.5	0.7	-29	0.6	0.5	-27.2	0.5
Tam	0.6	22.4	0.5	0.7	34.5	0.4	0.7	29.5	0.5	0.7	36	0.4	0.7	24.2	0.6
Tar	0.8	6.1	0.8	0.7	10.6	0.6	0.8	7.5	0.8	0.8	6.8	0.7	0.7	4.9	0.7

La comparaison graphique entre les débits annuels et mensuels observés et simulés pour l'ensemble des stations montre des différences significatives d'une station à l'autre et d'un modèle à l'autre (Annexe 7.1 et 7.2). Mise à part la station de Taghzoute, tous les modèles surestiment les débits enregistrés aux stations du HaB-OER. En effet, les MCR sont confrontés à d'importants défis pour représenter les précipitations dans la région méditerranéenne, en raison de la forte variabilité interannuelle et de l'importance des événements extrêmes. Cependant, les MCR reproduisent bien la forme générale des débits observés, ce qui permet d'appliquer leurs données de précipitations et de températures pour les projections climatiques futures, dans le contexte hydrologique du HaB-OER.

7.5 Changement spatio-temporel futur des paramètres climatiques

7.5.1 Projections climatiques dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

7.5.1.1 Harmonisation des données et synchronisation des périodes

Pour l'analyse des projections, il est important de noter que dans cette étude, aucune sélection du "meilleur MCR" n'a été effectuée. Au lieu de cela, nous avons opté pour une approche d'ensemble multi-modèle en utilisant la moyenne des données provenant de l'ensemble de modèles adopté précédemment. Cette approche a été choisie dans le but de réduire l'incertitude liée à la diversité des modèles et de fournir une vision plus complète des tendances climatiques futures. En effet, selon Tebaldi & Knutti (2007) l'utilisation de la moyenne d'un ensemble multi-modèle permet d'obtenir des estimations plus fiables et plus robustes que celles fournies par un seul modèle.

La période future a été divisée en trois segments de 25 années hydrologiques : à court terme "P_1" entre 2025 et 2050, à moyen terme "P_2" entre 2051 et 2075 et à long terme "P_3" entre 2076 et 2100. Afin de comparer les résultats des modèles avec les observations, on a choisi d'utiliser la période de référence "P_0" la plus récente de 30 ans définie par l'OMM (2017) qui s'étend de 1981 à 2010.

7.5.1.2 Projections futures des précipitations

L'évolution des précipitations annuelles futures montre une diminution de la pluviométrie pour toutes les stations du HaB-OER (Annexe 7.3). À la station de Tarhat, on observe une baisse plus importante selon le scénario RCP 8.5 par rapport au RCP 4.5 (Fig. 7.7). La moyenne des précipitations annuelles diminue progressivement sur les trois périodes P_1, P_2 et P_3, avec respectivement pour les deux scenarios des valeurs de 497/457 mm, 465/422 mm et 470/331mm. La tendance de diminution des précipitations pour la station de Tarhat est de 0.95 mm/an pour le scénario RCP 4.5 et de 2.8 mm/an pour le scénario RCP 8.5. La légère augmentation remarquée en P_3 pour le RCP 4.5 est attribuable à la stabilité des émissions de CO_2 projetée dans ce scénario "optimiste" vers les années 2100.

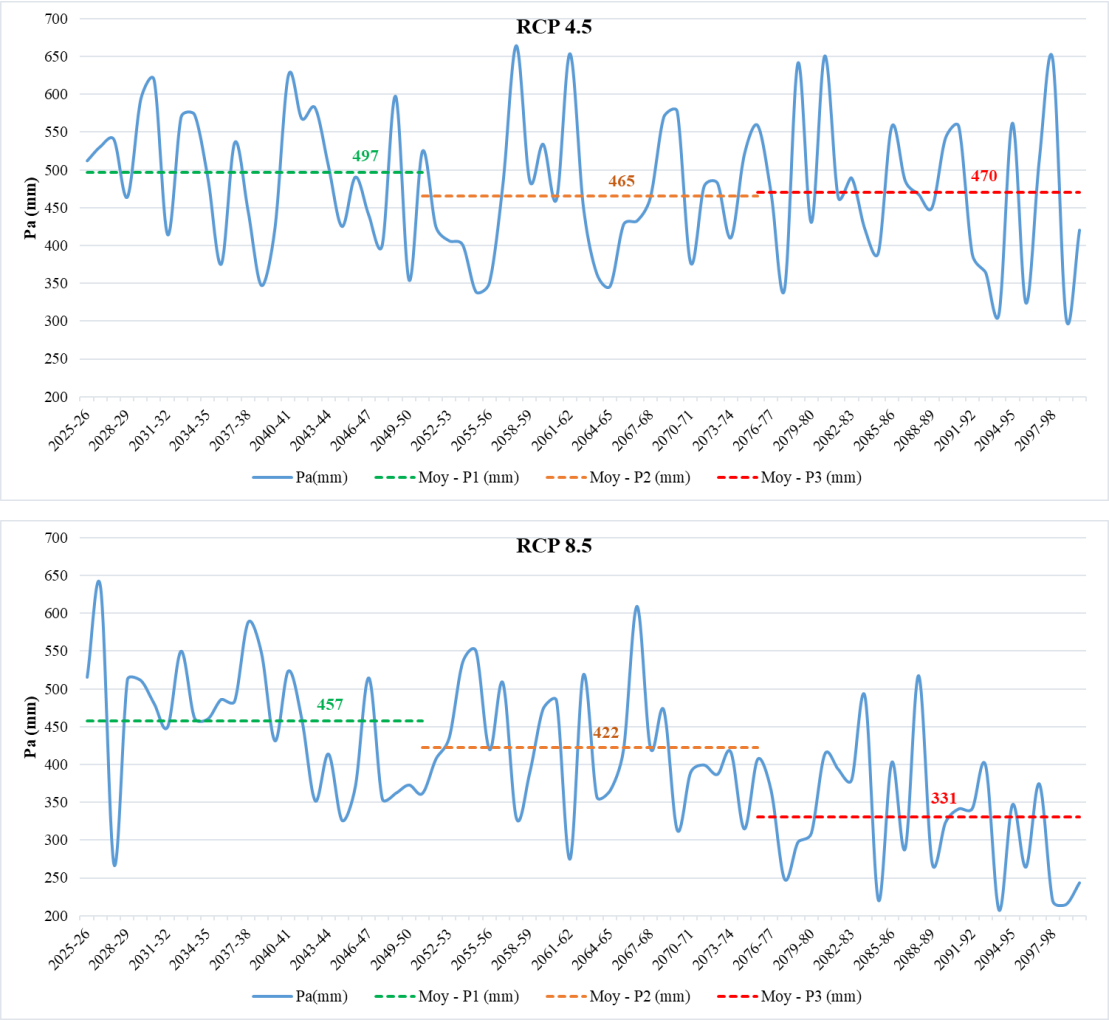


Figure 7.7 Précipitations moyennes annuelles futures pour la station Tarhat selon les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

La projection des précipitations, selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, pour les périodes P_1, P_2 et P_3 par rapport à la période de référence, révèle une diminution des précipitations dans toutes les stations du HaB-OER (Fig. 7.8). La station de Tamchachat enregistre la plus forte diminution, tandis que celle de Tarhat est la moins affectée. L'évolution moyenne des précipitations pour l'ensemble des stations diminue sur les trois périodes P_1, P_2 et P_3, avec respectivement pour les deux scenarios des valeurs de 16/26 %, 22/29 % et 21/45 %. Ces pourcentages traduisent une diminution des précipitations de 89/130 mm, 126/164 mm et 118/253 mm respectivement pour les trois périodes et les deux scénarios.

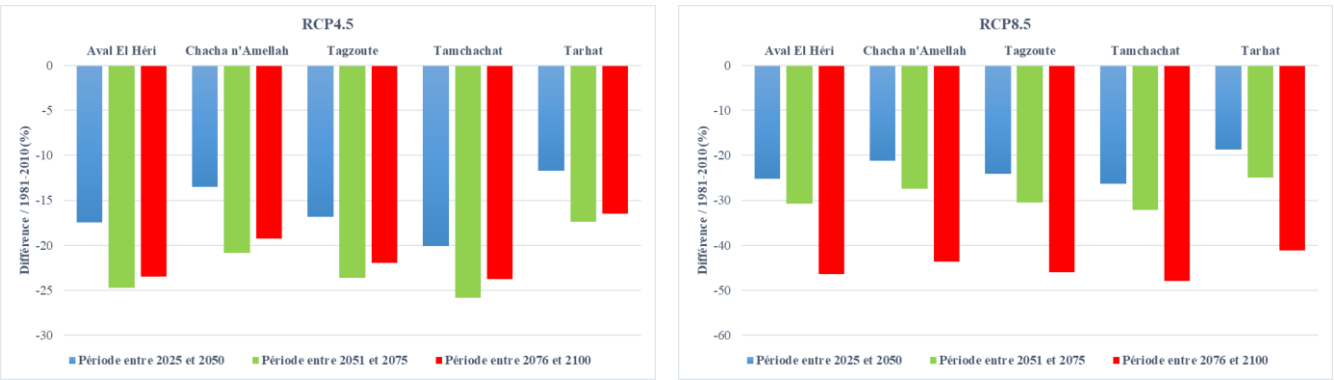


Figure 7.8 Différence entre les moyennes des précipitations futures et la moyenne des précipitations de référence

En moyenne, les précipitations saisonnières dans l'ensemble des stations du HaB-OER diminuent respectivement de 5,5 %, 21,6 %, 24,5 % et 39,7 % pour les périodes de l'automne (SON), de l'hiver (DJF), du printemps (MAM) et de l'été (JJA) selon le scénario RCP 4.5 (Fig.7.9). Ces pourcentages s'accentuent pour atteindre respectivement 25,6 %, 32,4 %, 35,6 % et 43,7 % pour le scénario RCP 8.5. La station la plus impactée reste Tamchachat, avec des moyennes de pourcentage sur les saisons SON, DJF, MAM et JJA, qui sont respectivement de 20/36 %, 22/34 %, 21/33 % et 54/58 % pour les deux scénarios.

Il est important de noter que la saison "humide", d'intérêt économique en raison de l'importance de ses précipitations pour l'agriculture (DJF), enregistre une diminution de précipitations variant respectivement de 20 %, 24 % et 21 % pour les trois périodes sous le scénario RCP 4.5. Cela équivaut à des pertes de précipitations respectives de 49 mm, 58 mm et 51 mm. Ces pertes augmentent sous le scénario RCP 8.5 pour atteindre 62 mm, 68 mm et 107 mm.

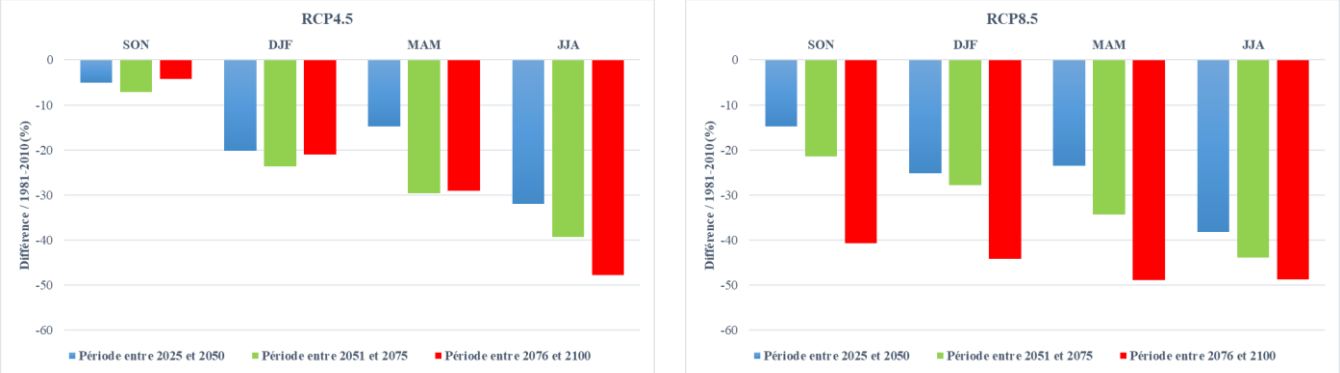


Figure 7.9 Différence entre les moyennes des précipitations saisonnières futures et les moyennes des précipitations saisonnières de référence

7.5.1.3 Projections futures des températures moyennes

Les températures subissent des augmentations qui varient en fonction des périodes et des scénarios. L'augmentation des températures minimales (Tn) varie entre 1,6°C et 2,5°C sous le scénario RCP 4.5, tandis qu'elle varie entre 1,9°C et 5°C sous le scénario RCP 8.5. Pour les températures maximales (Tx), leur augmentation varie respectivement de 2,5°C, 3,4°C et 2,8°C, 6,1°C pour les mêmes conditions. Nous nous intéressons par la suite à l'étude des températures moyenne (Tab. 7.5).

Tableau 7.5 Augmentation moyenne des températures en fonction des période et scénario

	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2025 - 2050	**2051 - 2075**	**2076 - 2100**	**2025 - 2050**	**2051 - 2075**	**2076 - 2100**
Tn (°C)	1.6	2.2	2.5	1.9	3.3	5
Tx (°C)	1.7	2.5	2.7	2.1	3.7	5.6
Tm (°C)	2.5	3.1	3.4	2.8	4.3	6.1

Les deux scénarios montrent une augmentation relativement constante des températures moyennes (Tm) par rapport aux précipitations dans l'ensemble des stations et sur les trois périodes considérées (Annexe 7.4). À la station de Tarhat, on observe une augmentation plus importante des températures dans le scénario RCP 8.5 par rapport au RCP 4.5 (Fig. 7.10). La moyenne des températures annuelles augmente progressivement sur les trois périodes P_1, P_2 et P_3, avec respectivement pour les deux scenarios des valeurs de 17.5/17.9°C, 18.2/19.3 °C et 18.4/21 °C. La tendance d'augmentation des températures pour la station de Tarhat est de 0.02°C/an pour le scénario RCP 4.5 et de 0.058 °C /an pour le scénario RCP 8.5.

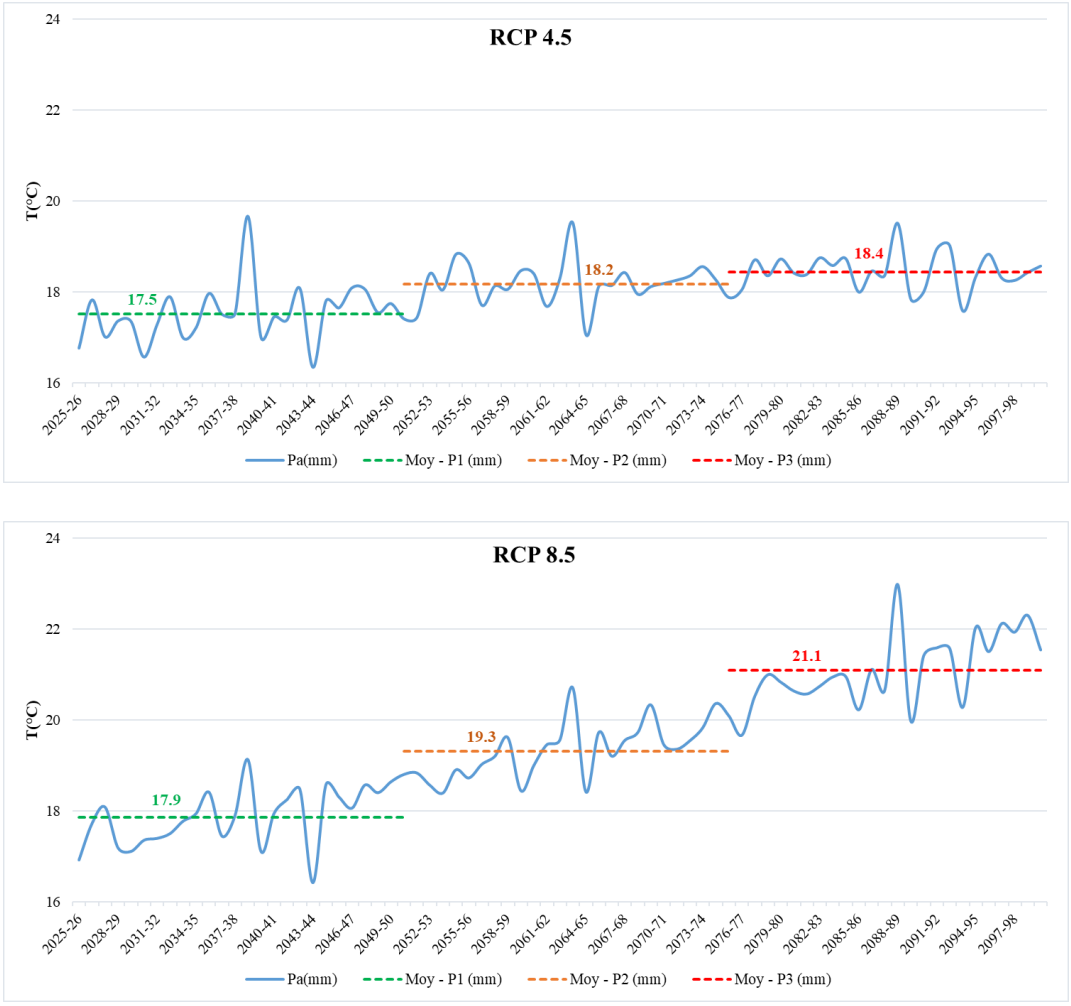


Figure 7.10 Températures moyennes annuelles futures pour la station Tarhat selon les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

La station de Tamchachat, située à une altitude élevée (2400 m) par rapport aux autres stations, se caractérise par la plus forte augmentation de la température (Fig. 7.11). Selon Moucha *et al.*, (2021), les zones montagneuses sont confrontées à une augmentation plus importante des températures par rapport aux plaines. Pour la période P_3, la température moyenne augmente de 29,2 % pour le scénario RCP 4.5, alors que cette augmentation est presque doublée, atteignant 51,4 % pour le scénario RCP 8.5. Ces évolutions correspondent à une augmentation de température de 3,7 °C et 6,5 °C respectivement.

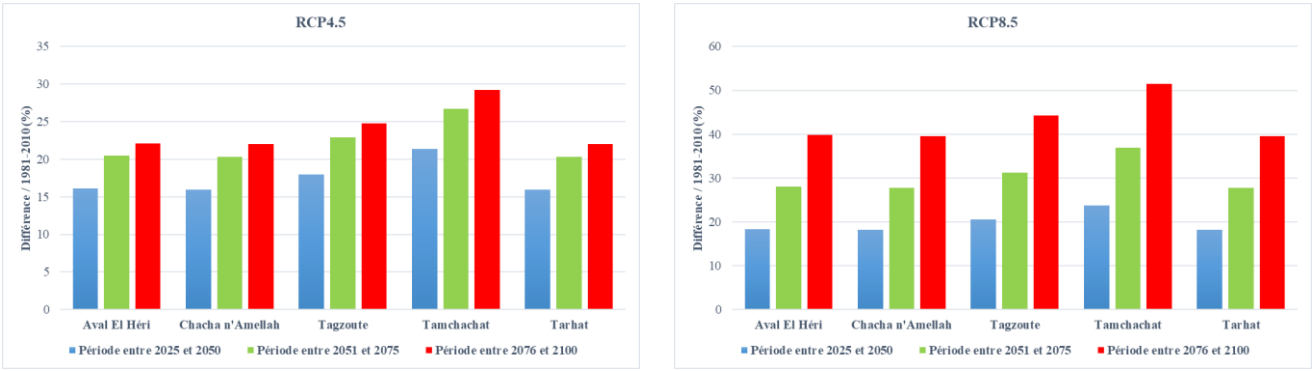


Figure 7.11 Différence entre les températures moyennes futures et les températures moyennes de référence

L'évolution des températures saisonnières dans le HaB-OER montre une tendance proportionnelle pour toutes les saisons (Fig. 7.12). L'augmentation la plus marquée se produit pendant l'hiver, avec une augmentation moyenne des températures dans l'ensemble des stations de 47,1 %, 53,6 % et 61,5 % respectivement pour les périodes P_1, P_2 et P_3 selon le scénario RCP4.5. Cette augmentation atteint un maximum de 100 % pendant la troisième période pour le scénario RCP 8.5. Ainsi, la température moyenne dans le HaB-OER passe de 6,2 °C enregistré pendant la période de référence à 12,2 °C vers la fin du siècle selon le scénario dit pessimiste.

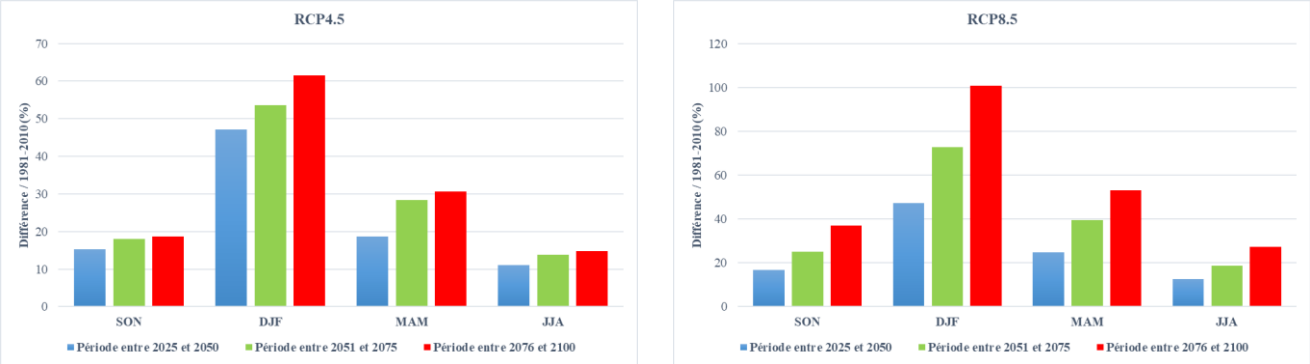


Figure 7.12 Différence entre les moyennes des températures moyennes saisonnières futures et les moyennes des températures moyennes de référence

7.5.2 Cartographie des changements spatiaux des paramètres climatiques futurs

7.5.2.1 Changement spatial des précipitations

La répartition actuelle et future des précipitations dans le HaB-OER offre des informations précieuses aux décideurs afin d'élaborer des stratégies de gestion plus efficaces des ressources en eau. La cartographie des précipitations moyennes pour la période de référence de 1981 à 2010, établie à partir des données du modèle SWAT, met en évidence une variabilité significative des précipitations dans les sous-bassins du HaB-OER. Les valeurs de précipitations varient entre un minimum de 433 mm enregistré dans le sud du bassin et un maximum d'environ 590 mm enregistré dans le sud-est (Annexe 7.5).

L'analyse spatiale des variations des précipitations entre les trois périodes futures et la période de référence au niveau des sous-bassins du HaB-OER nous a permis d'identifier les zones les plus impactées par la diminution prévue des précipitations liée aux changements climatiques (Fig. 7.13). Les diminutions de précipitations varient géographiquement d'une période à l'autre et d'un scénario à l'autre dans l'ensemble des sous-bassins. En général, les sous-bassins du sud-est, tels que le bassin de Chacha n'Amellah, connaissent les baisses de précipitations les plus importantes, tandis que ceux du nord-ouest enregistrent des diminutions moins prononcées.

Pour le scénario RCP 4.5, les bassins les plus touchés enregistrent une diminution des précipitations de 56 mm, 104 mm et 113 mm respectivement pour les périodes P_1, P_2 et P_3. Ces valeurs augmentent dans le scénario RCP 8.5, atteignant 130 mm, 151 mm et 230 mm respectivement pour les mêmes périodes. La période P_3 du scénario RCP 8.5 présente des valeurs extrêmes allant de -140 mm à -231 mm. Les sous-bassins du sud connaissent en général des diminutions moins importantes, sur les trois périodes P_1, P_2 et P_3, avec respectivement pour les deux scenarios 1/57mm, 36/75mm et 39/140mm. Les sous-bassins du nord sont modérément affectés.

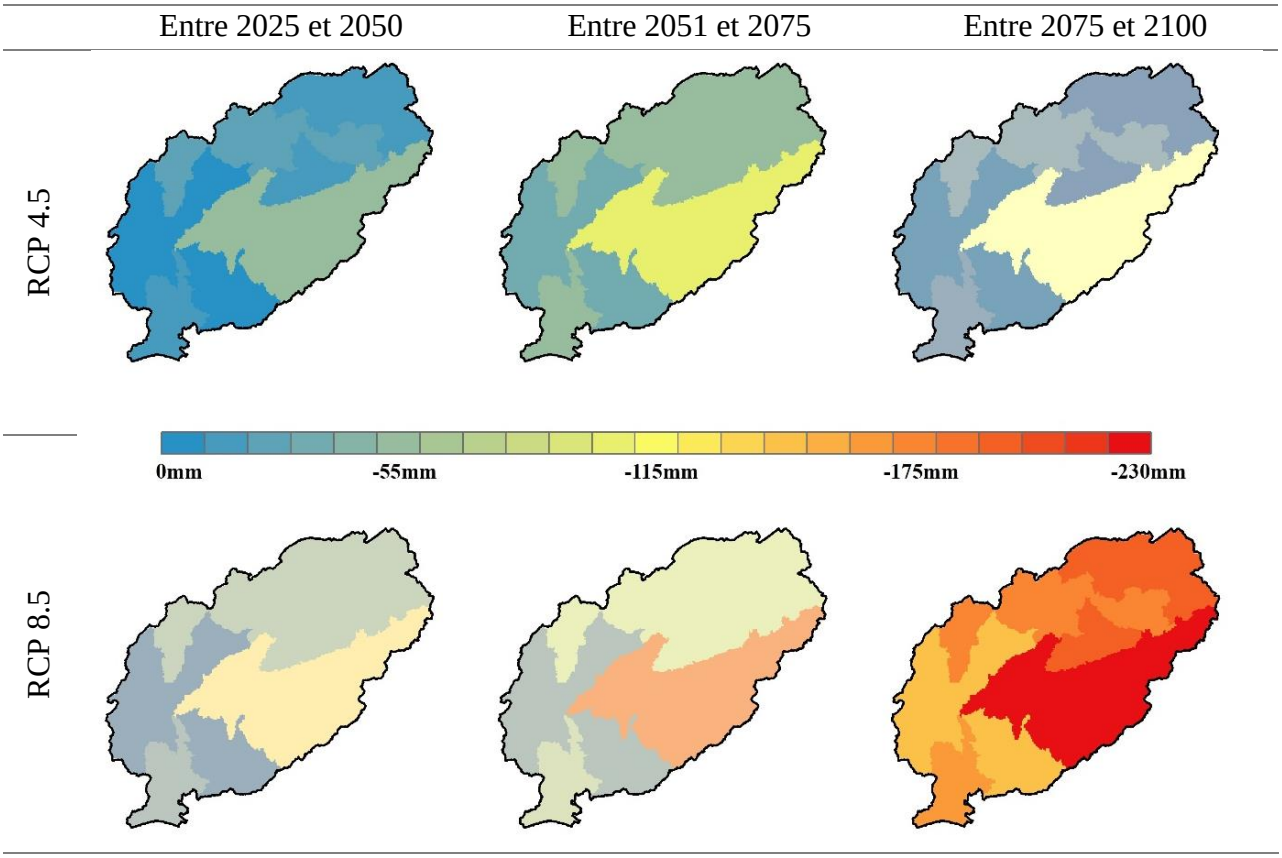


Figure 7.13 Changement spatial relatif des précipitations moyennes dans les périodes P_1, P_2 et P_3 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 par rapport à la période de référence

7.5.2.2 Changement spatial des températures

De même que les précipitations, les données des températures issues du modèle SWAT ont été cartographiées afin de visualiser leur distribution et leur variation selon les périodes futures et les scénarios. Cependant, contrairement aux précipitations, la cartographie des températures moyennes montre peu de différences entre les sous-bassins du HaB-OER. Trois classes de températures ont été déterminées avec 13.4°C comme valeur minimale et 15.9°C comme valeur maximale (Annexe 7.6).

L'analyse spatiale des changements des températures futures par rapport aux données de référence révèle des augmentations de température dans l'ensemble des sous-bassins du HaB-OER, variant selon les périodes et les scénarios (Fig. 7.14). Cependant, les sous-bassins situés au nord du HaB-OER, tels que le bassin de Tamchachat, enregistrent des augmentations plus marquées par rapport aux bassins situés au sud.

Pour le scénario RCP 4.5, les bassins du nord du HaB-OER enregistrent une augmentation des températures de 1,6 °C, 2,5 °C et 2,9 °C respectivement pour les périodes P_1, P_2 et P_3. Ces valeurs augmentent dans le scénario RCP 8.5 pour atteindre 1,9 °C, 3,2 °C et 5,7 °C. Il est important de noter que la période P_3 enregistre les valeurs les plus élevées, allant de 5,2 °C à 5,7 °C. Les sous-bassins du nord-ouest connaissent généralement des augmentations de température moins importantes sur les trois périodes P_1, P_2 et P_3, avec respectivement pour les deux scenarios des valeurs de 1,3 /1,6 °C, 2,2/2,6°C et 2,5/5,2°C.

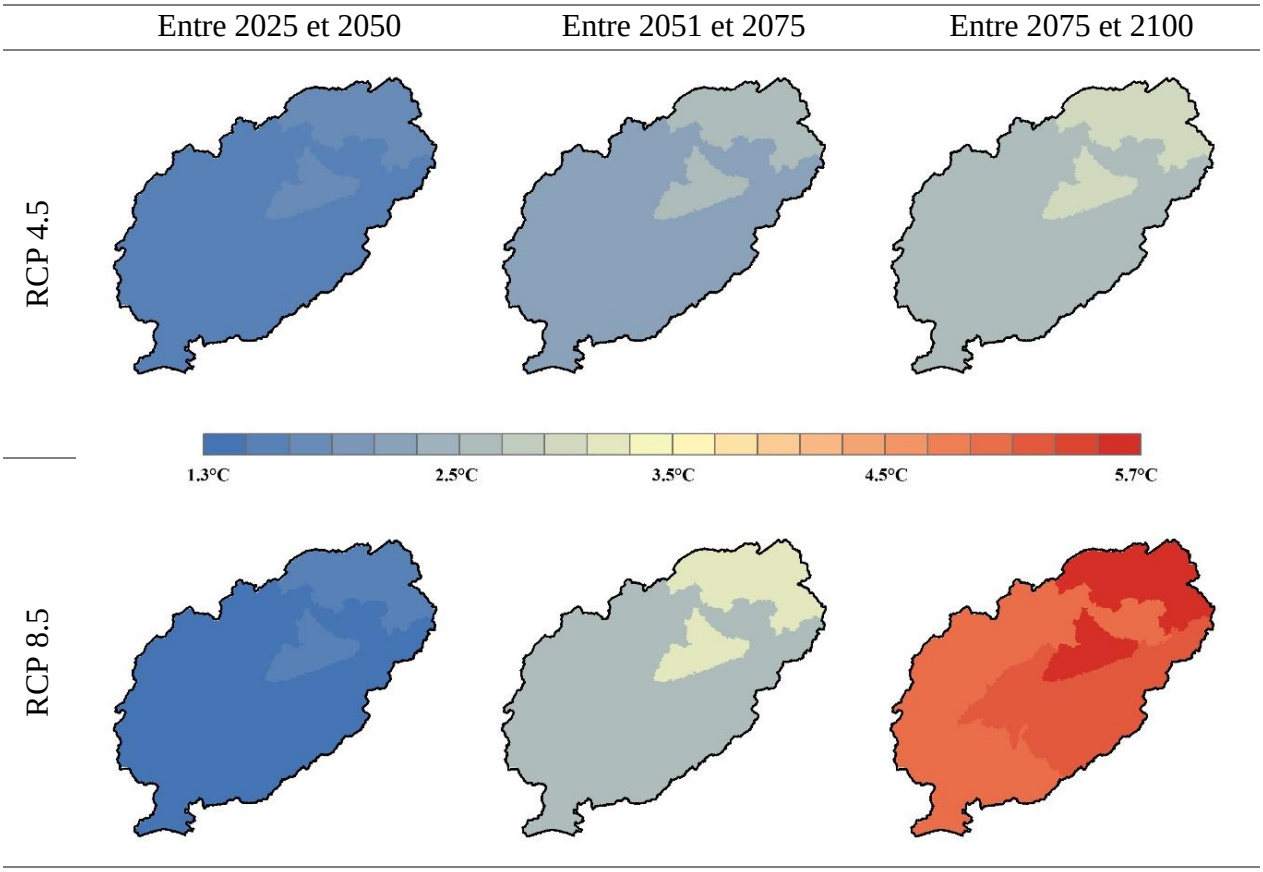


Figure 7.14 Changement spatial relatif des températures moyennes dans les périodes P_1, P_2 et P_3 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 par rapport à la période de référence

7.6 Impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau dans le HaB-OER

7.6.1 Caractéristiques des sécheresses sous l'impact des changements climatiques

7.6.1.1 Fréquence des sécheresses futures

a. Indice SPEI

Des études basées sur des simulations de projections climatiques suggèrent la persistance de la diminution des précipitations à l'avenir (Tramblay *et al*., 2012). Plusieurs indices de sécheresse ont été développés et appliqués dans divers domaines tels que la météorologie, l'hydrologie et l'agriculture. Parmi les indices les plus couramment utilisés, on trouve l'Indice Standardisé d'Évapotranspiration et Précipitations "SPEI" (Vicente Serrano *et al*., 2010). Cet indice utilise les mêmes principes que l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI), mais il intègre la température pour tenir compte de son impact sur la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique (OMM, 2016). Comparé au SPI, le SPEI s'est révélé plus robuste dans la caractérisation des sécheresses dans les zones semi-arides (Byakatonda *et al*., 2018). Il a également mieux réussi à détecter les sécheresses dans les données de référence et les données simulées en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration (Badji *et al*., 2023). L'indice SPEI est utilisé pour étudier les événements de sécheresse dans le HaB-OER à partir de la moyenne des données provenant des cinq MCR retenus. Les données de précipitations et de températures maximales et minimales de la période de référence ont été également utilisée pour analyser et comparer les effets futurs de la sécheresse dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Les calculs de l'indice SPEI ont été réalisés pour des périodes annuelles et saisonnières de 12 et 03 mois. Ensuite, les niveaux de sécheresse ont été classés en quatre catégories, les mêmes que celles de l'indice SPI (Tab. 7.6).

Tableau 7.6 Classification de la sévérité de la sécheresse SPI (McKee et al., 1993)

Classes	Type de sécheresse
0 à -0.99	Légèrement sèche
-1.0 à -1.49	Modérément sèche
-1.5 à -1.99	Sévèrement sèche
Moins de -2.0	Extrêmement sèche

b. Les années futures : une accentuation alarmante des périodes sèches

La fréquence des classes de sécheresses est mesurée en comptant le nombre d'événements de sécheresse sur une station donnée par rapport au nombre total d'événements pendant les périodes sélectionnées, à la fois pour les échelles de temps de 12 et de 03 mois, et en tenant compte des scénarios RCP considérés (Fig. 7.15). Pour obtenir des informations globales sur le HaB-OER, la moyenne des fréquences de l'ensemble des stations a été utilisée.

Pour le SPEI annuel (12 mois), la fréquence des années sèches pour la période de référence P_0 est d'environ 50%, avec une prédominance de la classe légèrement sèche. Cette fréquence augmente pendant P_2 et P_3, atteignant respectivement pour les deux scénarios 67,5/61,8% et 61/96%. Dans la troisième période du RCP 8.5, on observe une fréquence de 25% pour la classe sévèrement sèche et de 2% pour la classe extrêmement sèche. En ce qui concerne le SPEI saisonnier (3 mois), la fréquence diminue pendant P_1 pour les deux scénarios, puis elle augmente pendant P_2 et P_3, atteignant respectivement 61,4/60,7% et 61,6/87,2% pour le RCP 4.5 et le RCP 8.5. On enregistre des fréquences extrêmes pour la troisième période du RCP 8.5, avec 19% de la classe sévèrement sèche et 3% de la classe extrêmement sèche.

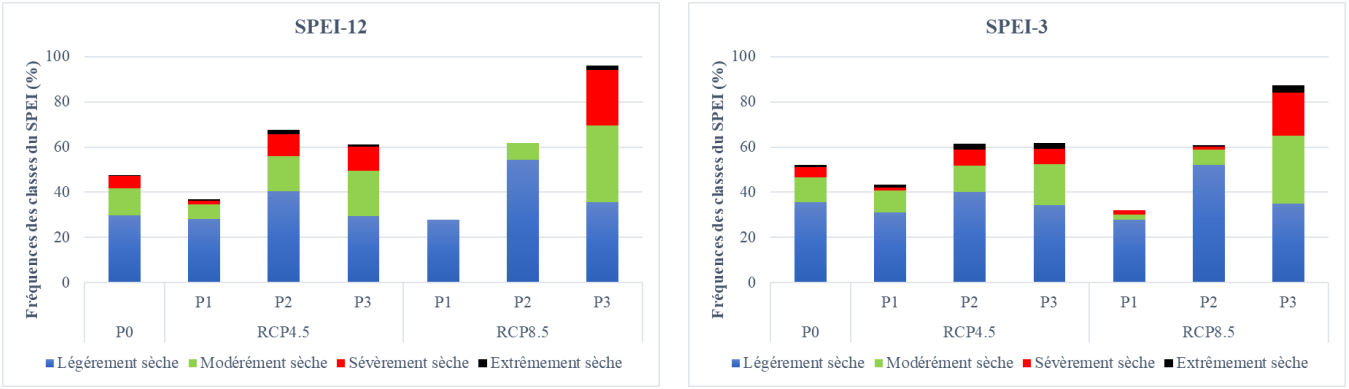


Figure 7.15 Fréquence des classes de sécheresses de référence et futures au niveau du HaB-OER

Afin de mieux anticiper les périodes de stress hydrique et de mettre en place des mesures d'adaptation appropriées, il est important de prendre en compte les prévisions de sécheresse à court et à long terme (Annexe 7.7, 7.8, 7.9 et 7.10). À l'échelle de la station de Tarhat, l'évolution des conditions de sécheresse à long terme, basée sur le SPEI-12, met en évidence les tendances annuelles de sécheresse (Fig. 7.16). Pour le RCP 4.5, malgré une alternance entre les années sèches et humides, la dominance des années sèches persiste, tandis que pour le RCP 8.5, la succession d'années sèches domine plus de 90% de la troisième période. L'analyse de sécheresse à court terme, mesurée à l'aide du SPEI-3, révèle des variations rapides avec une alternance entre les saisons sèches et humides pour le RCP 4.5. En revanche, la troisième période du RCP 8.5 est caractérisée par une dominance des années sèches, indiquant une diminution des saisons humides et une augmentation des saisons sèches.

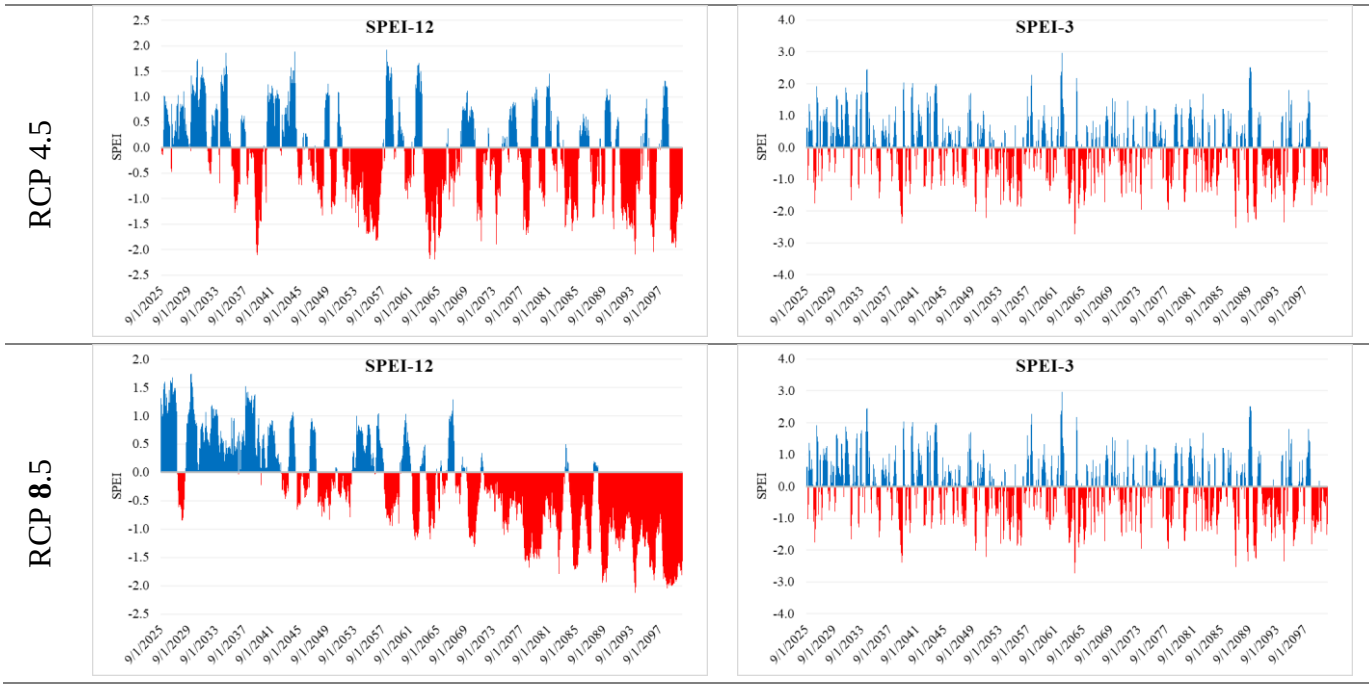


Figure 7.16 SPEI-12 et SPEI-3 pour la station de Tarhat selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

7.6.1.2 Tendance des sécheresses futures

Pour évaluer les tendances futures des paramètres climatiques, une analyse du "Test de Mann-Kendall" (Mann, 1945; Kendall, 1975) a été réalisée sur les données de précipitations et de températures projetées. Dans cette méthode non paramétrique, l'hypothèse nulle (H_0) stipule qu'il n'y a pas eu de tendance dans les paramètres au fil du temps, tandis que l'hypothèse alternative (H_1) suggère qu'il y a eu une tendance (à la hausse ou à la baisse) au fil du temps (Ahmad *et al.*, 2015). En utilisant le calcul de la "statistique Z" du test de Mann-Kendall (Annexe 7.11), ce test est considéré parmi les méthodes statistiques préférées pour l'analyse des tendances des séries temporelles. Afin d'estimer l'amplitude des tendances dans les données climatiques futures, la méthode de l'estimation de la pente de Sen, (1968) a été utilisée.

Le test de tendance de Mann-Kendall a révélé l'existence d'une tendance significative dans les séries temporelles SPEI-12 et SPEI-3 de toutes les stations, et ce, pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Les tests de tendance effectués sur les données annuelles SPEI-12 et saisonnières SPEI-3 ont montré que toutes les valeurs sont négatives, ce qui indique une augmentation des tendances de sécheresse dans la région HaB-OER. L'ampleur de la tendance, estimée par la pente "Sen's Slope", est assez similaire entre les stations, mais varie en fonction de l'échelle temporelle et des deux scénarios. Cette ampleur tend à augmenter du niveau saisonnier vers le niveau annuel, ainsi que du scénario optimiste vers le scénario pessimiste (Tab. 7.7).

Tableau 7.7 Tendance et ampleur des sècheresses futures

	RCP 4.5				**RCP 8.5**			
	SPEI-12		SPEI-3		SPEI-12		SPEI-3	
	Z	Sen's slope	Z	Sen's slope	Z	Sen's slope	Z	Sen's slope
Ava	-9.30	-0.0012	-6.39	-0.0008	-25.75	-0.0027	-18.98	-0.0022
Cha	-9.77	-0.0012	-6.86	-0.0009	-26.30	-0.0027	-19.77	-0.0022
Tag	-9.66	-0.0013	-6.77	-0.0009	-26.27	-0.0027	-19.88	-0.0022
Tam	-9.11	-0.0011	-6.67	-0.0009	-27.46	-0.0027	-21.61	-0.0024
Tar	-9.17	-0.0012	-5.86	-0.0008	-26.60	-0.0028	-19.48	-0.0022

7.6.2 Impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau dans le HaB-OER

7.6.2.1 L'approche SWAT-CORDEX : prévision du régime hydrologique futur

Les conséquences de la succession d'années sèches et de l'intensité croissante des épisodes de sécheresse entraîneront des répercussions négatives sur la disponibilité des ressources en eau. Cela souligne la nécessité d'une gestion proactive pour garantir une utilisation durable de cette ressource vitale. L'approche couramment utilisée pour étudier les impacts du changement climatique sur les débits consiste à utiliser des modèles hydrologiques qui sont alimentés par des sorties de précipitations et de températures des modèles climatiques (Tramblay *et al*., 2013). Le modèle SWAT est largement utilisé pour évaluer l'impact des changements climatiques, et de nombreuses études ont démontré sa capacité à aborder ce type de problématique (Grusson, 2016). L'analyse des simulations hydrologiques réalisées sur la période de 1989 à 2009 indique que le modèle SWAT est capable de reproduire de manière satisfaisante les régimes hydrologiques des cours d'eau du HaB-OER en utilisant les données des MCR.

7.6.2.2 Les années futures : une baisse des débits des cours d'eau du HaB-OER

Selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, le débit annuel moyen projeté pour toutes les stations se situe respectivement entre des minimums de 0,5/0,34 m³/s et des maximums de 13,5/11,8m³/s, comparés aux 0,63 m³/s et 14,9 m³/s observés pendant la période de référence. La diminution sur les trois périodes P_1, P_2 et P_3 est respectivement de 16,2/26%, 26,8/36% et 22,8/52,6% pour les deux scénarios. À l'instar des précipitations, la période P_3 sous le scénario RCP 4.5 enregistre une atténuation de la diminution des débits en raison de la stabilité des émissions de CO_2.

Les résultats indiquent que la diminution des débits dans l'Oum Er Rbia (Station de Tarhat) est la moins importante, variant entre 7 % et 12 % sous le scénario RCP 4.5 et entre 13 % et 30 % sous le scénario RCP 8.5 (Fig. 7.17). Un autre cours d'eau présentant une diminution modérée est celui de Chbouka (Station Aval El Héri), avec des diminutions allant de 10,3 % à 20,7 % sous le scénario RCP 4.5 et de 45,6 % à 20,9 % sous le scénario RCP 8.5. En revanche, pour les autres cours d'eau, Amengous (Station de Tamchachat), Srou (Station de Chacha n'Amellah) et Ouaoumana (Station de Taghzoute), les diminutions sont beaucoup plus importantes selon les deux scénarios. Elles varient respectivement entre 13,1 % et 29,4 %, 17,4 % et 30,9 %, et 33,2 % et 41,1 % pour le scénario RCP 4.5, et entre 26,2 % et 68,2 %, 30 % et 59,8 %, et 40,1 % et 59,2 % pour le scénario RCP 8.5.

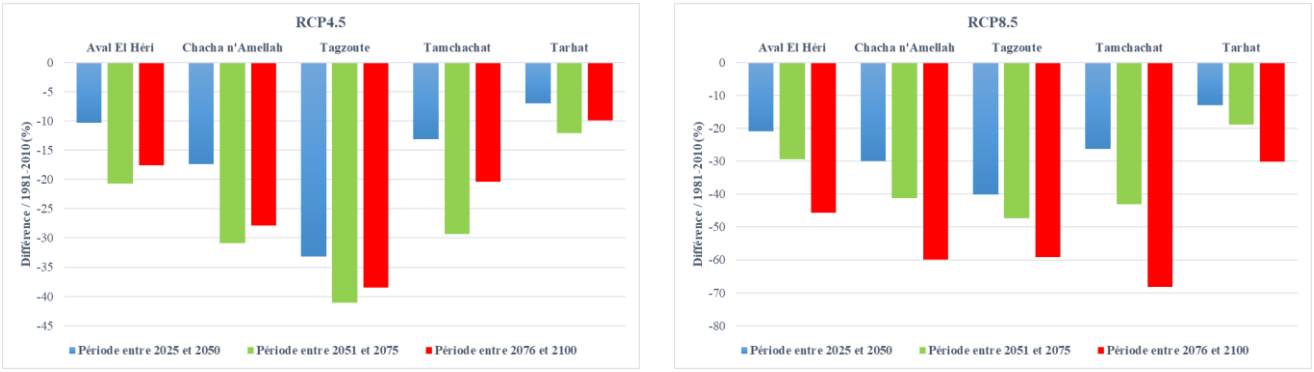


Figure 7.17 Différence entre les moyennes des débits futurs et les moyennes des débits de référence

À l'échelle saisonnière (Fig. 7.18), à l'exception de la période P_1 du JJA, toutes les périodes du RCP 4.5 indiquent des diminutions des débits moyens dans le HaB-OER, en particulier pendant

le DJF, où cette diminution atteint un maximum de 31,3% pendant le P_2. Sous le scénario RCP8.5, la situation devient encore plus marquée, avec des diminutions remarquables des débits pour toutes les périodes, notamment en P_3, où elles atteignent une valeur maximale de 58,4% pendant le DJF.



Figure 7.18 Différence entre les moyennes des débits saisonniers futures et les moyennes des débits saisonniers de référence

Rappelons que les trois cours d'eau de l'Oum Er Rbia, de Srou et d'Ouaoumana alimentent le b'AEH en aval. Cette diminution influence sans aucun doute la rétention d'eau du barrage, surtout pendant la période humide de DJF, caractérisée par la collecte des eaux de ces cours d'eau, pour une utilisation ultérieure pendant les périodes sèches.

Si l'on examine les débits de l'Oum Er Rbia, de Srou, et d'Ouaoumana pendant la saison DJF, durant la période P_1 (Tab. 7.8), on remarque des diminutions de 14,6/19,3 %, 36,1/41,7 %, et 48/50,8 % respectivement sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Ces diminutions représentent des pertes saisonnières d'eau d'environ 22/29 hm^3, 37/43 hm^3, et 7/8 hm^3 respectivement. Pendant la période P_3 du RCP 8.5, la diminution des trois cours d'eau atteint des maximums de 38,6 % pour l'Oum Er Rbia et d'environ 67 % pour les deux autres cours d'eau. Ces diminutions équivalent à des pertes respectives de 58 hm^3, 69 hm^3, et 10 hm^3.

Tableau 7.8 Diminution des débits des trois cours d'eau qui alimentent le barrage d'Ahmed El Hansali

Débits m^3/s		**RCP 4.5**				**RCP 8.5**			
		SON	**DJF**	**MAM**	**JJA**	**SON**	**DJF**	**MAM**	**JJA**
Oum Er Rbia (Tarhat)	P_0	11.1	19.2	18	11.4	11.1	19.2	18	11.4
	P_1	10.4	16.4	18	10.6	10.3	15.5	16.1	10
	P_2	10	16.1	16.1	10.1	9.8	15	14.2	9.5
	P_3	10.3	17.2	16.4	9.9	9.3	11.8	11.7	8.8
Srou (Chacha n'Amellah)	P_0	3.6	13.3	8.1	2	3.6	13.3	8.1	2
	P_1	3.2	8.5	8.8	1.9	2.6	7.8	7.1	1.5
	P_2	2.4	8	6.8	1.5	2.2	7.1	5.3	1.3
	P_3	2.7	8.6	6.8	1.4	1.7	4.4	3.8	1
Ouaoumana (Tagzoute)	P_0	0.5	1.9	1.2	0.3	0.5	1.9	1.2	0.3
	P_1	0.5	1	0.9	0.2	0.4	0.9	0.7	0.2
	P_2	0.4	1	0.7	0.2	0.4	0.9	0.6	0.2
	P_3	0.4	1.1	0.7	0.2	0.3	0.6	0.4	0.2

L'évolution des régimes mensuels d'écoulement montre des diminutions de différentes amplitudes pour toutes les stations du HaB-OER sur l'ensemble des périodes des deux scénarios (Annexe 7.12). La station de Taghzoute enregistre les diminutions les plus importantes pour les deux scénarios, avec des valeurs variant entre 47% et 53% pendant janvier pour le RCP 4.5, et des valeurs variant entre 53% et 69% pendant février pour le RCP 8.5. Le débit de ce mois passe de 2,5 m^3/s en tant que débit de référence à 0,7 m^3/s pour la période P_3 du RCP 8.5.

À l'échelle de la station de Tarhat, considérée comme moins affectée par les impacts des changements climatiques, on observe également des valeurs importantes. A l'exception de la période d'avril-mai de la période P_1 sous le scénario RCP 4.5, l'évolution des régimes de l'Oued Oum Er Rbia, principal affluent du barrage, montre des diminutions pour l'ensemble des périodes et des deux scénarios (Fig. 7.19). Le mois de février enregistre la plus forte diminution avec 13,6%, 15,2 %, 20,4 % et 43,2 % respectivement pour les périodes P_1, P_3 sous les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Cela équivaut simultanément à une perte d'eau mensuel de 7 hm^3, 8 hm^3, 11 hm^3 et 23 hm^3.

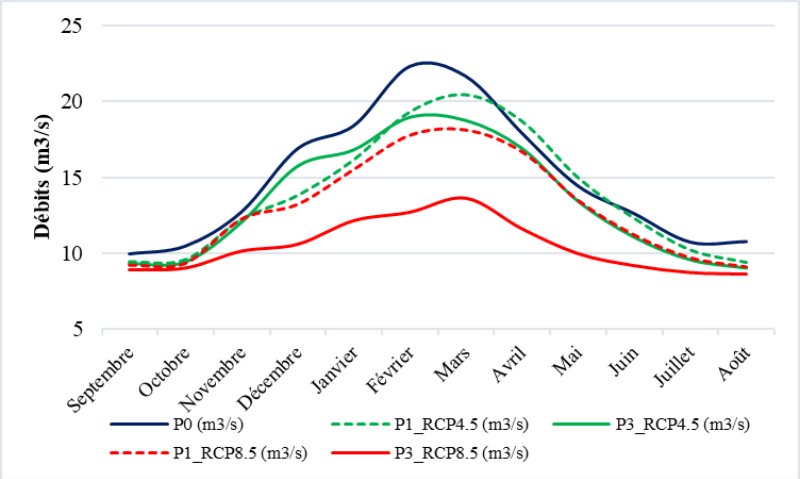


Figure 7.19 Régimes mensuels d'écoulement futurs et d'écoulement de référence pour la station de Tarhat

7.7 Convergence sur les impacts hydrologiques des changements climatiques à l'échelle régionale

Les projections climatiques futures pour le HaB-OER indiquent une augmentation des températures, une diminution des précipitations, et une baisse des débits des cours d'eau dans la zone d'étude. D'ici 2050, la moyenne des précipitations diminue de 16 % à 23 % selon les deux scénarios, tandis qu'à l'horizon 2100, cette diminution moyenne atteint 21 % à 45 %. En ce qui concerne la température moyenne, elle augmente de 2,5°C à 2,8°C pendant la première période, selon les deux scénarios. En 2100, la température moyenne continue d'augmenter pour atteindre respectivement 3,4°C et 6,1°C. En raison de la diminution des précipitations, les débits moyens des cours d'eau connaissent également une réduction. Cette diminution atteint, à la fin des années 2050, 16 % à 26 % par rapport au débit de référence, selon les deux scénarios. Elle s'accentue davantage vers les années 2100, atteignant simultanément 23 % et 53 %.

Plusieurs recherches ont été menées au Maroc, et nos résultats sont en accord avec la plupart d'entre elles. Schilling *et al*., (2012) affirment une diminution des précipitations entre 10% et 20%, et une augmentation de température entre 2 et 3 °C d'ici 2050. Tramblay *et al*., (2013) ont également indiqué une diminution des précipitations de 15% à 19% et une augmentation de la température de 1,3°C à 1,9°C sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 respectivement pour la période 2041-2062, ainsi qu'une réduction de l'écoulement de surface de 30% à 57%. Marchane *et al*., (2017) ont constaté des températures plus élevées de 1,4°C à 2,6°C et des précipitations totales en baisse de 22% à 31% pour la période 2049-2065, avec une réduction significative de l'écoulement de surface de 19% à 63%. Moucha *et al*., (2021) ont rapporté une augmentation de 2,6°C et une diminution des précipitations de 16% dans les zones montagneuses entre 2041 et 2060. Selon Choukri *et al*., (2020), pour la période 2031-2050, les températures moyennes devraient augmenter de 1,3°C à 2°C, et les précipitations interannuelles moyennes diminuer de 6,2% à 11,6% selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement.

7.8 Conclusion

Afin d'obtenir des projections climatiques détaillées et de réaliser des analyses d'impact hydrologique précises, notre approche repose sur la combinaison du modèle SWAT et des simulations CORDEX. Le modèle SWAT est largement reconnu comme l'un des modèles les plus utilisés pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau à des échelles fines. D'autre part, les simulations CORDEX, en raison de leur résolution plus fine, permettent une meilleure représentation des conditions climatiques. Nous avons utilisé les données de précipitations et de températures provenant de cinq modèles (ALADIN63, CCLM4-8-17, HIRHAM5, RACMO22E et RCA4) sur les trois périodes P_1, P_2, et P_3, pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Une fois que le modèle SWAT a été calibré et validé pour le HaB-OER, et que les biais des données ont été corrigés, les sorties des modèles CORDEX ont été utilisées comme entrées pour le modèle SWAT afin de simuler les débits futurs de manière précise et détaillée.

Les prévisions indiquent une diminution significative des précipitations annuelles, ce qui entraînera une réduction importante de l'approvisionnement en eau du b'AEH. La diminution des précipitations hivernales pourrait avoir un impact critique sur les ressources en eau, entraînant une diminution importante des apports pendant l'hiver, estimée à environ 28% à 44% selon les scénarios RCP 4.5 et RCP8.5. Par conséquent, les apports hydriques diminueront significativement et le risque d'assèchement du réservoir augmentera considérablement, comme cela a été observé dans d'autres pays méditerranéens. Si l'on considère que le barrage reçoit en moyenne annuelle environ 760 hm^3, les projections futures montrent que cette quantité diminuera sur les trois périodes P_1, P_2, et P_3, avec respectivement pour les deux scenarios des valeurs de 80/137 hm^3, 136/191 hm^3 et 118/288 hm^3.

Chapitre 8 : L'érosion hydrique : un vrai défi pour la ressource en eau du b'AEH

8.1 Introduction

Face aux changements globaux au cours desquels les sociétés humaines transforment de manière irréversible leur environnement, les ressources en eau sont continuellement affectées par les modifications d'occupation et d'usage des sols. L'analyse de la dynamique de ces changements revêt une importance cruciale dans le domaine de l'analyse spatiale pour une meilleure compréhension des bassins versants (Ray *et al*., 2023). La déforestation, principalement causée par l'expansion urbaine et la conversion des terres à des fins agricoles, joue un rôle prépondérant dans ces transformations. Cette situation entraîne divers problèmes, notamment l'érosion des sols, qui peut avoir des répercussions néfastes sur l'agriculture (Pomel & Salomon, 2019). En effet, la perte de sol au Maroc provoque la perte d'environ 70 Mm^3 d'eau annuellement en raison de l'envasement des barrages, ce qui entraîne une diminution de 0,5% de leur capacité totale (Choukri *et al*., 2019; Markhi *et al*., 2019).

Les forêts, qui couvrent environ les deux tiers du HaB-OER (Chap2), jouent un rôle essentiel dans la préservation des sols en agissant comme des boucliers naturels contre leur érosion. Cependant, le déclin de la couverture forestière, en particulier au profit des terres agricoles dans ces zones montagneuses fragiles, augmente le taux d'érosion des sols ce qui entraîne une augmentation de la sédimentation dans les cours d'eau. Cette situation peut compromettre l'efficacité du b'AEH, anciennement nommé Dchar El Oued, en réduisant sa capacité de stockage. Afin de développer les meilleures pratiques de gestion des ressources en eau dans notre zone d'étude, il est crucial de quantifier l'impact potentiel de ces changements sur la perte de sol d'une part, et sur les ressources en eau mobilisables au niveau du b'AEH d'autre part.

8.2 Intérêt du b'AEH dans la gestion des ressources en eau régionales

8.2.1 Le b'AEH : un atout stratégique national

Le Maroc dispose d'un potentiel annuel de ressources en eau renouvelables estimé à 22 milliards de m^3, soit l'équivalent de 650 m^3/habitant/an contre 2560 m^3 en 1960, marquant ainsi la transition du pays d'une situation de stress hydrique à une pénurie d'eau (Harraou, 2019). Ces ressources sont soumises à une forte disparité spatio-temporelle marquée par une irrégularité annuelle avec une augmentation des sécheresses dans la période récente, et elles sont inégalement réparties sur le territoire (Harbouze *et al*., 2019). Près de 70% de ces ressources se trouvent dans les bassins du Loukkous, du Sebou et de l'Oum Er Rbia qui couvrent seulement 15% du territoire national (MTEDD, 2020). Pour faire face à cette rareté, le Maroc a mis en place depuis les années 1960 une politique de construction de barrages ayant la une capacité totale de stockage actuel de 19,1 milliards de m^3 (Amara, 2021) dans 149 grandes retenues d'eau.

A l'égard de cette "grande hydraulique" le bassin de l'Oum Er Rbia est un bassin précurseur puisque ses premiers aménagements datent du début du 20ème siècle. Actuellement, le bassin compte 5 ouvrages de régularisation des débits, ainsi que 13 ouvrages de prise ou de compensation, offrant une capacité totale de mobilisation des ressources hydrauliques estimée à environ 4,86 milliards de m^3 en 2020 (ABHOER, 2018g), représentant ainsi 25% du stockage national total. Parmi ces aménagements, les trois principaux barrages sont le barrage Al Massira, le barrage de Bin El Ouidane et le b'AEH, avec des capacités respectives de 2657 Mm^3, 1215 Mm^3 et 668 Mm^3.

Mis en service en 2001, le b'AEH (photo.8), est l'une des pièces maîtresses du complexe Dchar El Oued-Aït Messaoud, dont l'objectif est de maximiser la mobilisation des eaux de surface pour l'approvisionnement en eau potable et industrielle de plusieurs agglomérations, l'irrigation de près de 36 100 hectares dans la plaine du Tadla, ainsi que la production d'énergie électrique (ABHOER, 2018c).



Photo 8-1 Barrage Ahmed El Hansali (ABHOER, 2014)

8.2.2 Suivi temporel des volumes d'eau stockés dans le b'AEH

8.2.2.1 Approche hydrologique

Après trois ans de remplissage du b'AEH, son volume a atteint en 2003-04 les 530 Mm^3, soit environ les 3/4 de sa capacité totale (Fig. 8.1). Ensuite, et conformément aux résultats de l'analyse des données pluviométriques effectuée dans la zone d'étude (El Orfi *et al*., 2020b), l'augmentation et la diminution des volumes suivent les fluctuations annuelles des précipitations. Jusqu'en 2007-08, fin de la période sèche qui avait commencé en 1980, le volume du b'AEH diminue pour atteindre un minimum de 218 Mm^3 soit 30% de sa capacité totale. À partir de 2008-09, une série pluvieuse débute au cours de laquelle le volume augmente pour atteindre un maximum de 647 Mm^3 en 2012-13 soit environ 93% de la capacité totale du barrage. Depuis lors la pluviométrie a diminué, ce qui a entraîné une réduction critique des volumes stockés estimé en 2022-23 à seulement 62 Mm^3, soit 9.2% de sa capacité totale. Le taux moyen de remplissage est de 385 Mm^3 soit seulement 53.2% de la capacité initiale du barrage.

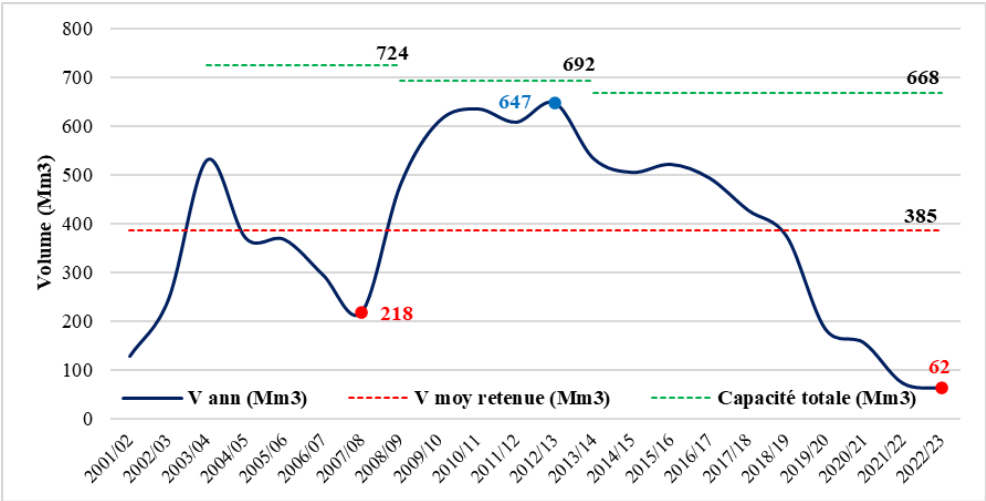


Figure 8.1 Evolution des volumes annuels du b'AEH entre 2001/02 et 2022-23

Dans le cadre de la gestion des écoulements par la grande hydraulique, les volumes d'eau produits dans le HaB-OER sont stockés dans le réservoir du b'AEH mais aucune étude fine n'a été produite à ce jour sur l'organisation spatio-temporelle des apports. Afin de remédier à cette lacune, une comparaison a été réalisée entre les volumes annuels entrant dans le barrage provenant des trois cours d'eau qui l'alimentent (Oum Er Rbia, Srou et Ouaouman) et les apports fournis par l'ABHOER (Fig. 8.2). Mis à part de légères différences, les volumes calculés et les apports sont étroitement liés, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,88. La moyenne annuelle des apports sur la période 2001-02 à 2018-19 s'élève à 767 Mm^3, les trois cours d'eau, Oum Er Rbia, Srou et Ouaoumana, contribuant respectivement à 64,9%, 31,8% et 3,3% de l'alimentation du barrage. L'année marquée par un apport maximal est 2009-10 avec 1845,6 Mm^3, tandis que le minimum a été enregistré en 2006-07 avec seulement 323,7 Mm^3.

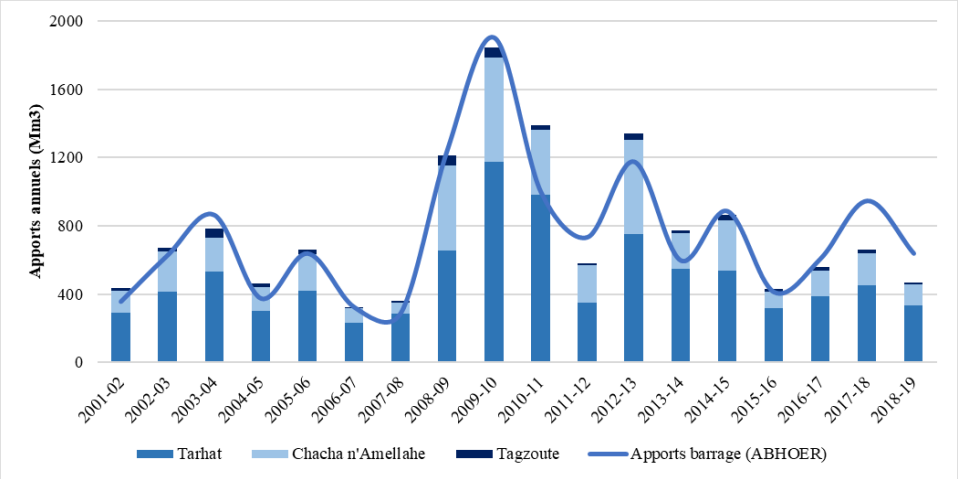


Figure 8.2 Contribution de l'Oum Er Rbia, de Srou et d'Ouaoumana dans l'alimentation du b'AEH

Les volumes annuels de base et de crue des principaux cours d'eau qui alimentent le b'AEH ont été calculer selon la méthode de l'hydrologie analytique (Chap. 4). Sur la moyenne annuelle de 767Mm^3 qui alimente le barrage, les volumes de base représentent 81%, soit 621,3 Mm^3, répartis entre l'Oum Er Rbia (71%), le Srou (26%) et l'Ouaoumana (3%), tandis que les volumes de crue contribuent à 19%, soit 146 Mm^3, répartis respectivement à 40%, 55% et 5% sur les trois cours d'eau (Fig. 8.3). L'Oum Er Rbia contribue davantage à l'alimentation du barrage par les débits de base en raison de la contribution régulière de ses sources situées à l'amont (Chap. 4). D'autre part, le Srou contribue davantage aux débits de crue en raison de ses caractéristiques physiographiques davantage favorable au ruissellement (Chap. 2).

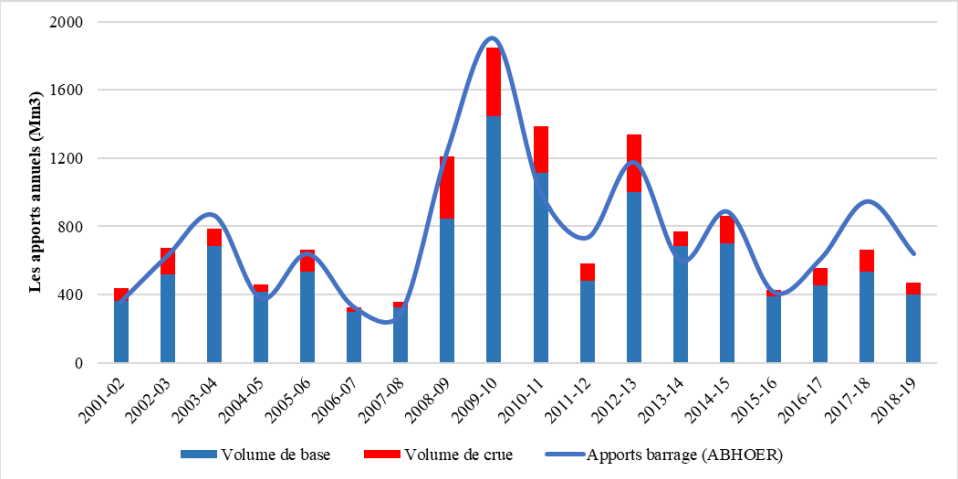


Figure 8.3 Contribution des débits de base et de crues des trois cours d'eau dans l'alimentation du b'AEH

8.2.2.2 Approche par télédétection satellitaire

Le suivi des volumes des lacs du HaB-OER, y compris la retenue du b'AEH, à l'aide d'images satellites, représente une approche pratique, objective et complémentaire aux méthodes traditionnelles basées sur la lecture des échelles limnimétriques. Cette approche s'avère particulièrement utile en l'absence de données précises reflétant l'état actuel de la retenue, notamment dans un contexte de diminution des précipitations et un recul de l'étendue.

L'étude de l'évolution temporelle des volumes d'eau du b'AEH repose sur deux sources d'information : les variations de l'étendue du lac et les données de bathymétrie (Fig. 8.4). Pour analyser l'évolution de l'étendue du lac du b'AEH de 2001/02 à 2022/23, nous avons utilisé l'indice MNDWI sur des images Landsat (Chap. 5). De plus, nous avons utilisé une carte topographique à l'échelle de 1/100000 de Khénifra (Institut Géographique National - France, 1972), des données de Google Earth et la couche World Topo Map (doc.arcgis.com) pour obtenir un MNT anté-barrage avec une résolution spatiale de 87 m. Enfin, afin de calculer les volumes de la retenue du b'AEH, nous avons croisé les variations de l'étendue du lac avec les données de bathymétrie issues du MNT (El Orfi *et al.*, 2020a).

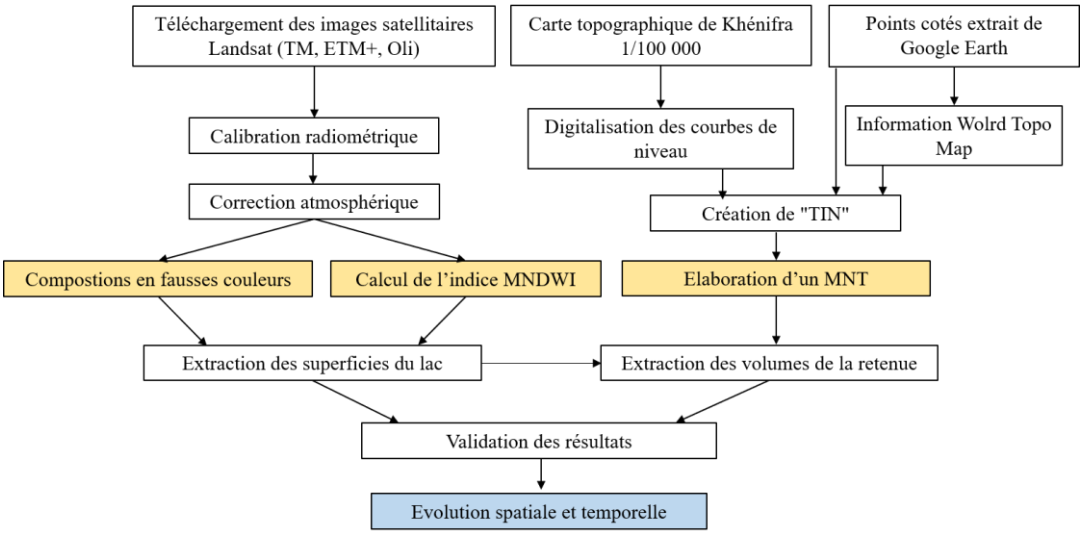


Figure 8.4 Organigramme méthodologique pour le calcul des volumes de la retenue du b'AEH

La faible incertitude dans le calcul du volume d'eau est principalement attribuée au système de pentes du plancher du lac, où 82% de la surface présente des pentes inférieures à 15% et seulement 2% présente des pentes supérieures à 25% (El Orfi *et al.*, 2020a). L'interprétation visuelle de la superposition des étendues minimale et maximale de la retenue HaB-OER avec les compositions colorées des images Landsat, ainsi que les résultats du MNDWI, s'avère globalement acceptable pour ces deux situations extrêmes (Annexe 8.1). De plus, la corrélation à l'échelle annuelle et mensuelle entre les volumes d'eau calculés à partir de la télédétection et ceux mesurés par l'ABHOER sur la période de 2001-02 à 2022-23 montre de bons résultats, avec des coefficients R^2 respectifs de 0,97 et 0,96 (Annexe 8.2).

Notre méthodologie nous a permis de suivre avec précision l'évolution du volume de la retenue à différents pas de temps, y compris des dates récentes. Après le remplissage du barrage, la fin de la période sèche est accompagnée d'une vidange du lac jusqu'à atteindre 171 Mm^3 en 2007/08 (Fig. 8.5). À partir de 2008-09, les réserves augmentent pour atteindre le maximum en 2012-13 avec 690 Mm^3, pour ensuite diminuer de manière quasi-continue et dépasser la moyenne de 380Mm^3 en 2018-19. Nos résultats montrent que le b'AEH a atteint un niveau critique en 2022-23, avec seulement 63 Mm^3, ce qui représente environ 9.4% de sa capacité totale initiale.

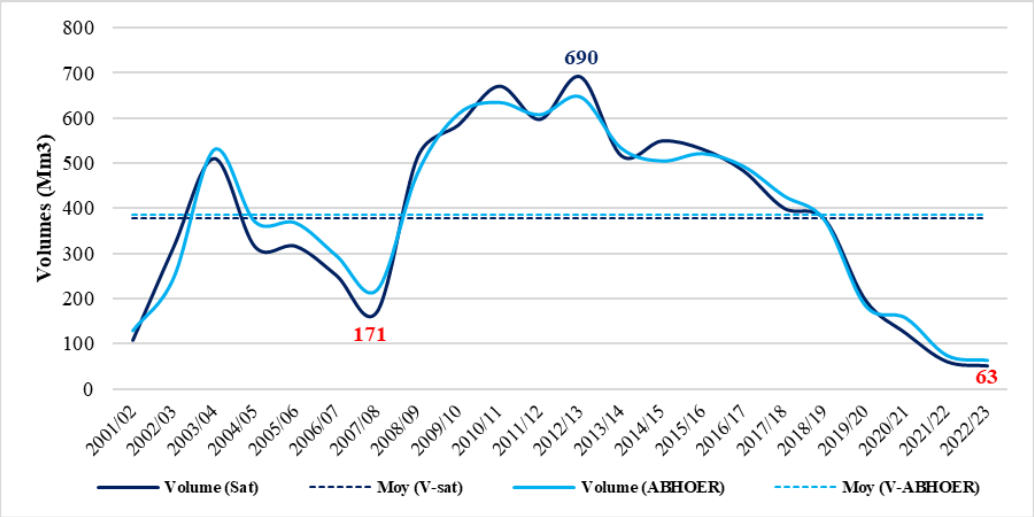
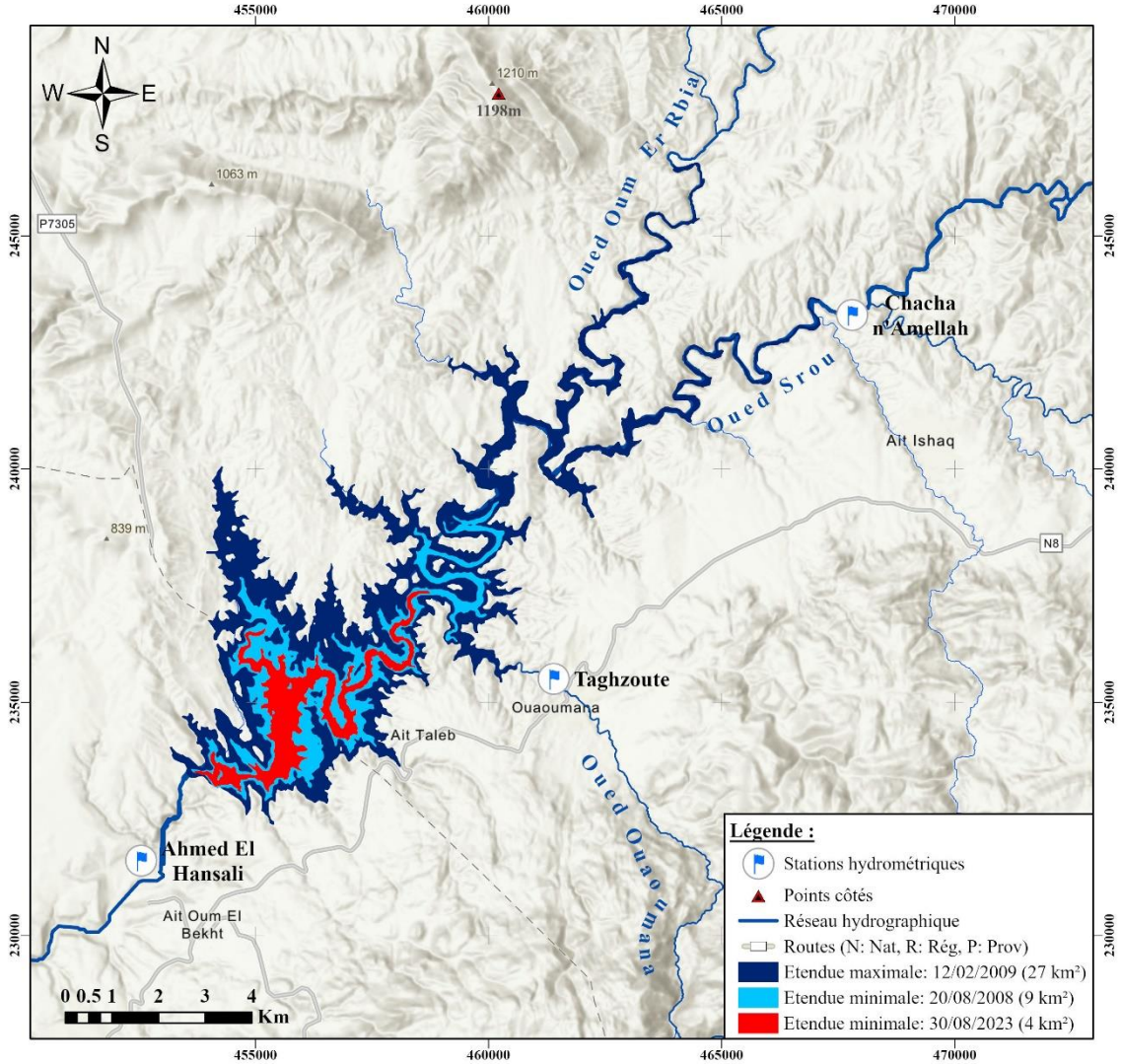


Figure 8.5 Volume annuel moyen de la retenue du b'AEH entre 2001-02 et 2022-23

L'utilisation de la cartographie basée sur l'exploitation des données satellitaires s'avère intéressante pour analyser les fluctuations spatiales. Conformément aux tendances climatiques régionales, on observe un retrait important de l'étendue du lac pendant les années sèches, notamment en aout 2023, avec une étendue minimale qui ne dépassant pas les 4 km² (Carte 8.1 Ph8.2 et 8.3).



Carte 8.1 Etendues minimale et maximale du lac sur la période 2001/2023



Photo 8-2 Etendue du lac du b'AEH en 2012 (El Orfi, 2012)



Photo 8-3 Etendue du lac du b'AEH en 2022 (El Orfi, 2022)

8.2.3 Bilan hydrique du b'AEH

8.2.3.1 Pertes d'eau de la retenue du barrage

a. Pertes d'eaux par évaporation

Pour évaluer l'évaporation au-dessus des lacs et des réservoirs, les données provenant des bacs d'évaporation sont fréquemment utilisées. Cependant, les bacs ont beaucoup moins de réserve de chaleur que les lacs et ont tendance à fournir un cycle d'évaporation annuel différent de celui des lacs (OMM, 2008a). Afin d'utiliser les mesures effectuées par un bac d'évaporation pour estimer l'évaporation des lacs et des réservoirs de barrages d'une profondeur moyenne à grande, un coefficient de correction est nécessaire (Lenters *et al*., 2013). Celui-ci varie en fonction de sa conception. Par exemple le coefficient moyen annuel de correction pour les bacs sur charpente est de 0,74 mais peut varier de 0,57 à 0,91 ; Pour les bacs enterrés il est de 0,78 en moyenne mais varie sur l'année de 0,7 à 0,8 (Aldomany, 2017). Au sein du b'AEH, un bac Colorado est installé à proximité de la retenue, permettant ainsi la mesure quotidienne de l'évaporation (Ph.8.2). Géré par l'ABHOER, ces mesures annuelles couvrant la période de 2002-03 à 2018-19 ont été corrigées en utilisant l'équation suivante :

$$V_E = C_r \times S \times L_E$$

(Équation 8.1)

avec :
V_E : Volume d'eau évaporé (Mm^3)
C_r : Coefficient de correction : 0,78
S : Surface de la retenue du barrage extraite à partir des images satellitaires (m^2)
L_E : Lame d'eau évaporée mesurée au bac Colorado et fournie par l'ABHOER (m)



Photo 8-4 Bac d'évaporation à la station du b'AEH (El Orfi, 2020)

Nos calculs montrent une perte moyenne annuelle d'eau due à l'évaporation de 30 Mm^3. Les années avec les pertes d'eau les plus faibles et les plus élevées sont respectivement 2022/23, avec une perte de 9,6 Mm^3, et 2012/13, avec une perte de 41,2 Mm^3 (Fig. 8.6). Ces chiffres sont inversement proportionnels au pourcentage des pertes d'eau par rapport à la capacité totale du barrage. Lorsque les réserves du barrage sont élevées, les pourcentages de perte sont faibles malgré les taux d'évaporation importants. En revanche, ces dernières années, avec la diminution des précipitations, la capacité de la retenue a diminué, ce qui a entraîné une augmentation significative du pourcentage de pertes par rapport à la capacité totale du barrage.

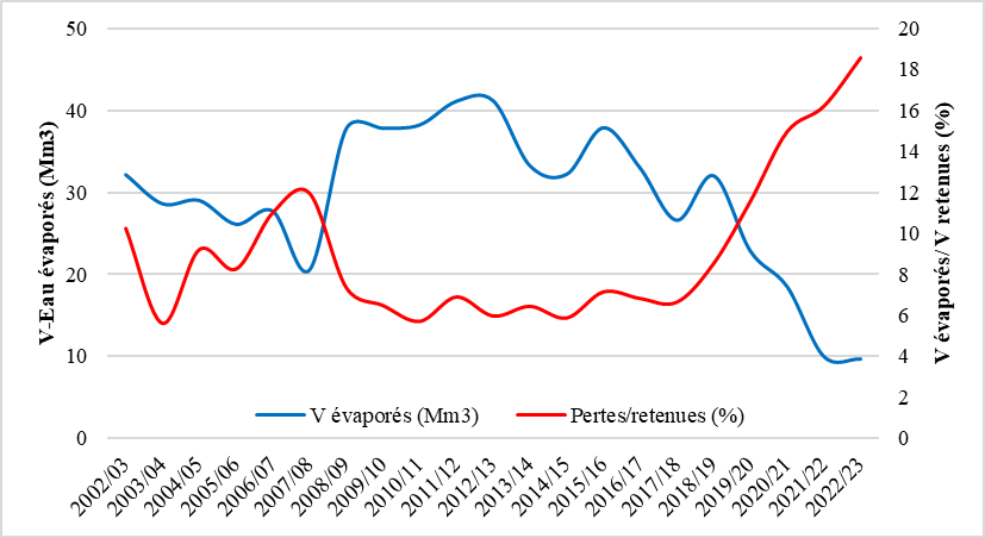


Figure 8.6 Evolution des pertes d'eau par évaporation entre 2002-03 et 2018-19

Étant donné la récence du b'AEH, les fuites causées par des fissures sur le mur du barrage ou des problèmes avec les vannes de contrôle des débits sont estimées négligeables, et donc elles ne contribuent pas à la diminution des réserves du barrage.

b. Pertes d'eaux par restitution

Les volumes restitués (ou lâchers) du b'AEH sont constitués des eaux de vidange du fond, des évacuations de crue et des eaux turbinées. La vidange du fond du barrage et l'évacuation des eaux de crue se font simultanément par une galerie souterraine située en rive droite avec un débit de 518 m^3/s, et par un évacuateur à seuil libre avec un débit de 2374 m^3/s (ABHOER, 2014). L'étude de l'évolution de ces volumes montre des valeurs nulles, à l'exception de quelques années où les volumes les plus importants ont été enregistrés. Ces années sont respectivement 2014/15, 2009/10 et 2016/17, avec des volumes de 13,3 Mm^3, 35,2 Mm^3 et 60,1Mm^3.

En plus de l'irrigation de la plaine des Béni Amir et de l'alimentation en eau potable des villes avoisinantes, le b'AEH et le barrage d'Aït Messoud constituent un aménagement intégré visant à assurer la production d'électricité. Les eaux évacuées dans les turbines permettent une production électrique moyenne annuelle de 200 GWh. Ces eaux utilisées pour la production d'électricité sont ensuite utilisées pour l'irrigation du périmètre de Béni Amir. Elles représentent la majeure partie du total restitué.

Les volumes totaux d'eau restitués sont globalement nuls pendant la période de remplissage du barrage (Fig. 8.7). Après 2005-06, les volumes restitués montrent une forte variation d'une année à l'autre en fonction de l'équation "offre/demande", c'est-à-dire en fonction des conditions climatiques annuelles et de la demande énergétique et d'irrigation. L'évolution des volumes

restitués annuels enregistre une moyenne d'environ 775 Mm^3, avec des valeurs dépassant les 1000 Mm^3 enregistrés en 2009/10, 2012/13 et 2010/11, avec respectivement 1508 Mm^3, 1094Mm^3 et 1012 Mm^3. Ces valeurs correspondent généralement à des années humides marquées par des apports importants qui dépassent la capacité du b'AEH.

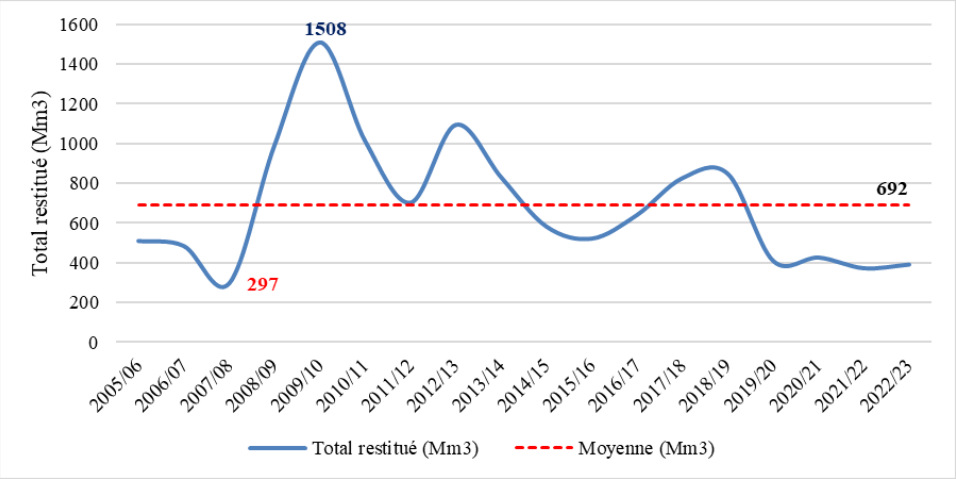


Figure 8.7 Evolution des volumes d'eau restitués (Mm^3) entre 2005-06 et 2018-19

8.2.3.2 Bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique d'un barrage permet une gestion rationnelle et durable des ressources en eau. Les éléments du bilan hydrique d'une retenue de barrage, comprenant les apports et les pertes d'eau, sont influencés par les caractéristiques physiques de la retenue ainsi que par les facteurs climatologiques, hydrologiques, morphologiques, etc., du lac et du bassin environnant. La méthode utilisée pour calculer le bilan hydrique repose sur la relation entre les apports (recette) et les pertes (dépense) d'eau dans la retenue (Boutoutaou *et al*., 2012) (Tab. 8.1). Pour déterminer le bilan hydrique de la retenue du b'AEH, l'équation du bilan basée sur le principe de conservation des volumes d'eau a été appliquée (Abdellaoui *et al*., 2002), à savoir:

$$\Delta_V = (V_P + V_R + V_{ST}) - (V_E + V_{RS} + V_I) \qquad \textit{(Équation 8.2)}$$

Tableau 8.1 Eléments du bilan hydrique de la retenue

Apports (m^3)	**Pertes** (m^3)
$\boldsymbol{V_P}$: volume des précipitations	V_E : volume d'évaporation
$\boldsymbol{V_R}$: volume ruisselé	V_{RS} : volume restituée (vidange + évacuation)
$\boldsymbol{V_{ST}}$: volume d'apport souterrain	V_I : volume infiltré
Δ_V : stockage ou déstockage de la retenue (m^3)	

Le volume des précipitations directement reçu dans la retenue (V_P) est calculé en convertissant les données pluviométriques enregistrées à la station d'Ahmed El Hansali en fonction de la surface de la retenue, obtenue à partir d'images satellitaires. Le volume ruisselé (V_R) correspond aux apports fournis par l'ABHOER. Cependant, comme nous ne disposons pas d'information sur les apports souterrains (V_{ST}) ni l'infiltration (V_I) nous avons fait l'hypothèse qu'ils sont nuls.

Pendant les deux premières années, marquées par le remplissage du barrage, le bilan hydrique était largement positif, atteignant en 2003-04 une valeur maximale de 850 Mm^3 (Fig. 8.8). Par la suite, les excédents annuels sont devenus moins importants, même pendant les années les plus humides, ne dépassant pas la limite des 400 Mm^3. La succession d'années déficitaires depuis 2015-16 a conduit à un bilan global déficitaire pour le b'AEH.

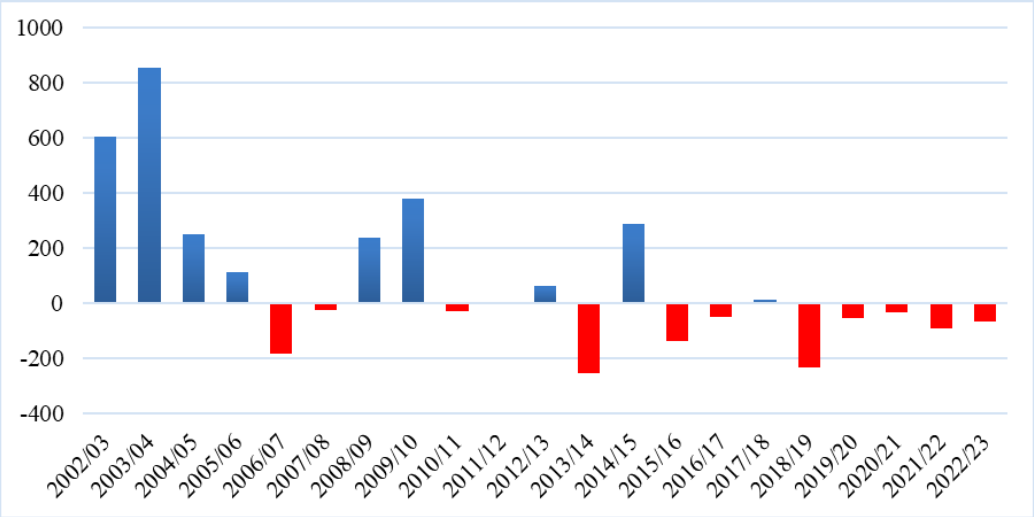


Figure 8.8 Evolution du bilan hydrique de la retenue du b'AEH entre 2002-03 et 2022-23

Le bilan hydrique du b'AEH est affecté par une pression considérable sur les ressources en eau, principalement en raison de l'agriculture irriguée du périmètre de Béni Amir. Cette situation est exacerbée par les conditions climatiques sévères de la région semi-aride, caractérisées par des précipitations faibles et irrégulières, ce qui entraîne une diminution des apports d'eau de surface. De plus, les pertes par évaporation, estimées à 30 Mm^3 en moyenne, réduisent encore la capacité du barrage.

8.3 Etude de la dynamique du couvert forestier

8.3.1 Intérêt de l'étude du changement de couvert forestier

La forêt joue un rôle essentiel dans le cycle de l'eau, en influençant à la fois le bilan hydrologique global et l'alimentation en eau des sols (Aussenac, 1969). Elle exerce une influence significative sur la régulation des cours d'eau et affecte le fonctionnement des bassins ainsi que leur temps de réponse (Sallak, 2019). La dégradation du couvert forestier entraîne des répercussions sur la dynamique des cours d'eau, pouvant entraîner des inondations soudaines et une augmentation de la fréquence des crues, ce qui peut conduire à une érosion des sols plus prononcée (Annexe 8.4). La conversion de la couverture forestière, en particulier dans la région du Moyen Atlas, en terres agricoles, aggrave l'érosion des sols due au ruissellement (Ouakhir, 2022).

8.3.2 Classification supervisée des images Landsat

8.3.2.1 Les données utilisées

Les changements d'occupation et d'usage des sols, résultant de l'interaction de multiples facteurs à l'interface Homme/Nature, varient dans le temps et l'espace (Corgne, 2014). Landsat possède la plus longue collection de données de télédétection spatiale à résolution modérée acquise en continu ; les premières images datent de 1972 (Mohsen *et al*., 2018). Nous avons donc fait le choix de mener une analyse diachronique de l'occupation du sol depuis 1985 à partir de 3 images Landsat (Path: 201 et Row: 037) distantes de 15/20 ans. Le choix de l'année 1985 permet de fixer l'état initial de l'occupation du sol dans la zone dans la mesure où les changements rapides ne sont intervenus qu'à l'aube des années 1980 (1ère partie). D'autre part cette période correspond à l'acquisition des premières images Landsat à une résolution spatiale de 30 m au lieu de 60 m pour les images antérieures. Les images de 1985, 2000 et 2020 (Tab. 8.2), correspondant à trois générations de capteurs respectivement TM, ETM^+ et OLI/TIRS ont été téléchargées à partir du portail "USGS Earth Explorer".

Ces 3 scènes, bénéficiant du plus haut niveau de prétraitement disponible (corrections géométrique et radiométrique), ont été sélectionnées selon 2 critères. Le premier critère est inhérent à la date. Les trois images sont acquises en juillet/août afin de bénéficier d'une similarité phénologique nécessaire à la méthodologie de classification supervisée des images. Le deuxième critère est l'absence de nuage.

Tableau 8.2 Principales caractéristiques des scènes sélectionnées

	Date d'acquisition	Satellite	Instruments
Scène 1	04/07/1985	Landsat-5	TM (Thematic Mapper)
Scène 2	14/08/2000	Landsat-5	TM (Thematic Mapper)
Scène 3	05/08/2020	Landsat-8	OLI (Operational Land Imager)

8.3.2.2 Méthodologie de l'étude de la dynamique du couvert végétal

La technologie géospatiale permet d'accéder à des données pour la cartographie des ressources, tandis que de nombreux algorithmes de classification ont été récemment développés (Ray *et al*., 2023). Ces méthodes de classification comprennent généralement des algorithmes paramétriques de classification supervisée (tel que le maximum de vraisemblance), des algorithmes non supervisés (tels que ISODAT et le clustering k-means) et des algorithmes d'apprentissage automatique (tels que les neurones artificiels, les arbres de décision, les machines à vecteurs de support …) (Kulkarni & Lowe, 2016). Ces derniers peuvent traiter la multi-dimensionnalité des données de télédétection, contrairement aux techniques traditionnelles de classification des images (Onojeghuo & Onojeghuo, 2023). Les arbres de décision offrent des avantages que d'autres approches n'offrent pas, et ils sont rapides à calculer et ne font aucune hypothèse statistique sur la distribution des données (Otukei & Blaschke, 2010). La dynamique de l'occupation du sol à l'échelle du HaB-OER a été étudiée en appliquant l'algorithme des "forêts aléatoires", qui est l'un des algorithmes basés sur le principe des arbres de décision.

Cet algorithme (ou Random Forest "RF" parfois aussi traduit par forêt d'arbres décisionnels) (Breiman, 2001) est un classificateur d'apprentissage automatique non paramétrique, composé d'une collection de classificateurs d'arbres, et peut traiter des données de télédétection de haute dimension (Belgiu & Drăguţ, 2016). La classification RF attribue une étiquette à chaque pixel en se basant sur le vote majoritaire des "arbres" créés à partir d'un nœud divisé de manière aléatoire avec un sous-ensemble de variables d'entrée, ce qui améliore la robustesse de la classification par rapport à d'autres classificateurs (Garba *et al*., 2023). Ce type de classificateur est largement utilisé dans la communauté de la télédétection en raison de sa précision élevée lors des classifications. Cet algorithme donne des précisions de classification plus élevées que d'autres méthodes tel que Support Vector Machine et Maximum Likelihood Classification … (Akar & Gungor, 2012).

Pour répondre à l'objectif de cette analyse diachronique de l'occupation du sol à l'échelle du HaB-OER, pour rappel la vulnérabilité à l'érosion, une identification des quatre classes suivantes est suffisante : "forêts", "cultures et parcours", "plan d'eau" et "sols nus et zones urbaines". Les échantillons d'intérêt "ROI" ont été choisis en se basant sur la composition colorée infrarouge fausses couleurs des canaux 4, 3, et 2 et l'Indice Normalisé Différentiel de Végétation "NDVI" (Équ. 8.3) (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R} \qquad \textit{(Équation 8.3)}$$

avec :
ρ_{PIR} : la réflectance dans le proche infrarouge ;
ρ_R : la réflectance dans le rouge.

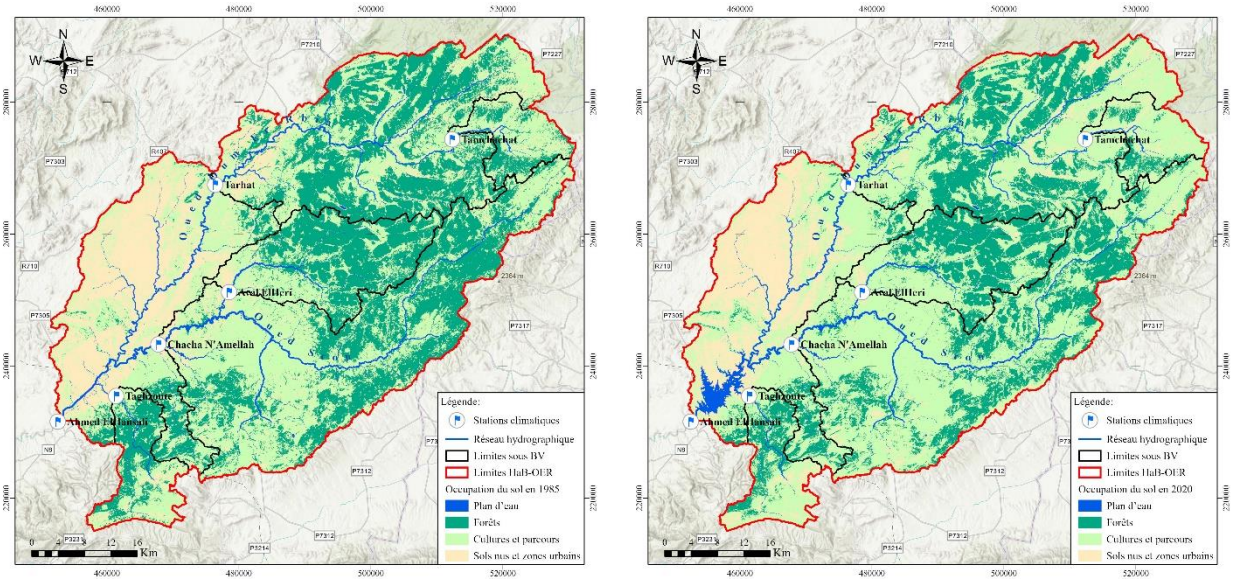
Les valeurs du NDVI vont de -1 à 1. La valeur la plus élevée (NDVI => 1) représente une végétation en pleine santé (activité chlorophyllienne très élevée), tandis que la valeur la plus basse (NDVI => -1) indique une absence de couverture végétative.

L'ensemble des étapes de classification a été réalisé à l'aide du logiciel "Snap". La validation a été effectuée en comparant les résultats de classification avec les images haute résolution de Google Earth, et en confrontant ces résultats sur le terrain lors de campagnes dédiées à cet objectif. Généralement, les résultats de classification obtenus avec la méthode RF sont satisfaisants (Annexe 8.3), ce qui permet de les adopter pour estimer les gains et pertes des types d'occupations du sol depuis 1985.

8.3.2.3 Dynamique de l'occupation du sol

L'étude des cartes de l'occupation des sols à l'échelle du HaB-OER (Carte 8.2) révèle des changements significatifs pour toutes les classes, notamment une réduction notable des forêts.

a- 1985 b- 2020



Carte 8.2 Évolution de l'occupation du sol dans le HaB-OER entre 1985 et 2020

Entre 1985 et 2020, on constate une diminution des classes "forêt" et "sols nus et zones urbaines" au profit de celle "terres cultivées et des parcours", (Fig. 8.9). Elles passent respectivement de 37% (1250 km²) à 28% (950 km²) et de 19% (665 km²) à 15% (515 km²). En revanche, la superficie de la classe "terres cultivées et des parcours" est passée de 43% en 1985 avec une superficie de 1460 km² à 56% avec une superficie dépassant les 1900 km².

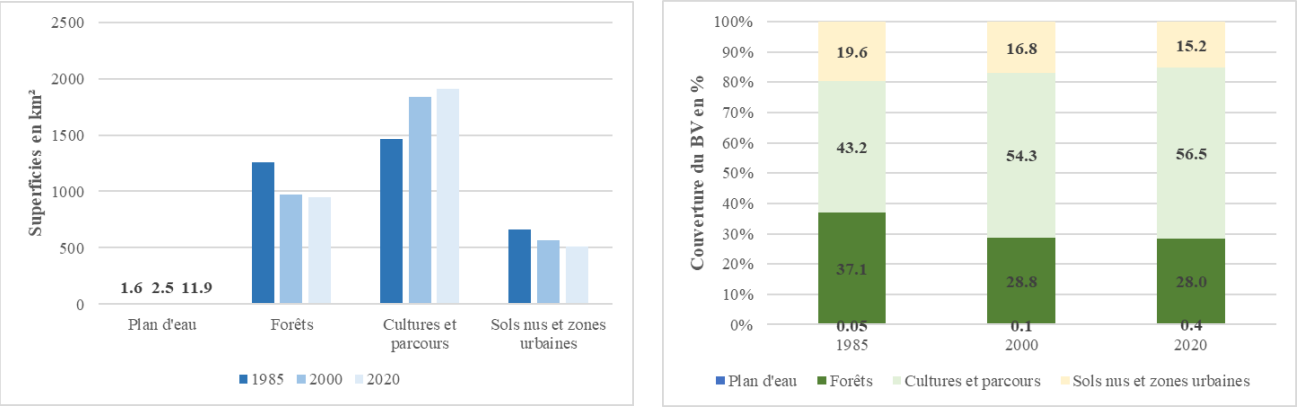


Figure 8.9 Évolution de l'occupation du sol au niveau du HaB-OER entre 1985, 2000 et 2020

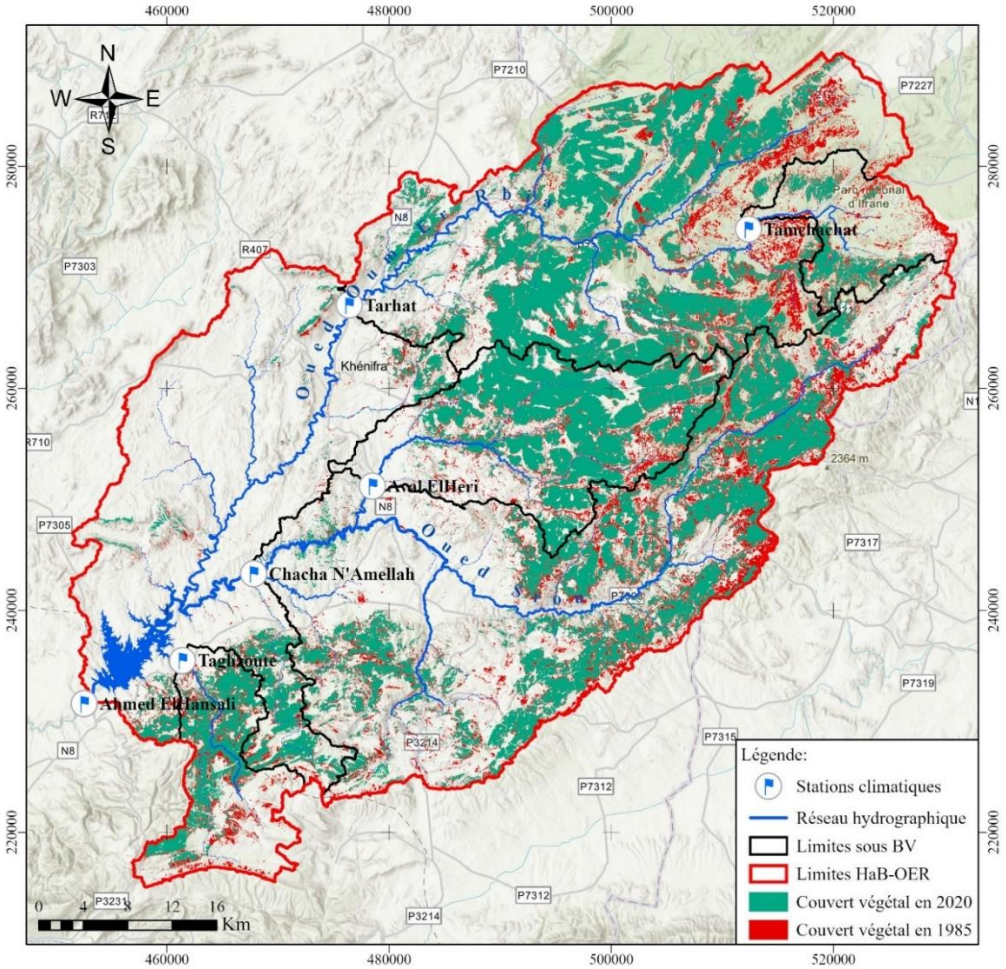
8.3.2.4 Evolution spatio-temporelle du couvert forestier

La densité du couvert végétal dans le HaB-OER varie d'un sous-bassin à l'autre, ainsi que de l'amont vers l'aval au sein d'un même bassin. En général, le couvert forestier est présent dans l'ensemble du HaB-OER, à l'exception de la partie nord-ouest où les conditions du substratum limitent son développement (Chap. 2). Ce couvert subit une dégradation importante, influencée par plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques et l'impact humain.

L'ensemble des sous-bassins du HaB-OER témoigne d'une régression du couvert végétal, avec une perte d'environ 300 km² entre 1985 et 2020, soit une régression de 9% (Carte 8.3). En 2020, la couverture forestière dans la zone d'étude est réduite à 28% par rapport à 37% en 1985. Cette dégradation s'est principalement produite entre 1985 et 2000. Concernant les sous bassins, le Tamchachat enregistre une dégradation de 14,3%, suivi par Taghzoute, Taraht, Chacha n'Amellah et Aval El Héri avec respectivement 12%, 11,5%, 10,9% et 9,55% (Tab. 8.3).

Tableau 8.3 Evolution du couvert forestier au niveau des bassins du HaB-OER entre 1985 et 2020

	Superficie du bassin	1985		2020		Evolution entre 85 et 20	
		Superficie du CF	Couverture	Superficie du CF	Couverture	en Km²	en %
HaB-OER	3387	1256,5	37,1	947,4	27,9	-309,1	-9,1
Ava	353,7	209,7	59,3	175,9	49,7	-33,8	-9,6
Cha	1420,5	633,4	44,6	478,7	33,7	-154,8	-10,9
Tag	171,4	78,3	45,7	57,7	33,7	-20,6	-12
Tam	134,3	45,3	33,8	26,2	19,5	-19,1	-14,3
Tar	1016,3	466,2	45,9	349,5	34,4	-116,7	-11,5



Carte 8.3 Dynamique du couvert végétal au niveau du HaB-OER entre 1985 et 2020

8.3.3 Apport de "GEE" pour préciser la dynamique du couvert forestier

8.3.3.1 La Plate-forme Google Earth Engine "GEE"

Le suivi de la déforestation à grande échelle présente plusieurs défis, notamment en raison du volume massif de données et des exigences en termes de capacités informatiques. Heureusement, l'émergence de nouveaux systèmes informatiques efficaces, tels que Google Earth Engine "GEE" (Gorelick *et al*., 2017), a ouvert la voie au développement d'analyses complexes en télédétection. Grâce à ses capacités de calcul haute performance, à l'accès aux données pertinentes et à l'utilisation de méthodes avancées, notamment les algorithmes d'apprentissage automatique de l'intelligence artificielle, il est désormais possible de réaliser ces analyses avec une grande précision (Htitiou *et al*., 2021).

Parmi les nombreuses données disponibles dans le catalogue de GEE, Il existe différents ensembles de données sur la couverture forestière, tels que GFC "Global Forest Change (année 2000)" (Hansen *et al*., 2013), qui fournit des informations sur les changements de couverture forestière, et le GLCF "Landsat Tree Cover Continuous Fields" (Sexton *et al*., 2013), qui fournit une estimation continue de la couverture arborée à partir des images Landsat. La couverture arborée est exprimée en pourcentage par cellule de la grille de sortie, représentant la proportion d'arbres dont la hauteur dépasse 5 m en 2000 (Hansen *et al*., 2013). La plateforme GEE nous a permis d'améliorer les résultats précédents de la classification en nous offrant la possibilité d'obtenir des informations détaillées sur l'évolution annuelle de la déforestation dans chaque sous-bassin du HaB-OER.

8.3.3.2 Suivi de la déforestation au niveau du HaB-OER

La plateforme GEE et les données du "GFC" ont été utilisées pour analyser les changements de déforestation dans les trois sous-bassins caractéristiques du HaB-OER, à savoir Tarhat, Chacha n'Amellah et Taghzoute, sur la période de 2000 à 2020. GEE estime une perte de couverture forestière de 1630 ha entre 2000 et 2020, tandis que la première méthode de classification indique une perte de 2600 ha. Selon Cunningham *et al*. (2019), les données du "GFC" sous-estiment le couvert forestier dans certaines conditions, notamment en lien avec l'altitude. L'année 2003 a enregistré la plus grande perte avec 234 ha, tandis que l'année 2013 n'a connu qu'une perte de 1 ha (Fig. 8.10). Cette variation peut être attribuée à la vente de coupes de produits forestiers dans les forêts soumises au régime forestier. Le sous-bassin de Tarhat représente la plus grande perte avec 680 ha, soit 60% du total perdu, suivi des sous-bassins de chacha n'Amellah et de Taghzoute avec respectivement 516 ha (32%) et 84 ha (5%).

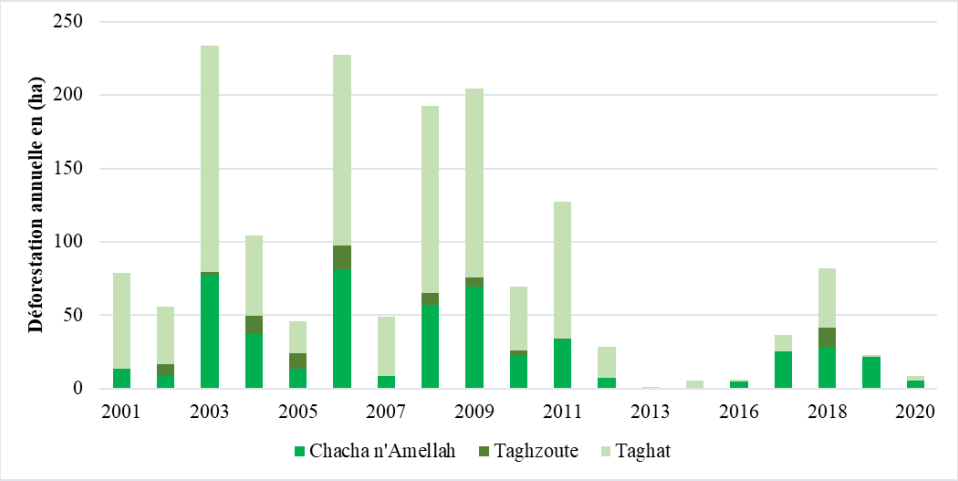


Figure 8.10 Déforestation annuelle en hectares au niveau des bassins du HaB-OER entre 2000 et 2020

8.4 Impact de la dynamique du couvert végétal sur l'érosion hydrique

8.4.1 Le modèle "RUSLE"

La quantification de l'érosion peut être estimée à l'aide de divers modèles, tels que les modèles empiriques, conceptuels et physiques (Manaouch *et al*., 2021). L'équation universelle de perte de sol (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) et sa version révisée, l'équation universelle de perte de sol révisée (RUSLE) (Renard *et al*., 1997), font partie des modèles empiriques les plus largement utilisés à l'échelle mondiale. Le modèle RUSLE s'intègre facilement aux systèmes d'information géographique (SIG) et est considéré comme fiable pour estimer les pertes annuelles de sol. Il présente l'avantage d'être rapide, économique et permet d'identifier clairement la distribution spatiale des zones d'érosion, facilitant ainsi la compréhension de l'interaction entre l'érosion et ses facteurs contributifs (Wang & Su, 2020).

Le modèle RUSLE est largement utilisé dans la région méditerranéenne (Meliho *et al*., 2016). Au Maroc, plusieurs études basées sur la modélisation RUSLE ont été réalisées dans différentes régions. Parmi celles-ci, la région du Rif représente à elle seule 50% du nombre total de recherches, soulignant ainsi l'importance de ce phénomène dans la région (Manaouch *et al*., 2021). Dans le Haut et Moyen Atlas, plusieurs chercheurs ont appliqué ce modèle à divers bassins versants, tels que Sebou par Chadli, (2016), M'dez (Sebou) par Boufala *et al*., (2020), Agoudal (Imilchil) par Ouadjane *et al*., (2021), N'Fiss par Ennassiri & Mouak, (2021), Mikkès par Mazouzi *et al*., (2021), Oum Er Rbia par El Jazouli *et al*., (2019).

Le modèle RUSLE a été largement utilisé à la fois dans les environnements agricoles et forestiers pour quantifier et cartographier la perte annuelle moyenne de sol sur la base des principaux facteurs d'érosion que sont (Meliho *et al*., 2016) :

- ✓ R: érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h.an),
- ✓ K: érodibilité du sol (t.h/ha. MJ.mm),
- ✓ LS: facteur topographique (L en m, S en %),
- ✓ C: facteur de couverture végétale,
- ✓ P: facteur des pratiques agricoles.

Ainsi le taux de perte en sol (A) s'écrit :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \qquad \textit{(Équation 8.4)}$$

8.4.2 Description et analyse des facteurs d'érosion au niveau du HaB-OER

8.4.2.1 Facteur d'érosivité des pluies (R)

L'érosivité représente le potentiel érosif des précipitations résultant de l'énergie cinétique et de l'intensité maximale des pluies sur une période de 30 minutes (Wischmeier & Smith, 1978). Étant donné que la collecte de données sur l'énergie cinétique et l'intensité des pluies peut être difficile, des formules alternatives ont été développées qui utilisent des données mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R. Au Maroc, plus de 50% des chercheurs ont utilisé le facteur R basé sur l'équation 8.5 (Annexe 8.5) (Rango & Arnoldus, 1987).

Cette formule a été appliquée aux données mensuelles provenant de 19 stations situées à l'intérieur et aux abords du HaB-OER sur une période de 44 ans (1975-2019). L'interpolation spatiale du facteur R a été réalisée à l'aide de la méthode du krigeage simple de l'outil de géo-spatialisation d'ArcGIS (Carte 8.4.a). L'érosivité moyenne des pluies "R" est d'environ

80MJ.mm/ha.h.an, avec des valeurs oscillantes entre 67 MJ.mm/ha.h.an et 97 MJ.mm/ha.h.an selon les années. Sur 80% de la surface du HaB-OER, ces valeurs varient entre 78 MJ.mm/ha.h.an et 89 MJ.mm/ha.h.an, couvrant une superficie de 2690km². Les valeurs les plus élevées, comprises entre 89 MJ.mm/ha.h.an et 97 MJ.mm/ha.h.an, représentent environ 13% du HaB-OER, couvrant une superficie de 427 km², principalement localisée autour de la station de Tamchachat, au nord de la zone d'étude.

8.4.2.2 Facteur d'érodibilité du sol (K)

L'érodibilité du sol, représentée par le paramètre K, est utilisée pour évaluer la résistance des différents types de sols à l'érosion (Meliho *et al*., 2016; Elhafid & Akdim, 2018). Elle mesure la susceptibilité des particules de sol au détachement et au transport par les précipitations et le ruissellement (M. Tahiri *et al*., 2017). L'érodibilité des sols dépend de facteurs tels que le pourcentage de matière organique, la texture, la structure et la perméabilité du sol (Mazouzi *et al*., 2021). La détermination de ces paramètres est souvent difficile en raison du manque d'études pédologiques dans la zone d'étude (Ouadjane, Ait Yacine, *et al*., 2021).

La détermination du facteur K s'est basée sur l'équation de Williams (1995), mentionnée dans les travaux de Wawer *et al*. (2005) et Souphihalath *et al*. (2017). Cette équation a été appliquée sur la base des informations tirées de la carte numérique des sols du monde établie par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Ces données sur les propriétés physiques (% de sable, % de limon, % d'argile, densité apparente) et chimiques (pH, carbone organique, CEC, saturation en bases, rapport C/N, teneur en $CaCO_3$) de la couche arable et du sous-sol pour les différentes unités pédologiques (FAO, 2003) ont été utilisées dans l'équation 8.6 (Annexe 8.5).

L'érodibilité des sols "K" varie entre 0.1 t.h/ha.MJ.mm et 0.14 t.h/ha.MJ.mm sur l'HaB-OER (Carte 8.4.b). Ce facteur est représenté par deux classes, l'une avec K égal à 0.1, couvrant 38% du HaB-OER, et l'autre avec K égal à 0.14, couvrant les 62% restants du bassin. La répartition de ces classes est en accord avec la répartition des formations géologiques à l'affleurement plutôt indurées dans la partie est et friable dans la partie ouest du HaB-OER (Chap. 2).

8.4.2.3 Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique joue un rôle primordial dans les processus érosifs des zones de haute montagne où la topographie devient déterminante pour différentes phases du cycle de l'érosion, notamment lors du transport des sédiments (Ouadjane, Ait Yacine, *et al*., 2021). Deux paramètres topographiques clés qui influencent l'érosion sont la longueur et la valeur de la pente. L'activité érosive croit avec la pente de même que le ruissellement devient plus prononcé, entraînant ainsi un risque accru d'inondation (Manaouch *et al*., 2021).Le facteur LS a été calculé en utilisant l'équation 8.7 (Annexe 8.5) de Stone & Hilborn, (2012) cité par Mouatassime Sabri *et al*., (2017).

Les deux variables ont été dérivées d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 12 m de résolution spatiale fourni par le Centre Aérospatial Allemand (DLR. Le HaB-OER est caractérisé par une valeur moyenne du facteur LS égale à 22, avec une variation entre 0 et 46 (Carte 8.4.c). La classe dominante correspond aux valeurs inférieures à 5, couvrant une superficie de 3062 km² soit 90% de la superficie totale. La classe des valeurs supérieures à 10 ne couvre que 53 km², soit 1,6% de la superficie du HaB-OER. Les faibles valeurs sont moins sensibles à l'érosion et se localisent dans la partie de la meseta centrale, tandis que les fortes valeurs révèlent une plus grande sensibilité à l'érosion et se localisent dans la partie du Moyen Atlas.

8.4.2.4 Facteur du couvert végétal (C)

Le facteur C est utilisé pour évaluer la densité du couvert végétal, l'efficacité des systèmes agricoles et la gestion des sols (Elhafid & Akdim, 2018). Les valeurs de C varient de 0.001 pour un sol entièrement couvert à 1 pour un sol nu (Wischmeier & Smith, 1978). Les facteurs C attribués aux quatre classes des deux cartes sont présentés dans le tableau suivant :

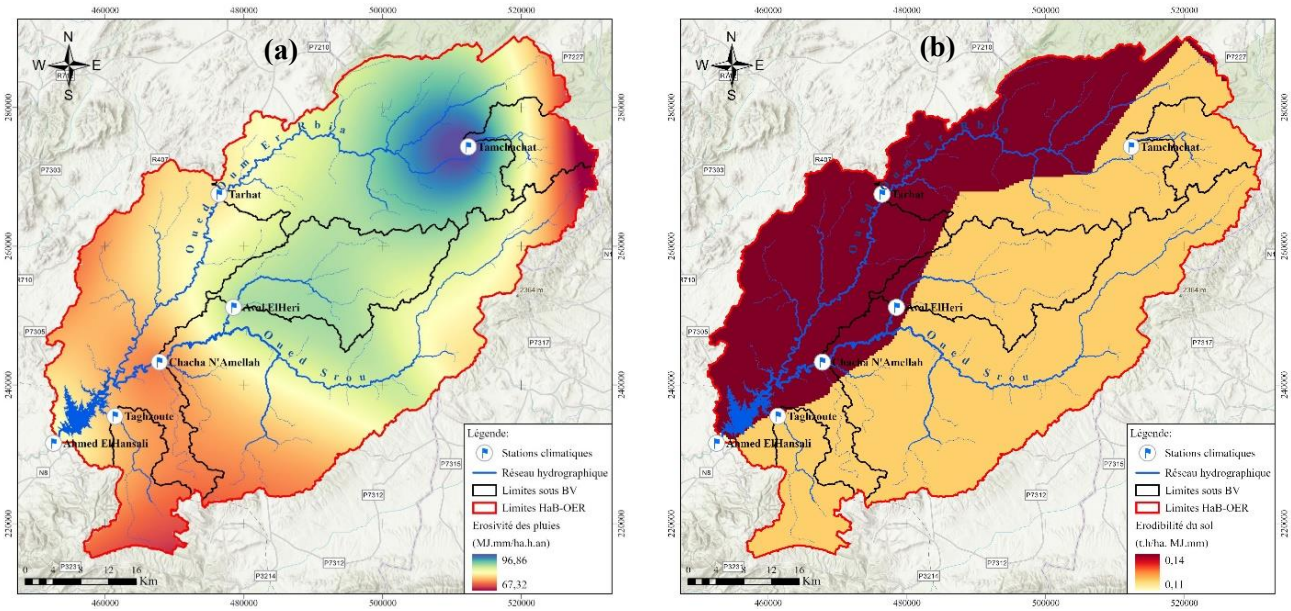
Tableau 8.4 Valeurs du facteur C par type d'occupation du sol

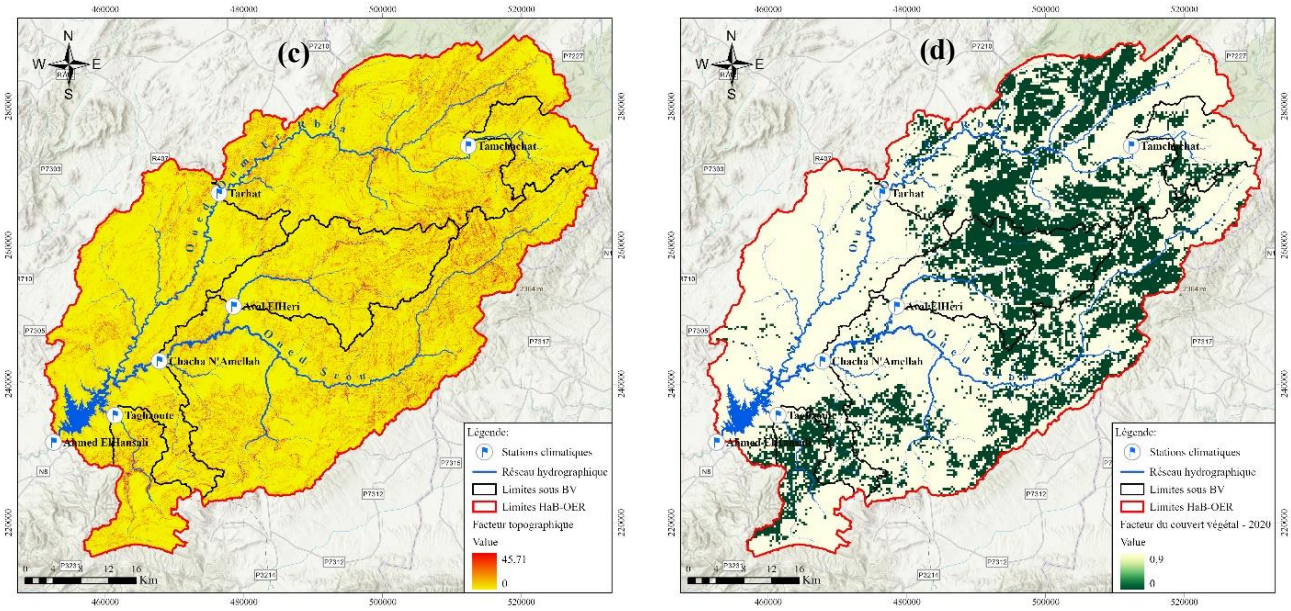
Types d'occupation du sol	Facteur C
Plan d'eau	0
Forêts	0.1
Cultures et parcours	0.6
Sol nus	0.9

Récemment, le calcul du facteur C à l'échelle régionale s'appuie de plus en plus sur des techniques de télédétection et sur la classification d'images satellites, une approche qui est largement appliquée (Manaouch *et al*., 2021). Afin d'évaluer l'impact de la dégradation du couvert végétal entre 1985 et 2020, les deux cartes d'occupation du sol produites dans le cadre de l'axe 8.2 sur la dynamique du couvert végétal dans le HaB-OER ont été retenues (Carte 8.4.d). La valeur moyenne du facteur "C" pour les deux scènes est de 0.53. La classe la plus prédominante est celle de 0.6, correspondant aux terrains cultivés et aux parcours, qui couvrent respectivement 1463 km² (43%) et 1909 km² (56%) pour les deux année 1985 et 2020. La classe des forêts, considérée comme une protection des sols avec une valeur de C égale à 0.1, occupe la deuxième position avec une couverture de 37% et 28% respectivement.

8.4.2.5 Facteur des pratiques agricoles (P)

Les pratiques culturales telles que le labour en suivant les courbes de niveau, les cultures en bandes alternées ou en terrasses, le billonnage, etc., sont des techniques efficaces de conservation des sols (Meliho *et al*., 2016). Le facteur P est un paramètre utilisé pour prendre en compte les pratiques anti-érosives existantes lors de l'estimation des pertes de sol. Les valeurs typiques de P varient de 0,2 pour les terrasses à pente inversée à 1 lorsque aucune pratique de contrôle de l'érosion n'est mise en place (Manaouch *et al*., 2021). Étant donné l'indisponibilité des données sur les aménagements antiérosifs, la valeur de 1 proposé par Mazouzi *et al*. (2021) peut être attribuée au facteur P pour l'ensemble du HaB-OER.

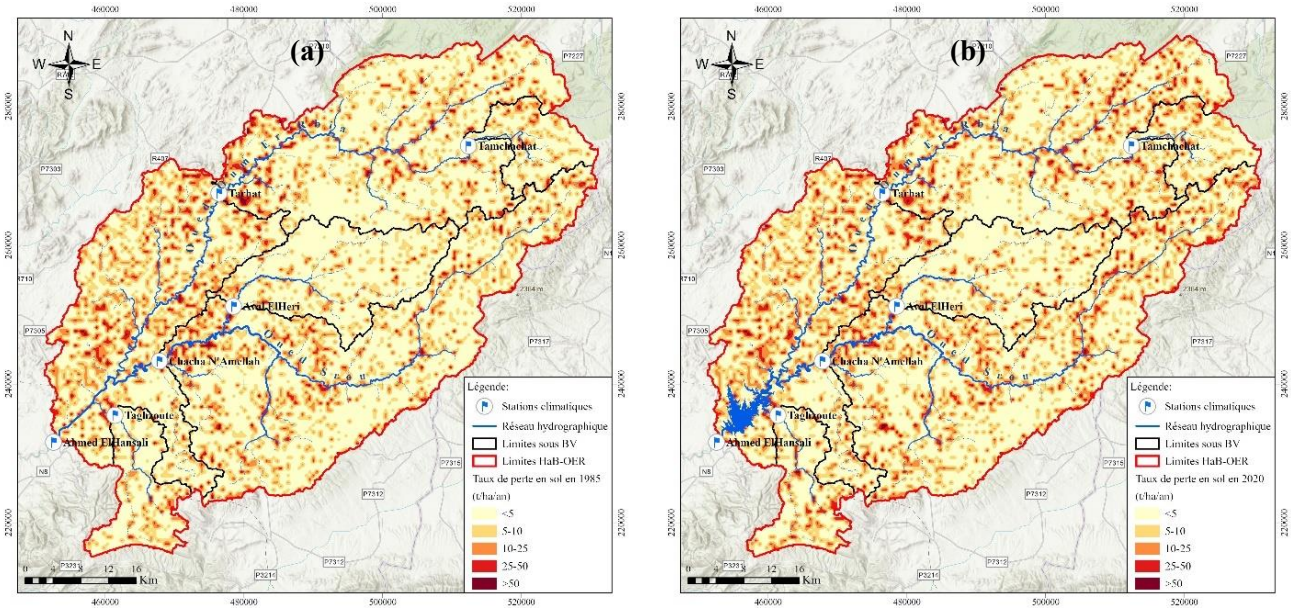




Carte 8.4 Facteurs d'estimation de l'érosion au niveau du HaB-OER : a) facteur R, b) facteur K, c) facteur LS et c) facteur C -2020

8.4.3 Quantification de l'érosion au niveau du HaB-OER en 1985 et 2020

L'application du modèle RUSLE sur la base des facteurs spatialisés nous a permis d'estimer la perte annuelle de sol et sa variabilité spatiale dans le HaB-OER pour 1985 et 2020 ; celle-ci est significative dans la région, avec des valeurs allant de moins de 5 t/ha/an à plus de 230 t/ha/an (Carte 8.5). Les zones dépourvues de végétation dans la partie de la meseta centrale, au sud-ouest, où les schistes friables sont abondants, présentent des taux d'érosion élevés par rapport aux zones couvertes par la végétation dans la partie du Moyen Atlas. Les parcours dégradés du Moyen Atlas, au nord, sont également vulnérables aux pertes de sol. La diminution de la couverture forestière entre les deux périodes, due à l'expansion des cultures et des parcours, a entraîné l'apparition de zones de pertes importantes dans la partie nord-est de la zone d'étude.



Carte 8.5 Cartes des taux d'érosion dans le HaB-OER en (a) 1985 et (b) 2020

Selon la classification proposée par la FAO *et al*., (1979), qui divise les risques d'érosion en 4 classes en fonction des taux d'érosion "A" : faible (A<10 t/ha/an), moyen (10<A<50), élevé (50<A<200) et très élevé (A>200), on constate pour les deux dates une prédominance de la classe de faible risque d'érosion, représentant environ 80% de la zone (Fig. 8.11). La diminution de la couverture forestière observée en 2020 a entraîné une augmentation des zones présentant un risque moyen et élevé d'érosion, passant de 17,9% à 20,5%.

Globalement nos chiffres sont cohérents avec ceux déjà produits sur le Moyen Atlas. Par exemple Boufala *et al*., (2020) ont estimé que 84% de la superficie du bassin de M'dez (Sebou) est exposée à un faible risque d'érosion, tandis que 16% du bassin présente un risque modéré. Ennassiri & Mouak, (2021) ont également constaté une prédominance de faibles pertes de sol, inférieures à 4 t/ha/an, sur la moitié du bassin de N'Fiss. À l'échelle du Moyen Atlas, selon Choukri *et al*., (2019), les pertes annuelles de sol causées par l'érosion atteignent fréquemment 5 t/ha/an, tandis que Manaouch *et al*., (2021) ont estimé des valeurs allant de 5 à 10 t/ha/an, ce qui est comparable à notre estimation de 7 t/ha/an.

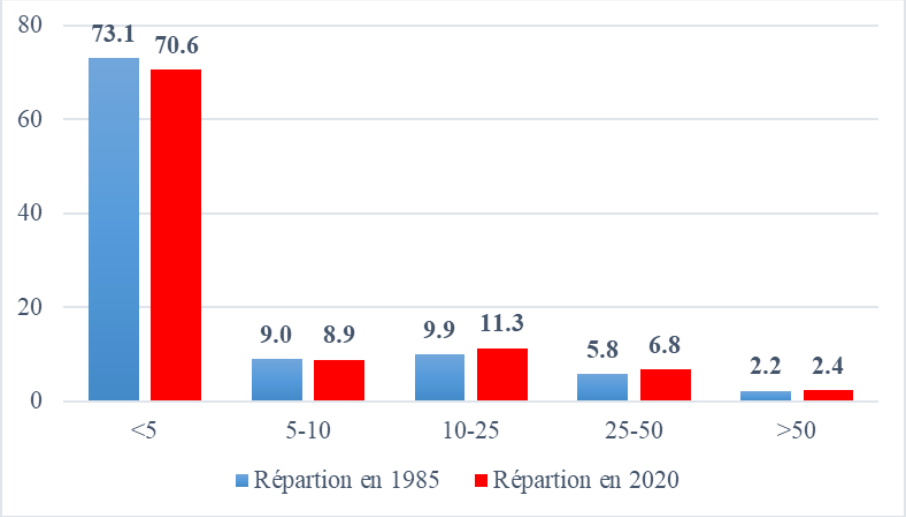


Figure 8.11 Comparaison des classes de pertes de sol entre 1985 et 2020

À l'échelle du HaB-OER, le taux moyen d'érosion en 2020 est de 7,8 t/ha/an, tandis qu'il n'était que de 7,1 t/ha/an en 1985 (Tab. 8.5), représentant ainsi une augmentation de 9% entre les deux dates. Le total des pertes de sol passe ainsi de 3,8 Mt en 1985 à 4,13 Mt en 2020. Tous les sous-bassins du HaB-OER enregistrent une augmentation des taux d'érosion entre 1985 et 2020, le plus important étant celui de Taghzoute avec une augmentation de 33%, tandis que les sous-bassins de Tamchachat et Tarhat présentent les taux les plus faibles, avec une moyenne d'environ 12,6%. Le sous-bassin de Chacha n'Amellah enregistre les pertes les plus élevées, avec une moyenne d'environ 1,5 Mt.

Tableau 8.5 Comparaison des taux d'érosion et des pertes des sols annuels au niveau du HaB-OER

	Moy (t/ha/an)		**Pertes (Mt)**		**Différence entre 1985 et 2020 (%)**
	1985	2020	1985	2020	
Hab-OER	7,1	7,8	3,8	4,13	9
Aval El Héri	4,4	5,3	0,23	0,29	20.2
Chacha n'Amellah	6,4	7,3	1,41	1,62	14.2
Taghzoute	5,5	7,4	0,13	0,19	33.7
Tamchachat	5,8	6,5	0,11	0,13	12.8
Tarhat	7	7,9	1,18	1,3	12.5

8.5 L'envasement : un autre facteur de réduction de la capacité du b'AEH

8.5.1 Estimation de l'envasement à l'aide du modèle RUSLE

Pour évaluer la contribution des trois bassins versants qui alimentent le b'AEH (Tarhat, Chacha n'Amellah et Taghzoute) à la réduction de sa capacité due à l'envasement, nous proposons une conversion simple des pertes totales estimées par la méthode RUSLE en volume. Nous divisons le tonnage simulé par la densité moyenne des sédiments afin d'obtenir le volume sédimenté dans le barrage (Équ. 8.8) (Abdellaoui *et al*., 2009).

$$V = \frac{P}{D}$$

(Équation 8.8)

Avec :
V : le volume envasé en Mm^3,
P : les pertes de sol estimées par le modèle RUSLE en Mt,
D : la densité de vase moyenne en t/m^3, estimé par plusieurs étude à 1.3 (Abdellaoui *et al*., 2002, 2009; Zouagui *et al*., 2018; Boukhari *et al*., 2019; Bassairate *et al*., 2021).

Selon la méthodologie utilisée, l'estimation de l'envasement annuel du b'AEH est de 3,2 Mm^3. Cette valeur représente une perte annuelle de 0,44% du volume initial de la retenue du barrage soit une perte cumulée depuis la mise en service du barrage de plus de 7%. Les sous-bassins de Chacha n'Amellah, Tarhat et Taghzoute fournissent respectivement 1,3 Mm^3, 1 Mm^3 et 0,2 Mm^3 de sédiments. Le sous-bassin de Chacha n'Amellah contribue à lui seul à plus de 41% de l'envasement du barrage (Tab. 8.6). Les résultats de l'étude menée par Ouakhir (2022) soulignent une contribution importante et significative des processus d'érosion des terres agricoles du bassin de Srou, ce qui a un impact certain sur l'envasement du b'AEH.

Tableau 8.6 Estimation des cours d'eau à l'envasement du b'AEH

	Taux d'érosion moyen (t/ha/an)	Pertes des sols (Mt)	Densité de vase (t/m^3)	Volume envasé (Mm^3)	Contribution à l'Env. (%)
Cha	7.3	1.6	1.3	1.3	40.6
Tag	7.4	0.2		0.2	6.3
Tar	7.9	1.3		1	31.2
HaB-OER	7.8	4.1		3.2	

Cependant, il est important de noter que cette réduction n'est pas représentative de la réalité, car elle est basée sur des équations empiriques et nécessite une validation sur le terrain. Afin de vérifier ces résultats, on propose de les comparer avec les données de bathymétrie fournies par l'ABHOER.

8.5.2 Estimation de l'envasement à l'aide des mesures bathymétriques

Au Maroc, les levés bathymétriques sont largement utilisés pour évaluer l'érosion et l'envasement des retenues (Boukhari et al., 2019). Les campagnes de bathymétrie sont effectuées tous les 3 à 5 ans afin de suivre l'envasement du barrage, d'assurer une surveillance des structures et de prendre des décisions relatives aux mesures de protection nécessaires (Bassairate *et al*., 2021). Les contrôles bathymétriques demeurent la méthode la plus précise pour évaluer les taux de perte de capacité de stockage des barrages depuis leur mise en service mais permettent également des projections et des estimations pour l'envasement futur (ABHOER, 2018h).

Des campagnes bathymétriques ont été réalisées au niveau du b'AEH afin de surveiller le volume de sa retenue entre 2002 et 2014 (Annexe 8.6). Durant cette période, le volume de la retenue du barrage a diminué de 744 Mm^3 en 1998, avant sa construction, à 668 Mm^3 en 2014, entraînant une perte de 76 Mm^3 sur une période de 16 ans, ce qui représente une réduction de 10,2% par rapport à sa capacité initiale. La perte annuelle moyenne s'élève à 4,75 Mm^3/an (Fig. 8.12). Cette

valeur est supérieure à celle estimée par la méthode RUSLE, qui est de 3,2 Mm^3/an soit une différence de 36,6 %. Ce constat demande une deuxième application, mais avec d'autres modèles de quantification de l'érosion, ou un suivi sur le terrain pour confirmer ces résultats.

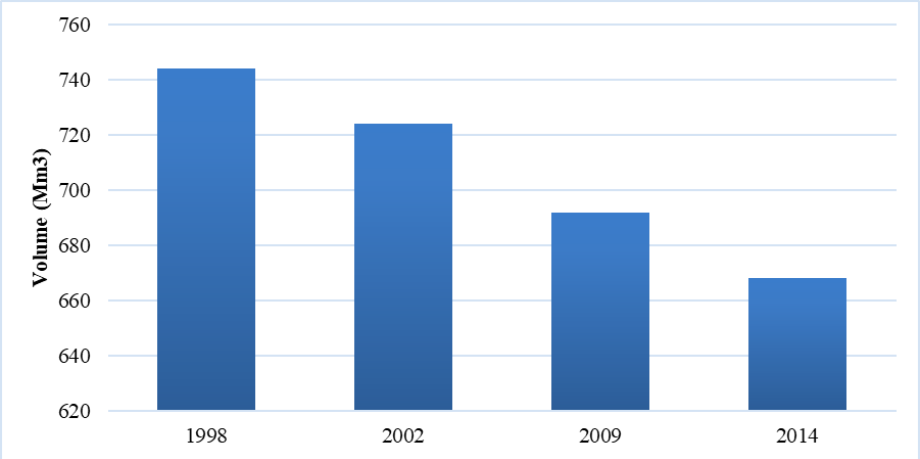


Figure 8.12 Evolution du volume de la retenue du b'AEH entre 1998 et 2014

8.6 Conclusion

Récemment, le b'AEH a connu une diminution remarquable de ses réserves en raison de la baisse des précipitations, entraînant une diminution des apports, de l'augmentation des températures, entraînant des pertes. Un autre facteur contribuant à la difficulté à pourvoir aux usages pour lequel il a été conçu est l'envasement. Grâce à l'utilisation d'outils de télédétection, on a pu suivre à la fois l'évolution spatiale et temporelle de la retenue du barrage, ainsi que l'étude de la dynamique de l'occupation des sols dans le HaB-OER. En utilisant l'indice NDWI et en générant un MNT multi-source, on a pu suivre l'évolution des volumes de la retenue du barrage, qui a connu une diminution critique ces dernières années.

L'étude de la dynamique de l'occupation des sols à l'échelle du HaB-OER entre 1985 et 2020 révèle une diminution significative de la couverture forestière au profit des terres cultivées et des pâturages. Cette dynamique contribue à l'augmentation des pertes de sol dans l'ensemble des sous-bassins du HaB-OER. En utilisant le modèle RUSLE, on a pu quantifier ces pertes entre 1985 et 2020. Le taux moyen d'érosion était de 7,1 t/ha/an en 1985, et ce taux a augmenté pour atteindre 7,8 t/ha/an en 2020. Le total des pertes de sol a augmenté de 3,8 Mt en 1985 à 4,13 Mt en 2020. Ces estimations demeurent inférieures par rapport aux pertes réelles observées lors des campagnes bathymétriques effectuées. Le volume de la retenue du barrage est passé de 744 Mm^3 en 1998 à 668 Mm^3 en 2014, entraînant une perte de 76 Mm^3. La perte annuelle moyenne s'élève à 4,75 Mm^3/an.

Par conséquent, la politique de la grande hydraulique au Maroc doit s'adapter aux réalités du changement climatique. Ce qui demande une approche intégrée qui prend en compte la préservation des ressources forestières et la gestion durable des sols. Il est essentiel de repenser la gestion des barrages non seulement comme des réservoirs d'eau, mais aussi comme des éléments clés d'un écosystème fragile qui nécessite une attention particulière pour assurer la sécurité hydrique du pays.

Chapitre 9 : Ressources en eau dans le HaB-OER : opportunités agro-touristiques et menaces écologiques

9.1 Introduction

L'eau, à l'origine de toute forme de vie, revêt une importance indéniable pour les écosystèmes et le développement humain (Ed-Dahmouny *et al*., 2019). À travers l'histoire, la relation entre l'homme et les ressources d'un milieu s'est caractérisée par un comportement interactionnel, principalement axé sur l'utilisation de la ressource en eau dans les activités humaines (A. Qadem, 2015). En raison de la dépendance des ressources en eau à l'égard d'un climat irrégulier, l'homme a dû mettre en place divers systèmes d'irrigation adaptés dès la Haute Antiquité (De Reparaz, 1993). Le Maroc, conscient de cette dépendance, a entrepris un effort colossal en développant des grands aménagements et infrastructures hydrauliques, tels que les barrages, les périmètres irrigués, les ouvrages de transfert d'eau entre bassins, ... (CESE, 2014).

Si le b'AEH a été construit dans le but de garantir l'irrigation du périmètre irrigué de Béni Amir en aval, la situation en amont du barrage subit depuis des années une reconversion majeure. La croissance démographique et la sédentarisation des populations nomades ont conduit à une expansion des terres cultivées au détriment des espaces de pâturage (Jennan, 1986). Certaines familles nomades se sont installées sur les terres irriguées de l'Oum Er Rbia (Beaudet, 2010), optant pour l'agriculture comme une nouvelle alternative (Ghadbane, 2022). Les fonds provenant des immigrants et les investissements des agriculteurs ont grandement contribué au développement de cette agriculture. En conséquence, les terres agricoles se sont considérablement étendues aux dépens des zones de parcours et des forêts (Chap 8).

L'introduction de cultures telles que le maraîchage et l'arboriculture fruitière a entraîné une sédentarisation rapide des populations (Aït Hamza, 2012). La modernisation des techniques d'irrigation, encouragée par les autorités publiques pour les usagers individuels (Molle *et al*., 2019), a renforcé le processus de sédentarisation et a également attiré les agriculteurs et les investisseurs. Cependant, ces transformations ont créé une pression croissante sur les ressources en eau, qui est encore amplifiée par les besoins en augmentation de la population. Afin de mieux comprendre l'impact de ces mutations sur les ressources en eau, il est crucial de réaliser un diagnostic précis sur les pratiques d'irrigation dans le HaB-OER. Pour atteindre cet objectif, une approche basée sur la collecte d'informations et de données auprès des acteurs et des utilisateurs de l'eau a été adoptée en utilisant une enquête par entretiens et questionnaire. Cette démarche a été complétée grâce à l'utilisation de la télédétection.

9.2 Présentation de la méthodologie adoptée

L'évaluation de la manière dont la population du HaB-OER perçoit les risques liés aux changements climatiques et s'adapte au stress hydrique nécessite l'utilisation d'une méthode de collecte de données appropriée. Parmi les nombreuses méthodes et approches disponibles, nous avons adopté une approche "intégrée" qui repose sur la demande de données socio-économiques aux administrations locales et régionales, l'exploitation des bases de données géospatiales, ainsi qu'une enquête.

Il est important de noter que l'obtention et l'organisation des données peuvent représenter un véritable défi. Dans de nombreux cas, la récupération de données auprès des administrations a été difficile. La collecte des données géospatiales est fastidieuse, nécessite un matériel performant, et la maîtrise de techniques informatiques. De plus, les déplacements et la planification des rencontres avec les enquêtés a été parfois complexes. Cependant, grâce à une insistance continue, nous avons réussi à rassembler des données, la plupart du temps complètes et cohérentes dans l'ensemble.

9.2.1 Collecte de données socio-économiques

Les données socio-économiques jouent un rôle essentiel dans la compréhension de l'utilisation et de la gestion des ressources en eau. Pendant les années de thèse, différents établissements, agences et services… liés à la gestion et à l'utilisation des ressources en eau ont été sollicités pour rassembler les informations nécessaires afin de mieux comprendre la relation entre l'homme et les ressources en eau dans le HaB-OER (Tab. 9.1).

Tableau 9.1 Données sur l'utilisation des ressources en eau

Etablissement	Données
HCP Béni Mellal Khénifra	Données démographiques et socio-économiques de la population selon les recensements généraux de la population et de l'habitat de 1994, 2004 et 2014.
DRA Béni Mellal Khénifra	- Canevas de synthèse des filières végétales ; - Canevas d'évaluation des filières animales.
DPA Khénifra	- Base de données de la petite et de la moyenne hydraulique à Khénifra ; - Liste des associations des usagers des eaux agricoles - zone d'action de la DPA de Khénifra ; - Liste des projets pilier II dans le cadre du Plan Maroc Vert.
ONEP Khénifra	Schéma synoptique du système adducteur de Khénifra.
ABHOER	Base de données des demandes de creusement / approfondissement des puits.

9.2.2 Apport de la télédétection

Afin d'enrichir les bases de données collectées auprès des établissements nous avons utilisé des outils et techniques de télédétection pour les objectifs suivants :

- ✓ Identification des périmètres irrigués :

En utilisant l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et en projetant les coordonnées des périmètres irrigués sur les fonds de Google Earth, nous avons pu précisément identifier ces périmètres et obtenir des informations sur leur localisation et l'évolution de certains d'entre eux.

- ✓ Suivi du couvert végétal :

En utilisant la plateforme GEE, nous avons étudié l'évolution de l'indice NDVI au fil du temps, en le comparant à l'évolution de l'étendue du lac d'Aguelmam Abekhan, qui a connu une régression très accentuée par rapport aux autres lacs (Chap. 6). La cartographie de cet indice aux abords du lac s'est basée sur des images satellites Landsat acquises en juillet des années 1990, 2009 et 2022. Cette analyse nous a permis de mettre en évidence la relation entre l'évolution des terrains de culture et celle de l'étendue du lac.

- ✓ Localisation des bassines d'irrigation :

En utilisant des images de haute résolution de Google Earth pour l'année 2022, nous avons pu localiser les bassines utilisées pour la collecte et le stockage de l'eau avant sa distribution aux cultures via la méthode d'irrigation goutte-à-goutte. Cette démarche nous a également permis d'identifier les parcelles qui utilisent ces nouvelles techniques d'irrigation.

9.2.3 Enquête

Après avoir manipulé et analysé les données socio-économiques, nous avons procédé à la programmation des campagnes de terrain pour mener l'enquête. Cette démarche s'est déroulée entre décembre 2021 et janvier 2022, après coordination avec les autorités locales des provinces de Khénifra, Béni Mellal et El Hajeb.

- ✓ La première étape de l'enquête a été consacrée aux acteurs institutionnels de la gestion des ressources en eau, tels que la DPA, l'ONEP, l'ABHOER et l'ANEF.
- ✓ La deuxième étape a été consacrée aux communes et aux associations, notamment les associations de distribution de l'eau potable et les associations d'usagers des eaux agricoles.
- ✓ Enfin, la troisième étape de l'enquête a ciblé les agriculteurs dans les différents périmètres irrigues du HaB-OER.

Ces étapes nous ont permis de recueillir des informations essentielles auprès des différents acteurs de gestion et utilisateurs des ressources en eau dans la zone d'étude (Pl. Ph. 9.1).



Planche photos 9-1 : Enquête avec des acteurs institutionnels, des associations et des agriculteurs (El Orfi 2021-22)

9.3 Méthodologie et protocole d'enquête

9.3.1 Méthode et techniques sociogéographiques

Dans un monde en perpétuel changement, les chercheurs en sciences humaines et sociales doivent régulièrement actualiser les données qu'ils utilisent pour collecter des informations (Tamim, 2020). En géographie, il existe diverses méthodes de collecte de données, et le choix dépend principalement des objectifs et des hypothèses. On peut distinguer trois grandes catégories de collecte de données : les observations sur le terrain, l'utilisation de documents

administratifs et d'archives, ainsi que la collecte de données par enquête (Gumuchian & Marois, 2018). L'enquête est l'une des méthodes de collecte de données les plus fréquemment employées en géographie. Il s'agit d'une "méthode interrogative" permettant de mesurer la perception des individus concernant les phénomènes sociaux (Salès-Wuillemin, 2006). Dans cette étude, les enquêtes ont concerné deux groupes de population : des acteurs et des agriculteurs, en utilisant deux techniques sociogéographiques, à savoir l'entretien et le questionnaire.

Les entretiens sont menés avec des acteurs institutionnels et des membres des communes locales afin de recueillir des informations qualitatives sur la dynamique territoriale survenue dans le HaB-OER et leur lien avec l'utilisation des ressources en eau. Ces entretiens, de type semi-directif, sont menés à l'aide de questions structurées regroupées en quatre thèmes principaux : les perceptions climatiques, l'hydrologie et les ressources en eau, les usages des ressources en eau et les pratiques de gestion. Les conditions et le déroulement des entretiens sont inspirés de l'étude de Gruzelle & Lebaut (2022). En effet, pour garantir la collecte maximale d'informations, la personne interrogée a la liberté de s'exprimer pendant 30 min, et l'ordre de discussion des thèmes peut être adapté en fonction de sa réactivité, tout en assurant de couvrir certains points essentiels. Les enquêtés sont sélectionnés en fonction de leur implication dans la zone d'étude et de leur connaissance de la région, et ils font l'objet d'une demande formelle directe.

Le questionnaire soumis aux agriculteurs sert à collecter des informations sur la manière dont ils perçoivent les risques liés aux changements climatiques et comment ils s'adaptent au stress hydrique (Annexe 9.1). L'enquête questionne quatre thèmes en 90 questions formulées de manière précise et facilement compréhensible. Le questionnaire comprend environ dix questions informatives sur le répondant, ainsi qu'une vingtaine de questions pour chaque thème, et il est conçu pour être complété en 30 minutes environ. Le questionnaire suit une structure "en entonnoir", c'est-à-dire qu'il commence par des questions générales pour ensuite devenir de plus en plus spécifique, dans le but d'éviter de commencer par des questions sur les risques, ce qui aurait pu introduire un biais (Verlynde, 2018). En plus des agriculteurs, le questionnaire a ciblé des associations répartis dans 8 communes où les terrains de culture sont situés. Le choix des enquêtés s'est basé sur plusieurs critères, notamment leur répartition dans le bassin (amont, milieu et aval), leur âge pour contribuer à la reconstruction de l'histoire de la région, ainsi que leur disponibilité lors de nos visites sur le terrain.

9.3.2 Méthode de passation et taille de l'échantillon

Pour les entretiens avec les acteurs institutionnels et les membres des conseils communaux, des demandes de rencontres formelles ont été adressées aux responsables afin de planifier ces entretiens en fonction de leurs disponibilités. Ainsi, des entretiens ont été menés avec le directeur de la DPA de Khénifra, les présidents ou les membres des conseils des 8 communes sélectionnées, ainsi que des chefs de service de l'ONEP de Khénifra, de l'ANEF de Béni Mellal-Khénifra et de l'ABHOER entre décembre 2021 et janvier 2022.

En ce qui concerne le questionnaire, après sa traduction en arabe, il a été testé auprès d'une dizaine de personnes pour s'assurer que les réponses aux questions posées permettaient bien de recueillir les informations recherchées et d'identifier toute redondance. Ensuite, le questionnaire a été saisis sur la plateforme "Google Forms" pour faciliter son remplissage. Cette plateforme permet une collecte d'informations directement auprès des participants et une visualisation des résultats en temps réel ce qui supprime les erreurs de saisie manuelle ultérieure. Le questionnaire a été mené en face à face auprès de 9 associations et 116 agriculteurs répartis dans 8 communes.

La taille de l'échantillon définie pour obtenir un degré de précision d'environ 5 % selon l'indice de Yamane (Verlynde, 2018) devait inclure 385 pour le HaB-OER. Cependant, le nombre de 116 répondants inférieur à la recommandation de la littérature selon Yamane (1967) induit une augmentation de la marge d'erreur qui passe ainsi 9 % pour un niveau de confiance de 95 %. Cet échantillon a été élaboré selon la méthode d'échantillonnage aléatoire ce qui signifie que toutes les personnes interrogées, indépendamment de leur sexe, de leur âge, de leur profession ou de leur catégorie socio-professionnelle, ont eu la même chance d'être incluses dans l'échantillon.

9.3.3 Prétraitement des données collectées

L'analyse des réponses obtenues nécessite une préparation et un traitement des données collectées. Tout d'abord, toutes les réponses recueillies ont été fidèlement transcrites sur la plate-forme "Google Forms" avec une traduction de l'arabe vers le français. Ensuite, les réponses ont été exportés vers un tableur Excel afin de faciliter la manipulation et le traitement des données. Les données ont ensuite été vérifiées, organisées, nettoyées et rendues homogènes. Une vérification générale a été effectuée pour avoir une idée du contenu global. Ensuite, les principales caractéristiques de l'échantillon, telles que le sexe, l'âge et la profession, ont été identifiées. Enfin, les résultats des quatre thèmes abordés ont été analysés, puis des croisements de données ont été réalisés pour affiner l'analyse en mettant en relation ces thèmes. Ces résultats sont présentés dans l'annexe 9.2.

9.4 Le HaB-OER : un espace en transformation continue

9.4.1 Statut juridique et structure foncière

En raison de ses richesses naturelles et de l'importance de ses forêts domaniales et collectives, le Moyen Atlas a attiré l'intérêt de l'État, qui a entrepris divers projets d'aménagement intégré pour valoriser ces richesses (Jennan, 1986). L'intervention de sociétés forestières dans l'exploitation des forêts ainsi que le transfert des espaces forestiers du domaine collectif au domaine de l'État ont progressivement entraîné la disparition de l'exploitation pastorale (Tag, 1996) ; Ceci a conduit à une évolution du mode de vie, passant du semi-nomadisme à une sédentarisation progressive (Jennan, 1986). Les pâturages sont désormais divisés entre les membres des localités et utilisés pour l'agriculture (Amahan, 1998).

En effet, les campagnes du Moyen Atlas connaissent des mouvements d'émigration dont le rythme s'accélère (Jennan, 1986). Cette mobilité croissante de la population a affaibli les liens avec le territoire pastoral collectif, tandis que la nouvelle génération s'est désintéressée de l'activité pastorale traditionnelle et a perdu la mémoire du foncier collectif (Tag, 1996). En conséquence, les traditions régissant l'utilisation des territoires ont disparu, car leur statut est passé du collectif à la propriété privée "*Melk*" (Amahan, 1998).

Dans la zone d'action de la DPA de Khénifra, qui est la plus représentative du HaB-OER, le statut juridique des terres se caractérise par une prédominance du statut "Melk", couvrant 54% de la superficie totale, suivi par le statut "Domaine de l'État" à 36% et le statut "Collectif" à 10% de la superficie totale (Fig. 9.1). La structure foncière de la zone est principalement marquée par la dominance des micropropriétés de moins de 10 ha ; Elles représentent 57% de la SAU (Fig.9.2). Le processus de morcellement des terrains agricoles s'accentue de génération en génération en raison de la succession, ce qui contribue à la croissance de la demande en eau, comme le confirme les réponses à la question 5 (Annexe 9.2, Enq. 9.10). Ces micropropriétés sont aujourd'hui exploitées par 84% des agriculteurs (DPA, 2020).

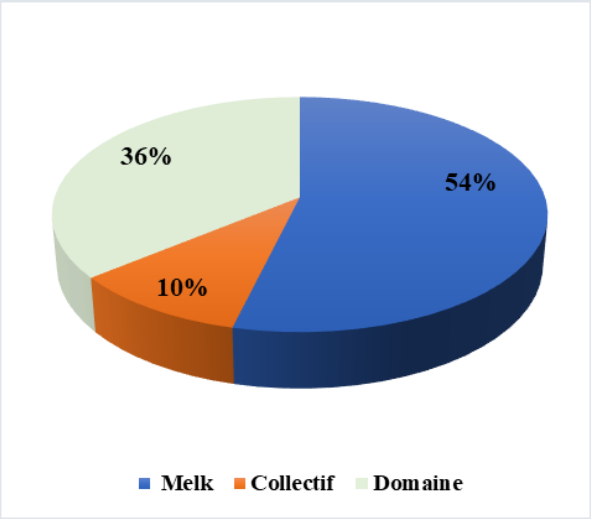


Figure 9.1 Statut juridique des terres dans la zone d'action de la DPA de Khénifra (DPA-Khénifra)

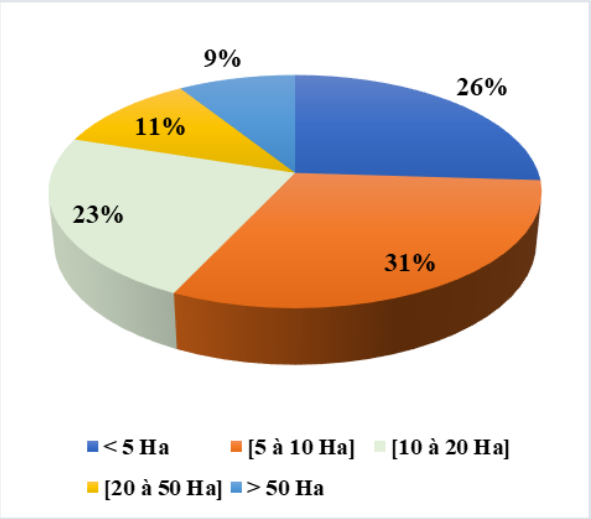


Figure 9.2 Structure foncière dans la zone d'action de la DPA de Khénifra (DPA-Khénifra)

9.4.2 L'élevage : du pastoralisme vers les stabulations

En raison de la diversité de son climat et de l'abondance de ses pâturages, le Moyen Atlas est avant tout considéré comme une terre d'élevage, ce qui a entraîné un mode de vie semi-nomade et la pratique de la transhumance (Jennan, 1986). Cependant, la transition d'un mode de transhumance à la sédentarisation s'est accompagnée d'un ensemble de mutations socio-économiques. Cette sédentarisation des éleveurs nomades est liée à l'évolution des sociétés pastorales sous l'influence de la "modernisation", et elle a conduit à l'émergence de nouvelles formes d'élevage, tels que l'élevage en stabulation et l'introduction de vaches laitières de race pure (Tag, 1996). En outre, l'État a mis en place des programmes visant à encourager les éleveurs à améliorer et à intensifier leurs pratiques d'élevage pour s'adapter progressivement aux nouvelles réalités de l'économie de marché tel que l'engraissement du bétail (Tag, 1996).

Actuellement, en raison de la diversité des écosystèmes et du statut juridique, trois systèmes d'élevage distincts sont identifiés dans cette zone (DPA, 2020):

- ✓ Le système pastoral : principalement axé sur les ovins et pratiqué sur les parcours hors forêt, se trouvant majoritairement dans les étendues collectives de Khenifra ;
- ✓ Le système sylvo-pastoral : repose sur l'alimentation des ovins et des caprins à partir des parcours forestiers, avec la jachère comme apport fourrager supplémentaire ;
- ✓ Le système d'élevage intégré à l'agriculture : combine l'élevage laitier avec des unités d'engraissement de bovins et d'ovins.

9.4.3 La production agricole : d'une culture de subsistance à une culture commerciale

L'économie de la région reposait principalement sur la production céréalière (maïs, orge, blé) en complément à l'activité pastorale (Jennan, 1986). Cependant aujourd'hui, la tendance dominante est à l'augmentation des cultures commerciales, telles que les pommiers, pruniers, et cerisier ... comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.13). L'agriculture est en pleine transition, passant d'une agriculture de subsistance à une agriculture davantage tournée vers le commerce.

En effet grâce à son climat favorable et à l'abondance des ressources en eau pour l'irrigation, la région a pu offrir des conditions idéales pour une expansion exceptionnelle des arboricultures. D'introduction récente (Badidi, 1995), ces cultures commerciales se sont révélées très rentables

et ont ainsi valorisé l'agriculture irriguée traditionnelle, caractérisant depuis longtemps la communauté agricole de montagne (Tag, 1996). L'impact de cette culture se traduit par une modification du niveau de vie des agriculteurs "fellahs" convertis à ces productions (Badidi, 1995). Cette réussite attire de plus en plus de capitaux d'origine citadine (Tag, 1996) et même des investissements provenant des retours de fonds des immigrants, comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.15).

L'arboriculture connaît un développement progressif dans la région, avec une prédominance de l'olivier représentant 76% de la superficie productive, suivi des pommiers (14%), des amandiers (3%), et des abricotiers (1,6%) (DPA, 2020). La superficie consacrée à ces cultures fruitières dans la zone d'action de la DPA de Khénifra a connu une augmentation ces dernières années, (Fig. 9.3), confirmant ainsi les résultats de l'enquête. En parallèle, le maraîchage gagne également en importance dans la zone HaB-OER, avec une concentration principale de cultures comme la pomme de terre et l'oignon, qui voient leurs superficies augmenter ces dernières années, comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.14).

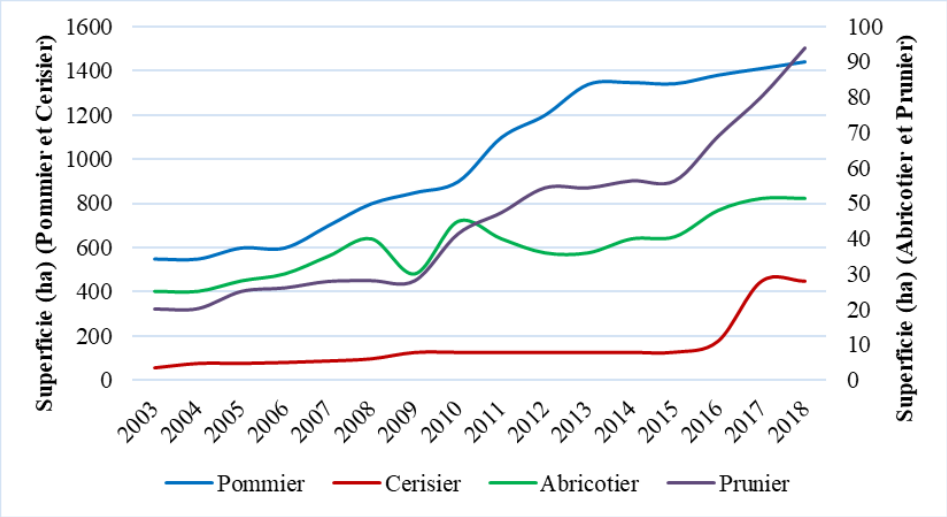


Figure 9.3 Évolution des superficies de quelques arboricultures dans la zone d'action de la DPA de Khénifra (DPA-Khénifra)

9.5 D'une gestion collective à un accaparement privé de l'eau

9.5.1 Origine de l'eau d'irrigation

Le HaB-OER bénéficie d'une abondance de sources et de cours d'eau (Chap. 4 et 5), ce qui assure un approvisionnement en eau adéquat pour les cultures dans les périmètres irrigués. Le réseau de canaux assure la distribution de l'eau sur l'ensemble des parcelles irriguées. Récemment, les agriculteurs ont commencé à utiliser des prélèvements souterrains pour irriguer leurs cultures, en utilisant soit des techniques traditionnelles avec des canaux, soit des nouvelles techniques telles que le système goutte-à-goutte. Cependant, nous ne disposons pas actuellement d'informations sur la part représentative de l'utilisation de cette nouvelle technique. Il est à noter que 69% de l'eau utilisée dans l'irrigation des périmètres irrigués proviennent de sources, tandis que les 31% restants proviennent de cours d'eau (Fig. 9.4).

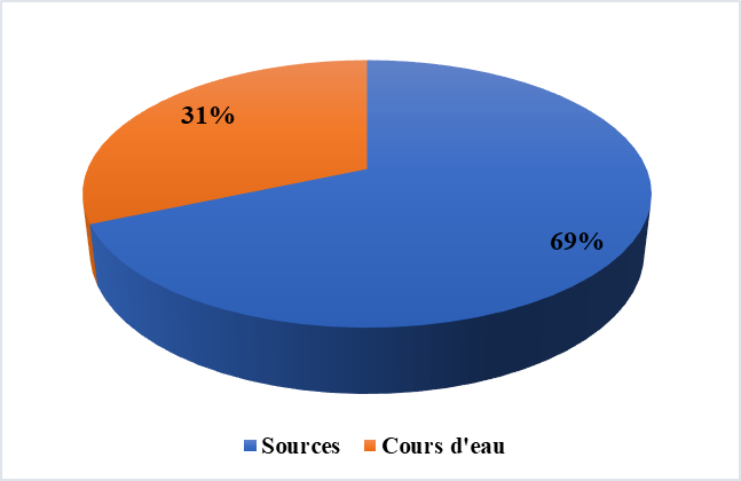


Figure 9.4 Origine des eaux d'irrigations des périmètres irrigués (DPA-Khénifra)

9.5.2 Les puits dans le HaB-OER

9.5.2.1 Evolution et localisation des puits dans le HaB-OER

Les propriétaires des parcelles irrigables dans les périmètres irrigués bénéficient d'un droit d'eau réglementé par un cycle d'irrigation appelé "tour" d'eau, dont les règles (classement d'irrigation, temps d'arrosage et fréquence d'irrigation, ...) sont établies en fonction des coutumes traditionnelles. À l'échelle du HaB-OER, la durée du cycle d'irrigation varie d'une région à une autre, allant d'une semaine à Ouaoumana à 25 jours à l'Oum Er Rbia, comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.17). Cependant, ces dernières années, l'augmentation de la fréquence des années sèches a considérablement réduit les eaux de surface. De ce fait, l'eau distribuée pendant les tours d'eau n'est plus suffisante, surtout pendant les saisons sèches ou lorsque les cultures requièrent beaucoup d'eau. Pour faire face à cette situation déficitaire, les agriculteurs ont eu recours à l'eau souterraine en creusant des puits et des forages privés et cela d'autant plus que ce moyen d'accès à l'eau est subventionné par l'état.

Ainsi plus d'une centaine d'utilisateurs soumettent chaque année à l'ABHOER des demandes pour le creusement ou l'approfondissement des puits. Entre 2011 et 2020, l'ABHOER a enregistré 1250 demandes de creusement de puits dans la région du HaB-OER. Ces dernières années, le nombre de demandes a augmenté, passant de 62 demandes en 2011 à 238 demandes en 2020 (Fig. 9.5). De même, les profondeurs moyennes des puits creusés pour l'exploitation des eaux souterraines ont augmenté, passant de 38 m en 2011 à 94 m en 2020 (Fig. 9.6).

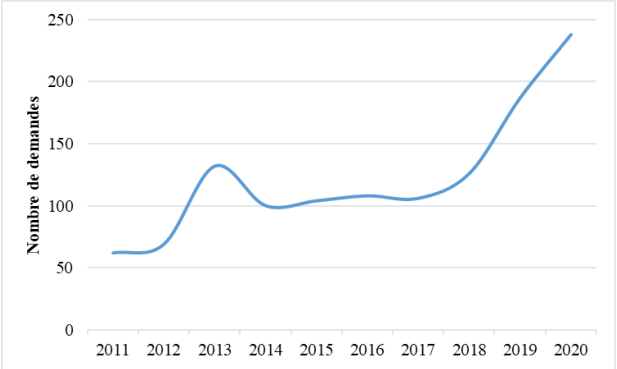


Figure 9.5 Evolution de nombre de demande de creusement de puits entre 2011 et 2020 (ABHOER)

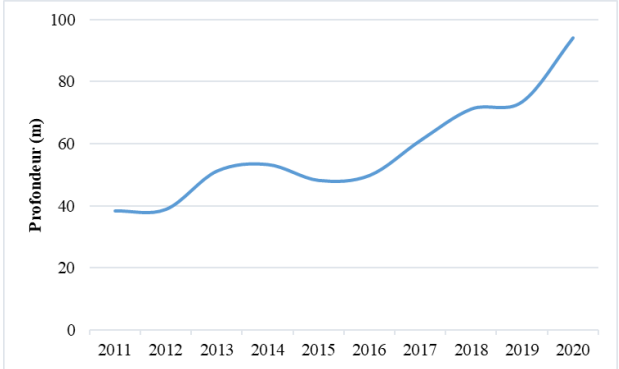
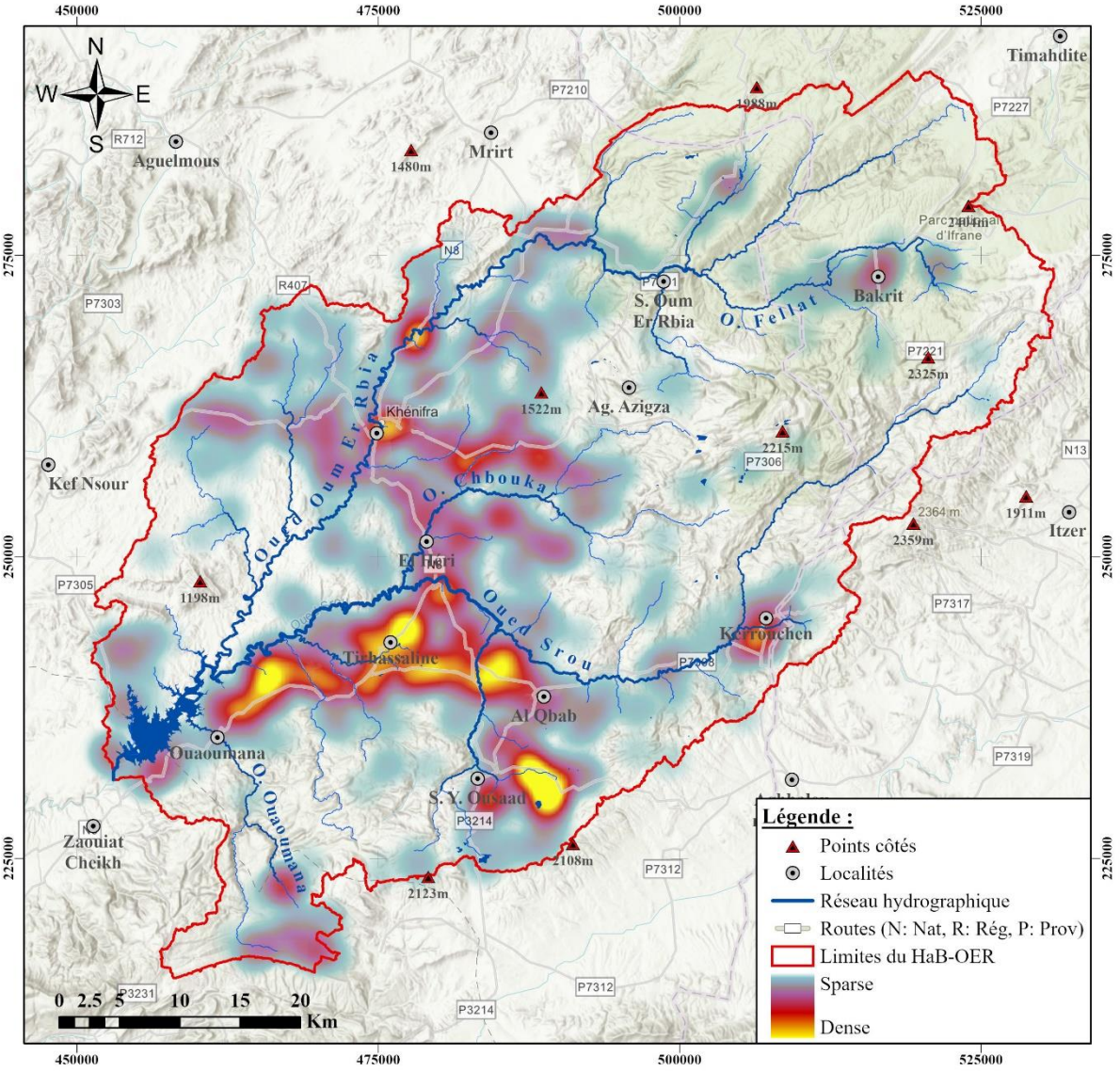


Figure 9.6 Evolution de profondeur moyenne de creusement de puits entre 2011 et 2020 (ABHOER)

Ces résultats indiquent une augmentation de la pression exercée sur les ressources en eaux souterraines. Parmi ces demandes 89% sont concentrées dans la province de Khénifra, 10% sont

réparties entre les provinces de Béni Mellal et d'Ifrane, tandis que seulement 1% sont localisées dans la province de Midelt. Les demandes reflètent une concentration de puits dans les zones les plus agricoles, à des altitudes plus basses, sur les plateaux et dans les dépressions le long des cours d'eau, en particulier sur la ligne reliant Ouaoumana *et al* Qbab, ainsi que dans la zone de Sidi Yahia Ou Saâd (Carte 9.1).



Carte 9.1 Localisation des demandes de creusements de puits à l'échelle du HaB-OER d'après l'ABHOER

Environ 89% des demandes soumises concernent le creusement de nouveaux puits, 10% sont liées à la régularisation de la situation de puits déjà existants, tandis que seulement 1% concerne l'approfondissement de puits. Ces résultats diffèrent de ceux de notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.9), qui indique qu'environ 30% des utilisateurs ont effectivement approfondi leurs puits. Cela s'explique par le fait qu'une grande partie des puits sont illégaux et leur exploitation se fait sans autorisation.

9.5.2.2 Utilisation des eaux souterraines dans le HaB-OER

L'irrigation représente la principale utilisation des puits avec 92%, suivie par l'usage domestique avec 6%. D'autres usages peuvent être signalés, mais ils restent très limités, comme c'est le cas pour les lavages d'automobiles (Fig. 9.7). Ces résultats diffèrent totalement de ce qui est montré par les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.11).

Contrairement aux cultures traditionnelles telles que les céréales et les luzernes, les agriculteurs accordent une grande importance aux cultures "modernes", car elles sont plus rentables. Cependant celles-ci nécessitent davantage d'eau et pour répondre à ces besoins, en particulier en raison des faibles taux de précipitations, les agriculteurs ont recours aux puits et aux forages. Les cultures irriguées privilégiées par les agriculteurs comprennent les arbres variés, représentant 42%, suivis des oliviers à 26%, des cultures maraîchères à 16% et de l'arboriculture à 13% (Fig. 9.8). Sachant que le PMV a permis l'extension des superficies arboricoles de plus de 7000 ha, réparties comme suit : 5000 ha d'oliviers, 1000 ha de pommiers, 400 ha de cerisiers et 700 ha d'amandiers (DPA, 2020).

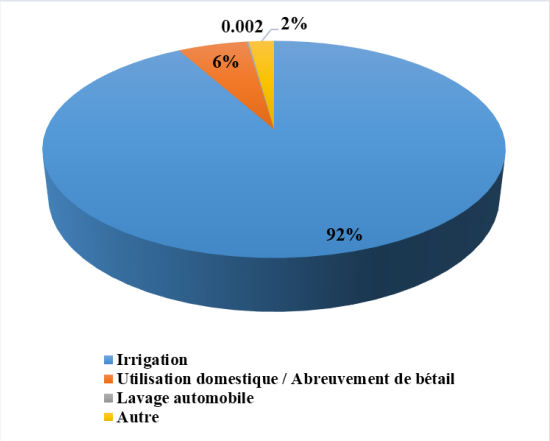


Figure 9.7 Type d'usages de puits dans le HaB-OER (ABHOER)

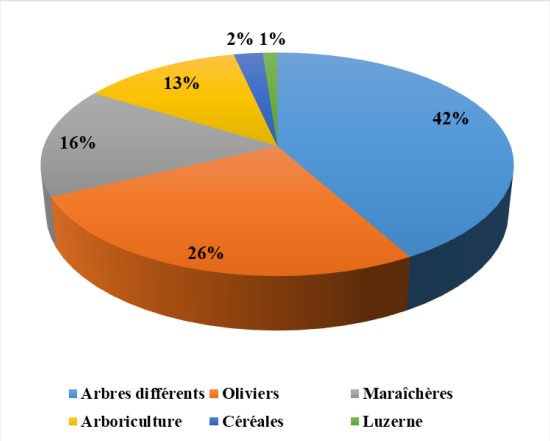


Figure 9.8 Type de cultures irriguées par les puits (ABHOER)

9.5.3 Le réseau de canaux d'irrigation

Le schéma socio-territorial classique d'une tribu est constitué de plusieurs fractions, elles-mêmes composées de plusieurs douars (M.-D. El Jihad, 2010). Au niveau de chaque douar, la Jmaâ, une assemblée traditionnelle représentant une collectivité territoriale, a mis en place une organisation spécifique avec à sa tête un chef appelé "*Amghar*," choisi par la communauté par consensus pour une période donnée (A. Qadem, 2015). Cependant, après l'indépendance, le découpage territorial traditionnel dit tribal a été remplacé par le nouveau découpage communal rural pour gérer les affaires des populations (M.-D. El Jihad, 2010). Cette évolution a entraîné des changements dans la gouvernance locale et la gestion du territoire.

En matière d'irrigation communautaire, l'Amghar, en tant que grand connaisseur de la gestion de l'eau, a pour rôle de répartir l'eau entre les irrigants, d'arbitrer les conflits et d'assurer l'entretien du réseau d'irrigation ... De plus, il mémorise les tours d'eau pour les ayants droit, en tenant compte des modifications résultant des transactions de vente ou de location des parts d'eau (Bekkari & Castillo, 2011). Afin d'impliquer davantage les usagers de l'eau dans le processus de planification et de gestion, le Maroc a mis en place des programmes de gestion participative en irrigation (GPI) visant à rationaliser l'utilisation de la ressource en eau (Ed-Dahmouny *et al.*, 2019). Les Associations d'usagers des eaux agricoles "AUEA" ont été encouragées à soutenir la politique étatique en matière d'irrigation. Ainsi, ces associations prennent progressivement le relais et remplace la Jmaâ et l'Amghar en tant que gestionnaires.

Le HaB-OER connaît une mutation socio-économique majeure, centrée sur des activités agricoles nécessitant des quantités d'eau importantes. L'infrastructure hydraulique repose sur un réseau de canaux appelés "seguias", qui permettent de transporter l'eau par gravité depuis des sources ou des prises d'eau sur des rivières vers l'aval en direction des parcelles irriguées. Les

eaux sont collectées à partir des sources ou prélevées dans les cours d'eau, puis acheminées par les canaux principaux pour être réparties dans les canaux secondaires. Chaque canal secondaire dessert un "douar" pendant une durée déterminée selon le calendrier du cycle d'eau, comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.17). Dans ce cycle, l'eau est d'abord répartie entre les fractions de tribus, puis entre les douars de chaque fraction de tribu.

Malheureusement, nous ne disposons que d'informations concernant le réseau des canaux pour seulement 23 des 76 périmètres irrigués de la zone d'action de la DPA de Khénifra. Parmi ces 76 périmètres, 59 sont localisés dans le HaB-OER (DPA, 2020). Le réseau de canaux d'irrigation se compose de deux types de canaux : les canaux traditionnels en terre, représentant 59% du réseau, et les canaux modernes en béton, représentant 41% (Fig. 9.9) (Pl. Ph. 9.2). Parmi les canaux en béton, 50% sont classés comme étant en "Bon État" et 50% en "Dégradé".

Le débit moyen transféré par ce réseau de canaux vers les 23 périmètres considérés est de 1,36m^3/s, dont 11 % représentent un débit pérenne, équivalent à 0,15 m^3/s, le reste étant saisonnier (Fig. 9.10). Le volume annuel prélevé à partir de 60 sources et 65 prises de cours d'eau pour l'irrigation pérenne de l'ensemble de ces périmètres s'élève à 110 hm^3, ce qui équivaut à 14,5 % des 760 hm^3 d'eau qui alimentant le b'AEH (Chap. 4). À noter qu'en période d'étiage, lorsque la demande en eau des cultures augmente, les zones irriguées utilisent la quasi-totalité des écoulements disponibles, sans tenir compte du débit réservé.

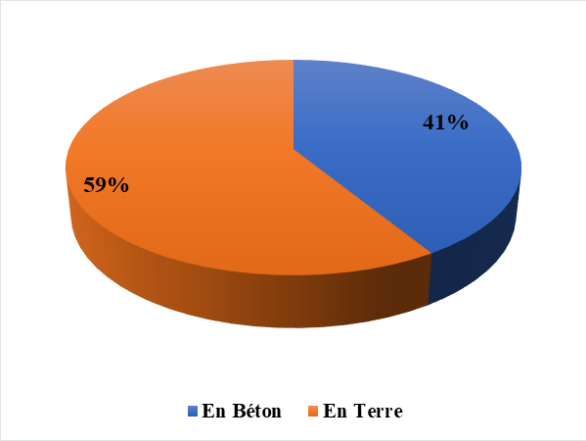


Figure 9.9 Réparation des canaux en béton et en terre (DPA-Khénifra)

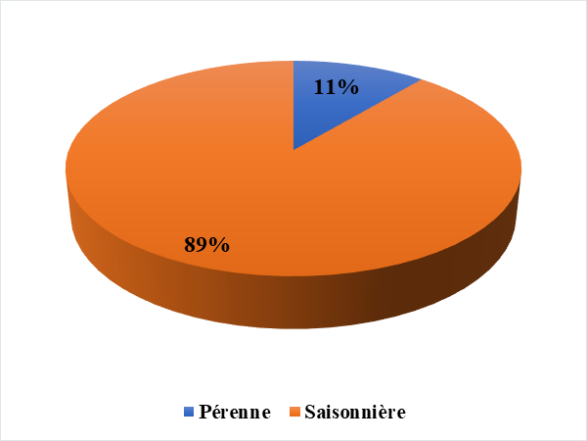


Figure 9.10 Contribution pérenne et saisonnière dans le débit transféré par le réseau de canaux (DPA-Khénifra)



Planche photos 9-2 Canaux traditionnels en terre (à gauche) et canaux modernes en béton (à droite) (El Orfi, 2022)

9.5.4 Le système goutte à goutte

Face à une demande croissante en eau, l'État marocain a adopté le Plan National d'Économie d'Eau en Irrigation (PNEEI) en 2008 (Kettani *et al*., 2020). Ce plan se concentre sur la promotion de la technologie du goutte-à-goutte qui est censée augmenter les rendements et assurer une distribution uniforme de l'eau avec une efficience d'irrigation élevée (Kettani *et al*., 2020). Depuis 2010 les subventions du PNEEI représente de 80-100% du coût d'investissement (Kuper & Benouniche, 2017). En conséquence, de nombreux agriculteurs se sont tournés vers ce système d'irrigation localisée qui s'avère être une excellente solution en matière d'économie d'eau comme le confirme les réponses à la question (Annexe 9.2).

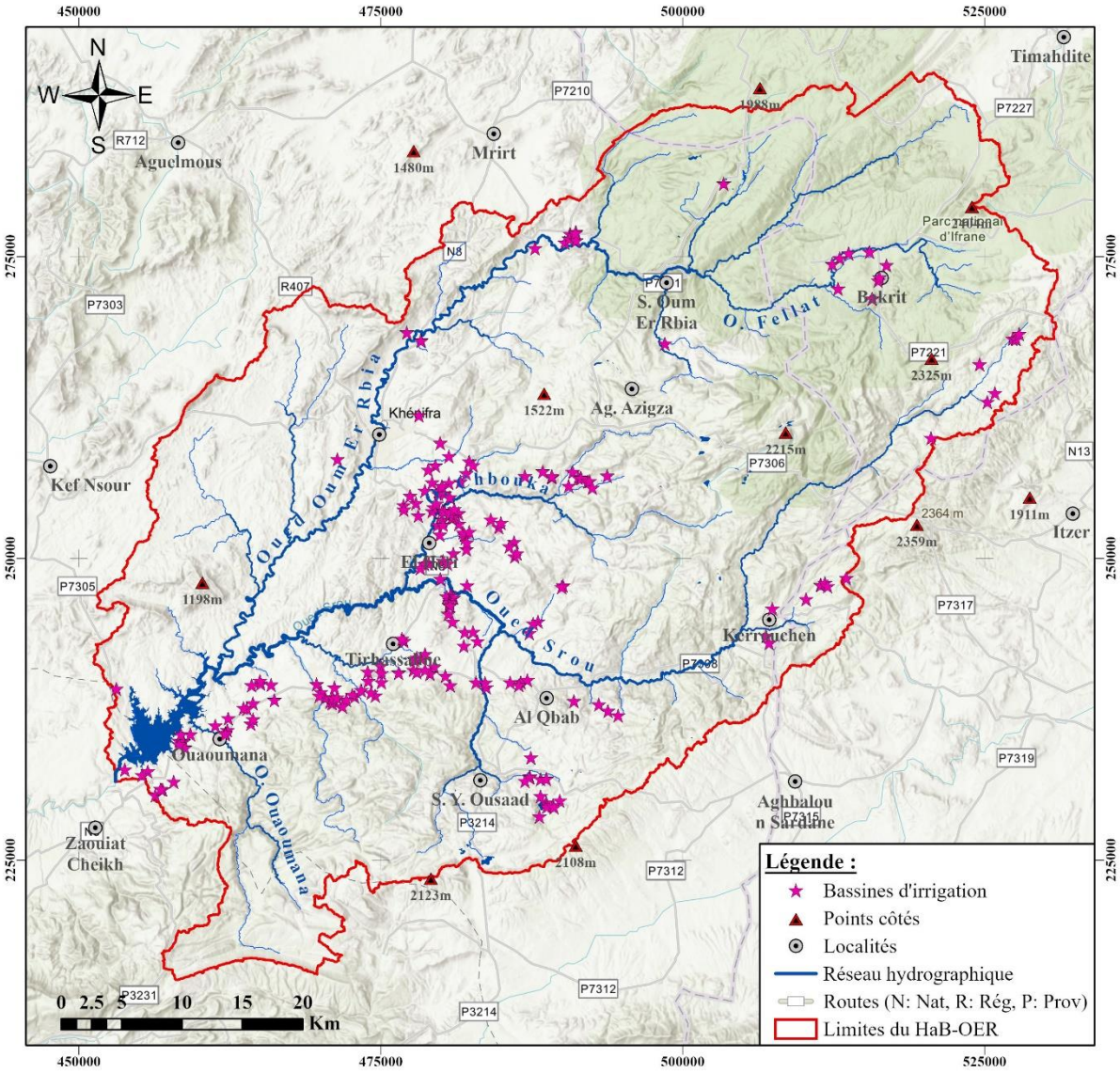
Compte tenu du manque de données sur le système d'irrigation goutte-à-goutte dans la zone d'étude et de l'impossibilité de parcourir toute la zone (3380 km²) pour les recenser, le recours aux outils de télédétection apparaît comme une approche intéressante. Pour cela nous faisons l'hypothèse que le système goutte à goutte repose sur une bassine comme source. Donc à partir des images de Google Earth de 2022, nous proposons de localiser indirectement les parcelles utilisant ce système d'irrigation en se basant sur la localisation des bassines. Nous supposons également que les dimensions de ces bassines peuvent nous donner une idée de l'importance de l'utilisation des eaux en agriculture. Une enquête sur le terrain est nécessaire pour valider et affiner ces résultats (Pl. Ph. 9.3).



Planche photos 9-3 Système d'irrigation goutte-à-goutte avec le bassin à gauche et les tuyaux à droite (El Orfi, 2022)

En adoptant cette approche, environ 230 bassines de différentes dimensions ont pu être localisées (Carte 9.2). Elles sont situées le long des cours d'eau aux mêmes endroits que les puits indiqués dans la carte 9.1. Cette observation est logique car les bassins sont utilisés pour stocker l'eau provenant des puits, des sources ou des cours d'eau, la filtrer et la distribuer de manière régulée aux lignes latérales du système d'irrigation. Les dimensions de ces bassins varient entre 9 m² (3 m x 3 m) et 3600 m² (60 m x 60 m), avec une prédominance de la classe inférieure à 500 m², représentant 60% des bassins (Fig. 9.11).

Contrairement au système d'irrigation par canaux où les pertes d'eau sont importantes en raison de l'arrosage excessif, de l'état dégradé des canaux et de l'évaporation, le système de goutte-à-goutte permet une utilisation plus efficace de l'eau en apportant de petites quantités d'eau directement aux racines des plantes, réduisant ainsi les pertes.



Carte 9.2 Localisation des bassins de collecte d'eau dans le HaB-OER

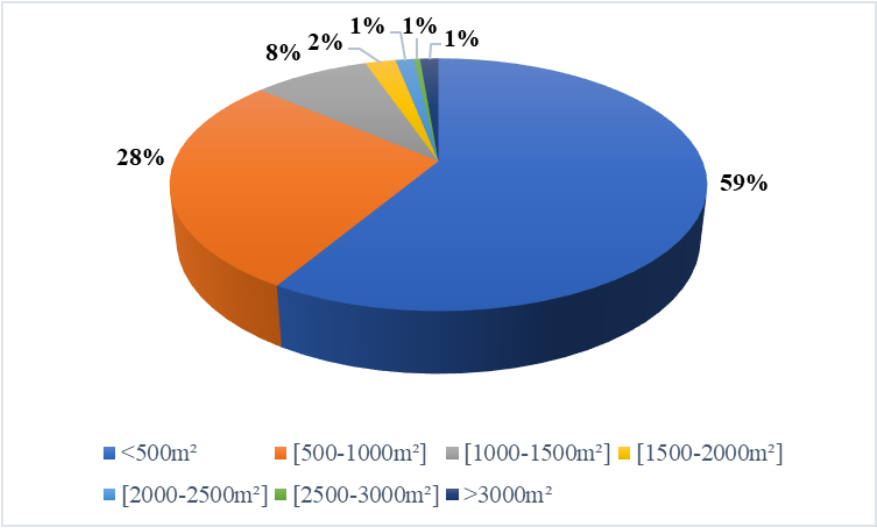


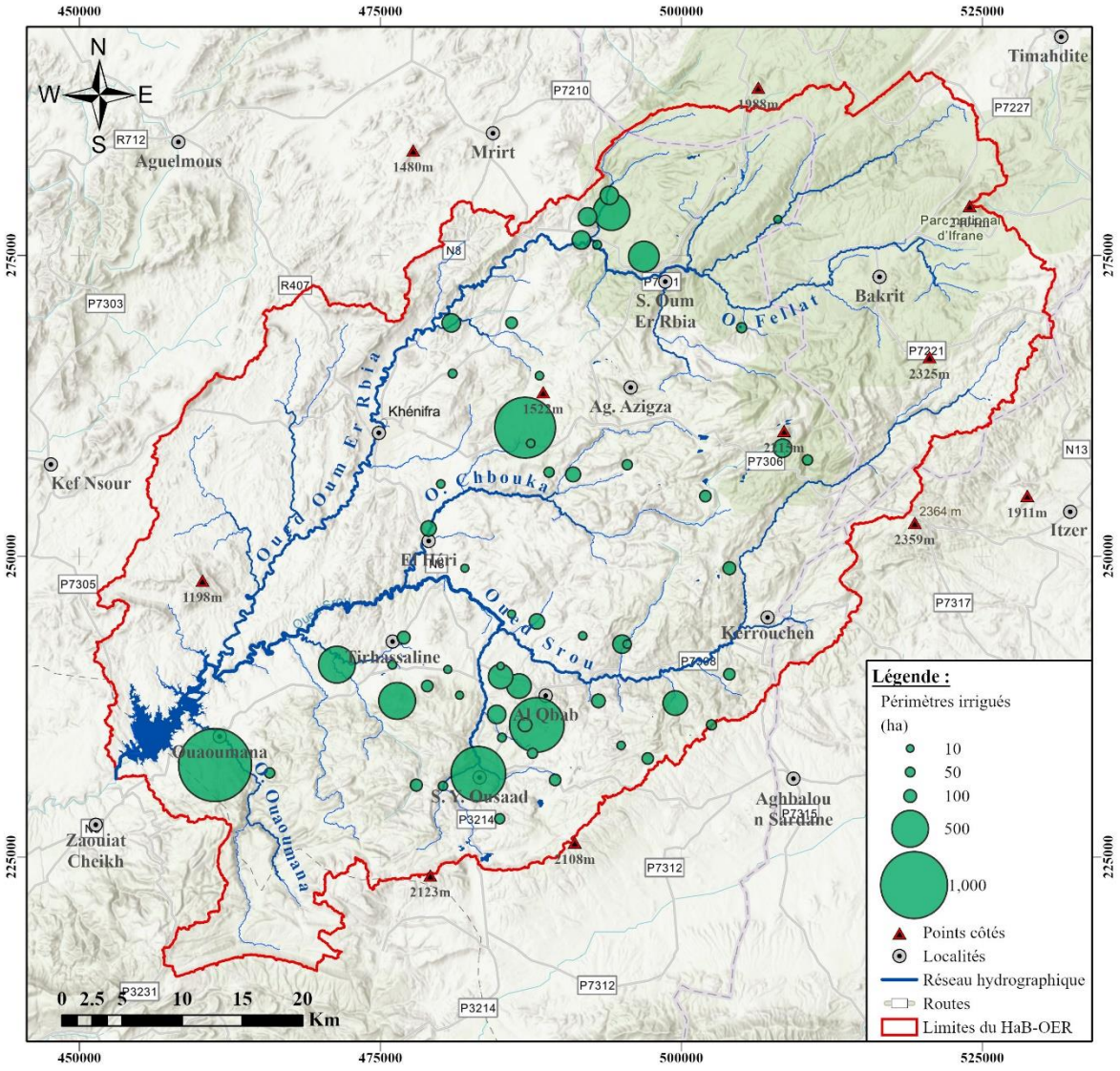
Figure 9.11 Répartition des bassins d'irrigation en fonction de leurs dimensions

9.5.5 Les périmètres irrigués

9.5.5.1 Les périmètres irrigués dans le HaB-OER

Le HaB-OER compte 57 périmètres de petite et moyenne hydraulique, couvrant une superficie totale d'environ 10000 ha. L'irrigation est en évolution continu dans la région, avec une adoption croissante de l'irrigation localisée. Environ 55% de la superficie est irriguée de manière pérenne, tandis que les 45% restants sont irrigués de manière saisonnière (DPA, 2020). Les communes les plus représentatives en termes de superficie irriguée sont El Qbab, Mouha Ouhamou Zayani et Oum Er Rbia, qui abritent en moyenne 8 périmètres et représentent respectivement 19,5 %, 15 % et 14,2 % de la superficie totale (Annexe 9.3).

Pour assurer un approvisionnement suffisant en eau, les périmètres irrigués sont principalement localisés dans les vallées des cours d'eau d'Ouaoumana, de Chbouka, de Srou et d'Oum Er Rbia. Les conditions topographiques favorisent une installation optimale des systèmes d'irrigation pour une distribution efficace de l'eau aux cultures, tandis que les conditions pédologiques sont propices à un rendement agricole satisfaisant. La superficie de ces périmètres varie entre 15 ha et 1100 ha, avec les principaux périmètres tels que Ouaoumane, Arougou, Sbaâ Arousse à El Qbab et Sidi Yahia Ou Saâd, couvrant respectivement 1100 ha, 900 ha et 800 ha (Carte 9.3).



Carte 9.3 Les périmètres irrigués dans le HaB-OER d'après le DPA-Khénifra

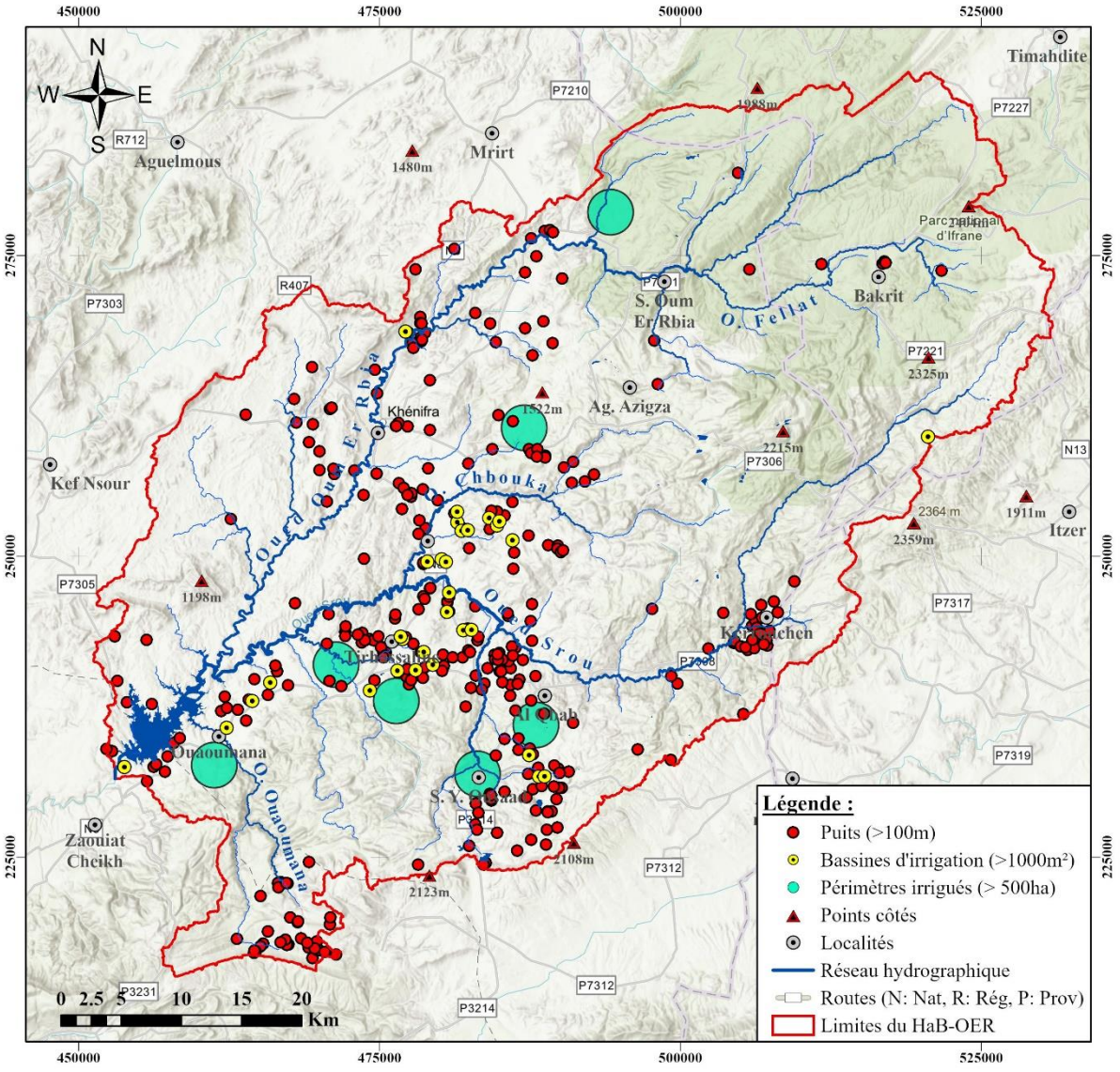
9.5.5.2 Les périmètres à forte consommation d'eau

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous ne disposons pas de données quantitatives sur les quantités d'eau consommée par les périmètres irrigués. Cependant, nous pouvons envisager une approche simple basée sur les données disponibles concernant l'utilisation de l'eau, afin de déterminer les zones où la consommation d'eau est plus élevée dans le HaB-OER.

Notre proposition repose sur la superposition de trois informations clés :

- Les puits ayant une profondeur dépassant 100 m ;
- Les bassins d'irrigation ayant une superficie supérieure à 1000 m² ;
- Les périmètres irrigués couvrant une superficie dépassant 500 hectares.

Les intervalles choisis pour chaque information indiquent une forte utilisation de l'eau, c'est-à-dire que les zones où l'on trouve à la fois des puits profonds de plus de 100 m, de grandes bassines et des vastes périmètres irrigués, consomment davantage d'eau par rapport aux autres zones. Malgré la grande salinité de l'Oued Srou, ces trois indications se concentrent principalement sur sa rive gauche, en particulier au niveau des périmètres de Tighssaline et de Sidi Yahia Ou Saâd (Carte 9.4).



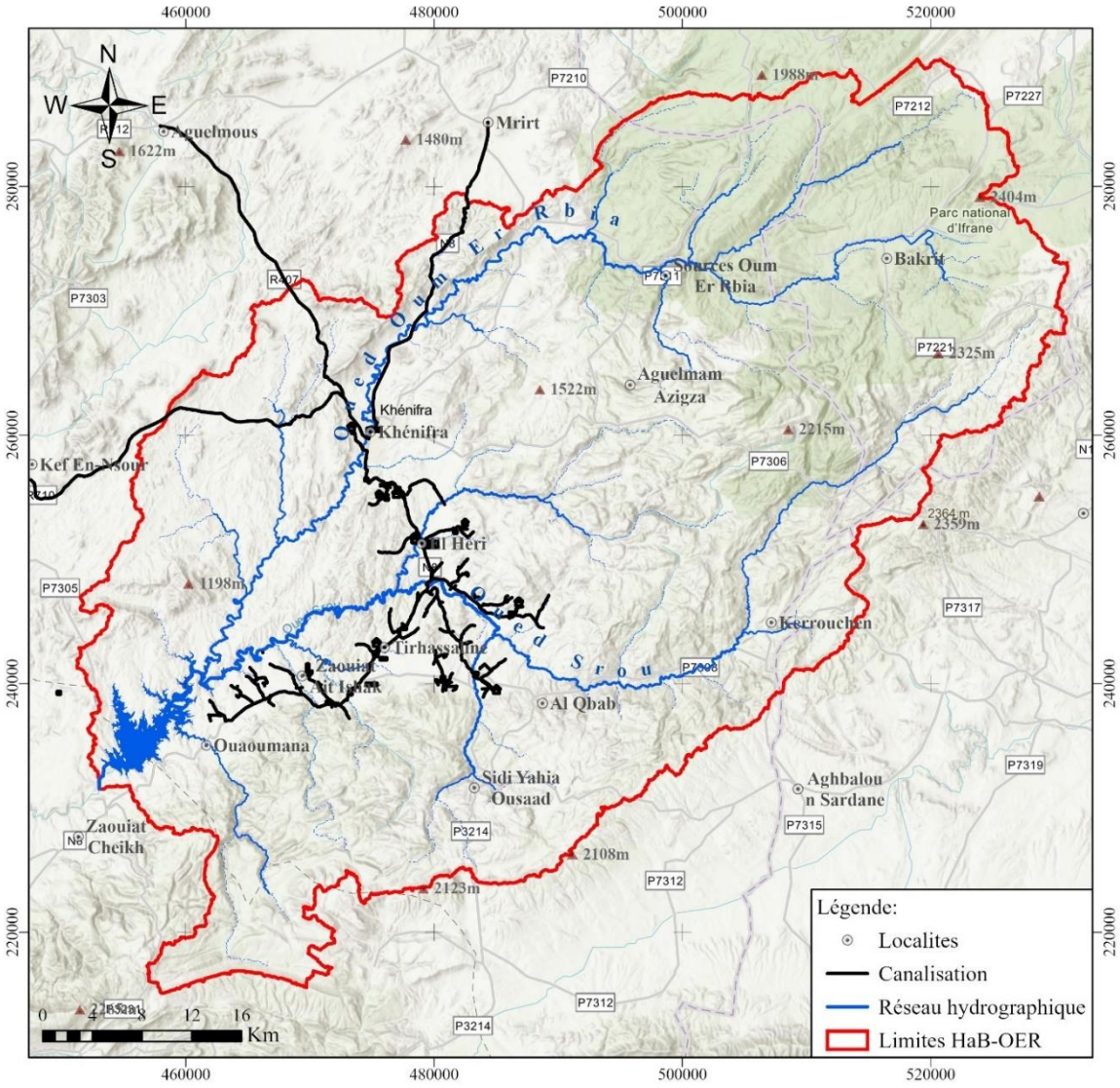
Carte 9.4 Superposition des puits, des bassins d'irrigation et des grands périmètres irrigués dans le HaB-OER

On peut en conclure que ces périmètres exploitent à la fois les eaux douces provenant des sources et les prélèvements d'eaux souterraines pour l'irrigation. L'exploitation excessive des ressources en eau dans cette zone a entraîné plusieurs perturbations, notamment le tarissement des sources et l'assèchement des lacs comme le montre les réponses à notre enquête (Enq. 9.8 dans l'annexe 9.2).

9.6 L'eau : une ressource vitale d'intérêts écotouristique

9.6.1 Approvisionnement en eau potable dans la province de Khénifra

L'Office National de l'Eau Potable (ONEP) de Khénifra joue un rôle essentiel dans la distribution de l'eau potable à l'échelle provinciale (80% du HaB-OER). Son objectif principal est d'assurer un accès à une eau de qualité et potable pour la population. À cet effet, l'ONEP assure la distribution de l'eau potable à travers un réseau de canalisations qui dessert les différentes villes et villages de la province (Carte 9.5) (ONEEP, 2020a).



Carte 9.5 Schéma synoptique adduction Khénifra d'après ONEP

L'ONEP de Khénifra est chargé du traitement des eaux provenant de 10 captages, comprenant 3 forages, 2 puits et 5 sources. Selon la qualité des eaux récupérées, les stations de Khénifra, Mrirt, Ait Ishaq, Tighassaline et Aguelmous traitent environ 8.74 Mm^3 d'eau chaque année, dont la station de Khénifra est responsable de 3/4 de la production totale. Pour répondre à la demande croissante de la population, cette productivité a augmenté de 7.5 Mm^3 en 2013 à 10.6 Mm^3 en 2020 (Fig. 9.12) (ONEEP, 2020b).

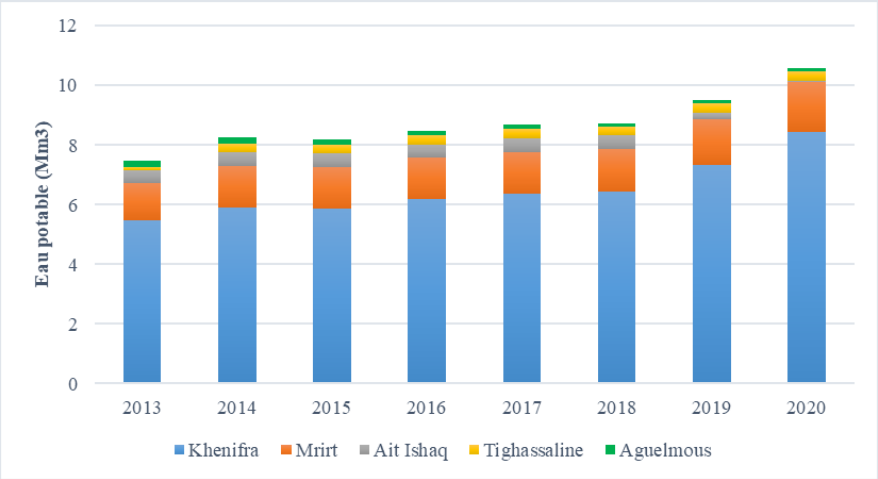


Figure 9.12 Evolution de la production de l'eau potable au niveau de la province de Khénifra d'après l'ONEP

Cette augmentation de 25 % de la production d'eau potable est principalement due à la connexion d'autres communes à ce réseau et à la croissance démographique qu'ont connue plusieurs communes, notamment celle de Khénifra (Chap. 2).

9.6.2 Livraisons d'eau pour l'OCP

Le secteur minier occupe une place importante à l'échelle du grand bassin de l'Oum Er Rbia en termes de ressources minières dont notamment les phosphates qui occupent le premier rang. Le site de Khouribga se distingue comme la principale zone de production des phosphates au sein du groupe OCP (ABHOER, 2018c). Pour répondre aux besoins industriels de ses sites miniers, l'OCP a initié un programme d'approvisionnement en eau de surface en provenance des barrages. Le projet "Maroc central" implique le transport de 45 millions de m^3 d'eau de surface depuis le barrage Ait Messaoud, l'un des deux barrages du complexe Dchar El Oued-Aït Messaoud (Chap.8), via une conduite d'eau qui traverse la proximité de la ville de Fquih Ben Salah vers Khouribga (OCP, 2013).

Depuis 2013, le barrage Aït Messaoud fournit en moyenne 36 hm^3 d'eau au site de Khouribga (Fig. 9.13), ce qui équivaut à environ 5 % de la capacité initiale du b'AEH. En 2019, ce volume a atteint son maximum, représentant environ 10 % de la capacité totale de retenue. Avec la diminution du niveau de retenue du b'AEH, la contribution dédiée à l'OCP devient de plus en plus significative, atteignant 25 % pour l'année 2021.

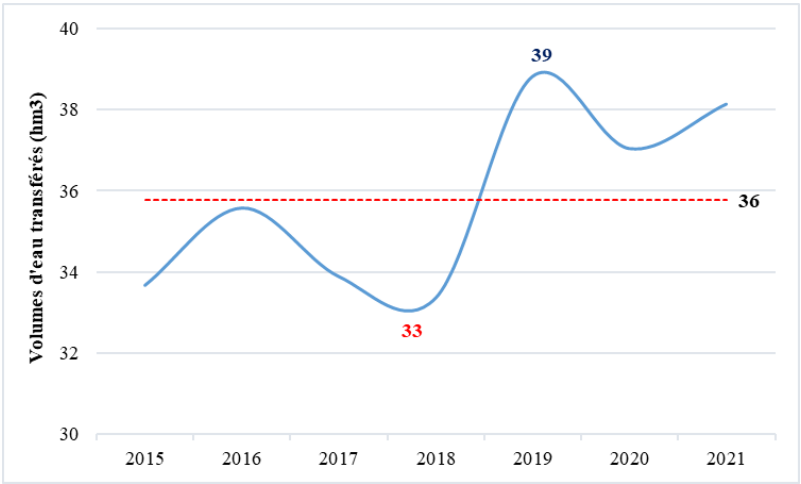


Figure 9.13 Volumes d'eau transférés pour l'OCP d'après barrage Aït Messaoud

9.6.3 Le HaB-OER : un trésor hydrique en terre de tourisme

9.6.3.1 Les ressources en eau du HaB-OER : un atout pour un écotourisme durable

Le secteur touristique joue un rôle crucial dans la croissance économique nationale. En 2019, le Maroc a accueilli 12,9 millions de touristes, contribuant ainsi à hauteur de 7% du PIB (CESE, 2020). A l'échelle de HaB-OER, trois types de tourisme co-existent : le tourisme de montagne, le tourisme écologique ou "tourisme vert" et le tourisme rural. Ils jouent un rôle important dans la protection de l'environnement et génèrent des retombées équitables pour les populations locales, améliorant ainsi leur bien-être (CRI, 2017). En s'intégrant dans l'écosystème et en maintenant le délicat équilibre écologique, le tourisme peut contribuer au développement durable de la région (Er-Rami & Touhami, 2022).

Le HaB-OER possède un riche potentiel touristique, principalement constitué de ressources naturelles, notamment hydriques. Afin de les protéger et de préserver leur biodiversité, la plupart de ces sites sont classés comme des sites d'intérêt biologique et écologique "SIBE" (Alaoui, 2015). La région est abondante en zones humides, comprenant des lacs naturels et des sources situées dans des régions montagneuses, entourés de superbes forêts de chêne vert et de cèdre (Chap. 6). Ces environnements offrent des espaces idéaux pour pratiquer divers sports et loisirs en plein air, dans un cadre naturel magnifique et unique, attirant ainsi de plus en plus les amateurs de nature et de randonnée.

Les fameuses sources de l'Oum Er Rbia possèdent des atouts touristiques importants, leur conférant une place distinguée à l'échelle nationale (El Orfi *et al*., 2021b). Site d'une grande valeur écologique, ces sources offrent un paysage naturel exceptionnel, avec cascade, des sources et des cours d'eau (Es-sdiqui & Sabri, 2022). En ce qui concerne les lacs, la zone dispose de plusieurs destinations d'intérêt écotouristique, dont les plus importants sont classés comme "SIBE" : lac Ouiouane, lac Azigza, lac N'Miaami et lac Abakhane (Chillasse & Dakki, 2004). Les Lacs Tiglmamine est désormais un lieu d'attraction pour les amateurs de plein air et les passionnés de nature, tandis que plusieurs autres petits lacs, tels que le lac d'Aguelmam Ihabchan, le lac Tiglmant n'Issa, et le Lac Harcha, (Ph. 1,2,3 et4) … méritent d'être valorisés.



Photo 9-1 Lac Aguelmam Ihabchan (El Orfi, 2022)



Photo 9-2 Lac Tiglmant n'Issa (El Orfi, 2022)



Photo 9-3 Lac Aguelmame N'Miaami (El Orfi, 2022)

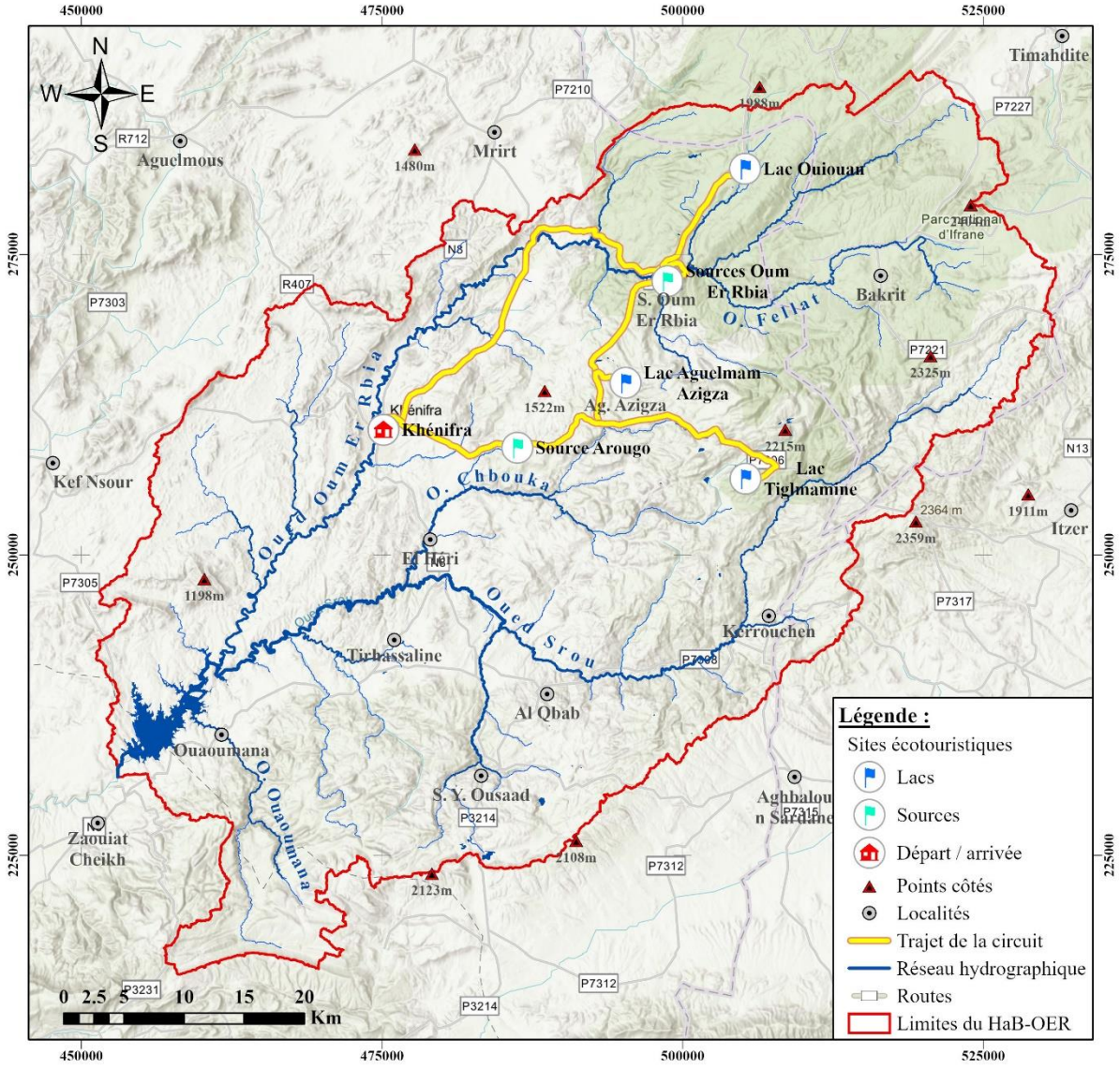


Photo 9-4 Lac Harcha (El Orfi, 2022)

9.6.3.2 Valorisation des ressources en eau à intérêt écotouristique

Une stratégie convenable d'écotourisme peut contribuer à un développement économique bénéfique pour les acteurs du tourisme et les populations locales, en particulier les plus défavorisées (Er-Rami & Touhami, 2022). Conscientes de l'importance de préserver la durabilité des sources et des lacs dans la zone, les autorités locales ont entrepris plusieurs projets visant à les structurer et à les aménager en leur fournissant des parkings, des toilettes, des espaces piétons,... Ces aménagements sont susceptibles d'améliorer considérablement l'expérience de visite pour les touristes.

Dans le but de diversifier les offres touristiques dans la province de Khénifra, Es-sdiqui & Sabri, (2022) ont proposé plusieurs circuits touristiques pour favoriser le développement de cette région. L'un de ces circuits, nommé "Circuit Bleu", met l'accent sur les lacs, les sources et les barrages. Il s'agit d'une boucle autour des sites les plus attractifs, principalement constitués des lacs les plus importants, labélisés comme "SIBE". Le circuit s'étend sur 146 km, débutant à Khénifra pour rejoindre le lac Ouiouan (49 km), puis les sources de l'Oum Er Rbia (16 km), suivi du lac d'Aguelmam Azigza (13 km), les lacs Tiglmamine (26 km), la source d'Arougou (28 km), et enfin, le retour à Khénifra (14 km) (Carte 9.6).



Carte 9.6 Trajet du "Circuit bleu"

9.7 Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques et à l'action de l'homme

9.7.1 Impact des changement climatiques sur les RE : cas des cascades

Les changements climatiques entraînent des répercussions significatives sur les ressources en eau à l'échelle mondiale, y compris dans notre zone d'étude. L'intensification des sécheresses et l'augmentation des températures ont entraîné une forte réduction des débits des cours d'eau (Chap. 5) et des niveaux des lacs (Chap. 6), conduisant même à l'assèchement de certaines sources, comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.8). Cette diminution de l'approvisionnement en eau peut entraîner des conséquences néfastes sur l'agriculture, le tourisme et les besoins en eau potable des populations locales.

Deux cours d'eau aux cascades emblématiques en particulier ont été significativement affectées par ces perturbations climatiques : la cascade des sources de l'Oum Er Rbia (Ph. 9.5 et 9.6) et les cascades de Takhyart dans la région de Bakrit (Ph. 9.7 et 9.8). La baisse de leurs débits a entraîné leur assèchement, ce qui a réduit leur attractivité. En conséquence, ces conditions naturelles de plus en plus difficiles entravent le développement du secteur touristique dans la région.

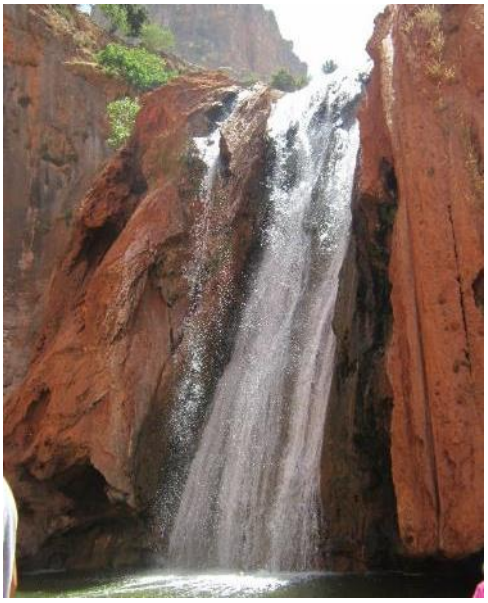


Photo 9-5 Cascade des sources de l'Oum Er Rbia, (El Orfi, 08/2012)



Photo 9-6 Cascade des sources de l'Oum Er Rbia, (El Orfi, 08/2023)



Photo 9-7 Cascade de Takhyart (Ismoun N'aari, 03/2018)

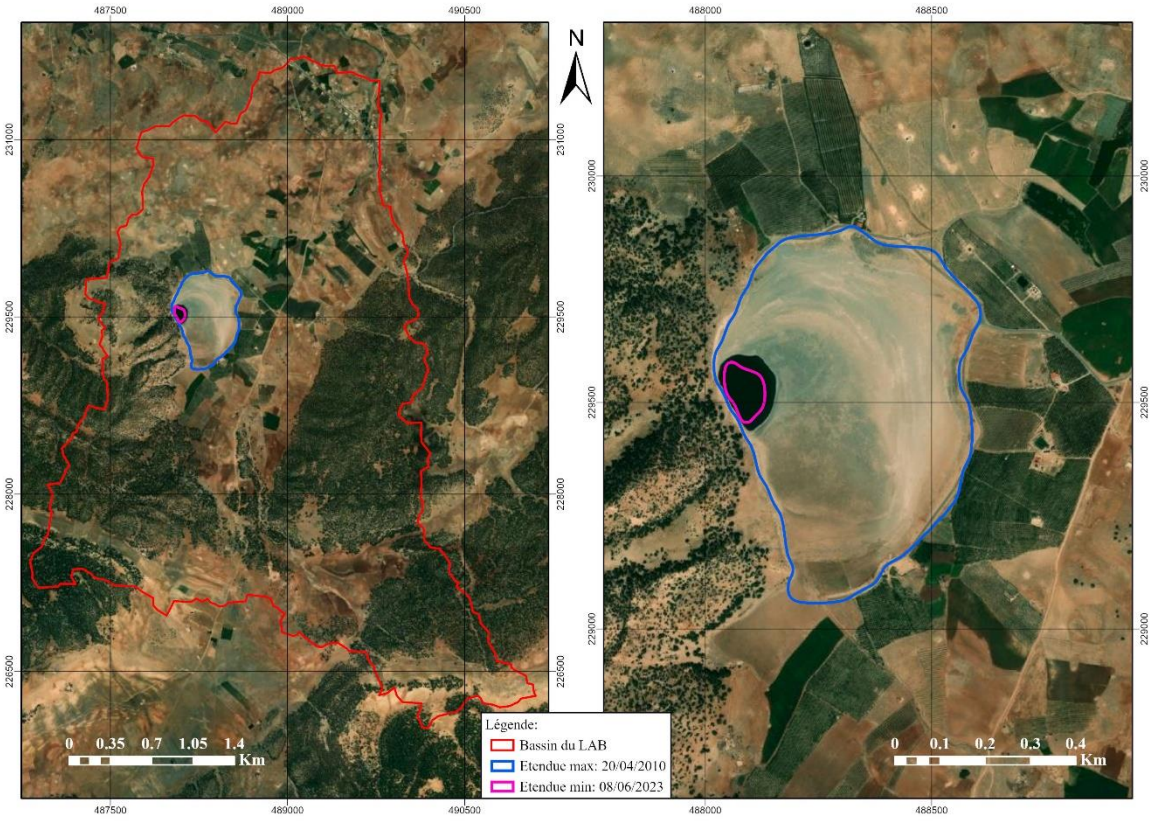


Photo 9-8 Cascade de Takhyart (El Orfi, 02/2022)

9.7.2 Impact des activité anthropiques sur les ressources en eau : cas du lac d'Aguelmam Abakhan

9.7.2.1 La pérennité du LAB est en danger !

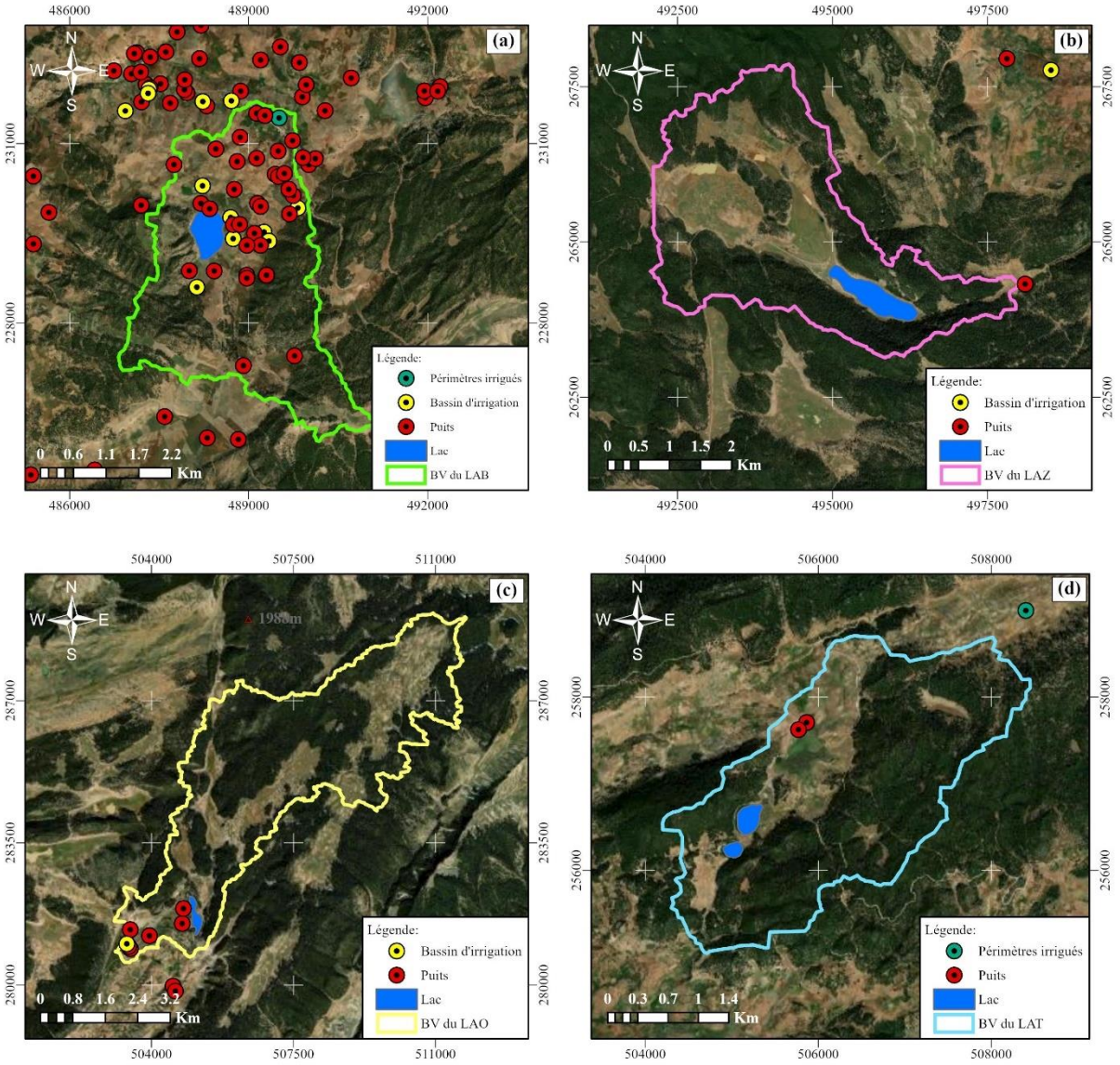
Dans le chapitre 5, nous avons souligné l'utilité des images de télédétection pour le suivi spatio-temporel des niveaux des lacs les plus importants du HaB-OER. L'analyse des superficies montre que le LAB a connu des changements significatifs entre 1984/85 et 2022/23, atteignant un maximum de 34 ha en 2010 et un niveau très bas d'environ 1 ha en 2022 (Carte 9.7). En tant que "SIBE" de priorité 3, ce lac nécessite une intervention immédiate pour sa préservation.
L'étude de l'influence pluviométrique sur l'évolution de la superficie du LAB montre une bonne corrélation avec l'évolution de l'écart à la moyenne des précipitations annuelles. Cependant, après 2018 on observe une chute brutale de la superficie, ce qui a suscité notre intérêt pour approfondir la question au-delà de l'influence des conditions climatiques. Il semble que d'autres facteurs soient à l'origine de la tendance vers l'assèchement du lac.



Carte 9.7 Superficie maximale et minimale du LAB entre 1984/85 et 2022/23

9.7.2.2 Le LAB et les activités agricoles

Les terres environnant le LAB sont principalement consacrées à l'agriculture, bénéficiant de techniques d'irrigation modernes qui utilisent l'exhaure d'eau des nappes souterraines via des puits de différentes profondeurs. A la différence des autres lacs étudiés, le bassin versant du LAB compte plus de 30 puits, dont 9 atteignent plus de 100 m de profondeur. De plus, 7 bassines d'irrigation équipées du système goutte-à-goutte sont présentes ; ces systèmes utilisent différentes sources d'énergie dont notamment l'énergie solaire. Au nord du bassin du LAB se trouve le périmètre irrigué de Timdghas n'Ait Lahsan, l'un des périmètres de Sidi Yahia Ou Saâd (Carte 9.8).



Carte 9.8 Localisation des puits, des bassins d'irrigation et des périmètres irrigués à l'échelle de : a) LAB, b) LAZ, c) LAO et d) LAT

Ces conditions ont favorisé l'émergence de nouvelles cultures modernes qui ont progressivement remplacé les cultures traditionnelles, principalement basées sur les céréales, comme le montre les réponses à notre enquête (Annexe 9.2, Enq. 9.14). Les cultures modernes pratiquées autour du LAB se concentrent principalement sur des cultures d'été, telles que les pommiers, les pruniers et plus récemment, la culture de pommes de terre (Ph. 9.9 et 9.10).



Photo 9-9 Pourtour du lac pendant l'hiver avec des terrains nus (El Orfi, 12/2021)

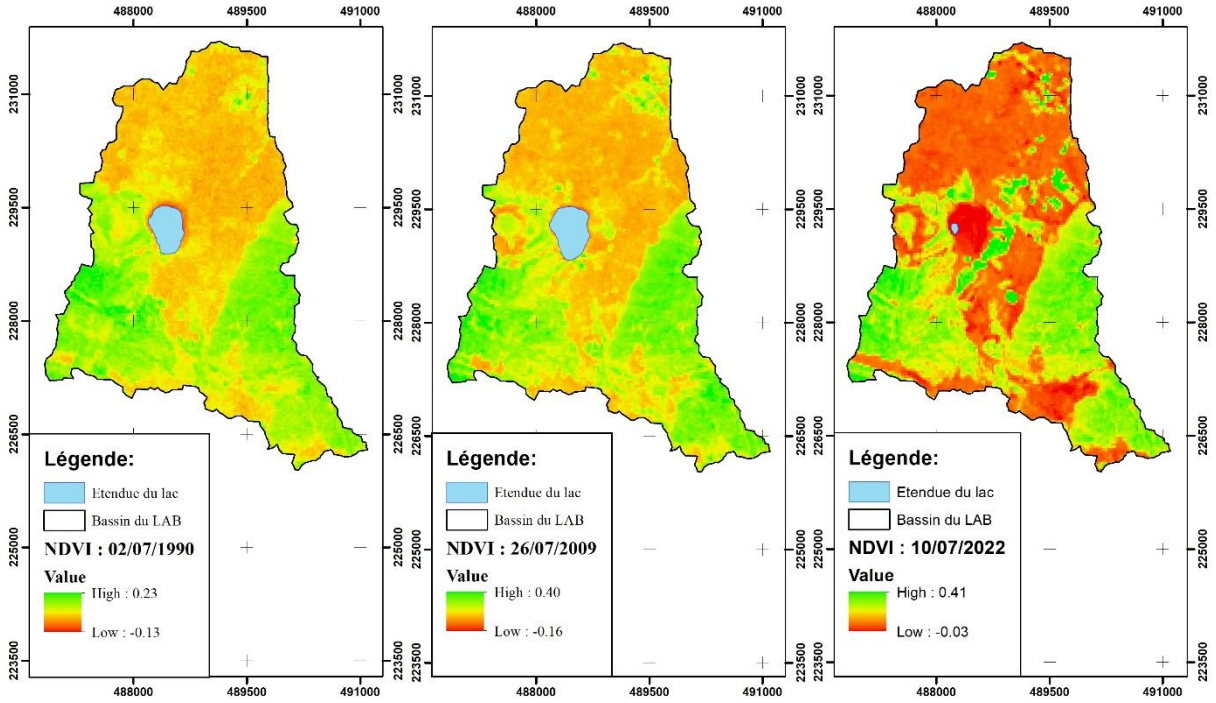


Photo 9-10 Même zone pendant l'été des cultures de pommes de terre (El Orfi, 08/2022)

Ces cultures ont un fort besoin en eau pour leur développement optimal. Au-delà du changement de types de cultures, on remarque qu'il y a eu une volonté d'étendre et de densifier le périmètre cultivé. Cette situation met en péril la stabilité écologique du lac et menace la biodiversité environnante.

9.7.2.3 Évolution de l'agriculture et son impact sur le LAB

La cartographie de l'indice NDVI et l'analyse des types d'occupation du sol sur le terrain nous ont permis de réaliser une étude diachronique du couvert végétal en juillet pour 3 années : 1990, 2010 et 2022. Au cours de l'ensemble de cette période, on a observé une augmentation des valeurs de l'indice NDVI dans la zone d'étude. En 1990, la valeur maximale du NDVI était de 0,23, tandis qu'en 2022, elle a dépassé 0,4. Cette augmentation est due au changement d'utilisation des terres autour du LAB. En particulier, on a remarqué une augmentation des zones classées en vert, représentant les valeurs les plus élevées du NDVI, ce qui indique une expansion des surfaces cultivées vers l'est et le NE du LAB entre 1990 et 2022 (Carte 9.9). La superficie des parcelles extraites en juillet est passée de 8 ha en 2009 à plus de 35 ha en 2022.



Carte 9.9 Evolution du couvert végétal entre 1990 et 2022 dans le BV du LAB

Afin d'étudier plus finement ce qu'il s'est passé en termes de changement d'occupation du sol sur la période récente nous avons mobilisé les ressources de la plate-forme GEE.

Son utilisation nous a permis d'extraire l'évolution du NDVI pour trois points caractéristiques du bassin du LAB : le pourtour immédiat en eau du lac, une zone cultivée par les pommiers et une zone de terre en "bour" ou de parcours. L'évolution du NDVI pendant la période de diminution de la superficie du LAB, soit entre 2015 et 2022, montre un changement de "saisonnalité" entre les deux cultures. Avant 2020, les pics ont été synchrones alors qu'après on observe un déplacement des valeurs maximales de NDVI de la zone des pommiers vers le mois d'Août. On peut interpréter cela comme un changement dans les modalités de production où l'on passerait d'un mode de culture traditionnel basée sur les pluies à un mode de cultures basé sur l'exploitation d'eau souterraine. Le corollaire à ce changement est un assèchement du lac comme l'illustrent les valeurs de NDVI proche de 0 caractéristiques de terre nue (Fig. 9.14).

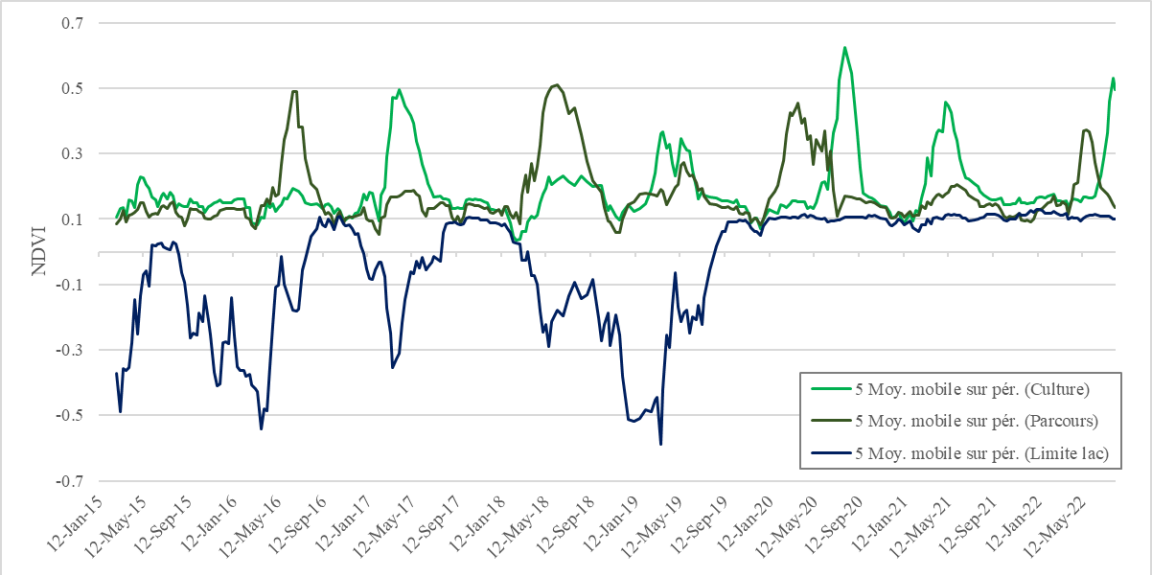


Figure 9.14 Evolution de l'indice NDVI pour trois points entre 2015 et 2022

Après avoir comparé l'évolution des superficies des lacs étudiés, l'évolution des précipitations et les données issues des images de télédétection, nous sommes convaincus que la situation critique du LAB est principalement due à l'intensification des activités agricoles autour du lac. Cette situation pose la question de la durabilité de cette pratique agricole et son impact sur les ressources en eau. Il est donc crucial de trouver un équilibre entre les besoins en eau de l'agriculture et la préservation des ressources hydriques afin de garantir la pérennité de l'écosystème lacustre.

9.8 Conclusion

On a adopté une méthodologie multidisciplinaire visant à mieux comprendre la relation entre l'homme et l'espace. Cette approche intègre une enquête de terrain et les données satellitaires. L'enquête a fourni des informations précieuses sur les pratiques agricoles, l'utilisation et la gestion de l'eau dans la vie quotidienne des populations du HaB-OER. Ces données ont mis en évidence l'importance vitale de l'eau pour ces communautés et ont également révélé le potentiel touristique des ressources en eau. Parallèlement, la télédétection a joué un rôle crucial dans le suivi de ces ressources, notamment les lacs, ainsi que les changements d'utilisation des terres. Grâce à cette approche intégrée, on a pu suivre les variations du couvert végétal, dues aux reconversions agricoles, tout en les mettant en relation avec les ressources en eau.

Malgré sa richesse en eau, le HaB-OER est confronté à des défis majeurs, notamment les changements climatiques et les pressions anthropiques. Les sécheresses fréquentes ont entraîné une forte réduction des débits des cours d'eau, des niveaux des lacs et même l'assèchement de certaines sources, perturbant ainsi son équilibre hydrique. Ces événements compromettent la disponibilité et la stabilité des ressources en eau de la région. Une autre contrainte menaçant ces hydrosystèmes est l'intensification des activités agricoles. Les profonds changements survenus aux alentours du lac d'Aguelmam Abakhan ont entraîné une diminution de son niveau, mettant en péril sa pérennité et son potentiel hydrique.

Il est crucial de trouver un équilibre entre les besoins en eau de l'agriculture et la préservation des ressources hydriques pour assurer la durabilité de cet écosystème fragile. Cette approche multidisciplinaire, combinant enquête de terrain et données satellitaires, nous a permis d'obtenir une vision globale et complète des interactions complexes entre l'homme, l'eau et

l'environnement dans le HaB-OER. Cette étude souligne l'importance vitale des ressources en eau pour les populations locales ainsi que leur potentiel touristique. Cependant, leur vulnérabilité face aux changements climatiques et aux activités humaines appelle à une gestion responsable et durable de ces ressources précieuses pour garantir leur préservation à long terme.

En impliquant tous les acteurs concernés, en promouvant la sensibilisation et l'éducation environnementale, et en adoptant des pratiques durables, nous pourrons préserver les richesses hydriques du HaB-OER et permettre aux générations futures de bénéficier de ces précieuses ressources naturelles.

Chapitre 10 : GIRE : une alliance entre plans participatifs et sensibilisation proactive

10.1 Introduction

Le concept de développement durable a été défini par Brundtland en 1987 comme un modèle de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins. En 2015, les Nations Unies ont adopté le Programme de développement durable "2015 - 2030", un nouveau cadre mondial comprenant 17 Objectifs de Développement Durable "ODD" (ONU, 2015). Si le développement durable vise à équilibrer les trois volets économique, social et environnemental, l'eau, en tant que source de vie pour l'homme, est une composante essentielle de l'environnement, et sa gouvernance joue un rôle déterminant dans l'atteinte des ODD (Barmaki & Aitcheik, 2015).

Dans le contexte du développement économique et social, de nombreux pays sont confrontés à des défis croissants liés à l'eau (GWP, 2000). Conscientes de cette situation, les Nations Unies ont adopté des approches de Gestion Intégrée des Ressources en Eau "GIRE" lors du sommet de la Terre en 1992 (ONU-Environnement, 2018). Depuis lors, la GIRE est devenue un pilier essentiel du développement durable et a été intégrée dans l'Agenda 2030 sous l'ODD 6. Cet objectif vise à garantir l'accès universel à l'eau potable et à l'assainissement, ainsi qu'à promouvoir une gestion durable des ressources en eau, des eaux usées et des écosystèmes (ONU, 2020).

Le HaB-OER, fournisseur d'eau par excellence, abrite un ensemble impressionnant de lacs, de sources et de cours d'eau, qui sont parmi les plus importants à l'échelle nationale. Cette richesse en ressources en eau joue un rôle fondamental dans le développement socioéconomique de la région. Cependant, le HaB-OER est confronté à divers défis dont certains sont d'ordre anthropique. En relation avec les questions abordées dans la partie VI du questionnaire sur la gestion des ressources en eau (Annexe 9.1), de nombreux répondants ont souligné que l'attitude égocentrique de certains utilisateurs envers cette ressource, sans prendre en compte les besoins des autres, contribue à l'aggravation de la situation hydrique. Alors que certains facteurs naturels peuvent être difficiles à surmonter, il est possible de travailler sur les aspects humains de cette problématique en vue de favoriser des changements positifs.

Dans un monde confronté aux défis des changements climatiques, de la pauvreté et des conflits, la concrétisation des ODD nécessite une sensibilisation accrue aux enjeux environnementaux. Afin de relever ce défi, il est essentiel de mettre l'accent sur l'éducation et la sensibilisation. L'Education au Développement Durable "EDD" est devenue une notion courante et vise à former des écocitoyens en développant simultanément les savoirs, savoir-faire, valeurs et attitudes (Diab *et al*., 2014). Par ailleurs, l'éducation joue un rôle central dans la sensibilisation des populations à la préservation de l'environnement (Jaoul-Grammare & Stenger, 2022), y compris des ressources en eau. En combinant l'éducation et la sensibilisation, on peut créer une synergie puissante pour préserver cette ressource vitale.

10.2 Lois de l'eau et plan stratégique : vers une GIRE au Maroc

10.2.1 Évolution institutionnelle et juridique de la gestion de l'eau au Maroc

10.2.1.1 Vers la législation de l'eau au Maroc

Au Maroc, l'histoire de la civilisation et de la culture de l'eau a été marquée par une évolution progressive, enrichissant et diversifiant cette dimension au fil du temps. Selon CESE (2014), les Romains ont apporté leur contribution en introduisant d'importantes infrastructures d'adduction d'eau pour les villes. Au IXe siècle, les Idrissides ont joué un rôle majeur en fondant la ville de

Fès et en l'équipant de réseaux de conduites d'eau. Les Almoravides, au XIe siècle, ont étendu l'ingénierie hydraulique en introduisant les Khettaras dans les régions du Haouz, du Tafilalt et du Souss. Par la suite, la dynastie des Alaouites a développé cet héritage technique et social, en créant de petits périmètres destinés à intensifier la production agricole et industrielle.

En conséquence, le Maroc a pu capitaliser des savoir et des techniques de mobilisation et de gestion des ressources en eau (CESE, 2014). Les populations ont ainsi développé des systèmes créatifs sous forme d'ensembles de règles coutumières propres aux communautés locales ; Connues sous le nom d'"Orf" celles-ci demeurent en vigueur de nos jours (Ed-Dahmouny *et al*., 2019).

A leur arrivée au Maroc, les autorités du protectorat ont découvert un état de fait : des usages de l'eau variables, complexes, dépourvus de législation écrite, et résultant presque toujours de droits communautaires en rapport étroit avec des relations de force (M.-D. El Jihad, 2001). En effet, dès 1914, les autorités ont promulgué la première loi sur l'eau afin de réglementer l'accès à cette ressource. Du point de vue opérationnel des instances centrales de gestion de l'eau ont été créées dans trois départements ministériels : l'Intérieur, l'Équipement et l'Agriculture (CESE, 2014).

10.2.1.2 Fondements de la politique de l'eau au Maroc

Au lendemain de l'indépendance l'irrigation est devenue une voie privilégiée pour le développement agricole au Maroc, motivée par plusieurs considérations telles que la lutte contre la pauvreté et la limitation de l'exode rural (A. Qadem, 2015). Dans cette optique, le pays a adopté une politique forte dans le secteur de l'eau visant à réduire la vulnérabilité aux aléas climatiques en stockant les eaux des années excédentaires pour faire face au déficit pendant les périodes de sécheresse (HCP, 2006a). Cette approche a conduit à la création de l'Office National des Irrigations (ONI) en 1960, qui a été rapidement dissous en 1965 pour être remplacé par l'Office de Mise en Valeur Agricole (OMVA), qui compte sept offices régionaux : Gharb, Loukkos, Haouz, Doukkala, Tadla, Souss-Massa et Ouarzazate (Ed-Dahmouny *et al*., 2019).

Le discours de Feu Sa Majesté le Roi Hassan II le 18 septembre 1967 à Tanger annonce le lancement de la fameuse politique des barrages dont les bienfaits sont ressentis encore aujourd'hui (Naciry, 2017). Dans ce contexte, le plan quinquennal 1968-1972 a donné la priorité à la construction des barrages et à l'objectif d'irrigation d'un million d'hectares (CESE, 2014). Cette politique a été mise en œuvre dans un cadre juridique et institutionnel régissant le développement et la gestion des ressources en eau ainsi que des infrastructures hydrauliques (Arrifi, 2008). En conséquence, la Direction de l'Hydraulique a été créée en 1967 pour mettre en place ce plan et superviser sa réalisation (CESE, 2014). Ainsi, le Maroc commence à prendre conscience de l'importance de la préservation de l'eau en tant que ressource indispensable à la vie et dont dépend fortement son économie (Naciry, 2017).

Les bienfaits de cette politique représentent sans doute l'une des grandes réussites du pays dans le domaine de l'eau et de l'agriculture (Ed-Dahmouny *et al*., 2019). Cependant, la sécheresse qui a frappé le Maroc en 1980 fait apparaître les limites de la politique des grands barrages et suscite l'annonce de la création du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat "CSEC" en 1981 (Tanouti, 2017). Cette création du conseil a marqué le premier pas vers la mise en place d'une politique de gestion intégrée et décentralisée de l'eau au Maroc (Ed-Dahmouny *et al*., 2019), car il était temps d'agir pour relever les défis de taille. C'est ainsi qu'en 1995, la loi n° 10-95 sur l'eau a été promulguée (Arrifi, 2008).

10.2.1.3 La loi n ° 10-95 : adoption de la première loi sur l'eau en 1995

Après la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement "CNUED" de 1992 à Rio de Janeiro, le Maroc s'est engagé dans la voie du développement durable, avec un accent particulier sur la préservation de l'eau (Ed-Dahmouny *et al*., 2019). Cependant, la réglementation de l'eau au Maroc était obsolète, ancienne et morcelée, avec des dispositions dispersées dans différents codes (1914, 1919, 1925, 1952 et 1969), ce qui rendait son application complexe (M.-D. El Jihad, 2001). Cette réglementation n'était pas adaptée pour atteindre les objectifs de développement durable. C'est pourquoi l'idée d'une nouvelle loi a été envisagée pour répondre de manière plus adéquate à ces objectifs.

La loi n° 10-95 portant sur l'eau marque une étape fondamentale dans la prise de conscience du Maroc quant à l'importance de légiférer dans ce domaine afin de renouveler la législation en vigueur (Naciry, 2017). Cette loi, composée de 13 chapitres et 123 articles, a été promulguée pour établir des règles concernant la planification et la gestion intégrée de l'eau, la lutte contre la pollution et la surexploitation des ressources en eau, … Elle vise en outre la valorisation des ressources en eau et la rentabilisation des investissements y afférents tout en prenant en considération les intérêts économiques et sociaux des populations par la sauvegarde des droits d'eau acquis.

La réforme institutionnelle par la loi n° 10-95 vise une gestion intégrée, concertée, participative et décentralisée des ressources en eau à travers (DGH, 2015) :

- ✓ l'institutionnalisation du CSEC, dont la principale mission est l'orientation de la politique nationale de l'eau ;
- ✓ la création de neuf ABH, auxquelles ont été conférées d'importantes attributions en matière de gestion et de protection des ressources en eau ;
- ✓ la création des commissions de l'eau au niveau provincial et préfectoral, chargées de l'encouragement des actions d'économie d'eau et de la sensibilisation à la protection des ressources en eau.

A cette configuration s'ajoute la Commission Interministérielle de l'Eau (CIE), instituée suite aux recommandations à la 9ème session du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat en 2001 (Arrifi, 2008). La CIE s'engage à assurer la coordination et le suivi des recommandations du Conseil (Ed-Dahmouny *et al*., 2019).

Il est indéniable que la loi n° 10-95 sur l'eau a entraîné d'importantes avancées dans la réforme du secteur, en favorisant une gestion intégrée et décentralisée des ressources en eau et en mettant davantage l'accent sur la gestion de la demande (Ed-Dahmouny *et al*., 2019). Efficience économique, Équité sociale et durabilité Environnementale représentent les trois principaux "piliers", appelés les 3 "E" de la "GIRE" (Fig. 10.1) (Molle, 2012). Cependant, malgré plusieurs années de mise en œuvre certaines contraintes importantes subsistent et entravent la réalisation des objectifs d'une véritable GIRE (Arrifi, 2008).

Le diagnostic établi par l'autorité gouvernementale chargée de l'Eau a démontré que la loi sur l'eau n° 10-95 n'est plus adaptée aux mutations qu'a connues le secteur de l'eau suite à l'évolution récente du contexte socioéconomique du Maroc. Selon la DGH (2015) les principales limites de la loi n° 10-95 sur l'eau sont liées à :

- ✓ l'absence de règles juridiques concernant le dessalement des eaux de mer, la réutilisation des eaux usées et la valorisation des eaux pluviales ;
- ✓ la carence de dispositions relatives à la protection contre les inondations ;
- ✓ la complexité des procédures de délimitation et d'utilisation du domaine public hydraulique ;

- ✓ l'absence de définitions pour certaines expressions, donnant lieu à des interprétations variées ;
- ✓ aux difficultés rencontrées par les conseils d'administration dans la gestion et le contrôle des ABH en raison de la composition et du nombre élevé de leurs membres.

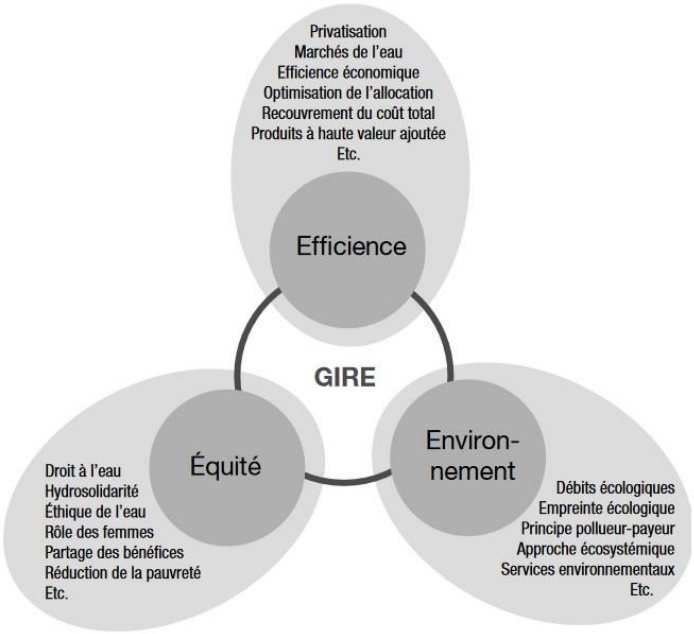


Figure 10.1 Les trois "E" de la GIRE (Molle, 2012)

10.2.1.4 La loi n ° 36-15 : une rénovation de l'arsenal juridique et institutionnel

Des efforts ont été déployés sur les plans juridiques et réglementaires pour répondre aux enjeux du secteur de l'eau, notamment avec la refonte de la loi n° 10-95 et l'adoption de la nouvelle loi n° 36-15 relative à l'eau (MEMDD, 2017). Cette nouvelle loi, composée de 163 articles répartis en 12 chapitres, fixe les règles d'une gestion intégrée, décentralisée et participative des ressources en eau pour garantir le droit des citoyennes et des citoyens à l'accès à l'eau et en vue d'une utilisation rationnelle et durable et une meilleure valorisation quantitative et qualitative de l'eau, des milieux aquatiques et du domaine public hydraulique (Loi n° 10-95, 1995).

Elle introduit également une innovation majeure en créant des "Conseils Consultatifs" pour chaque bassin hydraulique, permettant ainsi de proposer des modes de gestion adaptés et de mettre en œuvre des plans d'action intégrés (Naciry, 2017). La loi vise à établir les règles et les instruments nécessaires pour planifier l'utilisation de l'eau, y compris les eaux usées, les eaux de mer et autres sources, dans le but d'accroître le potentiel hydrique national tout en tenant compte des changements climatiques et en s'y adaptant. Elle comprend également des dispositions visant à prévenir les risques liés à l'eau, assurant ainsi la protection et la sécurité des individus, des biens et de l'environnement (Loi n° 36-15, 2016).

10.2.2 Planification visionnaire pour une utilisation responsable de l'eau au Maroc

10.2.2.1 La Stratégie Nationale de l'Eau "SNE"

En 1996, le Maroc s'est doté d'un plan national d'aménagement des bassins versants avec la création des neuf ABH, dont la première est l'ABHOER en 1998 (Ed-Dahmouny *et al*., 2019). L'un des produits majeurs de ce cadre institutionnel en matière de planification des ressources en eau réside dans les Plans Directeurs d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau "PDAIRE" (Arrifi, 2008). Selon l'article 19 de la loi n° 10-95, les résultats et les conclusions de ces PDAIRE servent à établir un plan "stratégie" national de l'eau.

En 2009, une nouvelle impulsion a été donnée au secteur de l'eau dans le but de renforcer sa politique, et cela s'est concrétisé par l'élaboration de la Stratégie Nationale de l'Eau "SNE" (IRES, 2014). Cette stratégie intègre la composante du changement climatique dans sa mise en œuvre, visant à renforcer la préservation des ressources disponibles (nappes, zones humides, oasis…), tout en luttant contre les causes de pollution des eaux (Naciry, 2017). Les principaux plans d'action de la SNE sont regroupés en 6 axes (SNE, 2009):

- ✓ la gestion de la demande en eau et sa valorisation ;
- ✓ la gestion et le développement de l'offre ;
- ✓ la préservation et la protection des ressources en eau, du milieu naturel et des zones fragiles;
- ✓ la réduction de la vulnérabilité aux risques naturels liés à l'eau et l'adaptation aux changements climatiques ;
- ✓ la poursuite des réformes règlementaires et institutionnelles ;
- ✓ la modernisation des systèmes d'information et renforcement des moyens et des compétences.

10.2.2.2 Le Plan Maroc Vert "PMV"

Le contexte mondial, marqué par les défis de la sécurité alimentaire, le changement climatique et la hausse des prix des produits agricoles,… a contraint le Maroc à revoir sa stratégie agricole (IRES, 2014). Compte tenu de l'importance de l'agriculture dans le tissu économique du pays, le Maroc a initié en 2008 une nouvelle stratégie appelée : Plan Maroc Vert "PMV" (A. Qadem, 2015). Ce plan repose sur deux piliers : l'un cible l'agriculture moderne à haute valeur ajoutée, et l'autre vise à améliorer la productivité des petites exploitations (IRES, 2020). Cette stratégie ambitieuse, porteuse de défis majeurs, a pour objectif de mettre en valeur le potentiel agricole, transformant ainsi l'agriculture en un moteur de développement économique et social moderne, compétitif et inclusif (DSS, 2020).

Pour déployer cette nouvelle vision, le PMV a entraîné une réforme du cadre institutionnel, avec la mise en œuvre de plusieurs réformes transversales, notamment en améliorant la gestion de l'eau d'irrigation (IRES, 2020). La politique de maîtrise et de gestion de l'eau de ce plan s'est appuyée sur quatre programmes clés : le Programme National d'Économie d'Eau en Irrigation "PNEEI", le Programme d'Extension de l'Irrigation "PEI", le Programme de la Réhabilitation et de Sauvegarde des Périmètres de Petite et Moyenne Hydraulique "PMH" et le Programme de Promotion du Partenariat Public-Privé "PPP". La mise en œuvre de ces programmes jusqu'en 2018 a permis d'économiser et de valoriser annuellement plus de 2 milliards de m^3 d'eau d'irrigation (DSS, 2020).

Pour atténuer les effets de la raréfaction des ressources en eau et améliorer l'efficience de leur utilisation en agriculture, le PNEEI a fixé un objectif de 550000 ha irrigués au goutte-à-goutte en 2020, cet objectif est déjà dépassé, car 560000 ha ont déjà été équipés (IRES, 2020). Le PNEEI favorise une utilisation plus productive de l'eau en introduisant des technologies d'irrigation efficaces, principalement le goutte-à-goutte. Le gouvernement soutient ce processus par le biais du fonds de développement agricole, offrant jusqu'à 100% de subventions pour l'irrigation au goutte-à-goutte et par microaspersion, avec un montant maximum par hectare (Dahan, 2017).

10.2.2.3 Le Plan National de l'Eau "PNE"

L'adoption de la nouvelle loi n° 36-15 a apporté plusieurs réformes concernant l'élaboration et la mise en œuvre du PDAIRE, qui doit être actualisé, ainsi que la stratégie de l'eau. En parallèle, le Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau a élaboré le Plan National de l'Eau "PNE" qui constitue un

prolongement de la SNE de 2009 et vise à consolider les acquis dans le secteur de l'eau, faire face aux défis et accompagner le développement socio-économique du pays (MEMDD, 2017). Ce PNE définit les priorités nationales dans ce domaine, favorise la mobilisation de la ressource et régule son utilisation (Naciry, 2017). Cependant, aucun document officiel n'a été diffusé, bien que l'annonce de la préparation de nouveau PNE ait été faite à nouveau (Tanouti, 2017).

Le Département Chargé de l'Eau a lancé un nouveau PNE pour la période 2020-2050, et il a l'intention de le finaliser (Le Matin, 2022). Le Projet PNE 2020-2050, qui servira de référence pour la politique de l'eau au cours des 30 prochaines années, a été préparé en concertation avec tous les acteurs du secteur de l'eau et présenté à la Commission Interministérielle de l'Eau le 25 décembre 2019. Ce plan met notamment l'accent sur la mobilisation des ressources en eau non conventionnelles, comme le dessalement de l'eau de mer (Amara, 2021).

Sur le plan opérationnel, le Projet PNE 2020-2050 a été intégré au cœur de la planification économique, sociale et d'aménagement du pays (MTEDD, 2020). Il est important de noter que le Programme National pour l'Approvisionnement en Eau Potable et l'Irrigation pour la période 2020-2027 "PNAEPI" constitue la première phase du projet du PNE 2020-2050. Lancé en 2020, le PNAEPI vise à améliorer la sécurité de l'eau en accélérant les investissements dans le secteur et en renforçant la résilience de l'approvisionnement en eau potable et de l'irrigation (BM, 2023).

10.2.2.4 La "Génération Green 2020-2030"

Le PNE a fait l'objet d'une mise en cohérence et de convergence avec celle du secteur agricole documentée dans le PMV (CESE, 2014). Ce dernier a été soumis à une évaluation minutieuse, permettant ainsi d'identifier des axes d'amélioration et les nouveaux défis à relever, dans le but de franchir un nouveau palier dans le développement agricole (MAPMDREF, 2021). Lancée en février 2020, la nouvelle stratégie de développement du secteur agricole "Génération Green 2020-2030", a pour objectif de consolider les réalisations du PMV en adoptant une vision nouvelle du secteur agricole, en établissant une nouvelle gouvernance et en mettant en place des moyens modernes au service de l'agriculture (MAP, 2021).

Cette stratégie représente une nouvelle vision qui prolonge le PMV (Fig. 10.2). La "Génération Green 2020-2030" repose sur deux fondements essentiels : la "Priorité à l'élément humain", en considérant que le développement des personnes est essentiel pour moderniser le secteur, et la "Pérennité du développement agricole", visant à consolider les acquis du PMV et à réaliser des avancées qualitatives et technologiques importantes (DSS, 2020). La nouvelle stratégie a pour ambition de doubler l'efficacité hydrique en mettant en œuvre le volet irrigation du PNAEPI 2020-2027, en poursuivant les programmes d'irrigation et d'aménagement, ainsi qu'en mobilisant les ressources en eau non conventionnelles (MAPMDREF, 2021).

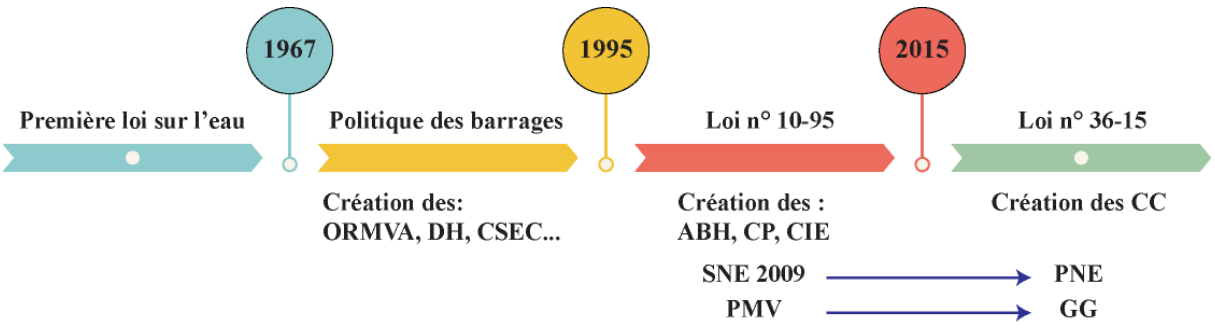


Figure 10.2 Aperçu historique de l'évolution de la politique de l'eau au Maroc

10.2.3 Intérêt et contraintes des contrats de gestion participative au Maroc

10.2.3.1 Contrat de nappe et gestion participative de l'eau souterraine

Pendant les années 1980, lors de la période de sécheresse prolongée au Maroc, les prélèvements d'eaux souterraines étaient la seule solution face au manque d'eau (SNE, 2009). Cette époque a connu des avancées technologiques dans le creusement de forages, facilitant l'accès à l'eau souterraine, notamment pour l'irrigation (Del Vecchio, 2023). Cependant, au cours des années 2000, les acteurs de la gestion de l'eau, tels que le ministère et les ABH, ont constaté une surexploitation des ressources en eaux souterraines (Del Vecchio, 2020). Par conséquent, il devient impératif de protéger et de préserver ces nappes d'eau souterraines, qui sont des réserves stratégiques nationales, pour garantir l'approvisionnement en eau pour les générations futures (IRES, 2014).

La SNE de 2009 vise à assurer une gestion durable des ressources en eau, notamment en renforçant la responsabilité des ABH grâce à l'adoption d'un standard international : le contrat de nappe "CdN" (SNE, 2009; IRES, 2020). Suite à la réforme de 2015, le Maroc a entrepris la mise en place des Contrats de Gestion Participative des nappes "CGP", un processus qui prolonge les projets antérieurs de CdN et qui vise à impliquer les différents usagers et acteurs dans la gestion des nappes (Ouassissou *et al*., 2019). Le CGP, réglementé par les articles 115 et 116 de la loi n° 36-15, établit un plan d'action, des objectifs, une durée, des modalités de financement, ainsi que les droits et les obligations des usagers de l'eau, de l'administration et des partenaires concernés... (ABHOER, 2022).

La politique marocaine de l'eau a évolué d'une approche historiquement "aménagiste" axée sur les aménagements hydrauliques visant à maximiser l'utilisation des ressources disponibles vers un modèle "préservationniste" qui privilégie la gestion intégrée et territorialisée des ressources en eau (Del Vecchio, 2020). Impliquer les usagers locaux dans la gestion de l'eau est essentiel pour mettre en œuvre efficacement cette approche et appliquer les mesures des CGP (ABHOER, 2018a). Cette approche collaborative vise à assurer une utilisation équitable et durable des ressources en eau souterraines.

10.2.3.2 Difficultés de mise en œuvre des contrats

Au Maroc, la politique de gestion des eaux souterraines est désormais basée sur la mise en œuvre de CGP. Pour réussir cette mise en œuvre, il est essentiel que l'ABH soit en mesure de contrôler les usages et prélèvements des usagers (Tanouti, 2017), ce qui nécessite une connaissance approfondie des ressources hydriques et des outils de gestion intégrée prenant en compte la variabilité de l'offre et de la demande en eau, y compris les prélèvements d'eau de surface et d'eau souterraine (Hadri *et al*., 2022b). Cependant, les moyens de contrôle sont limités, surtout dans le secteur agricole, rendant difficile une surveillance exhaustive des nombreux préleveurs souvent informels (Ouassissou *et al*., 2019). Cette situation représente l'un des défis auxquels la police de l'eau est confrontée lorsqu'elle exerce son contrôle sur des bassins parfois étendus et surexploités (Kinana, 2022).

Les CGP représentent une approche particulière de la gestion des eaux souterraines, mettant l'accent sur la participation des usagers et leur engagement direct (Del Vecchio, 2023). Cependant, malgré leur importance, leur mise en œuvre reste un défi. L'application de ces contrats met en évidence certaines contradictions liées à la cohabitation des deux paradigmes, "préservationniste" et "aménagiste", ainsi que l'opposition entre les secteurs de l'Eau et de l'Agriculture, ce dernier montrant une réticence significative envers le nouveau paradigme préservationniste (Del Vecchio, 2023). Cette réticence envers l'établissement d'un cadre de

régulation efficace se manifeste par le faible empressement des agriculteurs à participer à la régularisation des points d'eau et à l'installation de compteurs (AFD, 2012). Par conséquent, ce processus n'a pas abouti en raison des difficultés à concrétiser des actions pour réduire les prélèvements, ce qui contrevient aux intérêts des utilisateurs (Ouassissou *et al*., 2019).

Le modèle de gestion par contractualisation s'inspire des "contrats de milieux" français apparus dans les années 1980 (Tanouti, 2017). Son intégration par les ABH marocains a rencontré certaines contraintes et difficultés, dont Kinana (2022) a cité dans "Finance News" quelques-unes d'ordre juridique. Les déclinaisons territoriales des textes juridiques n'ont pas pleinement résolu les défis observés sur le terrain. L'article 116 de la loi de l'eau exige l'avis du conseil de bassin pour le CGP, mais il ne précise pas la nature juridique de cet avis, qui semble être consultatif. On se demande également si le contrat est juridiquement opposable aux tiers qui ne participent pas à la contractualisation, certains considérant que ces contrats n'ont pas de valeur juridique formelle, mais plutôt un engagement contractuel et financier entre les signataires.

L'eau souterraine est en déclin en raison de la surexploitation par certains agriculteurs individualistes. Près de la moitié des aquifères sont surexploités par seulement 40 à 50 % des agriculteurs, ce qui entraîne des inégalités dans l'utilisation de cette ressource (Kuper *et al*., 2016). Étant donné que la gestion de l'eau est fortement influencée par les structures sociopolitiques locales, ces inégalités peuvent influencer la décision de certains agriculteurs à participer à cette approche de gestion participative. Sans l'adhésion de tous les usagers, un CdN perdrait de sa légitimité (Kinana, 2022).

10.2.3.3 Contrat de gestion participative de l'Oum Er Rbia

Depuis l'adoption de la loi n° 10-95, le CdN du Souss a été l'innovation institutionnelle la plus importante dans le domaine de l'eau (AFD, 2012). Cette expérience a ensuite été étendue à d'autres bassins, comme l'Oum Er Rbia et le Tensift, avant d'être envisagée pour tous les bassins du pays (Tanouti, 2017). Face à la surexploitation importante de la quasi-totalité des nappes du bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia, des actions ont été identifiées pour rechercher l'équilibre de cette ressource et la préserver, notamment par l'étude des contrats de nappes de Tadla (ABHOER, 2018d).

Le contrat cadre pour la sauvegarde du complexe aquifère de Tadla, prévu de 2017 à 2030, vise à assurer une gestion participative et durable des ressources en eau souterraines et à instaurer une gouvernance régionale de l'eau. Son principal objectif est de mettre en place un plan d'actions visant à améliorer la gestion de la demande en eau, à mobiliser les eaux de surface, à mieux connaître le complexe aquifère du Tadla et à développer la communication et la sensibilisation des parties prenantes (ABHOER, 2022).

Les parties impliquées dans ce contrat s'engagent à mettre en œuvre un plan d'action comprenant 17 actions organisées en 9 axes d'intervention, en accord avec les objectifs du contrat cadre (ABHOER, 2022):

- ✓ Préserver les eaux souterraines de la nappe du Tadla pour en faire une réserve stratégique pour le développement économique et social tant local que régional ;
- ✓ Maitriser la demande en eau principalement dans le secteur agricole sans pour autant entraver le développement et la consolidation des acquis de ce secteur clé de l'économie ;
- ✓ Donner la priorité à la mobilisation et l'usage des ressources en eau superficielles de manière à réduire la pression sur les ressources en eau souterraines ;
- ✓ Préserver la qualité des ressources en eau en vue de sécuriser l'alimentation en eau potable pour la population ;

- ✓ Sauvegarder les équilibres hydrogéologiques et écologiques existants ;
- ✓ Renforcer la concertation et le dialogue entre les intervenants et mobiliser les moyens nécessaires pour garantir un développement durable au niveau régional.

10.3 L'éducation et la sensibilisation à l'eau : piliers de la réussite des plans stratégiques

10.3.1 L'Éducation pour l'enrichissement des connaissances sur l'eau

10.3.1.1 Finalités de l'éducation en matière d'eau

L'eau revêt une importance capitale pour le développement durable, d'où sa désignation, parmi d'autres enjeux émergents et récurrents, en tant que priorité par les États membres de l'UNESCO (UNESCO, 2012). En 2015, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté le Programme de développement durable à l'horizon 2030, un nouveau cadre global composé de 17 ODD, parmi lesquels l'ODD 6 qui vise à garantir une gestion durable des ressources en eau (ONU, 2015). L'éducation à l'eau représente une approche stratégique clé pour garantir une gestion intégrée des ressources en eau en faveur d'un développement durable à tous les niveaux (UNESCO, 2009). Par conséquent, la qualité de l'eau est devenue un objectif et un défi à relever dans les années à venir.

L'éducation sur l'eau peut avoir des effets immédiats sur les comportements des jeunes envers l'eau et des effets à plus long terme sur les adultes qu'ils deviendront (Jaoul-Grammare & Stenger, 2022). Cependant, pour transmettre efficacement les messages de sensibilisation, les éducateurs doivent opter pour des méthodes d'apprentissage pertinentes. Les approches visent à rendre l'apprentissage plaisant et utile, en intégrant des méthodes telles que l'apprentissage par la résolution de problèmes, par projets, et par enquêtes, ainsi que l'utilisation de réseaux sociaux, de plateformes d'apprentissage en ligne, et de jeux éducatifs sont particulièrement efficaces (Moreno-Guerrero *et al*., 2020).

Les approches pédagogiques prédominantes dans le contexte de l'éducation sur l'eau sont principalement les méthodes actives, en particulier la pédagogie de projet, qui cherche à favoriser l'autonomie et la responsabilité des individus en fixant des objectifs précis (Gérard, 2009), tout en intégrant des aspects cognitifs et éthiques (Hume & Barry, 2015). Ainsi, des objectifs d'apprentissage spécifiques pour l'ODD 6 ont été adoptés, se répartissant en trois catégories : la sphère cognitive, la sphère socio-émotionnelle et la sphère comportementale (UNESCO, 2017) (Tab. 10.1).

Tableau 10.1 Objectifs d'apprentissage correspondant à l'ODD 6 (UNESCO, 2017)

Objectifs d'apprentissage cognitifs	Objectifs d'apprentissage socio-émotionnels	Objectifs d'apprentissage comportementaux
L'élève : - saisit l'essence de l'eau, son importance et ses problèmes ; - reconnaît l'eau dans les interactions et systèmes complexes mondiaux ; - sait que l'accès à l'eau potable varie à l'échelle mondiale ; - comprend le concept d'eau virtuelle ; - comprend le GIRE et les stratégies pour l'eau, l'assainissement et les risques naturels.	L'élève : - s'engage dans des actions pour l'eau et l'assainissement communautaires ; - communique sur la pollution, l'accès à l'eau et l'économie d'eau, partage des expériences réussies ; - se sent responsable de son utilisation de l'eau ; - perçoit l'utilité des normes d'assainissement et d'hygiène ; - critique les inégalités socio-économiques et de genre en matière d'accès à l'eau et à l'assainissement.	L'élève : - collabore avec les autorités locales pour améliorer l'autosuffisance locale ; - participe à la gestion des ressources en eau au niveau local; - réduit son empreinte eau, adopte des habitudes économes en eau ; - planifie, exécute, évalue et reproduit des activités améliorant la qualité de l'eau ; - évalue, participe et influence les stratégies de gestion d'entreprises liées à la pollution.

En effet, l'Education à l'Environnement "EE" s'avère indispensable pour instiller au sein de l'ensemble de la société l'idée que l'eau doit être préservée. Depuis les années soixante, elle est devenue une forme d'éducation cruciale pour promouvoir la protection et le respect du patrimoine naturel (Diab *et al*., 2014). L'EE poursuit deux objectifs principaux : rapprocher les individus de la nature et les encourager à s'engager dans des actions citoyennes (Gérard, 2009). Elle joue un rôle important dans le développement de l'écocitoyenneté en cultivant chez les personnes des compétences intégrées telles que la connaissance, les savoir-faire, le savoir-être et le savoir participer (Diab *et al*., 2014). Suite au rapport Brundtland qui a popularisé le concept de "développement durable", la conférence des Nations unies à Rio en 1992 a marqué un tournant en faveur de l'éducation en vue du développement durable (Hume & Barry, 2015). Aujourd'hui, on parle souvent d'Education à l'Environnement vers un Développement Durable "EEDD" ou l'Education en vue du Développement Durable "EDD", qui visent à préparer la population aux changements économiques et sociaux induits par le développement durable (Leininger-Frezal, 2011).

Actuellement, le manque d'éducation, de sensibilisation et de connaissances en matière d'environnement entraîne une dégradation de la nature et de ses ressources (Yadav *et al*., 2022). Ainsi, il est essentiel de sensibiliser toutes les générations dès le plus jeune âge à l'importance de l'eau et à sa gestion responsable (Karleuša *et al*., 2009). L'éducation des élèves devrait inclure des actions qui encouragent la réflexion sur l'origine de cette ressource, les facteurs qui l'influencent, et le développement de compétences pour trouver des solutions adaptées (Moreno-Guerrero *et al*., 2020). Dans cette perspective, afin d'assurer un avenir durable, il est indispensable de fournir une éducation sur l'eau à tous les niveaux, permettant aux individus d'acquérir les compétences, les connaissances et les valeurs nécessaires pour contribuer positivement à la société (UNESCO, 2009).

10.3.1.2 Sources d'inspiration : initiatives innovantes d'éducation sur l'eau

La sensibilisation des élèves aux problèmes écologiques, notamment à l'eau, a considérablement progressé ces dernières années. En engageant les élèves dans des expériences pratiques et significatives, ces approches actives renforcent leur conscience environnementale et les encouragent à préserver l'eau et l'environnement. Plusieurs initiatives mondiales ont été adoptées, telles que :

- ✓ Eco-Schools Programme (www.ecoschools.global):

Géré par la Fondation pour l'Education à l'Environnement "FEE", ce programme mondial d'écoles durables est l'un des plus vastes. Il débute en classe et s'étend à la communauté, engageant les jeunes dans un apprentissage pratique. Grâce à cette initiative, les jeunes ressentent un sentiment de réussite en participant aux politiques de gestion environnementale de leurs écoles, les guidant vers la certification et le prestige liés à l'obtention du drapeau vert.

- ✓ Project WET "Water Education Today" (www.projectwet.org):

Ce projet promeut l'éducation sur l'eau pour appréhender les défis mondiaux et encourager des solutions locales. En imaginant un monde où l'éducation orientée vers l'action valorise l'eau, il œuvre pour un avenir durable en fournissant des ressources et des formations abordables aux éducateurs mondiaux. En partenariat avec près de 90 organisations, le projet élargit son impact tout en maintenant son approche novatrice pour réaliser sa mission.

✓ Le projet Blue Schools (www.blue-schools.eu) :

Ce projet définit l'économie bleue pour les élèves du secondaire, favorisant la conscience des enjeux côtiers durables. Les élèves apprennent l'économie bleue par des projets pratiques conformes aux directives de l'UE, exploitant le potentiel d'innovation et de durabilité des zones côtières. Le projet prévoit la création d'écoles bleues, d'évaluations et de guides, ainsi que d'ateliers et de webinaires pour les enseignants afin de transmettre ce message.

De plus, l'éducation en plein air, une autre approche pédagogique novatrice, est de plus en plus reconnue comme un moyen efficace de sensibiliser les enfants à l'importance de l'environnement. Elle établit une connexion entre les élèves et la nature, stimule l'apprentissage multisensoriel, développe des compétences sociales et de résolution de problèmes, …




Planche photos 10-1 Exemples des activités scolaire en pleine air (theecologyschool.org)

10.3.2 La sensibilisation pour la préservation de l'eau au Maroc

10.3.2.1 La sensibilisation : composante essentielle des plans pour la GIRE

Le Maroc a accompli d'importants efforts en matière de GIRE. Cependant, certains défis persistent, notamment en assurant une mise en œuvre efficace des CGP et en sensibilisant la population sur l'importance de préserver cette ressource vitale. En matière de sensibilisation, la loi sur l'eau a permis la création de la commission préfectorale ou provinciale de l'eau, dont l'un des objectifs est de mener des actions pour sensibiliser le public à la protection et à la préservation des ressources en eau (Loi n° 10-95, 1995).

Pour encourager les usagers à soutenir la mise en œuvre des décisions concernant la gestion de l'eau, notamment la mise en place des contrats de nappe, il est essentiel de partager avec eux des informations sur l'état des ressources en eau, leur évolution à court, moyen et long terme, ainsi que les contraintes liées à leur développement, cela permet de mieux comprendre les enjeux liés à l'eau (ABHOER, 2018b). La réponse à cette problématique réside dans l'établissement d'un système intégré de gestion de l'eau, qui deviendra un outil concret pour aider à la prise de décision (Loi n° 36-15, 2016).

La nouvelle stratégie de communication et de sensibilisation du PNAEPI 20-27, annoncée par Amara (2021), se divise en deux volets principaux. Le premier volet concerne le renforcement des échanges entre les intervenants du programme et la coordination de leurs actions. Le deuxième volet vise à encourager la population à adopter des comportements favorables à la rationalisation de la consommation d'eau potable et à l'économie d'eau pour l'irrigation

10.3.2.2 L'EDD et la sensibilisation au sein des établissements de l'éducation

Le Maroc accorde de plus en plus d'importance à l'EDD, conscient de son rôle crucial pour façonner un avenir durable. Depuis la conférence de Stockholm en 1972, le Maroc a participé à toutes les conférences et sommets sur l'environnement et le développement durable, en ratifiant toutes les déclarations pertinentes (Ouadjane, Bammou, *et al*., 2021). Cet engagement s'est à nouveau manifesté par l'adhésion au nouveau cadre mondial "L'EDD pour 2030" (UNESCO, 2021). Ce cadre renforce les efforts de la Décennie des Nations Unies et s'aligne sur l'initiative de Son Altesse Royale la Princesse Lalla Hasnaa, qui a établi L'EDD comme mission centrale de la Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement "FM6E" (Khanchouli, 2021).

Fondée en 2001, la FM6E accorde une importance particulière à l'EDD. Son objectif est d'accélérer la prise de conscience de l'impact humain sur l'environnement et de fournir à chacun les compétences nécessaires pour promouvoir le développement durable. En encourageant la compréhension et les changements comportementaux, elle cherche à établir une harmonie entre l'homme et son environnement. La Fondation a collaboré avec divers partenaires pour introduire au Maroc des programmes novateurs. Elle a ainsi initié quatre projets de la FEE : l'Eco-Écoles, les Jeunes Reporters pour l'Environnement, la Clé Verte et le Pavillon Bleu (fm6e.org).

a. L'Eco-Écoles

L'Eco-Écoles est considéré comme l'un des programmes les plus réussis. Lancé au Maroc en 2006, ce programme vise principalement à éduquer les enfants dans une perspective de développement durable (FEE, 2020). En partenariat avec le ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports, le programme Eco-Écoles a pour objectifs d'enseigner des gestes simples de protection de l'environnement, d'intégrer des concepts environnementaux dans le cursus scolaire et de sensibiliser l'entourage des enfants à l'environnement. Actuellement, le programme a engagé 3300 Éco-Écoles au Maroc, dont 745 ont reçu le label Pavillon Vert. De plus, grâce à l'installation d'ampoules à basse consommation dans 80% des écoles, une réduction de 30% de la facture d'électricité a été obtenue (fm6e.org).

Les projets des Éco-Écoles abordent sept thèmes, dont celui de l'eau, à travers des activités pratiques telles que la collecte d'eau de pluie pour l'arrosage du jardin de l'école, l'utilisation de techniques d'irrigation goutte à goutte, la mise en place de campagnes de sensibilisation sur l'eau, le suivi régulier des compteurs, la détection de problèmes dans le réseau d'eau, et la promotion de comportements responsables envers l'eau au sein de l'établissement... Les écoles ayant accompli ces tâches obtiennent le label Pavillon Vert et rejoignent le réseau international des Éco-Écoles (Ph. 10.1). Ces initiatives cultivent le sens de l'écocitoyenneté chez les élèves en leur inculquant les compétences essentielles pour défendre les questions environnementales, y compris celles liées à l'eau.



Photo 10-1 Octroi du label Pavillon Vert à l'une des Éco-Écoles (fm6e.org)

b. Les Jeunes Reporters pour l'Environnement

Le concours annuel des Jeunes Reporters pour l'Environnement "JRE", mis en place par la FEE spécifiquement pour les collèges et les lycées, joue un rôle crucial dans la sensibilisation des jeunes aux questions du développement durable. Les participants agissent comme de véritables journalistes, menant des enquêtes approfondies en rassemblant des informations, en effectuant des recherches sur le terrain et en interrogeant diverses sources. Ce concours offre aux jeunes l'opportunité de se plonger dans le monde du journalisme en créant des reportages écrits, des vidéos et des photographies qui mettent en lumière les enjeux environnementaux (fm6e.org).

Développé en partenariat entre la FM6E et le ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports, ce concours vise à former une génération consciente et engagée envers le développement durable. Pour atteindre cet objectif, il se concentre sur trois axes essentiels : apprendre à influencer leur entourage, développer leur esprit critique et acquérir la capacité de proposer des solutions. Depuis son lancement, ce concours a rassemblé la participation de plus de 34000 collégiens et lycéens, témoignant de leur engagement envers l'environnement. Les efforts des jeunes sont récompensés par la reconnaissance de 245 travaux primés au concours marocain et de 33 travaux distingués au concours international (fm6e.org).

Les JRE se plongent au cœur des problématiques liées à l'eau en menant des recherches approfondies sur le terrain. Leurs travaux permettent d'éclairer les défis auxquels l'eau est confrontée localement, tels que le gaspillage et la pollution (Pl. 10.1). A l'instar de l'initiative Éco-Écoles, ce concours contribue à approfondir la compréhension des jeunes quant à l'importance capitale de l'eau, tout en renforçant leur prise de conscience de leur rôle essentiel dans la protection de l'environnement.



Planche photos 10-2 Exemples de photos lauréates dans la catégorie "Photographie" du concours JRE (jeunesreporters.org.ma)

10.3.2.3 Engagement associatif pour la préservation de l'eau

Depuis leur instauration par les Nations Unies en 2015, les 17 ODD ont été adoptés au niveau national à travers les "Agendas 2030". La participation de divers acteurs tels que les administrations publiques, les élus locaux, les associations et les citoyens est l'une des clés de la réussite de leur mise en œuvre (Dussaux, 2010). Parmi ces intervenants, les associations peuvent jouer un rôle efficace dans certaines situations (Laville, 2001). En matière d'éducation, l'émergence de l'éducation à l'environnement est récente et a principalement été développée par les associations environnementales (Gérard, 2009). Ces associations s'engagent dans la résolution de problèmes d'intérêt public (Flahault & Robic, 2020), et sont largement considérées comme les acteurs les plus fiables pour relever le défi de la préservation de l'environnement et de ses ressources (Serin, 2014).

A cet égard on peut citer l'exemple de l'Association des Chercheurs Géographes sur l'Eau et l'Environnement "ACG$_2$E". Celle-ci fondée en 2019 par des doctorants, docteurs et professeur est naît de l'idée que les chercheurs avaient un rôle à jouer dans la diffusion de la connaissance géographique auprès des populations. Elle se concentre sur les enjeux de développement durable et les problématiques liées à l'eau. L'ACG$_2$E vise à accroître la prise de conscience quant à l'importance de préserver l'environnement et d'optimiser l'utilisation des ressources, en particulier hydrique. En outre, elle s'engage à mobiliser la recherche scientifique pour relever les défis associés à l'eau, à l'environnement et à la société, dans le but de réduire les impacts du changement climatique. L'association a établi des collaborations avec divers partenaires pour mettre en place des campagnes de sensibilisation, des ateliers et des conférences.

a. Les campagnes de sensibilisation

Les campagnes de sensibilisation menées par l'ACG$_2$E ont pour objectif principal de former des citoyens conscients de l'importance vitale de l'eau et de l'urgence de préserver cette ressource pour les générations futures. Ces campagnes pédagogiques, spécialement conçues pour les élèves en fonction de leur niveau scolaire, ont pour but de les sensibiliser à la question de l'eau en partageant avec eux des informations scientifiques de manière simple et ludique. Pour susciter leur intérêt, l'ACG$_2$E opte pour des activités interactives et participatives qui reposent sur des exemples concrets et pertinents issus d'études de cas réels, permettant ainsi aux élèves de s'impliquer activement dans leur apprentissage. En outre, l'association met en avant des solutions novatrices et durables en matière de gestion de l'eau, incitant ainsi les élèves à jouer un rôle actif dans la préservation de cette ressource essentielle.





Planche photos 10-3 Campagnes de sensibilisation dans les établissements scolaire (El Orfi, 2023)

b. Les journées hydrologiques

Les Journées Hydrologiques "JH" sont conçues pour les étudiants, doctorants et chercheurs. L'objectif principal de ces événements est de mettre en évidence les richesses écologiques et les potentiels hydrologiques dans différentes régions (montagnes, oasis, zones humides, ...) afin de les valoriser comme moteurs de développement local tout en assurant leur durabilité (Ph. 10.2, 10.3, 10.4 et 10.5). En plus de sensibiliser aux impacts négatifs, notamment d'origine humaine, sur les ressources en eau, l'ACG$_2$E encouragent la promotion de bonnes pratiques de gestion visant à garantir la pérennité de ces ressources.



Photo 10-2 Atelier utilisation des RE en agriculture JH Demnat (El Orfi 2022)



Photo 10-3 Atelier fonctionnement hydrologique de l'O. Toudgha JH Goulmima (El Orfi 2022)

De plus, les JH renforcent le lien entre la théorie et la pratique en offrant des expériences concrètes dans des contextes réels, tels que l'utilisation de techniques de mesure hydrométrique ou l'évaluation des géomorphosites... Elles favorisent le développement de compétences spécifiques chez les participants, notamment l'analyse des différents aspects environnementaux, la compréhension des enjeux actuels et futurs liés à l'eau, la conception et la mise en œuvre d'initiatives de sensibilisation, la collaboration pour trouver des solutions durables, ainsi que la proposition de solutions novatrices pour préserver cette ressource essentielle…



Photo 10-4 Atelier recensement des oiseaux hivernale JH Imilchil (El Orfi 2023)



Photo 10-5 Atelier évaluation des géomorphosites JH Khénifra (El Orfi 2023)

c. Les conférences

À l'occasion des journées mondiales dédiées à l'eau, l'ACG$_2$E en partenariat avec des entités scientifiques telles que LDPRP et l'EST de Khénifra, ainsi que des organismes publics et des acteurs associatifs, organise des conférences scientifiques (Ph. 10.6 et 10.7). Ces événements réunissent des experts et chercheurs spécialisés dans le domaine de l'eau, tels que LDPRP, ESTK, ABHOER, DPA, ONEP, ANEF, pour partager des connaissances scientifiques, des expériences concrètes et des solutions innovantes pour la préservation de cette ressource essentielle. L'objectif de ces conférences est de créer une plateforme de communication et d'échange d'informations dédiée aux étudiants, doctorants, docteurs et chercheurs, afin de sensibiliser à l'importance de la GIRE. Ces échanges stimulent la réflexion critique et la prise de conscience individuelle et collective en mettant en lumière les conséquences environnementales, économiques et sociales de la détérioration des ressources en eau. Ces activités permettent à la communauté scientifique de jouer un rôle actif dans la sensibilisation du public à la préservation de cette ressource précieuse.



Photo 10-6 Célébration de la journée mondiale de l'eau 2022 à Khénifra (El Orfi, 2022)



Photo 10-7 Célébration de la journée mondiale de l'eau 2023 à Béni Mellal (El Orfi, 2023)

Au Maroc, bien que les actions visant à préserver les ressources naturelles puissent être efficaces pour sensibiliser à la nécessité de préserver et de protéger l'eau, il est important de noter que ces programmes, projets et actions ne sont pas toujours cohérents et peuvent présenter des lacunes. Selon l'IRES (2020), plusieurs points faibles contribuent à ces incohérences, notamment le manque de formation, de recherche et de développement, d'innovation et de sensibilisation, ainsi que l'insuffisance de l'EEDD dans le système éducatif et sur le terrain. Le même rapport souligne que l'efficacité et l'efficience de ces actions dépendent d'une approche basée sur des démarches de développement collectives et inclusives qui favorisent la cohérence des politiques sectorielles.

10.4 Conclusion

Après la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement à Rio de Janeiro en 1992, l'engagement du Maroc sur la voie du développement durable a fait de la conservation de l'eau l'un de ses défis majeurs. Depuis lors, le pays a mis en place de nombreuses politiques et stratégies visant à garantir une gestion optimale et intégrée de ses ressources en eau. L'évolution institutionnelle et juridique de la gestion de l'eau au Maroc, ainsi que les stratégies de planification telles que le Plan Nationale de l'Eau, le Plan Maroc Vert et la "Génération Green 2020-2030", témoignent de l'engagement continu du pays envers une gestion responsable et durable de l'eau. La mise en place de lois et de contrats de gestion participative de nappe, malgré les défis de leur implémentation, reflète la volonté de combiner les efforts gouvernementaux avec la participation active des parties prenantes pour assurer la pérennité des ressources en eau.

Le succès de plans stratégiques repose en grande partie sur l'éducation et la sensibilisation à l'eau. Plus les individus sont conscients des enjeux liés à l'eau, meilleurs seront les résultats obtenus dans la gestion de cette ressource. L'éducation joue un rôle essentiel dans l'enrichissement des connaissances sur l'eau et la promotion du développement durable. Des initiatives novatrices d'éducation sur l'eau inspirent des approches créatives pour sensibiliser les citoyens, en particulier les jeunes. La sensibilisation, quant à elle, s'avère être une composante essentielle des plans pour la GIRE. Elle se manifeste au sein des établissements éducatifs à travers des programmes comme les Éco-Écoles et les Jeunes Reporters pour l'Environnement, qui engagent activement les élèves dans la protection de l'eau et de l'environnement.

L'engagement associatif joue également un rôle déterminant dans la préservation de l'eau. Les campagnes de sensibilisation, les journées hydrologiques et les conférences scientifiques permettent de rassembler des experts, chercheurs et étudiants pour échanger des connaissances, des expériences et des solutions novatrices. En intégrant les plans stratégiques, l'éducation, la sensibilisation et l'engagement associatif, il est possible d'atteindre les objectifs visés et de

relever les défis complexes liés à la GIRE. En outre, la recherche et l'innovation dans le domaine de la gestion de l'eau sont indispensables pour développer des solutions durables. Il est également crucial de coordonner les efforts entre les différents acteurs et de mettre en place une gouvernance efficace de l'eau pour garantir une utilisation équitable et responsable de cette ressource vitale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le HaB-OER, représentatif du Moyen Atlas et de ses marges, s'inscrit dans un contexte géologique à la jonction entre les différents domaines du Moyen Atlas (méridional, plissé et tabulaire) et la Meseta centrale. Cette hétérogénéité détermine un contraste physiographique, climatologique et donc hydrologique entre les deux domaines. Sur le point physiographique, les sous-bassins de la Meseta centrale sont caractérisés par de faibles pentes, une lithologie imperméable et un faible couvert forestier ; à l'opposé, les sous-bassins du Moyen Atlas présentent des altitudes élevées, des pentes fortes, une lithologie calcaire karstifiée et une végétation très présente. Du point de vue hydrologique on retrouve donc deux systèmes distincts : l'un favorisant l'infiltration des eaux et l'alimentation des ressources souterraines dans le Moyen Atlas, et l'autre favorisant l'écoulement en surface dans la Meseta. L'émergence de la nappe conduit à la formation de nombreuses sources, parmi lesquelles les plus importantes sont celles de l'Oum Er Rbia, qui sont alimentées par un bassin karstique, et dont les trois quarts se trouvent dans le bassin du Sebou. Ces sources contribuent à la régulation et à la pérennité de l'écoulement de l'Oum Er Rbia tout au long de l'année, avec une contribution qui a dépassé les 90% pendant l'été 2019.

Sur le plan climatique, les masses d'air venant plus fréquemment de l'ouest génèrent des précipitations abondantes au contact du Moyen Atlas. En effet, la partie atlasique au NE reçoit en moyenne 700 mm de précipitations, tandis que le plateau central au SO en enregistre moins de 500 mm. L'analyse temporelle des données climatiques représentative de la région (station de Tarhat), rend compte d'une variabilité annuelle marquée, avec des précipitations variant de 288 mm à 1117 mm sur la période 1975-76 à 2022-23. De même, l'ETR, second facteur du bilan hydrique, se caractérise par une grande variabilité spatio-temporelle, fluctuant entre 294 mm et 774 mm, avec les montants les plus élevés enregistrés dans la zone du Moyen Atlas, en grande partie en raison de la présence de vastes forêts. L'analyse des données satellitaires complétée par des mesures de terrain, montre une moyenne de 40 jours enneigés sur la période 2000-01 à 2020-21, principalement dans la région atlasique. La couverture neigeuse, caractérisée par la densité et l'équivalent en eau très variables, se maintient généralement entre décembre et février, pour ensuite fondre en mars et disparaître totalement en avril. Globalement, depuis 1975, on a observé une tendance générale à la diminution des précipitations, des jours enneigés et à l'augmentation des températures

L'analyse des données hydrologiques révèle une forte variabilité temporelle étroitement liée aux précipitations. Pour y faire face, la construction de barrages pour le stockage des apports pendant les années humides est essentielle. Depuis 2001, le barrage d'Ahmed El Hansali "b'AEH" à l'aval du bassin reçoit un volume annuel moyen de 760 hm^3, dont 128 hm^3 proviennent des crues soit 17% du total. Les volumes annuels moyens en eau souterraine contributifs aux débits sont de 495 hm^3, 97.2 hm^3 et 5.7 hm^3 pour les sous-bassins respectifs de l'Oum Er Rbia, du Srou et d'Ouaoumana. Ces chiffres mettent en lumière l'importance de la contribution des nappes souterraines à l'alimentation des cours d'eau du HaB-OER.

Cependant, le b'AEH a connu une diminution remarquable de ses réserves sous l'action conjointe de la baisse des précipitations, entraînant une diminution des apports, et de l'augmentation des températures, entraînant des pertes. La situation actuelle déjà alarmante devrait pourtant empirer puisque selon les deux scénarios produit dans le cadre du programme "Coupled Model Intercomparison Project-5", l'un optimiste "RCP 4.5" et l'autre pessimiste "RCP 4.8", indique

que d'ici à 2050, la moyenne des précipitations diminuera de 16 % à 23 % selon les scénarios, et 21 % à 45 % à l'horizon 2100. Selon ces mêmes scénarios la température moyenne devrait augmenter de 2,5°C à 2,8°C pendant la première période et de 3,4°C à 6,1°C en 2100. A partir de ces valeurs projetées notre modélisation hydrologique renvoie une diminution conséquente des volumes alimentant le b'AEH, de 16/26 % et 23/53 % pour les périodes futures de 2050 et 2100. Un autre facteur contribuant à la difficulté à pourvoir aux usages pour lequel le barrage a été conçu est l'envasement.

Les transformations de l'espace qu'a connu le HaB-OER, à travers la déforestation, principalement causée par l'expansion urbaine et la conversion des terres à des fins agricoles, jouent un rôle prépondérant dans ce processus. Notre modélisation des dégradations spécifiques a révélé une augmentation du taux moyen d'érosion de 7,1 t/ha/an en 1985 à 7,8 t/ha/an en 2020. Ces estimations théoriques demeurent cependant inférieures aux pertes réelles, calculées par différence des bathymétries relevées en 1998 et 2014. Elle montre que le volume de la retenue du barrage est passé de 744 Mm^3 en 1998 à 668 Mm^3 en 2014, entraînant une perte de 76 Mm^3 soit une perte moyenne de 4,75 Mm^3/an.

Les sources et les lacs, hydrosystèmes assez abondants dans le HaB-OER, ont été également affectés par les effets de ces changements globaux, dont certains sont totalement asséchées. La réponse de certains lacs aux variations pluviométriques depuis les années 1980, a été étudiée pour la première fois pour une échelle mensuelle. L'application des techniques de télédétection associées aux images multispectrales a démontré son efficacité dans le domaine de l'hydrologie en permettant le suivi des superficies des lacs les plus représentatifs du HaB-OER, à savoir : Aguelmam Azigza "LAZ", Tiguelmamine "LaT", Aguelmam Ouiouane "LAO" et Aguelmam Abekhan "LAB". Ces lacs, sont largement reconnus comme des Sites d'Intérêt Biologique et Ecologique "SIBE" avec un enjeu touristique. Les volumes du LAZ sont étroitement liés aux précipitations, et depuis le 2012 une tendance générale à la diminution a été remarquée pour l'ensemble des lacs naturels étudiés. Cependant, et contrairement aux autres lacs, l'étendue du LAB a enregistré une chute brutale de sa superficie après 2018, qui tend vers son asséchement. Nos investigations de terrain et les données satellitaires ont permis de mettre en évidence que l'intensification des activités agricoles est également un facteur mettant en péril la pérennité et le potentiel hydrique des hydrosystèmes moyen atlasique.

L'exacerbation de la détérioration des ressources en eau par les activités humaines est notable, et ce, malgré les efforts déployés sur les plans juridiques et réglementaires qui ont été faits pour répondre aux enjeux du secteur de l'eau, notamment avec la refonte de la loi n° 10-95 et l'adoption de la nouvelle loi n° 36-15 relative à l'eau. Parallèlement aux lois, plans et programmes institutionnels dont les retombées se font essentiellement sur la "gouvernance de l'eau", l'Education à l'Environnement "EE" s'avère donc indispensable pour instiller au sein de la société l'idée que l'eau doit être préservée. Plus les individus sont conscients des enjeux liés à l'eau, meilleurs seront les résultats obtenus dans la gestion de cette ressource. La sensibilisation, quant à elle, s'avère être une composante essentielle des plans pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau "GIRE". En effet, l'alliance entre plans participatifs et la sensibilisation proactive s'avère importante pour limiter les dégâts des changement globaux.

Pour conclure, nous avons essayé à travers cette thèse d'évaluer les ressources en eau dans le HaB-OER, bassin clé qui joue un rôle central dans l'économie du Maroc. Elle a exploré les aspects hydro-climatiques et les activités socio-économiques qui influent sur la disponibilité des

ressources en eau. Dans un contexte de changement global, cette disponibilité devient de plus en plus "critique" en raison des transformations accélérées que la zone a connues au cours de la dernière décennie, notamment après 2015. L'effet combiné de la diminution des précipitations et de l'intensification des activités agricoles a sérieusement baissé les potentiels hydriques, entraînant l'assèchement de plusieurs lacs et sources et conduisant la réserve d'eau du b'AEH à son minimum absolu, depuis sa mise en eau en 2001, au mois d'août 2023 avec 42 hm^3, soit 6,4% de la capacité totale du barrage. Nos projections sur la base des sorties des modèles climatiques prévoient la continuation de cette tendance à la baisse des apports en eau dans le futur. Pour atténuer cette accélération rapide et difficile à contrôler, il nous apparaît que mettre l'accent sur le développement d'une éducation environnementale efficace, capable de sensibiliser les générations futures à l'importance de la préservation de l'eau est une piste prometteuse.

A l'issue de notre travail, bien qu'ayant abordé de nombreux thèmes relatifs à la ressource en eau, il nous paraît nécessaire d'approfondir encore certains aspects. Parmi ceux-ci, la quantification de la contribution de la neige à l'alimentation des cours d'eau, la réalisation d'un inventaire des sources et des lacs dans la zone en précisant leurs usages, la mesure précise des prélèvements en particulier dans le secteur agricole, et le développement de modèles hydrologiques tenant compte des influences anthropiques nous paraissent prioritaires. Il est à noter que pour avancer dans ces domaines, il est essentiel de favoriser la recherche par des financements adéquats et en facilitant l'accès aux données bancarisées.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Aalbers, E. E., Lenderink, G., van Meijgaard, E., & van den Hurk, B. J. J. M. (2018). Local-scale changes in mean and heavy precipitation in Western Europe, climate change or internal variability? *Climate Dynamics*, *50*(11-12), 4745-4766. Scopus. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3901-9

Abbaspour, K. C., & Johnson, C. A. (2004). Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *VADOSE ZONE J.*, *3*, 13.

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, *333*(2-4), 413-430. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014

Abbaspour, K., Vaghefi, S., & Srinivasan, R. (2017). A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment : A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water*, *10*(1), 6. https://doi.org/10.3390/w10010006

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(28), 42539-42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Abdellaoui, B., Merzouk, A., Aberkan, M., & Albergel, J. (2002). Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, *15*(4), 737-748. https://doi.org/10.7202/705478ar

Abdellaoui, B., Merzouk, A., Pépin, Y., Aberkan, M., & Albergel, J. (2009). Simulation du bilan hydro–sédimentaire d'un barrage collinaire en zone marneuse méditerranéenne (Cas du barrage Saboun, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, *22*(4), 487-504. https://doi.org/10.7202/038327ar

ABHOER. (2014). *Fiche synoptique des barrages Ahmed El Hansali et Ait Messaoud*.

ABHOER. (2018a). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Confrontation « ressources-besoins », affectation des ressources mobilisables et définition des objectifs du PDAIRE* (p. 96). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018b). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Confrontation « ressources-besoins », affectation des ressources mobilisables et définition des objectifs du PDAIRE : Définition des objectifs du PDAIRE* (p. 49). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018c). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Elaboration du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau et des conditions de sa mise en œuvre* (p. 96). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018d). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Elaboration du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau et des conditions de sa mise en œuvre : Analyse de l'impact du changement climatique et évaluation des mesures d'adaptation (version provisoire)* (p. 100). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018e). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Etat des lieux, évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau et état de l'utilisation des ressources en eau* (p. 188). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018f). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Etat des lieux, évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau et état de l'utilisation des ressources en eau : Etat d'aménagement et de l'utilisation des ressources en eau* (p. 101). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018g). *Etude d'actualisation du PDAIRE de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia : Evaluation de l'évolution de la demande en eau par secteur et par type d'usage* (p. 207). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2018h). *Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia. Etat des lieux, évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau et état de l'utilisation des ressources en eau : Synthèse de l'état des lieux* (p. 97). Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2019). *Atlas des sources et lacs* (p. 119) [Atlas]. Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia.

ABHOER. (2022). *Assistance technique et juridique pour l'élaboration du contrat cadre du complexe aquifère de Tadla et la mise en place d'une démarche méthodologique pour l'élaboration des contrats spécifiques* (p. 107) [Rapport de synthèse]. BRGM.

Acharki, S., Taia, S., Arjdal, Y., & Hack, J. (2023). Hydrological modeling of spatial and temporal variations in streamflow due to multiple climate change scenarios in northwestern Morocco. *Climate Services*, *30*, 100388. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100388

Acharya, T., Subedi, A., & Lee, D. (2018). Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*, *18*(8), 2580. https://doi.org/10.3390/s18082580

Adallal, R. (2019). *Variabilité environnementale des lacs du Moyen Atlas marocain : Fonctionnement hydrogéochimique, hydrologique et réponse au changement climatique* [These de doctorat en cotutelle]. Université d'Aix-Marseille.

Adallal, R., Vallet-Coulomb, C., Vidal, L., Benkaddour, A., Rhoujjati, A., & Sonzogni, C. (2019). Modelling lake water and isotope mass balance variations of Lake Azigza in the Moroccan Middle Atlas under Mediterranean climate. *Regional Environmental Change*, *19*(8), 2697-2709. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01566-9

AFD. (2012). *Gestion de la demande en eau dans le bassin méditerranéen—Exemple du Maroc—Cas d'étude du Souss Massa* [Rapport final]. Agence Française de Développement.

Agoumi, A., & Debbagh, A. (2006). *Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2005)* (p. 62). OIEau.

Aguilar, A. L., Flores, H., Crespo, G., Marín, M. I., Campos, I., & Calera, A. (2018). Performance Assessment of MOD16 in Evapotranspiration Evaluation in Northwestern Mexico. *Water*, *10*(7), Article 7. https://doi.org/10.3390/w10070901

Ahbari, A., Stour, L., & Agoumi, A. (2021). Impacts of Climate Change on the Hydro-Climatology and Performances of Bin El Ouidane Reservoir : Morocco, Africa. In *African Handbook of Climate Change Adaptation* (p. 1-24). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42091-8_245-1

Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., & Wagan, B. (2015). Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan. *Advances in Meteorology*, *2015*, e431860. https://doi.org/10.1155/2015/431860

Aït Hamza, M. (2012). Nomadisme et semi-nomadisme au Maroc. *Encyclopédie berbère*, *34*, Article 34. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.2752

Akar, Ö., & Gungor, O. (2012). Classification of multispectral images using Random Forest algorithm. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, *1*, 139-146. https://doi.org/10.9733/jgg.241212.1t

Alaoui, A. (2015). *Regards sur le patrimoine culturel et naturel du Moyen Atlas* (Direction du patrimoine culturel).

Aldomany, M. (2017). *L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin)* [Thèse de doctorat]. Université d'Orléans.

Alijanian, M., Rakhshandehroo, G. R., Mishra, A. K., & Dehghani, M. (2017). Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran : Evaluation of satellite rainfall climatology. *International Journal of Climatology*, *37*(14), 4896-4914. https://doi.org/10.1002/joc.5131

Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments : Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, *326*, 116799. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799

Amahan, A. (1998). *La vie agricole : L'espace agraire et son exploitation*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme. https://doi.org/10.4000/books.editionsmsh.6434

Amara, A. (2021). Politique de gestion de l'eau au Maroc. *Conjoncture*, *3*(N° 1035), 72.

Ambroise, B. (1999). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, facteurs, modèles* (2ème Edition). H.G.A.

Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S., & Ramis, C. (2012). A Statistical Adjustment of Regional Climate Model Outputs to Local Scales : Application to Platja de Palma, Spain. *Journal of Climate*, *25*(3), 939-957. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-10-05024.1

Amraoui, F. (2005). *Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du lias de la plaine du sais et du causse moyen atlasique tabulaire (Maroc)* [Thèse de doctorat d'état]. Hassan II.

Andréassian, V. (2004). Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La Houille Blanche*, *90*(2), 31-35. https://doi.org/10.1051/lhb:200402002

Anshuman, A., Kunnath-Poovakka, A., & Eldho, T. I. (2019). Towards the use of conceptual models for water resource assessment in Indian tropical watersheds under monsoon-driven climatic conditions. *Environmental Earth Sciences*, *78*(9), 282. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8281-5

Aqnouy, M., El Messari, J. E., Hilal, I., Bouadila, A., Moreno, J. G., Bounab, L., & Aoulad, M. R. (2019). Assessment of the SWAT Model and the Parameters Affecting the Flow Simulation in the Watershed of Oued Laou (Northern Morocco). *Journal of Ecological Engineering*, *20*(4), 104-113. https://doi.org/10.12911/22998993/102794

Archambault, C. (1972). Le phénomène hydrogéologique des sources douces et des sources salées de l'Oum er Rbia : Etude quantitative. *Mines et géologie, n° 36, Rabat*, 57-62.

Arif, S., & Doumani, F. (2012). *Maroc, Coût de la Dégradation des Ressources en Eau du Bassin de l'Oum Er-Rbia* (p. 78). Programme de Gestion Intégrée Durable de l'Eau (SWIM-SM) financé par la Commission européenne et mis en œuvre par le consortium comprenant : LDK Consultants Ingénieurs & Programmateurs S.A. (Chef de file) ; l'Association des Services d'Eau des Pays Arabes (ACWUA) ; le Réseau Arabe pour l'Environnement et le Développement (RAED) ; le Bureau de Conseils DMV B.V., le Global Water Partnership - Mediterranean (GWP-Med) ; le Ministère Grec de l'Environnement, de l'Energie et du Changement Climatique/Département des Relations Internationales et des Affaires de l'Union européenne ; le Ministère Libanais de l'Energie et de l'Eau/Direction Générale des Ressources Hydrauliques et Electriques ; le Ministère Tunisien de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche/Direction Générale des Ressources en Eau ; ainsi que l'Agence Autrichienne pour l'Environnement (Umweltbundesamt GmbH). Bruxelles.

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A. van, Liew, M. W. V., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT : Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, *55*(4), 1491-1508. https://doi.org/10.13031/2013.42256

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I : Model Development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *34*(1), 73-89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Arrifi, E. M. (2008). La gestion intégrée en eau au Maroc : Ressources, contraintes et implications sur l'économie d'eau. *Revue HTE, N°140*, 77-79.

Arsenault, R., Brissette, F., & Martel, J.-L. (2018). The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, *566*, 346-362. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.027

Arts, I., & Sary, M. (2000). Cartographie des débits d'étiage : Application au bassin de la Meurthe. *Revue Géographique de l'Est*, *40*(1-2), Article 1-2. https://journals.openedition.org/rge/4175#tocto1n2

Astagneau, P. C., Thirel, G., Delaigue, O., Guillaume, J. H. A., Parajka, J., Brauer, C. C., Viglione, A., Buytaert, W., & Beven, K. J. (2021). Technical note : Hydrology modelling R packages - a unified analysis of models and practicalities from a user perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(7), 3937-3973. https://doi.org/10.5194/hess-25-3937-2021

Attioui, A., Oukessou, T., Louali, A., & Takani, K. (2020). *Le Maroc à l'épreuve du changement climatique : Situation, impacts et politiques de réponse dans les secteurs de l'eau et de l'agriculture* (N° 18; p. 34). Direction des Etudes et des Prévisions Financières.

Aussenac, G. (1969). Influences du couvert forestier sur les précipitations. *Revue Forestière Française*, *7*, 631. https://doi.org/10.4267/2042/20312

Baali, A. (1998). *Genèse et évolution au Plio-Quaternaire de deux bassins intram-ontagneux en domaine carbonaté méditerranéen. Les bassins versants des dayets (lacs) Afourgagh et Agoulmam (Moyen Atlas, Maroc)* [Thèse d'état]. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès.

Baba, M. W. (2018). *Application de la télédétection pour la modélisation du manteau neigeux dans le Haut Atlas* [Thèse de doctorat]. Univeristé de Toulouse.

Baba, M. W., Gascoin, S., Jarlan, L., Simonneaux, V., & Hanich, L. (2018). Variations of the Snow Water Equivalent in the Ourika Catchment (Morocco) over 2000–2018 Using Downscaled MERRA-2 Data. *Water*, *10*(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/w10091120

BAD. (2012). *Appui au Plan Maroc Vert* [Rapport d'évaluation]. Banque Africaine de Développement.

Badidi, B. (1995). *La revolution des vergers de rosacees au moyen-atlas central et ses bordures (maroc)* [Thèse de doctorat]. Université de Limoges.

Badji, O., Zhu, Y., Lü, H., Guédé, K. G., Chen, T., Oumarou, A., Yao, K. B. M. O., & Brice, S. (2023). The Effects of Drought in the Huaibei Plain of China Due to Climate Change. *Atmosphere*, *14*(5). Scopus. https://doi.org/10.3390/atmos14050860

Bai, M., Mo, X., Liu, S., & Hu, S. (2021). Detection and attribution of lake water loss in the semi-arid Mongolian Plateau-A case study in the Lake Dalinor. *Ecohydrology*, *14*(1), e2251. https://doi.org/10.1002/eco.2251

Balaghi, R., El Hairech, T., Alaouri, M., Motaouakil, S., Benabdelouahab, T., Mounir, F., Lahlou, M., Arrach, R., Abderrafik, M., Colmant, R., Evangelisti, M., Poortinga, A., Kuik, O. J., & Delobel, F. (2016). *Climate change impact assessment using MOSAICC in Morocco*. INRA-Morocco.

Barmaki, L., & Aitcheik, D. (2015). Chapitre 9. Gouvernance de l'eau et développement durable, une comparaison Nord-Sud. In *Regards croisés Nord-Sud sur le développement durable* (p. 197-213). De Boeck Supérieur. https://doi.org/10.3917/dbu.dieme.2015.01.0197

Bassairate, O., Chikhaoui, M., Naimi, M., & Sabir, M. (2021). Effets de la dynamique de la végétation sur le rythme d'envasement et la disponibilité de l'eau dans le barrage Makhazine (Maroc). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, *9*(4), 553-561.

Baulig, H. (1959). Morphométrie. *Annales de géographie*, *68*(369), 385-408. https://doi.org/10.3406/geo.1959.15984

Beaudet, G. (1969). *Le Plateau Central marocain et ses bordures,étude géomorphologique*. Ministère de l'Enseignement supérieur du Maroc et des ministères français de l'Education nationale et des Affaires étrangères.

Beaudet, G. (2010). Mgild (Beni) / Ayt Mgild, Ayt Myill (Maroc central). *Encyclopédie berbère*, *32*, Article 32. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.134

Beckers, E., & Degré, A. (2011). Revue bibliographique : La prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, *15*(1), 143-151.

Bekkari, L., & Castillo, I. Y. del. (2011). L'appropriation du modèle d'association d'usagers de l'eau par une communauté villageoise du Moyen Atlas au Maroc. *Cahiers Agricultures*, *20*(1-2), Article 1-2. https://doi.org/10.1684/agr.2011.0474

Belaroui, A., Haouchine, F. Z., & Haouchine, A. (2019). Rainfall-runoff modeling : Flow characterization of Hammam Melouane Wadi Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(15), 487. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4610-y

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing : A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *114*, 24-31. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011

Ben Sari, D. (2004). *Prévision et prévention des catastrophes naturelles et environnementales : Le cas du Maroc*. Editions Unesco.

Benabid, A. (1985). Les écosystèmes forestiers, préforestiers et presteppiques du Maroc : Diversité, répartition biogéographique et problèmes posés par leur aménagement. *forêt méditerranéenne*, *VII*(1), 53-64.

Benameur, S., Benkhaled, A., Meraghni, D., Chebana, F., & Necir, A. (2017). Complete flood frequency analysis in Abiod watershed, Biskra (Algeria). *Natural Hazards*, *86*(2), 519-534. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2703-4

Benkaddour, A. (1993). *Changements hydrologiques et climatiques dans le Moyen-Atlas Marocain, chronologie, minéralogie, géochimie isotopique et élémentaire des sédiments lacustres de Tigalmamine* [Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Orsay]. http://www.secheresse.info/spip.php?article23930

Benkaddour, A., Rhoujjati, A., & Nour El Bait, M. (2008). Hydrologie et sédimentation actuelles au niveau des lacs Iffer et Aguelmam Azigza (Moyen Atlas, Maroc). *Actes RQM4*, 108-118.

Benkirane, M., Amazirh, A., Laftouhi, N.-E., Khabba, S., & Chehbouni, A. (2023). Assessment of GPM Satellite Precipitation Performance after Bias Correction, for Hydrological Modeling in a Semi-Arid Watershed (High Atlas Mountain, Morocco). *Atmosphere*, *14*(5). Scopus. https://doi.org/10.3390/atmos14050794

Bennis, S. (2009). *Hydraulique et Hydrologie* (2éme). Presses de l'université du Quebec.

Bentayeb, A., & Leclerc, C. (1977). Le Moyen Atlas. Le causse moyen atlasique. In *Ressources en Eau du Maroc, Tome III, Domaine atlasique et Sub-atlasique: Vol. III* (p. 37-65). Editions du service géologique du Maroc, Rabat.

Berges, J.-C. (2019). GPM, le programme Global Precipitation Measurement (NASA/JAXA) – fondements théoriques et accès à la base de données. *Climatologie*, *16*, 23-51. https://doi.org/10.4267/climatologie.1374

Blache, J. (1919). De Meknès aux sources de la Moulouya. *Annales de géographie*, *28*(154), 293-314. https://doi.org/10.3406/geo.1919.9301

Blache, J. (1937). Termier (Henri)—Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen-Atlas septentrional. *Revue de Géographie Alpine*, *25*(3), 525-529.

Blanchon, D. (2019). Eau bleue, eau verte, eaux grises, eaux virtuelles : De quelles ressources parle-t-on ? In *Géopolitique de l'eau* (p. 25-28). Le Cavalier Bleu. https://www.cairn.info/geopolitique-de-l-eau--9791031803746-p-25.htm

BM. (2021). *Climate risk country profile : Morocco* (p. 36 p). La Banque Mondiale.

BM. (2023, juillet 24). *Un nouveau Programme de la Banque mondiale au Maroc soutient les efforts en faveur de la sécurité et de la résilience de l'eau pour tous*. World Bank. https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2023/07/24/new-world-bank-program-in-morocco-supports-efforts-to-boost-water-security-and-resilience-for-all

Bois, P. H. (2000). *Hydrologie générale* (Ecole Nationale Polytechnique de Grenoble).

Boithias, L., Sauvage, S., Lenica, A., Roux, H., Abbaspour, K. C., Larnier, K., Dartus, D., & Sánchez-Pérez, J. M. (2017). Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. *Water*, *9*(12), Article 12. https://doi.org/10.3390/w9120929

Born, K., Fink, A. H., & Paeth, H. (2008). Dry and wet periods in the northwestern Maghreb for present day and future climate conditions. *Meteorologische Zeitschrift*, 533-551. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0313

Bouchaou, L. (1995). *Fonctionnement des aquifères atlasiques et leur relation avec les aquifères de la plaine : Cas de l'Atlas de Béni Mellal et de la plaine de Tadla (Maroc)*. Cadi Ayyad FST Semlalia.

Boudhar, A. (2010). *Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech* [Thèse de doctorat, Cadi Ayyad FST Marrakech]. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243409000798

Boufala, M., El Hmaidf, A., Chadli, K., Essahlaoui, A., El Ouali, A., & Lahjouj, A. (2020). Assessment of the risk of soil erosion using RUSLE method and SWAT model at the M'dez Watershed, Middle Atlas, Morocco. In A. Akhssas, K. Baba, L. Bahi, F. Benradi, E. Cherkaoui, M. Khamar, A. Lahmili, M. Menzhi, A. Nounah, & L. Ouadif (Éds.), *Seventh International Congress Water, Waste and Environment (ede7-2019)* (Vol. 150, p. 03014). E D P Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015003014

Boufala, M., El Hmaidi, A., Chadli, K., Essahlaoui, A., El Ouali, A., & Taia, S. (2019). Hydrological modeling of water and soil resources in the basin upstream of the Allal El Fassi dam (Upper Sebou watershed, Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, *5*(4), 1163-1177. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00621-y

Boufala, M., El Hmaidi, A., Essahlaoui, A., Chadli, K., El Ouali, A., & Lahjouj, A. (2022). Assessment of the best management practices under a semi-arid basin using SWAT model (case of M'dez watershed, Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, *8*(1), 713-731. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01123-6

Boukhari, A. E., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Raclot, D. (2019). Caractérisation de la dégradation spécifique des sols pour la région septentrionale du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, *7*(2), 288-293.

Boukhari Taleb, R., Naimi, M., Chikhaoui, M., Raclot, D., & Sabir, M. (2019). Evaluation des performances du modele Agro-Hydrologique SWAT à reproduire le fonctionnement hydrologique du bassin versant Nakhla (Rif occidental, Maroc). *European Scientific Journal ESJ*, *15*(5). https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n5p311

Boukhari Taleb, R., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Sabir, M. (2021). *Utilisation de SWAT pour la modélisation hydrologique et l'évaluation du rendement des sédiments dans le bassin versant de Nakhla, Maroc*. 13.

Bounouira, H. (2007). *Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant du Bouregreg*. Université Ibn Tofail.

Bouslihim, A., & Torra, M. (2020). Problématique des ressources en eau au Maroc. *Journal d'Economie, de Management, d'Environnement et de Droit*, *3*(N° 3), 98-107.

Bouslihim, Y., Rochdi, A., & Paaza, N. E. A. (2020). Combining SWAT Model and Regionalization Approach to Estimate Soil Erosion under Limited Data Availability Conditions. *Eurasian Soil Science*, *53*(9), 1280-1292. https://doi.org/10.1134/S1064229320090021

Boutoutaou, D., Lakhdar, M., Daddi Bouhoun, M., & Saggai, S. (2012). Détermination de l'évaporation des surfaces des plans d'eau pour les conditions climatiques de l'Algérie. *Algerian journal of arid environment*, *2*(2), 94-101.

Brassel, K. E., & Reif, D. (1979). A Procedure to Generate Thiessen Polygons. *Geographical Analysis*, *11*(3), 289-303. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Briak, H., Mrabet, R., Moussadek, R., & Aboumaria, K. (2019). Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya river basin (North of Morocco). *International Soil and Water Conservation Research*, *7*(2), 176-183. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.002

Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Chehbouni, A., Hanich, L., Bergaoui, K., McDonnell, R., & Benaabidate, L. (2020). Assessing Hydrological Vulnerability to Future Droughts in a Mediterranean Watershed : Combined Indices-Based and Distributed Modeling Approaches. *Water*, *12*(9), 2333. https://doi.org/10.3390/w12092333

Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Hirich, A., Bouabid, R., Zaaboul, R., & Benaabidate, L. (2018). Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*, *162*, 154-163. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.024

Brouziyne, Y., De Girolamo, A. M., Aboubdillah, A., Benaabidate, L., Bouchaou, L., & Chehbouni, A. (2021). Modeling alterations in flow regimes under changing climate in a Mediterranean watershed : An analysis of ecologically-relevant hydrological indicators. *Ecological Informatics*, *61*, 101219. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101219

Bruland, O., Færevåg, Å., Steinsland, I., Liston, G. E., & Sand, K. (2015). Weather SDM : Estimating snow density with high precision using snow depth and local climate. *Hydrology Research*, *46*(4), 494-506. https://doi.org/10.2166/nh.2015.059

Brundtland, H. (1987). *Notre avenir à tous* (p. 349). Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement.

Brunet-Moret, Y. (1979). Homogénéisation des précipitations. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Hydrol.*, *XVI*(3), 147-170.

Byakatonda, J., Parida, B. P., Moalafhi, D. B., & Kenabatho, P. K. (2018). Analysis of long term drought severity characteristics and trends across semiarid Botswana using two drought indices. *Atmospheric Research*, *213*, 492-508. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.002

Calizaya, E., Laqui, W., Sardón, S., Calizaya, F., Cuentas, O., Cahuana, J., Mindani, C., & Huacani, W. (2023). Snow Cover Temporal Dynamic Using MODIS Product, and Its Relationship with Precipitation and Temperature in the Tropical Andean Glaciers in the Alto Santa Sub-Basin (Peru). *Sustainability (Switzerland)*, *15*(9). Scopus. https://doi.org/10.3390/su15097610

Carmello, V., Dubreuil, V., & Sant'Anna Neto, J. L. (2015). Analyse géostatistique de la distribution spatiale des précipitations sur le versant sud du bassin du fleuve Paranapanema, dans le sud du Brésil. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 439-444. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2587.5046

Castaneda-Gonzalez, M. (2018, janvier 24). *Effects of regional climate model spatial resolution on hydrological modelling of summer-fall floods in southern Quebec*. https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-regional-climate-model-spatial-on-of-in-Castaneda-Gonzalez/8bcd4e6f78f08ed4650f2e72bdcb341b24dfffee

Castany, G. (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod. https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/hydrogeologie-9782100041718/

Castellani, C. (1986). Régionalisation des précipitations annuelles par la méthode de la régression linéaire simple : L'exemple des Alpes du Nord. *Revue de Géographie Alpine*, *74*(4), 393-403. https://doi.org/10.3406/rga.1986.2658

CEIBM. (2006). Convention sur la diversité biologique : SIBE du domaine continental, zones humides. *https://ma.chm-cbd.net*.

Célérier, J. (1927). La transhumance dans le Moyen-Atlas. *Hespéris, VII, 1er trim.*, 53-68.

CESE. (2014). *La gouvernance par la gestion intégrée des ressources en eau au Maroc : Levier fondamental de développement durable* (Auto-Saisine n° 15; p. 103). Le Conseil Economique, Social et Environnemental.

CESE. (2020). *Le tourisme, levier de développement durable et d'intégration : Pour une nouvelle stratégie nationale du tourisme* (p. 25). Commission des affaires économiques et des projets stratégiques.

Chadli, K. (2016). Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, *2*(2), 51. https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y

Chadli, K. (2018). Hydrological modeling of the Mikkés watershed (Morocco) using ARCSWAT model. *Sustainable Water Resources Management*, *4*(1), 105-115. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0145-0

Chaponnière, A. (2005). *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride* [Thèse de doctorat]. Centre d'études spatiales de la biosphère.

Che, X., Zhang, H. K., Sun, Q., Ouyang, Z., & Liu, J. (2022). MODIS Evapotranspiration Downscaling Using a Deep Neural Network Trained Using Landsat 8 Reflectance and Temperature Data. *Remote Sensing*, *14*(22), Article 22. https://doi.org/10.3390/rs14225876

Cheddadi, R., Lamb, H., Joel, G., & van der Kaars, S. (1998). Holocene climatic change in Morocco : A quantitative reconstruction from pollen data. *Climate Dynamics*, *14*, 883-890. https://doi.org/10.1007/s003820050262

Cheikh, F. (2018). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Gambie. (Bassin continental Guineo-Sénégalais). *Revue Marocaine de Géomorphologie*, *2*, pp 110-127.

Chen, Y. (2018). Distributed Hydrological Models. In *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting* (p. 1-24). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_23-1

Chen, Y., Xia, J., Liang, S., Feng, J., Fisher, J. B., Li, X., Li, X., Liu, S., Ma, Z., Miyata, A., Mu, Q., Sun, L., Tang, J., Wang, K., Wen, J., Xue, Y., Yu, G., Zha, T., Zhang, L., … Yuan, W. (2014). Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote Sensing of Environment*, *140*, 279-293. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.045

Chiew, F. H. S., Zheng, H., Potter, N. J., Charles, S. P., Thatcher, M., Ji, F., Syktus, J., Robertson, D. E., & Post, D. A. (2022). Different Hydroclimate Modelling Approaches Can Lead to a Large Range of Streamflow Projections under Climate Change : Implications for Water Resources Management. *Water*, *14*(17), Article 17. https://doi.org/10.3390/w14172730

Chillasse, L., & Dakki, M. (2004). Potentialités et statuts de conservation des zones humides du Moyen-Atlas (Maroc), avec référence aux influences de la sécheresse. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, *15*(4), 337-345.

Chillasse, L., Dakki, M., & Abbassi, M. (2001a). *Valeurs et fonctions écologiques des Zones humides du Moyen Atlas (Maroc)*. 8.

Chillasse, L., Dakki, M., & Abbassi, M. (2001b). Valeurs et fonctions écologiques des Zones humides du Moyen Atlas (Maroc). *SEHUMED*, 139-146.

Choubert, G., & Marcais, J. (1952). Aperçu structural in Géologie du Maroc. *XIXéme Congés Géol. Inten., Alger, 1952, monogr Rég., 3ème série, Maroc, n° 6, 2 cartes, Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc, n° 100*, pp 9-73.

Choukri, F., Chikhaoui, M., Naimi, M., Pepin, Y., & Raclot, D. (2019). *Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant Tleta du Rif Occidental du Maroc à l'aide du modèle SWAT*. 9.

Choukri, F., Raclot, D., Naimi, M., Chikhaoui, M., Nunes, J. P., Huard, F., Hérivaux, C., Sabir, M., & Pépin, Y. (2020). Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, *8*(2), 141-153. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.003

Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, *20*(1), 37-46. https://doi.org/10.1177/001316446002000104

Colo, G. (1961). *Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional*. Division de la géologie. Rabat.

Condon, L. E., Atchley, A. L., & Maxwell, R. M. (2020). Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. *Nature Communications*, *11*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41467-020-14688-0

Copernicus Climate Change Service. (2019). *CORDEX regional climate model data on single levels* [jeu de données]. ECMWF. https://doi.org/10.24381/CDS.BC91EDC3

cordex.org. (2023, mai 30). CORDEX domain description. *Cordex*. https://cordex.org/domains/cordex-domain-description/

Corgne, S. (2014). *Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations.* [Habilitation à diriger des recherches, Université Rennes 2]. https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01240394

Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., & Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions : An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, *48*(5). https://doi.org/10.1029/2011WR011721

Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchies, D., Perrin, C., & Michel, C. (2023). *airGR : Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.7.4.* [jeu de données]. Recherche Data Gouv. https://doi.org/10.15454/EX11NA

Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, *94*, 166-171. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002

Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.-F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., & Richard, D. (2003). Rôle joué par la forêt sur l'hydrologie des régions méditerranéennes. Synthèse des recherches menées en France. In J. P. Bariot (Éd.), *Rapport quadriennal (1999-2002) du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique* (p. 239-250). Comité National Français de Géodésie et de Géophysique. https://hal.science/hal-00325629

Cosandey, C., & Robinson, M. (2012). Chapitre 10 - Rôle hydrologique de la végétation : Boisement, déboisement. In *Hydrologie continentale* (p. 382-421). Armand Colin. https://doi.org/10.3917/arco.cosan.2012.01.0382

Crétaux, J.-F., Abarca-del-Río, R., Bergé-Nguyen, M., Arsen, A., Drolon, V., Clos, G., & Maisongrande, P. (2016). Lake Volume Monitoring from Space. *Surveys in Geophysics*, *37*(2), 269-305. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9362-6

CRI. (2017). *Tourisme : Secteur d'activité* (p. 29). Centre Régional d'Investissement de Béni Mellal - Khénifra.

Cunningham, D., Cunningham, P., & Fagan, M. E. (2019). Identifying Biases in Global Tree Cover Products : A Case Study in Costa Rica. *Forests*, *10*(10), 853. https://doi.org/10.3390/f10100853

Dacharry, M. (1997). *Dictionnaire français d'hydrologie*.

Dahan, S. (2017). *Gestion de la rareté de l'eau en milieu urbain au Maroc* (p. 38) [Rapport]. Banque mondiale, Washington, DC.

Dakhlaoui, H., Ruelland, D., & Tramblay, Y. (2020). A general differential split-sample test to select sub-periods of discontinuous years gathering similar to different climate conditions. *MethodsX*, *7*, 101008. https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101008

Damnati, B., Etebaai, I., Benjilani, H., El Khoudri, K., Reddad, H., & Taieb, M. (2016). Sedimentology and geochemistry of lacustrine terraces of three Middle Atlas lakes : Paleohydrological changes for the last 2300 cal BP in Morocco (western Mediterranean region). *Quaternary International*, *404*, 163-173. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.038

Damnati, B., Etebaai, I., Reddad, H., Benhardouz, H., Benhardouz, O., Miche, H., & Taieb, M. (2012). Recent environmental changes and human impact since mid 20th century in Mediterranean Lakes : Ifrah, Iffer and Afourgagh, Middle Atlas Morocco. *Quaternary International*, *262*, 44-55. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.028

Damnati, B., & Reddad, H. (2017). Les microcharbons dans les sédiments du lac Ifrah moyen atlas (Maroc) : Significations climatiques depuis 24 000 ans cal. bp. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, *vol. 28/2*, Article 28/2. https://doi.org/10.4000/quaternaire.8082

Daum, J. R. (1994). *Méthodologie du jaugeage des sources* (R 38193; p. 68). BRGM.

De Reparaz, A. (1993). De l'eau et des hommes en Méditerranée... *Méditerranée*, *78*(3), 101-104. https://doi.org/10.3406/medit.1993.2842

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., … Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis : Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *137*(656), 553-597. https://doi.org/10.1002/qj.828

DEFM. (1927). Les Forêts du Maroc. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, *7*(73), 588-592. https://doi.org/10.3406/jatba.1927.4560

Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Niclòs, R., & Sánchez, J. M. (2021). Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *24*(2), 319-328. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.004

Del Vecchio, K. (2020). Gestion des eaux souterraines au Maroc : Entre priorités du développement agricole et préoccupations environnementales. *Comité Scientifique et Technique pour l'Eau Agricole*, 7.

Del Vecchio, K. (2023). Un nouvel instrument au service du statu quo : Comment l'importation des contrats de nappe renforce les équilibres nationaux de la politique marocaine de l'eau: *Critique internationale*, *N° 98*(1), 73-93. https://doi.org/10.3917/crii.098.0073

Delaigue, O., Coron, L., Brigode, P., & Thirel, G. (2020). *airGRteaching : Teaching Hydrological Modelling with the GR Rainfall-Runoff Models (« Shiny » Interface Included). R package version 0.3.1*. [jeu de données]. Recherche Data Gouv. https://doi.org/10.15454/W0SSKT

Delaigue, O., Thirel, G., Coron, L., & Brigode, P. (2018). *airGR and airGRteaching : Two Open-Source Tools for Rainfall-Runoff Modeling and Teaching Hydrology*. 541-532. https://doi.org/10.29007/qsqj

Delannoy, H., Lecompte, M., & Romane, F. (1979). Géographie des températures quotidiennes dans le Moyen-Atlas et ses bordures : Analyse multivariée et situations atmosphériques. *L'Espace géographique*, *8*(1), 25-41.

Derak, M., M'hirit, O., Mouflih, B., & Et-Tobi, M. (2008). Influence de la densité et du type de peuplement sur le dépérissement du Cèdre à Sidi M'Guild (Moyen Atlas marocain). *Forêt Méditerranéenne*, *XXIX*(1), 23-32.

Detriche, S. (2007). *Evolution d'un système lacustre karstique au cours de la période historique d'après l'étude des archives sédimentaires : La dayet Afourgagh (Moyen-Atlas, Maroc)* [Thèse pour obtenir le grade de docteur]. Université François Rabelais de Tours.

Devos A, Nejjari A. (1998). *La sécheresse hydrologique récente dans le bassin supérieur du Sebou (Moyen-Atlas)*. Rapport AUPELF-UREF. 57 p

DeWalle, D. R., & Rango, A. (2008). *Principles of Snow Hydrology* (1re éd.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535673

DGH. (2015). *La loi 36-15 sur l'Eau*. http://www.equipement.gov.ma/eau/Pages/Conseil-Superieur-Eau-et-Climat.aspx

DGM. (2021). *Maroc : Etat du climat en 2020* (p. 38). Direction générale de la météorologie.

DGM. (2023). *Maroc : Etat du climat en 2022* (p. 33). Direction générale de la météorologie.

Diab, T., Khater, C., Hawi, A., Martin, A., & Hage, F. E. (2014). L'éducation à l'environnement dans les écoles libanaises : Vers un développement de l'écocitoyenneté ? *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *9*, Article 9. https://doi.org/10.4000/rdst.869

Dimitriadou, S., & Nikolakopoulos, K. G. (2021). Annual Actual Evapotranspiration Estimation via GIS Models of Three Empirical Methods Employing Remotely Sensed Data for the Peloponnese, Greece, and Comparison with Annual MODIS ET and Pan Evaporation Measurements. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/ijgi10080522

DLR. (2021, mars). *TanDEM-X Science Server*. https://tandemx-science.dlr.de/

Douaik, A. (2021). A review of methodological contributions of geostatistics to precision agriculture. *Africand & Mediterranean Agricultal Journal*, *132*, 40-64.

Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, *28*, 9-22. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6

DPA. (2020). *Monographie de la province de khenifra* (p. 12). Direction Provinciale de l'Agriculture de Khénifra.

DPEFLCD. (2014). *Carte des types de peupleument des forêt*.

Driouech, F. (2010). *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : Descente d'échelle et incertitudes* [Thèse de doctorat, Univeristé de Toulouse]. http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001300/

Driouech, F., Déqué, M., & Mokssit, A. (2009). Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Climate Dynamics*, *32*(7), 1055-1063. https://doi.org/10.1007/s00382-008-0430-6

DSS. (2020). *Le Plan Maroc Vert bilan et impacts 2008-2018* (p. 43). Direction de la Stratégie et des Statistiques.

Du Dresnay, R. (1988). Recent data on the geology of the Middle-Atlas (Morocco). In V. H. Jacobshagen (Éd.), *The Atlas System of Morocco* (Vol. 15, p. 293-320). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/BFb0011598

Duarte, L. V., Formiga, K. T. M., & Costa, V. A. F. (2022). Analysis of the IMERG-GPM Precipitation Product Analysis in Brazilian Midwestern Basins Considering Different Time and Spatial Scales. *Water*, *14*(16), Article 16. https://doi.org/10.3390/w14162472

Dubreuil, P. (1974). *Initiation à l'analyse hydrologique : Dix exercices suivis des corrigés* (ORSTOM). Masson & Cie.

Duchenne-Moutien, R. A., & Neetoo, H. (2021). Climate Change and Emerging Food Safety Issues : A Review. *Journal of Food Protection*, *84*(11), 1884-1897. https://doi.org/10.4315/JFP-21-141

Dussaux, M. (2010). L'éducation au développement durable : De la ville éducatrice au territoire apprenant ? *Spécificités*, *3*(1), 39-56. https://doi.org/10.3917/spec.003.0039

Echakraoui, Z., Boukdir, A., Aderoju, O., Ben-Saïd, E. H., Zitouni, A., El Maslouhi, R., & Dias, A. G. (2018). The climate changes in the sub-basin of the Oum Er rbia central and the impact on the surface waters. *E3S Web of Conferences*, *37*, 03003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183703003

Ed-Dahmouny, H., Eddelani, O., & El-Broumi, S. (2019). *Gestion des ressources en eau au Maroc : D'une simple lutte contre la dégradation à l'étude faisabilité des Paiements pour les Services Environnementaux (PSE)*. https://doi.org/10.5281/ZENODO.3543761

Ehsanzadeh, E., El Adlouni, S., & Bobée, B. (2010). Frequency Analysis Incorporating a Decision Support System for Hydroclimatic Variables. *Journal of Hydrologic Engineering*, *15*, 869-881. https://doi.org/10.1061/ASCÊHE.1943-5584.0000261

El Adlouni, S., & Bobée, B. (2014). *Analyse fréquentielle hydrologique : Logiciel Hyfran-plus (version -v2. 1)* [Guide d'utilisateur disponible avec la version Démo]. http://www.wrpllc.com/books/HyfranPlus/indexhyfranplus3.html

El Adlouni, S., Thiombiano, A. N., St-Hilaire, A., El-Jabi, N., & Caissie, D. (2011). *Caractérisations des hydrogrammes de crues pluviales sur des petits bassins versants forestiers*.

El Fellah Idrissi, B., Cherai, B., Hinaje, S., & Mehdi, K. (2017). La variabilité climatique et son influence sur les ressources en eau dans la partie septentrionale du Moyen Atlas Marocain : Cas des causses de Sefrou et de l'Anoceur. *Larhyss Journal*, *32*, 155-179.

El Ghachi, M. (2007). *La Seille : Un système fluvial anthropisé (Lorraine, France)* [Thèse de doctorat]. Metz.

El Ghachi, M., & Morchid, F. Z. (2015). Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique. *J. Mater. Environ. Sci*, *6*(11), 3346-3358.

El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R., Rais, J., & Baghdadi, M. E. (2019). Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *13*, 361-374. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.004

El Jihad, M.-D. (2001). L'eau de la montagne et le pouvoir étatique au Maroc : Entre le passé et le présent//The water from the mountains and the State power in Morocco : between past and present. *Annales de géographie*, *110*(622), 665-672. https://doi.org/10.3406/geo.2001.1708

El Jihad, M.-D. (2003). Les sécheresses saisonnières dans le haut bassin de l'Oum-er-Rbia (Maroc central) : Aspects et fréquences. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, *14*(3), 157-167.

El Jihad, M.-D. (2010). Les difficultés de gestion des ressources « naturelles » et de développement rural dans un milieu anthropisé : L'expérience du Projet Oued Srou (Maroc central). *Norois. Environnement, aménagement, société*, *216*, Article 216. https://doi.org/10.4000/norois.3320

El Jihad, M.-D. E. (2003). *Les sécheresses saisonnières dans le haut bassin de l'Oum-er-Rbia (Maroc central) : Aspects et fréquences*. *14*, 23.

El Jihad, M.-D. E. (2016). Changement climatique et développement rural dans les montagnes du Moyen-Atlas et leurs bordures (Maroc). *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, *104-4*, Article 104-4. https://doi.org/10.4000/rga.3373

El Khalki, E. M., Tramblay, Y., Hanich, L., Marchane, A., Boudhar, A., & Hakkani, B. (2021). Climate change impacts on surface water resources in the Oued El Abid basin, Morocco. *Hydrological Sciences Journal*, *66*(15), 2132-2145. https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1982137

El Khalki, Y. (2001). *Les hydrosystèmes karstiques des causes du SW du Moyen Atlas : Etude hydrologique et hydrochimique (Ain Leuh-El Hammam, Ajdir et sources de l'Oum-er-Rbia)* [Doctorat d'État]. Université Cadi Ayad - FLSH - Béni Mellal.

El Moçayd, N., Kang, S., & Eltahir, E. A. B. (2020). Climate change impacts on the Water Highway project in Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences*, *24*(3), 1467-1483. https://doi.org/10.5194/hess-24-1467-2020

El Orfi, T., El Ghachi, M., & Lebaut, S. (2020a). Contributions of remote sensing in the diachronic study of the spatial and temporal evolution of the Ahmed El Hansali dam water reservoir from 2002-03 to 2018-19. *E3S Web of Conferences*, *183*, 10 p. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018302004

El Orfi, T., El Ghachi, M., & Lebaut, S. (2020b). Variabilité des précipitations dans le bassin versant de l'oued Oum ErRbia en amont du barrage Ahmed El Hansali. *Renforcement de la résilience des hydrosystèmes face aux changements globaux: « de la mesure hydrologique aux modèles de gestion »*, 47-52.

El Orfi, T., El Ghachi, M., Lebaut, S., & Gille, E. (2021a). *Evaluation des ressources en eau dans le bassin amont de l'Oum Er Rbia (Maroc) sur la période 1975-2015 et prospective*. pp.164-169.

El Orfi, T., El Ghachi, M., Lebaut, S., & Gille, E. (2021b). Les sources du lac de l'Oum Er-Rbia : Méthodes hydrométriques et application (2019-2020). In *Monitoring dans le bassin de l'Oum Er-Rbia (Maroc) : Retours d'expériences en hydro-climatologie: Vol. I* (p. 15-25).

Elbouqdaoui, K., Haida, S., Aboulabbes, O., Benaabidat, L., Zahraoui, M., & Ozer, A. (2006). Evolution du régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant du srou. *Geo-Eco-Trop, 41-50*.

Elhafid, D., & Akdim, B. (2018). Quantification de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrée dans un SIG. Cas du bassin versant de l'oued Isly (Maroc Oriental). *European Scientific Journal, ESJ*, *14*(5), 373. https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n5p373

Ellatifi, M. (2012). *L'économie de la forêt et des produits forestiers au Maroc : Bilan et perspectives* [Thèse de doctorat]. Université de Montesquieu - Bordeau IV.

El-Sadek, A., & Irvem, A. (2014). Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *38*, 515-530. https://doi.org/10.3906/tar-1309-89

Emberger, L. (1939). *Aperçu général sur la végétation du Maroc : Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1:1.500.000*. Mémoire hors série de la Société des sciences naturelles du Maroc.

Emberger, L. (1964). La position phytogéographique du Maroc dans l'ensemble méditerranéen. *Al Awamia (MA)*, *12*, 16.

Ennassiri, B., & Mouak, S. (2021). Modélisation du risque d'érosion des sols dans le bassin versant de N'Fiss : Utilisation de l'Equation Universelle Révisée des Pertes en Sols (RUSLE). *Revue Marocaine de Géomorphologie*, *5*, 36-47.

Erhard-Cassegrain, A., & Margat, J. (1979). *Introduction à l'économie générale de l'eau* (79 SGN 329 HYD; p. 377). Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Erraioui, L., Mafhoum, N., Taia, S., Chao, J., El Mansouri, B., Haida, S., & Taj-Eddine, K. (2022). Assessment of the relative impacts of climate changes and anthropogenic forcing on Ouergha watershed hydrology (North-East of Morocco). *E3S Web of Conferences*, *336*, 00027. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233600027

Er-Rami, A., & Touhami, F. (2022). Tourisme durable dans la région Béni Mellal-Khénifra : Quelle contribution au développement économique de la région ? *African Scientific Journal*, *3*(10), 276-295. https://doi.org/10.5281/ZENODO.6367839

Es-sdiqui, A., & Sabri, N. (2022). *Mise en valeur des sites d'intérêt touristique de la province de Khénifra* (p. 83). Province de Khénifra et Agence Urbaine de Khénifra.

Etebaai, I., Damnati, B., Benhardouze, H., Benhardouze, O., Reddad, H., Maatouk, M., & Taieb, M. (2008). L'environnement du lac Ifrah (Moyen Atlas, Maroc) : Physico-chimie des eaux et sédimentation actuelle. *Africa Geoscience Review*, *15*, 303-317.

Et-Tobi, M., M'Hirit, O., & Benzyane, M. (2008). *Changements climatiques, dégradations et dépérissements : Arguments et nouveaux outils pour une réforme de la sylviculture des cédraies au Maroc*. 14.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*(5), 1937-1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The New Blue and Green Water Paradigm : Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *132*(3), 129-132. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129)

FAO. (2015). *Profil de Pays—Maroc* (p. 21). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

FAO. (2003). *FAO Digital Soil Map of the World (DSMW) | Terres et eaux | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/fr/c/1026564/

FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, & JRC. (2009). Harmonized World Soil Database—Version 1.1. *FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.*, 43.

FAO, UNEP, & UNESCO. (1979). *A provisional methodology for soil degradation assessment. Methode provisoire pour l'evaluation de la degradation des sols*. FAO/UNEP/UNESCO.

Fassnacht, S. R., & Soulis, E. D. (2002). Implications during transitional periods of improvements to the snow processes in the land surface scheme - hydrological model WATCLASS. *Atmosphere-Ocean*, *40*(4), 389-403. https://doi.org/10.3137/ao.400402

Fathi, M. M., Awadallah, A. G., & Aldahshoory, W. (2023). An Improved Monthly Water Balance GR2M Model with a Seasonally Variable Parameter. *Journal of Hydrology*, *617*, 129127. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129127

Fedan, B. (1988). *Évolution géodynamique d'un basin intraplaque dur décrochements : Le Moyen Atlas (Maroc) durant le Méso-Cénozoïque*. Thèse ès-Science, Rabat.

FEE. (2020). *Changing Together Eco-Schools 1994-2019* (p. 64-105). Foundation for Environmental Education.

Flahault, É., & Robic, P. (2020). Les associations d'environnement partenaires privilégiés des pouvoirs publics : Un paradoxe qui dynamise la gestion de l'environnement. In A. Dussuet & J.-M. Lauzanas (Éds.), *L'économie sociale entre informel et formel : Paradoxes et innovations* (p. 183-198). Presses universitaires de Rennes. https://doi.org/10.4000/books.pur.44874

Flores, N., Rodriguez, R., Yepez, S., Osores, V., Rau, P., Rivera, D., & Balocchi, F. (2021). Comparison of Three Daily Rainfall-Runoff Hydrological Models Using Four Evapotranspiration Models in Four Small Forested Watersheds with Different Land Cover in South-Central Chile. *WATER*, *13*(22), 3191. https://doi.org/10.3390/w13223191

Flower, R. J., & Foster, I. D. L. (1992). Climatic Implications of Recent Changes in Lake Level at Lac Azigza (morocco). *Bulletin De La Societe Geologique De France*, *163*(1), 91-96.

Flower, R. J., Stevenson, A. C., Dearing, J. A., Foster, I. D. L., Airey, A., Rippey, B., Wilson, J. P. F., & Appleby, P. G. (1988). Catchment disturbance inferred from paleolimnological studies of three contrasted sub-humid environments in Morocco. *Journal of Paleolimnology*, *1*(4), 293-322. https://doi.org/10.1007/BF00184003

François, D., Gille, E., & Zumstein, J.-F. (1993). Analyse des séries chronologiques et application aux données hydroclimatologiques. *L'Eau, la Terre et les Hommes.*, 137-146.

François, D., & Sary, M. (1994). Intérêt des profils hydrologiques d'étiage pour la détermination des débits de référence au droit des ouvrages hydrauliques (exemple de la Haute Meurthe dans les Vosges). *Revue de Géographie Alpine*, *82*(2), 37-44. https://doi.org/10.3406/rga.1994.3748

Fugazza, D., Manara, V., Senese, A., Diolaiuti, G., & Maugeri, M. (2021). Snow cover variability in the greater alpine region in the modis era (2000–2019). *Remote Sensing*, *13*(15). Scopus. https://doi.org/10.3390/rs13152945

Gallego, F., Camba Sans, G., Di Bella, C. M., Tiscornia, G., & Paruelo, J. M. (2023). Performance of real evapotranspiration products and water yield estimations in Uruguay. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *32*, 101043. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101043

Gamez, P., & Zumstein, J. F. (1993). Méthode de détermination des débits de base et de ruissellement d'un cours d'eau, L'eau, la terre et les hommes – Hommage à René Frécaut. *Presse Universitaire de Nancy*, pp 113-120.

Garba, S. I., Ebmeier, S. K., Bastin, J.-F., Mollicone, D., & Holden, J. (2023). Wetland mapping at 10 m resolution reveals fragmentation in southern Nigeria. *Wetlands Ecology and Management*, *31*(3), 329-345. Scopus. https://doi.org/10.1007/s11273-023-09919-2

Garcia, P. F. (2016). *Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage*. Université Pierre et Marie Curie.

Gaume, E. (2002). *Hydrologie : Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit* (p. 45 p.). Ecole Nationale des ponts et Chaussées.

George, P., & Verger, F. (2000). *Dictionnaire de la géographie*. Editions PUF.

Gérard, R. (2009). Education à l'environnement vers un Développement durable. Réseau et mouvement. *Le Sociographe*, *29*(2), 27-37. https://doi.org/10.3917/graph.029.0027

Ghadbane, O. (2022). *Étiage et tarissement dans le bassin versant de l'oued Srou (amont Oum Er Rbia-Maroc) (1976-2019) : Détermination, analyse et impact*. Université Soultan Moulay Slimane.

GIEC. (2013). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V; p. 1552). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

GIEC. (2023). *AR6 Synthesis Report* (Rapport de synthèse 6; p. 85). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, *33*(8), 4. https://doi.org/10.1029/2006GL025734

Giorgi, F. (2019). Thirty Years of Regional Climate Modeling : Where Are We and Where Are We Going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(11), 5696-5723. https://doi.org/10.1029/2018JD030094

Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*(1), 467-490. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217

Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, *63*(2), 90-104. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, *202*, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Grusson, Y. (2016). *Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne* [Thèse de doctorat]. Université de Toulouse.

Gruzelle, A., & Lebaut, S. (2022). Démarche d'analyse et de diagnostic du risque de glissement de terrain : De l'identification à une mesure proactive. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, *Volume 17*, Article Volume 17. https://doi.org/10.4000/physio-geo.14697

Gudulas, K., Voudouris, K., Soulios, G., & Dimopoulos, G. (2013). Comparison of different methods to estimate actual evapotranspiration and hydrologic balance. *Desalination and Water Treatment*, *51*(13-15), 2945-2954. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.748443

Guennoun, S. (1929). *La montagne Berbère : Les Aït Oumalou et le pays Zaïan (Traduit par Boukabout, 2001)*. Comité de l'Afrique française.

Gumuchian, H., & Marois, C. (2018). Chapitre 5. Les principales méthodes de collecte de données. In *Initiation à la recherche en géographie : Aménagement, développement territorial, environnement* (p. 239-263). Presses de l'Université de Montréal. https://doi.org/10.4000/books.pum.14799

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, *377*(1), 80-91. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Gutowski Jr., W. J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H.-S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T., & Tangang, F. (2016). WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX) : A diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, *9*(11), 4087-4095. https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016

GWP. (2000). *La gestion intégrée des ressources en eau* (4; p. 80). Global Water Partnership, Stockholm. Suède.

Habib, E., Haile, A., Sazib, N., Zhang, Y., & Rientjes, T. (2014). Effect of Bias Correction of Satellite-Rainfall Estimates on Runoff Simulations at the Source of the Upper Blue Nile. *Remote Sensing*, *6*(7), 6688-6708. https://doi.org/10.3390/rs6076688

Hadri, A., Saidi, M. E. M., El Khalki, E. M., Aachrine, B., Saouabe, T., & Elmaki, A. A. (2022a). Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region. *Journal of Water and Climate Change*, jwc2022039. https://doi.org/10.2166/wcc.2022.039

Hadri, A., Saidi, M. E. M., El Khalki, E. M., Aachrine, B., Saouabe, T., & Elmaki, A. A. (2022b). Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region. *Journal of Water and Climate Change*, *13*(6), 2414-2442. https://doi.org/10.2166/wcc.2022.039

Hadria, R., Benabdelouahab, T., Elmansouri, L., Gadouali, F., Ouatiki, H., Lebrini, Y., Boudhar, A., Salhi, A., & Lionboui, H. (2019). Derivation of air temperature of agricultural areas of Morocco from remotely land surface temperature based on the updated Köppen-Geiger climate classification. *Modeling Earth Systems and Environment*, *5*(4), 1883-1892. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00645-4

Hadria, R., Benabdelouahab, T., Mahyou, H., Balaghi, R., Bydekerke, L., El Hairech, T., & Ceccato, P. (2018). Relationships between the three components of air temperature and remotely sensed land surface temperature of agricultural areas in Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, *39*(2), 356-373. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1385108

Haghe, J.-P. (2017). L'eau comme ressource. In A. Euzen, C. Jeandel, & R. Mosseri (Éds.), *L'eau à découvert* (p. 32-33). CNRS Éditions. https://doi.org/10.4000/books.editionscnrs.9773

Haider, H., Zaman, M., Liu, S., Saifullah, M., Usman, M., Chauhdary, J. N., Anjum, M. N., & Waseem, M. (2020). Appraisal of Climate Change and Its Impact on Water Resources of Pakistan : A Case Study of Mangla Watershed. *Atmosphere*, *11*(10), Article 10. https://doi.org/10.3390/atmos11101071

Hajhouji, Y. (2018). *Modélisation hydrologique du bassin versant de l'oued Rheraya et sa contribution à la recharge de la nappe du Haouz (bassin du Tensift, Maroc)* [Thèse de doctorat]. Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2016). *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid* [jeu de données]. NASA National Snow and Ice Data Center DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006

Hamid, M., & El Ghachi, M. (2023). Variabilité de la température dans le bassin hydraulique d'Oum Er Rbia (Maroc), durant la période (1990-2020) : Étude des anomalies et des tendances. *Revue Internationale de La Recherche Scientifique (Revue-IRS)*, *1*(2), Article 2. https://doi.org/10.5281/zenodo.7842585

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, *342*(6160), 850-853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

Harbouze, R., Pellissier, J.-P., Rolland, J.-P., & Khechimi, W. (2019). *Rapport de synthèse sur l'agriculture au Maroc* (p. 105) [Rapport de recherche]. CIHEAM-IAMM.

Harraou, K. (2019). *Tableau de bord sectoriel de l'économie Marocaine* (p. 102). Direction des Etudes et des Prévisions Financières.

HCP. (2006a). *Prospective « Maroc 2030 » : Gestion durable des ressources naturelles et de la biodiversité au Maroc* (p. 118). Haut Commissariat au Plan.

HCP. (2006b). *Statistiques environnementales au Maroc* (p. 108). Haut Commissariat au Plan, Rabat - Maroc.

Hedrick, A. R., Marks, D., Havens, S., Robertson, M., Johnson, M., Sandusky, M., Marshall, H., Kormos, P. R., Bormann, K. J., & Painter, T. H. (2018). Direct Insertion of NASA Airborne Snow Observatory-Derived Snow Depth Time Series Into the *iSnobal* Energy Balance Snow Model. *Water Resources Research*, *54*(10), 8045-8063. https://doi.org/10.1029/2018WR023190

Herrera, S., Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., & Gutiérrez, J. M. (2020). Evaluation of the EURO-CORDEX Regional Climate Models Over the Iberian Peninsula : Observational Uncertainty Analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(12). https://doi.org/10.1029/2020JD032880

Hiez, G. (1977). L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, *XIV*(2), pp 129-172.

Hingray, B., Picouet, C., Musy, A., & Hubert, P. (2009). *Hydrologie 2 Une science pour l'ingénieur* (METZ - BRIDOUX - BU). Presses polytechniques et universitaires romandes.

Hossayni, A. (1983). *Foret d'Ajdir région de Khenifra contribution à L'étude de la productivité et du comportement du Cèdre de l'Atlas (Cedrus Atlantica Menetti) et introduction à la gestion sylvicole.* (Mémoire de 3ème cycle 83-0594; p. 120). IAV.

Htitiou, A., Boudhar, A., Chehbouni, A., & Benabdelouahab, T. (2021). National-Scale Cropland Mapping Based on Phenological Metrics, Environmental Covariates, and Machine Learning on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, *13*(21), 4378. https://doi.org/10.3390/rs13214378

Huffman, G., & Bolvin, D. (2015). *Real-time TRMM multi-satellite precipitation analysis data set documentation* (p. 49 p.). NASA. https://gpm.nasa.gov/resources/documents

Hufty, A. (2001). *Introduction à la climatologie*. Presses Université Laval.

Hume, T., & Barry, J. (2015). Environmental Education and Education for Sustainable Development. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 7. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.91081-X

IRES. (2014). *Vulnérabilités climatiques et stratégies de développement : Synthèse et recommandations stratégiques pour une prise en compte du risque « climat » dans les politiques et stratégies sectorielles* (p. 52). Institut Royal Des Etudes Stratégiques.

IRES. (2020). *La question de l'eau au Maroc selon l'approche « nexus » dans le contexte du changement climatique* (p. 174). Institut Royal Des Etudes Stratégiques.

Jackson, E. K., Roberts, W., Nelsen, B., Williams, G. P., Nelson, E. J., & Ames, D. P. (2019). Introductory overview : Error metrics for hydrologic modelling – A review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption. *Environmental Modelling & Software*, *119*, 32-48. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.05.001

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., … Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX : New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, *14*(2), 563-578. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2

Jacquet, J. (1960). Applications de la méthode de l'hydrogramme unitaire à quelques cours d'eau français. *La Houille Blanche*, 857-871. https://doi.org/10.1051/lhb/1960018

Jaoul-Grammare, M., & Stenger, A. (2022). Quel rôle joue l'éducation dans les préoccupations environnementales ? *Cereq Bref*, *417*(1), 1-4.

Jaw, T., Li, J., Hsu, K., Sorooshian, S., & Driouech, F. (2015). Evaluation for Moroccan dynamically downscaled precipitation from GCM CHAM5 and its regional hydrologic response. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *3*, 359-378. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.008

Jellali, M. M. (1997). Développement des ressources en eau au Maroc. *Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens*, *31*, 51-68.

Jennan, L. (1986). Mutations récentes des campagnes du Moyen Atlas et de ses bordures. *Méditerranée*, *59*(4), 49-62. https://doi.org/10.3406/medit.1986.2426

Jonas, T., Marty, C., & Magnusson, J. (2009). Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, *378*(1-2), 161-167. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.021

Jose, D. M., & Dwarakish, G. S. (2020). Uncertainties in predicting impacts of climate change on hydrology in basin scale : A review. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(19), 1037. https://doi.org/10.1007/s12517-020-06071-6

Jouilil, I., Bitar, K., Salama, H., Amraoui, A., Mokssit, A., & Tahiri, M. (2013). Sècheresse météorologique au bassin hydraulique Oum Er Rbia durant les dernières décennies. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782*, *0*(12), Article 12.

Jouve, G., Vidal, L., Adallal, R., Rhoujjati, A., Benkaddour, A., Chapron, E., Tachikawa, K., Bard, E., Courp, T., Dezileau, L., Hebert, B., Rapuc, W., Simonneau, A., Sonzogni, C., & Sylvestre, F. (2019). Recent hydrological variability of the Moroccan Middle Atlas Mountains inferred from microscale sedimentological and geochemical analyses of lake sediments. *Quaternary Research*, *91*(1), 414-430. https://doi.org/10.1017/qua.2018.94

Jung, C.-G., Lee, D.-R., & Moon, J.-W. (2016). Comparison of the Penman-Monteith method and regional calibration of the Hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-simulated results in the Seolma-cheon basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, *61*(4), 793-800. https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943231

Kabbaj, A., & Combe, M. (1977). Le Moyen Atlas. Présentation du domaine atlasique. In *Ressources en Eau du Maroc, Tome III, Domaine atlasique et Sub-atlasique: Vol. III* (p. 29-159). Editions du service géologique du Maroc, Rabat.

Karleuša, B., Deluka-Tibljaš, A., & Ožani, N. (2009). The Role of Higher Education in Developing Awareness about Water Management. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, 607-614.

Kazamias, A.-P., Sapountzis, M., & Lagouvardos, K. (2022). Evaluation of GPM-IMERG rainfall estimates at multiple temporal and spatial scales over Greece. *Atmospheric Research*, *269*, 106014. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.106014

Kelleher, C. A., & Shaw, S. B. (2018). Is ET often oversimplified in hydrologic models? Using long records to elucidate unaccounted for controls on ET. *Journal of Hydrology*, *557*, 160-172. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.018

Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods 5th edn. *London: Oxford University Press*.

Kettani, A., Hammani, A., Taky, A., & Kuper, M. (2020). L'expérience de l'irrigation par aspersion dans les secteurs collectifs de la Grande Hydraulique du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, *8*(4), 399-410.

Khalid, H. W., Khalil, R. M. Z., & Qureshi, M. A. (2021). Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *24*(3, Part 2), 619-634. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.003

Khalighi-Sigaroodi, S., Ghaljaee, E., Moghaddam Nia, A., Malekian, A., & Zhang, F. (2019). Evaluation of TRMM-3B42V7 and Persiann-Cdr Daily-Precipitation Products for the Southern Slopes of Alborz Mountains, Iran. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *4218*, 1163-1167. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-1163-2019

Khalil, N. (2002). *Démarche méthodologique pour une meilleure connaissance de l'hydrologie et de la géochimie des acquifères de moyenne montagne : Cas du Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Moyen-Atlas, Maroc)* [Thèse de doctorat]. Université Cadi Ayad.

Khalil, N., Er Rouane, S., Mania, J., & Mudry, J. (2004). Essai de bilan hydrochimique sur les eaux du Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Moyen Atlas, Maroc). *Revue Francaise de Géothnique*, *109*, 75-85.

Khanchouli, M. (2021, mai 17). *Problématique environnementale : Un engagement résolu du Maroc pour l'éducation au développement durable | MapNews*. www.mapnews.ma. https://www.mapnews.ma/fr/actualites/social/probl%C3%A9matique-environnementale-un-engagement-r%C3%A9solu-du-maroc-pour-l%E2%80%99%C3%A9ducation-au

Kharchaf, Y., Rhinane, H., Kaoukaya, A., & Fadil, A. (2013). The Contribution of the Geospatial Information to the Hydrological Modelling of a Watershed with Reservoirs : Case of Low Oum Er Rbiaa Basin (Morocco). *Journal of Geographic Information System*, *05*(03), 258-268. https://doi.org/10.4236/jgis.2013.53025

Kim, H. W., Hwang, K., Mu, Q., Lee, S. O., & Choi, M. (2012). Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *16*(2), 229-238. https://doi.org/10.1007/s12205-012-0006-1

Kinana, E. (2022, novembre 6). Les contrats de nappe, entre acquis mitigés et contraintes. *http://fnh.ma*. https://fnh.ma/article/opinions-libres/les-contrats-de-nappe-entre-acquis-mitiges-et-contraintes

Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, *31*(1), 13-24. https://doi.org/10.1080/02626668609491024

Knippertz, P., Christoph, M., & Speth, P. (2003). Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *83*(1-2), 67-88. https://doi.org/10.1007/s00703-002-0561-y

Kulkarni, A., & Lowe, B. (2016). Random Forest Algorithm for Land Cover Classification. *Computer Science Faculty Publications and Presentations*. https://scholarworks.uttyler.edu/compsci_fac/1

Kuper, M., & Benouniche, M. (2017). *Le goutte à goutte comme innovation locale dans le domaine de l'irrigation* (p. 67-72). FAO, CIRAD, CIHEAM, IAMM. Rabat : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture-CIRAD.

Kuper, M., Faysse, N., Hammani, A., Hartani, T., Marlet, S., Hamamouche, M. F., & Ameur, F. (2016). Liberation or anarchy? The Janus nature of groundwater use on North Africa's new irrigation frontiers. In *Integrated groundwater management : Concepts, approaches and challenges / Jakeman, Anthony J. (ed.), Barreteau Olivier (ed.), Hunt Randall J. (ed.), Rinaudo Jean-Daniel (ed.), Ross Andrew (ed.)* (p. 583-615). Springer International Publishing.

Laaha, G. (2000). Zur Beurteilung der Genauigkeit von Niederwasserkennwerten. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, *80*, 61-68.

Laborde, J. P. (2009). *Eléments d'hydrologie de surface*. Ecole Polytechnique de l'Université de Nice - Sophia Antipolis.

Lahlou, N. (2021). *Les crues dans le haut bassin de l'Oum Er-Rbia (amont station Machraa Edahk) entre 1934-2018 : Identification, mesure, suivie et extraction (Maroc)* [Thèse de doctorat]. Université Soultan Moulay Slimane.

Lallement, C. (2017, juillet 17). Hydrométrie : Mesurer les débits d'une rivière, pourquoi et comment ? *Encyclopédie de l'environnement*.

Lamb, H., Damblon, F., & Maxted, R. W. (1991). Human Impact on the Vegetation of the Middle Atlas, Morocco, During the Last 5000 Years. *Journal of Biogeography*, *18*(5), 519. https://doi.org/10.2307/2845688

Lamb, H., Eicher, U., & Switsur, V. R. (1989). An 18,000-Year Record of Vegetation, Lake-Level and Climatic Change from Tigalmamine, Middle Atlas, Morocco. *Journal of Biogeography*, *16*(1), 65-74. https://doi.org/10.2307/2845311

Lamb, H., Roberts, N., Leng, M., Barker, P., Benkaddour, A., & van der Kaars, S. (1999). Lake evolution in a semi-arid montane environment : Responses to catchment change and hydroclimatic variation. *Journal of Paleolimnology*, *21*, 325-343. https://doi.org/10.1023/A:1008099602205

Lamb, H., & van der Kaars, S. (1995). Vegetational response to Holocene climatic change : Pollen and palaeolimnological data from the Middle Atlas, Morocco. *Holocene*, *5*, 400-408. https://doi.org/10.1177/095968369500500402

Lang, C. (2007). *Etiages et tarissements : Vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français.* [Thèse de doctorat]. Univeristé de Metz.

Lang, C., & Gille, E. (2006). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Norois*, *201*, 31-43. https://doi.org/10.4000/norois.1743

Lang Delus, C. (2011). Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo: European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.24827

Laoust, E. (1935). L'habitation chez les transhumants du Maroc Central. *Collection Hespéris, VI*, 421.

Laville, J.-L. (2001). 3. Les raisons d'être des associations. In *Association, démocratie et société civile* (p. 61-140). La Découverte. https://doi.org/10.3917/dec.lavil.2001.02.0061

Le Coz, J., Bechon, P. M., Camenen, B., & Dramais, G. (2014). Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, *5*, 31-39. https://doi.org/10.1051/lhb/2014047

Le Goulven, P., A. Aleman, M., & Osorno, I. (1988). Homogénéisation et régionalisation pluviométrique par la méthode du vecteur régional. *5ème Congrès d'Hydraulique de l'Equateur*, 95-118.

Le Matin. (2022, juillet 24). *Stress hydrique : Le Maroc finalise sa Stratégie à l'horizon 2050*. https://lematin.ma/express/2022/stress-hydrique-maroc-finalise-strategie-nationale-lhorizon-2050/378868.html

Le Moine, N. (2008). *Le bassin versant de surface vu par le souterrain : Une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?* Université Pierre et Marie Curie.

Lebaut, S. (2000). *L'apport de l'analyse et de la modélisation Hydrologiques de bassins versants dans la Connaissance du fonctionnement d'un aquifère Les grès d'Ardenne-Luxembourg* [Thèse de doctorat]. Univeristé de Metz.

Lebaut, S., Qadem, A., Akdim, B., Gille, E., & Laaouane, M. (2021). Estimation des réserves en eau souterraine régulatrices dans la partie moyen-atlasique du fleuve Sebou (Maroc). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, *384*, 169-173. https://doi.org/10.5194/piahs-384-169-2021

Lebel, T., Janicot, S., Aubertin, C., Bernoux, M., Dounias, E., Guégan, J.-F., Mazurek, H., Sultan, B., & Reinert, M. (Éds.). (2019). Chapitre 6. Les projections futures : Scénarios et incertitudes. In *Changement climatique : Quels défis pour le Sud ?* (p. 69-73). IRD Éditions. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.29424

Lecompte, M. (1986). *Biogéographie de la montagne marocaine : Le Moyen-Atlas central*. Editions du Centre national de la recherche scientifique : Presses du CNRS, diffusion.

Lecompte, M. (1988). La phytoclimatologie dynamique : Une approche différente de la nature du climat. *L'Espace géographique*, *17*(2), 109-121. https://doi.org/10.3406/spgeo.1988.2757

Lee, M.-H., Im, E.-S., & Bae, D.-H. (2019). Impact of the spatial variability of daily precipitation on hydrological projections : A comparison of GCM- and RCM-driven cases in the Han River basin, Korea. *Hydrological Processes*, *33*(16), 2240-2257. https://doi.org/10.1002/hyp.13469

Leininger-Frezal, C. (2011). L'éducation à l'environnement et/ou au développement durable : Un enjeu de la vie politique locale. *Éducation relative à l'environnement. Regards - Recherches - Réflexions*, *Volume 9*, Article Volume 9. https://doi.org/10.4000/ere.1503

Lemaitre-Basset, T., Oudin, L., Thirel, G., & Collet, L. (2022). Unraveling the contribution of potential evaporation formulation to uncertainty under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(8), 2147-2159. https://doi.org/10.5194/hess-26-2147-2022

Lemoine, A., Ramos, M.-H., & Andréassian, V. (2022). Climate change impacts on the management of hydropower reservoirs using guide curves. *LHB*, *108*(1), 2101393. https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2101393

Lenters, J., Anderton, J., Blanken, P., Spence, C., & Suyker, A. (2013). Assessing the Impacts of Climate Variability and Change on Great Lakes Evaporation. *Great Lakes Integrated Sciences and Assessments*, 11 pages.

Lepoutre, B., & Martin, J. (1967). Le Causse moyen atlasique. *Cahiers de la Recherche Agronomique*, *1*(24), 207-226.

Lettenmeyer, D. P. (1976). Detection of trends in water quality data from records with dependent observations. *Water Resources Research*, *12*(5), 1037-1046. https://doi.org/10.1029/WR012i005p01037

L'Hermite, P., Plagnes, V., Jost, A., Kern, G., Reilé, B., Chautard, C., & Descostes, M. (2022). Characterizing groundwater flow in a former uranium mine (Bertholène, France) : Present status and future considerations. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *44*, 101221. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101221

Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., Sun, B., & Zhang, X. (2013). A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, *5*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/rs5115530

Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H.-P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I., de Rosnay, P., Dumont, M., Girotto, M., Immerzeel, W. W., Jonas, T., Kim, E. J., Koch, I., Marty, C., Saloranta, T., Schöber, J., & De Lannoy, G. J. M. (2019). Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. *Nature Communications*, *10*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41467-019-12566-y

Liu, H., Hu, H., Liu, X., Jiang, H., Liu, W., & Yin, X. (2022). A Comparison of Different Water Indices and Band Downscaling Methods for Water Bodies Mapping from Sentinel-2 Imagery at 10-M Resolution. *Water*, *14*(17), 2696. https://doi.org/10.3390/w14172696

Lober, C., Fayne, J., Hashemi, H., & Smith, L. C. (2023). Bias correction of 20 years of IMERG satellite precipitation data over Canada and Alaska. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *47*, 101386. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101386

Loi n° 10-95. (1995). *Loi n° 10-95 sur l'eau*.

Loi n° 36-15. (2016). *Loi n° 36-15 relative à l'eau*.

Louali, A. (2019). *Le secteur agricole marocain : Tendances structurelles, enjeux et perspectives de développement* (p. 34). Direction des Etudes et des Prévisions Financières.

Loup, J. (1957). Note sur l'évaporation au Maroc. *Revue de géographie alpine*, *45*(2), 351-379. https://doi.org/10.3406/rga.1957.1901

Loup, J. (1962). L'Oum Er Rebia. Etudes sur une grande rivière des montagnes marocaines. *Revue de Géographie Alpine*, *50*(4), 519-555. https://doi.org/10.3406/rga.1962.1002

Lyra, A., & Loukas, A. (2023). Simulation and Evaluation of Water Resources Management Scenarios Under Climate Change for Adaptive Management of Coastal Agricultural Watersheds. *Water Resources Management*, *37*(6-7), 2625-2642. Scopus. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03392-x

Mahe, G., & L'Hôte, Y. (1995). Utilisation de la méthode du vecteur régional pour la description des variations pluviométriques interannuelles en Afrique de l'ouest et centrale. In L. Le Barbé & E. Servat (Éds.), *Régionalisation en hydrologie : Application au développement* (ORSTOM, p. 175-192).

Maire, R. (1924). *Études sur la végétation et la flore du Grand Atlas et du Moyen Atlas marocains* (Mémoires de la société des sciences naturelles du Maroc).

Mami, A. (2020). *Impact des changements climatiques sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau : Cas du bassin versant de la Tafna* [Thèse de doctorat]. Université de Toulouse.

Manaouch, M., Zouagui, A., & Fenjiro, I. (2021). A review of soil erosion modeling by R/USLE in Morocco : Achievements and limits. *E3S Web of Conferences*, *234*, 00067. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400067

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, *13*(3), 245. https://doi.org/10.2307/1907187

Mannschatz, T., Wolf, T., & Hülsmann, S. (2016). Nexus Tools Platform : Web-based comparison of modelling tools for analysis of water-soil-waste nexus. *Environmental Modelling & Software*, *76*, 137-153. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.031

MAP. (2021, juillet 23). *« Génération Green 2020-2030 » : Une stratégie consacrant la Vision Royale d'un secteur agricole résilient et durable*. Maroc.ma. https://www.maroc.ma/fr/actualites/generation-green-2020-2030-une-strategie-consacrant-la-vision-royale-dun-secteur-agricole

MAPMDREF. (2018). *L'agriculture marocaine en chiffres : 2018* (p. 31). Ministre de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts.

MAPMDREF. (2021). *Génération Green 2020-2030*. https://www.agriculture.gov.ma/fr/ministere/generation-green-2020-2030

Maraun, D., & Widmann, M. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781107588783

Marbouty, D. (1984). Les propriétés physiques de la neige. *La Houille Blanche*, *70*(8), 557-567. https://doi.org/10.1051/lhb/1984041

Marchane, A., Tramblay, Y., Hanich, L., Ruelland, D., & Jarlan, L. (2017). Climate change impacts on surface water resources in the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco). *Hydrological Sciences Journal*, *62*(6), 979-995. https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1283042

Margat, J. (1993). Les ressources en eau : Conception, évaluation, cartographie, comptabilité. *BRGM*, 141 p.

Marghadi, S. (2009). *Intégration des méthodes d'aide à la décision dans l'aménagement multifonctionnel des forêts au Maroc*. Université Catholique de Louvain.

Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C. M., & Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*, *48*, 29. https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743

Markhi, A., Laftouhi, N., Grusson, Y., & Soulaimani, A. (2019). Assessment of potential soil erosion and sediment yield in the semi-arid N′fis basin (High Atlas, Morocco) using the SWAT model. *Acta Geophysica*, *67*(1), 263-272. https://doi.org/10.1007/s11600-019-00251-z

Martin, J. (1981). *Le Moyen Atlas central : Étude géomorphologique*. Service géologique du Maroc.

Martin, J., Jover, H., Le Coz, J., Maurer, J., & Noin, D. (1964). *Géographie du Maroc* (Hatier). Hatier.

Mathevet, T. (2005). *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants* [Thèse de doctorat]. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

Mau, D. P., & Winter, T. C. (1997). Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, United States. *Ground Water*, *35*(2), 291-304.

Maurer, G. (1996). L'homme et les montagnes atlasiques au Maghreb. *Annales de Géographie*, *105*(587), 47-72. https://doi.org/10.3406/geo.1996.20726

Mazouzi, K., Hmaidi, A. E., Bouabid, R., & Faleh, E. M. E. (2021). Quantification de l'érosion hydrique, par la méthode RUSLE, au niveau du bassin versant de l'Oued Mikkès en amont du barrage Sidi Chahed (région de Meknès, Maroc). *European Scientific Journal ESJ*, *17*(14). https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n14p256

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425-1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. 6.

MDMEMEE. (2014). *Politique du changement climatique au Maroc* (p. 40). Ministère délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Environnement.

Meliho, M., Khattabi, A., Mhammdi, N., & Hongming, Z. (2016). Cartographie des risques de l'erosion hydrique par l'équation universelle revisee despertes en sols, la télédétection et les SIG dans le bassin versant de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal, ESJ*, *12*(32), 277-297. https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p277

MEMDD. (2017). *Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) 2030* (p. 60). Secrétariat d'Etat auprès du Ministre de l'Energie, des Mines et du Développement Durable, chargée du développement durable.

Menjour, F. (2018). *Contribution à l'étude morphostructurale et hydrique du moyen atlas (Maroc) par l'outil SIG et télédétection* [Thèse de doctorat]. Hassan II.

Menjour, F., Amraoui, F., & Remmal, T. (2016). Assessment of the spatio-temporal evolution of Aguelmam Sidi Ali lake using multitemporal Landsat imagery (Middle Atlas—Morocco). *Proceedings, 6th International Conference on Cartography and GIS*, *Vol. 1, 2*, 588-597.

Messager, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., & Schmitt, O. (2016). Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, *7*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/ncomms13603

Metahni, S., Coudert, L., Gloaguen, E., Guemiza, K., Mercier, G., & Blais, J.-F. (2019). Comparison of different interpolation methods and sequential Gaussian simulation to estimate volumes of soil contaminated by As, Cr, Cu, PCP and dioxins/furans. *Environmental Pollution*, *252*, 409-419. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.122

Mével, J.-P. (2006). *Dictionnaire Hachette* (01 éd.). Hachette.

M'Hirit, O. (1999). Le cèdre de l'Atlas à travers le réseau Silva Mediterranea «cèdre». Bilan et perspectives. *Forêt méditerranéenne*, *t. XX*(n° 3), 91-100.

M'hirit, O., & Benzyane, M. (2006). *Le cèdre de l'atlas*. Editions Mardaga.

Michard, A. (1976). *Éléments de Géologie Marocaine*. Editions du service géologique du Maroc, Rabat.

Michel, C. (1983). How to use single-parameter conceptual model in hydrology? *La Houille Blanche*, *69*(1), 39-44. https://doi.org/10.1051/lhb/1983004

Milewski, A., Seyoum, W. M., Elkadiri, R., & Durham, M. (2019). Multi-Scale Hydrologic Sensitivity to Climatic and Anthropogenic Changes in Northern Morocco. *Geosciences*, *10*(1), 22. https://doi.org/10.3390/geosciences10010013

Mimoun, K., Azizi, M., & houssaine, E. (2016). Etude hydrogéologique des sources Oum Errabiaa et lacs avoisinants : Quelle relation ? *Revue Interdisciplinaire*, *1*(3), 10.

Mjejra, M. (2015). *Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : Apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique* [Thèse de doctorat]. Univeristé de Renne 2.

Mleczko, M., & Mróz, M. (2018). Wetland Mapping Using SAR Data from the Sentinel-1A and TanDEM-X Missions : A Comparative Study in the Biebrza Floodplain (Poland). *Remote Sensing*, *10*(2), 78. https://doi.org/10.3390/rs10010078

Mockus, V. (1972). National Engineering Handbook, Section 4 : Hydrology. *US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC*, 127.

Mohsen, A., Elshemy, M., & Zeidan, B. A. (2018). Change detection for Lake Burullus, Egypt using remote sensing and GIS approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(31), 30763-30771. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8167-y

Mokhtari, N., Mrabet, R., Lebailly, P., & Bock, L. (2014). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue Marocaine Des Sciences Agronomiques et Veterinaires*, *2*, 50-66.

Molle, F. (Éd.). (2012). La GIRE : Anatomie d'un concept. In *La gestion intégrée des ressources en eau en Afrique subsaharienne : Paradigme occidental, pratiques africaines* (1re éd., p. 23-53). Presses de l'Université du Québec. https://doi.org/10.2307/j.ctv18pgvcx

Molle, F., Montginoul, M., El Fatouaki, S., & Touhmani, J. (2019). *Modernisation des périmètres irrigués au Maroc : Une solution aux effets contrastes pour les agriculteurs et la ressource en eau* (p. 47) [Projet CHAAMS].

Moniod, F. (1973). Étude hydrologique de l'Oum er R'bia (Maroc). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, *X*(2), 153-170.

Morel, J. (2007). *Les ressources en eau sur Terre : Origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d'horizon de la littérature* (p. 30) [Note de synthèse]. Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale.

Moreno-Guerrero, A.-J., Romero-Rodríguez, J.-M., López-Belmonte, J., & Alonso-García, S. (2020). Flipped Learning Approach as Educational Innovation in Water Literacy. *Water*, *12*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/w12020574

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. V., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885-900. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models : Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, *58*(6), 1763-1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Moriasi, D. N., Wilson, B. N., Douglas-Mankin, K. R., Arnold, J. G., & Gowda, P. H. (2012). Hydrologic and Water Quality Models : Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, *55*(4), 1241-1247. https://doi.org/10.13031/2013.42265

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*(7282), Article 7282. https://doi.org/10.1038/nature08823

Motschmann, A., Teutsch, C., Huggel, C., Seidel, J., León, C. D., Muñoz, R., Sienel, J., Drenkhan, F., & Weimer-Jehle, W. (2022). Current and future water balance for coupled human-natural systems – Insights from a glacierized catchment in Peru. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *41*, 101063. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101063

Mouatassime Sabri, E., Boukdir, A., El Meslouhi, R., Mabrouki, M., El Mahboul, A., Romaric Ekouele Mbaki, V., Zitouni, A., Baite, W., & Echakraoui, Z. (2017). Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in Oued El Abid Watershed, Morocco. *ATHENS JOURNAL OF SCIENCES*, *4*(3), 225-242. https://doi.org/10.30958/ajs.4-3-4

Moucha, A., Hanich, L., Tramblay, Y., Saaidi, A., Gascoin, S., Martin, E., Le Page, M., Bouras, E., Szczypta, C., & Jarlan, L. (2021). Present and Future High-Resolution Climate Forcings over Semiarid Catchments : Case of the Tensift (Morocco). *Atmosphere*, *12*(3), 370. https://doi.org/10.3390/atmos12030370

Mouelhi, S. (2003a). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier* [Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts].

Mouelhi, S. (2003b). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier* [Thèse de doctorat, Université Paris VI, ENGREF, Ecole des Mines en association avec l'IFP de Paris].

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006a). Linking stream flow to rainfall at the annual time step : The Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology*, *328*(1), 283-296. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.022

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006b). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, *318*(1), 200-214. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014

MTEDD. (2020). *4ème Rapport sur l'état de l'environnement du Maroc 2020* (p. 296). Ministère de la Transition Energétique et du Développement Durable.

Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, *115*(8), 1781-1800. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019

Musy, A., & Higy, C. (2004). *Hydrologie : Une science de la nature*. PPUR presses polytechniques.

Myers, D. T., Ficklin, D. L., Robeson, S. M., Neupane, R. P., Botero-Acosta, A., & Avellaneda, P. M. (2021). Choosing an arbitrary calibration period for hydrologic models : How much does it influence water balance simulations? *Hydrological Processes*, *35*(2), e14045. https://doi.org/10.1002/hyp.14045

Naciry, H. (2017). La gestion de l'eau au Maroc : Chronologie des fondements politiques, juridiques et institutionnels de la gestion de l'eau au Maroc. *Konrad-Adenauer-Stiftung*, 15.

Nadzri, M. I., & Hashim, M. (2014). Validation of MODIS Data for Localized Spatio-Temporal Evapotranspiration Mapping. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *18*(1), 012182. https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012182

Naik, B. C., & Anuradha, B. (2019). Time Series Analysis of Water Feature Extraction using Water Index Techniques from Landsat Remote Sensing Images. *2019 Third International conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 478-482. https://doi.org/10.1109/I-SMAC47947.2019.9032701

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, *10*(3), 282-290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas A&M Natural Resources Institute, College Station*, 647.

Nejjari, A. (2002). *La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin versant du Haut Sebou (Moyen Atlas septentrional—Maroc)* [These de doctorat]. Univeristé de Metz.

Nicolle, P., Pushpalatha, R., Perrin, C., Francois, D., Thiéry, D., Mathevet, T., Lay, M. L., Besson, F., Soubeyroux, J.-M., Viel, C., Regimbeau, F., Andréassian, V., Maugis, P., Augeard, B., & Morice, E. (2014). Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18*, 2829. https://doi.org/10.5194/hess-18-2829-2014

OCP. (2013). *Rapport développement durable 2013 : Population, Planète, Phosphate* (p. 53 p.). Office chérifien des phosphates.

Omar, G., Mohamed, E. G., & Ahmed, L. (2020). Amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'oued Srou : Mesures des débits et création d'une courbe de tarage pour l'année 2017 (Bassin de l'oued Oum Er Rbia-Maroc). *Renforcement de la résilience des hydrosystèmes face aux changements globaux: « de la mesure hydrologique aux modèles de gestion »*, 6.

OMM. (1994). *Guide des pratiques hydrologiques : Acquisition et traitment des données, analyses, prévision et autres applications.* OMM.

OMM. (2008a). Évaporation, évapotranspiration et humidité du sol. In *Guide des pratiques hydrologiques, volume I : Hydrologie—De la mesure à l'information hydrologique* (Edition 2008, mise à jour en 2020, p. 34).

OMM. (2008b). *Guide des pratiques hydrologiques, volume I : Hydrologie - De la mesure à l'information hydrologique* (Edition 2008, mise à jour en 2020). OMM.

OMM. (2011). *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues*.

OMM. (2012). *Glossaire international d'hydrologie*. Organisation météorologique mondiale.

OMM. (2016). *Manuel des indicateurs et indices de sécheresse* (1173; p. 52). Organisation météorologique mondiale (OMM) et Partenariat mondial pour l'eau (GWP).

OMM. (2017). *Guidelines for the Calculation of Climate Normals* (WMO-N° 1203; p. 29 p.). Organisation Météorologique Mondiale.

ONEEP. (2020a). *Schéma synoptique adduction Khénifra*. Office National de l'Electricité de l'Eau Potable.

ONEEP. (2020b). *Statistiques de la production eau potable 2013-2020*. Office National de l'Electricité de l'Eau Potable.

Onojeghuo, A. O., & Onojeghuo, A. R. (2023). Wetlands Mapping with Deep ResU-Net CNN and Open-Access Multisensor and Multitemporal Satellite Data in Alberta's Parkland and Grassland Region. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, *6*(1-2), 22-37. Scopus. https://doi.org/10.1007/s41976-023-00080-1

ONU. (2015). *Transformer notre monde : Le Programme de développement durable à l'horizon 2030* (p. 38). Nations Unies.

ONU. (2020). *Rapport sur les objectifs de développement durable 2020* (p. 68). Ntions Unies.

ONU-Environnement. (2018). *Progrès en matière de gestion intégrée des ressources en eau* (p. 8). Organisation des Nations Unies.

ORSTOM. (1995). *Aménagement de Tanafnit sur l'Oum Er Bia (Maroc) : Mise à jour de l'hydrologie* (p. 87). Montpellier : Hydroconsult International.

Otmane, A., Baba Hamed, K., & Bouanani, A. (2019). Apport de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin versant dans la modélisation hydrologique et les sous-produits du bilan hydrologique : Cas du bassin versant de l'aval Mekerra, Algérie. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *32*(2), 117-144. https://doi.org/10.7202/1065203ar

Otukei, J. R., & Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *12*, S27-S31. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.002

Ouadjane, Y., Ait Yacine, E.-A., Benzougagh, B., Nassiri, L., & Ibijbijen, J. (2021). Évaluation des risques d'érosion hydrique et cartographie des zones vulnérables par la méthode RUSLE couplée aux SIG et à la télédétection dans le bassin versant d'Agoudal en amont de la vallée d'Imilchil (Haut Atlas Central, Maroc). *European Scientific Journal, ESJ*, *17*(21), 66. https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n21p66

Ouadjane, Y., Bammou, M., Mimich, K., Benzougagh, B., Ibijbijen, J., & Nassiri, L. (2021). Quelle place de l'éducation à l'environnement et au développement durable dans les programmes scolaires au Maroc ? Cas de l'éducation familiale dispensée au secondaire collégial. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, *26*(01), 217-226.

Ouakhir, H. (2022). *Suivi et analyse spatio-temporelle des flux sédimentaires dans le bassin versant de Srou-Maroc : Application aux deux bassins représentatifs et expérimentaux de Talhiant et Mougeryberdan (2017-2020)* [Thèse de doctorat en cotutelle]. Université Soultan Moulay Slimane.

Ouassissou, R., Kuper, M., Hammani, A., & El Amrani, M. (2019). Le contrat de gestion participative pourrait-il résoudre la crise de gouvernance des eaux souterraines ? Cas de la nappe de Berrechid au Maroc. *Alternatives Rurales*, 14.

Ouatiki, H., Boudhar, A., Ouhinou, A., Arioua, A., Hssaisoune, M., Bouamri, H., & Benabdelouahab, T. (2019). Trend analysis of rainfall and drought over the Oum Er-Rbia River Basin in Morocco during 1970–2010. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(4), 128. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4300-9

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *Journal of Hydrology*, *303*(1-4), 290-306. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Oularbi, Y., Dahmani, J., & Mounir, F. (2022). The Contribution of GIS for the Modeling of Water Erosion, Using Two Spatial Approaches : The Wischmeier Model and SWAT in the High Oum Er-Rbia Watershed (Middle Atlas Region). In R. Saidi, B. El Bhiri, Y. Maleh, A. Mosallam, & M. Essaaidi (Éds.), *Advanced Technologies for Humanity* (p. 61-72). Springer International Publishing.

Paul, P. K., Zhang, Y., Ma, N., Mishra, A., Panigrahy, N., & Singh, R. (2021). Selecting hydrological models for developing countries : Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. *Journal of Hydrology*, *600*, 126561. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126561

Payraudeau, S. (2002). *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens* [Phdthesis, ENGREF (AgroParisTech)]. https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00005633

Penman, H. L. (1956). Evaporation : An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, *4*(1), Article 1. https://doi.org/10.18174/njas.v4i1.17768

Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Segura-Méndez, F., Pulido-Velazquez, D., & Srinivasan, R. (2019). Evaluating Hydrological Models for Deriving Water Resources in Peninsular Spain. *Sustainability*, *11*(10), Article 10. https://doi.org/10.3390/su11102872

Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative* [Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble].

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, *279*(1), 275-289. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*, 16.

Pi, X., Luo, Q., Feng, L., Xu, Y., Tang, J., Liang, X., Ma, E., Cheng, R., Fensholt, R., Brandt, M., Cai, X., Gibson, L., Liu, J., Zheng, C., Li, W., & Bryan, B. A. (2022). Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. *Nature Communications*, *13*(1), 5777. https://doi.org/10.1038/s41467-022-33239-3

Podgórski, J., Kinnard, C., Pętlicki, M., & Urrutia, R. (2019). Performance Assessment of TanDEM-X DEM for Mountain Glacier Elevation Change Detection. *Remote Sensing*, *11*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/rs11020187

Poff, N. L. (2002). Ecological response to and management of increased flooding caused by climate change. *Philosophical transactions of the royal society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, *360*(1796), 1497-1510.

Pomel, S., & Salomon, J.-N. (2019). Chapitre VII. Les déstabilisations écologiques et sociales, prise de conscience et solutions. In *La déforestation dans le monde tropical* (p. 83-103). Presses Universitaires de Bordeaux. https://doi.org/10.4000/books.pub.1415

Pouffary, S., Laboulaye, G., Antonini, A., Quefelec, S., & Dittrick, L. (2018). *Les défis du changement climatique en méditerranée*. ENERGIES 2050, FEMISE et Institut de la Méditerranée.

Pradhan, R. K., Markonis, Y., Vargas Godoy, M. R., Villalba-Pradas, A., Andreadis, K. M., Nikolopoulos, E. I., Papalexiou, S. M., Rahim, A., Tapiador, F. J., & Hanel, M. (2022). Review of GPM IMERG performance : A global perspective. *Remote Sensing of Environment*, *268*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112754

Pujos, A. (1966). *Les milieux de la cédraie marocaine. Etude d'une classification des cédraies du Moyen Atlas et du Rif en fonction des facteurs du sol et du climat et de la régénération naturelle actuelle dans ces peuplements.* (Tome 8; p. 283). Annales de la recherche forestier au Maroc.

Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., & Andréassian, V. (2011). A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, *411*(1), 66-76. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.034

Qadem, A. (2015). *Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc).* [Thèse de doctorat]. Université de Lorraine.

Qadem, A., Lebaut, S., & Qadem, Z. (2023). Exploration of Karst Groundwater and Surface Water in Central Middle Atlas, Morocco. In *EuroKarst 2022, Málaga* (p. 25-31). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16879-6_4

Qadem, Z. (2020). *Hydrologie des oueds Fès et Mikkes drainant le plateau de Saiss et ses bordures moyennes atlasiques* [Thèse de doctorat]. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

Qadem, Z., Qadem, A., Obda, K., & Lasri, M. (2019). Variabilité climatique et son impact sur l'organisation spatiotemporelle des précipitations. Cas des bassins versants des Oueds Mikkès et Fès. Maroc. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, *3*(4), 253-260.

Quezel, P. (1998). Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : Signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt méditerranéenne, t. XIX*(n° 3), 243-260.

R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.* https://www.R-project.org/. https://www.R-project.org/

Rachdane, M., Khalki, E. M. E., Saidi, M. E., Nehmadou, M., Ahbari, A., & Tramblay, Y. (2022). Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products in Sub-Saharan Morocco. *Water (Switzerland)*, *14*(20). Scopus. https://doi.org/10.3390/w14203336

Raible, C. C., Ziv, B., Saaroni, H., & Wild, M. (2010). Winter synoptic-scale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5. *Climate Dynamics*, *35*(2-3), 473-488. https://doi.org/10.1007/s00382-009-0678-5

Ramadhan, R., Yusnaini, H., Marzuki, M., Muharsyah, R., Suryanto, W., Sholihun, S., Vonnisa, M., Harmadi, H., Ningsih, A. P., Battaglia, A., Hashiguchi, H., & Tokay, A. (2022). Evaluation of GPM IMERG Performance Using Gauge Data over Indonesian Maritime Continent at Different Time Scales. *Remote Sensing*, *14*(5). Scopus. https://doi.org/10.3390/rs14051172

Rango, A., & Arnoldus, H. M. J. (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*, 1-11.

Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Indrajeet Chaubey, & Arnold, J. G. (2016). CMhyd User Manual : Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies. *PURDUE University*, 17.

Ray, R., Das, A., Hasan, M. S. U., Aldrees, A., Islam, S., Khan, M. A., & Lama, G. F. C. (2023). Quantitative Analysis of Land Use and Land Cover Dynamics using Geoinformatics Techniques : A Case Study on Kolkata Metropolitan Development Authority (KMDA) in West Bengal, India. *Remote Sensing*, *15*(4). Scopus. https://doi.org/10.3390/rs15040959

Reille, M. (1976). Analyse pollinique de sédiments postglaciaires dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas Marocains : Premiers résultats. *Ecologia mediterranea*, *2*(1), 153-170. https://doi.org/10.3406/ecmed.1976.925

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 703.

Rhanem, M. (2011). Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, *Volume 5*, Article Volume 5. https://doi.org/10.4000/physio-geo.1983

Rhoujjati, A., Cheddadi, R., Taïeb, M., Baali, A., & Ortu, E. (2010). Environmental changes over the past c. 29,000 years in the Middle Atlas (Morocco) : A record from Lake Ifrah. *Journal of Arid Environments*, *74*(7), 737-745. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.09.006

Rhoujjati, A., Nourelbait, M., Benkaddour, A., Damnati, B., Baali, A., Taieb, M., Decobert, M., Malek, F., & Cheddadi, R. (2012). Significations paléoenvironnementales des dépôts du remplissage Holocène du lac Iffer (Moyen Atlas, Maroc). *Quaternaire*, *vol. 23/3*, 241-252. https://doi.org/10.4000/quaternaire.6300

Rifai, N., Khattabi, A., & Rhazi, L. (2015). Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d'une méthode de descente d'échelle statistique. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, *Volume 14 Numéro 3*, Article Volume 14 Numéro 3. https://doi.org/10.4000/vertigo.15474

Ringard, J., Becker, M., Seyler, F., & Linguet, L. (2015). Temporal and Spatial Assessment of Four Satellite Rainfall Estimates over French Guiana and North Brazil. *Remote Sensing*, *7*(12), Article 12. https://doi.org/10.3390/rs71215831

Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface* (ORSTROM).

Roche, M. (1986). *Dictionnaire français d'hydrologie de surface*. MASSON.

Roche, P.-A., Miquel, J., & Gaume, E. (2012a). *Hydrologie quantitative processus, modèles et aide à la décision.* Springer.

Roche, P.-A., Miquel, J., & Gaume, E. (2012b). *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0106-3

Rousselle, P. (1998). *Charte qualité de l'Hydrométrie : Code de bonnes pratiques* (p. 56). Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y., & Price, C. (2010). Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, *394*(1-2), 245-255. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.021

Ruggieri, G., Allocca, V., Borfecchia, F., Cusano, D., Marsiglia, P., & De Vita, P. (2021). Testing Evapotranspiration Estimates Based on MODIS Satellite Data in the Assessment of the Groundwater Recharge of Karst Aquifers in Southern Italy. *Water*, *13*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/w13020118

Running, S., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2019). *MOD16A2GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006* [jeu de données]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.006

Sa, C., Meng, F., Luo, M., Li, C., Wang, M., Adiya, S., & Bao, Y. (2021). Spatiotemporal variation in snow cover and its effects on grassland phenology on the Mongolian Plateau. *Journal of Arid Land*, *13*(4), 332-349. Scopus. https://doi.org/10.1007/s40333-021-0056-7

Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture : Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, *147*, 103-115. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008

Saidi, M. E., Daoudi, L., Aresmouk, M. E. H., & Blali, A. (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard, exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc). *Séchresse*, *14*(02), 107-114.

Salès-Wuillemin, E. (2006). *Méthodologie de l'enquête* (p. 45). Presses Universitaires de France. https://shs.hal.science/halshs-00903244

Sallak, B. (2019). *Les risques hydrologiques d'inondations et la problématique d'aménagement des territoires de piémont : Cas du dir de Taghzirt à Zaouit Echiekh, Province de Béni Mellal, Maroc* [Thèse de doctorat]. Université de Lorraine.

Sambou, S., Sane, M. L., Leye, I., Ndione, D. M., Kane, S., & Badji, M. L. (2021). Calage et validation de SWAT sur le bassin versant du Bafing (Fleuve Sénégal) en amont de BAFING MAKANA : Vers une application à la gestion du barrage de Manantali. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, *384*, 363-366. https://doi.org/10.5194/piahs-384-363-2021

Samuel, S., Dosio, A., Mphale, K., Faka, D. N., & Wiston, M. (2023). Comparison of multimodel ensembles of global and regional climate models projections for extreme precipitation over four major river basins in southern Africa—Assessment of the historical simulations. *Climatic Change*, *176*(5). Scopus. https://doi.org/10.1007/s10584-023-03530-3

Saouabe, T., El Khalki, E. M., Saidi, M. E. M., Najmi, A., Hadri, A., Rachidi, S., Jadoud, M., & Tramblay, Y. (2020). Evaluation of the GPM-IMERG Precipitation Product for Flood Modeling in a Semi-Arid Mountainous Basin in Morocco. *Water*, *12*(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/w12092516

Sarp, G., & Ozcelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using time series : A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*, *11*(3), 381-391. https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2016.04.005

Sauvage, C. (1963). Etages bioclimatiques du Maroc. *Atlas du Maroc. Notices explicatives. Planche n° 6b*.

Sayad, A., Chakiri, S., Chahlaoui, A., & Z, B. (2012). Impact des stress hydriques sur les potentiels de dayet Aoua (Moyen Atlas—Maroc). *ScienceLib Editions Mersenne 6*, *Volume 4*, 14.

Sayad, A., Chakiri, S., Martin, C., Bejjaji, Z., & Echarfaoui, H. (2011). Effet des conditions climatiques sur le niveau du lac Sidi Ali (Moyen Atlas, Maroc). *Physio-Géo*, *Volume 5*, 251-268. https://doi.org/10.4000/physio-geo.2145

Schilling, J., Freier, K. P., Hertig, E., & Scheffran, J. (2012). Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *156*, 12-26. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.021

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379-1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Senatore, A., Fuoco, D., Maiolo, M., Mendicino, G., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2022). Evaluating the uncertainty of climate model structure and bias correction on the hydrological impact of projected climate change in a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *42*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101120

Serbout, R. (2001). *Le bassin versant de l'oued Oum er Rébia en amont de Déchra el Oued (moyen-Atlas) : Contribution à l'étude des phénomènes hydro-climatiques* [These de doctorat, Nice]. https://www.theses.fr/2001NICE2043

Serin, L. (2014). L'environnement, une histoire associative jeune reflétant une préoccupation récente de notre société. *Pour*, *223*(3), 35-41. https://doi.org/10.3917/pour.223.0035

Sexton, J. O., Song, X.-P., Feng, M., Noojipady, P., Anand, A., Huang, C., Kim, D.-H., Collins, K. M., Channan, S., DiMiceli, C., & Townshend, J. R. (2013). Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover : Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error. *International Journal of Digital Earth*, *6*(5), 427-448. https://doi.org/10.1080/17538947.2013.786146

Shen, H., Tolson, B. A., & Mai, J. (2022). Time to Update the Split-Sample Approach in Hydrological Model Calibration. *Water Resources Research*, *58*(3), e2021WR031523. https://doi.org/10.1029/2021WR031523

Shen, Z., Yong, B., Yi, L., Wu, H., & Xu, H. (2022). From TRMM to GPM, how do improvements of post/near-real-time satellite precipitation estimates manifest? *Atmospheric Research*, *268*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106029

Shi, L., Feng, P., Wang, B., Liu, D. L., Zhang, H., Liu, J., & Yu, Q. (2022). Assessing future runoff changes with different potential evapotranspiration inputs based on multi-model ensemble of CMIP5 projections. *Journal of Hydrology*, *612*, 128042. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128042

Singh, P. (2001). *Snow and Glacier Hydrology*. Springer Science & Business Media.

Singh, S. K., Ibbitt, R., Srinivasan, M. S., & Shankar, U. (2017). Inter-comparison of experimental catchment data and hydrological modelling. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, *550*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.049

Singh, V. P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications.

Singh, V. P. (Éd.). (2011). *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*. Springer.

Slater, L. J., Thirel, G., Harrigan, S., Delaigue, O., Hurley, A., Khouakhi, A., Prosdocimi, I., Vitolo, C., & Smith, K. (2019). Using R in hydrology : A review of recent developments and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(7), 2939-2963. https://doi.org/10.5194/hess-23-2939-2019

SNE. (2009). *La Stratégie Nationale de l'Eau*.

Soulié-Märsche, I., Benkaddour, A., Khiati, N. E., Gemayel, P., & Ramdani, M. (2008). Charophytes, indicateurs de paléobathymétrie du lac Tigalmamine (Moyen Atlas, Maroc). *Geobios*, *41*(3), 435-444. https://doi.org/10.1016/j.geobios.2007.10.004

Souphihalath, T., Hayashi, K., Ooba, M., & Kobayashi, W. (2017). *Spatial Assessment of Land Cover Change and Ecosystem Services from a Case Study in Savannakhet Province, Laos*. 11.

Stone, R. P., & Hilborn, D. (2012). Universal Soil Loss Equation (USLE). *Factsheet*, *12-051*, 8.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *38*(6), 913-920. https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913

Strohmeier, S., López López, P., Haddad, M., Nangia, V., Karrou, M., Montanaro, G., Boudhar, A., Linés, C., Veldkamp, T., & Sterk, G. (2020). Surface Runoff and Drought Assessment Using Global Water Resources Datasets—From Oum Er Rbia Basin to the Moroccan Country Scale. *Water Resources Management*, *34*(7), 2117-2133. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02251-6

Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T., & Lea, J. (2010). Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes. *Journal of Hydrometeorology*, *11*(6), 1380-1394. https://doi.org/10.1175/2010JHM1202.1

Swain, S., Mishra, S. K., Pandey, A., Pandey, A. C., Jain, A., Chauhan, S. K., & Badoni, A. K. (2022). Hydrological modelling through SWAT over a Himalayan catchment using high-resolution geospatial inputs. *Environmental Challenges*, *8*, 100579. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100579

Tag, B. (1996). Les potentialités de développement du Moyen-Atlas oriental et leur appréciation par les acteurs locaux / Development possibilities in the eastern Middle Atlas Mountains and their assessment by local actors. *Revue de géographie alpine*, *84*(4), 51-60. https://doi.org/10.3406/rga.1996.3885

Tahiri, A. (2021). *Contribution à l'étude du système hydrogéologique des sources du Haut bassin de l'Oum-Er-Rabiaa (Moyen-Atlas, Maroc). Apport de l'analyse hydroclimatique, de la télédétection, de l'hydrochémie et du traçage isotopique* [Thèse de doctorat]. Université Hassan II Casa Blanca.

Tahiri, M., Tabyaoui, H., Hammichi, F. E., Achab, M., Tahiri, A., & Hadi, H. E. (2017). Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de La Terre*, *39*, 87-101.

Taia, S., Erraioui, L., Arjdal, Y., Chao, J., El Mansouri, B., & Scozzari, A. (2023). The Application of SWAT Model and Remotely Sensed Products to Characterize the Dynamic of Streamflow and Snow in a Mountainous Watershed in the High Atlas. *Sensors*, *23*(3), 1246. https://doi.org/10.3390/s23031246

Talbot, C. J., Bennett, E. M., Cassell, K., Hanes, D. M., Minor, E. C., Paerl, H., Raymond, P. A., Vargas, R., Vidon, P. G., Wollheim, W., & Xenopoulos, M. A. (2018). The impact of flooding on aquatic ecosystem services. *Biogeochemistry*, *141*(3), 439-461. https://doi.org/10.1007/s10533-018-0449-7

Tallaksen, L., & Lanen, H. A. J. van. (2004). *Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier.

Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, *165*(1-4), 349-370. https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R

Tamim, A. (2020). Le questionnaire et l'entretien comme instruments de recherche dans les sciences humaines et sociales. *Revue Linguistique et Référentiels Interculturels*, *1*(1), 52-57.

Tanouti, O. (2017). *La gestion intégrée des ressources en eau à l'épreuve du bassin versant : Cas du bassin du Tensift au Maroc* [These de doctorat, Paris 10]. http://www.theses.fr/2017PA100172

Tatalovich, Z., Wilson, J. P., & Cockburn, M. (2006). A Comparison of Thiessen Polygon, Kriging, and Spline Models of Potential UV Exposure. *Cartography and Geographic Information Science*, *33*(3), 217-231. https://doi.org/10.1559/152304006779077318

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *106*(D7), 7183-7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(4), 485-498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *365*(1857), 2053-2075. https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076

Termier, H. (1936). *Études géologiques sur le Maroc central et le Moyen-Atlas septentrional* (NANCY - SCIENCES ET TECHNIQUES - BU). Imprimerie officielle.

Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies : Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, *456-457*, 12-29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052

Thapa, S., Zhang, F., Zhang, H., Zeng, C., Wang, L., Xu, C.-Y., Thapa, A., & Nepal, S. (2021). Assessing the snow cover dynamics and its relationship with different hydro-climatic characteristics in Upper Ganges river basin and its sub-basins. *Science of the Total Environment*, *793*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148648

Till, C. (1986). L'influence des facteurs écologiques sur l'épaisseur des cernes du Cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica (End.) Carrière) au Maroc. *Ecologia Mediterranea*, *12*(3), 33-47. https://doi.org/10.3406/ecmed.1986.1172

Toebes, C., & Strang, D. D. (1964). On recession curves—Recession equations. *J. Hydrol. NZ*, *3*, 2-15.

Tong, R., Parajka, J., Komma, J., & Blöschl, G. (2020). Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of Hydrology*, *590*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125548

Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., El Adlouni, S., Neppel, L., & Servat, E. (2012). *Climate change effects on extreme precipitation events in Morocco*. 44.

Tramblay, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R., & Servat, E. (2013). High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies : A first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(10), 3721-3739. https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013

Tramblay, Y., Thiemig, V., Dezetter, A., & Hanich, L. (2016). Evaluation of satellite-based rainfall products for hydrological modelling in Morocco. *Hydrological Sciences Journal*, *61*(14), 2509-2519. https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154149

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, *8*(2), 127-150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Tuel, A., El Moçayd, N., Hasnaoui, M. D., & Eltahir, E. A. B. (2022). Future projections of High Atlas snowpack and runoff under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(3), 571-588. https://doi.org/10.5194/hess-26-571-2022

Turc, L. (1954). Le bilan d'eau des sols : Relation entre la precipitations, l'evaporation et l'ecoulement. *Annales Agronomiques, Série A*, *5*, 491.

UNESCO. (2009). *Water education for sustainable development*. 8.

UNESCO. (2012). Éduquer à l'eau Approches pluridisciplinaires. *Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture*, *15*.

UNESCO. (2017). *L'éducation en vue des objectifs de développement durable : Objectifs d'apprentissage* (p. 68). Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

UNESCO. (2020). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 : L'eau et les changements climatiques*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

UNESCO. (2021). *Lancement d'un cadre de l'UNESCO pour l'éducation en vue du développement durable pour 2030* (p. 5).

Vachon, F. (2009). *Estimation de l'équivalent en eau de la neige en milieu subarctique du Québec par télédétection micro-ondes passives* [Thèse de doctorat]. Université de Sherbrooke.

Vassilaki, D. I., & Stamos, A. A. (2020). TanDEM-X DEM : Comparative performance review employing LIDAR data and DSMs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *160*, 33-50. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.015

Vauchel, P. (2005). Hydraccess version 4.3. *Aide disponible sur le logiciel*.

Verlynde, N. (2018). Perception des risques et du changement climatique en zone littorale densément peuplée. *Environnement, Risques & Santé*, *17*(3), 278-293.

Vernoux, J. F., Wuilleumier, A., Seguin, J. J., & Doerfliger, N. (2007). *Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses—Guide méthodologique* (p. 293) [Rapport intermédiaire]. BRGM.

Vicente Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming : The standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. *Journal of Climate*, *23*(07), 52. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Vidal, L., Rhoujjati, A., Adallal, R., Jouve, G., Bard, E., Benkaddour, A., Chapron, E., Courp, T., Dezileau, L., Garcia, M., Hebert, B., Simmoneau, A., Sonzogni, C., Sylvestre, F., Tachikawa, K., Vallet-Coulomb, C., & Viry, E. (2016). Past hydrological variability in the Moroccan Middle Atlas inferred from lakes and lacustrine sediments. In J.-P. Moatti & S. Thiébault (Éds.), *The Mediterranean region under climate change* (p. 57-69). IRD Éditions. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.23016

Vilaseca, F., Narbondo, S., Chreties, C., Castro, A., & Gorgoglione, A. (2022). *A comparison between lumped and distributed hydrological models for daily rainfall-runoff simulation*. *958*(1). Scopus. https://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012016

Wang, Z., & Su, Y. (2020). Assessment of Soil Erosion in the Qinba Mountains of the Southern Shaanxi Province in China Using the RUSLE Model. *Sustainability*, *12*(5), Article 5. https://doi.org/10.3390/su12051733

Wawer, R., Nowocieñ, E., & Podolski, B. (2005). Real and Calculated K-USLE Erodibility Factor for Selected Polish Soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, *14*(5), 655-658.

White, J. W., Hoogenboom, G., Stackhouse, P. W., & Hoell, J. M. (2008). Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. *Agricultural and Forest Meteorology*, *148*(10), 1574-1584.

Williams, J. R. (1969). Flood Routing With Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*, *12*(1), 100-103. https://doi.org/10.13031/2013.38772

Williams, J. R. (1995). Chapter 25 : The EPIC model. In V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, 909-1000.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *The USDA Agricultural Handbook No. 537, Maryland.*

Woillez, M.-N. (2019). Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Observations, projections et impacts. In *Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Observations, projections et impacts* (p. 1-33). Agence française de développement. https://doi.org/10.3917/afd.woill.2019.01.0001

Wuebbles, D., Jacobs, J., Jurado, J., Hayhoe, K., Mearns, L. O., & Kotamarthi, R. (Éds.). (2021). Global Climate Models. In *Downscaling Techniques for High-Resolution Climate Projections : From Global Change to Local Impacts* (p. 19-39). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108601269.003

Yadav, S. K., Banerjee, A., Jhariya, M. K., Meena, R. S., Raj, A., Khan, N., Kumar, S., & Sheoran, S. (2022). Chapter 19—Environmental education for sustainable development. In M. K. Jhariya, R. S. Meena, A. Banerjee, & S. N. Meena (Éds.), *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (p. 415-431). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00010-7

Yamane, T. (1967). Statistics : An introductory analysis. *New York : Harper and Row*.

Yang, Z., Villarini, G., & Scoccimarro, E. (2022). Evaluation of the capability of regional climate models in reproducing the temporal clustering in heavy precipitation over Europe. *Atmospheric Research*, *269*, 106027. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106027

Zamrane, Z. (2016). *Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclmatiques au Maroc : Identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques : Cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift* [Thèse pour obtenir le grade de docteur]. Université de Montpellier.

Zhao, B., Sun, H., Yan, D., Wei, G., Tuo, Y., & Zhang, W. (2021). Quantifying changes and drivers of runoff in the Kaidu River Basin associated with plausible climate scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *38*, 100968. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100968

Zouagui, A., Sabir, M., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Benmansour, M. (2018). Modelisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental : Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc). *European Scientific Journal, ESJ*, *14*(3), 524. https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n3p524

Ztait, M. Y., Idriss Sammaa, Ghachi, M. E., Abdessalam Taleb, & Alami, F. Z. O. (2020). Water resources in light of climate variability in the Midlle Sebou, between the two stations Azzaba and Dar El Arsa. *African Scientific Journal*, *3*(3), 123-146.

Zumstein, J.-F. (1976). Contribution à l'élaboration de cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973. *La Houille Blanche*, *62*(6-7), 569-581.

Annexes

Annexes

Chapitre 2 : Le complexe physico-humain du HaB-OER

Annexe 2.1 Les équations de caractérisation physiographique et anthropique du HaB-OER

$K_C = \frac{P}{2\sqrt{\pi \times A}} = 0{,}28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$	*(Équation 2.1)*	avec : P : Périmètre du bassin (Km), A : Superficie du bassin (Km²).
$L = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1{,}12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}12}{Kc}\right)^2}\right]$ *(Équation 2.2)*		$l = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1{,}12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}12}{Kc}\right)^2}\right]$ *(Équation 2.3)*
$S_{(Pente\ Moy)} = \frac{\Delta H}{L}$	*(Équation 2.4)*	avec : ΔH: différence d'altitudes maximal et minimal (m); L : la longueur du rectangle équivalent (km).
$I_g = \frac{\Delta H_{\%}}{L}$	*(Équation 2.5)*	avec : $\Delta H_{\%}$: différence d'altitudes correspondant à 5% et 95% de la superficie du BV (m) ; L : la longueur du rectangle équivalent (km).
$D_s = I_g \times \sqrt{A}$	*(Équation 2.6)*	avec : I_g : l'indice de pente global (m/km) ; A : la superficie du bassin versant (km²).
$Dd = \frac{\sum Li}{A}$	*(Équation 2.7)*	avec : Li : longueur totale des cours d'eau en km ; A : la superficie du bassin versant en km².
$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L}$	*(Équation 2.8)*	avec : ΔH : dénivelée maximale du cours d'eau en m ; L : longueur du cours d'eau principal en km.
$Ta = \frac{(P_n - P_0)}{(P_m \times n)} \times 100$ d'après ORFE (2003)	*(Équation 2.9)*	avec : P_0 : population en début de période P_n : population à la fin de la période n : nombre d'années de la période P_m : population moyenne $(P_n - P_0) \div 2$

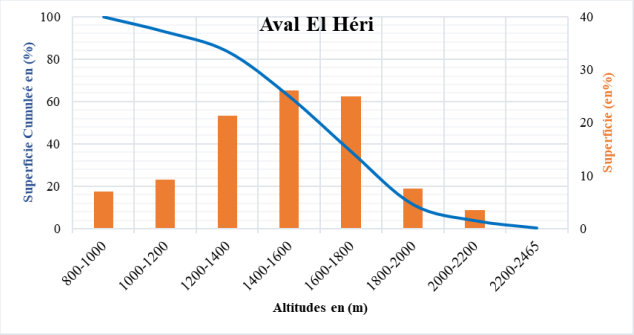
Annexe 2.2 Valeurs de Kc et type de réponse hydrologique (Roche, 1963)

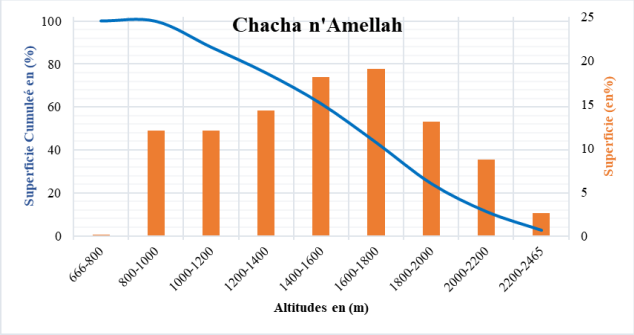
Indice Kc	Forme	Réponse
Kc < 1,25	Bassin compact	Réponse rapide
1,25 < Kc < 1,5	Bassin de forme moyenne	Réponse moyenne
Kc > 1,5	Bassin allongé	Réponse lente

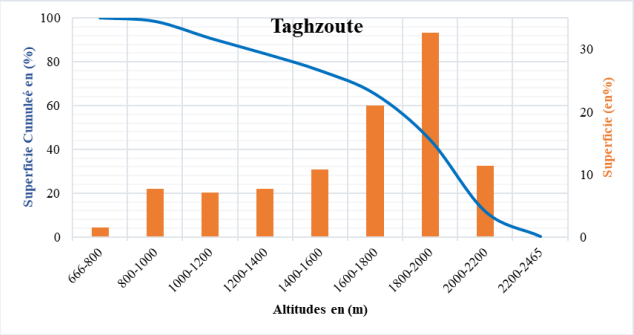
Annexe 2.3 Répartition des altitudes dans le HaB-OER

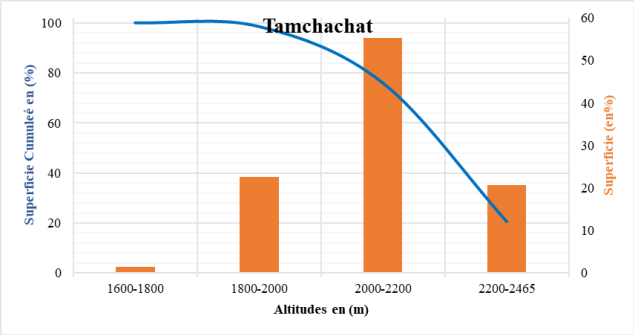
Tranches des altitudes en (m)	Superficies en (km²)	Pourcentage en (%)	Pourcentage Cumulé en (%)
666-800	125,66	3,71	100,00
800-1000	639,08	18,87	96,29
1000-1200	407,19	12,02	77,42
1200-1400	343,13	10,13	65,40
1400-1600	443,73	13,10	55,27
1600-1800	571,01	16,86	42,17
1800-2000	472,91	13,96	25,31
2000-2200	309,08	9,13	11,34
2200-2465	75,13	2,22	2,22

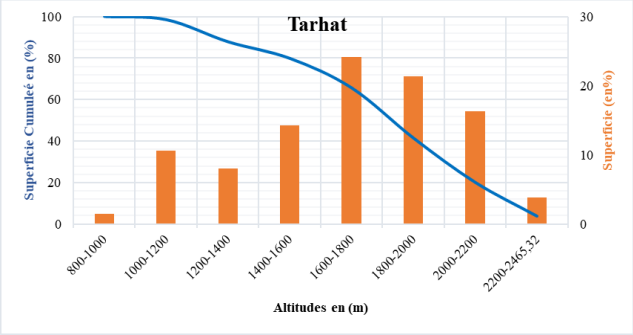
Annexe 2.4 Courbe hypsométrique et histogramme des fréquences des sous bassins du HaB-OER











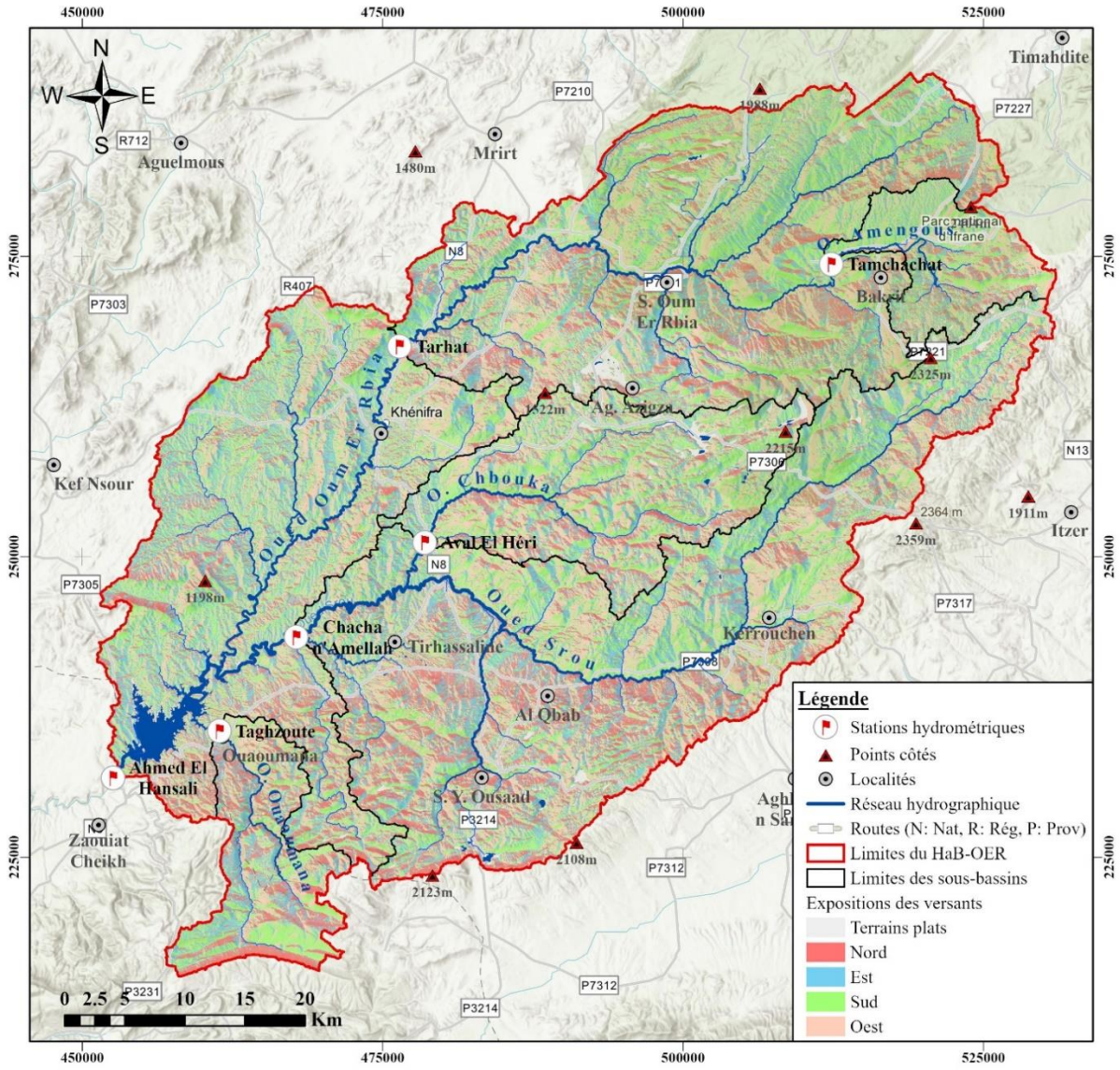
Annexe 2.5 Classification du relief selon la dénivelée spécifique (Ds) par l'ORSTOM

Type de relief	Dénivelée spécifique
Relief faible	Ds < 50 m
Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
Relief fort	100 m < Ds

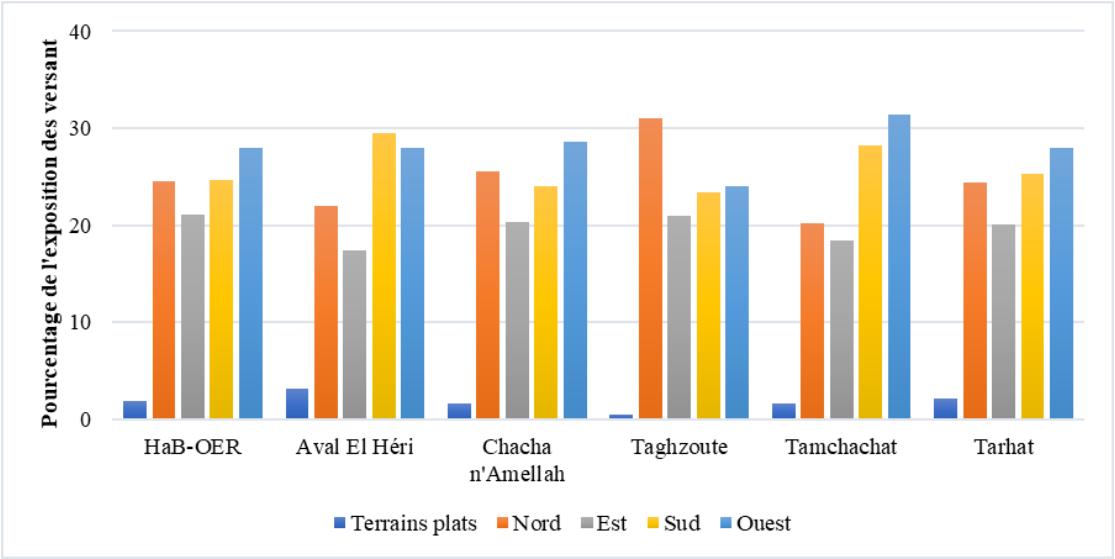
Annexe 2.6 Classes de pentes et leurs interprétations (Vernoux et al., 2007)

Classes des pentes	Reliefs
< 5°	Pente faible
5° - 15°	Pente moyenne
15° - 50°	Pente forte
> 50°	Pente très forte

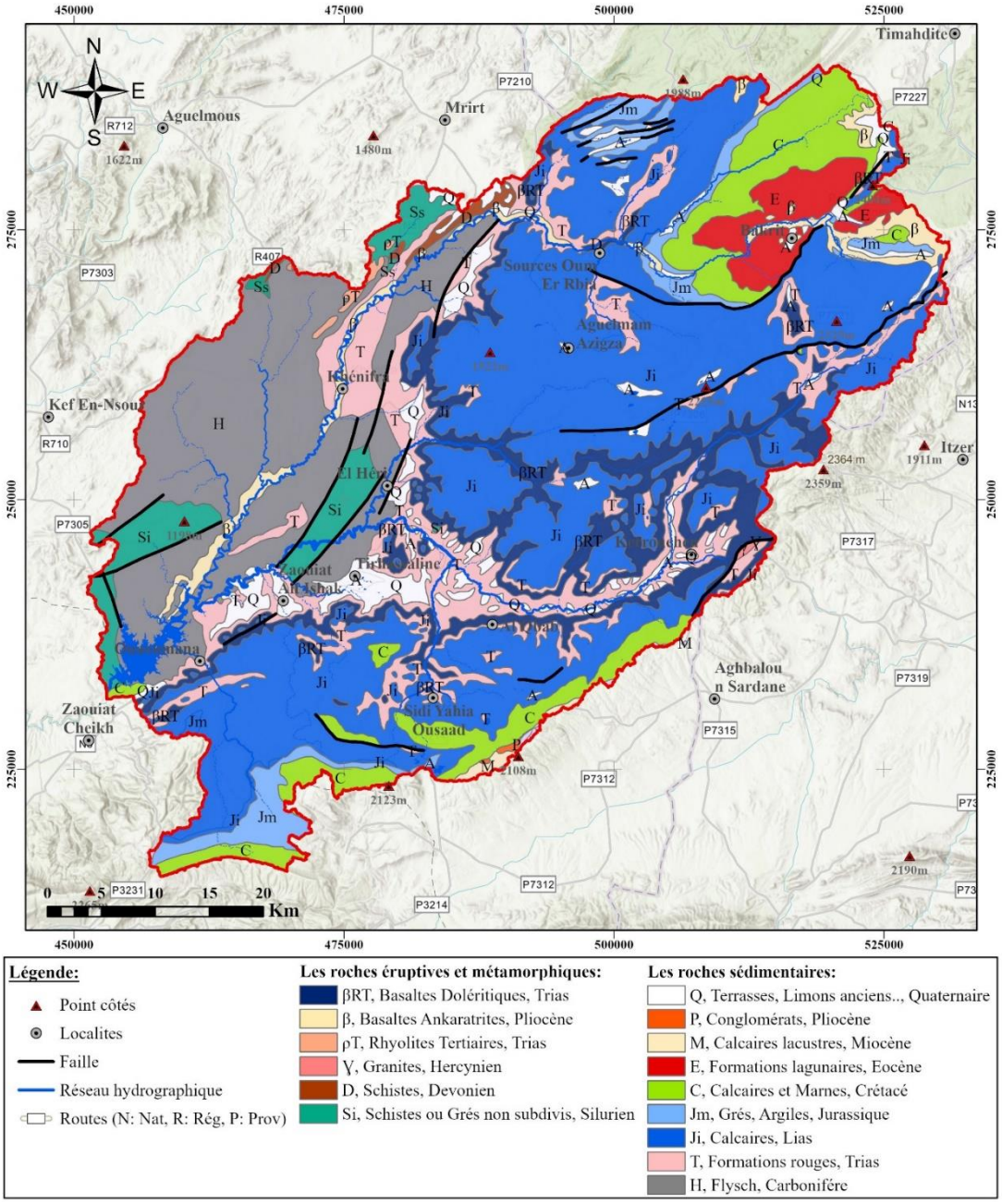
Annexe 2.7 Expositions des versants dans le HaB-OER et ses sous-bassins



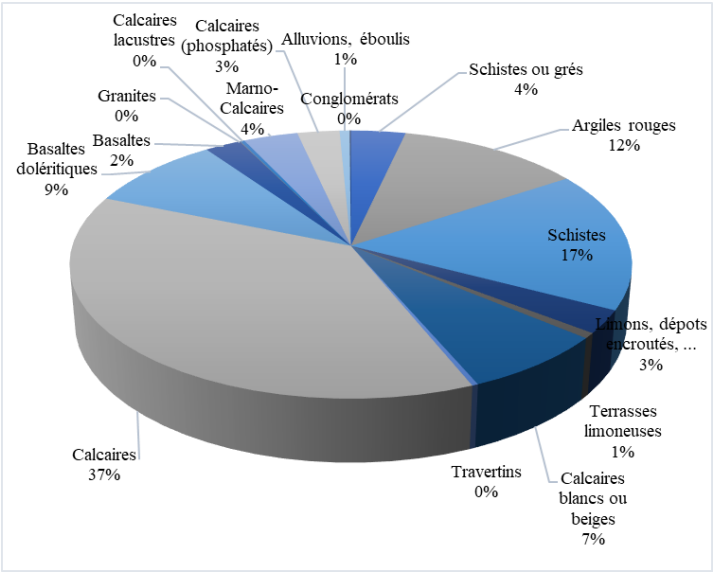
Annexe 2.8 Répartition de l'exposition des versants dans le HaB-OER et ses sous-bassins



Annexe 2.9 Carte lithologique du Hab-OER (source : carte géologique 1/500000 de Rabat)



Annexe 2.10 Répartition des formations lithologique à l'échelle du HaB-OER



Annexe 2.11 Planche photos de quelques cours d'eau du HaB-OER (El Orfi)



Photo 2-1 L'oued Amengous



Photo 2-2 L'oued Fellat



Photo 2-3 Confluence entre l'oued Fellat et l'Oum Er Rbia



Photo 2-4 L'oued Bou-Idji



Photo 2-5 L'oued Srou



Photo 2-6 L'oued Oum Er Rbia

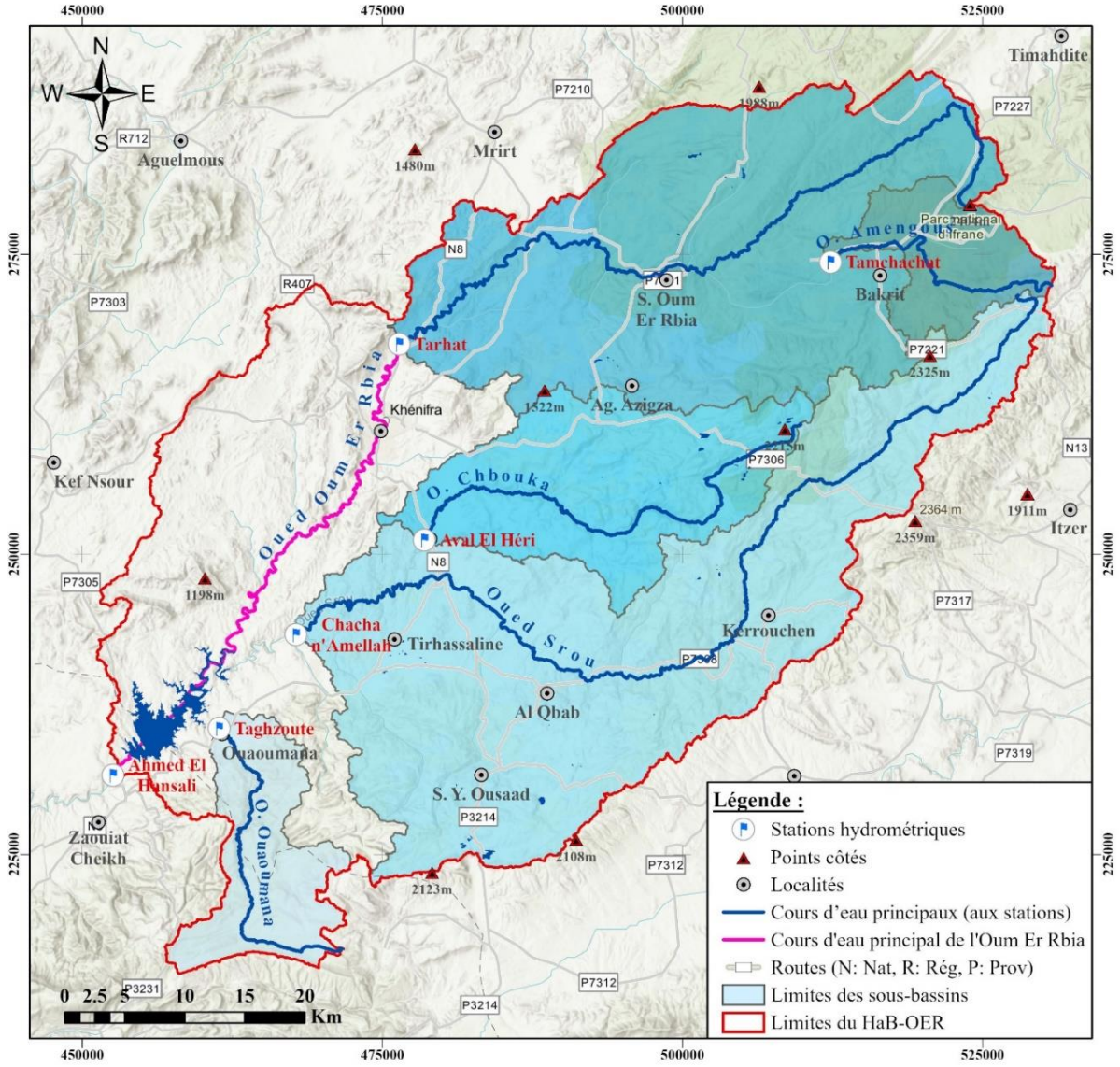


Photo 2-7 L'oued Chbouka

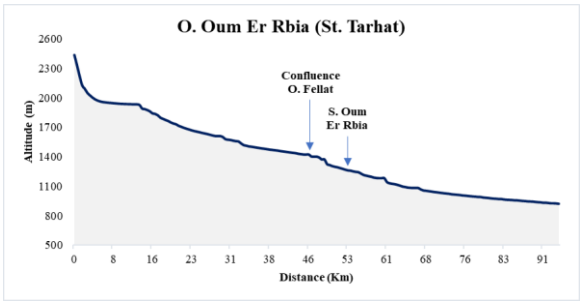


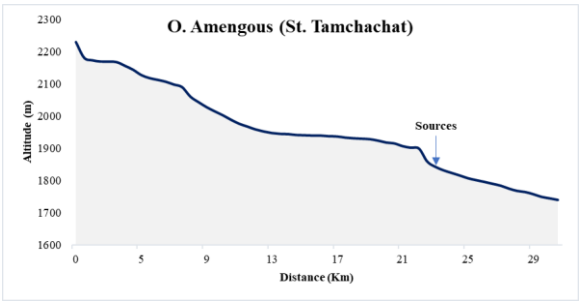
Photo 2-8 L'oued Ouaoumana

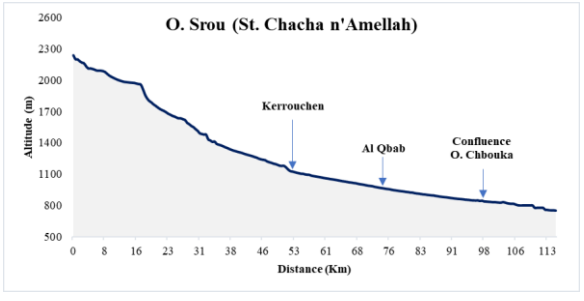
Annexe 2.12 Cours d'eau principaux du HaB-OER

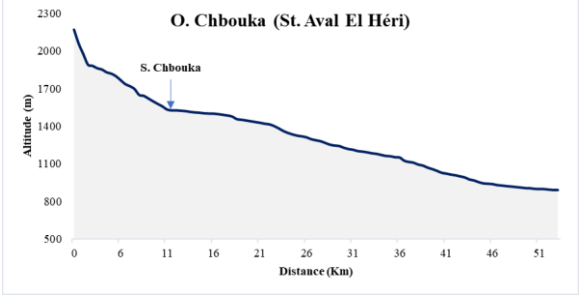


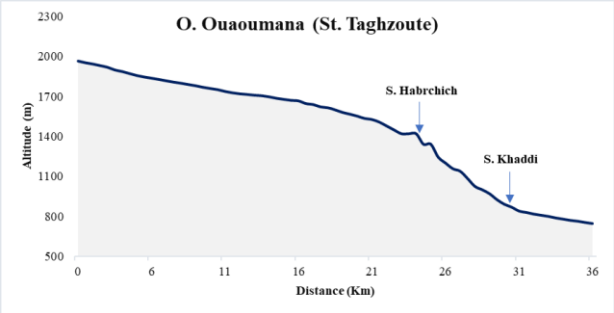
Annexe 2.13 Profil en long des cours d'eau principaux du HaB-OER



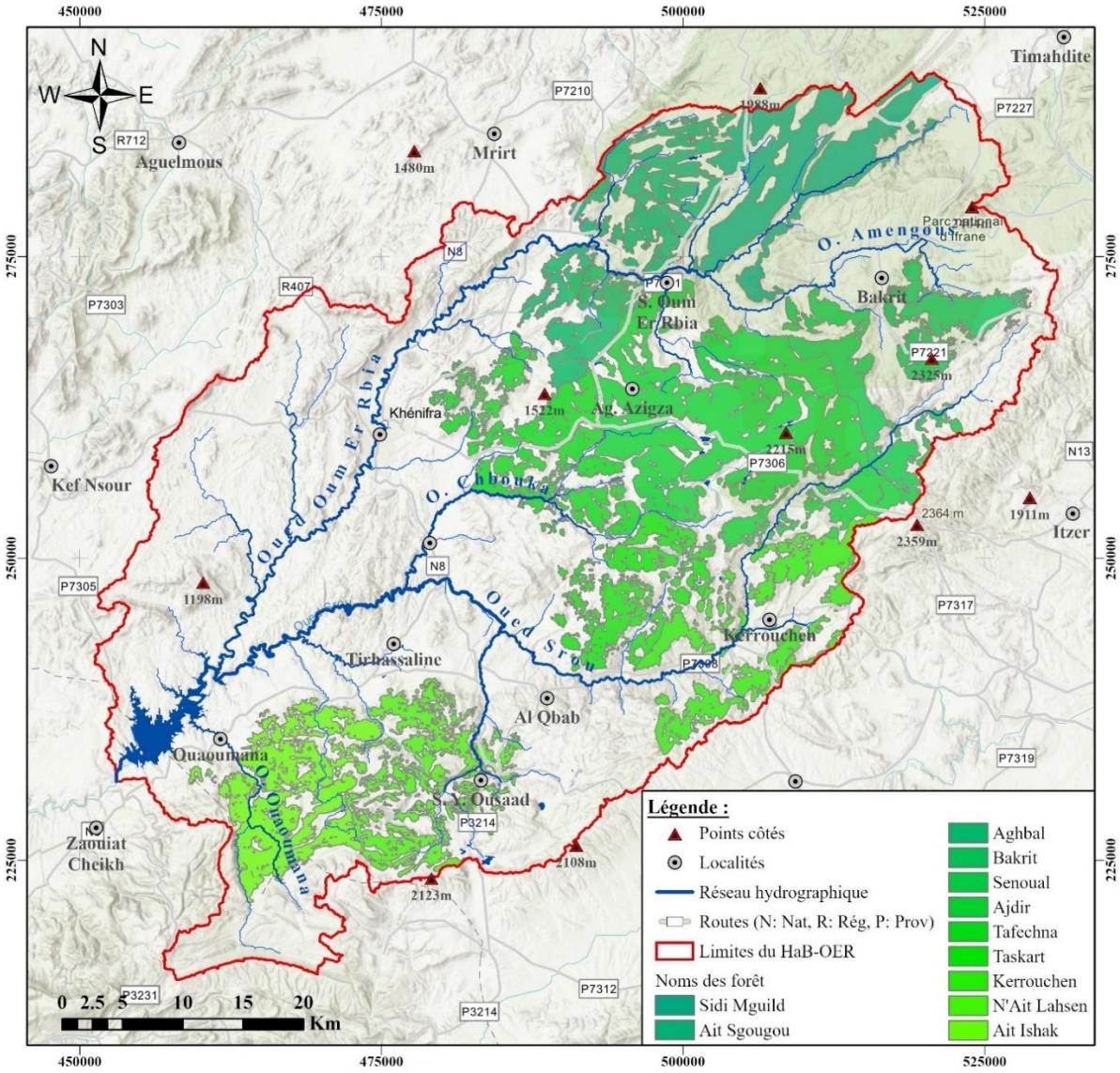








Annexe 2.14 Principales forêts du HaB-OER



Chapitre 3 : Données d'observations aux stations et satellitaires pour l'étude climatique du HaB-OER

Annexe 3.1 Localisation et date de mise en service des 26 stations pluviométriques

Stations	Lambert X	Lambert Y	Altitude (m)	Date M.S	Gestionnaire
Stations au sein du HaB-OER					
Ahmed El Hansali	452550	231600	595	1968-69	ABHOER
Aval El Heri	478500	251200	830	1970-71	
Chacha N'Amellah	467800	243300	685	1974-75	
Taghzoute	461400	235500	690	1970-71	
Tamchachat	512330	274340	1685	1975-76	
Tarhat	476400	267500	1036	1969-70	
Stations autour du HaB-OER					
Béni Mellal	409165	193045	537	1982-83	ABHOER
Mechra Eddahk	394980	204800	406	1968-69	
My Bouzekri	401000	207350	452	1968-69	
Taghzirt	423900	205600	565	1967-68	
Tizi N'Isly	467680	201500	1595	1974-75	
Aguelmam sidi Ali	537800	276000	2078	1975-76	ABHS
Ait Khabbach	557000	314800	1478	1970-71	
Azrou	517100	317500	1279	1972-73	
Fès	538200	370300	569	1914-15	
Ifrane	524700	323200	1648	1935-36	
Sidi El Mokhfi	507600	311800	1075	1975-76	
Louggagh	530900	201000	1900	1980-81	ABHM
Midelt	561800	231200	1520	1990-91	
Tabouazant	541150	217450	1640	1977-78	
Zaida	541100	247000	1470	1963-64	
Ouljet Haboub	420200	279300	589	1972-73	ABHBC
Tsalat	441300	303800	815	1976-77	

Annexe 3.2 Quelques photos des stations pluviométriques en aval, milieu et amont du HaB-OER





Station d'Ahmed El Hansali, située sur le b'AEH, au niveau de l'exutoire du bassin

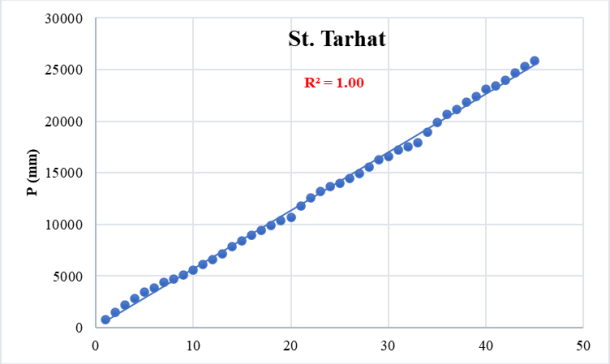


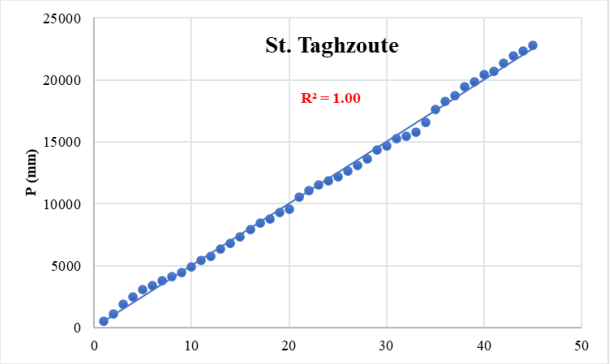

Station de Tarhat, située au milieu du bassin, représentative de la zone

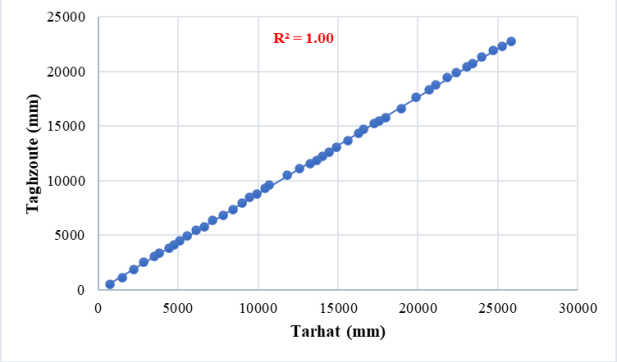


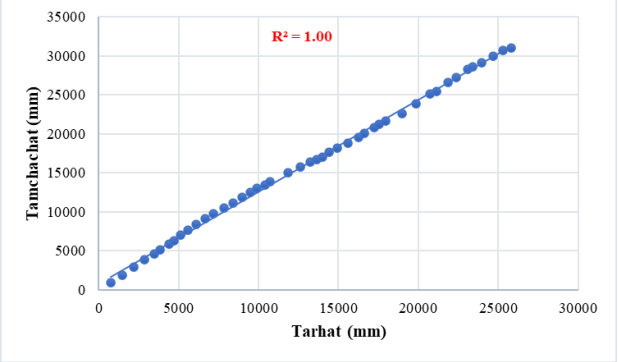

Station de Tamchachat, située à l'amont du HaB-OER, à 1685m d'altitude

Annexe 3.3 Méthode du simple et du double cumul

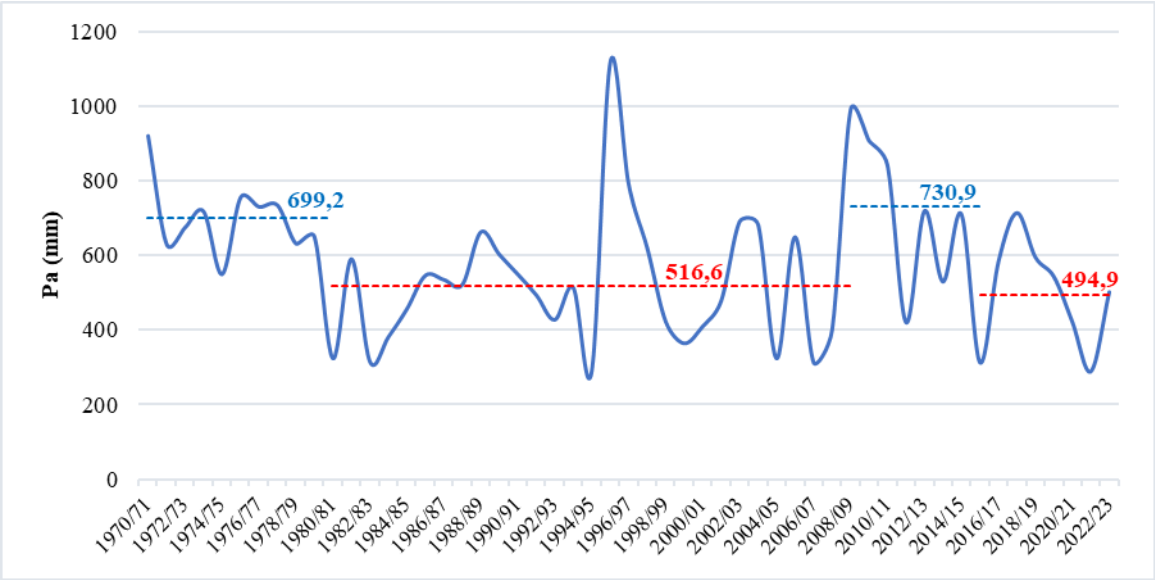




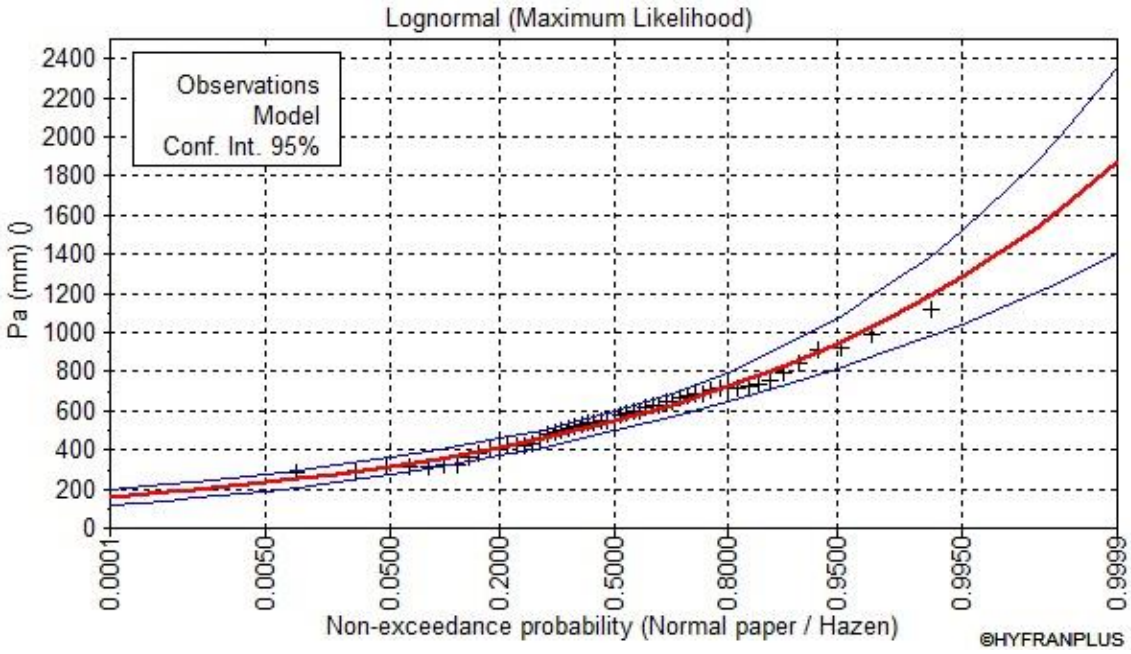




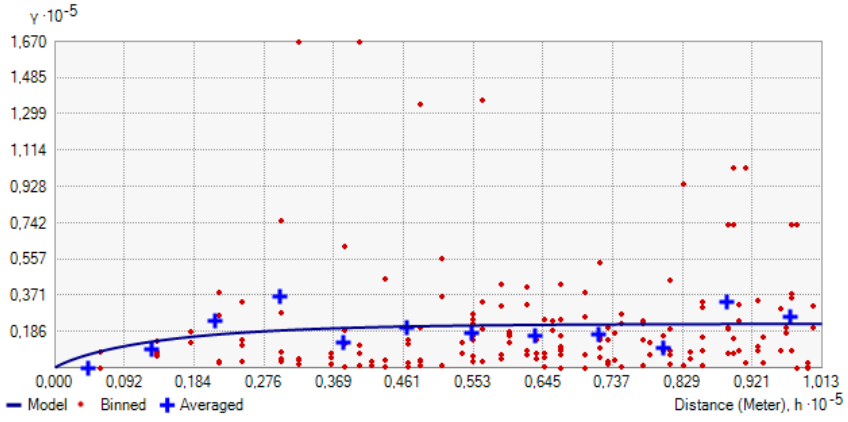
Annexe 3.4 Résultat du découpage de la série pluviométrique de la station de Tarhat selon la méthode CUSUM



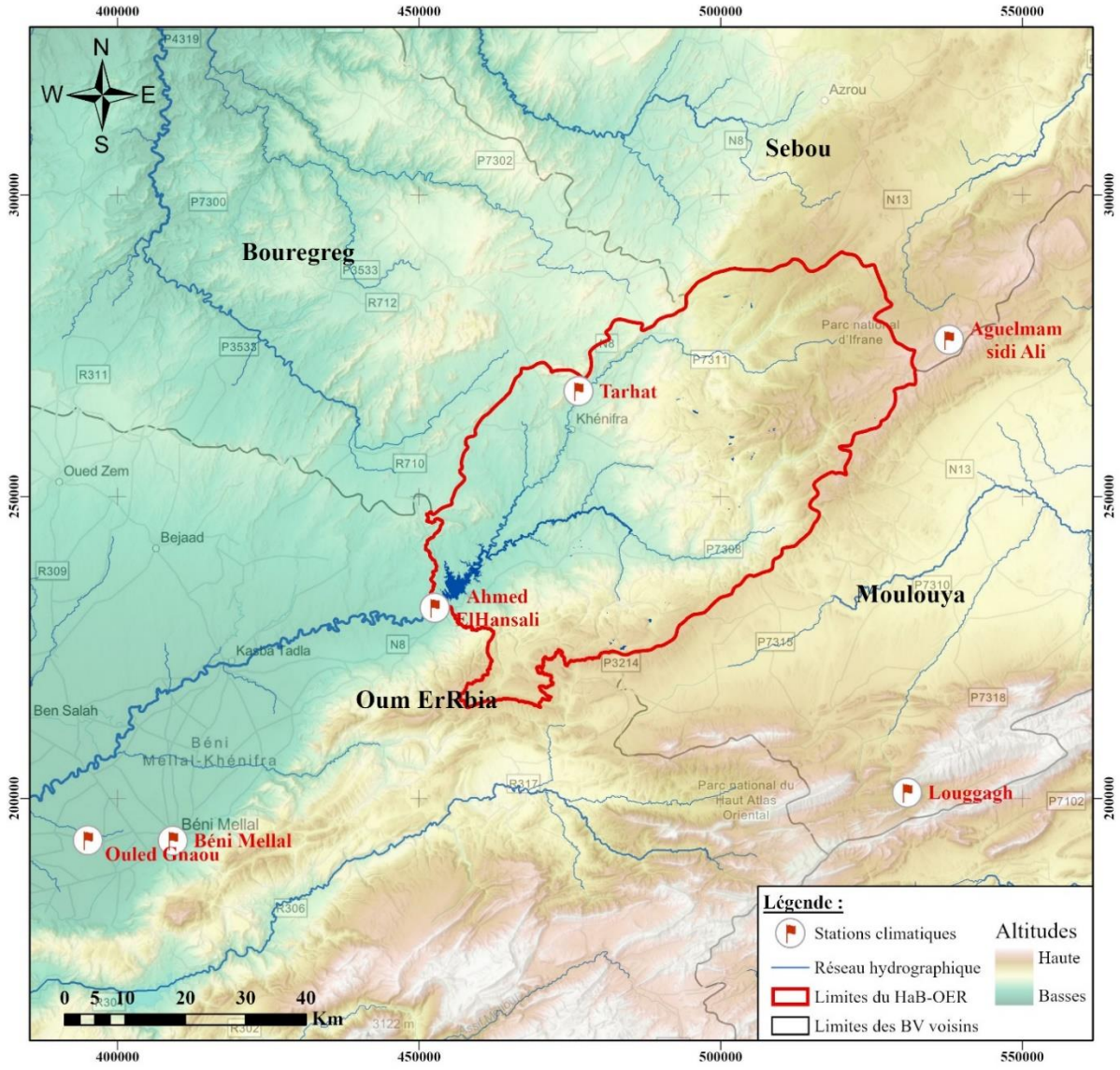
Annexe 3.5 Ajustement statistique des pluies annuelles à la station de Tarhat selon la loi Lognormal



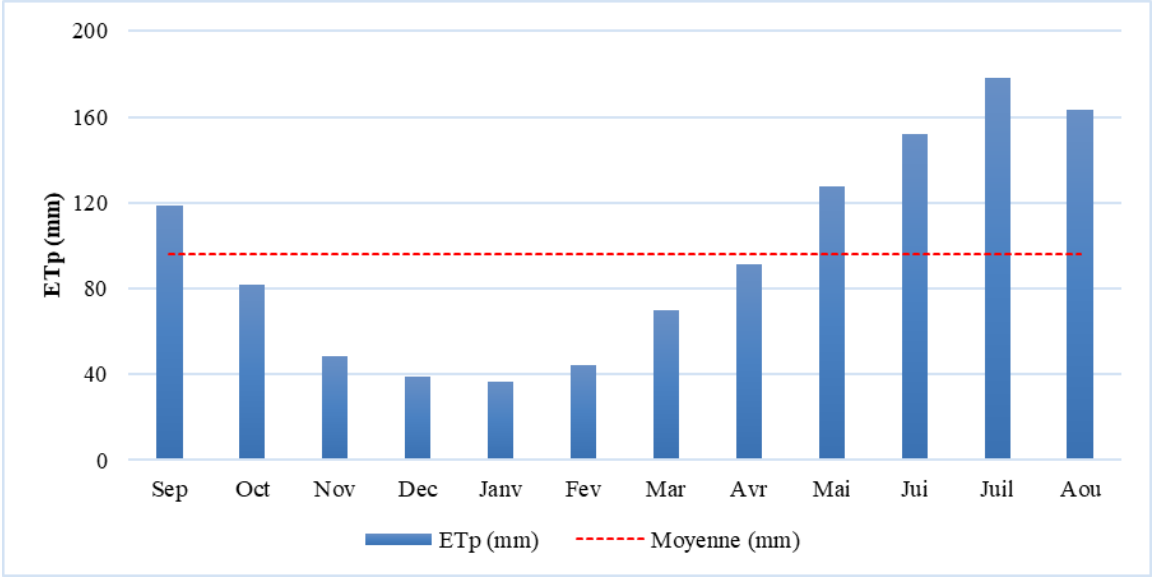
Annexe 3.6 Semi-variogramme et son modèle ajusté des données pluviométriques



Annexe 3.7 Localisation des stations climatiques

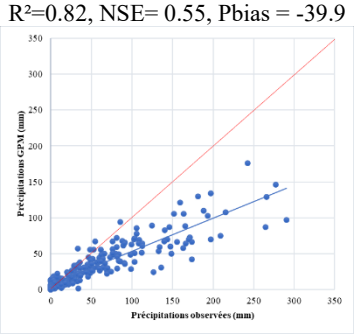


Annexe 3.8 Variation mensuelle de l'ETp à la station de Taghat pour la période de 1985-86 à 2022-2023

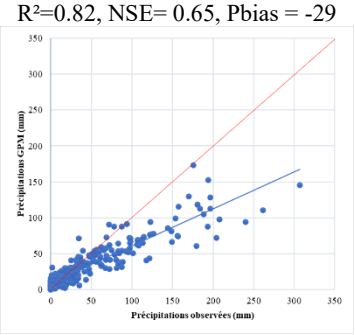


Annexe 3.9 Résultats de la performance des données de précipitations IMERG aux différentes stations avant la correction du biais

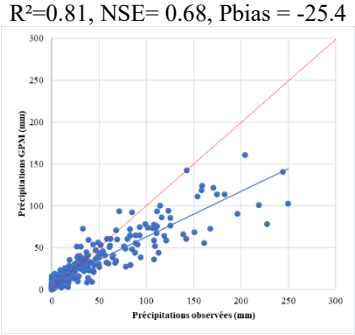
Ahmed El Hansali
R^2=0.82, NSE= 0.55, Pbias = -39.9



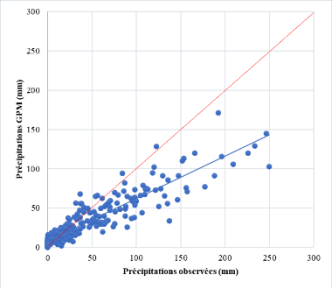
Aval El Heri
R^2=0.82, NSE= 0.65, Pbias = -29



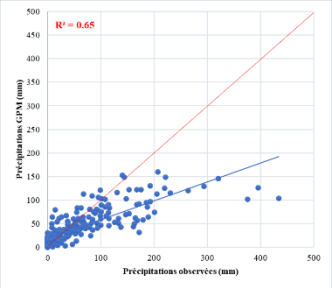
Chacha n'Amellah
R^2=0.81, NSE= 0.68, Pbias = -25.4



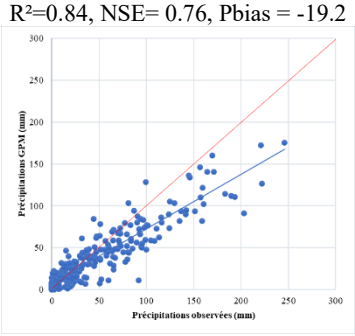
Taghzoute
R^2=0.83, NSE= 0.67, Pbias = -27.9



Tamchachat
R^2=0.65, NSE= 0.51, Pbias = -26.7

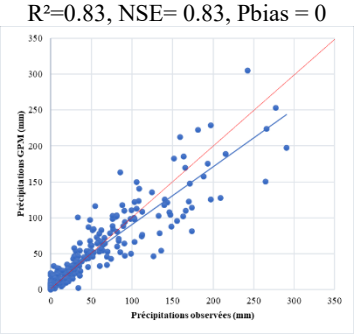


Tarhat
R^2=0.84, NSE= 0.76, Pbias = -19.2

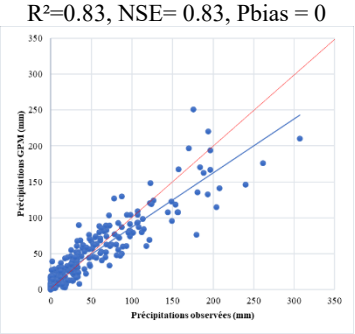


Annexe 3.10 Résultats de la performance des données de précipitations IMERG aux différentes stations après la correction du biais

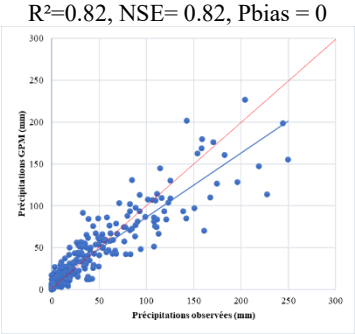
Ahmed El Hansali
R^2=0.83, NSE= 0.83, Pbias = 0



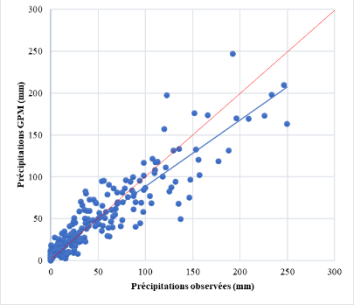
Aval El Heri
R^2=0.83, NSE= 0.83, Pbias = 0



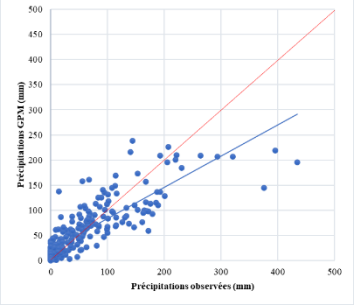
Chacha n'Amellah
R^2=0.82, NSE= 0.82, Pbias = 0



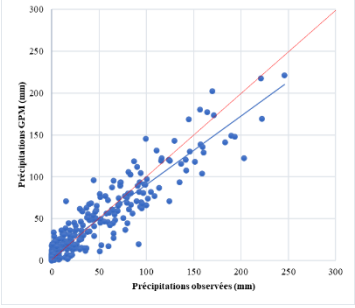
Taghzoute
R^2=0.85, NSE= 0.84, Pbias = 0



Tamchachat
R^2=0.7, NSE= 0.69, Pbias = 0

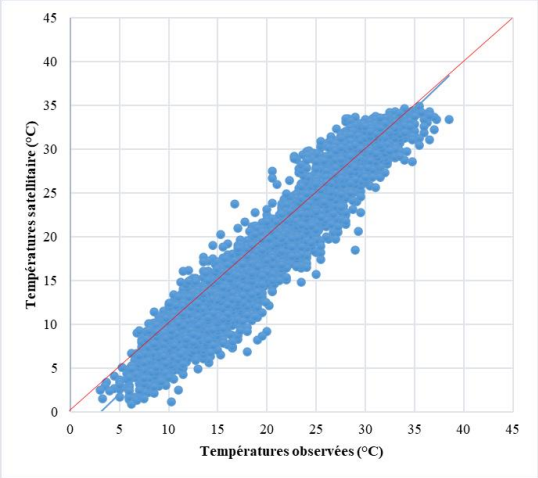


Tarhat
R^2=0.85, NSE= 0.85, Pbias = 0

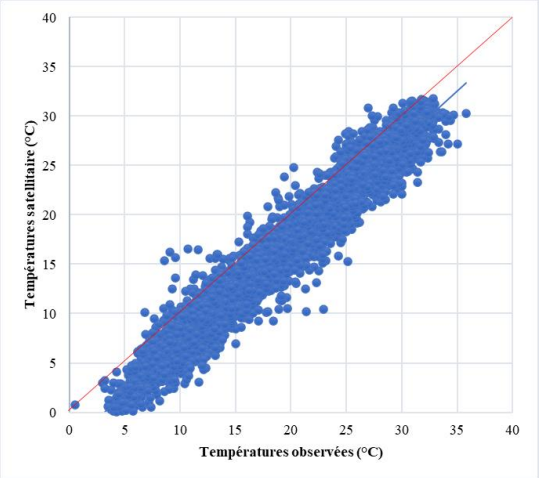


Annexe 3.11 Résultats de la performance des données de températures NASA/POWER aux différentes stations

Oueled Gnaou
R²=0.93, NSE= 0.85, Pbias = -8.6

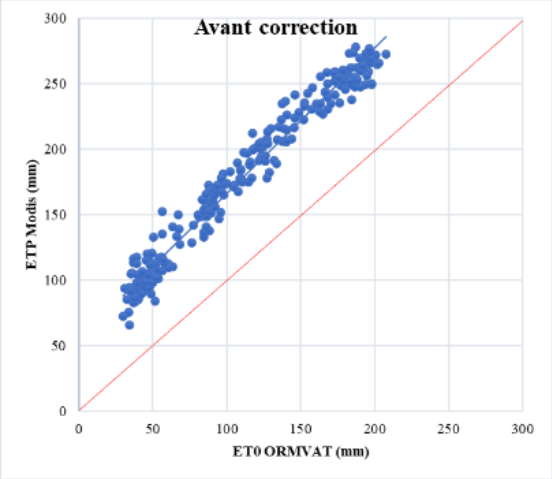


Tarhat
R²=0.96, NSE= 0.81, Pbias = -15.3

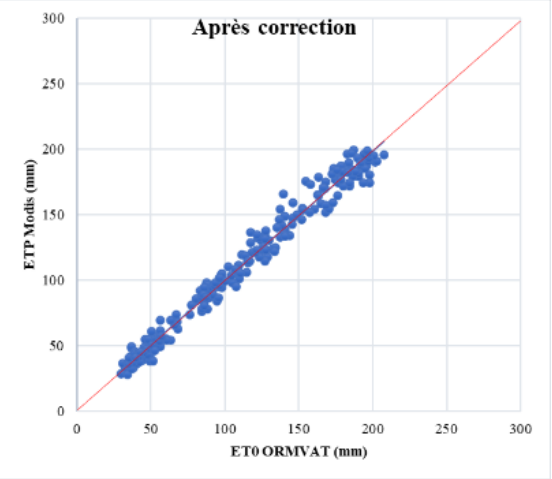


Annexe 3.12 Résultats de la performance des données de d'ETP Modis à la station d'Ouled Gnaou

Oueled Gnaou
R²=0.97, NSE= -0.57, Pbias = 62

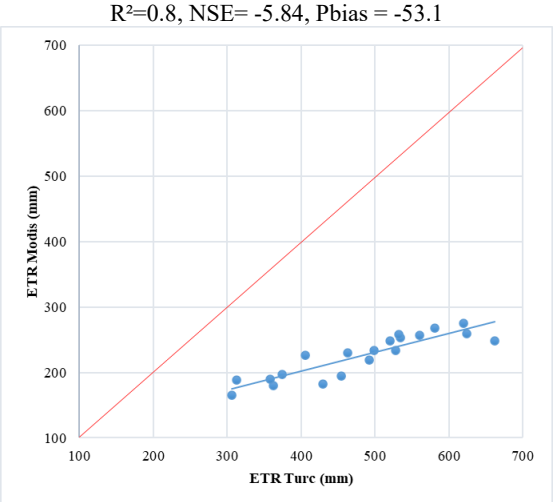


Oueled Gnaou
R²=0.98, NSE= 0.98, Pbias = 0

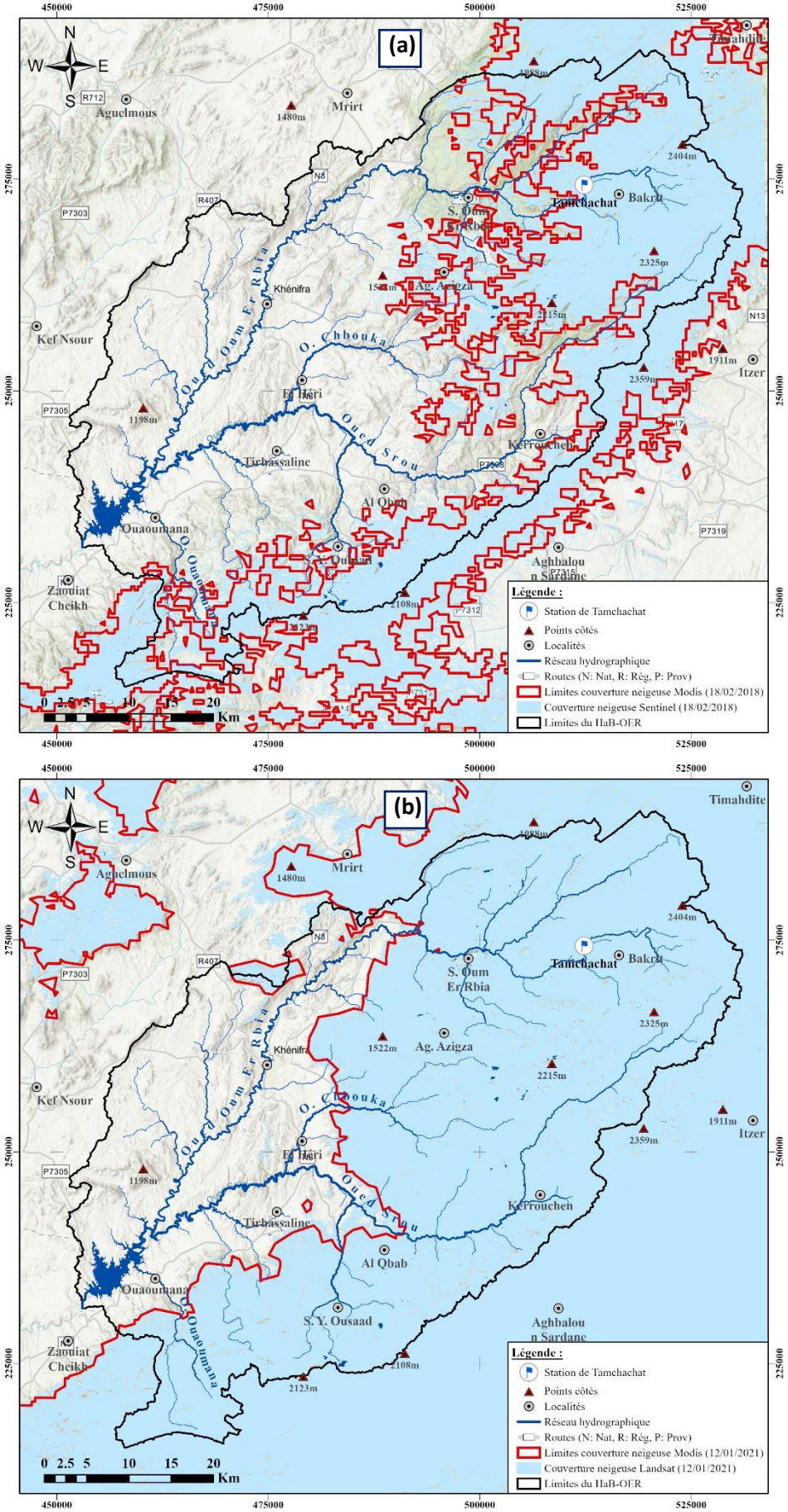


Annexe 3.13 Résultats de la performance des données de d'ETR Modis aux différentes stations

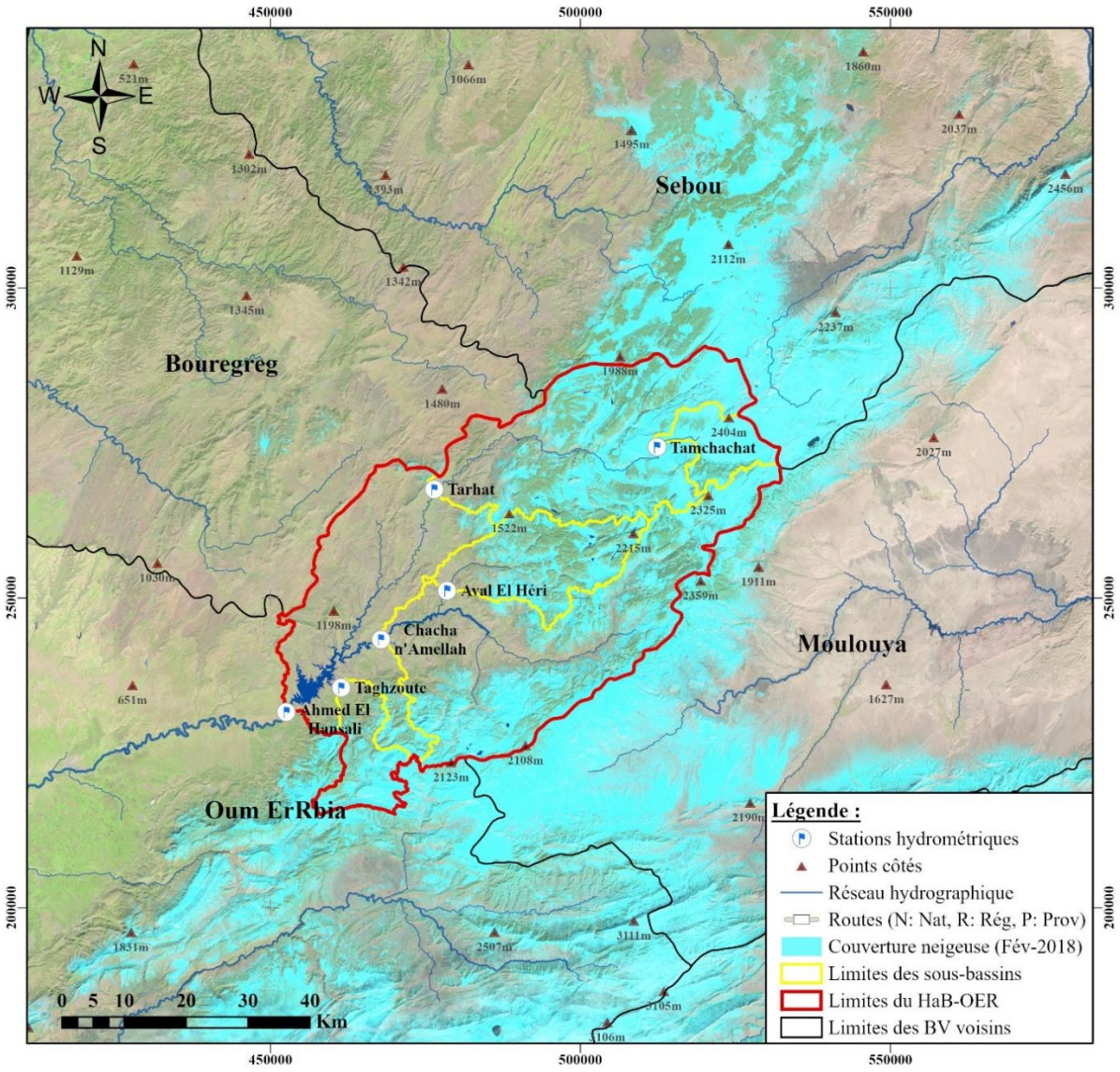
Tarhat
R²=0.8, NSE= -5.84, Pbias = -53.1



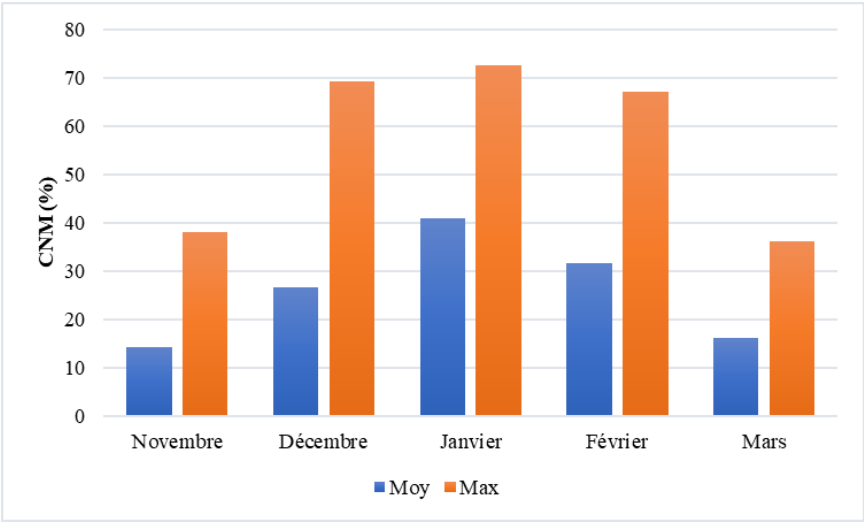
Annexe 3.14 Comparaison entre (a) les limites de la couverture neigeuse Modis et Sentinel (18/02/2018) et entre (b) les limites de la couverture neigeuse Modis et Landsat (12/01/2021)



Annexe 3.15 Couverture neigeuse du HaB-OER (image Sentinel février 2018)



Annexe 3.16 Variabilité mensuelle de la couverture neigeuse maximale au HaB-OER entre 2000-01 et 2020-21



Annexe 3.17 Planche photos sur la couverture neigeuse dans le HaB-OER (El Orfi, 2018)






Annexe 3.18 Instruments de mesure de l'épaisseur de la couverture neigeuse




Annexe 3.19 Equipement du site de Tamchachat par les instruments de mesure des principales propriétés de la neige (El Orfi, 2019)








Annexe 3.20 Mesure des caractéristiques de la neige dans le HaB-OER pour l'épisode de janvier 2021







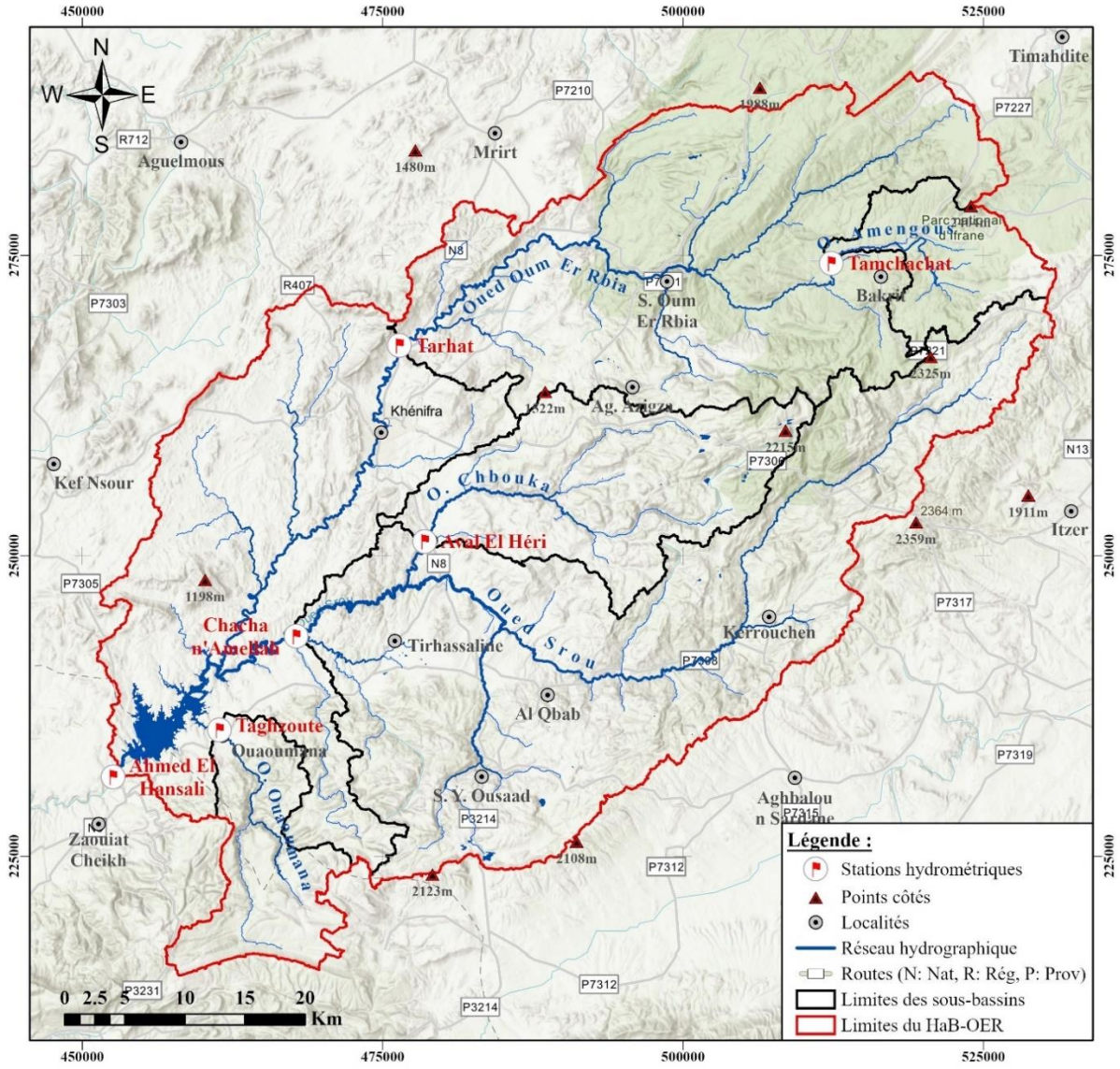






Chapitre 4 : Étude hydrologique pour l'évaluation des ressources en eau dans le HaB-OER

Annexe 4.1 Localisation des stations de mesures hydrométriques



Annexe 4.2 Quelques photos des stations hydrométriques implémentées dans le HaB-OER



Station hydrométrique d'Aval El Héri sur le Chbouka



Station hydrométrique de Chacha n'Amellah sur le Srou



Station hydrométrique de Taghzoute sur l'Ouaoumana

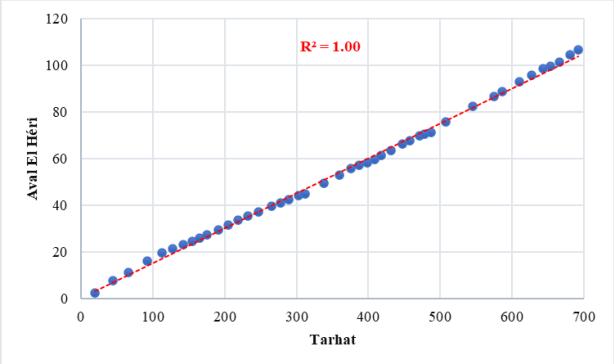


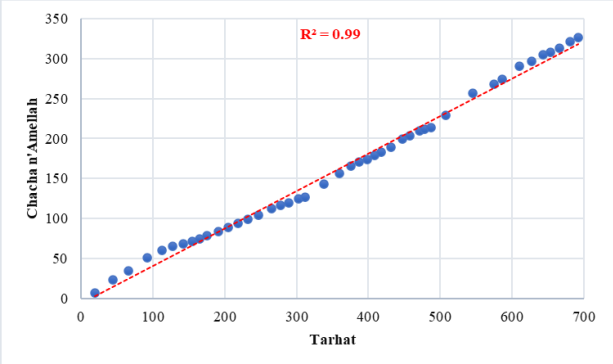
Station hydrométrique de Tamchachat sur l'Amengous

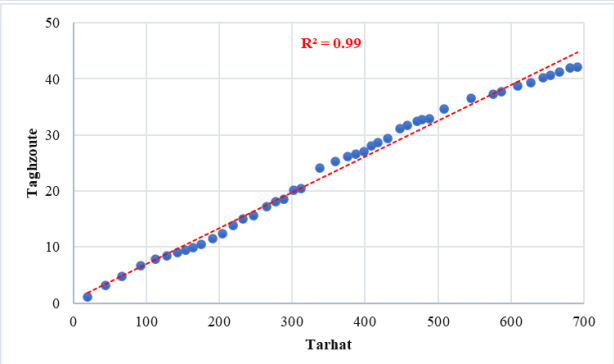


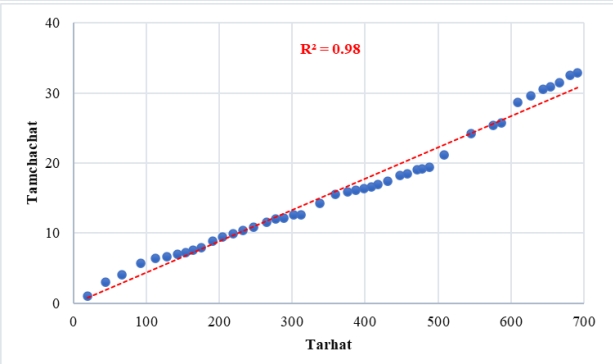
Station hydrométrique de Tarhat sur l'Oum Er Rbia

Annexe 4.3 Méthode du double cumul entre la station de Tarhat et les autres stations du HaB-OER

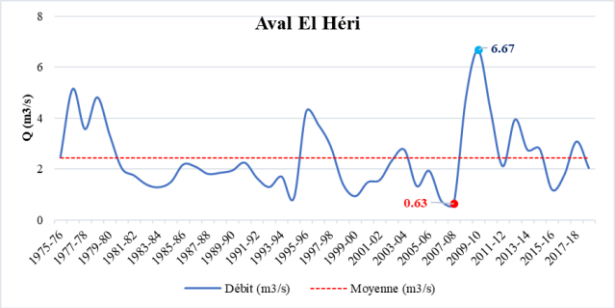


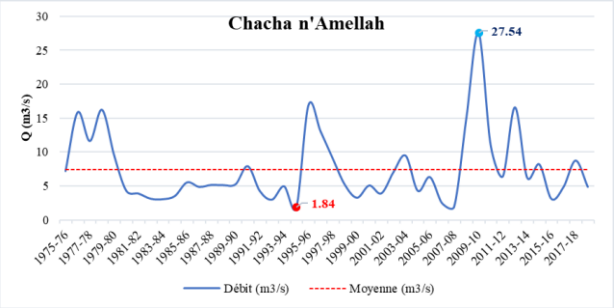


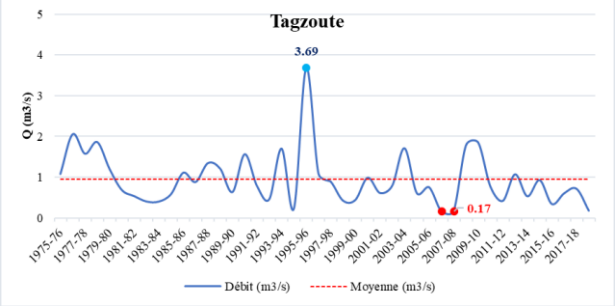


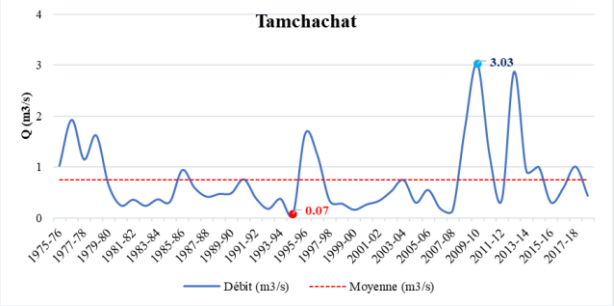


Annexe 4.4 Modules annuels et interannuel aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

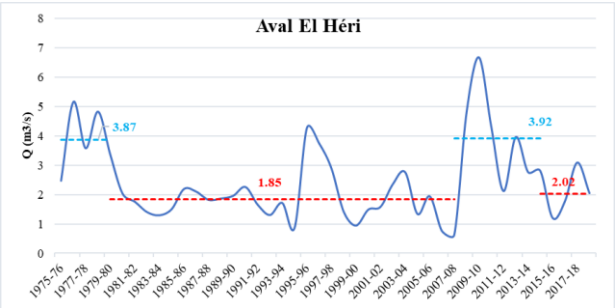


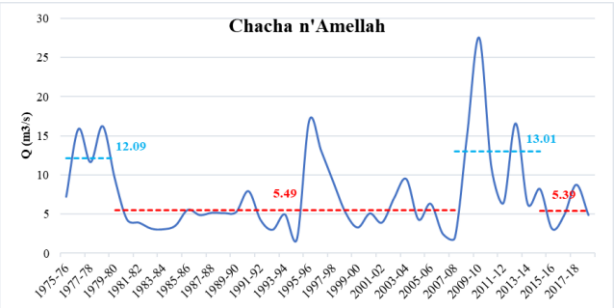


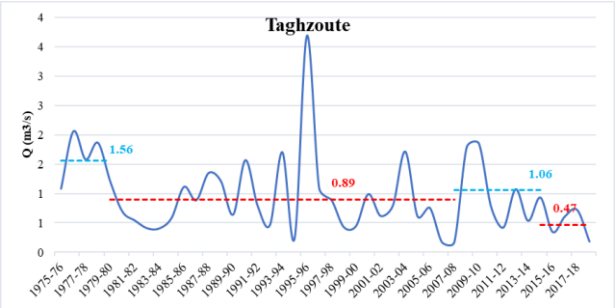


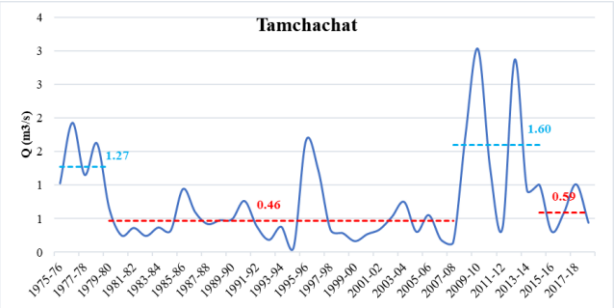


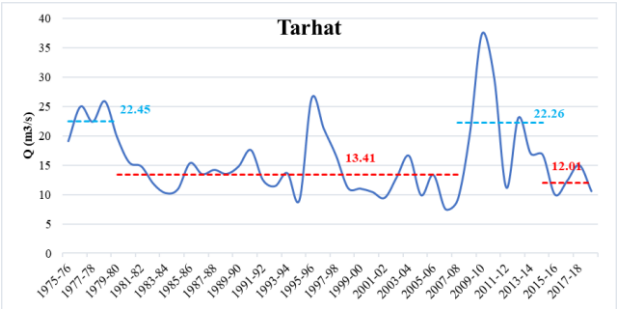
Annexe 4.5 Résultat du découpage des débits des stations du HaB-OER selon la méthode CUSUM







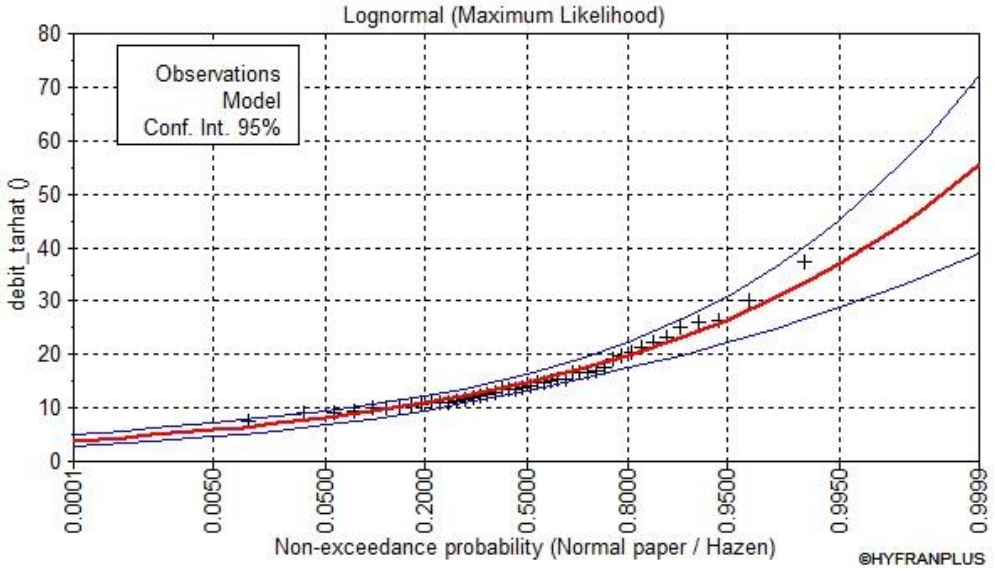




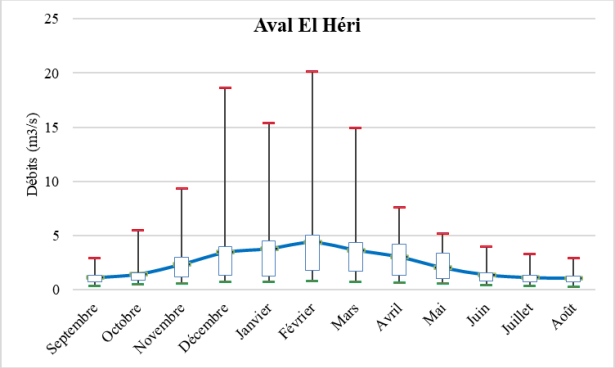
Annexe 4.6 Résultats du choix de l'ajustement statistique le plus approprié pour les modules aux stations du HaB-OER

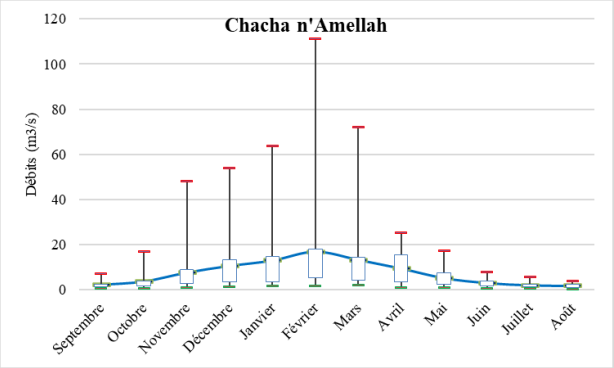
	Ava		Cha		Tag		Tam		Tar	
	BIC	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**
Lognormal	141.6	138	248.4	244.8	75.7	72.2	59.6	56	277.4	273.8
Gumbel	143.5	140	255.9	252.3	78.4	74.8	73.1	69.5	277.4	273.9
GEV	145.8	140.4	251.5	246.2	79.8	74.4	63.8	58.5	278.2	272.8
Weibull	246.2	143.4	257.9	254.3	78.4	74.9	66.3	62.7	289.8	251.5
Normal	156.2	152.6	276.7	273.1	95.2	91.6	96.6	93	292.6	289

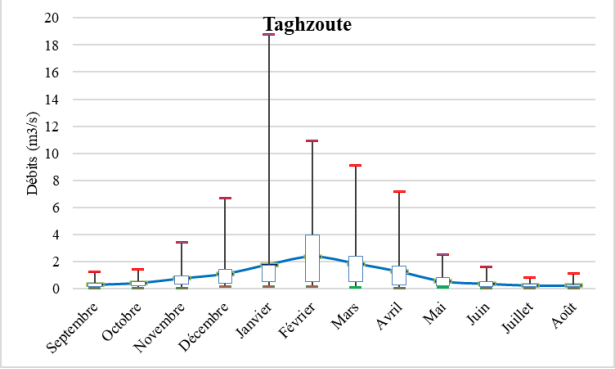
Annexe 4.7 Ajustement statistique des modules à la station de Tarhat selon la loi Lognormal

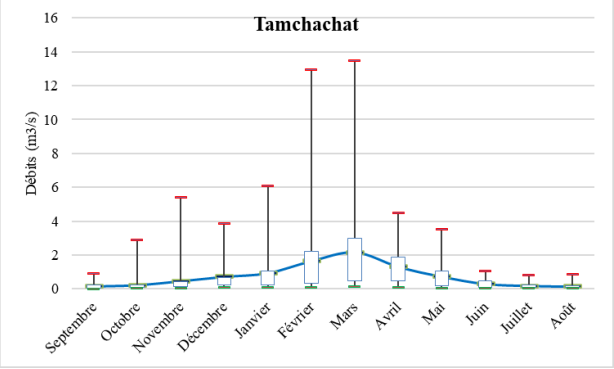


Annexe 4.8 Régime hydrologique aux stations du HaB-OER

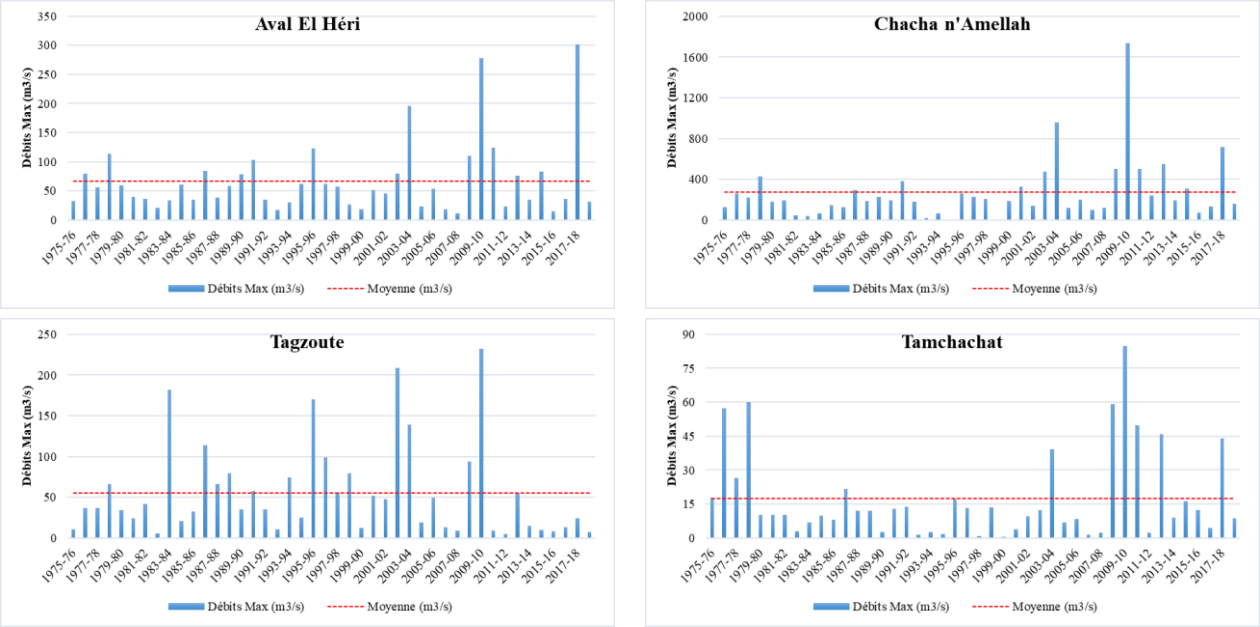








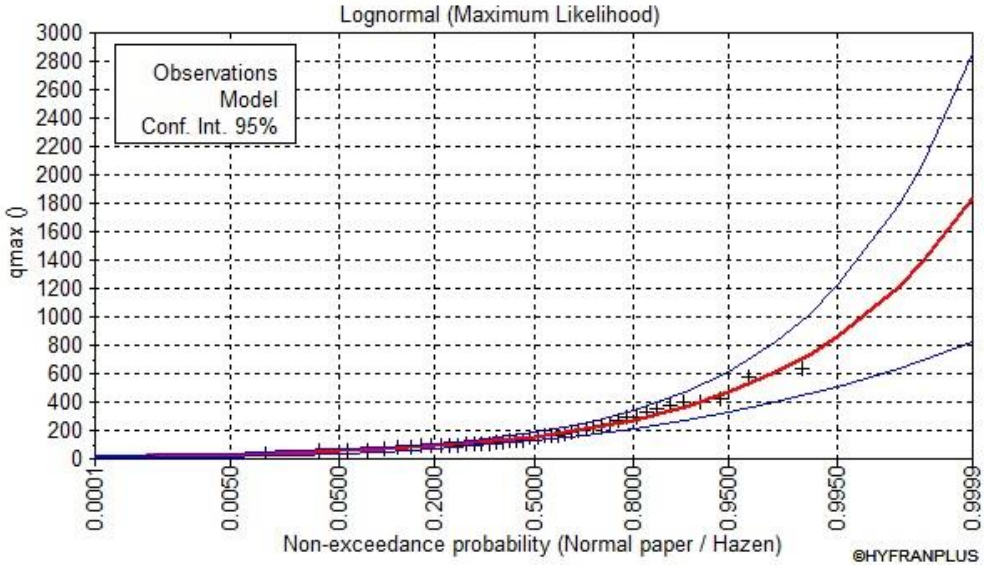
Annexe 4.9 Débits instantanés maxima annuels aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19



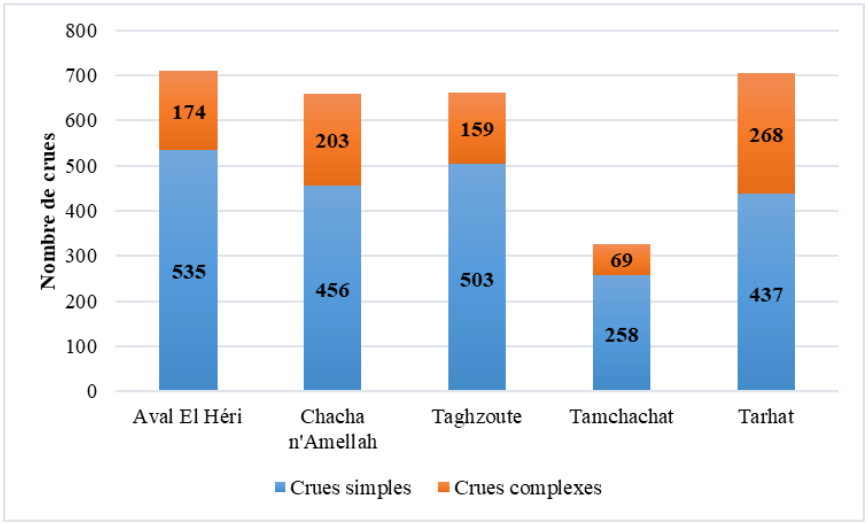
Annexe 4.10 Résultats du choix de l'ajustement statistique le plus approprié pour les débits instantanés maxima annuels aux stations du HaB-OER

	Ava		Cha		Tag		Tam		Tar	
	BIC	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**
Lognormal	450.1	446.5	1154.7	1149.8	444.5	440.9	346.7	343.1	540.4	536.8
Gumbel	453.4	448.1	1144	1136.6	451.6	446.2	353	347.6	544.6	539.3
GEV	460.8	457.3	1145.9	1141	447.8	444.2	-	-	547.1	543.5
Weibull	463.5	460	1151.9	1146.9	463.4	459.9	368.4	364.9	547.6	544
Normal	494	490.4	1224.2	1219.2	485.7	482.1	393.5	390	564.8	561.3

Annexe 4.11 Ajustement statistique des débits instantanés maxima annuels à la station de Tarhat selon la loi Lognormal



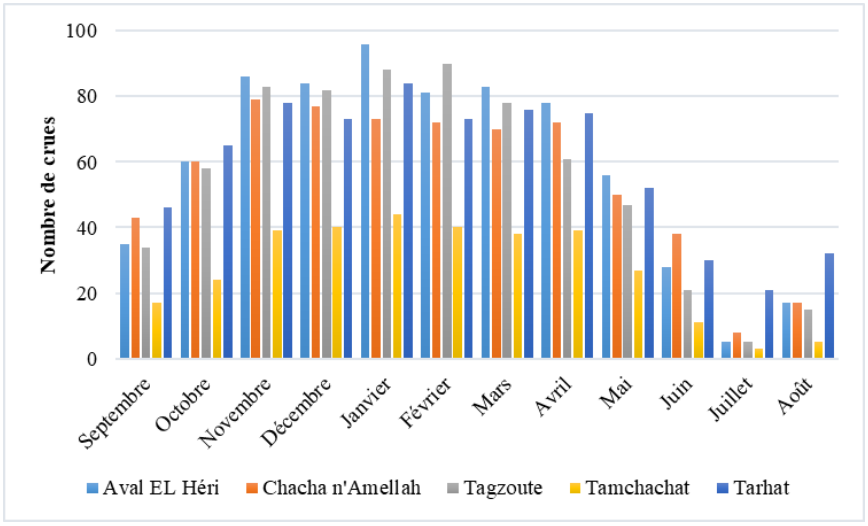
Annexe 4.12 Nombre de crues aux stations du HaB-OER entre 1975-75 et 2018-19



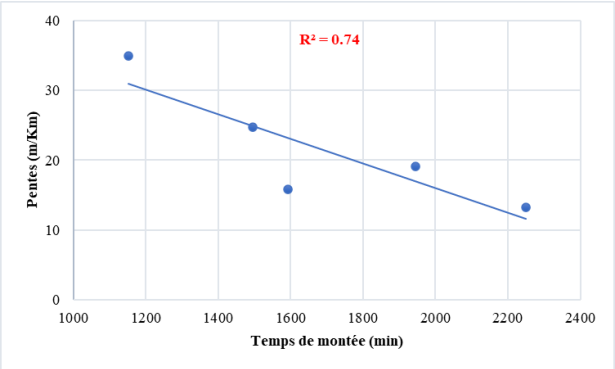
Annexe 4.13 Effectifs annuels de crues aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

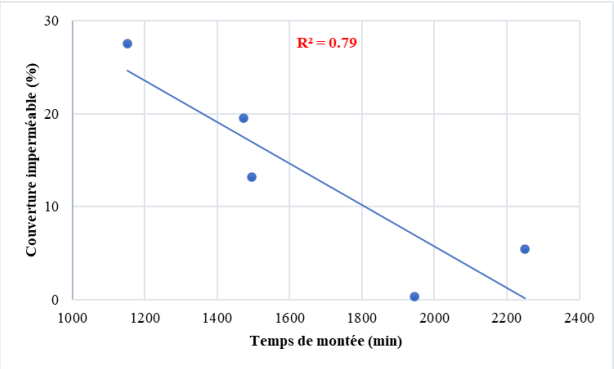


Annexe 4.14 Effectifs mensuelle de crues aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

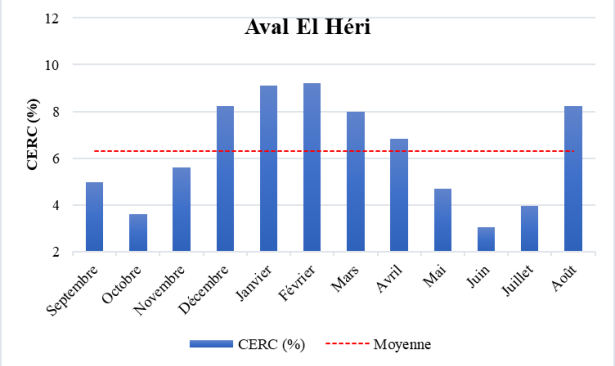


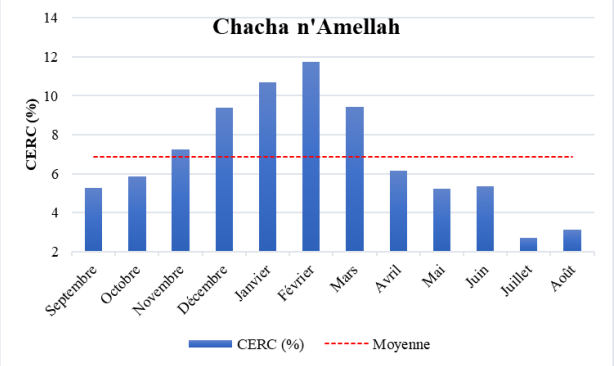
Annexe 4.15 Corrélation entre le temps de montée des crues et les pentes et la portion de la couverture imperméable des sous-bassins du HaB-OER

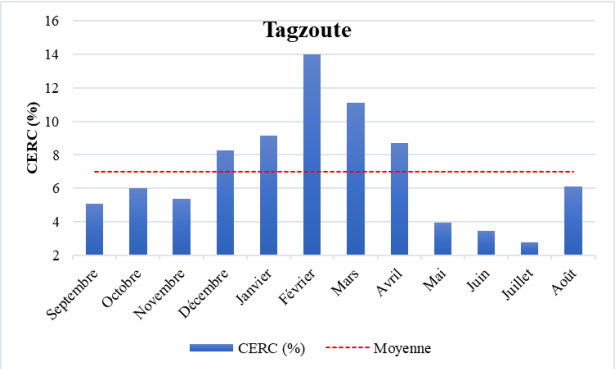


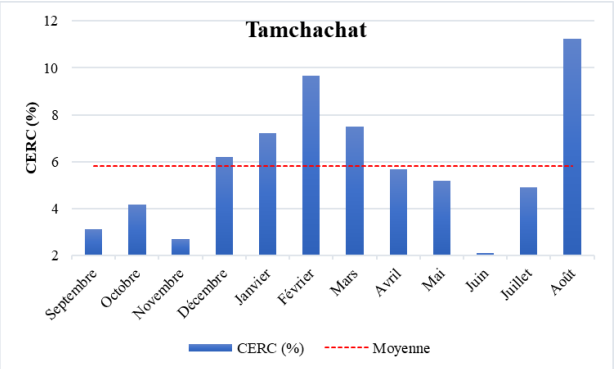


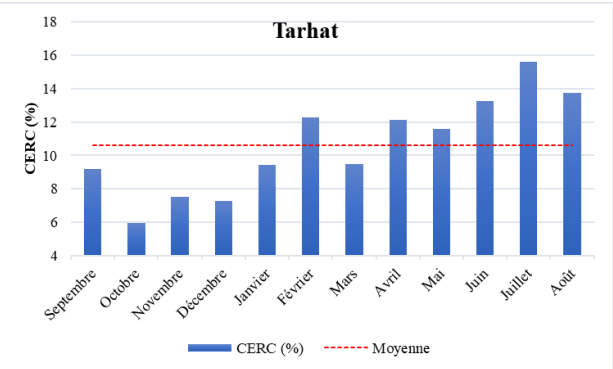
Annexe 4.16 Moyenne mensuelle des CERC aux stations du HaB-OER



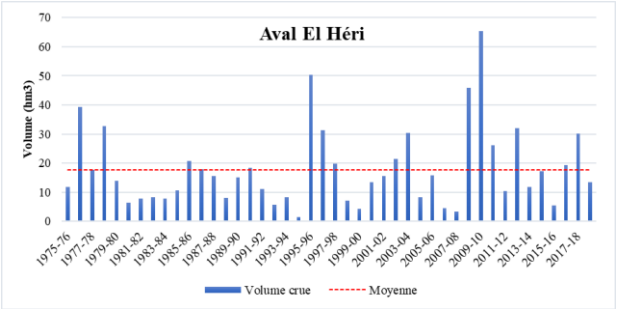


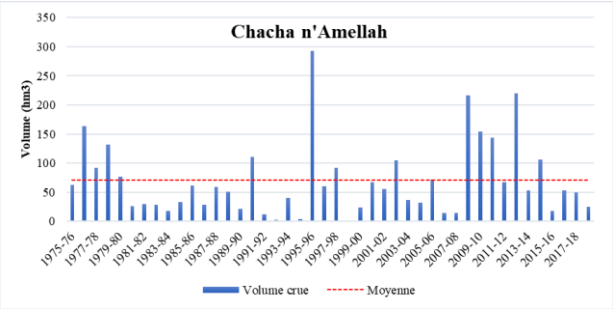


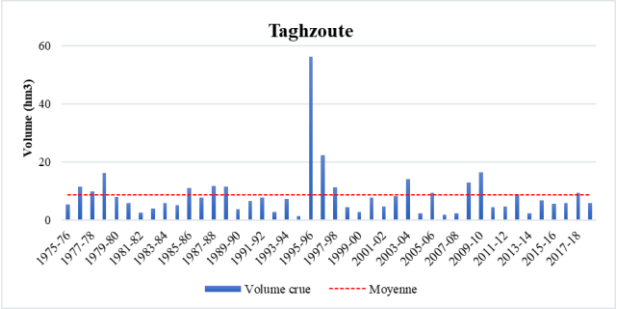


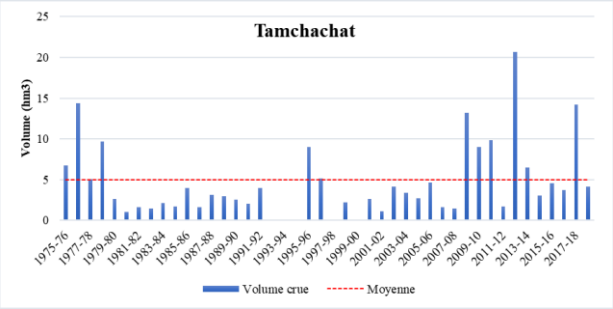


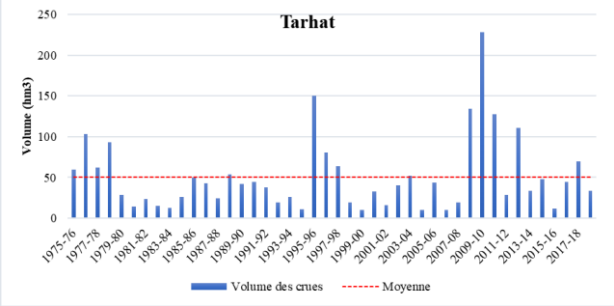
Annexe 4.17 Variabilité annuelle des volumes de crues aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19



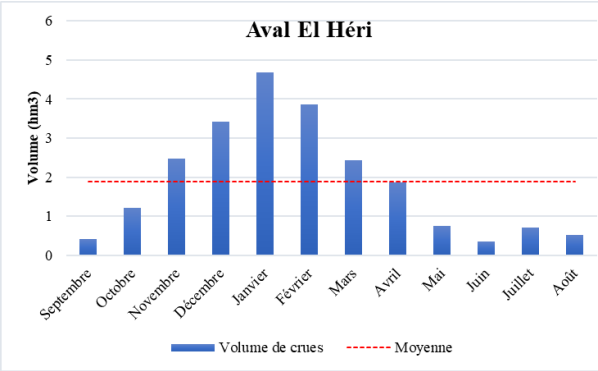


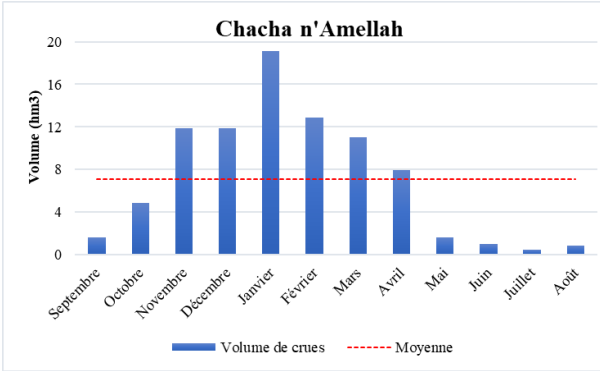


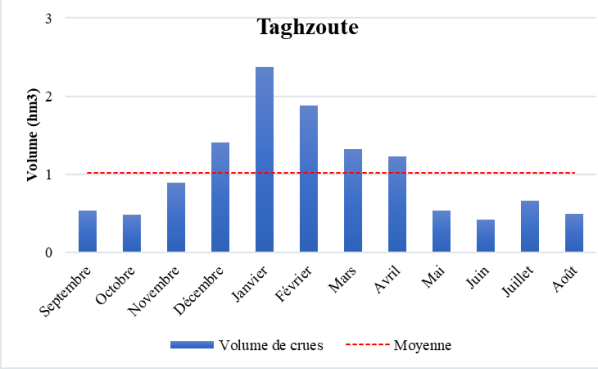


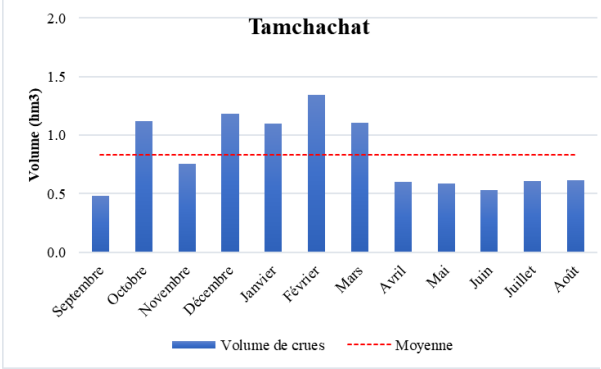


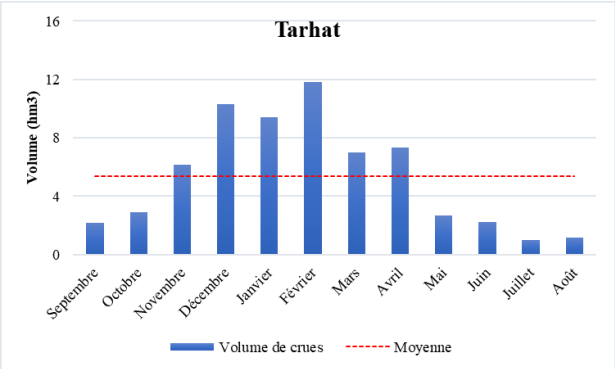
Annexe 4.18 Variabilité mensuelle des volumes de crues aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19



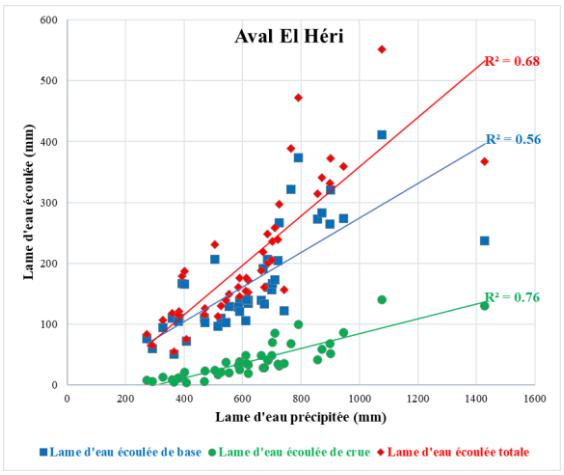


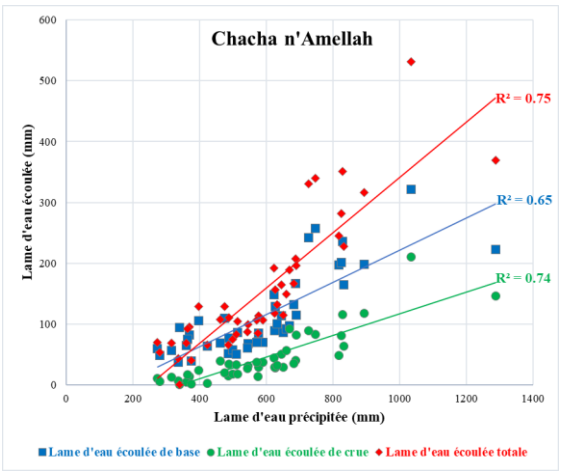


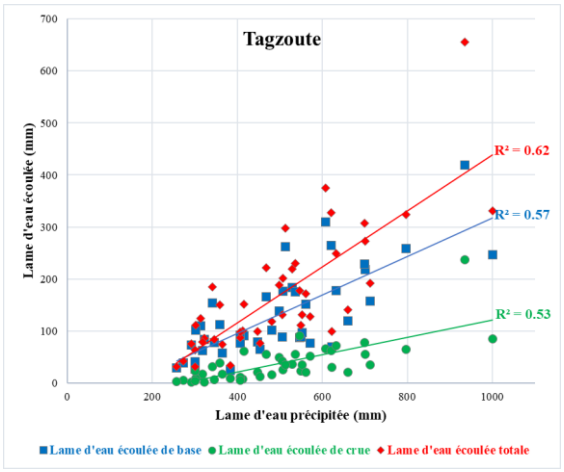


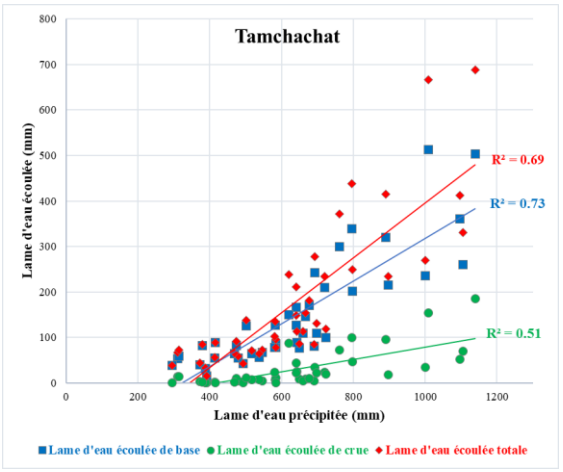


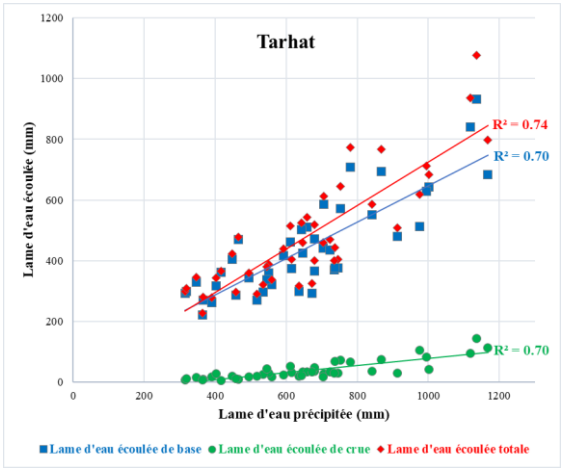
Annexe 4.19 Résultats de corrélation entre les lames d'eau précipitées et écoulées aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19



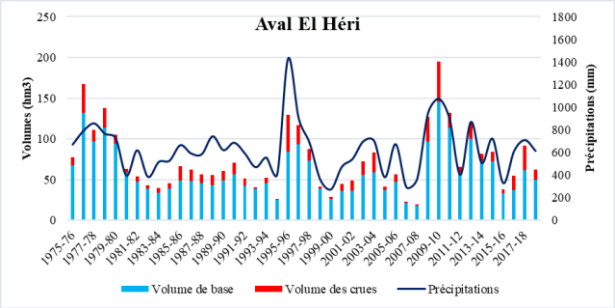


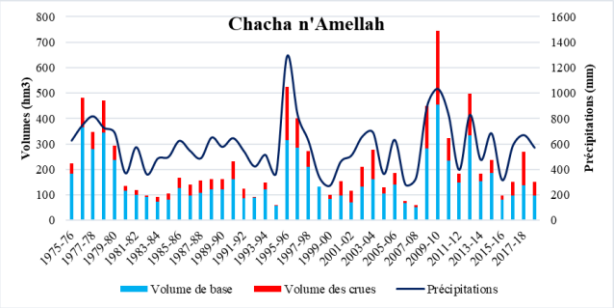


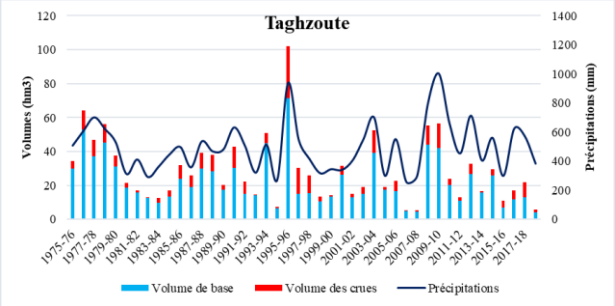


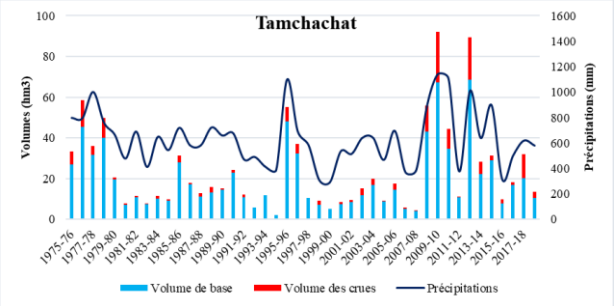


Annexe 4.20 Évolution des précipitations et des volumes des écoulements aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

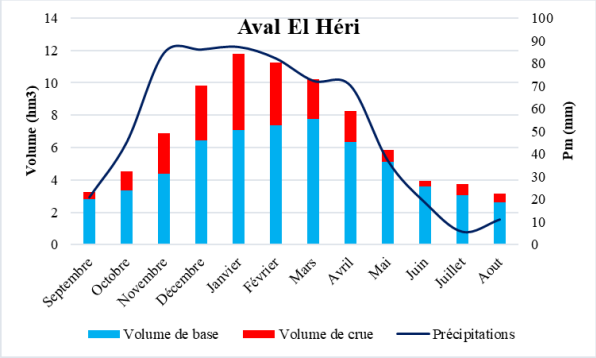


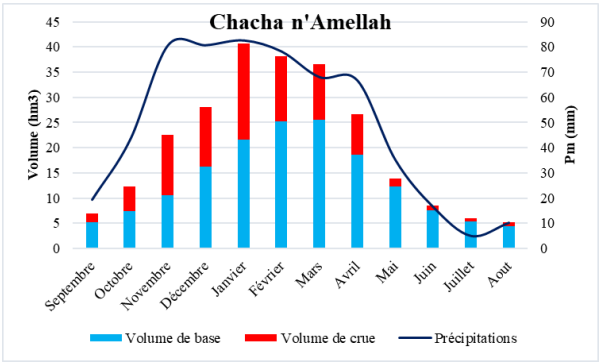


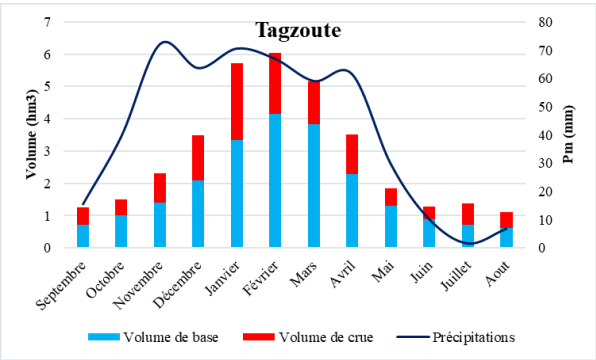


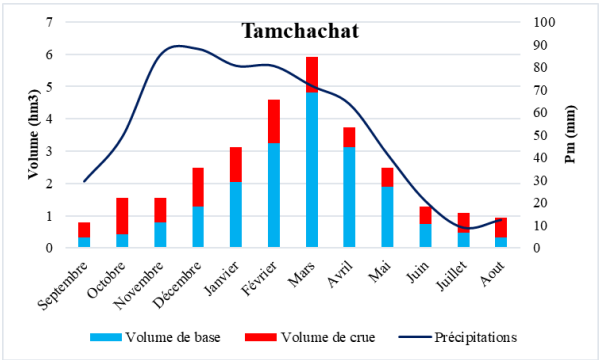


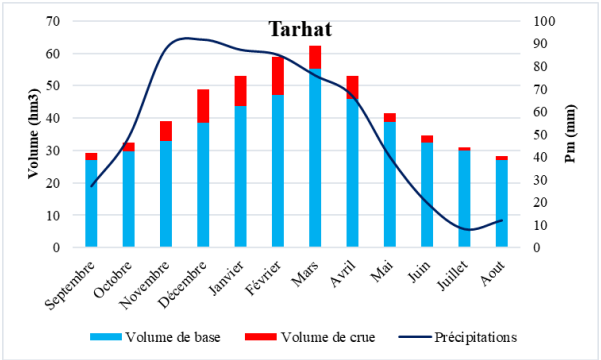
Annexe 4.21 Évolution des précipitations et des volumes des écoulements aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19











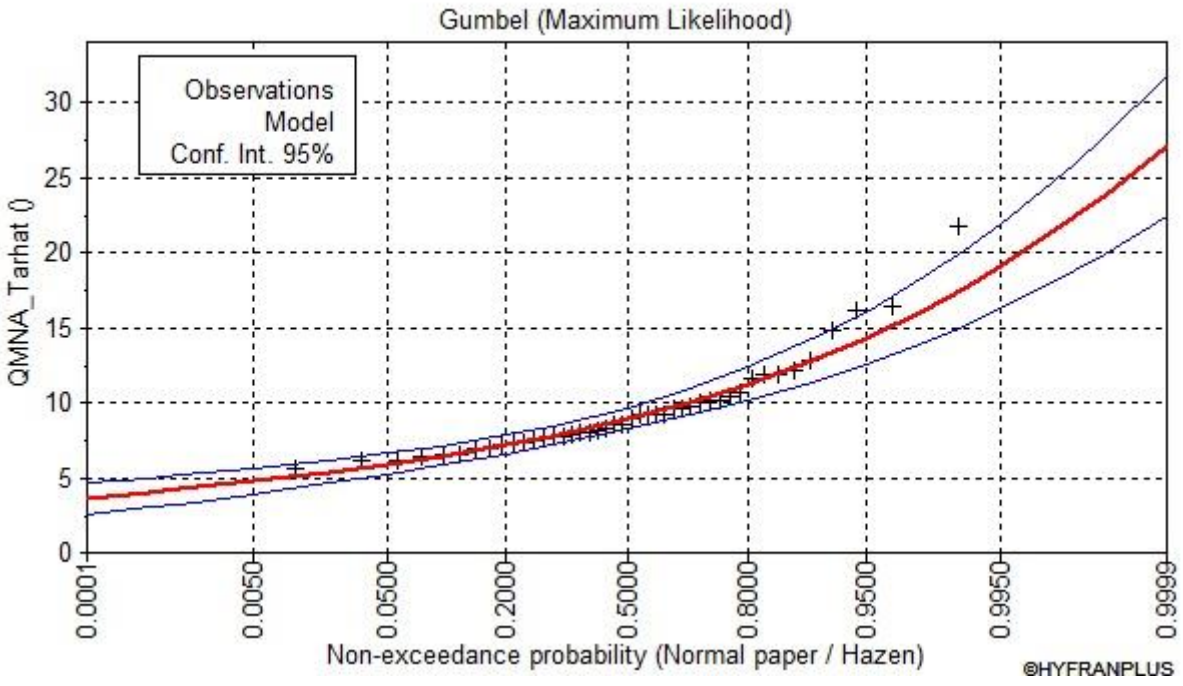
Annexe 4.22 Variabilité des QMNA aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19



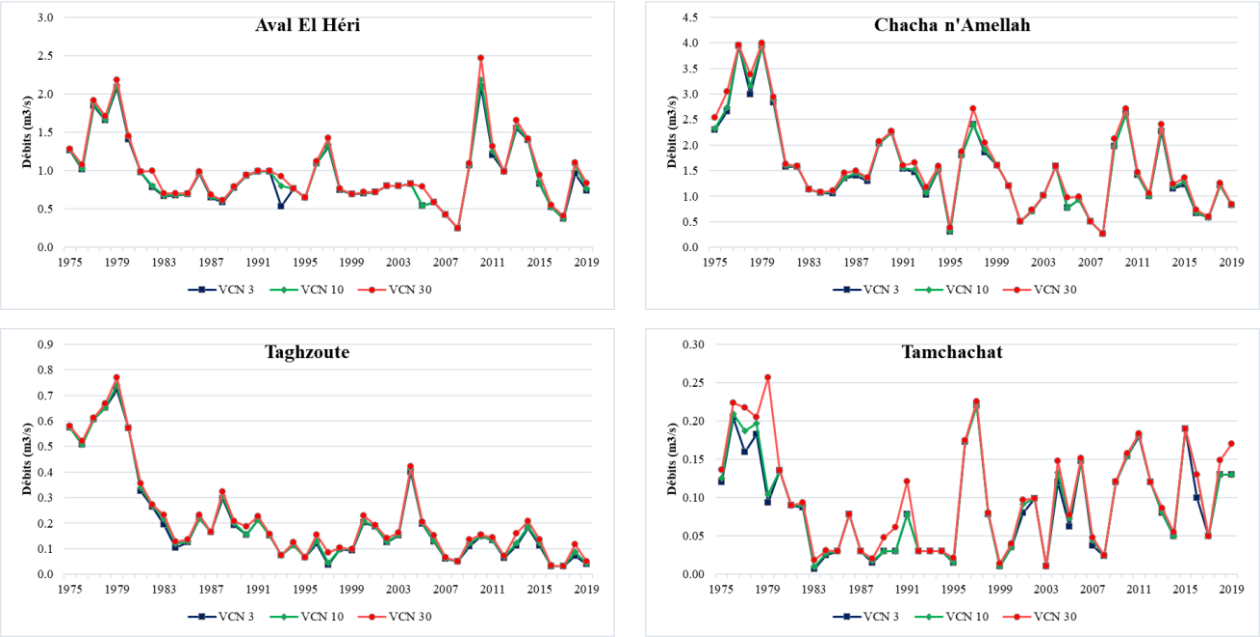
Annexe 4.23 Résultats du choix de l'ajustement statistique le plus approprié pour les QMNA aux stations du HaB-OER

	Ava		Cha		Tag		Tam		Tar	
	BIC	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**
Lognormal	32.9	29.4	106	102.4	-56.7	-60.3	-127.5	-131.1	215.6	212.0
Gumbel	31.9	28.4	106.2	102.6	-50.0	-53.6	-122.0	-125.6	213.0	209.4
GEV	35.3	30	109.5	104.2	-52.3	-57.7	-120.9	-126.2	215.3	210.0
Weibull	34.8	31.2	107.5	104	-	-	-	-	233.2	229.6
Normal	36.4	32.8	116.0	112.4	-29.9	-33.5	-113.8	-117.3	232.2	228.7

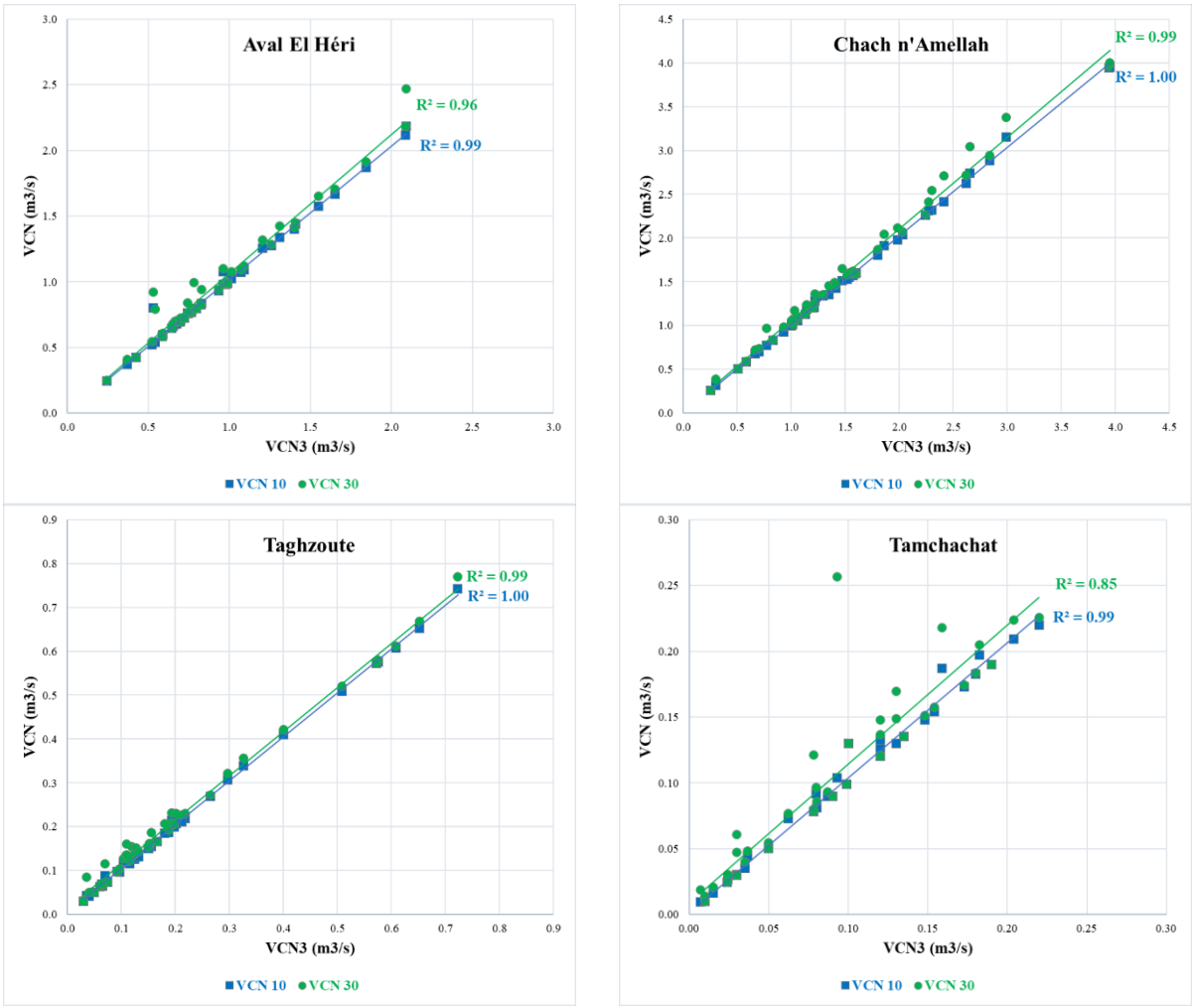
Annexe 4.24 Ajustement statistique des QMNA à la station de Tarhat selon la loi Gumbel

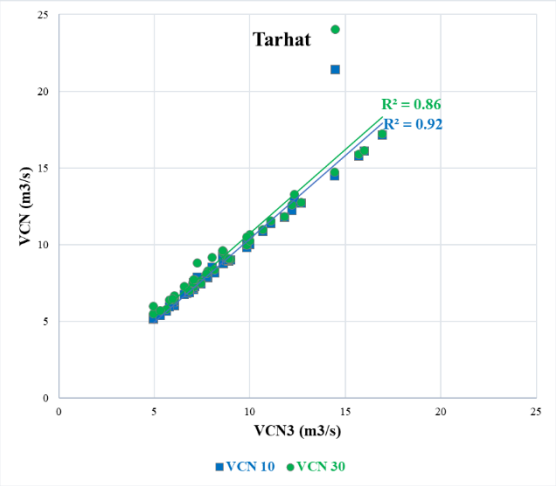


Annexe 4.25 Variabilité des VCN retenues pour les stations du HaB-OER entre 1975 et 2019

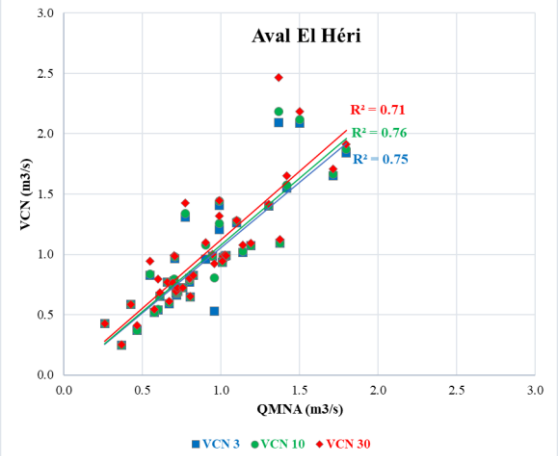


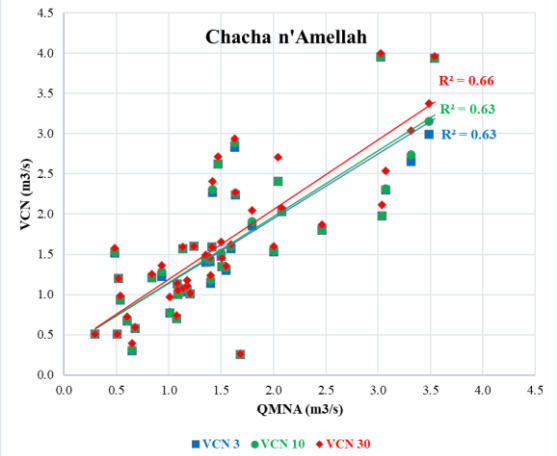
Annexe 4.26 Corrélation entre les VCN aux stations du HaB-OER

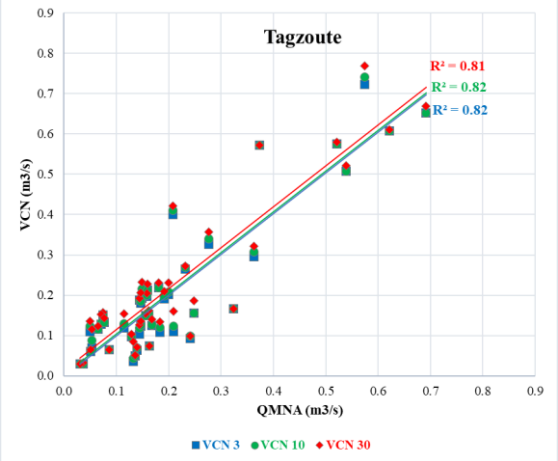


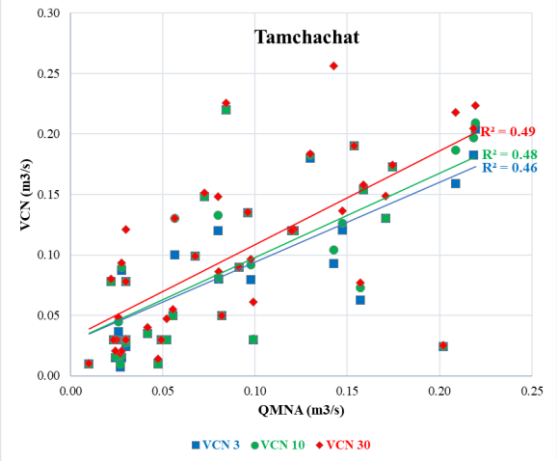


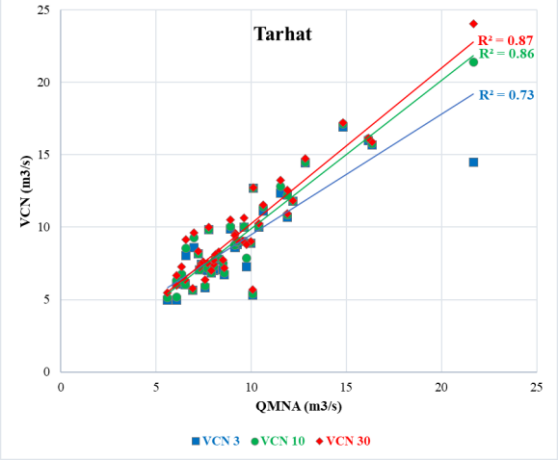
Annexe 4.27 Corrélation entre les QMNA et les VCN aux stations du HaB-OER











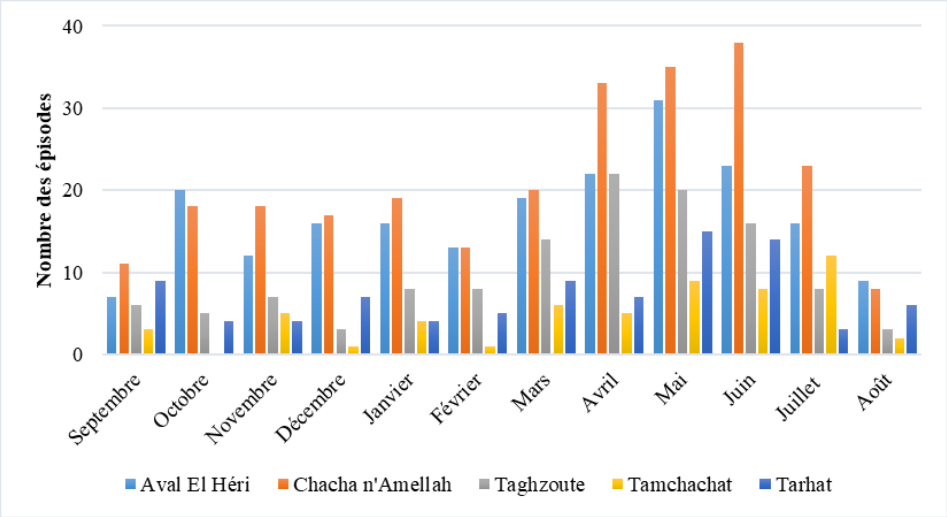
Annexe 4.28 Résultats du choix de l'ajustement statistique le plus approprié pour les VCN aux stations du HaB-OER

	Ava		Cha		Tag		Tam		Tar	
	BIC	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**	**BIC**	**AIC**
Lognormal	45.79	42.18	112.84	109.23	-56.44	-60.06	-125.1	-128.7	224.31	220.7
Gumbel	45.31	41.7	110.96	107.34	-43.29	-46.91	-123.9	-127.5	223.74	220.13
GEV	48.91	43.49	114.63	109.21	-51.76	-57.18	-120.1	-125.6	226.16	220.74
Weibull	51.33	47.72	111.78	108.17	-	-	-	-	234.39	230.78
Normal	56.15	52.54	119.91	116.3	-20.48	-24.09	-119.5	-123.1	235.01	231.4

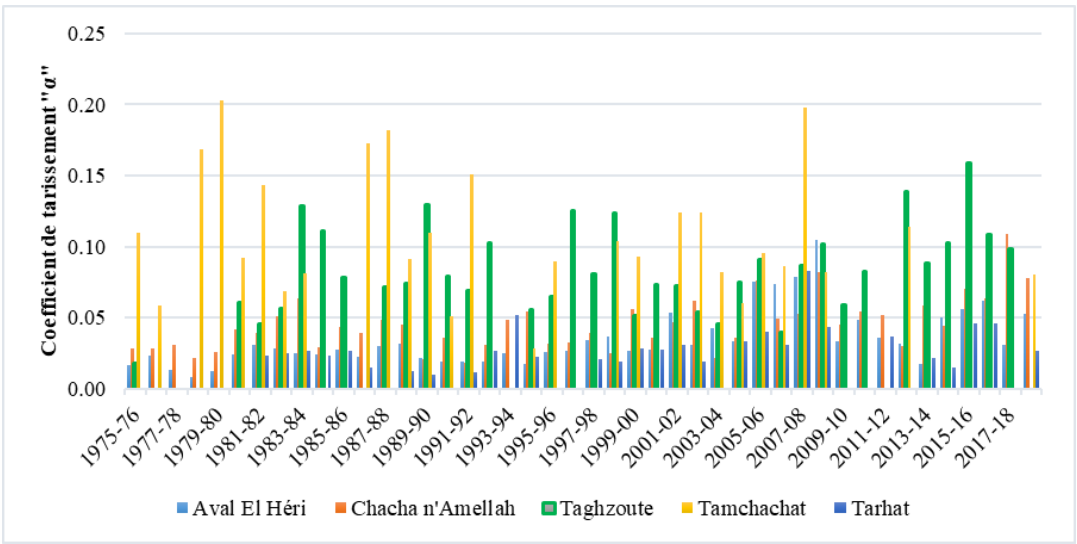
Annexe 4.29 Les débits modaux des stations du HaB-OER selon la loi de Fréchet

	Sep	**Oct**	**Nov**	**Dec**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Avr**	**Mai**	**Jui**	**Juit**	**Aou**
Ava	0.81	0.91	1.16	1.47	1.70	1.87	1.84	1.64	1.25	0.96	0.84	0.78
Cha	1.31	1.75	2.66	3.64	4.50	5.44	5.02	4.05	2.81	1.86	1.34	1.14
Tag	0.16	0.22	0.32	0.44	0.52	0.60	0.53	0.37	0.26	0.19	0.15	0.14
Tam	0.06	0.10	0.14	0.22	0.29	0.41	0.57	0.50	0.26	0.13	0.09	0.07
Tar	8.67	9.27	10.41	11.27	12.29	13.59	14.20	13.76	11.47	10.19	9.16	8.73

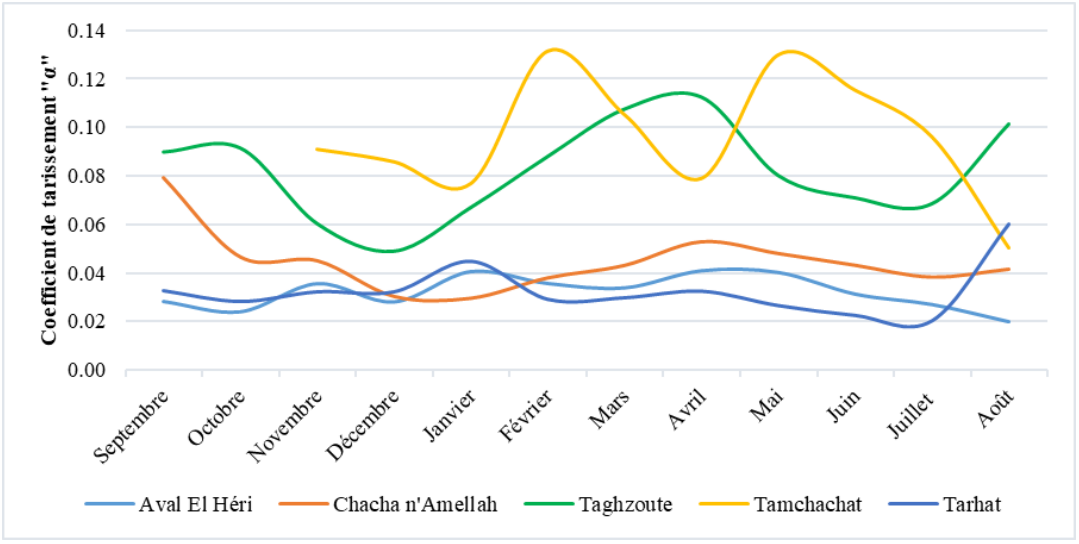
Annexe 4.30 Nombre mensuel des épisodes de tarissement des stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19



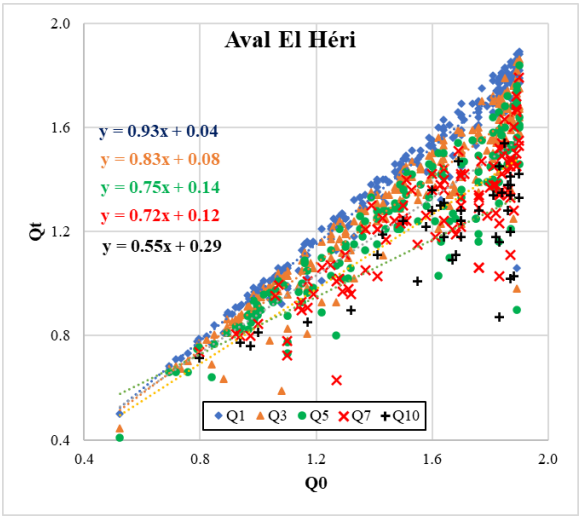
Annexe 4.31 Variabilité annuelle du coefficient de tarissement "α" pour les stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

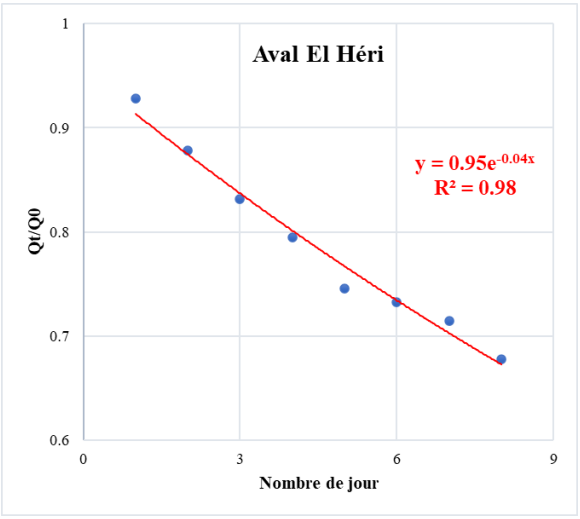


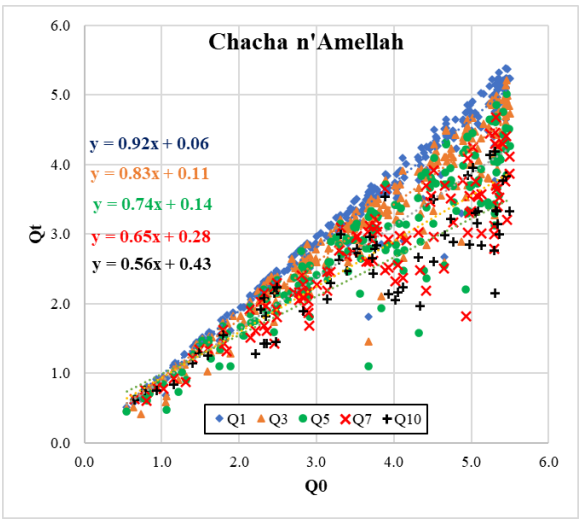
Annexe 4.32 Variabilité mensuelle du coefficient de tarissement "α" pour les stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19

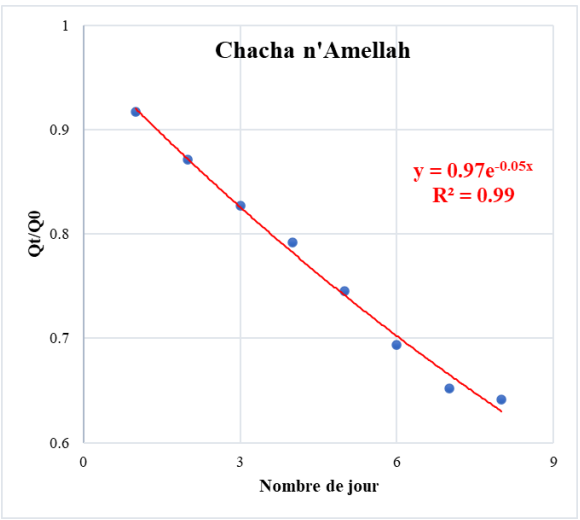


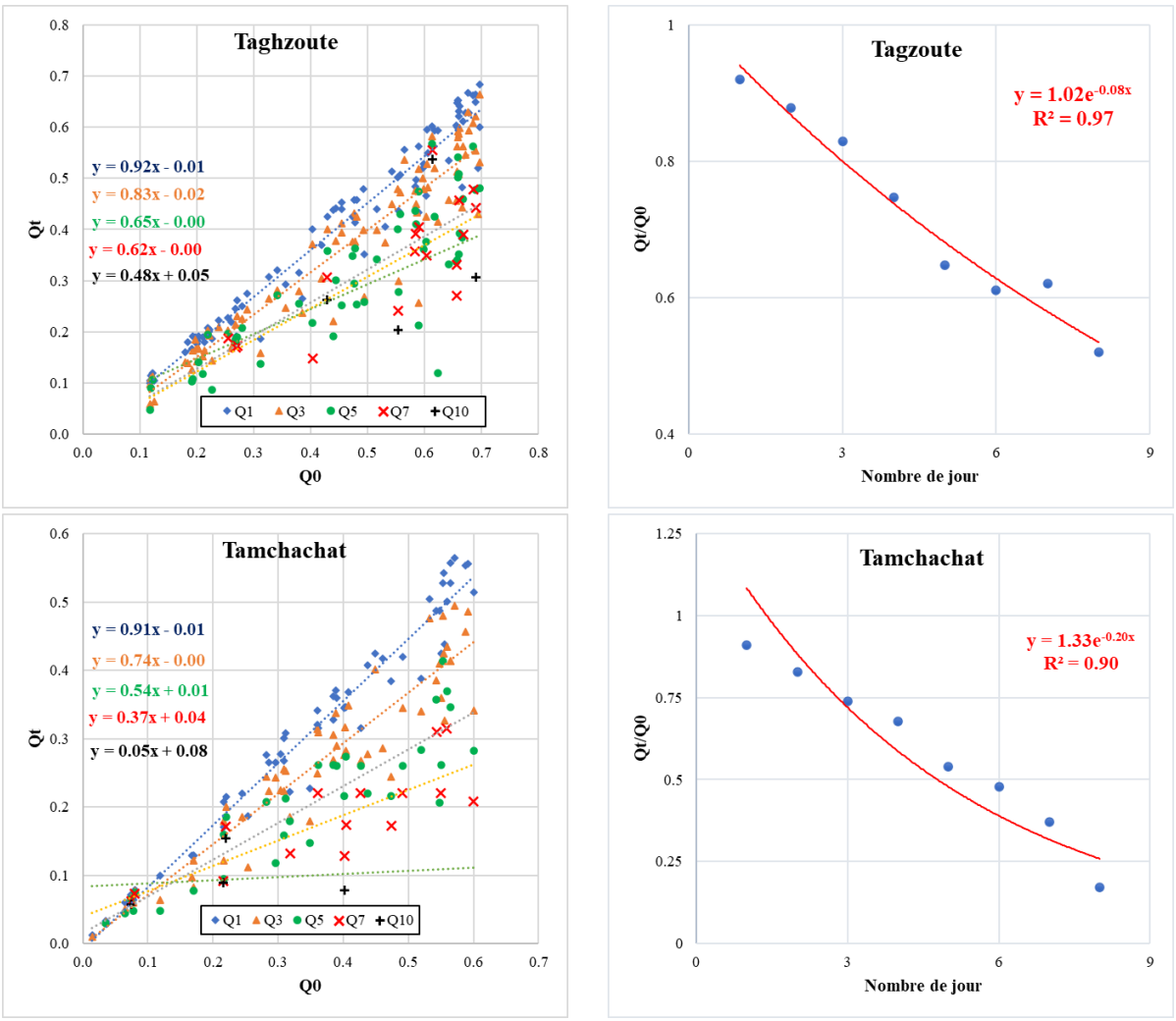
Annexe 4.33 Résultats de l'application de la méthode des corrélations pour les stations du HaB-OER



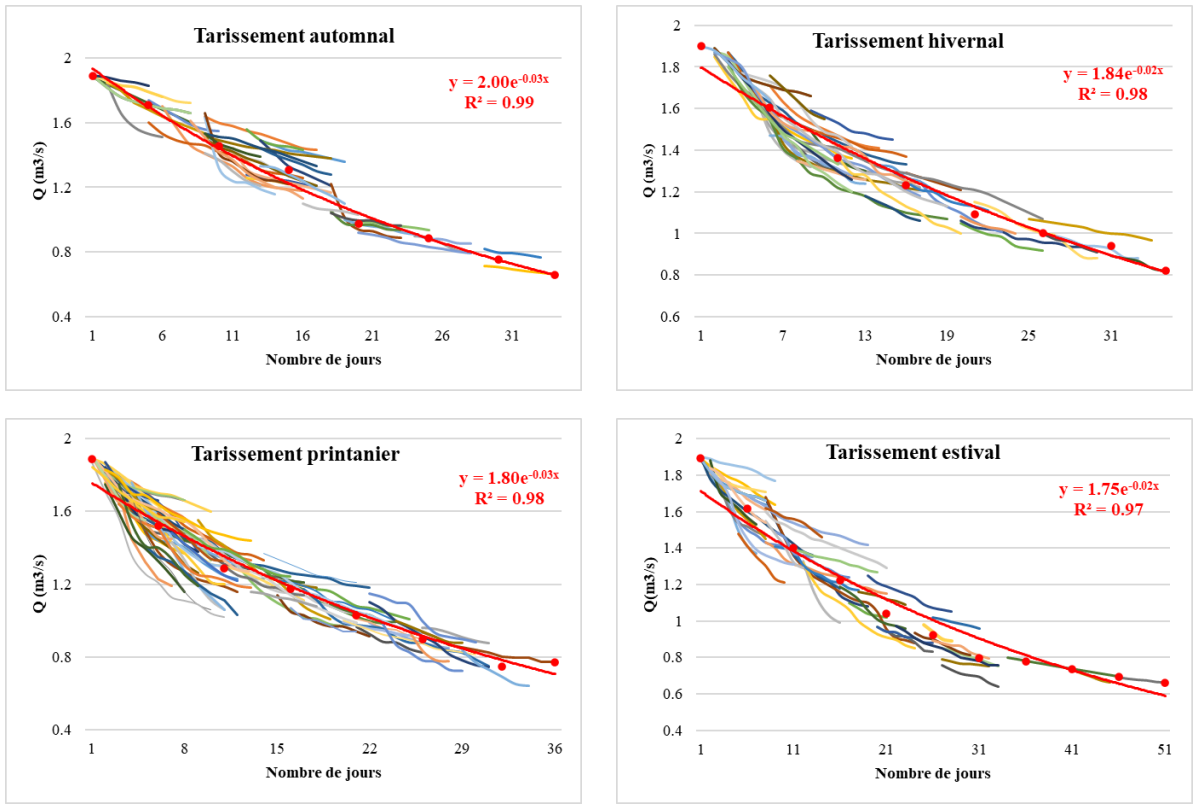




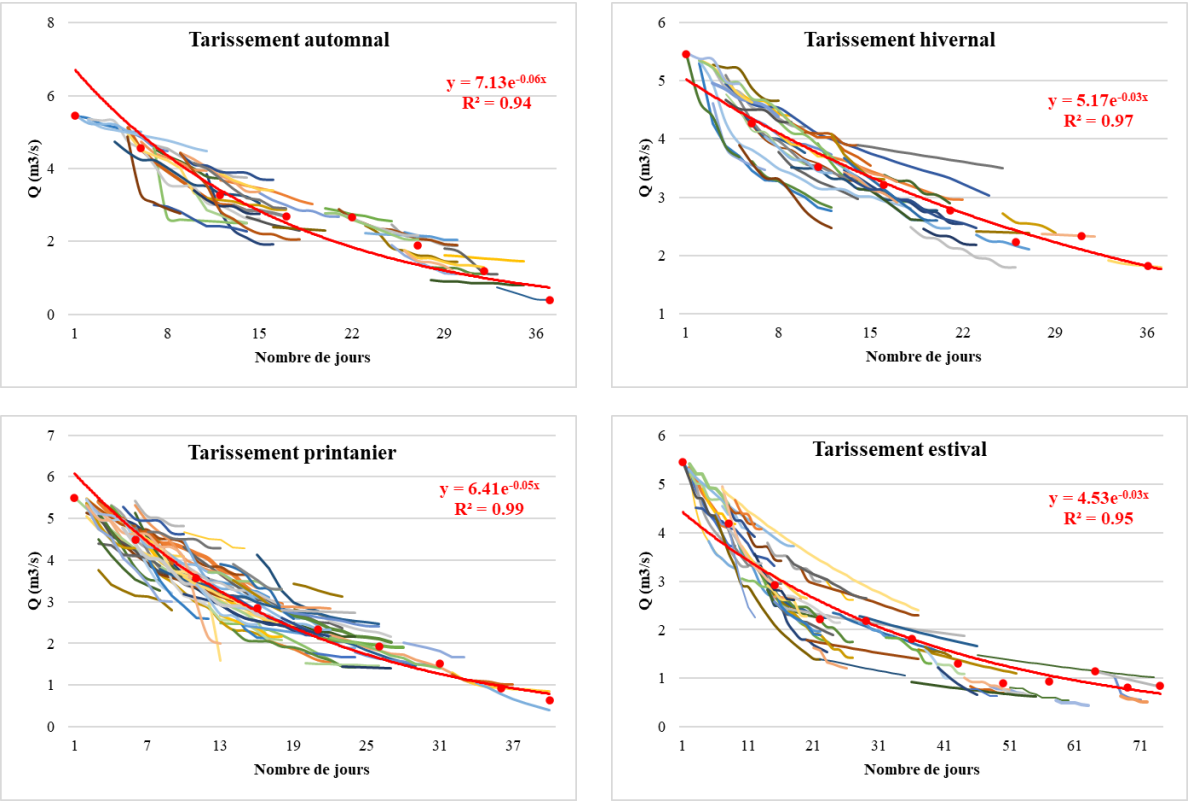




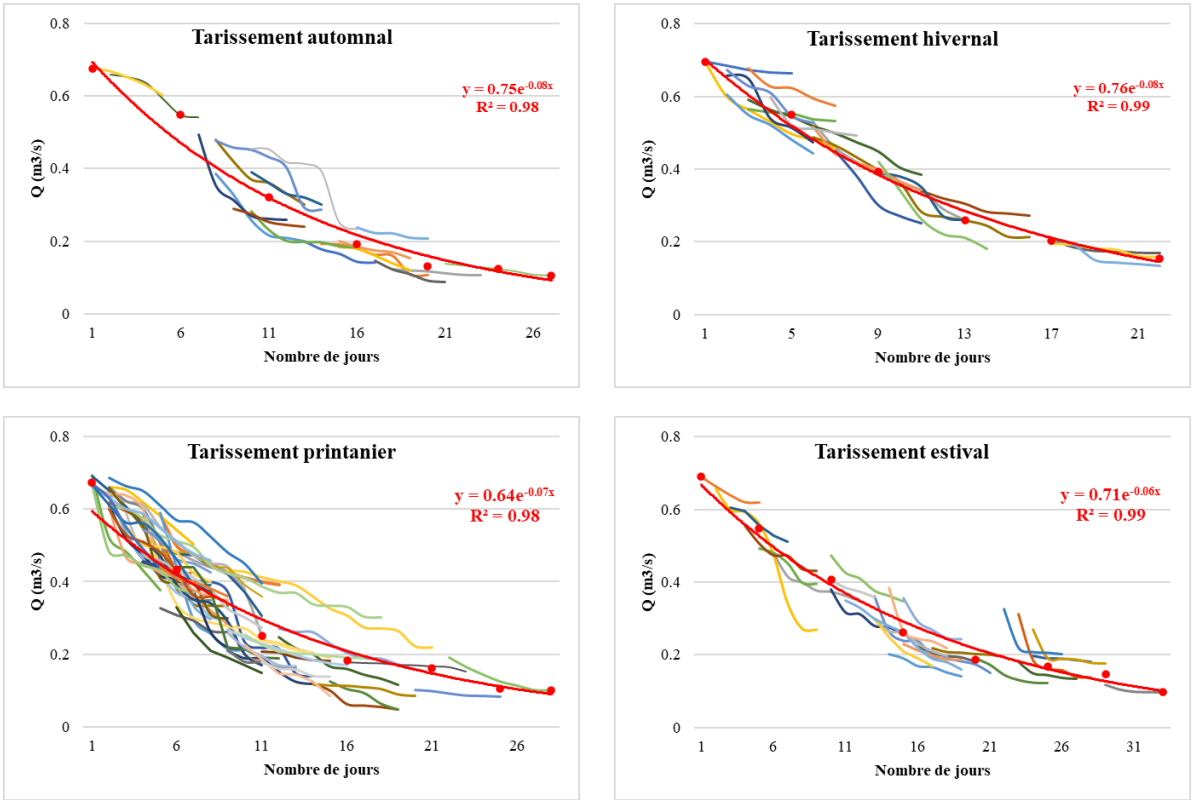
Annexe 4.34 Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode "MSM" pour la station d'Aval El Héri



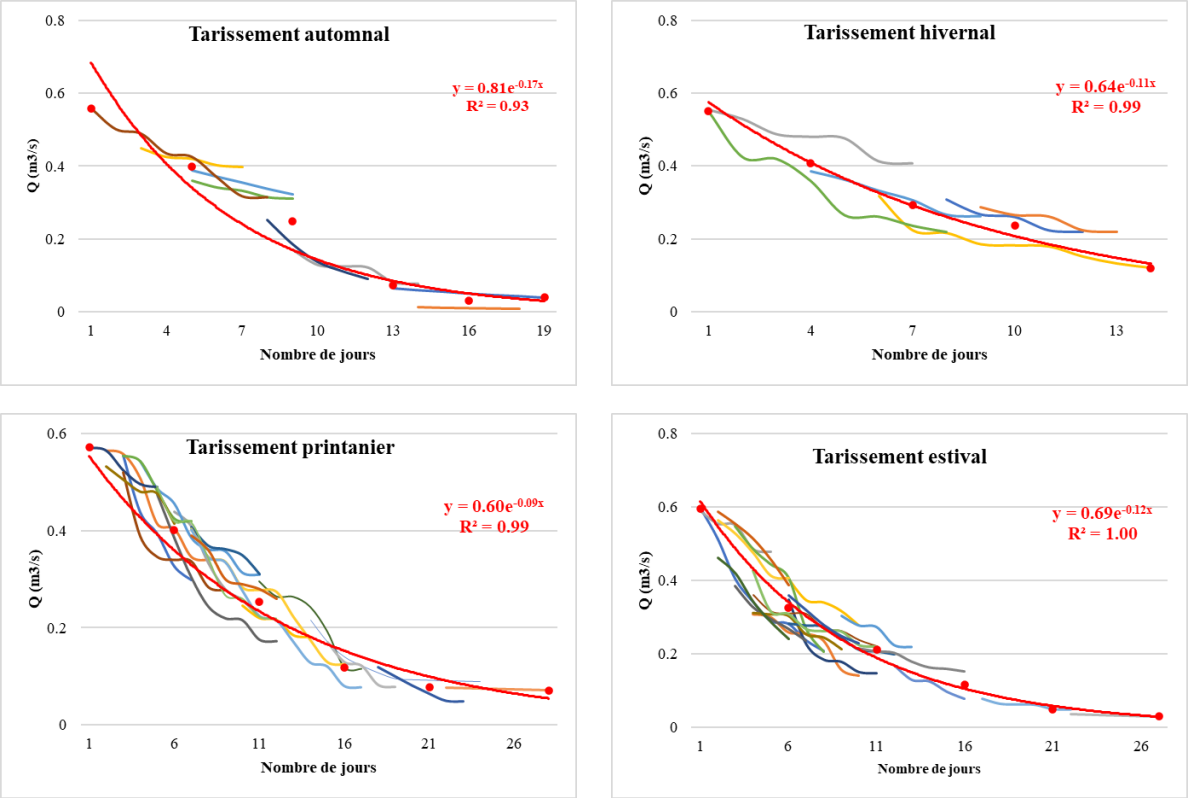
Annexe 4.35 Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode "MSM" pour la station de Chacha n'Amellah



Annexe 4.36 Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode "MSM" pour la station de Tagzoute



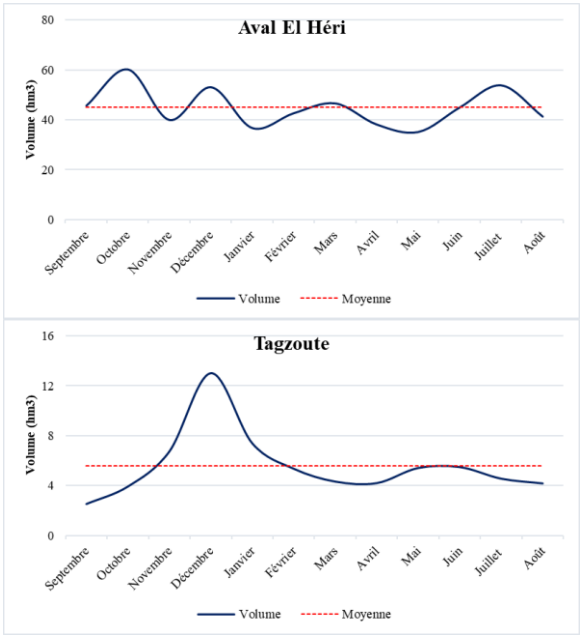
Annexe 4.37 Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode "MSM" pour la station de Tamchachat

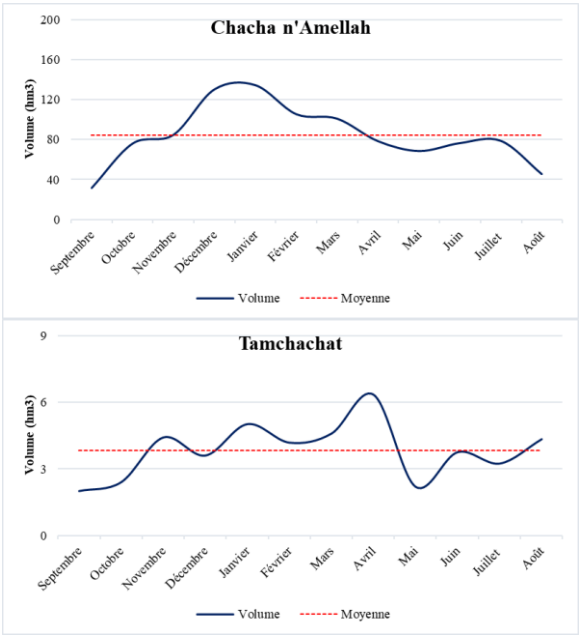


Annexe 4.38 La ressource régulatrice annuelle moyenne dans le HaB-OER



Annexe 4.39 La ressource régulatrice mensuelle moyenne dans le HaB-OER





Annexe 4.40 Cordonnées des points de jaugeages

	Abréviation	X	Y	Z
Oued Amengous Amont	Amn_Am	519889	276421	1873
Oued Amengous Aval	Amn_Av	512383	274393	1701
Oued Fellat Amont	Fel_Am	509311	272309	1527
Oued Fellat Aval	Fel_Av	498454	273565	1219
Oued Bou-Idji	Bou	498775	272700	1258
Oued OER sous Sources	OER_S	496956	273067	1200

Annexe 4.41 Débits et hauteurs d'eau mesurés aux sites sélectionnés

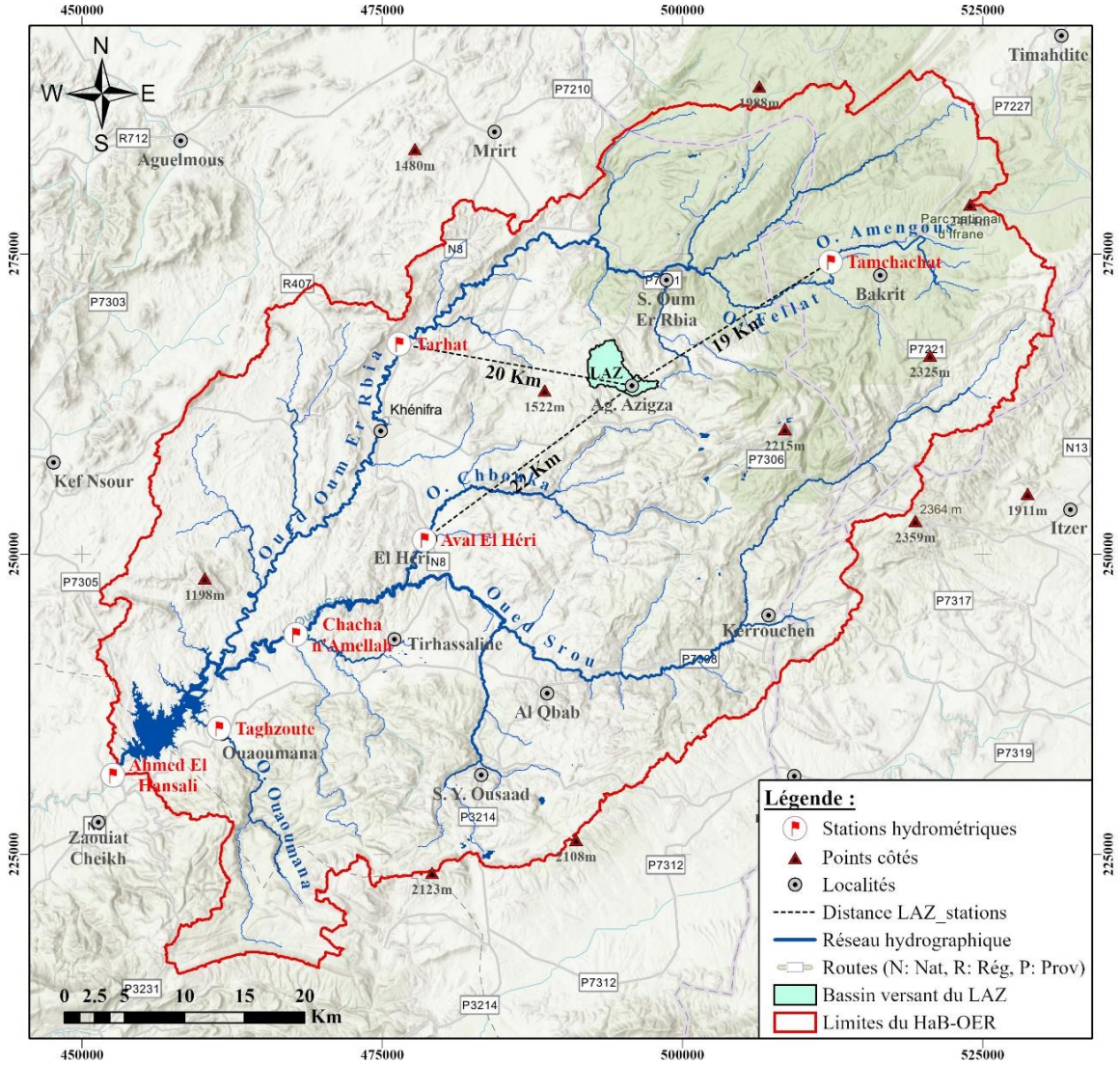
	06/06/19		02/07/2019		09/08/2019		01/09/2019		01/01/2020		02/02/2020		08/08/2020	
	H (cm)	Q m^3/s	H (cm)	Q m^3/s	H (cm)	Q m^3/s	H (cm)	Q m^3/s	H (cm)	Q m^3/s	H (cm)	Q m^3/s	H (cm)	Q m^3/s
Amn_Am	6	0.15	5	0.12	4	0.10	4.5	0.11	8	0.20	7.5	0.18	4	0.08
Amn_Av	99	0.13	98	0.08	94	0.04	96	0.06	105	0.42	103	0.27	97	0.01
Fal_Am	36	0.48	34	0.37	32	0.27	33	0.31	45	1.10	42	0.81	34	0.23
Fel_Av	38	0.60	30	0.23	28	0.11	31	0.26	50	1.3	49	1.26	-	0.01
Bou	23	0.02	19	0.004	17	0.003	31	0.071	36	0.11	35	0.11	Sec	
OER	-	9.6	-	9.46	-	9.34	-	8.34	-	-	-	-	-	-

Chapitre 5 : Suivi et analyse de l'évolution des lacs et des sources du HaB-OER

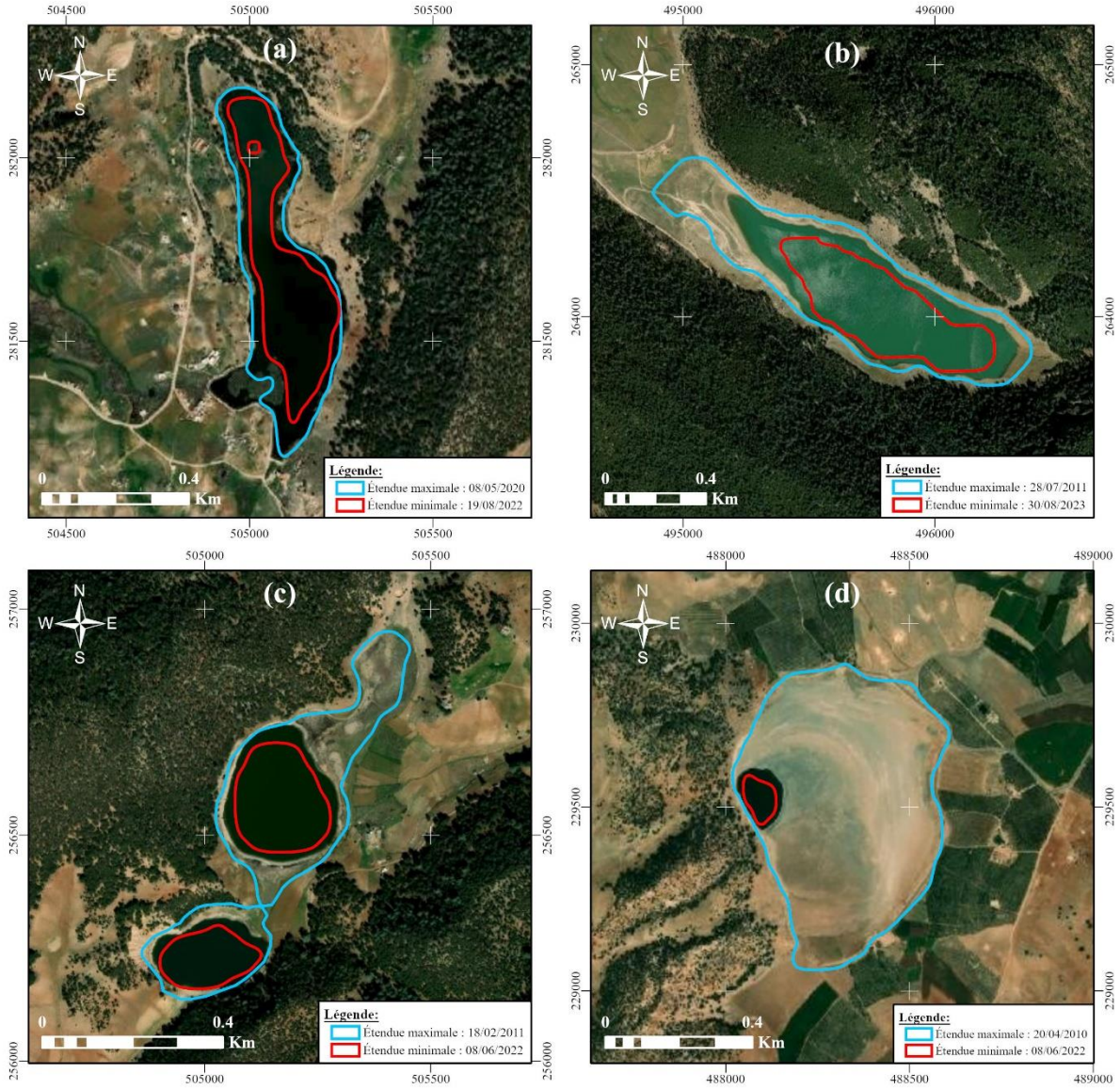
Annexe 5.1 Principales caractéristiques des satellites Landsat (https://landsat.gsfc.nasa.gov/)

Satellites		Landsat-5	Landsat-7	Landsat-8	
Instruments		TM	ETM+	OLI - TIRS	
Période de mission		1984-2013	1999-opérationnel	2013-opérationnel	
Bandes spectrales	Bande 1 :	0,45-0,52 µm (B)	0,441-0,514 µm (B)	0,435-0,451 µm (Aér)	Aér : Aérosol B : Bleu V : Vert R : Rouge PIR : Proche Infrarouge MIR : Moyen Infrarouge Pan: Panchromatique Cir : Cirrus IRT : Infrarouge Thermique
	Bande 2 :	0,52-0,60 µm (V)	0,519-0,601 µm (V)	0,452-0,512 µm (B)	
	Bande 3 :	0,63-0,69 µm (R)	0,631-0,692 µm (R)	0,533-0,590 µm (V)	
	Bande 4 :	0,76-0,90 µm (PIR)	0,772-0,898 µm (PIR)	0,636-0,673 µm (R)	
	Bande 5 :	1,55-1,75 µm (MIR1)	1,547-1,74 µm (MIR1)	0,851-0,879 µm (PIR)	
	Bande 6 :	10,4-12,5 µm (IRT)	10,31-12,36 µm (IRT)	1,566-1,651 µm (MIR1)	
	Bande 7 :	2,08-2,35 µm (MIR2)	2,064-2,345 µm (MIR2)	2,107-2,294 µm (MIR2)	
	Bande 8 :		0,515-0,896 µm (Pan)	0,503-0,676 µm (Pan)	
	Bande 9 :			1,363 - 1,384 µm (Cir)	
	Bande 10 :			10,60-11,19 µm (IRT1)	
	Bande 11 :			11,50-12,51 µm (IRT1)	
Résolution		Générale : 30 m IRT :120 m	Générale : 30 m Pan : 15 m IRT : 60 m	Générale : 30 m Pan : 15 m IRT : 100 m	

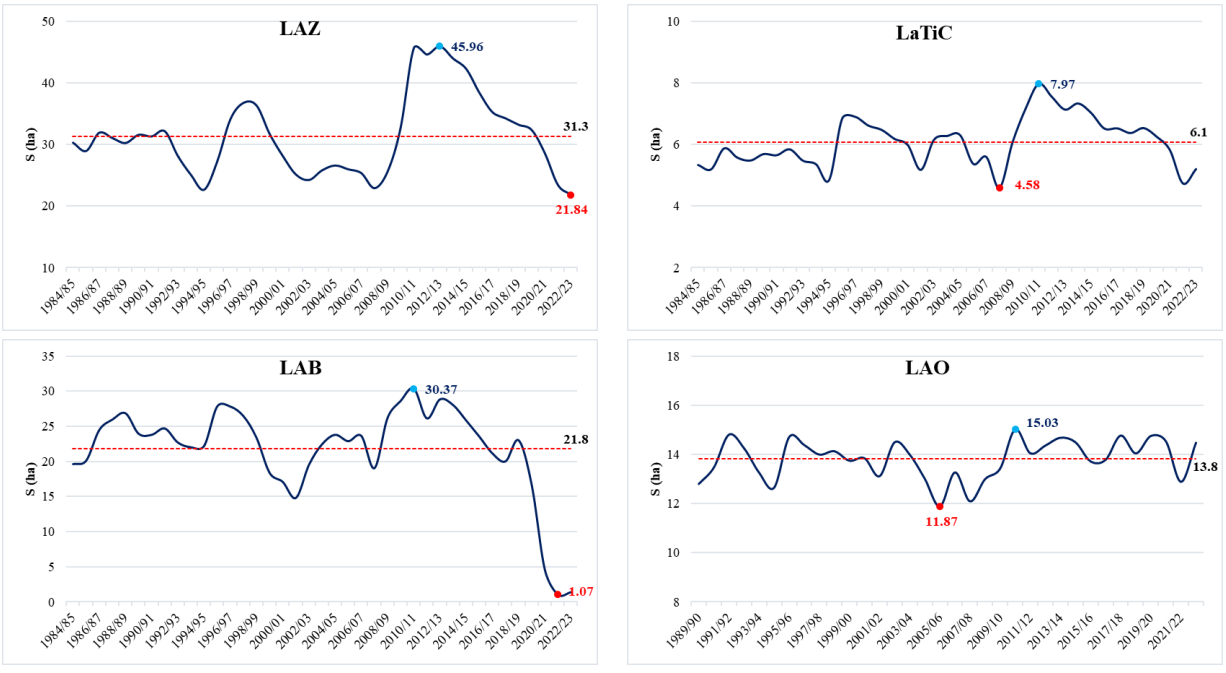
Annexe 5.2 Localisation du LAZ par rapport aux station pluviométrique



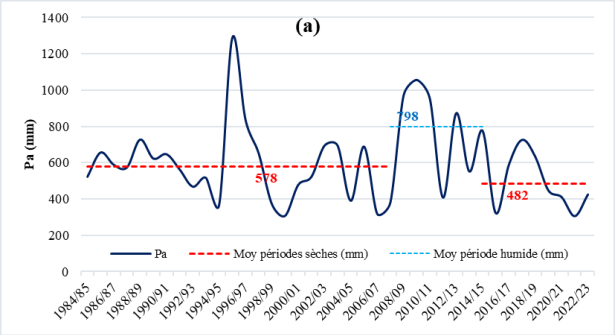
Annexe 5.3 Étendue maximale et minimale des (a) LAO, (b) LAZ, (c) LaTiC et (d) LAB



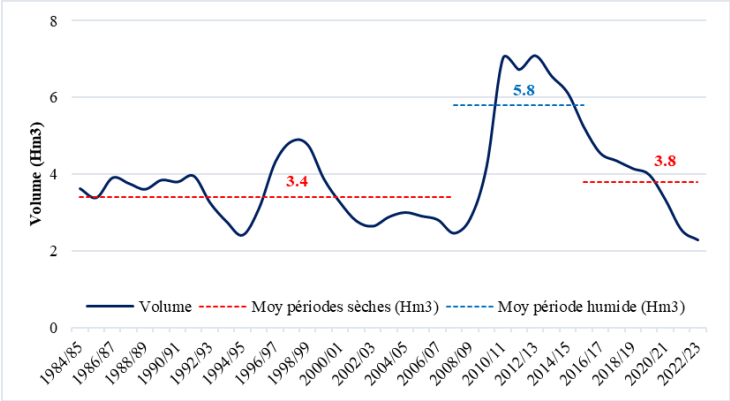
Annexe 5.4 Evolutions des superficies moyennes annuelles des lacs du HaB-OER entre 1984 et 2023



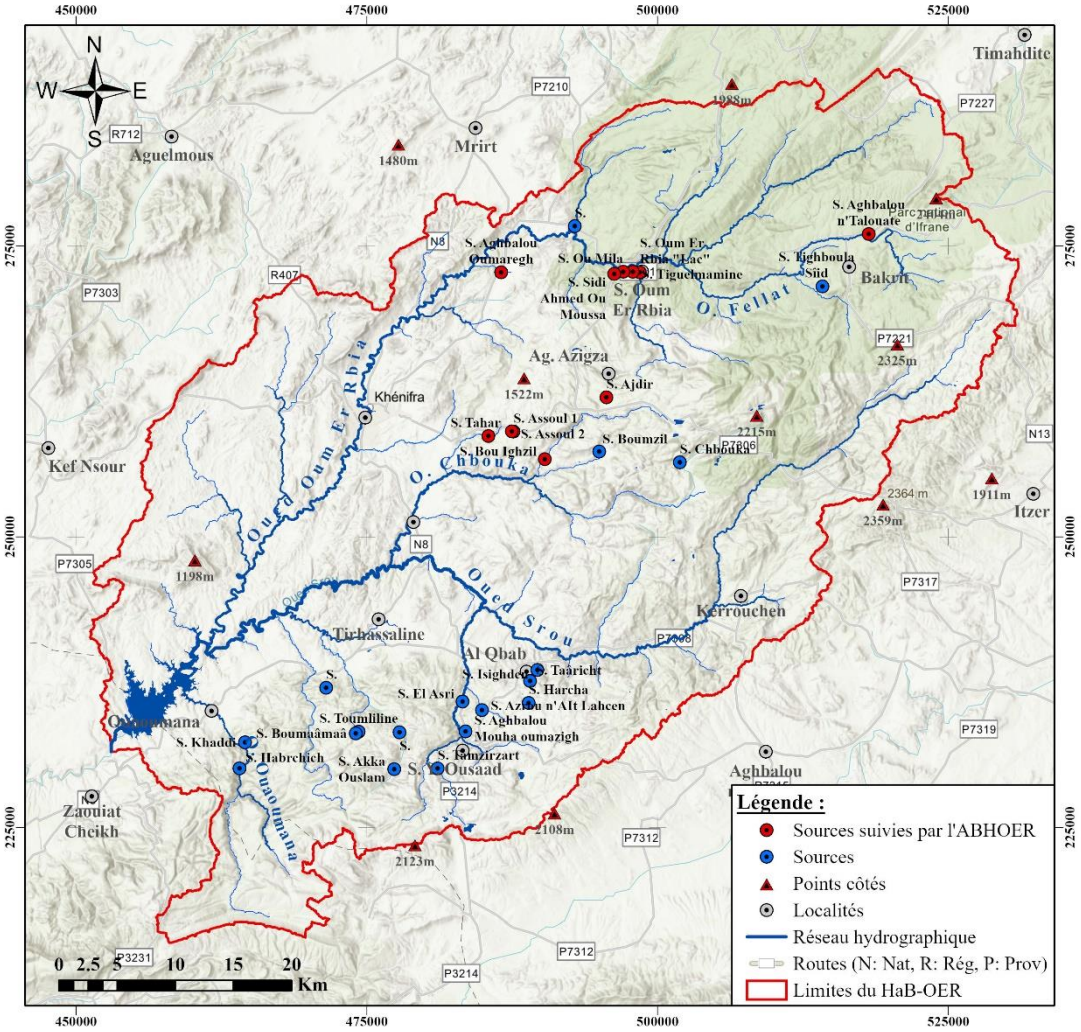
Annexe 5.5 Variabilité des (a) précipitations et de (b) l'ETP à l'échelle du LAZ selon le découpage du CUSUM



Annexe 5.6 Variabilité des volumes du LAZ selon le découpage du CUSUM



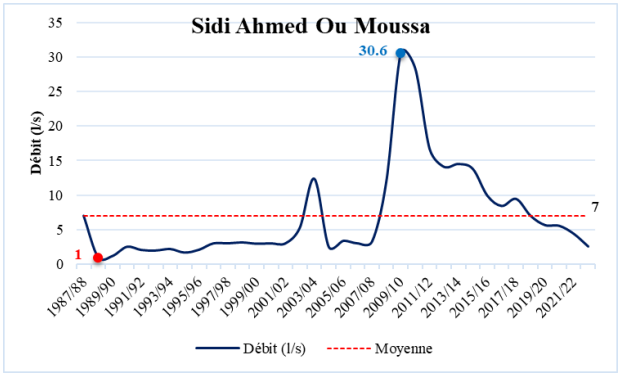
Annexe 5.7 Localisation des principales sources du HaB-OER

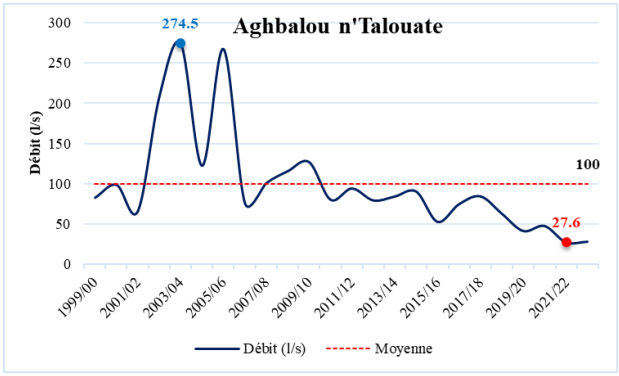


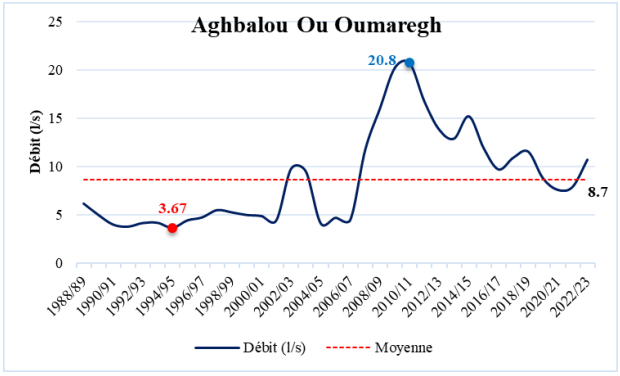
Annexe 5.8 Caractéristiques statistiques des débits des sources suivies par l'ABHOER

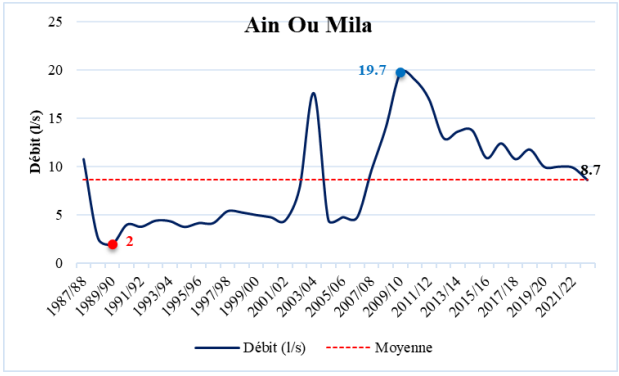
	Moy (l/s)	Min (l/s)	Max (l/s)	ET (l/s)	CV (%)
Sidi Ahmed Ou Moussa	7	1	30.6	7	100
Ain Ou Mila	8.7	2	19.7	5	57
Ain Tahar	0.5	0.2	0.9	0.2	43
Ain Ajdir	0.7	0	1.7	0.4	61
Aghbalou Ou Oumaregh	8.7	3.7	20.7	4.9	56
Aghbalou n'Talouate	99.8	27.6	274.5	64.5	65

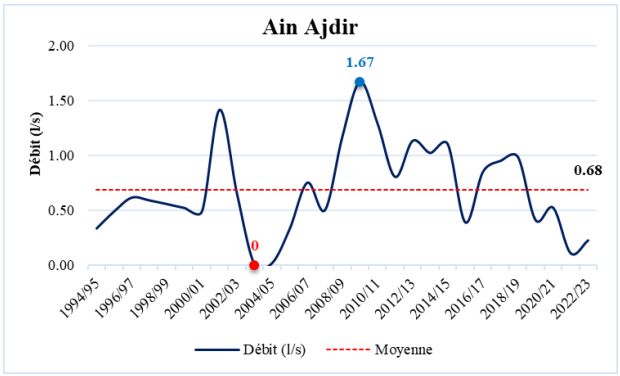
Annexe 5.9 Evolution annuelle des débits des sources suivies par l'ABHOER

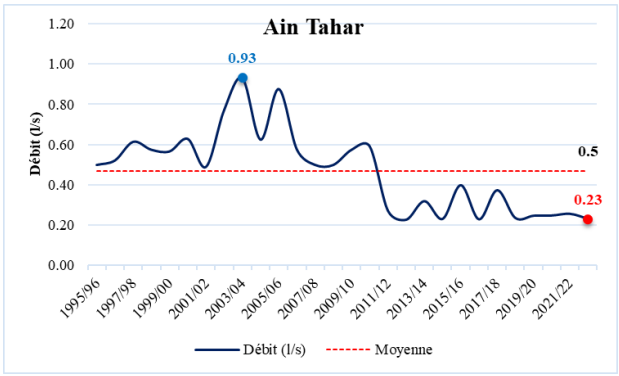






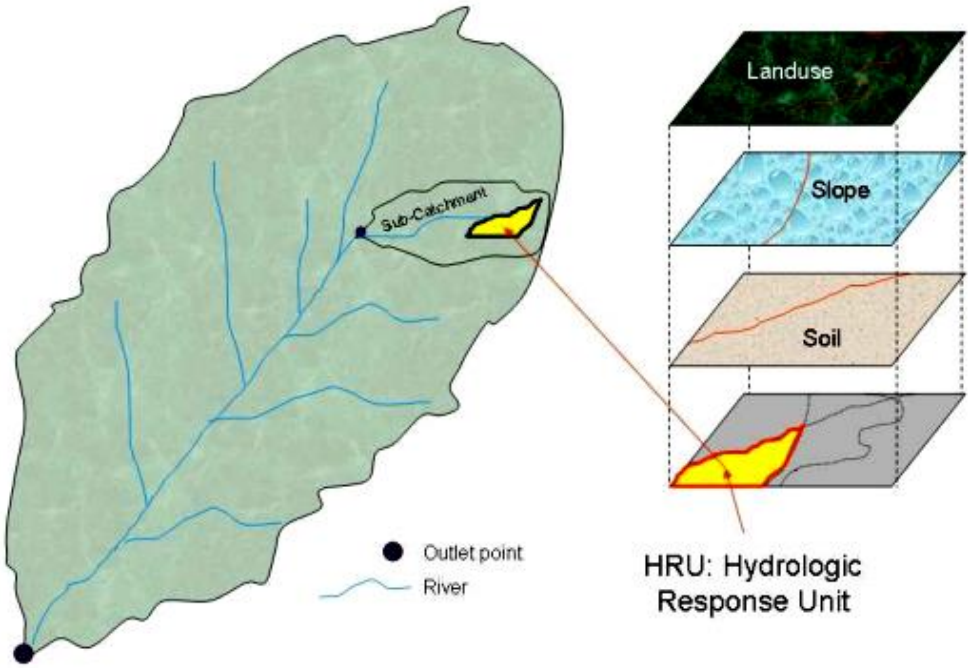






Chapitre 6 : Modélisation pluie débit : choix, structure et performance

Annexe 6.1 Schéma d'URH (Oeurng, 2010)



Annexe 6.2 Caractéristiques des deux horizons des sols dans la région du HaB-OER (Gies & Merwade, 2014)

Code	Texture	SOL_BD1 (Mg/m³)	SOL_AWC1 (mm)	SOL_K1 (mm/hr)	CLAY1	SILT1	SAND1
Bk13-2ab-1114	Limon	1.3	0.16	8.2	23	42	35
E12-2c-1152	Limon	1.4	0.09	4.78	24	40	36
Lc38-2bc-1403	Limon argileux sableux	1.3	0.166	11.49	25	25	50
Lc39-2c-1404	Limon argileux sableux	1.2	0.09	18.7	23	25	51
Lc45-3bc-1411	Limon argileux	1.3	0.095	7.06	31	37	33

Code	Texture	SOL_BD1 (Mg/m³)	SOL_AWC1 (mm)	SOL_K1 (mm/hr)	CLAY1	SILT1	SAND1
Bk13-2ab-1114	Limon	1.5	0.16	2.8	26	41	34
E12-2c-1152	Limon	1.5	0.09	2.49	32	32	35
Lc38-2bc-1403	Limon argileux sableux	1.4	0.166	5.39	32	25	43
Lc39-2c-1404	Limon argileux sableux	1.4	0.09	5.39	32	25	43
Lc45-3bc-1411	Limon argileux	1.4	0.095	4.64	38	28	34

avec :

SOL_BD	**Moist bulk density**	**Densité apparente à saturation en eau**
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	Capacité en eau disponible dans sol
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	Conductivité hydraulique saturée

Annexe 6.3 Hydrogramme des débits simulés et observés par le modèle GR2M sur la période 1982-2019

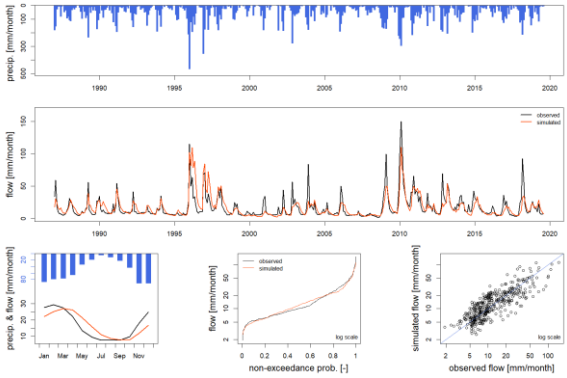


Figure 6.1 pour la station d'Aval El Héri

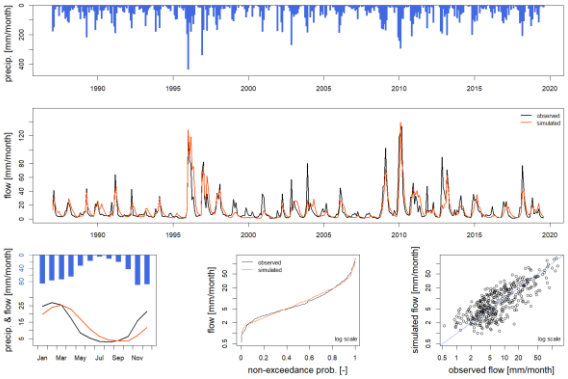


Figure 6.2 pour la station de Chacha n'Amellah

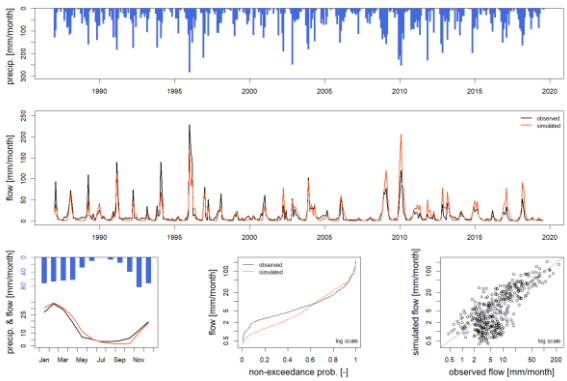


Figure 6.3 pour la station de Taghzoute

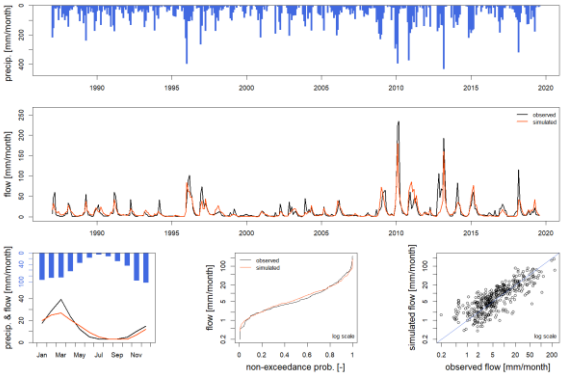


Figure 6.4 pour la station de Tamchachat

Annexe 6.4 Hydrogramme des débits simulés et observés par le modèle GR4J sur la période 1982-2019

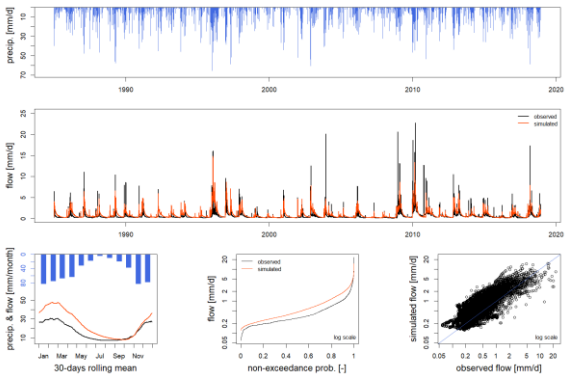


Figure 6.5 pour la station d'Aval El Héri

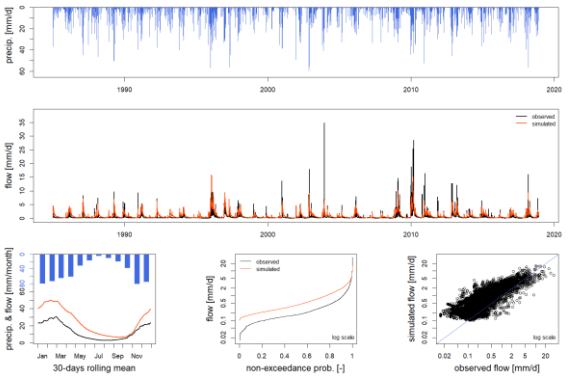


Figure 6.6 pour la station de Chacha n'Amellah

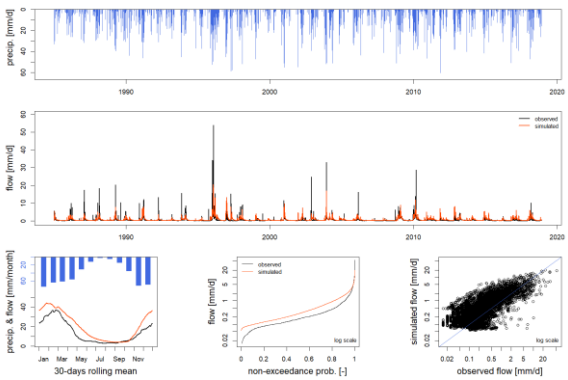


Figure 6.7 pour la station de Taghzoute

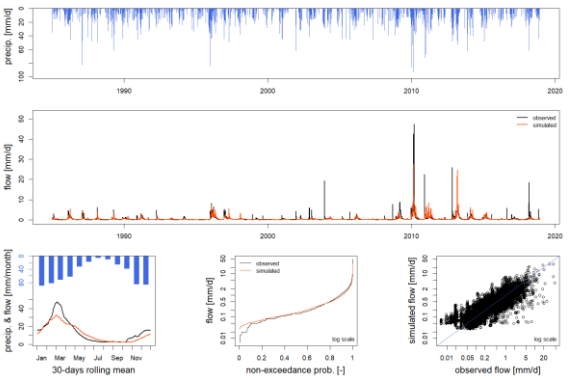
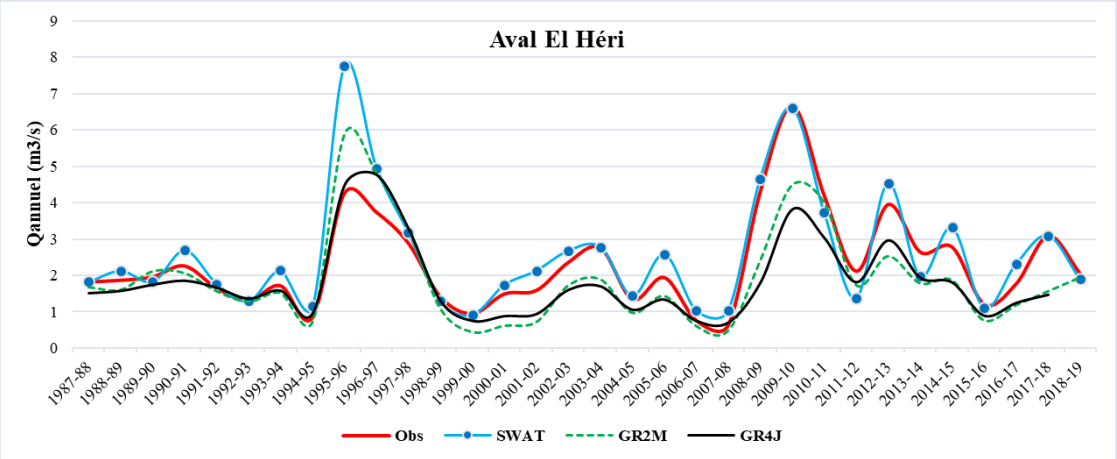


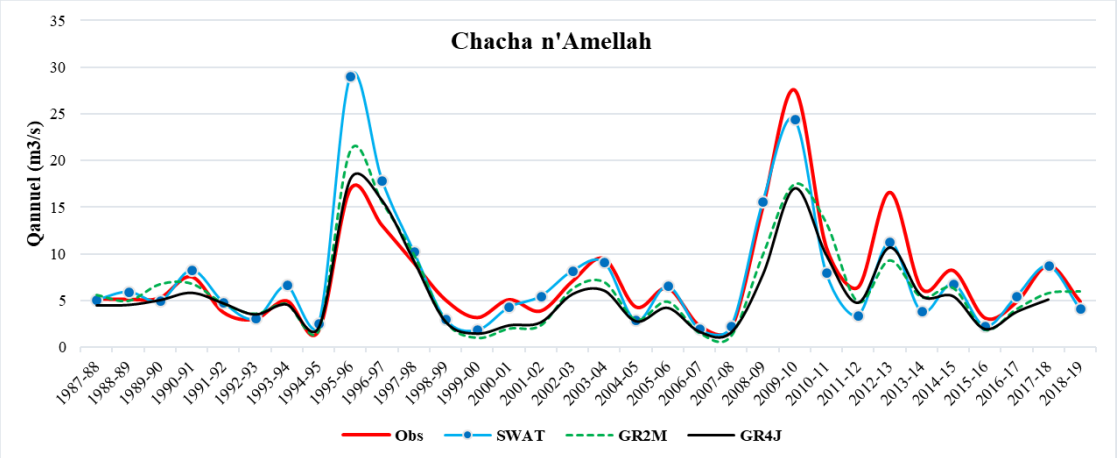
Figure 6.8 pour la station de Tamchachat

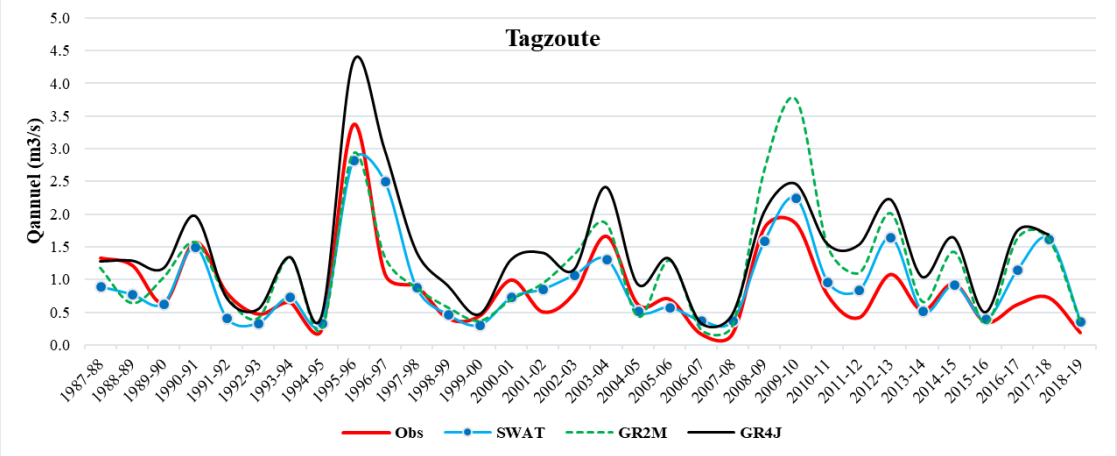
Annexe 6.5 Hydrogrammes des débits mensuels observés et simulés par le modèle SWAT entre 1982 et 2019

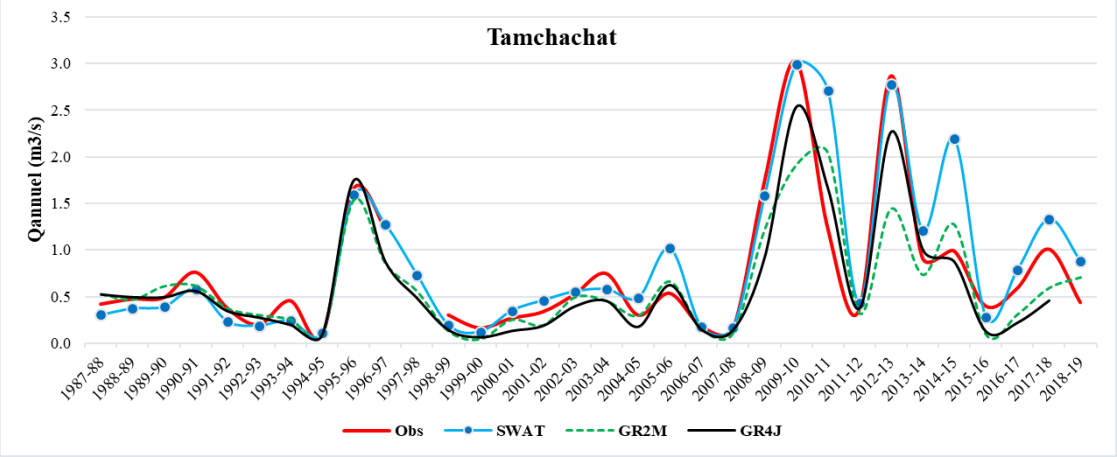


Annexe 6.6 Comparaison des débits moyens annuels observés et simulés pour les stations du HaB-OER

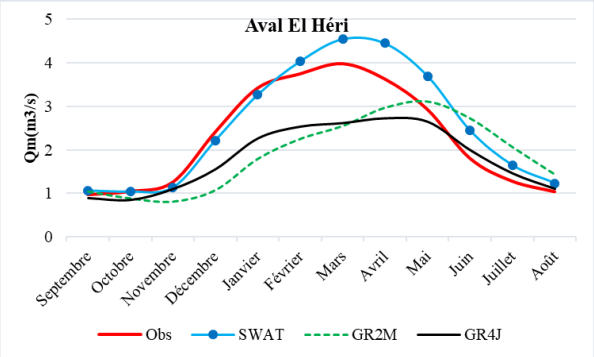


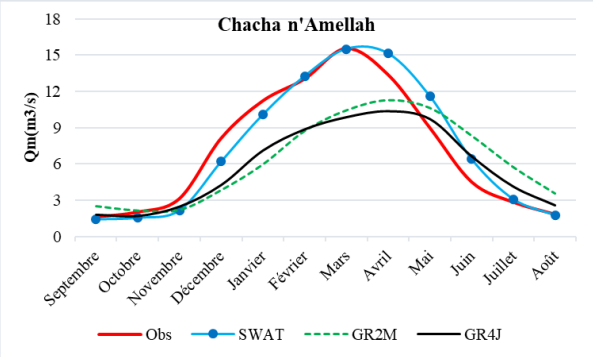


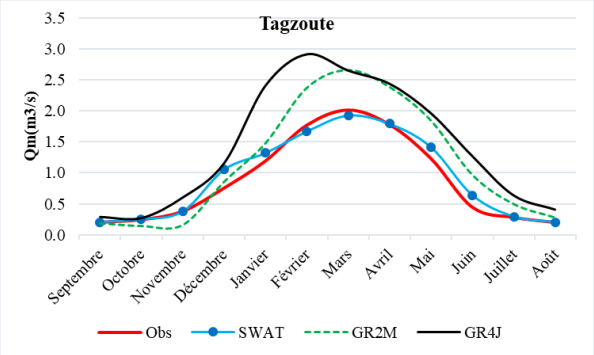


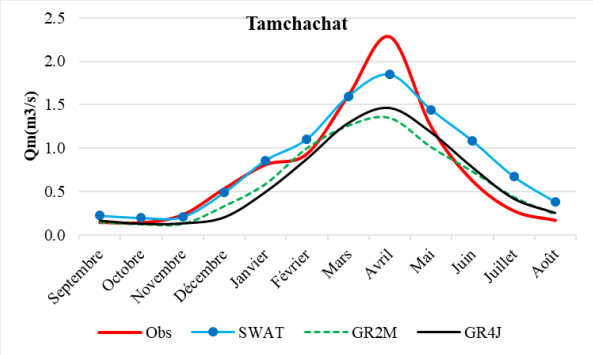


Annexe 6.7 Comparaison des débits moyens mensuels observés et simulés pour les stations du HaB-OER







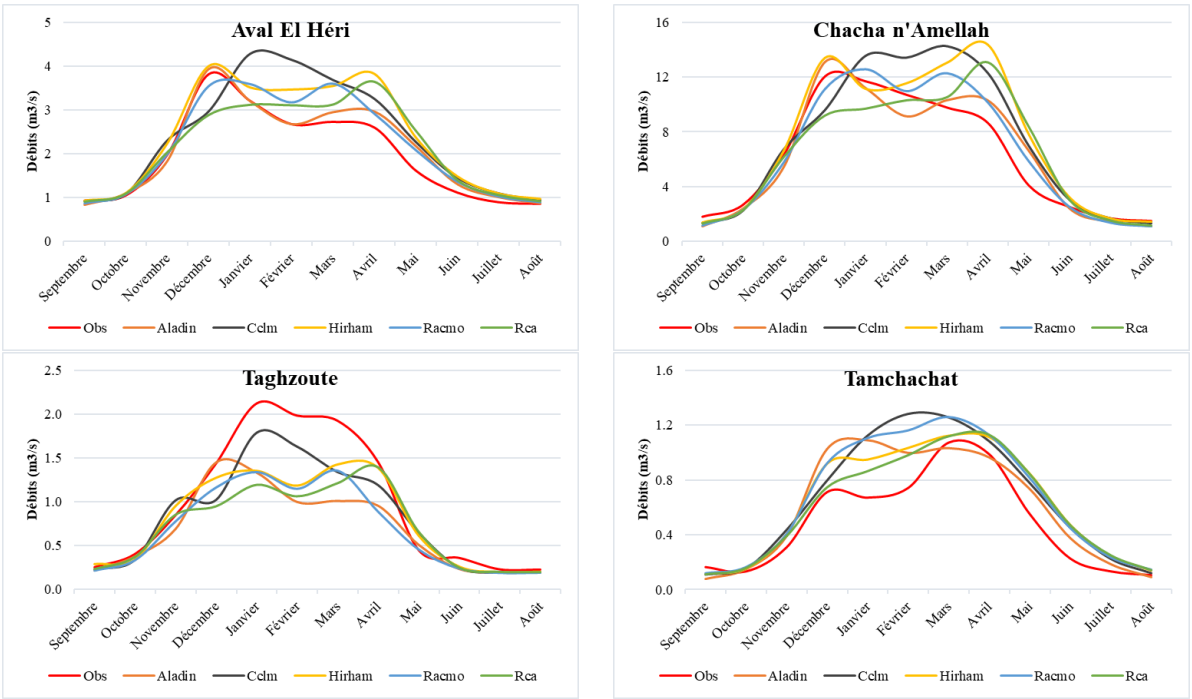


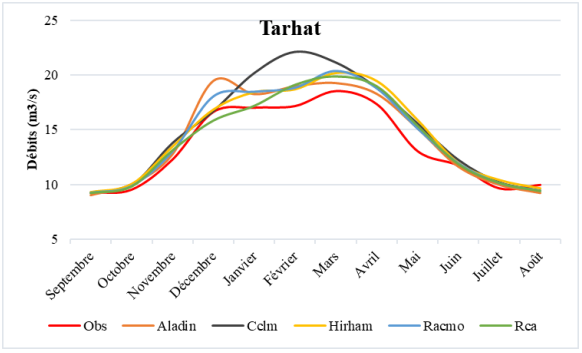
Chapitre 7 : Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le HaB-OER

Annexe 7.1 Débits annuels moyens observés et simulés pour les stations du HaB-OER entre 1989 et 2008

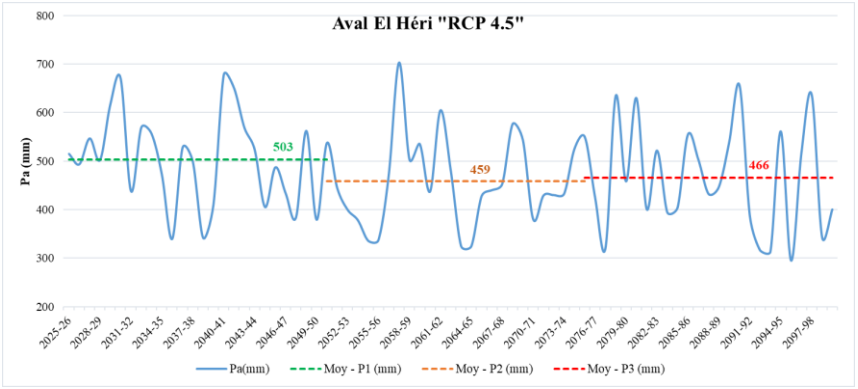


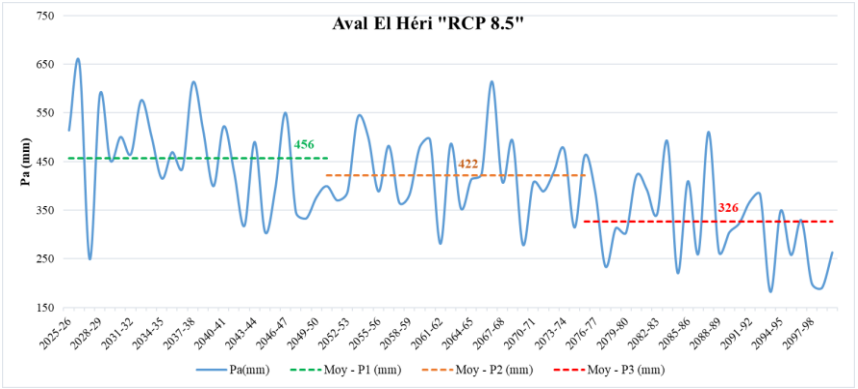
Annexe 7.2 Débits mensuels moyens observés et simulés pour les stations du HaB-OER entre 1989 et 2008

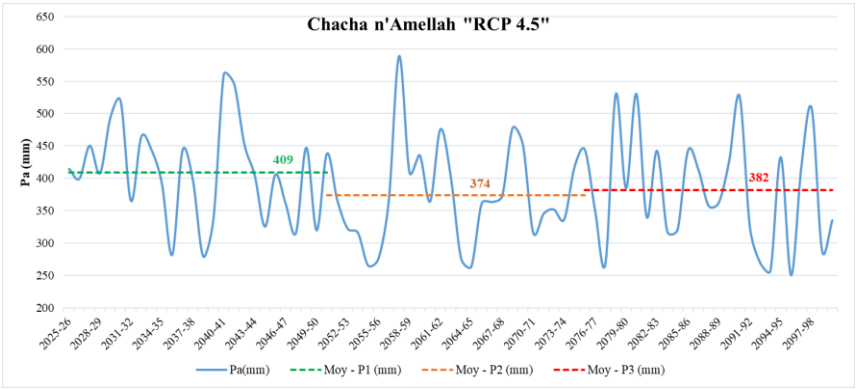


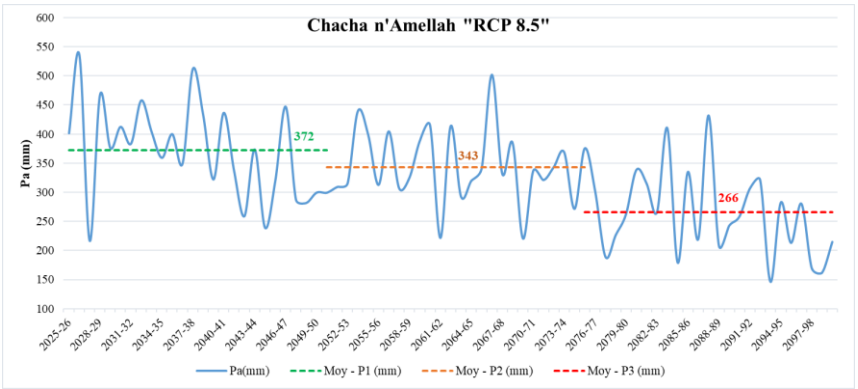


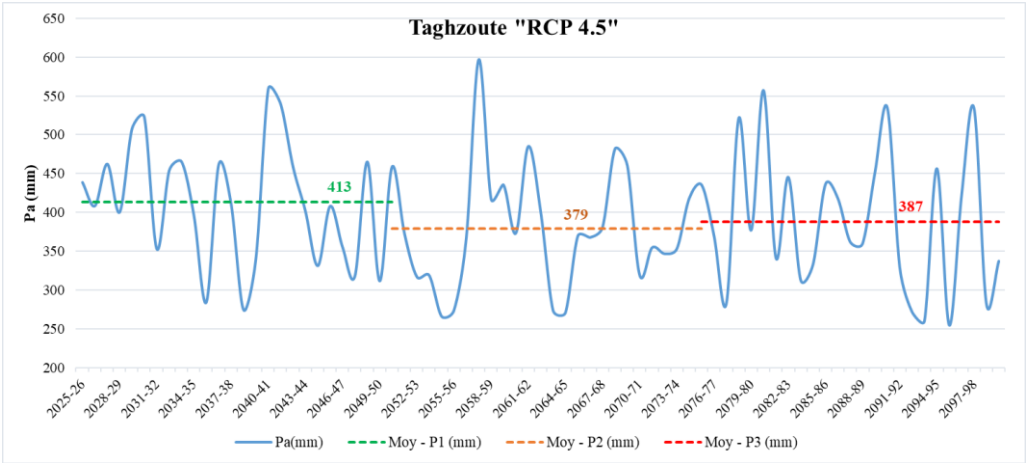
Annexe 7.3 Précipitations moyennes annuelles futures pour les stations du HaB-OER selon les deux scénarios 4.5 et 8.5

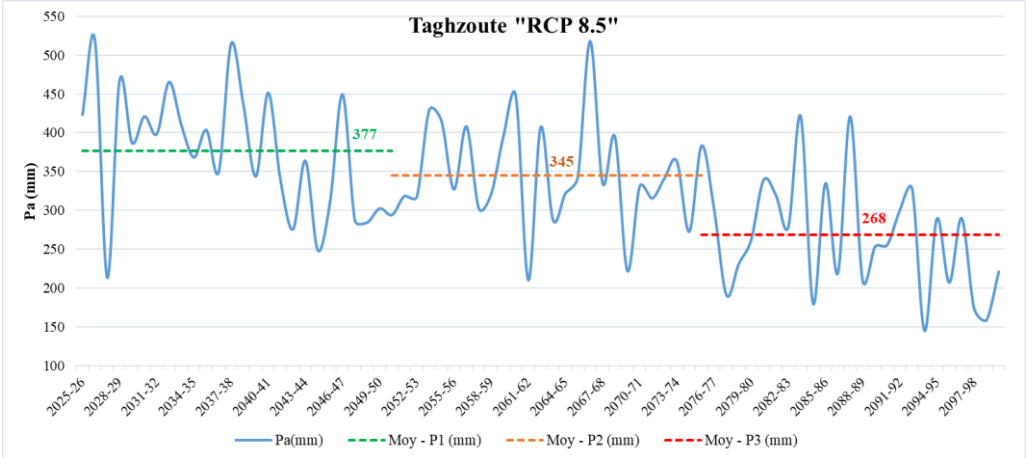


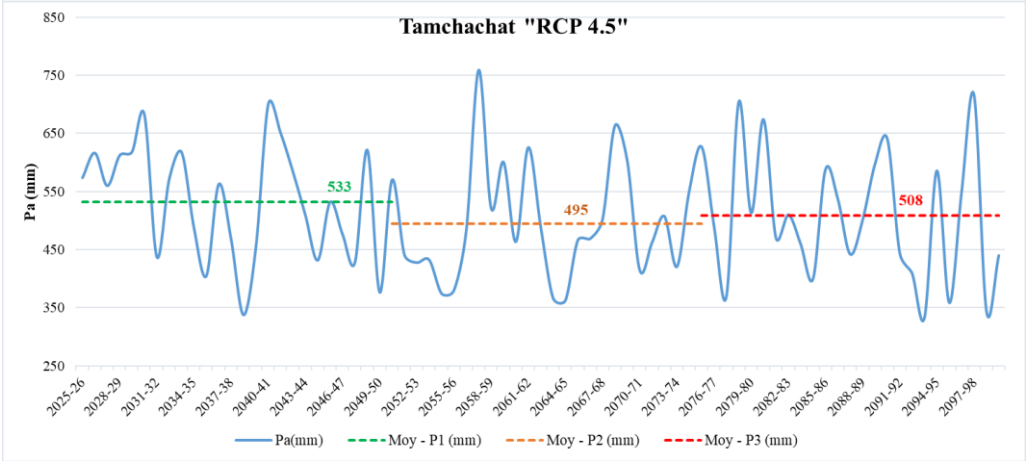


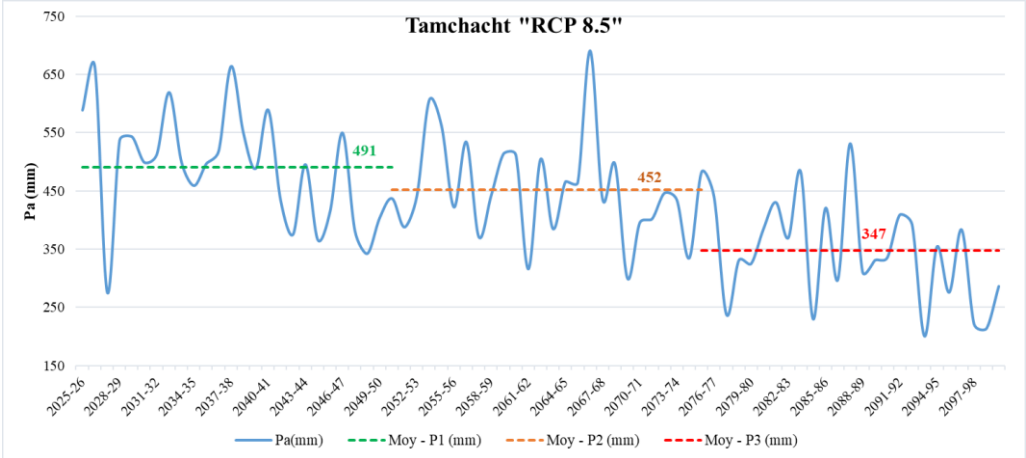




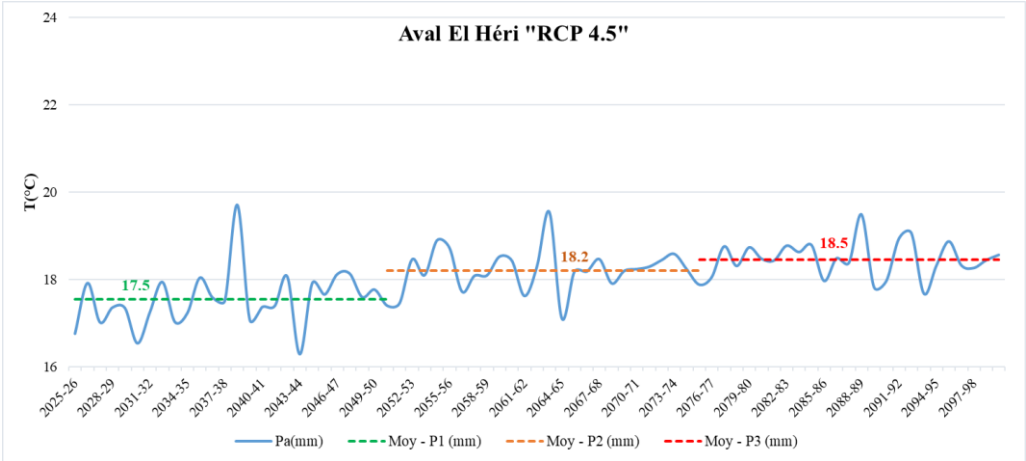

Taghzoute "RCP 4.5"
Pa (mm)
413
379
387
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)

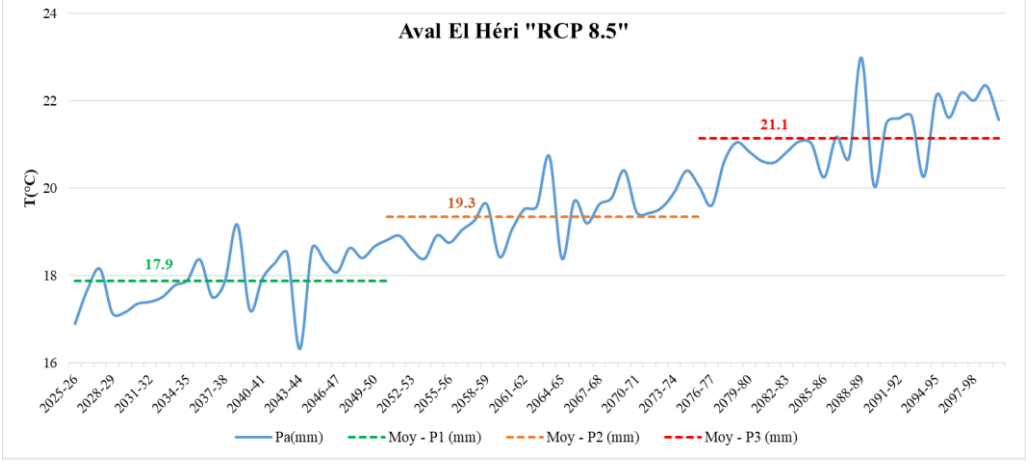

Taghzoute "RCP 8.5"
Pa (mm)
377
345
268
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)

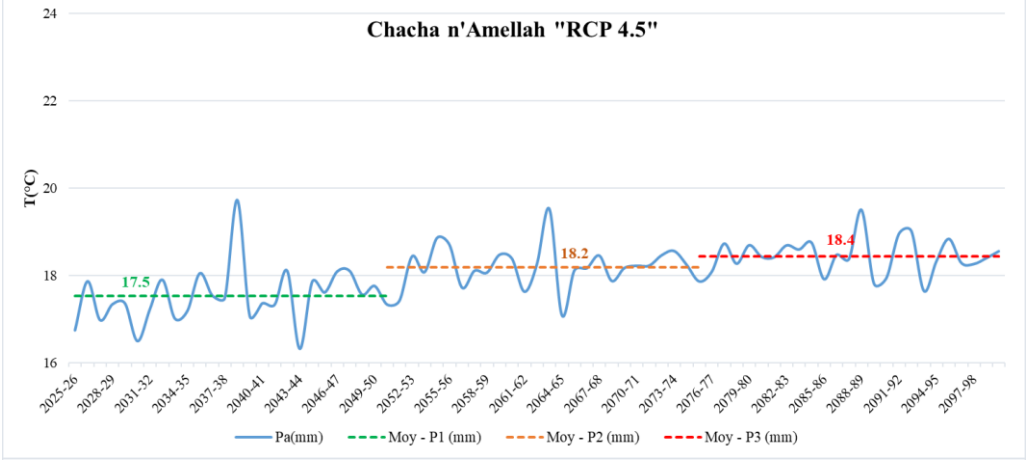

Tamchachat "RCP 4.5"
Pa (mm)
533
495
508
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)

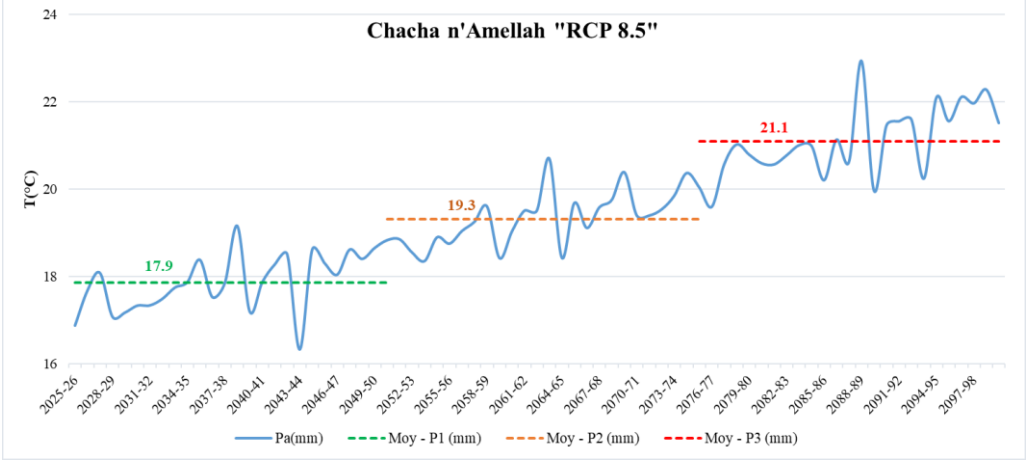

Tamchacht "RCP 8.5"
Pa (mm)
491
452
347
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)

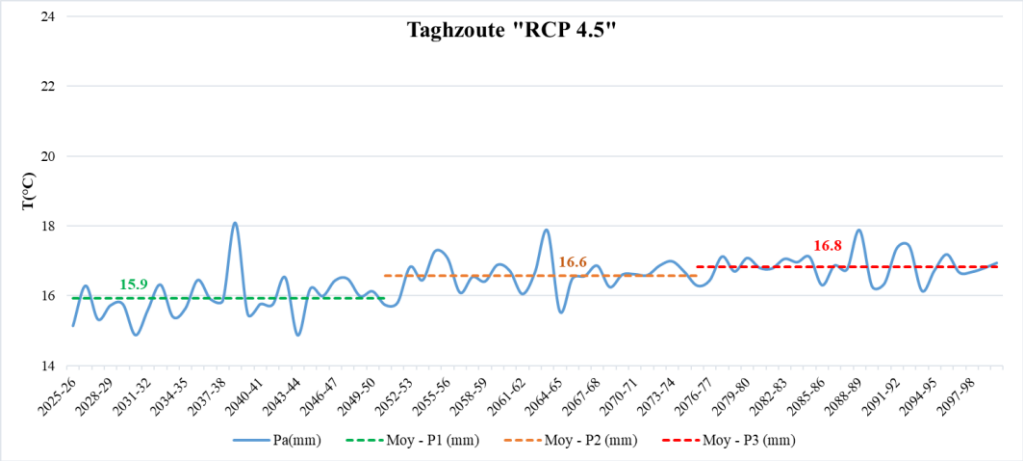
Annexe 7.4 Températures moyennes annuelles futures pour les stations du HaB-OER selon les deux scénarios 4.5 et 8.5

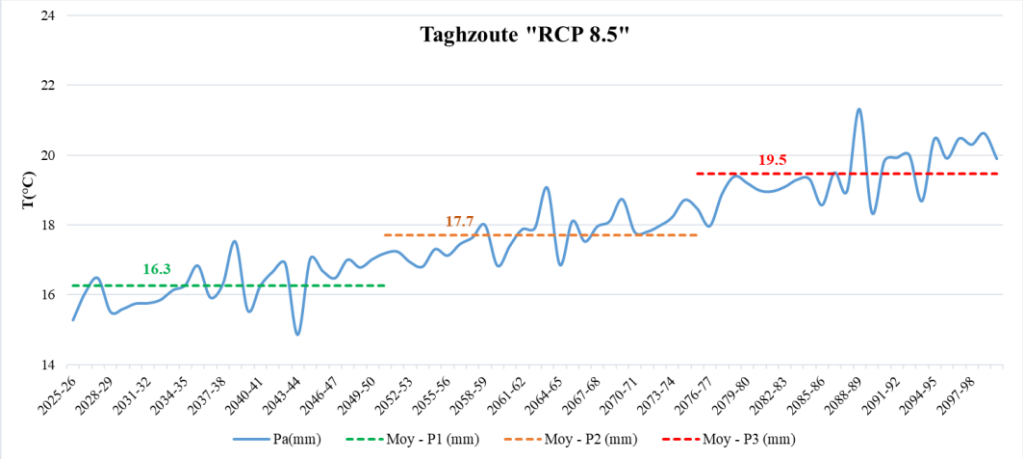


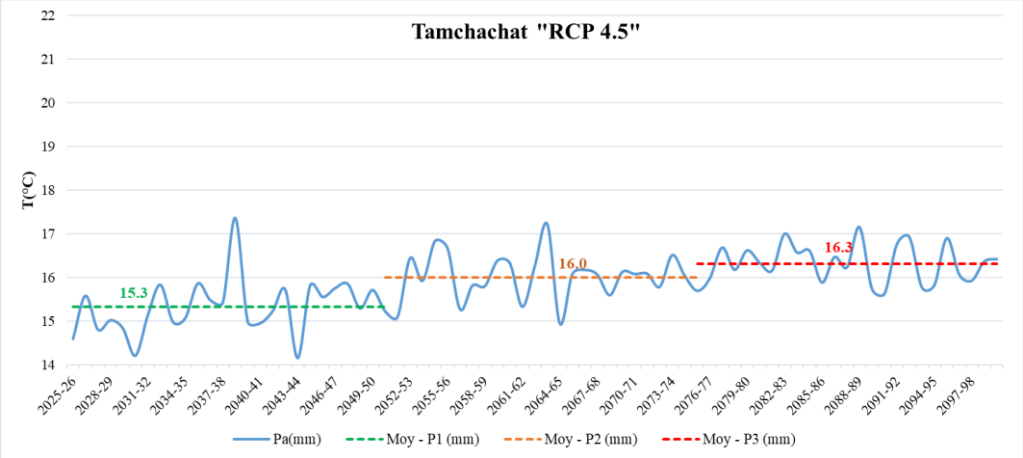


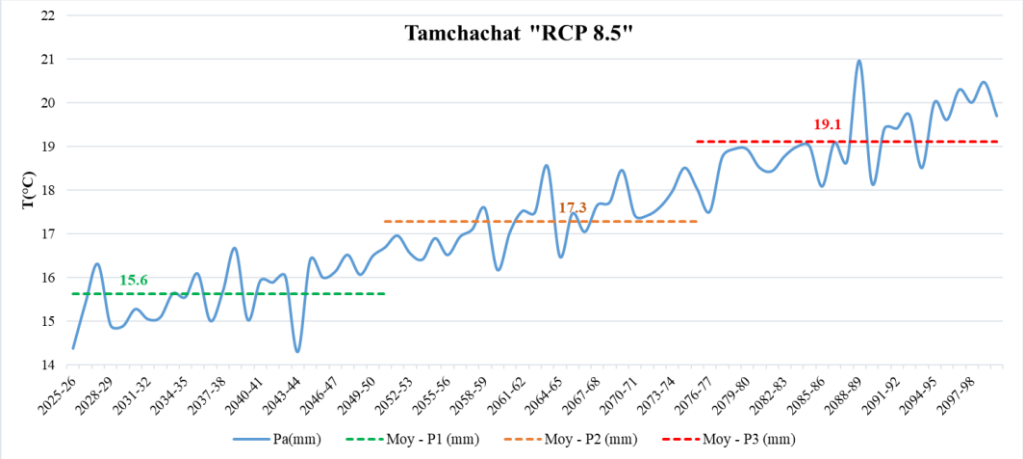




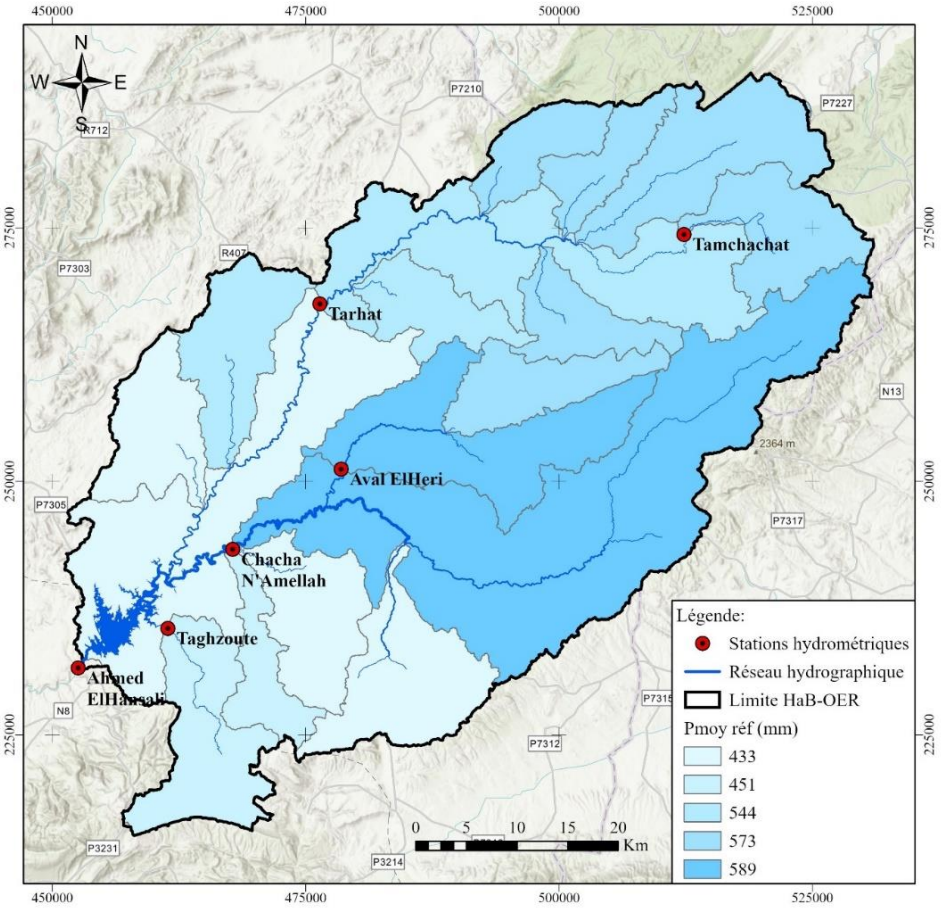

Taghzoute "RCP 4.5"
T(°C)
15.9
16.6
16.8
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)


Taghzoute "RCP 8.5"
T(°C)
16.3
17.7
19.5
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)

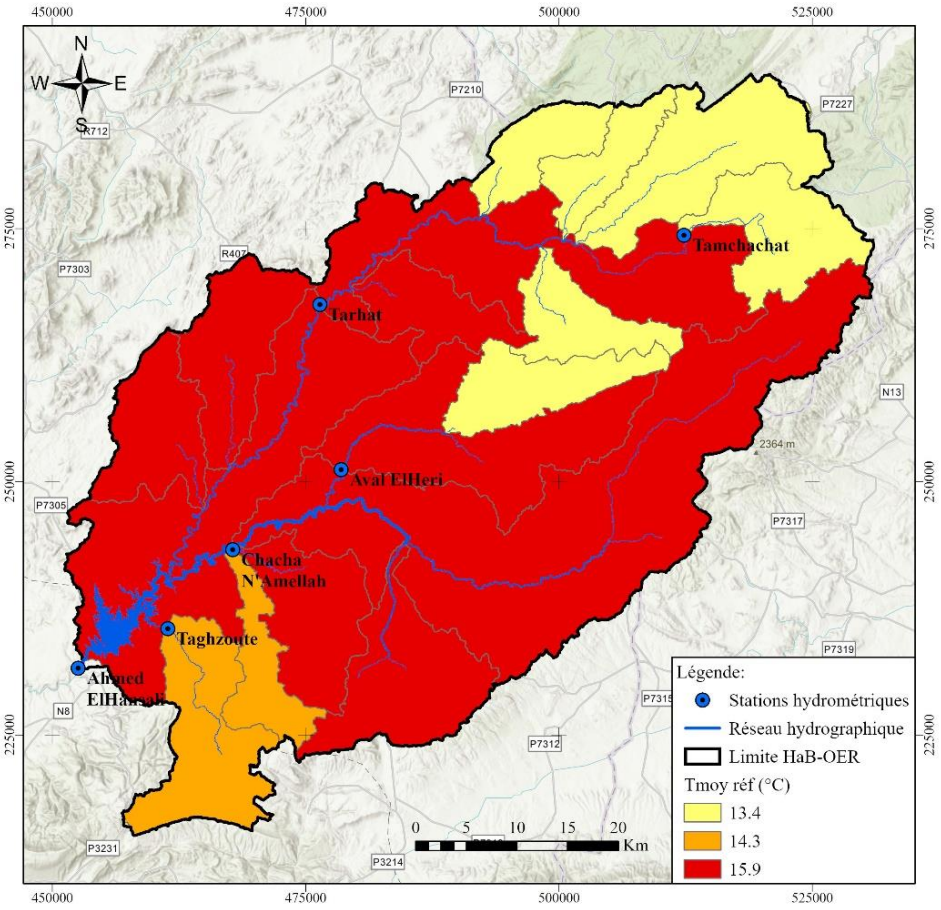

Tamchachat "RCP 4.5"
T(°C)
15.3
16.0
16.3
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)


Tamchachat "RCP 8.5"
T(°C)
15.6
17.3
19.1
Pa(mm)
Moy - P1 (mm)
Moy - P2 (mm)
Moy - P3 (mm)

Annexe 7.5 Cartographie des précipitations moyennes sur la période de référence sur le HaB-OER

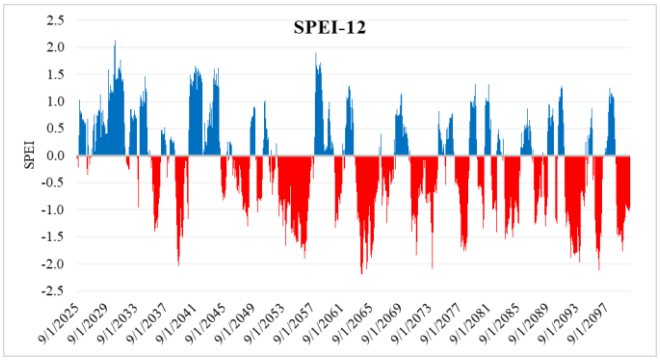


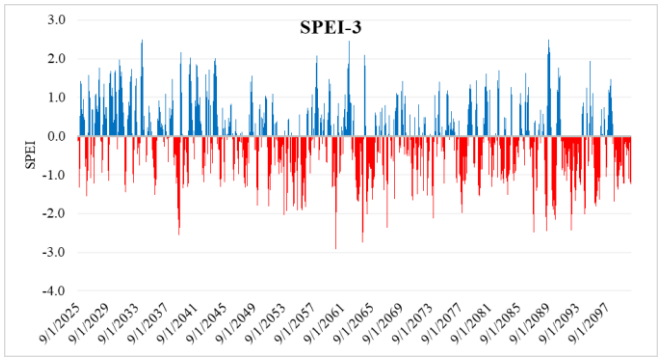
Annexe 7.6 Cartographie des températures moyennes sur la période de référence sur le HaB-OER



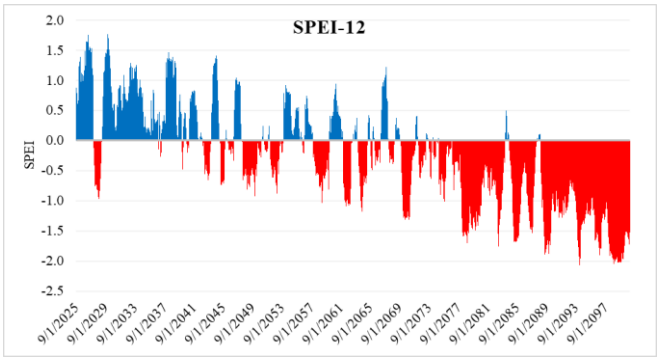
Annexe 7.7 SPEI-12 et SPEI-3 pour la station d'Aval El Héri selon les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5

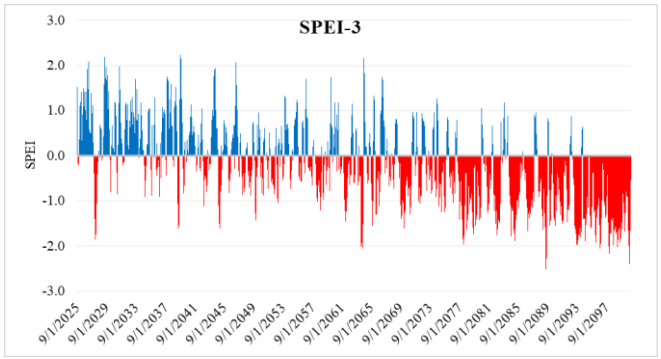
RCP4.5





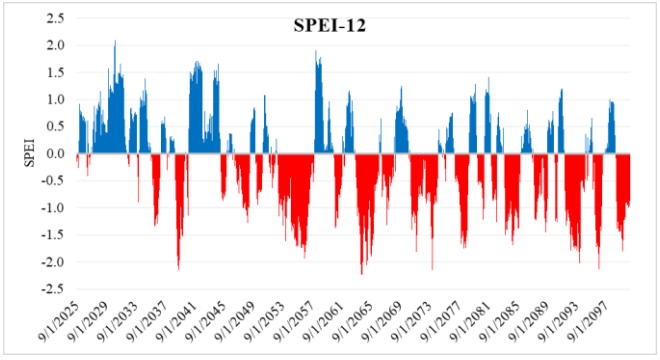
RCP8.5

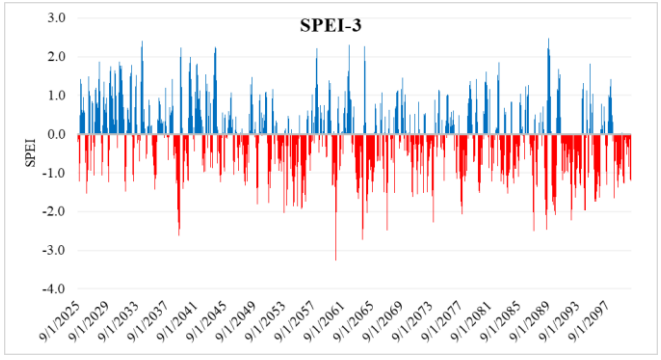




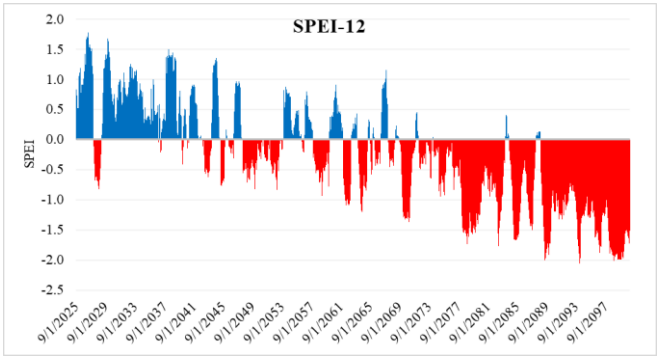
Annexe 7.8 SPEI-12 et SPEI-3 pour la station de Chacha n'Amellah selon les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5

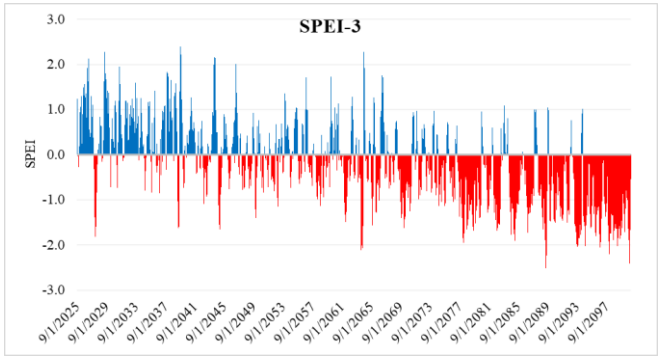
RCP4.5





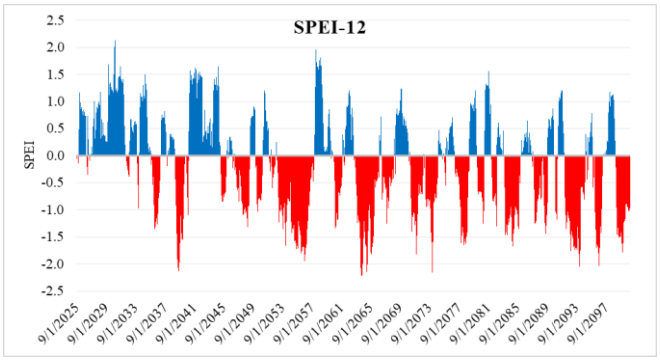
RCP8.5

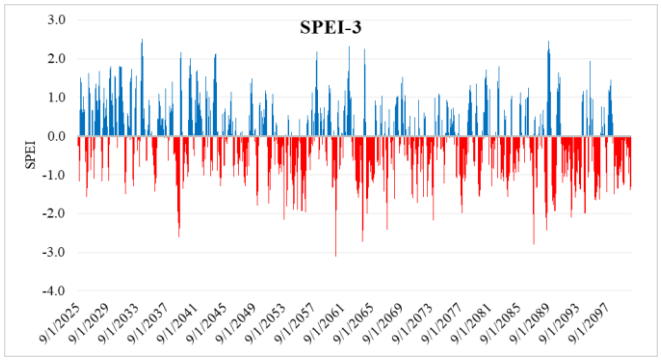




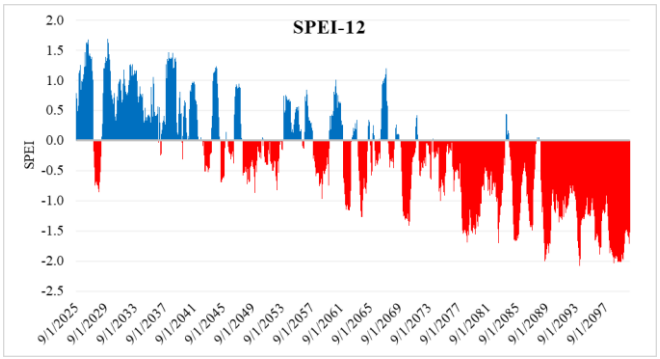
Annexe 7.9 SPEI-12 et SPEI-3 pour la station de Taghzoute selon les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5

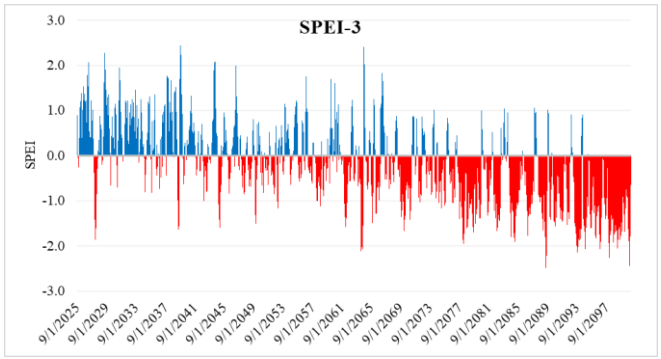
RCP4.5





RCP8.5

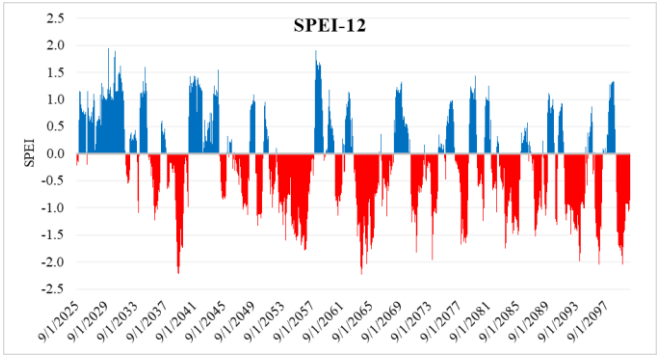


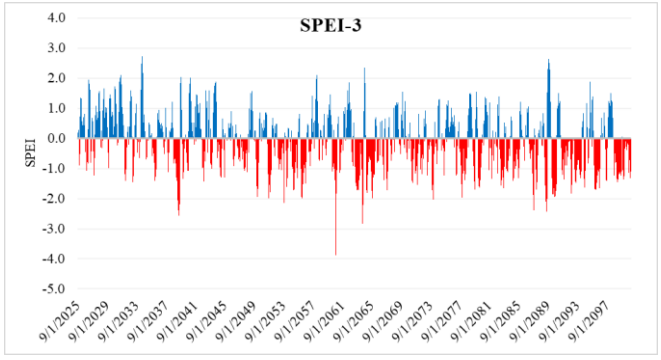


2

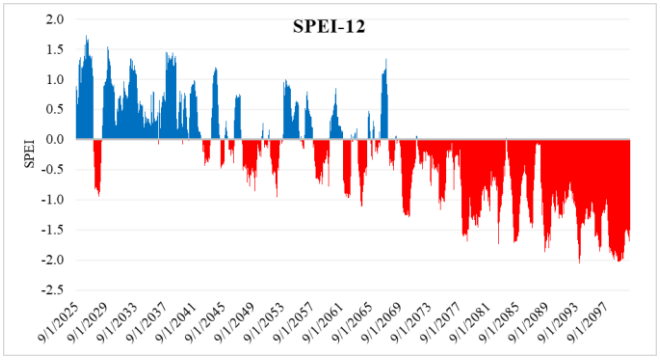
Annexe 7.10 SPEI-12 et SPEI-3 pour la station de Tamchachat selon les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5

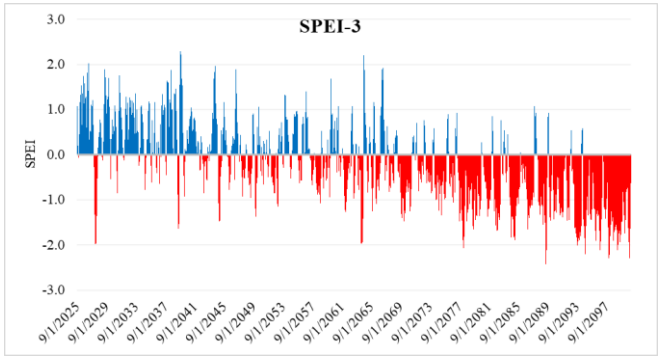
RCP4.5





RCP8.5





Annexe 7.11 La "statistique Z" du test de Mann-Kendall

La statistique Z du test de Mann-Kendall est calculée de la manière suivante :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} Sgn(x_j - x_i) \qquad \textit{(Équation 7.1)}$$

avec :
x_j et x_i : les observations de la série temporelle dans l'ordre chronologique;
n : la longueur de la série temporelle.

$Sgn(x_j - x_i)$ est calculé selon l'équation suivante :

$$Sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 \; si \; (x_j - x_i) > 0 \\ 0 \; si \; (x_j - x_i) = 0 \\ -1 \; si \; (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \qquad \textit{(Équation 7.2)}$$

La variance de S est déterminée par :

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \qquad \textit{(Équation 7.3)}$$

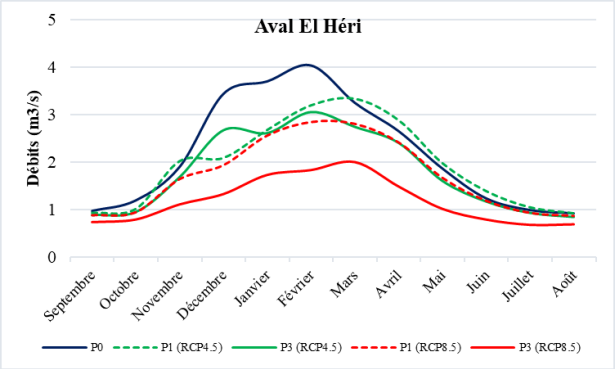
avec :
t_p : le nombre de valeurs à la p[ième] valeur
q : le nombre total de valeurs

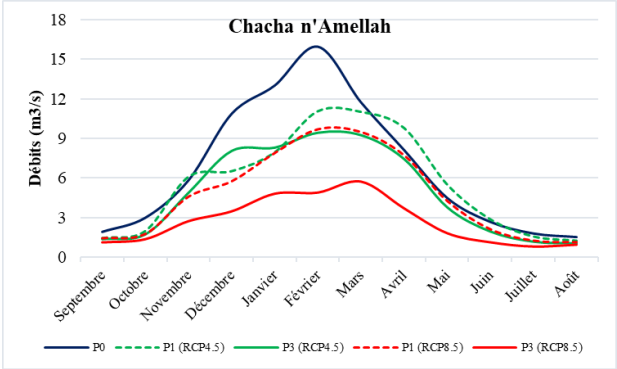
La statistique Z est ensuite calculée en utilisant S et la variance $Var(S)$, comme indiqué ci-dessous :

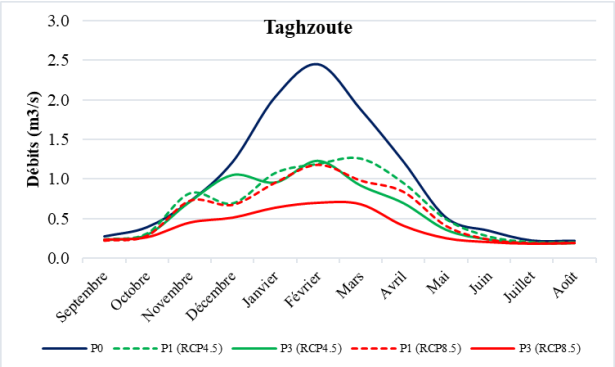
$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{Var(s)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{Var(s)}} & S < 0 \end{cases} \qquad \textit{(Équation 7.4)}$$

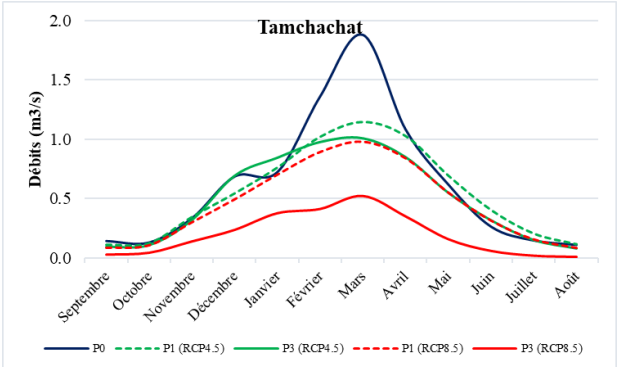
si $|Z| \geq Z_{1-(\alpha/2)}$, l'hypothèse initiale H_0 est rejetée, ce qui signifie qu'il existe une tendance statistiquement significative dans la série temporelle de données. La valeur de $Z_{1-(\alpha/2)}$ pour une valeur α = 0,05, à partir de la table de la distribution normale standard, est de 1,96.
Les valeurs positives de Z indiquent une tendance à la hausse dans la série chronologique, tandis que les valeurs négatives de Z indiquent une tendance à la baisse.

Annexe 7.12 Régimes mensuels d'écoulement futurs et d'écoulement de référence pour les stations du HaB-OER



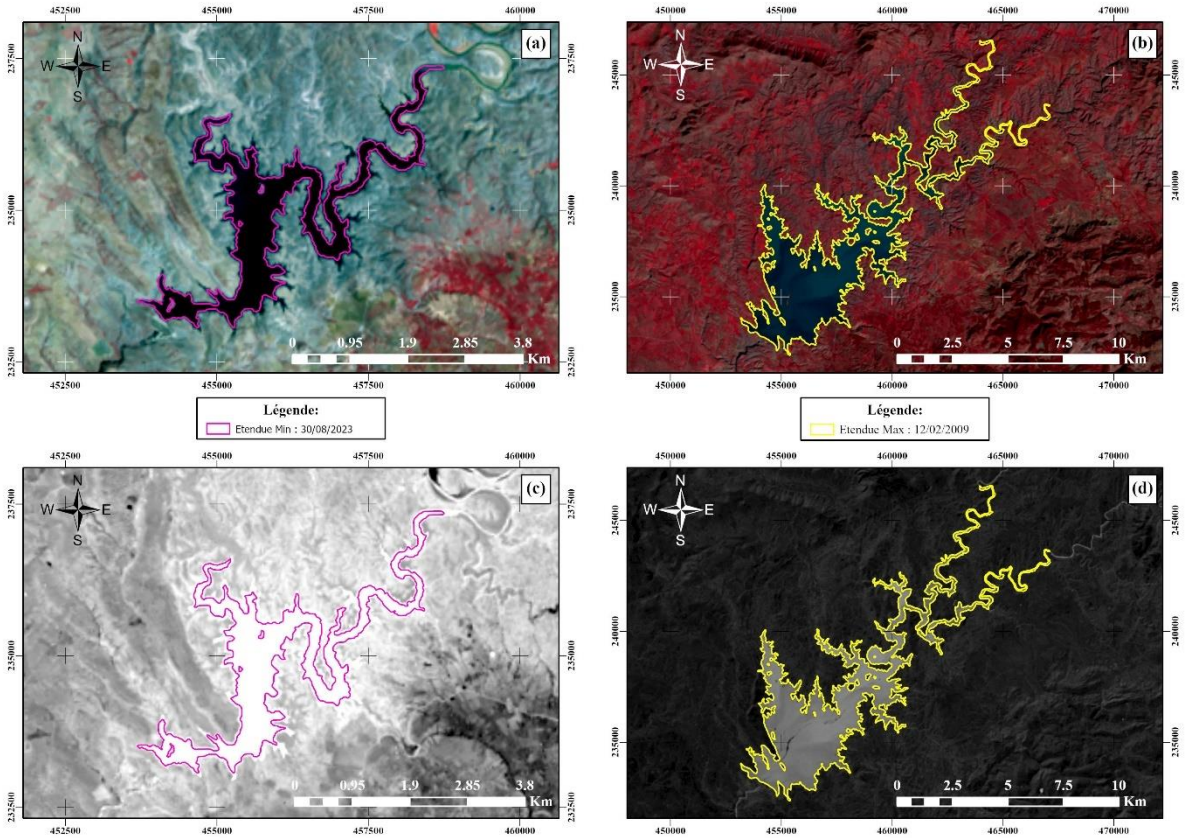




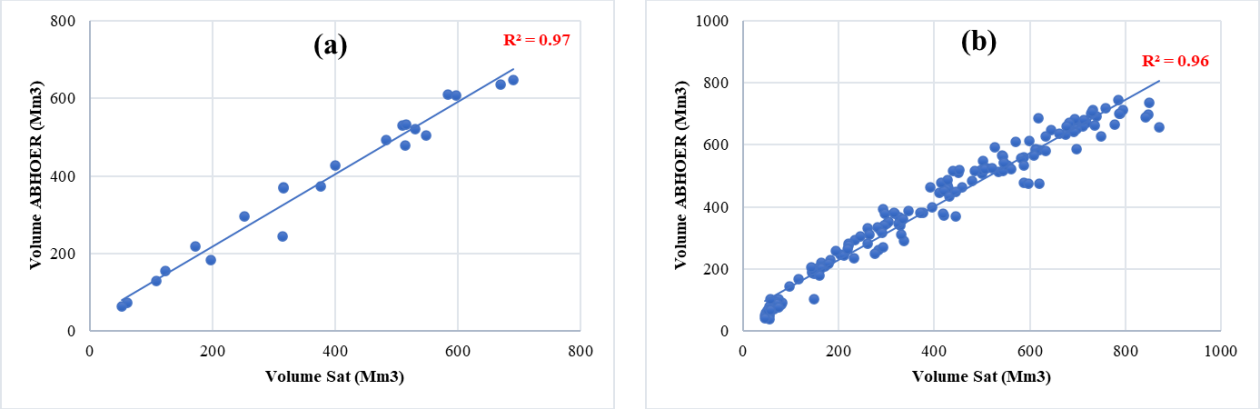


Chapitre 8 : L'érosion hydrique : un vrai défi pour la ressource en eau du b'AEH

Annexe 8.1 Superposition de l'étendue minimale de la retenue du b'AEH avec : (a) la composition IR et (c) le MNDWI et la superposition de l'étendue maximale de la retenue du b'AEH avec : (b) la composition IR et (d) le MNDWI



Annexe 8.2 corrélation entre les volumes d'eau calculés à partir de la télédétection et ceux mesurés par l'ABHOER a l'échelle (a) annuelle et (b) mensuelle



Annexe 8.3 Précision de la classification des trois scènes de Landsat (1985, 2000 et 2020)

	1985			2000			2020		
	Pré	Cor	Err	Pre	Cor	Err	Pre	Cor	Err
Forêts	0.998	0.997	0.0008	0.999	0.997	0.0009	0.999	0.995	0.001
Cultures et parcours	0.92	0.92	0.03	0.984	0.987	0.00	0.986	0.99	0.003
Plan d'eau	1	1	0	1	0.99	0.0002	1	1	0
Sol nus et Z. Urbaines	0.957	0.918	0.03	0.997	0.989	0.004	1	0.994	0.002
Prédiction correct		96.8			99.48			99.64	

Pré : Précision, Cor : Corrélation et Err : Taux d'erreur

Annexe 8.4 Quelques aspect de l'érosion dans le HaB-OER






Annexe 8.5 Les équations des facteurs du modèle "RUSLE"

$$\log R = 1{,}74 \times \log \sum \left(\frac{P_i^2}{P}\right) + 1{,}29$$

(Équation 8.5)

avec :
Pi : précipitations mensuelles en mm,
P : précipitations annuelles en mm.

$$K = K_w = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{org} \cdot f_{hisand}$$

(Équation 8.6)

avec :

$$f_{csand} = \left(0{,}2 + 0{,}3.\, exp\left[-0{,}256.\, m_s.\left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)\right]\right)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0{,}3}$$

$$f_{org} = \left(1 - \frac{0{,}25.\, orgC}{orgC + exp[3{,}72 - 2{,}95.\, orgC]}\right)$$

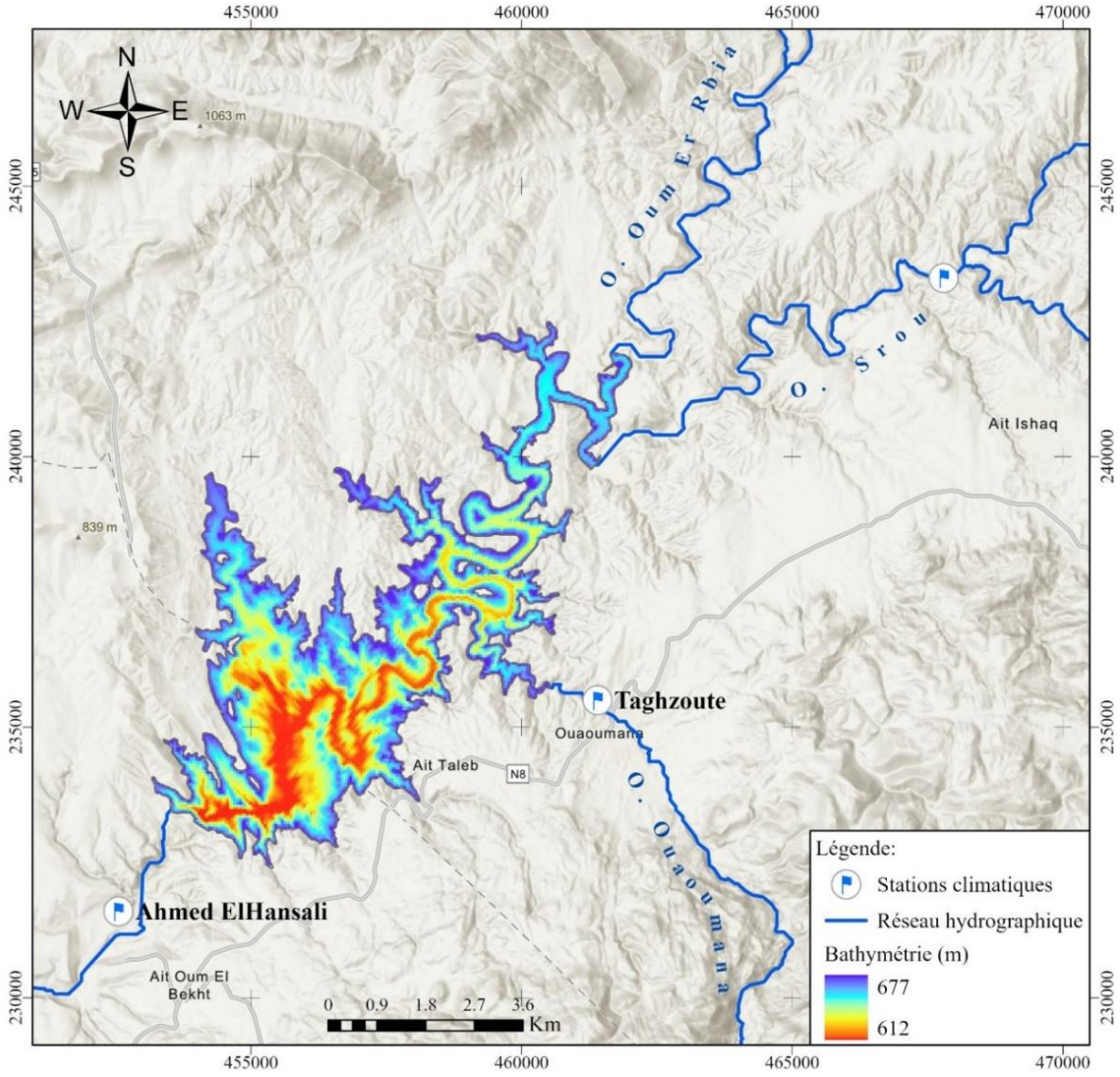
$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0{,}7.\left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + exp\left[-5{,}51 + 22{,}9.\left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right]}\right)$$

m_s : la teneur en fraction de sable (diamètre entre 0,05 et 2 mm) en %,
m_{silt} : la teneur en fraction de limon (diamètre entre 0,02 et 0,05 mm) en %,
m_c : la teneur en fraction d'argile (diamètre entre < 0,02 mm) en %,
$orgC$: la teneur en carbone organique en %.

$$LS = \left(\frac{longueur\ de\ la\ pente}{22{,}1}\right)^{0{,}5} \left[0{,}065 + 0{,}0456\left(pente_{(\%)}\right) + 0{,}0056\left(pente_{(\%)}\right)^2\right]$$

(Équation 8.7)

Annexe 8.6 Bathymétrie de la retenue du b'AEH



Chapitre 9 : Ressources en eau dans le HaB-OER : opportunités agro-touristiques et menaces écologiques

Annexe 9.1 Questionnaires d'enquête

UNIVERSITÉ SULTAN MOULAY SLIMANE — Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine — LOTERR Centre de recherche en géographie — UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Questionnaire sur :
la perception des risques liés aux changements climatiques dans la région HaB-OER et les formes d'adaptation face au stress hydrique

Réalisé par : Tarik El Orfi
Encadré par : Mohamed El Ghachi et Sébastien Lebaut

Dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat, nous vous présentons des questions concernant les ressources en eau dans le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali.

N° de Questionnaire : …….. Date :……/……../…….. Interrogateur : ……..

	Amont	Médiane	Aval	La rivière la plus proche	La source la plus proche	La seguia la plus proche
Amengous	☐	☐	☐	……	……	……
Oum Er Rbia	☐	☐	☐	……	……	……
Chbouka	☐	☐	☐	……	……	……
Srou	☐	☐	☐	……	……	……
Ouaoumana	☐	☐	☐	……	……	……
Autour du Barrage	☐	☐	☐	……	……	……

I- Données personnelles :

1- Informations générales :

1- Commune / Douar : ……
2- Lieu de naissance : ……
3- Depuis quand vous habitez-vous ici ? ……
4- Activité : ……

2- Propriété :

5- Combien d'hectare irrigué possédez-vous ?	☐ < 1ha	☐ 1-5 ha	☐ 5-10 ha	☐ > 10ha
6- Envisagez-vous d'augmenter la superficie irriguée	☐ Oui		☐ Non	
7- Si oui, pourquoi ?	……			
8- Quel est le type de propriété ?	☐ Privé	☐ Location	☐ Hypothèque	☐ Autre
9- Si différent, veuillez spécifier :	……			

II- Climat de la zone

1- Précipitations :

10- Quel type de précipitations prédomine dans la zone ?

☐ Liquides ☐ Solides

11- Comment étaient les précipitations par le passé ?

☐ Faibles ☐ Moyennes ☐ Fortes

12- Quelle est la période historique la plus pluvieuse ?

☐ 50 ☐ 60 ☐ 70 ☐ 80 ☐ 90 ☐ 2000

13- Quelle est leur durée habituelle ?

☐ Quelques jours ☐ Une semaine ☐ Un mois

14- Quelles sont les saisons pluvieuses ?

☐ Hiver ☐ Printemps ☐ Eté ☐ Automne

2- Températures

15- Comment a évolué la température dans la zone ?

☐ Diminuer ☐ La même ☐ Augmenter

16- Pendant quelle période avez-vous connu les températures les plus élevées ?

☐ 50 ☐ 60 ☐ 70 ☐ 80 ☐ 90 ☐ 2000

17- Quelle est leur durée habituelle ?

☐ Quelques jours ☐ Une semaine ☐ Un mois

18- Quelles sont les saisons les plus chaudes ?

☐ Hiver ☐ Printemps ☐ Eté ☐ Automne

III- Hydrologie :

1- Cours d'eau :

19- Le cours d'eau est : ☐ Temporaire ☐ Permanent

Hautes Eaux :

20- Quel est le niveau maximum observé du cours d'eau ?

.....

21- A quelle année ?

.....

22- Vous souvenez-vous d'inondations ? ☐ Oui ☐ Non

23- Quel a été l'impact (sur la population, les activités économiques, ...) ?

.....

Basses Eaux :

24- Quel est le niveau minimum observé du cours d'eau ?

.....

25- A quelle année ?

.....

26- Vous souvenez-vous que le cours d'eau est devenu à sec ? ☐ Oui ☐ Non

27- Quel a été l'impact (sur la population, les activités économiques, ...) ?

.....

-2-

2- Sources :

28- La source est : ☐ Temporaire ☐ Permanent

29- Quel a été le débit maximum observé de la source ?

.....

30- A quelle année ?

.....

31- Quel a été le débit minimum observé de la source ?

.....

32- A quelle année ?

.....

33- Vous souvenez-vous que la source est devenue à sec ? ☐ Oui ☐ Non

34- Quelles sont les causes de ces variations de débit ?

☐ Déficit pluviométrique ☐ Température élevée ☐ Prélèvement intensifs

3- Lacs :

35- Le lac est : ☐ Temporaire ☐ Permanent

36- Quel est le niveau d'eau maximale observée du lac ?

.....

37- A quelle année ?

.....

38- Quel est le niveau d'eau minimale observée du lac ?

.....

39- A quelle année ?

.....

40- Vous souvenez-vous que le lac est devenu à sec ? ☐ Oui ☐ Non

4- Relation facteurs climatiques / débits :

41- Avez-vous remarqué une relation entre les précipitations (liquides et solides) et le niveau d'eau dans le cours d'eau ou le niveau d'eau du lac ?

☐ Oui ☐ Non

42- Avez-vous remarqué une relation entre les températures et le niveau d'eau dans le cours d'eau ou le niveau d'eau du lac ?

☐ Oui ☐ Non

43- Avez-vous une idée de l'évolution de la nappe phréatique dans cette zone ?

☐ Oui ☐ Non

44- Pouvez-vous nous parler du terme "changement climatique" ?

.....

.....

.....

.....

-3-

IV- Activités liées aux ressources en eau :

1- Les ressources en eau superficielle :

45- Quelle est la source de votre eau potable ?

☐ Réseau publique ☐ Puits ☐ Sources

46- Quelle est la source d'eau d'irrigation ?

☐ Pompage direct du cours d'eau ☐ Canalisation (seguia) ☐ Source ☐ Puits/ Forage

47- Quelle est la nature des canaux d'irrigation ?

☐ Sol ☐ Béton ☐ Canal en plastique

48- Savez-vous que les canaux de séguia peuvent entraîner un gaspillage d'eau (Infiltration) ?

☐ Oui ☐ Non

49- L'eau est-elle utilisée sans restriction ?

☐ Oui ☐ Non

50- Si oui, de quelle manière ?

.....

51- Suivez-vous un calendrier d'irrigation "tour d'eau" ?

☐ Oui ☐ Non

52- En période sèche, combien de tours d'irrigation sont nécessaires ?

☐ 3 tours ☐ 4 tours ☐ 5 tours ☐ 6 tours ☐ Plus que 6 tours

53- Quels types de plantes cultivez-vous ?

	Nombre d'irrigation dans les années humides	Nombre d'irrigation dans les années sèches	Périodes d'irrigations
Céréale			
Maraichage			
Légumineuse			
Arboriculture			
Autre			

54- À votre avis, quelles sont les types de cultures les plus consommatrices d'eau ?

☐ Céréale ☐ Maraichage ☐ Légumineuse ☐ Arboriculture ☐ Autre

55- Si autre, lesquelles :

.....

56- Envisagez-vous de remplacer les types de cultures existantes par d'autres cultures moins consommatrices en eau ?

☐ Oui ☐ Non

57- Si oui, lesquelles :

.....

2- Les ressources en eau souterraine :

58- Combien de puits possédez-vous sur votre propriété ?

	Puits 1		Puits 2		Puits 3	
	X	Y	X	Y	X	Y
Coordonnées						
Date de creusement						
Profondeur						

59- Vous utilisez les eaux du puits pour :

☐ L'eau Potable ☐ L'usage domestique ☐ L'abreuvage du bétail ☐ L'agriculture ☐ Autre

60- Si autre, veuillez préciser :

.....

61- Avez-vous réalisé des travaux d'approfondissement du ou des puits après le 1er creusement ?

☐ Oui ☐ Non

62- Si oui :

Combien de fois ?	Quand ?	Combien de mètre ?

63- Quelle source d'énergie utilisez-vous pour pomper l'eau du puits ?

☐ Manuelle ☐ Electrique ☐ Solaire ☐ Gasoil ☐ Gaz

64- Partagez-vous l'utilisation de l'eau du puits avec d'autres personnes ?

☐ Oui ☐ Non

65- Si oui, précisez avec qui :

☐ Frères ☐ Cousins ☐ Voisins ☐ Autre

66- A quelle fréquence utilisez-vous l'eau du puits ?

☐ Une fois par semaine ☐ 2 à 3 fois par semaine ☐ 4 à 5 fois par semaine ☐ Quotidiennement

67- Si vous utilisez une motopompe, combien d'heures à chaque utilisation ?

☐ < 6h ☐ 6h - 12h ☐ 12h - 18h ☐ > 18h

68- Pendant quels mois utilisez-vous le plus fréquemment l'eau du puits ?

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc

69- Quels types de cultures sont irrigés avec l'eau du puits ?

☐ Céréales ☐ Maraichage ☐ Légumineuses ☐ Arboriculture ☐ Autres

V- L'homme et l'eau

70- Y a-t-il eu une importante migration dans la région au cours des dernières années ?

☐ Oui ☐ Non

71- Dans l'affirmative, à quelle période a-t-on observé la plus grande migration de personnes ?

☐ 50 ☐ 60 ☐ 70 ☐ 80 ☐ 90 ☐ 2000

72- Quelles sont les raisons de ces migrations ?

.....

73- Quelles zones sont privilégiées par les immigrants comme destination dans la région ?

.....

74- Est-ce que les immigrants investissent dans l'agriculture ?

☐ Oui ☐ Non

75- Si oui, quelles techniques modernes sont adoptées pour l'extraction de l'eau ?

☐ Bassines ☐ Goutte à goutte ☐ Panneaux solaire ☐ Motopompes puissants ☐ Autre

VI- Gestion des ressources en eau :

76- Qui est responsable de la gestion et du partage des prélèvements et de l'utilisation des puits ?

……

77- Si vous suivez un tour d'eau, sur quelle période l'eau revient-elle aux champs ?

☐ Journalière ☐ Hebdomadaire ☐ Bimensuel ☐ Mensuel

78- Selon quels critères répartissez-vous l'eau ?

☐ Temps ☐ Volume ☐ Autre

79- La quantité d'eau que vous avez pendant chaque tour vous suffit-elle ?

☐ Oui ☐ Non

80- Si non, comment comblez-vous la quantité qui vous manque ?

……

81- Pensez-vous que le partage de l'eau est équitable entre les bénéficiaires ?

☐ Oui ☐ Non

82- Si non, pourquoi ?

……

83- Avez-vous déjà eu des conflits concernant l'utilisation de l'eau ?

☐ Oui ☐ Non

84- Quelles sont les causes de ces conflits ?

☐ Surexploitation ☐ Pollution ☐ Informel ☐ Besoin d'eau ☐ Autre

85- En période sèche, comment surmontez-vous le problème de la pénurie d'eau pour :

Domestique : ……..

Agriculture : ……..……

Bétail : ……

86- Y a-t-il des associations qui s'intéressent aux problèmes liés à la gestion des ressources en eau?

☐ Oui ☐ Non

87- Avez-vous bénéficié de campagnes de sensibilisation concernant la gestion des ressources en eau ?

☐ Oui ☐ Non

88- Savez-vous que l'État subventionne l'équipement des parcelles par des technique de goutte-à-goutte ?

☐ Oui ☐ Non

89- Envisagez-vous d'équiper vos parcelles avec la technique du goutte-à-goutte ?

☐ Oui ☐ Non

90- Connaissez-vous des bonnes pratiques locales pour :

La gestion de l'eau : ……..……..

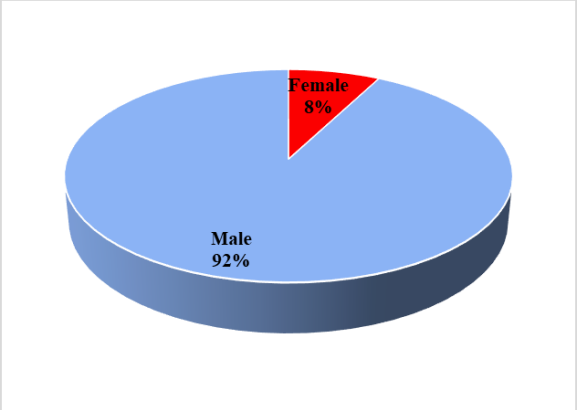
L'utilisation de l'eau (domestique, irrigation, …) : ……..……

……

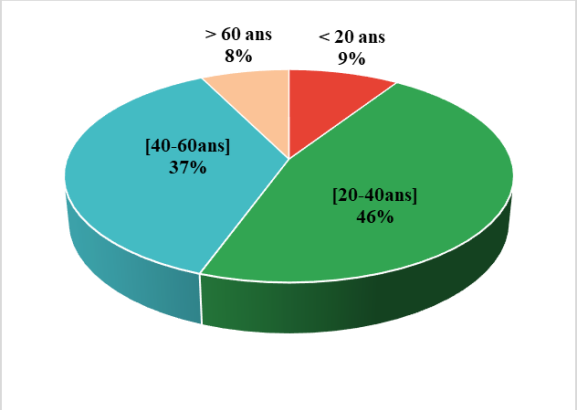
Annexe 9.2 Résultats de l'enquête

Composition de l'échantillon

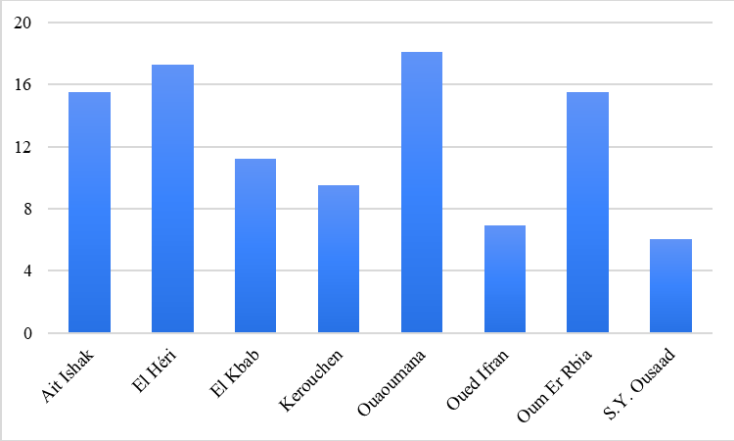
Sur les 116 réponses complètes recueillies dans le HaB-OER, nous avons constaté que 8% des répondants étaient des femmes et 92% étaient des hommes (Enq. 9.1). Cette répartition est logique car l'agriculture est principalement pratiquée par des hommes. En ce qui concerne les tranches d'âge, la majorité des répondants se situent dans la tranche des jeunes de 20 à 40 ans, représentant 46% de l'échantillon (Enq. 9.2). Les personnes âgées et les jeunes de moins de 20 ans sont moins représentés, ne comptant que pour 8% de l'échantillon. Les jeunes de moins de 20 ans sont généralement engagés dans leurs études. En ce qui concerne la répartition géographique, les 8 communes sont représentées à hauteur d'environ 12%, avec une légère surreprésentation des communes facilement accessible (Enq. 9.3).



Enquête 9.1 Répartition des répondants par genre



Enquête 9.2 Répartition des répondants par âge

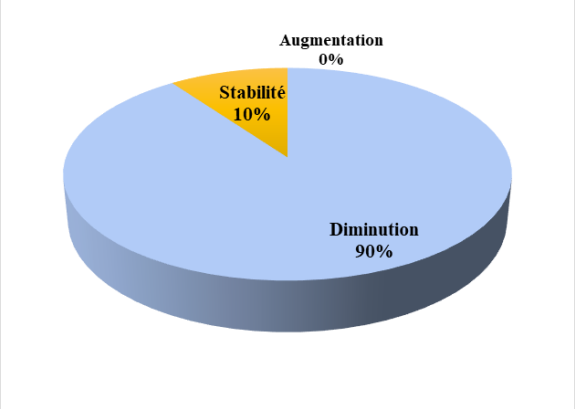


Enquête 9.3 Répartition des répondants par appartenance géographique

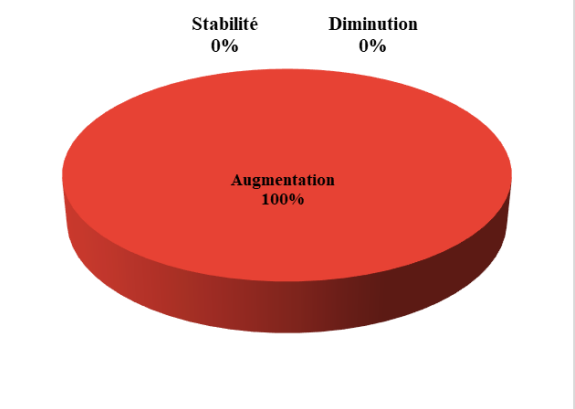
Thème 1 : Perception climatique

L'ensemble des répondants sont conscients de l'impact des changements climatiques sur les tendances pluviométrique et thermique. Tous les enquêtés ont été d'accord sur le fait que les précipitations diminuent (Enq. 9.4) et les températures augmentent (Enq. 9.5), bien qu'ils n'aient pas de notions scientifiques sur le phénomène. Les 10% qui ont répondu en indiquant la stabilité des précipitations sont généralement des jeunes qui n'ont pas une expérience suffisamment longue pour comparer avec des années très pluvieuses.

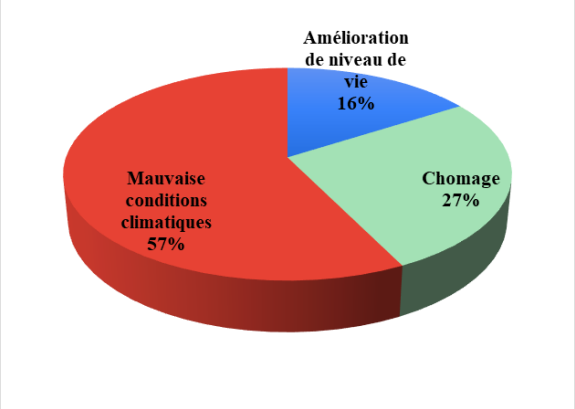
De plus, 57% des répondants estiment que les mauvaises conditions climatiques et leurs impacts sur la disponibilité en eau ont été les principales causes de plusieurs vagues d'immigrations qui ont caractérisé la région, en particulier pendant les années sèches (Enq.9.6). Cela est d'autant plus préoccupant car les habitants dépendent largement des précipitations, principalement en raison de leurs activités agricoles. Selon les répondants, environ 40% des personnes ont décidé d'immigrer vers l'Europe, tandis que 61% ont choisi de rester au Maroc mais de chercher de meilleures conditions de vie, en particulier dans les villes, notamment à Khénifra (Enq. 9.7).



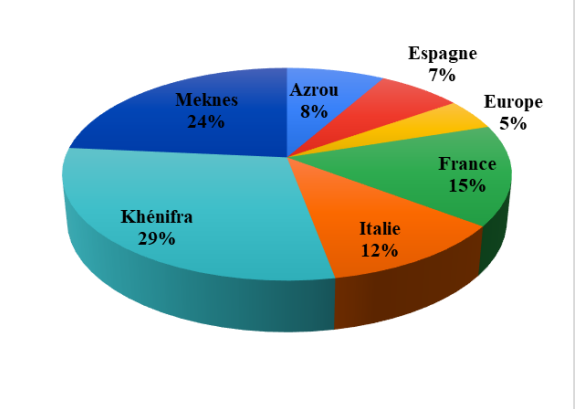
Enquête 9.4 Perception de l'évolution des précipitations



Enquête 9.5 Perception de l'évolution des températures



Enquête 9.6 Principales causes de l'immigration

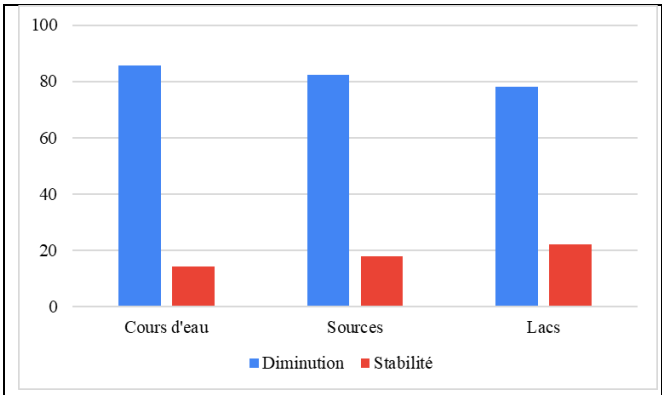


Enquête 9.7 Destination des immigrants

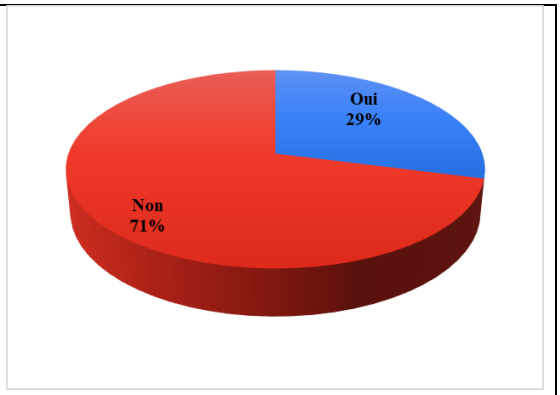
Thème 2 : Hydrologie et ressources en eau

La plupart des réponses des enquêtés concernant les ressources en eau sont liées à l'impact des changements climatiques. Environ 80% des répondants ont noté une diminution des débits des cours d'eau, des sources et des niveaux des lacs dans la région (Enq. 9.8). En revanche, les 20% qui ont observé une stabilité se trouvent principalement près des hydrosystèmes où la diminution n'est pas facilement perçue, tels que les sources et l'oued de l'Oum Er Rbia. Un autre point d'accord entre les enquêtés concerne les périodes d'extrêmes hydrologiques. Plus de 100% ont convenu que l'année 2022 a connu les niveaux d'eau les plus bas jamais enregistrés, avec l'assèchement de plusieurs sources et lacs, tandis que 90% ont choisi la période entre 2009 et 2011 comme celle où les cours d'eau ont connu des crues et des niveaux d'eau élevés.

En ce qui concerne les ressources en eau souterraine, la profondeur des puits varie en fonction de la nappe phréatique, ce qui diffère d'une zone à l'autre. Dans la région étudiée, on trouve des puits dont la profondeur est inférieure à 30 mètres, ainsi que des forages dont la profondeur peut atteindre plus de 120 mètres. Environ 30% des agriculteurs ont dû approfondir leurs puits en raison de la rareté des précipitations et de la diminution du niveau de la nappe phréatique (Enq. 9.9), notamment durant les périodes entre 2005-2009 et 2015 a présent.



Enquête 9.8 Perception des cours d'eau, des débits de sources et des niveaux de lacs



Enquête 9.9 Confirmation de l'approfondissement des puits

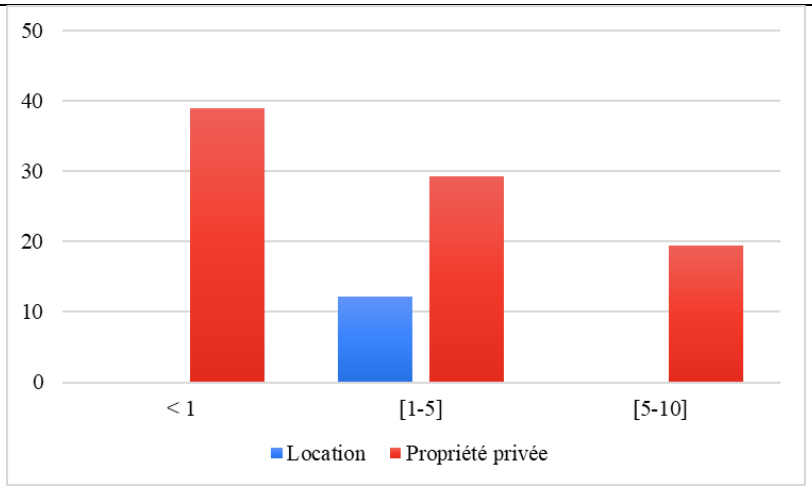
Thème 3 : Usages des ressources en eau

Les résultats de l'enquête révèlent une structure foncière caractérisée par une grande disparité des superficies des exploitations agricoles (Enq. 9.10). Environ 80% d'entre elles sont réparties entre des parcelles de moins de 1 ha et de 1 à 5 ha, dont 12% sont louées. En revanche, les surfaces de plus de 5 ha ne représentent que 20% de l'ensemble. Ainsi, la prédominance de petites parcelles caractérise la structure foncière de la région. Les répondants signalent que le morcellement des terres agricoles s'accentue de génération en génération en raison de la succession.

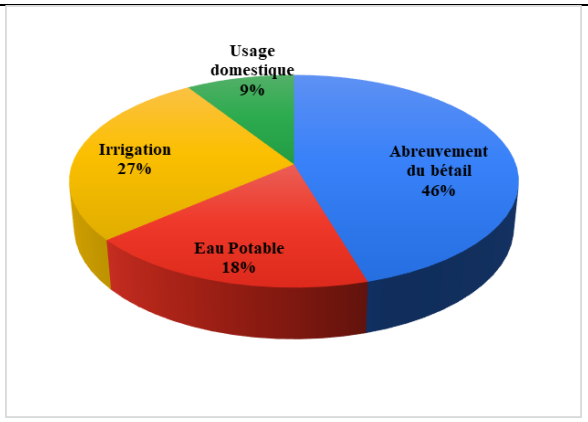
Quant à l'utilisation des puits, les répondants indiquent qu'ils sont principalement utilisés pour l'abreuvement du bétail et les besoins domestiques (Enq. 9.11). Seulement 27% des puits sont dédiés à l'irrigation. Cette situation s'explique en partie par l'abondance des sources d'eau de surface, dont 85% de l'eau d'irrigation provient, ainsi que des cours d'eau superficiels et de systèmes de canalisation (Enq. 9.12). Parmi ces canaux, 86% sont en béton et en sol et 14% sont en plastique.

Les différentes sources d'eau sont utilisées pour irriguer les divers types de cultures présentes dans la région, notamment l'arboriculture, les oliviers et les céréales (Enq. 9.13). Selon les répondants, la région connaît une tendance croissante pour les cultures commerciales, telles que les pommiers, les pruniers et les cerisiers. Bien que ces cultures nécessitent une quantité importante d'eau d'irrigation, les oliviers, selon les répondants, s'adaptent aux conditions climatiques régionales et ont des besoins en eau plus faibles. Parallèlement, en raison de l'abondance des ressources en eau, le maraîchage gagne également en importance (Enq. 9.14). La culture de la pomme de terre se concentre dans le centre et l'ouest de la zone, alors que la culture de l'oignon dans le nord du bassin.

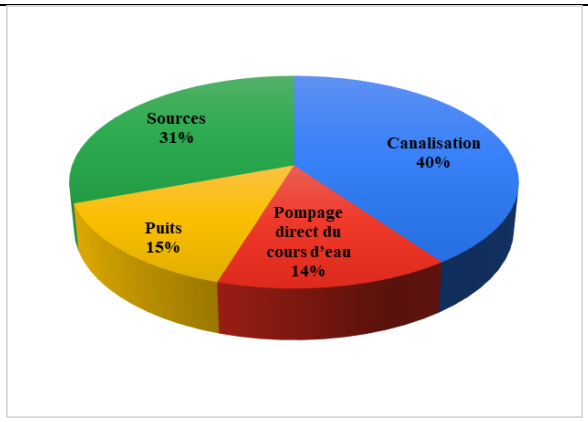
Malgré les impacts des changements climatiques, certaines zones du HaB-OER sont relativement riches en ressources en eau, ce qui attire les investisseurs dans le secteur agricole. Parmi ces investisseurs, on compte des immigrants de la région qui avaient initialement quitté sous force en raison des problèmes liés à l'abondance d'eau, mais qui sont revenus avec des fonds pour investir dans l'agriculture (Enq. 9.15). Ils exploitent davantage les ressources en eau, notamment les ressources souterraines, en creusant des puits profonds, et ils utilisent de nouvelles techniques telles que les bassines, les panneaux solaires et les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte (Enq. 9.16).



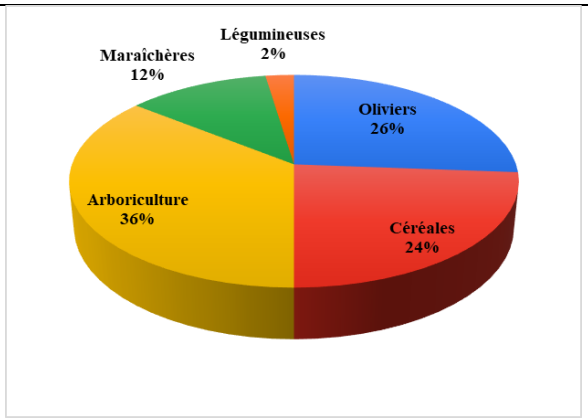
Enquête 9.10 Système foncier et superficie des exploitations irriguées



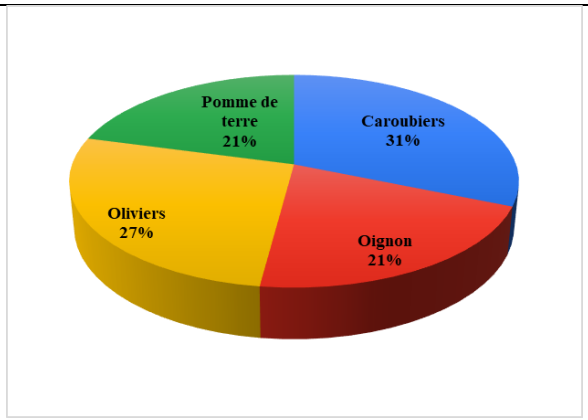
Enquête 9.11 Utilisations des puits



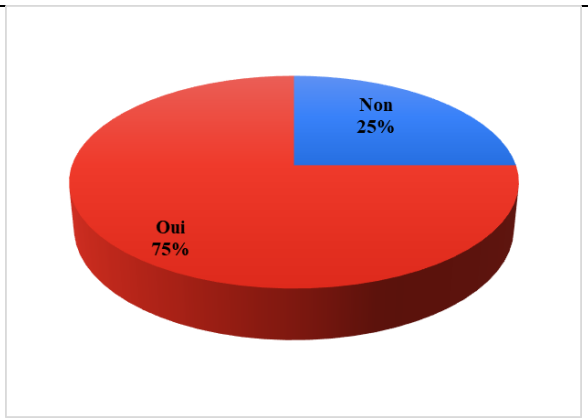
Enquête 9.12 Sources d'eau d'irrigation



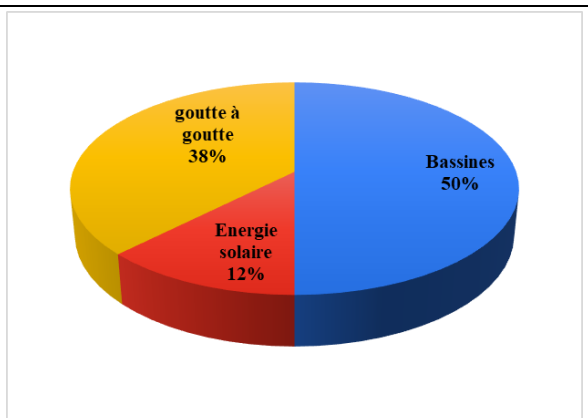
Enquête 9.13 Cultures agricoles de la région



Enquête 9.14 Cultures récemment répandues



Enquête 9.15 Confirmation de l'investissement des immigrants dans l'agriculture



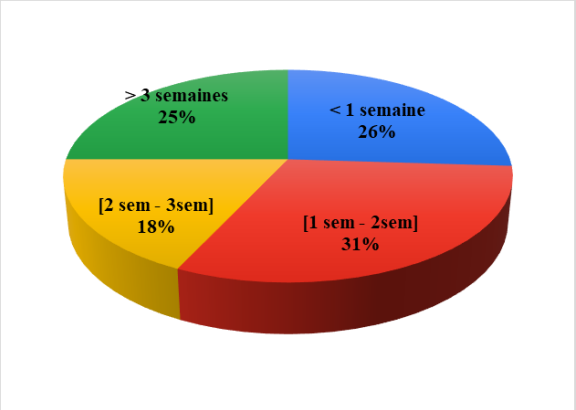
Enquête 9.16 Techniques modernes utilisées

Thème 4 : Pratiques de gestion des ressources en eau

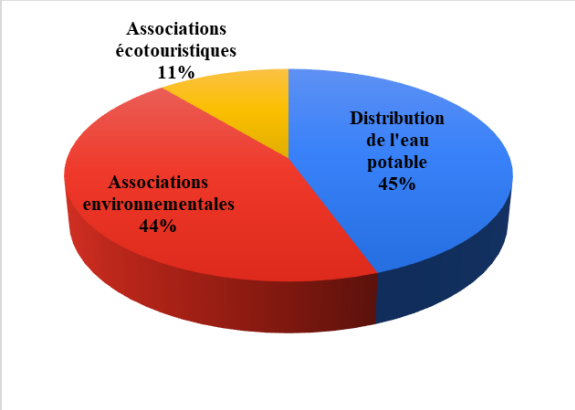
Parmi les systèmes de gestion les plus courants dans le Moyen Atlas, on trouve le cycle d'irrigation. La durée de ce cycle varie d'une zone à l'autre, mais en général, la durée de 2 semaines est légèrement prédominante, avec 30 % des réponses (Enq. 9.17). Les limites fixées par les enquêtés vont d'une semaine minimum à Ouaoumana à 25 jours maximum à l'Oum Er Rbia. Les cycles plus longs dans certaines régions, associés à une forte demande pour des cultures gourmandes en eau, en particulier pendant l'été, peuvent entraîner des conflits entre les ayants-droits, l'utilisation des puits et l'exploitation des ressources en eau souterraine, parfois de manière illégale.

Actuellement, les associations ont eu l'opportunité de gérer et valoriser les ressources en eau. Parmi les associations les plus actives dans le domaine de l'eau, que nous avons contactées, on trouve des associations de distribution d'eau potable dans les communes qui ne sont pas encore desservies par le réseau d'eau potable de l'Office National de l'Eau Potable (Enq. 9.18). En outre, des associations environnementales ont été créées pour valoriser et protéger les ressources naturelles, dont l'eau fait partie, garantissant ainsi leur durabilité. De même, des associations écotouristiques jouent un rôle essentiel dans la préservation du patrimoine écologique de la région, en particulier hydraulique, contribuant ainsi à son développement durable.

L'implantation du système goutte-à-goutte a été une initiative majeure dans la région du HaB-OER. Cette technologie d'irrigation moderne a été promue par diverses parties prenantes. Cependant, la structure foncière dominée par de petites parcelles pose un obstacle pour de nombreux utilisateurs.



Enquête 9.17 Répartition des durées des tours d'eau



Enquête 9.18 Répartitions des associations contactées

Annexe 9.3 Les périmètres irrigués dans les communes du HaB-OER

Commune	Nbre de périmètre	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Aguelmame	4	380	3.7
Ait Ishaq	2	1000	9.8
El Borj	3	320	3.1
El Héri	5	250	2.4
EL Qbab	9	1995	19.5
Kerrouchen	5	570	5.6
M. O. Zayani	7	1530	15
Ouaoumana	2	1160	11.3
Oum Er Rbia	8	1450	14.2
S. Y. Ou Saâd	4	995	9.7
Tighassaline	8	585	5.7
Total	57	10235	

Listes des cartes, figures, tableaux et photos

Liste des cartes

Carte 1.1 Situation géographique du HaB-OER à l'échelle : (a) du Maroc, (b) du bassin versant de l'Oum Er Rbia, (c) des grandes unités géologiques et (d) régionale 20
Carte 1.2 Les grandes unités géologiques du Hab-OER (Beaudet, 1969; Michard, 1976; Martin, 1981) 24
Carte 1.3 Localisation des stations témoignant de l'enneigement au Moyen Atlas (source : MNT) 27
Carte 1.4 Bassin versant topographique du HaB-OER et bassin versant hydrologique des sources de l'OER (Bentayeb & Leclerc, 1977) 29
Carte 1.5 Carte de répartition des lacs au Moyen Atlas (Chillasse & Dakki, 2004) 30
Carte 1.6 La forêt du Moyen-Atlas (Martin et al., 1964 in (Lecompte, 1986)) 31
Carte 1.7 Les tribus d'Aït Oumalou, qui résident dans les massifs montagneux (Guennoun, 1929) 33
Carte 2.1 Délimitation du HaB-OER et de ses sous-bassins 41
Carte 2.2 Hypsométrie du HaB-OER 43
Carte 2.3 Répartition spatiale des classes des pentes dans le HaB-OER 45
Carte 2.4 Degré de perméabilité des roches dans le HaB-OER et ses sous-bassins 47
Carte 2.5 Classification du réseau hydrographique du HaB-OER selon la méthode de Strahler 49
Carte 2.6 Principales essences forestières dans le HaB-OER (DPEFLCD, 2014) 53
Carte 2.7 Taux d'accroissement annuel moyen de la population des communes du HaB-OER 55
Carte 3.1 Etages bioclimatiques du Maroc (Mokhtari et al., 2014) 58
Carte 3.2 Pluviométrie moyenne annuelle du Maroc (Mokhtari et al., 2014) 58
Carte 3.3 Localisation des stations de mesures 59
Carte 3.4 Résultat de la méthode du vecteur régional 61
Carte 3.5 Spatialisation de la pluviométrie selon la méthode de Thiessen (1975-76/2019-20) 66
Carte 3.6 Spatialisation de la pluviométrie d'après la méthode "Krigeage" (1975-76/2019-20) 67
Carte 3.7 Spatialisation des moyennes de précipitations satellitaires IMERG pour la période 2000-01 à 2019-20 76
Carte 3.8 Cartographie des moyennes de l'ETR Modis pour la période 2000 à 2020 79
Carte 3.9 Résultats de caractéristiques de la neige dans le HaB-OER pour l'épisode de janvier 2021 84
Carte 4.1 points de mesure choisis pour le jaugeage 109
Carte 4.2 Rendement hydrologique estival dans le bassin de l'Oum Er Rbia (2019) et le bassin de Srou (2017) .113
Carte 5.1 Localisation des principaux lacs à l'échelle du HaB-OER (ABHOER, 2019) 117
Carte 5.2 Bassin versant du LAZ 118
Carte 5.3 Bassin versant des LaT 118
Carte 5.4 Bassin versant du LAO 119
Carte 5.5 Bassin versant du LAB 119
Carte 5.6 Bathymétrie du LAZ (Adallal et al., 2019) 120
Carte 5.7 Superposition de l'étendue minimale du LAZ avec : (a) la composition IR (4,3,2) et (c) le MNDWI et la superposition de l'étendue maximale du LAZ avec : (b) la composition IR (4,3,2) et (d) le MNDWI 122
Carte 5.8 Localisation des quatre sources choisies pour le suivi hydrométrique 130
Carte 6.1 a) Hypsométrie ; b) Sous-bassins ; c) Sols et d) Occupation du sol dans le HaB-OER 142
Carte 8.1 Etendues minimale et maximale du lac sur la période 2001/2023 181
Carte 8.2 Évolution de l'occupation du sol dans le HaB-OER entre 1985 et 2020 187
Carte 8.3 Dynamique du couvert végétal au niveau du HaB-OER entre 1985 et 2020 188
Carte 8.4 Facteurs d'estimation de l'érosion au niveau du HaB-OER : a) facteur R, b) facteur K, c) facteur LS et c) facteur C -2020 193
Carte 8.5 Cartes des taux d'érosion dans le HaB-OER en (a) 1985 et (b) 2020 193
Carte 9.1 Localisation des demandes de creusements de puits à l'échelle du HaB-OER d'après l'ABHOER 206
Carte 9.2 Localisation des bassins de collecte d'eau dans le HaB-OER 210
Carte 9.3 Les périmètres irrigués dans le HaB-OER d'après le DPA-Khénifra 211
Carte 9.4 Superposition des puits, des bassins d'irrigation et des grands périmètres irrigués dans le HaB-OER . 212
Carte 9.5 Schéma synoptique adduction Khénifra d'après ONEP 213
Carte 9.6 Trajet du "Circuit bleu" 216
Carte 9.7 Superficie maximale et minimale du LAB entre 1984/85 et 2022/23 218
Carte 9.8 Localisation des puits, des bassins d'irrigation et des périmètres irrigués à l'échelle de : a) LAB, b) LAZ, c) LAO et d) LAT 219
Carte 9.9 Evolution du couvert végétal entre 1990 et 2022 dans le BV du LAB 220

Liste des figures

Figure 1.1 Eau verte et eau bleue (Falkenmark & Rockström, 2006) 18
Figure 1.2 Les différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002) 19
Figure 1.3 Log litho-stratigraphique synthétique (Amraoui, 2005) in (A. Tahiri, 2021)..... 25
Figure 1.4 : Potentiel et état d'utilisation des ressources en eau au Maroc (Jellali, 1997)..... 35
Figure 1.5 Organigramme général de travail..... 35
Figure 2.1 Courbe hypsométrique et histogramme des fréquences des classes d'altitude du HaB-OER..... 44
Figure 2.2 Réparation des classes des pentes dans le HaB-OER et ses sous-bassins..... 46
Figure 2.3 Répartition des formations (im) perméables à l'échelle du HaB-OER et ses sous-bassins 47
Figure 2.4 Coupe géologique des sources de l'Oum Er Rbia (Bentayeb & Leclerc, 1977) et contexte géologique (d'après la carte géologique 1/500000 de Rabat) 48
Figure 2.5 Le profil en long du cours d'eau principal de l'Oum Er Rbia..... 50
Figure 2.6 Répartition du couvert forestier dans le HaB-OER et ses sous-bassins(DPEFLCD, 2014)..... 53
Figure 2.7 Évolution de la population à l'échelle communale entre 1994/2004 et 2004/2014..... 54
Figure 3.1 Chronogramme des stations pluviométriques utilisées 59
Figure 3.2 Précipitations annuelles à la station de Tarhat entre 1970/71 et 2022/23..... 62
Figure 3.3 CUSUM de la série des précipitations observée à la station de Tarhat entre 1970-71 et 2022-23..... 63
Figure 3.4 Variabilité des précipitations mensuelles à la station de Tarhat (1970-70/2022-23)..... 65
Figure 3.5 Corrélation entre altitude et température 68
Figure 3.6 Variation des températures annuelles et tendances dans la station de Tarhat entre 1985-86 et 2022-23 69
Figure 3.7 Variation annuelle de l'ETP calculée selon la méthode "Oudin" pour la période 1985-86 à 2022-23... 71
Figure 3.8 Variation annuelle de l'ETR calculée selon la méthode "Turc" pour la période 1985-86 à 2022-23..... 72
Figure 3.9 Évolution de la pluie efficace à la station de Tarhat entre 1985-86 et 2022-23 72
Figure 3.10 Comparaison entre les précipitations mesurées et satellitaires corrigées à Tarhat entre 2000-01 et 2019-20 75
Figure 3.11 Comparaison entre l'ETR Turc et l'ETR satellitaires à Tarhat entre 2000-01 et 2019-20 78
Figure 3.12 Evolution des moyennes de CNM annuelle du HaB-OER entre 2000-01 et 2020-21 80
Figure 3.13 Evolution des nombres des jours enneigés dans le HaB-OER entre 2000-01 et 2020-21..... 80
Figure 3.14 Représentation 3D du site choisi pendant l'enneigement de février 2018 82
Figure 3.15 Evolution de la couverture neigeuse et des précipitations à Tamchachat entre 12/2019 et 02/2020.... 84
Figure 3.16 Evolution de la couverture neigeuse et des températures à Tamchachat entre 12/2019 et 02/2020..... 84
Figure 3.17 Variabilité des jours enneigés et des températures maximales sur la période 2000-01 à 2020-21..... 85
Figure 4.1 Chronogramme des stations hydrométriques utilisées..... 89
Figure 4.2 Modules annuels et interannuel à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19 89
Figure 4.3 CUSUM des débits observés à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19 90
Figure 4.4 Régime hydrologique à la station de Tarhat..... 92
Figure 4.5 Débits instantanés maxima annuels à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19 93
Figure 4.6 Décomposition d'un hydrogramme de crue, épisode du 17- 18/02/2010 à la station de Tarhat 94
Figure 4.7 Effectifs annuels de crues à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19 94
Figure 4.8 Classification des crues en fonction des CERC 95
Figure 4.9 Corrélation entre les volumes extraits et les données des apports du b'AEH 96
Figure 4.10 Répartition des précipitations dans les bassins du HaB-OER..... 97
Figure 4.11 Évolution des précipitations et des volumes des écoulements à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19 98
Figure 4.12 Contribution des volumes de crue à l'alimentation des écoulements dans le HaB-OER..... 99
Figure 4.13 Variabilité des QMNA à la station de Tarhat entre 1975-76 et 2018-19 100
Figure 4.14 Variabilité des VCN retenues pour la station de Tarhat 101
Figure 4.15 ALgorithme d'Extraction des Courbes Séquences (ALECS) (Lang & Gille, 2006)..... 103
Figure 4.16 Résultats de l'application de la méthode des corrélations pour la station de Tarhat 105
Figure 4.17 Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode "MSM" pour la station de Tarhat. 106
Figure 4.18 Les ressources régulatrices (a) annuelle et (b) mensuelle moyenne à la station de Tarhat 107
Figure 4.19 Courbes de tarage des sites équipés d'une échelle limnimétrique (2019-2020).....111
Figure 4.20 Profils hydrologiques en débits spécifiques au niveau de l'Oum Er Rbia en amont de Tarhat en 2019 112
Figure 5.1 Evolutions des moyennes mobiles des superficies des lacs du HaB-OER entre 1984 et 2023..... 123
Figure 5.2 CUSUM des précipitations de la station de Tarhat et évolution des superficies des lacs du HaB-OER entre 1984-85 et 2022-23 124
Figure 5.3 Variabilité des précipitations (a) et de l'ETP (b) à l'échelle du LAZ entre 1984-85 et 2022-23..... 125
Figure 5.4 Evolution du volume du LAZ entre 1984-85 et 2022-23..... 126

Figure 5.5 Variabilité de l'écart par rapport à la moyenne des précipitations (a) et de l'ETP (b) et du volume du LAZ de 1984/85 à 2022/23 126
Figure 5.6 Bilans hydriques mensuels moyens (P - ETP) au LAZ de 1985/86 à 2022/23 127
Figure 5.7 Bilans hydriques mensuels moyens (P - ETP) à Sidi Ali de 1975/76 à 2009/10 (Sayad et al., 2011) .. 128
Figure 5.8 Evolution des débits des quatre sources choisies pour le suivi hydrométrique (ABHOER, 2023) 131
Figure 5.9 Régime hydrologique des sources étudiées sur la période 1995-96 à 2022-23 132
Figure 5.10 Variabilité de l'écart par rapport à la moyenne des précipitations et des débits sources suivies 132
Figure 5.11 Courbe de tarage des sources étudiées pour la période 2019-20 133
Figure 6.1 Fonctionnement et équations mathématiques du modèle GR2M (Mouelhi et al., 2006b) 138
Figure 6.2 Fonctionnement et équations mathématiques du modèle GR4J (Perrin et al., 2003) 139
Figure 6.3 Extrait du code utilisé pour exécuter le modèle GR2M 144
Figure 6.4 Organigramme général de la modélisation basée sur SWAT 145
Figure 6.5 Hydrogramme des débits simulés et observés par le modèle GR2M pour la station de Tarhat sur la période 1982-2019 147
Figure 6.6 Hydrogrammes des débits simulés et observés par le modèle GR4J pour la station de Tarhat sur la période 1982-2019 148
Figure 6.7 Hydrogrammes des débits mensuels observés et simulés à la station de Tarhat entre 1982 et 2019 ... 150
Figure 6.8 Bilan hydrique du HaB-OER pour la période 1982-2019 150
Figure 6.9 Critères de performance et leurs seuils de satisfaction des trois modèles pour les stations du HaB-OER 151
Figure 6.10 Comparaison des débits moyens annuels observés et simulés pour la station de Tarhat 152
Figure 6.11 Comparaison des débits moyens mensuels observés et simulés pour la station de Tarhat 152
Figure 7.1 Organigramme général de l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau 156
Figure 7.2 Schéma montre le principe des MCG (Wuebbles et al., 2021) 157
Figure 7.3 Modélisation de l'impact du changement climatique sur le débit des cours d'eau (Chiew et al., 2022) 158
Figure 7.4 Exemples de domaine CORDEX (cordex.org, 2023) 159
Figure 7.5 Diagrammes de Taylor des précipitations corrigées par rapport aux précipitations observées à la stations de Tarhat entre 1989-2008 pour chaque simulation MCR 161
Figure 7.6 Diagrammes de Taylor des températures corrigées par rapport aux températures observées à la stations de Tarhat entre 1989-2008 pour chaque simulation MCR 161
Figure 7.7 Précipitations moyennes annuelles futures pour la station Tarhat selon les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 164
Figure 7.8 Différence entre les moyennes des précipitations futures et la moyenne des précipitations de référence 164
Figure 7.9 Différence entre les moyennes des précipitations saisonnières futures et les moyennes des précipitations saisonnières de référence 165
Figure 7.10 Températures moyennes annuelles futures pour la station Tarhat selon les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 166
Figure 7.11 Différence entre les températures moyennes futures et les températures moyennes de référence 166
Figure 7.12 Différence entre les moyennes des températures moyennes saisonnières futures et les moyennes des températures moyennes de référence 167
Figure 7.13 Changement spatial relatif des précipitations moyennes dans les périodes P_1, P_2 et P_3 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 par rapport à la période de référence 168
Figure 7.14 Changement spatial relatif des températures moyennes dans les périodes P_1, P_2 et P_3 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 par rapport à la période de référence 169
Figure 7.15 Fréquence des classes de sécheresses de référence et futures au niveau du HaB-OER 170
Figure 7.16 SPEI-12 et SPEI-3 pour la station de Tarhat selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 171
Figure 7.17 Différence entre les moyennes des débits futurs et les moyennes des débits de référence 172
Figure 7.18 Différence entre les moyennes des débits saisonniers futures et les moyennes des débits saisonniers de référence 173
Figure 7.19 Régimes mensuels d'écoulement futurs et d'écoulement de référence pour la station de Tarhat 174
Figure 8.1 Evolution des volumes annuels du b'AEH entre 2001/02 et 2022-23 178
Figure 8.2 Contribution de l'Oum Er Rbia, de Srou et d'Ouaoumana dans l'alimentation du b'AEH 179
Figure 8.3 Contribution des débits de base et de crues des trois cours d'eau dans l'alimentation du b'AEH 179
Figure 8.4 Organigramme méthodologique pour le calcul des volumes de la retenue du b'AEH 180
Figure 8.5 Volume annuel moyen de la retenue du b'AEH entre 2001-02 et 2022-23 181
Figure 8.6 Evolution des pertes d'eau par évaporation entre 2002-03 et 2018-19 183
Figure 8.7 Evolution des volumes d'eau restitués (Mm^3) entre 2005-06 et 2018-19 184
Figure 8.8 Evolution du bilan hydrique de la retenue du b'AEH entre 2002-03 et 2022-23 185

Figure 8.9 Évolution de l'occupation du sol au niveau du HaB-OER entre 1985, 2000 et 2020 187
Figure 8.10 Déforestation annuelle en hectares au niveau des bassins du HaB-OER entre 2000 et 2020 189
Figure 8.11 Comparaison des classes de pertes de sol entre 1985 et 2020 194
Figure 8.12 Evolution du volume de la retenue du b'AEH entre 1998 et 2014 196
Figure 9.1 Statut juridique des terres dans la zone d'action de la DPA de Khénifra (DPA-Khénifra) 203
Figure 9.2 Structure foncière dans la zone d'action de la DPA de Khénifra (DPA-Khénifra) 203
Figure 9.3 Évolution des superficies de quelques arboricultures dans la zone d'action de la DPA de Khénifra (DPA-Khénifra) 204
Figure 9.4 Origine des eaux d'irrigations des périmètres irrigués (DPA-Khénifra) 205
Figure 9.5 Evolution de nombre de demande de creusement de puits entre 2011 et 2020 (ABHOER) 205
Figure 9.6 Evolution de profondeur moyenne de creusement de puits entre 2011 et 2020 (ABHOER) 205
Figure 9.7 Type d'usages de puits dans le HaB-OER (ABHOER) 207
Figure 9.8 Type de cultures irriguées par les puits (ABHOER) 207
Figure 9.9 Réparation des canaux en béton et en terre (DPA-Khénifra) 208
Figure 9.10 Contribution pérenne et saisonnière dans le débit transféré par le réseau de canaux (DPA-Khénifra) 208
Figure 9.11 Répartition des bassins d'irrigation en fonction de leurs dimensions 210
Figure 9.12 Evolution de la production de l'eau potable au niveau de la province de Khénifra d'après l'ONEP 214
Figure 9.13 Volumes d'eau transférés pour l'OCP d'après barrage Aït Messaoud 214
Figure 9.14 Evolution de l'indice NDVI pour trois points entre 2015 et 2022 221
Figure 10.1 Les trois "E" de la GIRE (Molle, 2012) 227
Figure 10.2 Aperçu historique de l'évolution de la politique de l'eau au Maroc 229

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Caractéristiques géométriques des bassins étudiés 42
Tableau 2.2 Altitudes et pentes caractéristiques du HaB-OER et ses sous-bassins 44
Tableau 2.3 Caractéristiques hydro-morphométriques du réseau hydrographique du HaB-OER 51
Tableau 3.1 Coefficients de corrélation obtenus par la méthode de vecteur régional 60
Tableau 3.2 Résultat du découpage des données des précipitations annuelles à la station de Tarhat 63
Tableau 3.3 Résultats du choix de la distribution statistique la plus adéquate 64
Tableau 3.4 Périodes de retour des précipitations annuelles à la station de Tarhat selon la loi Lognormale 64
Tableau 3.5 Précipitations annuelle calculées d'après les deux méthodes d'interpolation 67
Tableau 3.6 Caractéristiques statistiques des températures mesurées à la station de Tarhat entre 1985-86 et 2022-23 69
Tableau 3.7 Caractéristiques statistiques des ETR calculées selon la méthode "Turc" pour la période 1985-86 à 2022-23 71
Tableau 3.8 Critères statistiques utilisés pour évaluer la performance des données IMERG 74
Tableau 3.9 Résultats de la performance des données de précipitations IMERG aux différentes stations avant et après la correction du biais 74
Tableau 3.10 Comparaison entre les précipitations annuelle calculées par la méthode de krigeage et celle satellitaire entre 2000-01 et 2019-20 75
Tableau 3.11 Résultats de la performance des données de températures NASA/POWER aux différentes stations 77
Tableau 3.12 Résultats de la performance des données d'ET Modis aux différentes stations 77
Tableau 3.13 Récapitulatif des caractéristiques climatiques pour les sous-bassins du HaB-OER 78
Tableau 3.14 Principales caractéristiques des deux chutes de neige enregistrée sur le HaB-OER entre 2019-20 .. 83
Tableau 4.1 Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées 88
Tableau 4.2 Caractéristiques statistiques des débits des stations dans le HaB-OER pour la période de 1975-76 à 2018-19 90
Tableau 4.3 Caractéristiques statistiques des résultats du découpage de la série étudiée par la méthode CUSUM 91
Tableau 4.4 Périodes de retour des modules aux stations du HaB-OER selon la loi "Lognormale" 91
Tableau 4.5 Périodes de retour des débits instantanés maxima annuels aux stations du HaB-OER 93
Tableau 4.6 caractéristiques temporelles des crues enregistrées dans le HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19 95
Tableau 4.7 Caractéristiques statistiques des volumes de crue aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19 96
Tableau 4.8 . Coefficients de détermination R^2 entre la lame d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées aux stations du HaB-OER entre 1975-76 et 2018-19 97
Tableau 4.9 Volumes moyens annuels des écoulements au niveau des stations de mesures 98
Tableau 4.10 Quelques débits d'étiage caractéristiques (Hingray *et al*., 2009) 100
Tableau 4.11 Périodes de retour des QMNA (m^3) aux stations du HaB-OER 101
Tableau 4.12 Périodes de retour des VCN3, 10 et 30 aux stations du HaB-OER 102
Tableau 4.13 Caractéristiques des phases de tarissement retenues 105
Tableau 4.14 Résultats des coefficients de tarissement saisonniers moyens d'après la méthode "MSM" pour les stations du HaB-OER 106
Tableau 4.15 Volume (hm^3) de la réserve régulatrice dans le HaB-OER 107
Tableau 5.1 Caractéristiques statistiques de l'évolution des superficies moyennes annuelles des lacs du HaB-OER entre 1984-85 et 2022-23 123
Tableau 5.2 Résultat du découpage des données des précipitations et de l'ETP annuelles au niveau du LAZ 125
Tableau 5.3 Résultat du découpage des volumes moyens annuelles du LAZ 126
Tableau 5.4 Les sources mesurées et suivies par l'ABHOER 129
Tableau 5.5 Caractéristiques statistiques des débits des quatre sources étudiées de 1994-95 à 2022-23 131
Tableau 6.1 valeurs des deux paramètres du modèle GR2M 138
Tableau 6.2 Valeurs des deux paramètres du modèle GR4J 139
Tableau 6.3 Caractéristiques statistiques des sous périodes de calibration / validation choisies 144
Tableau 6.4 Critères statistiques utilisés pour évaluer la performance hydrologique du modèle SWAT (Moriasi *et al*., 2012) 146
Tableau 6.5 Les performances des indices statistiques utilisés (Moriasi *et al*., 2007) 146
Tableau 6.6 Résultats de la performance du modèle GR2M aux différentes stations 147
Tableau 6.7 Résultats de la performance du modèle GR4J aux différentes stations à l'échelle journalière 148
Tableau 6.8 Les paramètres de calibration les plus sensibles 149
Tableau 6.9 Résultats de la performance du modèle SWAT aux stations du HaB-OER 149
Tableau 7.1 Les quatre scénarios socio-économiques (Moss *et al*., 2010) 158
Tableau 7.2 Liste des RCM choisis (cordex.org, 2023) 160

Tableau 7.3 Critères de performance de la simulation des débits annuels à travers les données MCR 162
Tableau 7.4 Critères de performance de la simulation des débits mensuels à travers les données MCR 163
Tableau 7.5 Augmentation moyenne des températures en fonction des période et scénario 165
Tableau 7.6 Classification de la sévérité de la sécheresse SPI (McKee *et al*., 1993) 170
Tableau 7.7 Tendance et ampleur des sècheresses futures 171
Tableau 7.8 Diminution des débits des trois cours d'eau qui alimentent le barrage d'Ahmed El Hansali 173
Tableau 8.1 Eléments du bilan hydrique de la retenue 184
Tableau 8.2 Principales caractéristiques des scènes sélectionnées 186
Tableau 8.3 Evolution du couvert forestier au niveau des bassins du HaB-OER entre 1985 et 2020 188
Tableau 8.4 Valeurs du facteur C par type d'occupation du sol 192
Tableau 8.5 Comparaison des taux d'érosion et des pertes des sols annuels au niveau du HaB-OER 194
Tableau 8.6 Estimation des cours d'eau à l'envasement du b'AEH 195
Tableau 9.1 Données sur l'utilisation des ressources en eau 199
Tableau 10.1 Objectifs d'apprentissage correspondant à l'ODD 6 (UNESCO, 2017) 232

Liste des photos

Photo 4-1 Echelles limnimétriques installée dans l'amont de l'Oued Amengous (El Orfi, 2019) 110
Photo 4-2 Lecture de l'échelle limnimétriques installée sur l'Oued Amngous (El Orfi, 2019) 110
Photo 4-3 Micro-moulinet de type OTT (El Orfi, 2019).....110
Photo 4-4 Mesure du débit de l'amont de l'Oued Fellat (El Orfi, 2019).....110
Photo 5-1 Lac d'Aguelmam Azigza (Ismoun N'aari, 2018) 118
Photo 5-2 Lacs Tiglmamine (El Orfi, 2022) 118
Photo 5-3 Lac d'Aguelmam Ouiouane (El Orfi, 2021).....119
Photo 5-4 Lac d'Aguelmam Abakhan (El Orfi, 2022) 119
Photo 5-5 Echelle limnimétrique dans les sources de l'Oum Er Rbia "Lac" (El Orfi, 2020)..... 129
Photo 5-6 Mesure du débit de la source d'Assoul par un seau (Ghadbane, 2018) 129
Photo 5-7 Mesure de débit de la source de Tiguelmamine par le micro-moulinet (El Khidar, 2020) 129
Photo 5-8 Mesure de débit de la source de Bou Ighzil par le micro-moulinet (El Orfi, 2020) 129
Photo 8-1 Barrage Ahmed El Hansali (ABHOER, 2014) 178
Photo 8-2 Etendue du lac du b'AEH en 2012 (El Orfi, 2012)..... 182
Photo 8-3 Etendue du lac du b'AEH en 2022 (El Orfi, 2022)..... 182
Photo 8-4 Bac d'évaporation à la station du b'AEH (El Orfi, 2020) 182
Photo 9-1 Lac Aguelmam Ihabchan (El Orfi, 2022) 215
Photo 9-2 Lac Tiglmant n'Issa (El Orfi, 2022) 215
Photo 9-3 Lac Aguelmame N'Miaami (El Orfi, 2022)..... 215
Photo 9-4 Lac Harcha (El Orfi, 2022)..... 215
Photo 9-5 Cascade des sources de l'Oum Er Rbia, (El Orfi, 08/2012) 217
Photo 9-6 Cascade des sources de l'Oum Er Rbia, (El Orfi, 08/2023) 217
Photo 9-7 Cascade de Takhyart (Ismoun N'aari, 03/2018) 217
Photo 9-8 Cascade de Takhyart (El Orfi, 02/2022) 217
Photo 9-9 Pourtour du lac pendant l'hiver avec des terrains nus (El Orfi, 12/2021)..... 219
Photo 9-10 Même zone pendant l'été des cultures de pommes de terre (El Orfi, 08/2022)..... 219
Photo 10-1 Octroi du label Pavillon Vert à l'une des Éco-Écoles (fm6e.org)..... 235
Photo 10-2 Atelier utilisation des RE en agriculture JH Demnat (El Orfi 2022) 238
Photo 10-3 Atelier fonctionnement hydrologique de l'O. Toudgha JH Goulmima (El Orfi 2022) 238
Photo 10-4 Atelier recensement des oiseaux hivernale JH Imilchil (El Orfi 2023) 238
Photo 10-5 Atelier évaluation des géomorphosites JH Khénifra (El Orfi 2023)..... 238
Photo 10-6 Célébration de la journée mondiale de l'eau 2022 à Khénifra (El Orfi, 2022)..... 239
Photo 10-7 Célébration de la journée mondiale de l'eau 2023 à Béni Mellal (El Orfi, 2023) 239

Liste des planches photos

Planche photos 9-1 : Enquête avec des acteurs institutionnels, des associations et des agriculteurs (El Orfi 2021-22) 200
Planche photos 9-2 Canaux traditionnels en terre (à gauche) et canaux modernes en béton (à droite)..... 208
Planche photos 9-3 Système d'irrigation goutte-à-goutte avec le bassin à gauche et les tuyaux à droite (El Orfi, 2022) 209
Planche photos 10-1 Exemples des activités scolaire en pleine air (theecologyschool.org) 234
Planche photos 10-2 Exemples de photos lauréates dans la catégorie "Photographie" du concours JRE (jeunesreporters.org.ma)..... 236
Planche photos 10-3 Campagnes de sensibilisation dans les établissements scolaire (El Orfi, 2023) 237